

SERWAY | VUILLE



Fundamentos de Física

NOVENA EDICIÓN

SERWAY/VUILLE



Fundamentos de Física

Raymond A. Serway | *Emeritus, James Madison University*

Chris Vuille | *Embry-Riddle Aeronautical University*

Traducción

Dra. Ana Elizabeth García Hernández
Universidad La Salle, Morelia.

Revisión técnica

Dr. Ernesto Filio López
*Unidad Profesional en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas
Instituto Politécnico Nacional.*



Fundamentos de Física

Novena edición
Raymond A. Serway y Chris Vuille

**Presidente de Cengage Learning
Latinoamérica:**

Fernando Valenzuela Migoya

**Director Editorial, de Producción
y de Plataformas Digitales para
Latinoamérica:**

Ricardo H. Rodríguez

**Gerente de Procesos para
Latinoamérica:**

Claudia Islas Licona

**Gerente de Manufactura para
Latinoamérica:**

Raúl D. Zendejas Espejel

**Gerente Editorial de Contenidos
en Español:**

Pilar Hernández Santamarina

Coordinador de Manufactura:

Rafael Pérez González

Editores:

Sergio R. Cervantes González
Abril Vega Orozco

Diseño de portada:

Anneli Daniela Torres Arroyo

Imagen de portada:

Andrey Tranchuck
Shutterstock

Composición tipográfica:

Foto Grafic & Diseño
Humberto Núñez Ramos

© D.R. 2012 por Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.,
una Compañía de Cengage Learning, Inc.
Corporativo Santa Fe
Av. Santa Fe, núm. 505, piso 12
Col. Cruz Manca, Santa Fe
C.P. 05349, México, D.F.
Cengage Learning® es una marca registrada
usada bajo permiso.

DERECHOS RESERVADOS. Ninguna parte de
este trabajo, amparado por la Ley Federal del
Derecho de Autor, podrá ser reproducida,
transmitida, almacenado o utilizada en
cualquier forma o por cualquier medio, ya sea
gráfico, electrónico o mecánico, incluyendo,
pero sin limitarse a lo siguiente: fotocopiado,
reproducción, escaneo, digitalización,
grabación en audio, distribución en internet,
distribución en redes de información o
almacenamiento y recopilación en sistemas
de información, a excepción de lo permitido
en el Capítulo III, Artículo 27 de la Ley Federal
del Derecho de Autor, sin el consentimiento
por escrito de la Editorial.

Traducido del libro:

College Physics, Ninth Edition.
Raymond A. Serway and Chris Vuille
Publicado en inglés por Brooks & Cole, una compañía
de Cengage Learning ©2012
ISBN: 978-0-8400-6206-2

Datos para catalogación bibliográfica:

Serway, Raymond A. y Chris Vuille.
Fundamentos de Física, novena edición.
ISBN: 978-607-481-876-5

Visite nuestro sitio web en:
<http://latinoamerica.cengage.com>

Dedicamos este libro a nuestras esposas, hijos, nietos, parientes y amigos que nos han brindado tanto amor, apoyo y comprensión a través de los años, así como a los estudiantes para los cuales fue escrito.

■ Contenido general

PARTE 1 | Mecánica

Capítulo 1 Introducción	1	Capítulo 6 Cantidad de movimiento y colisiones	167
Capítulo 2 Movimiento en una dimensión	25	Capítulo 7 Movimiento rotatorio y la ley de gravedad	198
Capítulo 3 Vectores y movimiento en dos dimensiones	56	Capítulo 8 Equilibrio y dinámica rotatorios	235
Capítulo 4 Leyes de movimiento	86	Capítulo 9 Sólidos y fluidos	277
Capítulo 5 Energía	124		

PARTE 2 | Termodinámica

Capítulo 10 Física térmica	331	Capítulo 12 Leyes de la termodinámica	395
Capítulo 11 Energía en procesos térmicos	362		

PARTE 3 | Vibraciones y ondas

Capítulo 13 Vibraciones y ondas	437	Capítulo 14 Sonido	473
---------------------------------	-----	--------------------	-----

PARTE 4 | Electricidad y magnetismo

Capítulo 15 Fuerzas eléctricas y campos eléctricos	513	Capítulo 19 Magnetismo	648
Capítulo 16 Energía eléctrica y capacitancia	548	Capítulo 20 Voltajes inducidos e inductancia	688
Capítulo 17 Corriente y resistencia	590	Capítulo 21 Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas	723
Capítulo 18 Circuitos de corriente directa	616		

PARTE 5 | Luz y óptica

Capítulo 22 Reflexión y refracción de la luz	761	Capítulo 24 Óptica ondulatoria	824
Capítulo 23 Espejos y lentes	790	Capítulo 25 Instrumentos ópticos	859

PARTE 6 | Física moderna

Capítulo 26 Relatividad	885	Capítulo 29 Física nuclear	957
Capítulo 27 Física cuántica	911	Capítulo 30 Energía nuclear y partículas elementales	982
Capítulo 28 Física atómica	934		

APÉNDICE A Repaso de Matemáticas A.1

APÉNDICE B Tabla de isótopos abreviada A.14

APÉNDICE C Algunas tablas útiles A.19

APÉNDICE D Unidades SI A.21

APÉNDICE E Guía de estudio para adquirir habilidades MCAT A.22

Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas A.52

Índice I.1

ACERCA DE LOS AUTORES viii
PREFACIO ix
ATRATIVAS APLICACIONES xxiv
AL ESTUDIANTE xxvi
GUÍA DE PREPARACIÓN PARA EL EXAMEN MCAT xxx

PARTE 1 | Mecánica

CAPÍTULO 1 Introducción 1

- 1.1 Estándares de longitud, masa y tiempo 1
 - 1.2 Elementos constitutivos de la materia 4
 - 1.3 Análisis dimensional 5
 - 1.4 Incertidumbre en la medición y cifras significativas 7
 - 1.5 Conversión de unidades 10
 - 1.6 Cálculos aproximados y de orden de magnitud 12
 - 1.7 Sistemas de coordenadas 14
 - 1.8 Trigonometría 15
 - 1.9 Estrategia de solución de problemas 17
- Resumen 18

CAPÍTULO 2 Movimiento en una dimensión 25

- 2.1 Desplazamiento 26
 - 2.2 Velocidad 27
 - 2.3 Aceleración 33
 - 2.4 Diagramas de movimiento 35
 - 2.5 Movimiento en una dimensión con aceleración constante 36
 - 2.6 Objetos en caída libre 43
- Resumen 47

CAPÍTULO 3 Vectores y movimiento en dos dimensiones 56

- 3.1 Vectores y sus propiedades 56
 - 3.2 Componentes de un vector 58
 - 3.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración en dos dimensiones 62
 - 3.4 Movimiento en dos dimensiones 63
 - 3.5 Velocidad relativa 71
- Resumen 75

CAPÍTULO 4 Leyes de movimiento 86

- 4.1 Fuerzas 87
 - 4.2 Primera ley de Newton 88
 - 4.3 Segunda ley de Newton 89
 - 4.4 Tercera ley de Newton 95
 - 4.5 Aplicaciones de las leyes de Newton 98
 - 4.6 Fuerzas de fricción 105
- Resumen 112

CAPÍTULO 5 Energía 124

- 5.1 Trabajo 124
 - 5.2 Energía cinética y el teorema trabajo-energía 129
 - 5.3 Energía potencial gravitacional 132
 - 5.4 Energía potencial elástico 140
 - 5.5 Sistemas y conservación de la energía 145
 - 5.6 Potencia 147
 - 5.7 Trabajo realizado por una fuerza variable 152
- Resumen 154

CAPÍTULO 6 Cantidad de movimiento y colisiones 167

- 6.1 Cantidad de movimiento e impulso 167
- 6.2 Conservación de la cantidad de movimiento 172

- 6.3 Colisiones 175
 - 6.4 Colisiones tangenciales 182
 - 6.5 Propulsión de cohete 184
- Resumen 187

CAPÍTULO 7 Movimiento rotatorio y la ley de gravedad 198

- 7.1 Velocidad angular y aceleración angular 198
 - 7.2 Movimiento rotatorio con aceleración angular constante 202
 - 7.3 Relaciones entre cantidades angulares y lineales 203
 - 7.4 Aceleración centrípeta 207
 - 7.5 Gravitación newtoniana 214
 - 7.6 Leyes de Kepler 221
- Resumen 224

CAPÍTULO 8 Equilibrio y dinámica rotatorios 235

- 8.1 Torque 235
 - 8.2 Torque y las dos condiciones de equilibrio 240
 - 8.3 Centro de gravedad 241
 - 8.4 Ejemplos de objetos en equilibrio 244
 - 8.5 Relación entre el torque y la aceleración angular 247
 - 8.6 Energía cinética rotatoria 254
 - 8.7 Momento angular 257
- Resumen 261

CAPÍTULO 9 Sólidos y fluidos 277

- 9.1 Estados de la materia 277
 - 9.2 Densidad y presión 279
 - 9.3 Deformación de sólidos 282
 - 9.4 Variación de la presión con la profundidad 288
 - 9.5 Mediciones de la presión 292
 - 9.6 Fuerzas de empuje y principio de Arquímedes 293
 - 9.7 Fluidos en movimiento 299
 - 9.8 Otras aplicaciones de la dinámica de fluidos 305
 - 9.9 Tensión superficial, acción capilar y flujo de fluidos viscosos 308
 - 9.10 Fenómenos de transporte 315
- Resumen 319

PARTE 2 | Termodinámica

CAPÍTULO 10 Física térmica 331

- 10.1 Temperatura y la ley cero de la termodinámica 332
 - 10.2 Termómetros y escalas de temperatura 333
 - 10.3 Expansión térmica de sólidos y líquidos 337
 - 10.4 Descripción macroscópica de un gas ideal 343
 - 10.5 Teoría cinética de los gases 348
- Resumen 354

CAPÍTULO 11 Energía en procesos térmicos 362

- 11.1 Calor y energía interna 362
 - 11.2 Calor específico 365
 - 11.3 Calorimetría 367
 - 11.4 Calor latente y cambio de fase 369
 - 11.5 Transferencia de energía 375
 - 11.6 Calentamiento global y gases de efecto invernadero 385
- Resumen 386

CAPÍTULO 12 Leyes de la termodinámica 395

- 12.1 Trabajo en procesos termodinámicos 395
- 12.2 Primera ley de la termodinámica 398
- 12.3 Procesos térmicos 401
- 12.4 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica 410
- 12.5 Entropía 418
- 12.6 Metabolismo humano 424
- Resumen 427

PARTE 3 | Vibraciones y ondas**CAPÍTULO 13 Vibraciones y ondas 437**

- 13.1 Ley de Hooke 437
- 13.2 Energía potencial elástica 441
- 13.3 Comparación del movimiento armónico simple con el movimiento circular uniforme 445
- 13.4 Posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo 449
- 13.5 Movimiento de un péndulo 451
- 13.6 Oscilaciones amortiguadas 454
- 13.7 Ondas 455
- 13.8 Frecuencia, amplitud y longitud de onda 458
- 13.9 Velocidad de ondas sobre cuerdas 459
- 13.10 Interferencia de ondas 461
- 13.11 Reflexión de ondas 462
- Resumen 463

CAPÍTULO 14 Sonido 473

- 14.1 Producción de ondas de sonido 473
- 14.2 Características de las ondas de sonido 474
- 14.3 La velocidad del sonido 476
- 14.4 Energía e intensidad de las ondas de sonido 478
- 14.5 Ondas esféricas y planas 481
- 14.6 El efecto Doppler 482
- 14.7 Interferencia de las ondas de sonido 488
- 14.8 Ondas estacionarias 489
- 14.9 Vibraciones forzadas y resonancia 494
- 14.10 Ondas estacionarias en columnas de aire 495
- 14.11 Pulsaciones 499
- 14.12 Calidad del sonido 500
- 14.13 El oído 502
- Resumen 503

PARTE 4 | Electricidad y magnetismo**CAPÍTULO 15 Fuerzas eléctricas y campos eléctricos 513**

- 15.1 Propiedades de las cargas eléctricas 514
- 15.2 Aislantes y conductores 515
- 15.3 Ley de Coulomb 517
- 15.4 El campo eléctrico 522
- 15.5 Líneas de campo eléctrico 526
- 15.6 Conductores en equilibrio electrostático 529
- 15.7 El experimento de la gota de aceite de Millikan 531
- 15.8 El generador Van de Graaff 532
- 15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss 533
- Resumen 539

CAPÍTULO 16 Energía eléctrica y capacitancia 548

- 16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico 548
- 16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales 555
- 16.3 Potenciales y conductores cargados 558
- 16.4 Superficies equipotenciales 559

- 16.5 Aplicaciones 560
- 16.6 Capacitancia 562
- 16.7 El capacitor de placas paralelas 563
- 16.8 Combinaciones de capacitores 565
- 16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado 571
- 16.10 Capacitores con dieléctricos 573
- Resumen 579

CAPÍTULO 17 Corriente y resistencia 590

- 17.1 Corriente eléctrica 590
- 17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva 593
- 17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos 595
- 17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm 596
- 17.5 Variación de la resistencia con la temperatura 599
- 17.6 Energía eléctrica y potencia 601
- 17.7 Superconductores 604
- 17.8 Actividad eléctrica en el corazón 605
- Resumen 608

CAPÍTULO 18 Circuitos de corriente directa 616

- 18.1 Fuentes de fem 616
- 18.2 Resistores en serie 617
- 18.3 Resistores en paralelo 620
- 18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos 625
- 18.5 Circuitos RC 629
- 18.6 Circuitos domésticos 633
- 18.7 Seguridad eléctrica 634
- 18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas 635
- Resumen 638

CAPÍTULO 19 Magnetismo 648

- 19.1 Imanes 648
- 19.2 Campo magnético de la Tierra 650
- 19.3 Campos magnéticos 652
- 19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente 655
- 19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos 658
- 19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético 661
- 19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère 664
- 19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos 667
- 19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides 669
- 19.10 Dominios magnéticos 673
- Resumen 675

CAPÍTULO 20 Voltajes inducidos e inductancia 688

- 20.1 Fem inducida y flujo magnético 688
- 20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz 691
- 20.3 Fem de movimiento 697
- 20.4 Generadores 701
- 20.5 Autoinductancia 705
- 20.6 Circuitos RL 707
- 20.7 Energía almacenada en un campo magnético 711
- Resumen 712

CAPÍTULO 21 Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas 723

- 21.1 Resistores en un circuito CA 723
- 21.2 Capacitores en un circuito CA 727
- 21.3 Inductores en un circuito CA 728
- 21.4 El circuito RLC en serie 730
- 21.5 Potencia en un circuito CA 734
- 21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie 735
- 21.7 El transformador 737
- 21.8 Predicciones de Maxwell 739

- 21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell 740
- 21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena 741
- 21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas 742
- 21.12 El espectro de ondas electromagnéticas 746
- 21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas 750
- Resumen 750

PARTE 5 | Luz y óptica

CAPÍTULO 22 Reflexión y refracción de la luz 761

- 22.1 La naturaleza de la luz 761
- 22.2 Reflexión y refracción 762
- 22.3 La ley de refracción 767
- 22.4 Dispersión y prismas 771
- 22.5 El arco iris 774
- 22.6 Principio de Huygens 775
- 22.7 Reflexión interna total 777
- Resumen 780

CAPÍTULO 23 Espejos y lentes 790

- 23.1 Espejos planos 790
- 23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos 793
- 23.3 Espejos convexos y convenciones de signo 795
- 23.4 Imágenes formadas por refracción 801
- 23.5 Refracción atmosférica 803
- 23.6 Lentes delgadas 804
- 23.7 Aberraciones de lentes y espejos 814
- Resumen 815

CAPÍTULO 24 Óptica ondulatoria 824

- 24.1 Condiciones para interferencia 824
- 24.2 Experimento de doble rendija de Young 825
- 24.3 Cambio de fase debido a reflexión 829
- 24.4 Interferencia en películas delgadas 830
- 24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD 835
- 24.6 Difracción 836
- 24.7 Difracción de una sola rendija 837
- 24.8 La rejilla de difracción 839
- 24.9 Polarización de ondas de luz 842
- Resumen 849

CAPÍTULO 25 Instrumentos ópticos 859

- 25.1 La cámara 859
- 25.2 El ojo 860
- 25.3 El amplificador simple 865
- 25.4 El microscopio compuesto 866
- 25.5 El telescopio 868
- 25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares 871
- 25.7 El interferómetro Michelson 876
- Resumen 877

PARTE 6 | Física moderna

CAPÍTULO 26 Relatividad 885

- 26.1 Relatividad galileana 885
- 26.2 La velocidad de la luz 886
- 26.3 Principio de relatividad de Einstein 888
- 26.4 Consecuencias de la relatividad especial 889
- 26.5 Cantidad de movimiento relativista 897
- 26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial 898
- 26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía 899
- 26.8 Relatividad general 903
- Resumen 905

CAPÍTULO 27 Física cuántica 911

- 27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck 911
- 27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz 913
- 27.3 Rayos X 916
- 27.4 Difracción de rayos X mediante cristales 918
- 27.5 El efecto Compton 920
- 27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia 922
- 27.7 La función de onda 925
- 27.8 El principio de incertidumbre 926
- Resumen 928

CAPÍTULO 28 Física atómica 934

- 28.1 Primeros modelos del átomo 934
- 28.2 Espectros atómicos 935
- 28.3 El modelo de Bohr 937
- 28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno 942
- 28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica 945
- 28.6 Rayos X característicos 947
- 28.7 Transiciones atómicas y láseres 949
- Resumen 951

CAPÍTULO 29 Física nuclear 957

- 29.1 Algunas propiedades del núcleo 957
- 29.2 Energía de enlace 960
- 29.3 Radiactividad 962
- 29.4 Los procesos de decaimiento 965
- 29.5 Radiactividad natural 971
- 29.6 Reacciones nucleares 971
- 29.7 Aplicaciones médicas de la radiación 973
- Resumen 976

CAPÍTULO 30 Energía nuclear y partículas elementales 982

- 30.1 Fisión nuclear 982
- 30.2 Fusión nuclear 986
- 30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales 989
- 30.4 Positrones y otras antipartículas 990
- 30.5 Clasificación de partículas 990
- 30.6 Leyes de conservación 992
- 30.7 El método óctuple 995
- 30.8 Quarks y color 995
- 30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar 997
- 30.10 La conexión cósmica 999
- 30.11 Preguntas sin responder en cosmología 1000
- 30.12 Problemas y perspectivas 1003
- Resumen 1004

APÉNDICE A: Repaso matemático A.1

APÉNDICE B: Tabla abreviada de isótopos A.14

APÉNDICE C: Algunas tablas útiles A.19

APÉNDICE D: Unidades SI A.21

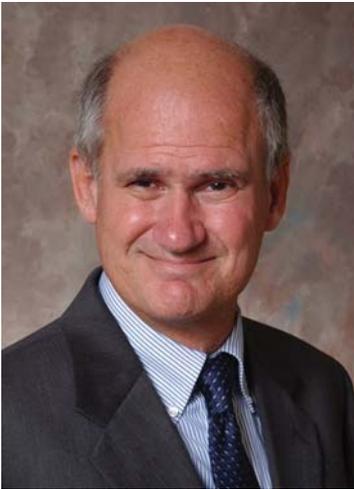
APÉNDICE E: Guía de estudio para adquirir habilidades MCAT A.22

Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas A.52

■ Acerca de los autores



Raymond A. Serway obtuvo su licenciatura en física en Utica College en 1959, su maestría en física en la Universidad de Colorado en 1961 y su doctorado en el Illinois Institute of Technology en 1967. Es profesor emérito en la Universidad James Madison. En 1990 recibió la Madison Scholar Award en dicha universidad, donde impartió clases durante 17 años. El Dr. Serway comenzó su carrera docente en la Universidad Clarkson, donde realizó investigación e impartió clases de 1967 a 1980. Recibió el Distinguished Teaching Award en la Universidad Clarkson en 1977 y el Alumni Achievement Award de la Utica College en 1985. Como científico invitado en el IBM Research Laboratory en Zúrich, Suiza, trabajó con K. Alex Müller, ganador del Premio Nobel en 1987. El Dr. Serway también fue científico visitante en el Argonne National Laboratory, donde colaboró con su mentor y amigo, Sam Marshall. Al inicio de su carrera, trabajó como investigador científico en el Rome Air Development Center de 1961 a 1963 y en el IIT Research Institute de 1963 a 1967. El Dr. Serway es coautor de *Física para ciencias e ingeniería*, octava edición; *Principios de Física: texto basado en cálculo*, cuarta edición; *Fundamentos de Física para bachillerato* y *Física Moderna*, tercera edición. También es coautor del libro de bachillerato *Física*, publicado por Holt, Reinhart y Winston. Además, el Dr. Serway ha publicado más de 40 artículos en el campo de la física de materia condensada e impartido más de 70 conferencias en reuniones profesionales. El Dr. Serway y su esposa, Elizabeth, disfrutan viajar, jugar golf, la pesca, la jardinería, cantar en el coro de una iglesia y pasar tiempo con sus cuatro hijos, nueve nietos y su bisnieto.



Chris Vuille es profesor asociado de física en la Embry-Riddle Aeronautical University (ERAU), en Daytona Beach, Florida, la institución líder en el mundo para educación superior en aviación. Recibió su doctorado en física de la Universidad de Florida en 1989 y se mudó a Daytona después de un año en el campus de la ERAU en Prescott, Arizona. Aunque ha impartido cursos en todos los niveles, incluido posgrado, su principal interés es la física introductoria. Ha recibido varios premios por excelencia académica, incluido el Senior Class Appreciation Award (tres veces). Realiza investigación acerca de relatividad general y teoría cuántica, y participó en el programa JOVE, un proyecto de beca especial de tres años de la NASA durante el cual estudió estrellas de neutrones. Su obra aparece en varias revistas científicas y ha sido escritor científico en la revista *Analog Science Fiction/Science Fact*. Además de este libro, es coautor de *Fundamentos de Física para bachillerato*. Al Dr. Vuille le gusta jugar tenis, nadar y tocar piezas clásicas en el piano, y fue campeón de ajedrez en St. Petersburg y Atlanta. En su tiempo libre escribe ficción y va a la playa. Su esposa, Dianne Kowing, es optometrista en una clínica local de Administración de Veteranos. Su hija, Kira Vuille-Kowing, tiene doble especialidad en meteorología/comunicaciones en la ERAU y es graduada del curso de física de primer año de su padre. Tiene dos hijos, Christopher, chelista y piloto, y James, ávido lector de cuentos de Disney.

Fundamentos de Física se escribió para un curso de un año de introducción a la física, que por lo general cursan los estudiantes que se especializan en biología, las profesiones de la salud y otras disciplinas que incluyen ciencias ambientales, de la tierra y sociales, y campos técnicos como la arquitectura. Las técnicas matemáticas que se utilizan en este libro incluyen álgebra, geometría y trigonometría, mas no cálculo.

Este libro, que cubre los temas estándar de la física clásica y la física del siglo xx, se divide en seis partes. La parte 1 (capítulos 1-9) trata de la mecánica newtoniana y la física de fluidos; la parte 2 (capítulos 10-12) se ocupa del calor y la termodinámica; la parte 3 (capítulos 13 y 14) cubre el movimiento ondulatorio y el sonido; la parte 4 (capítulos 15-21) desarrolla los conceptos de electricidad y magnetismo; la parte 5 (capítulos 22-25) trata las propiedades de la luz y el campo de las ópticas geométrica y ondulatoria, y la parte 6 (capítulos 26-30) proporciona una introducción a la relatividad especial, física cuántica, física atómica y física nuclear.

Objetivos

Los principales objetivos de este libro introductorio son dos: proporcionar al estudiante una presentación clara y lógica de los conceptos y principios básicos de la física y fortalecer su comprensión mediante un amplio rango de interesantes aplicaciones con el mundo real. Para alcanzar estos objetivos, enfatizamos firmes argumentos físicos y una metodología para resolver problemas. Al mismo tiempo intentamos motivar al estudiante a través de ejemplos prácticos que demuestren el papel de la física en otras disciplinas.

Cambios en la novena edición

En esta edición se hicieron un gran número de cambios y mejoras. Algunas de las nuevas características están basadas en nuestras experiencias y las tendencias actuales en la educación. Otros cambios fueron incorporados respondiendo a las sugerencias de los usuarios de la octava edición y de los revisores. Las siguientes características representan los principales cambios en la novena edición.

Análisis desde Enhanced WebAssign que se usa para revisar las preguntas y problemas

Como parte de la revisión de las preguntas y los conjuntos de problemas, los autores utilizaron análisis extensos de los usuarios recogidos por Enhanced WebAssign, tanto de los instructores que asignan y como de los estudiantes que trabajaron en los problemas de ediciones anteriores de *Fundamentos de Física*. Estos análisis ayudan enormemente, indicando que la redacción de los problemas podría ser más clara y proporcionando orientación sobre la manera de revisar los problemas para que fueran más fáciles de entender para los estudiantes y más fácil de asignar en Enhanced WebAssign. Por último, los análisis fueron utilizados para asegurar que los problemas asignados con mayor frecuencia fueran seleccionados para esta nueva edición. En conjunto, los problemas de cada capítulo, el cuartil superior de los problemas que fueron asignados en Enhanced WebAssign tienen **sombreado azul** los números de problema, para facilitar su identificación, permitiendo a los profesores encontrar rápida y fácilmente los problemas más populares asignados en Enhanced WebAssign.

Integración con Enhanced WebAssign

La estrecha integración del contenido de los libros de texto con Enhanced WebAssign facilita un entorno de aprendizaje en línea que ayuda a los estudiantes a mejorar sus habilidades de solución de problemas y les da una variedad de herramientas para satisfacer sus estilos individuales de aprendizaje. Nuevos en esta edición, los tutoriales Master It ayudan a los estudiantes a resolver problemas al tener que trabajar a través de una solución escalonada. Problemas con el tutorial Master It se indican con un icono **M** en cada conjunto de problemas del capítulo. Además, la solución en video Watch It explica los fundamentos de las estrategias de solución de problemas para ayudar a los estudiantes por medio de los problemas seleccionados. Los problemas asignados más frecuentemente en la Enhanced WebAssign (sombreadas en azul) tienen comentarios para hacer frente a concepciones erróneas de los estudiantes, ayudándolos a evitar errores comunes.

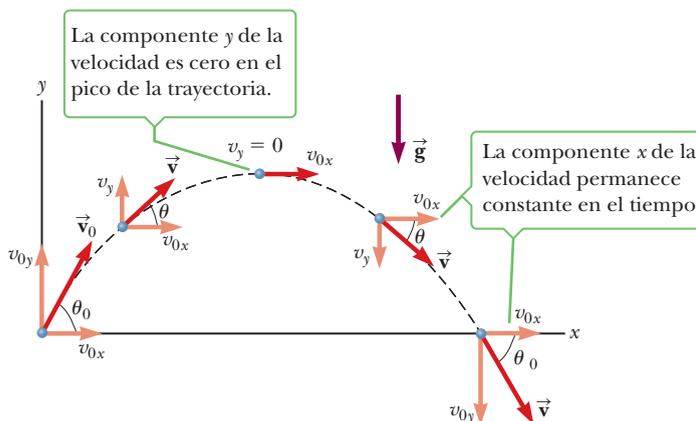
Revisión a fondo de las ilustraciones

Cada ilustración en la novena edición ha sido revisada en un estilo nuevo y moderno que ayuda a expresar los principios de la física en el trabajo de una manera más clara y precisa. También se ha revisado cada gráfica para asegurarse de que las situaciones físicas que se presentaban correspondiera exactamente a la discusión del texto en cuestión.

También se ha añadido para esta edición una nueva característica de muchas figuras: “Las etiquetas de orientación” que señalan las características importantes de la figura y guían a los estudiantes a través de las figuras sin tener que volver atrás y hacia adelante de la leyenda de la figura a la figura misma. Este formato también ayuda a aquellos estudiantes que son aprendices visuales. Un ejemplo de este tipo de figura aparece a continuación.

Figura activa 3.14

Trayectoria parabólica de una partícula que deja el origen con una velocidad de \vec{v}_0 . Observe que \vec{v} cambia con el tiempo. De cualquier modo, la componente x de la velocidad, v_x , permanece constante en el tiempo igual que su velocidad inicial v_{0x} . Además, $v_y = 0$ en el pico de la trayectoria, pero la aceleración siempre es igual a la aceleración en caída libre y actúa verticalmente hacia abajo.



Cambios en el contenido

El texto se editó cuidadosamente para mejorar la claridad de la presentación y la precisión del lenguaje. Esperamos que el resultado sea un libro tanto preciso como agradable de leer. Aunque el contenido y la organización globales del libro son similares a la octava edición, se realizaron algunos cambios que se enlistan a continuación:

- **Capítulo 1, “Introducción”.** Se ha mejorado el análisis de la exactitud de las mediciones y el ejemplo 1.3, que ilustra el uso de cifras significativas, se ha ampliado de manera importante.
- **Capítulo 2, “Movimiento en una dimensión”.** Para esta edición, es importante la introducción del concepto de “longitud de trayectoria” a menudo llamado (erróneamente) “distancia total”, al igual que las razones conceptuales para tal definición (utilizada en matemáticas). El debate general sobre el concepto fue revisado para una mayor claridad. Finalmente, una parte nueva del ejemplo 2.4 ilustra mejor el concepto de velocidad promedio.
- **Capítulo 3, “Vectores y movimiento en dos dimensiones”.** Las nuevas figuras 3.16 y 3.17 explican e ilustran la independencia de los movimientos horizontal y vertical. Una parte

nueva del ejemplo 3.5 muestra cómo encontrar la dirección del movimiento dados los dos componentes del vector de velocidad, mientras que una parte nueva añadida al ejemplo 3.10 muestra mejor cómo controlar el movimiento relativo en una dimensión.

- **Capítulo 4, “Leyes de movimiento”.** Las nuevas figuras 4.3 y 4.5 ilustran la primera y segunda ley de movimiento, respectivamente. El ejemplo 4.3 en la ley de Newton de la gravitación ahora introduce el concepto de las fuerzas de marea en el ejemplo y el ejercicio, todo a través de cálculos sencillos. El nuevo ejemplo 4.5 ilustra la tercera ley en un contexto simple. Por último, una nueva parte del ejemplo 4.15 nos da un ejemplo adicional del enfoque de sistema.
- **Capítulo 5, “Energía”.** Las definiciones de trabajo fueron refinadas para incluir la definición intuitiva más sencilla primero, seguida por dos generalizaciones. Se ha mejorado el debate general de la obra y se ha agregado una parte adicional al primer ejemplo en el trabajo, ejemplo 5.1.
- **Capítulo 6, “Cantidad de movimiento y colisiones”.** Se ha revisado y mejorado a fondo el ejemplo 6.3, velocidad de retroceso, al igual que el ejemplo 6.5 para el péndulo balístico.
- **Capítulo 7, “Movimiento rotatorio y la ley de gravedad”.** Se amplió el ejemplo 7.2, cinemática de rotación, permitiendo la eliminación del ejemplo 7.3. La figura 7.10 se redefinió y rediseñó, y ahora ilustra mejor el concepto de velocidad angular. La nueva figura 7.20 ayuda a los estudiantes a entender la energía potencial gravitatoria.
- **Capítulo 8, “Equilibrio y dinámica rotatorios”.** Las nuevas figuras 8.2 y 8.5 ayudan a explicar visualmente las ideas detrás del torque. Se amplió el ejemplo 8.4, centro de gravedad, para ilustrar mejor el concepto y la técnica de aplicación.
- **Capítulo 9, “Sólidos y fluidos”.** Las secciones del capítulo 9 se reordenaron ligeramente de modo que el concepto de presión pudiera ser introducido antes de tensión y esfuerzo. El nuevo ejemplo 9.1 ayuda al estudiante a entender el concepto de presión, así como sentar las bases para comprender la ecuación de equilibrio hidrostático. Se mejoró significativamente el ejemplo 9.4, problema sobre volumen de esfuerzo-deformación, y ahora incluye el cálculo del cambio de presión que causa el cambio de volumen.
- **Capítulo 10, “Física térmica”.** El nuevo ejemplo 10.9 enfocado en un haz de electrones de alta energía, muestra cómo un gran número de impactos de partículas crea una fuerza macroscópica observada y una presión asociada.
- **Capítulo 11, “Energía en procesos térmicos”.** El nuevo ejemplo 11.8 se basa en las pérdidas conductoras del cuerpo humano. Este mismo ejemplo también analiza las ballenas minke en el ejercicio de acompañamiento. Fue creado un nuevo y más completo ejemplo, acerca del aislamiento (ejemplo 11.9), que sustituye a dos problemas de ejemplo que son redundantes.
- **Capítulo 12, “Leyes de la termodinámica”.** Se aclaró la diferencia entre el trabajo realizado por un gas y el trabajo realizado sobre el gas. La nueva figura 12.2 compara el concepto de trabajo en un gas con el trabajo mecánico realizado sobre un objeto. La figura 12.5 ilustra el nuevo concepto de la primera ley de la termodinámica, y se acompaña de mayor análisis en un contexto más general. Finalmente, el ejemplo 12.7 se ha mejorado en forma significativa con más incisos y un análisis de gases monoatómicos y diatómicos.
- **Capítulo 13, “Vibraciones y ondas”.** El ejemplo 13.1 de la octava edición se cambió por el ejemplo 13.2 y fue mejorado enormemente con más incisos que muestran cómo manejar los resortes individuales y múltiples y sus constantes de resorte.
- **Capítulo 14, “Sonido”.** Una nueva e interesante aplicación de la física se refiere a un dispositivo que utiliza tecnología de ultrasonido en la cirugía de cerebro. Este dispositivo permite a los cirujanos operar sin cortar la piel o hacer una abertura en el cráneo, reduciendo muchos de estas cirugías a un procedimiento ambulatorio.
- **Capítulo 16, “Energía eléctrica y capacitancia”.** Un nuevo ejemplo muestra cómo controlar un capacitor con dos capas de materiales dieléctricos entre las placas. Además, el resumen dispone de nuevas figuras que ilustran las normas para las combinaciones de los capacitores en series y paralelo.
- **Capítulo 17, “Corriente y resistencia”.** Se introduce una explicación más detallada de la relación entre cargas en movimiento y la energía, conectando mejor la primera parte del capítulo 17 con los conceptos de energía eléctrica descritos en el capítulo 16.

Los nuevos incisos del ejemplo 17.1 y su ejercicio refuerzan el desarrollo conceptual. Además, se añadió un inciso nuevo al ejemplo 17.6 y su ejercicio.

- **Capítulo 18, “Circuitos de corriente directa”.** El ejemplo 18.1 de resistencias en serie tiene dos incisos nuevos y un ejercicio nuevo. Se ha revisado el ejemplo 18.3 para mejorar la claridad de la solución. Nuevas figuras en el resumen ilustran las dos reglas para combinaciones de resistencias en serie y paralelo.
- **Capítulo 19, “Magnetismo”.** El nuevo ejemplo 19.7 muestra cómo utilizar la ley de Ampère para calcular el campo magnético debido a un cable coaxial. Un nuevo análisis explica la diferencia entre los materiales magnéticos blandos y duros y sus aplicaciones generales. Se han introducido otras aplicaciones de los campos magnéticos para dirigir haces de partículas cargadas.
- **Capítulo 20, “Voltajes inducidos e inductancia”.** Este capítulo presenta un análisis más claro del flujo magnético, explicando el concepto de la orientación de una superficie y cómo se relaciona con el signo del flujo. El análisis de la ley de Lenz en la sección 20.2 se revisó a fondo, con varios ejemplos de la ley incluidos en el texto con diagramas. Con el análisis mejorado en la sección 20.2 era posible eliminar la sección 20.4 de la edición anterior; lo que resulta en una presentación más llana y más completa del concepto.
- **Capítulo 21, “Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas”.** Una nueva aplicación de la física, “Luz y tratamiento de heridas”, describe cómo la irradiación de las heridas con láser puede acelerar la curación. Los ejemplos 21.8 y 21.9 fueron revisados.
- **Capítulo 22, “Reflexión y refracción de la luz”.** La revisión del ejemplo 22.2 en la ley de Snell, lo hace más completo y permite la eliminación del ejemplo 22.4 de la última edición.
- **Capítulo 23, “Espejos y lentes”.** Un nuevo ejemplo combina una lente delgada y un espejo esférico.
- **Capítulo 24, “Óptica ondulatoria”.** Una nueva aplicación de la física, “Espejos perfectos”, explica cómo los materiales dieléctricos pueden mejorar la reflectividad. Fibras construidas con esta tecnología pueden guiar la luz sin ninguna pérdida significativa de intensidad.
- **Capítulo 26, “Relatividad”.** La velocidad relativa en la relatividad especial, reintroducida en esta edición, se relaciona con el enfoque relativista para el tratamiento elemental de la velocidad relativa que se presenta en el capítulo 3. La conexión con la física elemental facilita la comprensión del estudiante de este difícil tema. Un nuevo ejemplo ilustra el concepto y su uso.
- **Capítulo 30, “Energía nuclear y partículas elementales”.** Un nuevo debate sobre la energía nuclear y los reactores se centra en los esfuerzos para extraer el suministro casi ilimitado de uranio disuelto en los océanos del mundo. Una nueva sección sobre cosmología incluye el análisis de la materia oscura, energía oscura y la inflación cósmica, junto con nuevas figuras.

Características del libro

La mayoría de los instructores coinciden en que el libro de texto asignado en un curso debe ser guía principal del estudiante para la comprensión y el aprendizaje de la materia. Además, el libro de texto debe ser fácilmente comprensible y estar escrito en un estilo que facilite la enseñanza y el aprendizaje. Con esto en mente, hemos incluido muchas características pedagógicas que están destinadas a mejorar la utilidad del libro de texto para los estudiantes y los instructores. Las siguientes funciones están incluidas.

Ejemplos Para esta novena edición se han revisado todos los ejemplos prácticos, realizando mejoras, y se añadieron o revisaron muchas preguntas y ejercicios de fin de ejemplo. Cada esfuerzo se ha hecho para asegurar que la recopilación de ejemplos, como un todo, sea integral en la cobertura de todos los conceptos físicos, tipos de problemas de física y técnicas matemáticas necesarias. Las preguntas por lo general requieren una respuesta conceptual o determinación, pero también incluyen estimaciones que requieren conocimientos de las relaciones entre conceptos. Las respuestas de las preguntas se

pueden encontrar en la parte final del libro. Los ejemplos se muestran en un formato de dos columnas con una finalidad pedagógica: los estudiantes pueden estudiar el ejemplo, y luego cubrir la columna de la derecha y tratar de resolver el problema con las claves en la columna de la izquierda. Una vez que ha tenido éxito en ese ejercicio, el estudiante puede cubrir las dos columnas de la solución y tratar de solucionar el problema con sólo la declaración de estrategia, y, finalmente, sólo el enunciado del problema. Aquí está una muestra de un ejemplo en el texto trabajado, con una explicación de cada una de las partes principales del ejemplo:

El **Objetivo** describe los conceptos físicos que están siendo explorados en el ejemplo práctico.

El planteamiento del **Problema** presenta el problema en sí.

La sección de **Estrategia** ayuda a los estudiantes a analizar el problema y crear un marco para la elaboración de la solución.

La sección de **Solución** utiliza un formato de dos columnas que ofrece la explicación de cada paso de la solución en la columna de la izquierda, mientras que da cada paso matemático respectivo en la columna de la derecha. Esta disposición facilita el acompañamiento de la idea con su ejecución y ayuda a los estudiantes a aprender cómo organizar su trabajo. Otro de los beneficios: los estudiantes pueden usar este formato como una herramienta de formación, cubriendo la solución a la derecha y resolviendo el problema utilizando las observaciones de la izquierda como una guía.

EJEMPLO 13.7 Medida del valor de g

OBJETIVO Determinar g a partir del movimiento de un péndulo.

PROBLEMA Utilizando un pequeño péndulo de longitud 0.171 m, un geofísico cuenta 72.0 oscilaciones completas en un tiempo de 60.0 s. ¿Cuál es el valor de g en esta localidad?

ESTRATEGIA Primero calcule el periodo del péndulo dividiendo el tiempo total entre el número de oscilaciones completas. Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores.

SOLUCIÓN
 Calcule el periodo dividiendo el tiempo total transcurrido por el número de oscilaciones completas:

$$T = \frac{\text{tiempo}}{\# \text{ de oscilaciones}} = \frac{60.0 \text{ s}}{72.0} = 0.833 \text{ s}$$

 Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{(39.5)(0.171 \text{ m})}{(0.833 \text{ s})^2} = 9.73 \text{ m/s}^2$$

Comentarios después de cada solución que resaltan algunos de los conceptos básicos y la metodología utilizada para llegar a una solución correcta. Además, las observaciones se utilizan a menudo para poner el problema en un contexto real más grande.

COMENTARIOS La medición de tales oscilaciones es una buena manera para determinar los valores locales de la aceleración de la gravedad.

PREGUNTA 13.7 Verdadero o Falso: Un péndulo simple de longitud 0.50 m tiene una frecuencia mayor de oscilación que un péndulo simple de longitud de 1.0 m.

EJERCICIO 13.7 ¿Cuál sería el periodo de un péndulo de 0.171 m sobre la Luna, donde la aceleración de la gravedad g es 1.62 m/s^2 ?

RESPUESTA 2.04 s

Cada **Pregunta** cuenta con un ejemplo práctico caracterizado por una cuestión conceptual que promueve la comprensión de los alumnos de los conceptos contenidos en el ejemplo.

Ejercicio/Respuesta todas las preguntas están seguidas inmediatamente por un ejercicio con una respuesta. Estos ejercicios permiten a los estudiantes reforzar su comprensión al trabajar un problema similar o relacionado, con las respuestas ofreciendo una respuesta instantánea. Los estudiantes que trabajan de manera regular a través de estos ejercicios encuentran los problemas de final de capítulo menos intimidantes.



Muchos ejemplos resueltos también están disponibles para ser asignados como ejemplos activos en el sistema de gestión de tareas Enhanced WebAssign (visite www.cengage.com/physics/serway para más detalles).

Preguntas de opción múltiple Éstas sirven para varios propósitos: algunas requieren cálculos diseñados para facilitar la familiarización de los estudiantes con las ecuaciones, las variables utilizadas, los conceptos que las variables representan y las relaciones entre los conceptos. Las restantes son conceptuales y están diseñadas para estimular el pensamiento físico. Por último, muchos estudiantes están obligados a presentar exámenes de opción múltiple, por lo que un poco de práctica en esa forma de pregunta es deseable. El instructor puede seleccionar preguntas de opción múltiple para asignar como tarea o utilizarlas en el aula, posiblemente con métodos “instrucción por pares” o en combinación con sistemas de “clickers”. (Las preguntas de opción múltiple se escriben con la respuesta de los usuarios del sistema personal en mente, y la mayoría de las preguntas podrían ser fácilmente utilizadas en estos sistemas.) Casi 400 preguntas de opción múltiple se incluyen en este texto. Las respuestas a preguntas de opción múltiple de número impar se incluyen en la sección de respuestas al final del libro. Las respuestas a todas las preguntas de opción múltiple están en el *Instructor’s Solution Manual* y en el *Instructor’s Power Lecture DVD-ROM*.

Preguntas conceptuales Al final de cada capítulo hay aproximadamente una docena de preguntas conceptuales. Los ejemplos de física aplicada que se presentan en el texto sirven como modelos para los estudiantes cuando se asignan preguntas conceptuales y muestran cómo se puede aplicar el concepto para comprender el mundo físico. Estas preguntas proporcionan a los estudiantes los medios para autoevaluar los conceptos presentados en el capítulo. Algunas preguntas conceptuales son adecuadas para iniciar discusiones en el salón de clase. En la sección de respuestas al final del libro se incluyen las respuestas a las preguntas conceptuales de número impar, y las respuestas a todas las preguntas se encuentran en el *Instructor’s Solutions Manual*.

Problemas Todas las preguntas y los problemas de esta edición fueron revisados cuidadosamente para mejorar su variedad, interés y valor pedagógico, manteniendo su claridad y calidad. Un amplio conjunto de problemas se incluye al final de cada capítulo (en total, más de 2000 problemas se presentan en la novena edición), y aproximadamente 25% de las preguntas y problemas en esta edición son nuevos. Las respuestas a los problemas de número impar se incorporan al final del libro. Para conveniencia tanto del estudiante como del instructor, alrededor de dos tercios de los problemas se relacionan con secciones específicas del capítulo. Los problemas restantes, etiquetados como “Problemas adicionales”, no se refieren a secciones específicas. Los tres niveles de problemas están graduados de acuerdo con su dificultad. Los problemas sencillos están numerados en **negro**, los problemas de nivel intermedio tienen números en **azul** y los problemas de alto reto tienen números en **rojo**. El icono **BIO** identifica los problemas que tratan con aplicaciones a las ciencias de la vida y medicina. Las soluciones a aproximadamente 12 problemas en cada capítulo se encuentran en el *Student Solutions Manual/Study Guide*.

Hay tres tipos de problemas, que creemos que a los instructores y los estudiantes les serán de interés, a medida que utilicen el texto:

- **S** Los **problemas simbólicos** requieren que el estudiante obtenga una respuesta en términos de símbolos. En general, dentro del enunciado del problema se incluye alguna guía. La meta es capacitar mejor al estudiante para lidiar con las matemáticas a un nivel adecuado a este curso. La mayoría de los estudiantes a este nivel se sienten incómodos con las ecuaciones simbólicas, lo que es desafortunado porque estas ecuaciones son el vehículo más eficiente para presentar las relaciones entre los conceptos físicos. Una vez que los estudiantes comprenden los conceptos físicos, su habilidad para resolver problemas mejora enormemente. Sin embargo, tan pronto como los números se sustituyen en una ecuación, todos los conceptos y sus relaciones mutuas se pierden, al conjuntarse en la calculadora del estudiante. Los problemas simbólicos con contenido comentado capacitan a los estudiantes para posponer la sustitución de valores, lo que facilita su habilidad para pensar de manera conceptual usando las ecuaciones. Un ejemplo de problema simbólico con contenido comentado se muestra en la página siguiente:

14. **S** Un objeto de masa m se deja caer desde el techo de un edificio de altura h . Mientras el objeto está cayendo, un viento que sopla paralelo a la fachada del edificio ejerce una fuerza F horizontal constante sobre el objeto. a) ¿Cuánto tiempo le toma al objeto golpear la superficie de la tierra? Expresé el tiempo t en función de g y h . b) Halle una expresión en términos de m y F para la aceleración a_x del objeto en la dirección horizontal (tome como dirección x positiva). c) ¿A qué distancia horizontal se desplaza el objeto antes de golpear la superficie de la tierra? Responda en términos de m , g , F y h . d) Halle la magnitud de la aceleración del objeto mientras está cayendo, utilizando las variables F , m y g .

- **C/C** Un **problema cuantitativo/conceptual** alienta al estudiante a pensar verbal y conceptualmente acerca de un problema físico dado, en lugar de apoyarse de manera exclusiva en las habilidades de cómputo. La investigación en educación en física sugiere que los problemas de física estándares que requieren cálculos pueden no ser completamente adecuados para capacitar a los estudiantes a pensar de manera conceptual. Los estudiantes aprenden a sustituir números por símbolos en las ecuaciones sin comprender por completo lo que hacen o lo que significan los símbolos. El problema cuantitativo/conceptual combate esta tendencia al pedir respuestas que requieren algo más que un número o un cálculo. Un ejemplo de problema cuantitativo/conceptual es el siguiente:

5. **C/C** Partiendo del reposo, un bloque de 5.00 kg se desliza 2.50 m hacia abajo sobre un plano rugoso inclinado 30.0° . El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano es $\mu_k = 0.436$. Determine a) el trabajo realizado por la fuerza de gravedad, b) el trabajo realizado por fricción entre el bloque y el plano inclinado y c) el trabajo realizado por la fuerza normal. d) Cualitativamente, ¿cómo cambiarían las respuestas si se utiliza una rampa corta en un ángulo muy pronunciado para atravesar las mismas alturas verticales?

- **PG** Los **problemas guiados** ayudan a los estudiantes a dividir los ejercicios en pasos. Un problema físico por lo general requiere alguna cantidad física en un contexto dado. Sin embargo, con frecuencia, se deben usar diversos conceptos y algunos cálculos para llegar a la respuesta final. Muchos estudiantes no están acostumbrados a este nivel de complejidad y con frecuencia no saben dónde comenzar. Un *problema guiado* descompone un problema estándar en pasos más pequeños, lo que permite a los estudiantes capturar todos los conceptos y estrategias requeridos para llegar a una solución correcta. A diferencia de los problemas físicos estándar, con frecuencia la guía se incluye en el enunciado del problema. Por ejemplo, el problema puede indicar “encuentre la velocidad usando conservación de energía” en lugar de sólo pedir la velocidad. En cualquier capítulo por lo general habrá dos o tres tipos de problemas que sean particularmente adecuados a esta forma de cuestionamiento. El problema debe tener cierto nivel de complejidad, con una misma estrategia para la solución de problemas involucrada cada vez que aparece. Los problemas guiados son un recordatorio de cómo un estudiante puede interactuar con un profesor en una visita para asesoría. Estos problemas ayudan a capacitar a los estudiantes para descomponer ejercicios complejos en una serie de problemas más simples, una habilidad esencial para resolverlos. A continuación se proporciona un ejemplo de problema guiado:

32. **PG** Dos bloques de masas m_1 y m_2 ($m_1 > m_2$), se colocan sobre una mesa sin fricción en contacto mutuo. Se aplica una fuerza horizontal de magnitud F al bloque de masa m_1 en la figura P4.32.

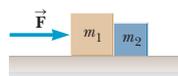


Figura P4.32

- a) Si P es la magnitud de la fuerza de contacto entre los bloques, trace un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. b) ¿Cuál es la fuerza neta en el sistema consistente en los dos bloques? c) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa

en m_1 ? d) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa en m_2 ? e) Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para cada bloque. f) Resuelva el sistema que resulta de dos ecuaciones y dos incógnitas, exprese la aceleración a y la fuerza de contacto P en términos de las masas y fuerza. g) ¿Cómo cambiaría la respuesta si la fuerza ha sido aplicada a m_2 ? (*Sugerencia:* Utilice la simetría; ¡no calcule!) ¿La fuerza de contacto es más grande, más pequeña o en este caso la misma? ¿Por qué?

Exámenes rápidos Todos los exámenes rápidos (véase el ejemplo siguiente) se presentan en un formato objetivo, incluidos opción múltiple, verdadero o falso, relacionar y preguntas de clasificación. Los exámenes rápidos proporcionan a los estudiantes la oportunidad de poner a prueba su comprensión de los conceptos físicos presentados. Los exámenes requieren que los estudiantes tomen decisiones acerca de la base del razonamiento lógico y algunos se escribieron para ayudar a los estudiantes a superar las equivocaciones comunes. Las respuestas a todos los exámenes rápidos se encuentran al final del texto y las respuestas con explicaciones detalladas se proporcionan en el *Instructor's Solutions Manual*. Muchos instructores eligen usar los exámenes rápidos en un estilo de enseñanza de “instrucción por pares”.

■ Examen rápido

4.4 Un pequeño automóvil deportivo colisiona de frente contra un camión. La enorme fuerza de impacto (en magnitud) actúa sobre a) el automóvil, b) el camión, c) ninguno, la fuerza es la misma en ambos. ¿Cuál es el vehículo que se somete a la mayor aceleración en magnitud? d) el automóvil, e) el camión, f) las aceleraciones son las mismas.

Estrategias para la solución de problemas Al final del capítulo 1 se presenta una estrategia general para resolver problemas. Esta estrategia proporciona a los estudiantes un proceso estructurado para solucionarlos. En la mayoría de los capítulos se incluyen estrategias y sugerencias más específicas (véase el ejemplo siguiente) para resolver los tipos de problemas que se presentan tanto en los ejemplos resueltos como en los problemas de fin de capítulo. Esta característica ayuda a los estudiantes a identificar los pasos esenciales para resolver problemas y aumentar sus habilidades como solucionadores de problemas.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Segunda ley de newton

Los problemas que involucran la segunda ley de Newton pueden ser muy complejos. El siguiente protocolo rompe el proceso de solución en objetivos intermedios, más pequeños:

1. **Lea** el problema esmeradamente por lo menos una vez.
2. **Trace** una imagen del sistema, identifique el objeto de interés básico e indique las fuerzas con flechas.
3. **Etiquete** cada fuerza en la imagen de cierta manera que inducirá a pensar lo que las cantidades físicas representan (digamos, T para la tensión).
4. **Trace** un diagrama de cuerpo libre del objeto de interés, en función de la imagen etiquetada. Si se incluyen objetos adicionales, dibuje diagramas de cuerpo libre por separado para ellos. Elija coordenadas convenientes para cada objeto.
5. **Aplique la segunda ley de Newton.** Los componentes x y y de la segunda ley de Newton se toman de la ecuación vectorial y se describen individualmente. Esto por lo general da como resultado dos ecuaciones y dos incógnitas.
6. **Resuelva** para la cantidad desconocida deseada y sustituya los números.

Aplicaciones biomédicas Para los estudiantes de biología y medicina, los iconos **BIO** señalan la ruta hacia varias aplicaciones prácticas e interesantes de los principios físicos a la biología y la medicina. Siempre que sea posible, se incluyen más problemas que son relevantes para estas disciplinas.

Guía de estudio constructora de habilidades MCAT La novena edición de *Fundamentos de Física* contiene un apéndice especial para desarrollar habilidades (apéndice E) como ayuda a los estudiantes de medicina a fin de prepararse para el examen MCAT. El apéndice contiene ejemplos escritos por los autores del texto para ayudar a los estudiantes a desarrollar habilidades conceptuales y cuantitativas. Estos ejemplos desarrolladores de habilidades contienen preguntas al estilo MCAT escrito por expertos que preparan el examen para garantizar que los estudiantes estén listos para dominarlo.

Guía de preparación para el examen MCAT Ubicada después de la sección “Al estudiante”, en las primeras páginas del libro, esta guía resalta 12 cursos de estudio basados en conceptos para la parte física del examen MCAT. Los estudiantes pueden usar la guía para preparar el examen MCAT, exámenes en clase o asignación de tareas.

Física aplicada Las características de física aplicada proporcionan a los estudiantes un medio adicional para revisar los conceptos que se presentan en dicha sección.

Algunos ejemplos de física aplicada demuestran la conexión entre los conceptos que se presentan en el capítulo y otras disciplinas científicas. Dichos ejemplos también sirven como modelos para los estudiantes cuando se les asigna la tarea de responder las preguntas conceptuales que aparecen al final de cada capítulo. Para ejemplos de los recuadros física aplicada, véase física aplicada 9.5 (“Plomería doméstica”) en la página 307 y física aplicada 13.1 (“Saltando de un bungee”) en la página 447.

Tips Colocados en los márgenes del texto, los tips abordan equívocos y situaciones estudiantiles comunes en las que los estudiantes con frecuencia siguen rutas improductivas (véase el ejemplo a la derecha). Más de 95 tips se presentan en esta edición para ayudar a los estudiantes a evitar errores y malas interpretaciones comunes.

Notas al margen Los comentarios y notas que aparecen en el margen (véase el ejemplo a la derecha) se pueden usar para ubicar enunciados, ecuaciones y conceptos importantes en el texto.

Aplicaciones Aunque la física es relevante para gran parte de la vida moderna, puede no ser obvia para los estudiantes en un curso introductorio. Las notas marginales de aplicaciones (véase el ejemplo a la derecha) hacen que la relevancia de la física en la vida diaria sea más obvia al puntualizar aplicaciones específicas en el texto. Algunas de estas aplicaciones pertenecen a las ciencias de la vida y se marcan con un icono **BIO**. Una lista de aplicaciones aparece después de este prefacio.

Estilo Para facilitar la rápida comprensión, intentamos escribir el libro en un estilo que fuese claro, lógico, relajado y atractivo. El estilo de escritura un tanto informal y relajado está diseñado para conectarse mejor con los estudiantes e incrementar su disfrute al leer. Los términos nuevos se definen con cuidado, e intentamos evitar el uso de jerga.

Introducciones Todos los capítulos comienzan con un breve preámbulo que incluye un análisis de los objetivos y el contenido del capítulo.

Unidades En todo el libro se usa el Sistema Internacional de unidades (SI). El sistema de unidades estadounidense se usa en poca medida sólo en los capítulos acerca de mecánica y termodinámica.

Uso pedagógico del color Los lectores deben consultar la carta pedagógica de color (al final del libro aparece una descripción completa del uso pedagógico del color) para un listado de los símbolos con código de color que se utilizan en los diagramas de texto. Este sistema se sigue de manera consistente a lo largo del texto.

Enunciados y ecuaciones importantes La mayoría de los enunciados y definiciones importantes se imprimen en **negrillas** o se resaltan con una pantalla de fondo para agregar énfasis y facilitar su revisión. De igual modo, las ecuaciones importantes se **resaltan con una pantalla beige** para facilitar su ubicación.

Ilustraciones y tablas La legibilidad y efectividad del material del texto, ejemplos resueltos y preguntas conceptuales y problemas de fin de capítulo se mejoraron con el gran número de figuras, diagramas, fotografías y tablas. El color agrega claridad a las ilustraciones y hace que éstas sean lo más realistas posibles. Los efectos tridimensionales se consiguen con el uso de áreas sombreadas y brillantes donde es apropiado. Los vectores tienen código de color y las curvas en las gráficas se dibujan en color. Las fotografías a color se seleccionaron cuidadosamente y sus leyendas se escribieron para funcionar como una herramienta instructiva adicional. Al final del libro aparece una descripción completa del uso pedagógico del color.

Resumen Los resúmenes de fin de capítulo se organizan con encabezados de sección individual para facilitar la referencia. Para la novena edición, un gran número de resúmenes de capítulo se caracterizan por tener figuras clave del capítulo.

Cifras significativas Las cifras significativas tanto en los ejemplos resueltos como en los problemas al final de capítulo se manejan con cuidado. La mayoría de los ejemplos numéricos y problemas se resuelven a dos o a tres cifras significativas, dependiendo de la precisión de los datos proporcionados. Los resultados intermedios que se presentan en los ejemplos se redondean al número adecuado de cifras significativas y sólo dichos dígitos se acarrean.

Tip 4.3 La segunda ley de Newton es una ecuación vectorial

Al aplicar la segunda ley de Newton, sume todas las fuerzas sobre el objeto como vectores y entonces determine el vector de aceleración resultante al dividir entre m . No encuentre las magnitudes individuales de las fuerzas y las sume como escalares.

◀ Tercera ley de Newton

BIO APLICACIÓN

Dieta frente al ejercicio en los programas de pérdida de peso

Apéndices Al final del libro se proporcionan varios apéndices. La mayor parte del material de los apéndices (apéndice A) representa un repaso de conceptos y técnicas matemáticas utilizados en el texto, incluidos notación científica, álgebra, geometría, trigonometría, cálculo diferencial y cálculo integral. La referencia a dichos apéndices se realiza según se requiera en el texto. La mayoría de las secciones del repaso matemático incluyen ejemplos resueltos y ejercicios con respuestas. Además del repaso matemático, algunos apéndices contienen tablas útiles que complementan la información textual. Para facilitar la referencia, en las últimas páginas de la publicación encontrarán una tabla que explica el uso del color a lo largo del libro y una lista de factores de conversión de uso frecuente.

Figuras activas Muchos diagramas del texto se animaron para convertirse en figuras activas (que se identifican en la leyenda de la figura), parte del sistema de tareas en línea Enhanced WebAssign. Al observar animaciones de los fenómenos y procesos que no se pueden representar por completo en una página estática, los estudiantes aumentan enormemente su comprensión conceptual. Además de ver animaciones de las figuras, los estudiantes pueden ver el resultado de cambiar variables para mirar los efectos, llevar a cabo las exploraciones sugeridas de los principios involucrados en la figura, y tomar y recibir retroalimentación de las preguntas relacionadas con la figura. Todas las figuras activas se incluyen en el *Instructor's Power Lecture DVD-ROM* del instructor para presentación de la clase.

Opciones de enseñanza

Este libro contiene material más que suficiente para un curso de un año de introducción a la física, que tiene dos propósitos. Primero, proporciona al instructor más flexibilidad para elegir los temas de un curso específico. Segundo, el libro se vuelve más útil como un recurso para los estudiantes. En promedio, sería posible cubrir alrededor de un capítulo por semana para una clase que dura tres horas por semana. Aquellas secciones, ejemplos y problemas de fin de capítulo que tratan con aplicaciones de física para las ciencias de la vida se identifican con el icono **BIO**. Las siguientes sugerencias se ofrecen para cursos más breves o para aquellos instructores que elijan avanzar a un ritmo más lento a lo largo del año.

Opción A: si elige poner más énfasis en temas contemporáneos de física, podría omitir todo o partes de los capítulos 8 (Equilibrio y dinámica rotatorios), 21 (Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas) y 25 (Instrumentos ópticos).

Opción B: si elige poner más énfasis en la física clásica, podría omitir todo o partes de la parte 6 del libro, que trata la relatividad especial y otros temas de la física del siglo xx.

El *Instructor's Solutions Manual* ofrece sugerencias adicionales para secciones y temas específicos que podrían omitirse sin pérdida de continuidad si el tiempo apremia.

Opciones personalizadas TextChoice para *Fundamentos de Física*

La biblioteca digital en inglés de Cengage Learning, *TextChoice*, le permite crear su versión personalizada de Serway/Vuille *Fundamentos de Física* a partir de cero. Usted puede escoger y elegir el contenido que desea incluir en su texto e incluso añadir sus propios materiales originales de la creación de una solución única, aprendizaje todo en uno. Todo esto ocurre desde la comodidad de su escritorio. Visite www.textchoice.com para empezar a conformar su libro hoy.

Cengage Learning ofrece la forma más rápida y fácil para crear los materiales de aprendizaje personalizados entregados de la manera deseada. Para obtener más información acerca de las opciones de publicación personalizadas, visite www.cengage.com/custom o póngase en contacto con su representante local de Cengage Learning®.

Soluciones del curso (en inglés) que se ajustan a sus metas de enseñanza y las necesidades de aprendizaje de sus estudiantes

Avances recientes en tecnología educativa hicieron que los sistemas de gestión de tareas y los sistemas de respuesta de audiencia sean herramientas poderosas y accesibles para mejorar la forma en que imparte el curso. Ya sea que ofrezca un curso más tradicional basado

en un texto, esté interesado en usar o en la actualidad use un sistema de gestión de tareas en línea como Enhanced WebAssign o esté listo para convertir su clase en un ambiente de aprendizaje interactivo con un sistema de respuesta de audiencia JoinIn de TurningPoint, puede estar seguro de que el contenido probado del texto proporciona los cimientos para todos y cada uno de los componentes de la tecnología y el paquete auxiliar.

Sistemas de gestión de tareas

Enhanced WebAssign ¡Las tareas en línea nunca han sido tan fáciles! Tanto si eres un veterano o un principiante, Enhanced WebAssign es el líder del mercado en soluciones de tareas en línea y la solución perfecta para satisfacer sus necesidades de gestión de tareas. Diseñado por físicos para físicos, este sistema es un compañero de enseñanza confiable y amigable con el usuario. Enhanced WebAssign está disponible (en inglés) para *Fundamentos de Física*, lo que le brinda libertad para asignar



- Cada problema y pregunta de final de capítulo
- Problemas seleccionados, mejorados con sugerencias y retroalimentación. Un ejemplo de retroalimentación objetivo aparece a continuación:

A ball is thrown directly downward with an initial speed of 7.65 m/s from a height of 29.0 m. After what time interval does it strike the ground?

s

You know the initial velocity, the distance and the acceleration. Which equation in Table 2.2 will allow you to find the time? You may need to use the quadratic equation.

Need Help?

Los problemas seleccionados (en inglés) incluyen información para hacer frente a los errores comunes que cometen los estudiantes. Esta información ha sido desarrollada por profesores con años de experiencia en el aula.

- Tutoriales Master It, para ayudar a los estudiantes a trabajar paso a paso el problema. Un ejemplo de un tutorial Master It aparece a continuación:

Master It

One gallon of paint (volume = $3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) covers an area of 35.0 m^2 . What is the thickness of the fresh paint on the wall?

Part 1 of 3 - Conceptualize

We assume the paint keeps the same volume in the can and on the wall.

Part 2 of 3 - Categorize

We model the film on the wall as a rectangular solid, with its volume given by its "footprint" area, which is the area of the wall, multiplied by its thickness t perpendicular to this area and assumed to be uniform.

Part 3 of 3 - Analyze

Solving for t in $V = At$ gives the following.

$$t = \frac{V}{A} = \frac{3.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{35.0 \text{ m}^2} = 1.08 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Los tutoriales **Master It** (en inglés) ayudan a los estudiantes a trabajar paso a paso el problema.

- Videos de soluciones Watch It que explican las estrategias de solución de problemas, para ayudar paso a paso a los estudiantes a través del problema. Además, los profesores pueden optar por incluir videos con sugerencias de las estrategias de solución de problemas. Una pantalla de captura a partir de una solución de video Watch It aparece a continuación:

Watch It

A ball is thrown directly downward with an initial speed of 8.00 m/s from a height of 30.0 m. After what time interval does it strike the ground?

$$y_f = y_i + v_i t - \frac{1}{2} g t^2$$

$$0 = 30 \text{ m} + (-8.00 \text{ m/s})t - 4.90 \text{ m/s}^2 t^2$$

$$t = \frac{+8.00 \pm \sqrt{(-8.00)^2 - 4(-4.90)(30)}}{2(-4.90)}$$

$$= \frac{+8.00 \pm \sqrt{64 + 588}}{-9.80}$$

$$t = 1.79 \text{ s}$$

Los videos **Watch It** (en inglés) ayudan a los estudiantes a visualizar los pasos necesarios para resolver un problema.

- La mayoría de los ejemplos resueltos, mejorada con sugerencias y retroalimentación, para ayudar a fortalecer las habilidades para resolver problemas
- Cada examen rápido, lo que proporciona a sus estudiantes amplia oportunidad para poner a prueba su comprensión conceptual

También están disponibles en Enhanced WebAssign

- figuras activas animadas, mejoradas con sugerencias y retroalimentación, para ayudar a los estudiantes a desarrollar sus habilidades de visualización
- un repaso matemático para ayudar a sus estudiantes a pulir conceptos cuantitativos clave
- un libro electrónico interactivo

Visite por favor www.webassign.net/brookscole para ver una demostración interactiva de Enhanced WebAssign.

El texto también se apoya en los siguientes sistemas de gestión de tareas. Contacte a su representante de ventas local para más información.

CAPA: un enfoque personalizado asistido por computadora y LON-CAPA,
<http://www.loncapa.org/>

CENGAGE
brain
 .com

CengageBrain.com

En **CengageBrain.com** los estudiantes serán capaces de ahorrar hasta 60% en los materiales (en inglés) del curso a través de nuestra gama completa de opciones. Tendrán la opción de alquilar sus libros de texto, comprar libros de texto impresos, electrónicos o capítulos individuales electrónicos y audio libros, todos con ahorros sustanciales en los precios promedio de venta. **CengageBrain.com** también incluye acceso a la amplia gama de tareas y herramientas de estudio Cengage Learning y cuenta con una elección de contenido libre.

Sistemas personales de respuesta

JoinIn de TurningPoint Posee un libro de preguntas específicas y muestra sin error las respuestas de los estudiantes, dentro de las diapositivas de Microsoft PowerPoint® de su propia conferencia en relación con el hardware “clicker” de su elección. Joinin de TurnIngPoint trabaja con la mayor parte de los teclados de sistemas de infrarrojos o de radiofrecuencia, incluyendo ResponseCard, EduCue, H-ITT y computadoras portátiles, inclusive. Póngase en contacto con su representante de ventas local para aprender más acerca de nuestro software y hardware de respuesta personal.

Sistemas de respuesta de audiencia (en inglés)

Sin importar el sistema de respuesta que utilice, proporcionamos el contenido probado para apoyarlo. El contenido listo para llevar incluye:

- todas las preguntas de los exámenes rápidos;
- todas las preguntas de opción múltiple al final de capítulo, preguntas de prueba y una selección de preguntas al final de capítulo para proporcionarle útiles puntos de control conceptual para utilizar en su clase; y
- las animaciones de las figuras activas también se mejoraron con preguntas de opción múltiple para ayudar a probar las habilidades de observación de los estudiantes;
- también se presenta el contenido de valoración para aprender en el aula de la Universidad de Massachusetts en Amherst. Esta colección de 250 preguntas conceptuales avanzadas se puso a prueba en sus aulas durante más de 10 años y lleva el aprendizaje por pares a un nuevo nivel.

Nuestro contenido exclusivo del sistema de respuesta de audiencia es perfecto para usuarios aficionados, intermedios o avanzados de esta tecnología para el nuevo aprendizaje. El contenido de nuestra plataforma neutral es perfecto para su uso con el programa “clicker” de su elección. ¿Le interesa adoptar la tecnología de sistema de respuesta de audiencia? Considere nuestro software JoinIn en TurningPoint®, compatible con Microsoft PowerPoint® y el hardware de soluciones de infrarrojos o de radiofrecuencia.

Visite www.cengage.com/physics/serway para descargar muestras del contenido del sistema de respuesta de audiencia.

Recursos para presentación de clases (en inglés)

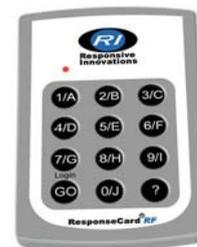
Los siguientes recursos proporcionan apoyo para sus presentaciones en clase.

DVD-ROM PowerLecture™ Una herramienta para clases multimedia fácil de usar, el DVD-ROM PowerLecture le permite ensamblar rápidamente ilustraciones, animaciones, video digital y archivos de base de datos con notas para crear clases fluidas. El conjunto de dos volúmenes (Volumen 1: capítulos 1-14; Volumen 2: capítulos 15-30) incluye clases preconstruídas en PowerPoint®, una base de datos de animaciones, videoclips e ilustraciones digitales del texto, así como archivos electrónicos editables a través del Solution Builder. El DVD-ROM también incluye el generador computarizado de exámenes ExamView®, que le da la capacidad de elaborar pruebas que ofrecen un número ilimitado de preguntas nuevas o de cualquiera de las preguntas existentes en el Test Bank preinstalado. Por último, el DVD-ROM incluye el sistema de respuesta de audiencia con el contenido específico para el libro de texto. Contacte a su representante de ventas local para aprender más acerca del software y el hardware de respuesta de audiencia.

Recursos de calificación y de preparación del curso

Algunos de los recursos que se mencionan a continuación le ayudarán con los procesos de calificación y preparación.

Instructor’s Solutions Manual por Charles Teague. Disponible en dos volúmenes, el *Instructor’s Solutions Manual* contiene las soluciones completas para todos los problemas, preguntas de opción múltiple y preguntas conceptuales en el texto y respuestas completas con explicaciones a los exámenes rápidos. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14, y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30. En el DVD-ROM PowerLecture también están disponibles los archivos electrónicos del Instructor’s Solutions Manual.



Banco de exámenes impresos por Ed Oberhofer (University of North Carolina en Charlotte y Lake-Sumter Community College). Disponible en dos volúmenes de DVD-ROM a través del software de exámenes ExamView®. Este banco de exámenes en dos volúmenes contiene aproximadamente 1 750 problemas y preguntas de opción múltiple. Los instructores pueden imprimir y duplicar las páginas para distribuir las entre los estudiantes. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14, y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30. Versiones WebCt y Blackboard del banco de exámenes están disponibles en el sitio web para el instructor en la dirección www.cengage.com/physics/serway.

Sitio web para el instructor Consulte el sitio web del instructor en www.cengage.com/physics/serway para una guía de correlación de problemas, clases muestra en PowerPoint® y contenido de respuesta de audiencia JoinIn. Los instructores que adopten la novena edición de *Fundamentos de Física* podrán descargar estos materiales después de asegurar la contraseña adecuada por parte de su representante de ventas local Cengage Learning.

Materiales de apoyo para el instructor (en inglés)

Los materiales de apoyo para el instructor están disponibles para adoptantes calificados. Por favor, contacte a su representante de ventas local para más detalles. Visite www.cengage.com/physics/serway para

- solicitar una copia impresa
- contactar a su representante local
- descargar archivos electrónicos de materiales seleccionados

Recursos para el estudiante (en inglés)

Visite el sitio www.cengage.com/physics/serway para ver ejemplos de suplementos seleccionados para los estudiantes. Vaya también a **CengageBrain.com** para adquirir y tener acceso a este producto en la tienda en línea preferida de Cengage Learning.

Students Solutions Manual and Study Guide por John R. Gordon, Charles Teague y Raymond A. Serway. Ahora en dos volúmenes, el *Student Solutions Manual/Study Guide* presenta soluciones detalladas a aproximadamente 12 problemas por capítulo. Los números en recuadro identifican aquellos problemas en el texto para los cuales sus soluciones completas se encuentran en el manual. En éste también se presenta una sección de habilidades, notas relevantes de secciones clave del texto y una lista de ecuaciones y conceptos importantes. El Volumen 1 contiene los capítulos 1 al 14 y el Volumen 2 los capítulos 15 al 30.

Premium eBook Este libro electrónico interactivo incluye enlaces a las figuras activas animadas y permite a los estudiantes resaltar el texto, añadir sus propias notas y marcar las páginas. Los estudiantes pueden acceder al libro electrónico a través de Enhanced WebAssign.

Physics CourseMate incluye

- un libro electrónico interactivo
- herramientas de enseñanza interactiva y de aprendizaje, incluyendo:
 - pruebas
 - las tarjetas de vocabulario
 - los videos de la solución
 - las animaciones con ejercicios interactivos
 - y más
- Engagement Tracker, una herramienta de primera en su tipo, que supervisa la participación del estudiante en el curso.

Physics CourseMate de Cengage Learning trae a la vida los conceptos del curso con el aprendizaje interactivo, el estudio y herramientas de preparación de exámenes que apoyan el libro de texto impreso. Observe cómo la comprensión de los estudiantes se dispara, cómo la clase trabaja con el libro de texto impreso y la página web del libro de texto específico. ¡Physics CourseMate va más allá del libro para ofrecerle lo que necesita! Obtenga más información en www.cengage.com/coursemate.

CENGAGE brain.com
buy. rent. access.

 **CourseMate**

Physics Laboratory Manual, 3a. edición, por David Loyd (Angelo State University). El *Physics Laboratory Manual* complementa el aprendizaje de los principios básicos de la física mientras se introducen los procedimientos y equipo de laboratorio. Cada capítulo del manual incluye una asignación de prelaboratorio, objetivos, lista de equipo, la teoría detrás del experimento, procedimientos experimentales, gráficas y preguntas. Para cada experimento se proporciona un reporte de laboratorio, de modo que el estudiante pueda registrar datos, cálculos y resultados experimentales. Para desarrollar su habilidad para juzgar la validez de sus resultados, se alienta a los estudiantes a aplicar análisis estadístico a sus datos. También está disponible un completo *Manual del instructor* para facilitar el uso de este manual.

Agradecimientos

Al preparar la novena edición de este libro, fuimos guiados por la experiencia de muchas personas quienes revisaron manuscritos o proporcionaron sugerencias previas a las revisiones. Queremos agradecer a los siguientes revisores y expresar nuestro sincero reconocimiento por sus útiles sugerencias, críticas y aliento.

Revisores de la novena edición:

Thomas K. Bolland, <i>The Ohio State University</i>	Sylvio May, <i>North Dakota State University</i>
Kevin R. Carter, <i>School of Science and Engineering Magnet</i>	Alexey A. Petrov, <i>Wayne State University</i>
David Cinabro, <i>Wayne State University</i>	Scott Pratt, <i>Michigan State University</i>
Mark Giroux, <i>East Tennessee State University</i>	Scott Saltman, <i>Phillips Exeter Academy</i>
Torgny Gustafsson, <i>Rutgers University</i>	Bartlett M. Sheinberg, <i>Houston Community College</i>
Martha Lietz, <i>Niles West High School</i>	Gay Stewart, <i>University of Arkansas</i>
Rafael Lopez-Mobilia, <i>University of Texas at San Antonio</i>	Michael Willis, <i>Glen Burnie High School</i>

Las siguientes personas realizaron una cuidadosa comprobación de la veracidad de *Fundamentos de Física*, novena edición: Phil Adams, *Louisiana State University*; Grant W. Hart, *Brigham Young University*; John Hughes, *Embry-Riddle Aeronautical University*; Ed Oberhofer, *Lake Sumter Community College*; M. Anthony Reynolds, *Embry-Riddle Aeronautical University*; y Eugene Surdutovich, *Oakland University*. Aunque la responsabilidad de cualquier error restante descansa sobre nosotros, les agradecemos su dedicación y vigilancia.

Gerd Kortemeyer y Randall Jones contribuyeron con varios problemas al final de capítulo, especialmente con aquellos de interés para las ciencias de la vida. Edward F. Redish, de la Universidad de Maryland, con gentileza nos permitió citar algunos de sus problemas del Activity Based Physics Project.

Nuestro especial reconocimiento y el agradecimiento va para el personal de Brooks/Cole Cengage Learning, en particular, Mary Finch, Charlie Hartford, Ed Dodd, Brandi Kirksey (quien dirigió el programa de auxiliares y mucho más), Cathy Brooks, Joshua Duncan, Laura Bowen, Brendan Killion, Rebecca Berardy Schwartz, Sam Subity, Nicole Molica y Michelle Julet, por su excelente trabajo durante el desarrollo, producción y promoción de este libro de texto. Reconocemos el servicio de producción especializada y excelentes ilustraciones proporcionado por el personal de Lachina Publishing Services y los esfuerzos dedicados a la investigación de fotos de Jaime Jankowski y Sara Golden en PreMediaGlobal. Finalmente, tenemos una profunda deuda con nuestras esposas e hijos por su amor, apoyo y sacrificios de largo plazo.

Raymond A. Serway
St. Petersburg, Florida

Chris Vuille
Daytona Beach, Florida

Atractivas aplicaciones

Aunque la física es relevante para gran parte de la vida moderna, puede no ser obvia para los estudiantes en un curso introductorio. En esta novena edición de *Fundamentos de Física*, continuamos una característica de diseño que comenzó en la séptima edición. Esta característica hace más obvia la relevancia de la física para la vida diaria, al puntualizar aplicaciones específicas en forma de una nota marginal. Algunas de estas aplicaciones pertenecen a las ciencias de la vida y están marcadas con el icono **BIO**. El siguiente índice no tiene la intención de ser un listado completo de todas las aplicaciones de los principios de la física que se encuentran en este texto. Dentro del texto se encuentran muchas otras aplicaciones, en especial en los ejemplos resueltos, preguntas conceptuales y problemas de fin de capítulo.

Capítulo 3

Salto de longitud, p. 68

Capítulo 4

Cinturón de seguridad, p. 89
Vuelo de un helicóptero, p. 96
Colisión de vehículos, p. 97
Paracaidismo, p. 111

Capítulo 5

BIO Movimiento flagelar; bioluminiscencia, p. 146
Impacto de asteroide, p. 147
BIO Shamu sprint (energía generada por la orca), p. 149
BIO Energía y potencia en un salto vertical, pp. 150-152
BIO Dieta frente a ejercicio en programas de pérdida de peso, p. 151
BIO Rendimiento de potencia máxima de los seres humanos en diferentes periodos (tabla), p. 152

Capítulo 6

BIO Boxeo y lesión cerebral, p. 169
BIO Lesión a los pasajeros en colisiones de automóvil, p. 171
BIO Conservación de la cantidad de movimiento y propulsión de un calamar, p. 173
BIO Prueba de glaucoma, p. 176
El profesor Goddard tenía razón: los cohetes funcionan en el espacio, p. 185
Cohetes de varias etapas, p. 186

Capítulo 7

Sitio de lanzamiento ESA, p. 204
Discos fonográficos y compactos, p. 205
Gravedad artificial, p. 210
Caminos peraltados, p. 213
¿Por qué el Sol es caliente?, p. 219
Órbitas geosincrónicas y satélites de comunicación, p. 223

Capítulo 8

BIO Localización del centro de gravedad de su compañero, p. 243
BIO Un peso sobre el antebrazo, p. 244
Engranajes de una bicicleta, p. 248
BIO Calentando el brazo, p. 252
Patinadora artística, p. 257
Salto mortal en el aire, p. 257
Rotación de una estrella de neutrones, p. 258

Capítulo 9

Raquetas para nieve, p. 280
El truco de la cama de clavos, p. 281
BIO Lesiones en fútbol, p. 285
Estructuras de arcos en edificios, p. 287
BIO Dolor en el oído, p. 290

Elevadores hidráulicos, p. 290
Construcción de las pirámides, p. 292
BIO Descompresión y lesiones a los pulmones, p. 292
BIO Medición de la presión sanguínea, p. 293
Bolígrafos, p. 293
BIO Vejigas natatorias en los peces, p. 295
BIO Control de la flotación en los peces, p. 295
BIO Líquido cefalorraquídeo, p. 295
Verificación del nivel de anticongelante, p. 295
Verificación de la carga de una batería, p. 296
Vuelo de una pelota de golf, p. 305
“Atomizadores” en botellas de perfume y dispersadores de pintura, p. 305
BIO Palpitación vascular y aneurismas, p. 305
Sustentación en las alas de aviones, p. 306
Navegar contra el viento, p. 307
Plomería doméstica, p. 307
Motores de cohetes, p. 307
BIO Tensión superficial de un saco de aire, p. 309
BIO Caminando sobre el agua, p. 309
Detergentes y agentes, p. 311
BIO Muestras de sangre con tubos capilares, p. 312
BIO Acción capilar en plantas, p. 312
BIO Ley de Poiseuille y flujo sanguíneo, p. 314
BIO Una transfusión de sangre, p. 314
BIO Flujo sanguíneo turbulento, p. 315
BIO Efecto de ósmosis en células vivas, p. 316
BIO Función renal y diálisis, p. 317
BIO La separación de las moléculas biológicas con centrifugación, p. 319

Capítulo 10

BIO Temperatura de la piel, p. 336
Juntas de expansión térmica, p. 338
Vidrio Pyrex, p. 338
Bandas bimetalicas y termostatos, p. 339
Elevación del nivel del mar, p. 341
BIO Calentamiento global e inundación de las costas, p. 342
BIO La expansión del agua congelada y la vida en la Tierra, p. 343
Tuberías que colapsan en invierno, p. 343
Expansión y temperatura, p. 353

Capítulo 11

BIO Quemando las calorías del desayuno, p. 364
BIO Fisiología del ejercicio, p. 364
Brisas marinas y térmicas, p. 365
BIO Las pérdidas conductivas del cuerpo humano, p. 376
BIO Temperatura de la ballena minke, p. 377
Aislamiento de casas, p. 377
Construcción y aislamiento térmico, p. 378
Enfriando motores de automóviles, p. 380

BIO Proliferación de algas en estanques y lagos, p. 380
BIO Temperatura corporal, p. 381
Ropa de verano de color claro p. 382
BIO Termografía, p. 383
Termómetros de radiación para medir la temperatura corporal, p. 383
Radiación térmica y visión nocturna, p. 383
El club del oso polar, p. 384
Termos, p. 385
BIO Calentamiento global y gases de efecto invernadero, pp. 385-386

Capítulo 12

Refrigeradores y bombas de calor, pp. 413-414
Máquinas de movimiento perpetuo, p. 419
La dirección del tiempo, p. 422
BIO Metabolismo humano, p. 424
BIO Lucha contra la obesidad, p. 425

Capítulo 13

Arquería, p. 442
Pistones y ruedas motrices, p. 446
Saltando de un bungee, p. 447
Relojes de péndulo, p. 452
Uso del péndulo en prospección, p. 453
Amortiguadores, p. 455
Cuerdas de guitarra, p. 460

Capítulo 14

BIO Usos médicos del ultrasonido, p. 474
BIO Aspirador quirúrgico ultrasónico cavitron, p. 475
BIO Ultrasonido focalizado de alta intensidad (HIFU), p. 475
Unidad de frecuencia ultrasónica para cámaras, p. 475
Los sonidos escuchados durante una tormenta, p. 477
BIO Regulaciones de la OSHA sobre el nivel de ruido, p. 480
Ondas de choque, p. 487
Conexión de los altavoces de un estéreo, p. 488
Afinación de un instrumento musical, p. 491
Fundamentos de la guitarra, p. 492
Rompiendo copas con la voz, p. 494
Integridad estructural y resonancia, p. 494
Osilaciones en un puerto, p. 496
¿Por qué deben calentarse los instrumentos?, p. 497
¿Cómo funcionan los bugles?, p. 497
Uso de las pulsaciones para afinar un instrumento musical, p. 499
¿Por qué el profesor habla como el Pato Donald?, p. 501
BIO El oído, p. 502
BIO Implantes de caracol, p. 503

Capítulo 15

Medición de los campos eléctricos atmosféricos, p. 528
 Pararrayos, p. 531
 Seguridad al conducir durante tormentas eléctricas, p. 531

Capítulo 16

Baterías de automóvil, p. 553
 El precipitador electrostático, p. 560
 Limpiador electrostático de aire, p. 561
 Fotocopiadoras xerográficas, p. 561
 Impresoras láser, p. 562
 Receptáculos de flash de cámara, p. 564
 Teclados de computadora, p. 564
 Confinamiento electrostático, p. 564
BIO Desfibriladores, p. 572
 Busca travesaños, p. 576

Capítulo 17

Poca iluminación de los focos viejos, p. 598
 Falla de focos, p. 602
BIO Actividad eléctrica en el corazón, pp. 605-608
BIO Electrocardiogramas, p. 605
BIO Marcapasos cardíacos, p. 606
BIO Desfibriladores cardioversores implantables, p. 607

Capítulo 18

Luces de navidad en serie, pp. 618-619
 Interruptores, p. 623
 Focos de tres vías, pp. 623-624
 Limpiaparabrisas intermitentes, p. 630
BIO Crecimiento bacterial, p. 630
 Destalladores en la autopista, p. 631
 Fusibles e interruptores, p. 634
 Tercer alambre en aparatos al consumidor, p. 634
BIO Conducción de señales eléctricas por las neuronas, pp. 635-637

Capítulo 19

Polvos para huellas digitales, p. 650
BIO Bacterias magnéticas, p. 651
 Marcaje de las pistas de aterrizaje en los aeropuertos, p. 652
 Brújulas en Australia, p. 652
 Operación de bocina, p. 657
BIO Bombas electromagnéticas para corazones y riñones artificiales, p. 657
 Relámpagos, p. 657
 Motores eléctricos, p. 661
 Espectrómetros de masas, p. 663

Capítulo 20

Interruptores de fallo a tierra, p. 696
 Bobinas de captación de guitarra eléctrica, p. 696
BIO Monitores de apnea, p. 697
 Catapulta espacial, pp. 698-699

Generadores de corriente alterna, p. 701
 Generadores de corriente directa, p. 702
 Motores, p. 704

Capítulo 21

BIO Campos eléctricos y tratamiento de cáncer, pp. 723, 726-727
 Corrimiento de fase para entregar más potencia, p. 735
 Sintonía de su radio, p. 736
 Detectores de metales en el juzgado, p. 736
 Transmisión de energía eléctrica a larga distancia, p. 738
 Transmisión de ondas de radio, p. 741
 Polvo del Sistema Solar, p. 744
 Un techo caliente de estaño (hogares con energía solar), p. 745
BIO Luz y tratamiento de heridas, p. 749
BIO El Sol y la evolución del ojo, p. 749

Capítulo 22

Cómo ver el camino en una noche lluviosa, p. 764
BIO Ojos rojos en fotografías con flash, p. 764
 Los colores de las ondas de agua en el atardecer, p. 764
 Imágenes dobles, p. 765
 Refracción de luz láser en un disco de video digital (DVD), pp. 770-771
 Cómo identificar gases con un espectrómetro, p. 772
 Periscopios de submarinos, p. 778
BIO Fibras ópticas en diagnóstico médico y cirugía, p. 779
 Fibras ópticas en telecomunicaciones, p. 779
 Diseño de una fibra óptica, p. 780

Capítulo 23

Configuraciones de día y noche para espejos retrovisores, pp. 792-793
 Truco de ilusionista, p. 793
 Cóncavo frente a convexo, p. 798
 Ondas reversibles, p. 798
BIO Visión submarina, p. 802
BIO Máscaras de visión y buceo, p. 808

Capítulo 24

Un humeante experimento de Young, p. 828
 Interferencia de señal de televisión, p. 828
 Comprobación de imperfecciones en lentes ópticas, p. 832
 Espejos perfectos p. 834
 La física de CD y DVD, p. 835
 Difracción de ondas sonoras, p. 838
 Prisma frente a rejilla, p. 841
 Arcos iris desde un disco compacto, p. 841
 Rastreo de información en un CD, p. 841
 Microondas de polarización, p. 844
 Lentes polarizados, p. 846
 Cómo encontrar las concentraciones de soluciones mediante su actividad óptica, p. 847

Pantallas de cristal líquido (LCD), pp. 847-849

Capítulo 25

La cámara, pp. 859-860
BIO El ojo, pp. 860-862
BIO Uso de lentes ópticos para corregir defectos, p. 862
BIO Prescripción de una lente correctiva para un paciente hipermetrope, pp. 863-864
BIO Una lente correctiva para miopía, pp. 863-865
 Visión del hombre invisible, p. 864
BIO Ojos de gato, p. 873

Capítulo 26

Relojes rápidos en una "ciudad de una milla de alto", p. 905

Capítulo 27

Colores de las estrellas, p. 912
 Fotoceldas, p. 916
 Uso de rayos X para estudiar la obra de pintores maestros, p. 918
BIO Microscopios electrónicos, p. 924
 ¿Microscopios de rayos X?, p. 925

Capítulo 28

Descubrimiento del helio, p. 936
 Térmico o espectral, p. 937
 Auroras, p. 937
 Tecnología láser, p. 950

Capítulo 29

Enlace de nucleones y electrones, pp. 961-962
 Energía y vida media, p. 966
 Datación con carbono, p. 969
 Detectores de humo, p. 969
BIO Contaminación con radón, pp. 969-970
 ¿Debes reportar este esqueleto a homicidios? p. 970
BIO Aplicaciones médicas de la radiación, pp. 973-976
BIO Límites de la exposición ocupacional a la radiación, p. 974
BIO Irradiación de alimentos y equipo médico, p. 975
BIO Trazadores radioactivos en medicina, p. 975
BIO Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM), pp. 975-976

Capítulo 30

Productos inestables, p. 983
 Diseño de un reactor nuclear, p. 985
 Reactores de fusión, p. 987
BIO Tomografía por emisión de positrones (TEP), p. 990
 Rompimiento de las leyes de conservación, pp. 994-995
 Conservación de número mesónico, p. 996

Como estudiante, es importante que entienda cómo usar este libro de manera más eficaz y cómo aprender mejor física. Explorar el prefacio le dará detalles de las diversas características disponibles, tanto en el libro como en línea. Estar al tanto de sus recursos educativos y cómo usarlos es esencial. Aunque la física es desafiante, puede dominarse con el abordaje correcto.

Cómo estudiar

Con frecuencia los estudiantes preguntan cuál es la mejor forma de estudiar física y prepararse para los exámenes. No hay una respuesta simple a esta pregunta, pero queremos ofrecerle algunas sugerencias con base en nuestra propia experiencia al aprenderla y enseñarla a través de los años.

Primero y más importante, mantenga una actitud positiva hacia la materia. Al igual que aprender un idioma, la física toma tiempo. Quienes se aplican en una *base diaria* pueden esperar alcanzar comprensión y triunfar en el curso. Tenga en mente que la física es la más fundamental de todas las ciencias naturales. Otros cursos de ciencia que continúan usarán los mismos principios físicos, así que es importante que entienda y pueda aplicar los diversos conceptos y teorías que se discuten en el texto. ¡Son relevantes!

Conceptos y principios

Usualmente los estudiantes intentan hacer su tarea sin estudiar primero los conceptos básicos. Es esencial que entienda los conceptos y principios básicos *antes* de intentar resolver los problemas asignados. Esta meta la puede lograr mejor al leer cuidadosamente el texto *antes* de asistir a su clase acerca del material tratado. Cuando lea el texto, debe anotar aquellos puntos que no son claros para usted. También, asegúrese de hacer un esfuerzo diligente por resolver los exámenes rápidos conforme los encuentre en su lectura. Hemos trabajado duro para preparar preguntas que lo ayuden a juzgar por sí mismo cuán bien entiende el material. Ponga mucha atención a los diversos Tips a lo largo del texto. Lo ayudarán a evitar malas interpretaciones, errores y equívocos, así como a maximizar la eficiencia de su tiempo al minimizar las aventuras a lo largo de rutas infructuosas. Durante la clase, tome notas y plantee preguntas acerca de aquellas ideas que no le sean claras. Tenga en mente que pocas personas son capaces de absorber todo el significado del material científico después de una sola lectura. Sus clases y trabajo en laboratorio complementan su libro de texto y deben clarificar algo del material más difícil. Debe minimizar la simple memorización del material. La memorización exitosa de pasajes del texto, ecuaciones y derivaciones no necesariamente indica que entendió los principios fundamentales.

Su comprensión mejorará a través de una combinación de eficientes hábitos de estudio, discusiones con otros estudiantes y con instructores y su habilidad para resolver los problemas que se presentan en el texto. Plantee preguntas siempre que considere necesario clarificar un concepto.

Horario de estudio

Es importante que establezca un horario de estudio, de preferencia diario. Asegúrese de leer el programa de estudio del curso y apéguese al horario establecido por su instructor. Como regla general, debe dedicar alrededor de dos horas de tiempo de estudio por cada hora que esté en clase. Si tiene problemas con el curso, busque el consejo del instructor u otros estudiantes que tomen el curso. Acaso descubrirá que necesita mayor instrucción de estudiantes experimentados. Con mucha frecuencia, los instructores ofrecen sesiones de repaso además de periodos de clase regulares. Es importante que evite la práctica de demorar el estudio hasta un día o dos antes de un examen. Una hora de estudio al día durante 14

días es mucho más eficaz que 14 horas el día anterior al examen. Por lo general, “atiborrarse” produce resultados desastrosos, especialmente en ciencia. En lugar de emprender una sesión de estudio de toda la noche inmediatamente antes de un examen, revise brevemente los conceptos y ecuaciones básicas y tenga una noche de buen descanso. Si cree que necesita ayuda adicional para comprender los conceptos, para preparar los exámenes o en la solución de problemas, le sugerimos adquirir una copia (en inglés) del *Student Solutions Manual/Study Guide* que acompaña a este libro; este manual está disponible a través de su representante local.

Visite el sitio web de *Fundamentos de Física* www.cengage.com/physics/serway para ver muestras de los suplementos seleccionados para los estudiantes. Vaya a CengageBrain.com para comprar y tener acceso a este producto en la tienda en línea preferida de Cengage Learning.

Use las características

Debe usar todas las características del texto presentadas en el prefacio. Por ejemplo, las notas marginales son útiles para localizar y describir ecuaciones y conceptos importantes, y las **negritas** indican enunciados y definiciones importantes. En los apéndices aparecen muchas tablas útiles, pero la mayoría de éstas se incorporan en el texto donde se consultan con más frecuencia. El apéndice A es un repaso conveniente de técnicas matemáticas.

Las respuestas a todos los exámenes rápidos y preguntas ejemplo, así como a preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas de número impar se proporcionan al final del libro. Las respuestas a problemas de fin de capítulo seleccionados se proporcionan en el *Student Solutions Manual/Study Guide*. Las estrategias para solución de problemas que se incluyen en capítulos seleccionados a lo largo del texto le proporcionan información adicional acerca de cómo debe resolver problemas. Los contenidos ofrecen un panorama de todo el texto y el índice le permiten localizar rápidamente material específico. En ocasiones se usan notas al pie de página para complementar el texto o citar otras referencias acerca del tema que se estudia.

Después de leer un capítulo, debe poder definir cualquier cantidad nueva que se introduzca en dicho capítulo y discutir los principios y supuestos que se usaron para llegar a ciertas relaciones clave. Los resúmenes de capítulo y las secciones de repaso del *Student Solutions Manual/Study Guide* deben ayudarlo en este aspecto. En algunos casos, quizá sea necesario que se remita al índice del texto para localizar ciertos temas. Debe asociar correctamente cada cantidad física con el símbolo utilizado para representar dicha cantidad y la unidad en la que se especifica la cantidad. Más aún, debe poder expresar cada relación importante en un enunciado en prosa conciso y preciso.

Solución de problemas

R. P. Feynman, Premio Nobel de Física, dijo alguna vez: “No sabes algo hasta que lo practicas”. Al tomar en cuenta este enunciado, le aconsejamos encarecidamente que desarrolle las habilidades necesarias para resolver un amplio rango de problemas. Su habilidad para resolver problemas será una de las pruebas principales de su conocimiento de física, así que intente resolver tantos problemas como sea posible. Es esencial que entienda los conceptos y principios básicos antes de intentar resolver problemas. Es buena práctica intentar encontrar soluciones alternativas al problema muestra. Por ejemplo, puede resolver problemas de mecánica con las leyes de Newton, pero con frecuencia un método alternativo que se apoya en consideraciones energéticas es más directo. No debe engañarse al pensar que entiende un problema simplemente porque observó cómo se resolvió en clase. Debe resolver el problema y problemas similares por cuenta propia. Los ejemplos de este libro los presentamos en un formato especial de dos columnas para ayudarlo en este aspecto. Después de estudiar un ejemplo, vea si puede cubrir el lado derecho y hacerlo usted mismo, usando sólo como sugerencias las descripciones escritas a la izquierda. Una vez que triunfe en ello, intente resolver completamente el ejercicio por cuenta propia. Finalmente, responda la pregunta y resuelva el ejercicio. Una vez que complete todos estos pasos, tendrá un buen dominio del problema, sus conceptos y la técnica matemática. Después de estudiar en esta forma todos los problemas ejemplo, está listo para abordar los problemas

al final del capítulo. De éstos, los problemas guiados proporcionan otra ayuda para aprender cómo resolver algunos de los problemas más complejos.

El planteamiento para solucionar problemas se debe planear cuidadosamente. Un plan sistemático es especialmente importante cuando un problema involucre muchos conceptos. Primero, lea el problema varias veces hasta que esté seguro de que entiende lo que se pregunta. Busque cualquier palabra clave que lo ayude a interpretar el problema y acaso le permita plantear ciertos supuestos. Su habilidad para interpretar una pregunta de manera adecuada es parte integral para la solución de problemas. Segundo, debe adquirir el hábito de escribir la información dada en un problema y aquellas cantidades que necesite encontrar; por ejemplo, puede elaborar una tabla que mencione tanto las cantidades dadas como las cantidades a encontrar. Este procedimiento a veces se utiliza en los ejemplos resueltos del libro. Después de decidir acerca del método que cree adecuado para un problema dado, proceda con su solución. Finalmente, compruebe sus resultados para ver si son razonables y consistentes con su comprensión inicial del problema. En el texto se incluyen estrategias generales de este tipo para la solución de problemas y se resaltan con un recuadro. Si sigue los pasos de este procedimiento, encontrará que es más fácil llegar a una solución y también ganará más de sus esfuerzos.

Con frecuencia, los estudiantes fallan para reconocer las limitaciones de ciertas ecuaciones o leyes físicas en una situación particular. Es muy importante que entienda y recuerde los supuestos subyacentes a una teoría o formalismo particular. Por ejemplo, ciertas ecuaciones de cinemática se aplican sólo a una partícula que se mueve con aceleración constante. Dichas ecuaciones no son válidas para describir el movimiento cuya aceleración no es constante, como lo es el movimiento de un objeto conectado a un resorte o el movimiento de un objeto a través de un fluido.

Experimentos

Puesto que la física es una ciencia que se basa en observaciones experimentales, le recomendamos que complemente el texto con la realización de varios tipos de experimentos “manuales”, ya sea en casa o en el laboratorio. Por ejemplo, el Slinky™ común es excelente para estudiar ondas viajeras; una bola que se balancea en el extremo de una cuerda larga se puede usar para investigar el movimiento de péndulo; varias masas unidas al extremo de un resorte vertical o liga de caucho se pueden usar para determinar su naturaleza elástica; un viejo par de gafas polarizadas y algunas lentes de desecho y una lupa son los componentes de varios experimentos en óptica, y la medida aproximada de la aceleración de caída libre se puede determinar al medir simplemente con un cronómetro el tiempo que tarda una bola en caer desde una altura conocida. La lista de tales experimentos es interminable. Cuando no estén disponibles modelos físicos, sea imaginativo e intente desarrollar modelos por cuenta propia.

Nuevos medios

Si es posible, le recomendamos que utilice el producto (en inglés) **Enhanced WebAssign** que está disponible con este libro de texto. Es mucho más fácil entender la física, si usted la ve en acción y los materiales disponibles en Enhanced WebAssign le permitirán convertirse en una parte de esa acción. Enhanced WebAssign se describe en el prólogo y es nuestra sincera esperanza de que encuentre en la física una experiencia emocionante y placentera y de la que usted se beneficiará con esta experiencia, independientemente de su profesión elegida.

Una invitación a la física

Esperamos que usted también encuentre la física como una experiencia excitante y agradable, y que se beneficie de esta experiencia, sin importar la profesión de su elección. ¡Bienvenido al excitante mundo de la física!

*Para ver el mundo en un grano de arena
y un cielo en una flor silvestre,
sostén el infinito en la palma de tu mano
y la eternidad en una hora.*

—William Blake, “Augurios de inocencia”

Bienvenido a su guía de preparación para el examen MCAT

La guía de preparación para el examen MCAT hace que su ejemplar de *Fundamentos de Física*, novena edición, sea la herramienta de estudio MCAT y el recurso en el aula que más abarca en la introducción a la física. La rejilla, que comienza abajo y continúa en las dos páginas siguientes, resalta 12 cursos de estudio basados en conceptos para la parte de física de su examen MCAT. Úsela para preparar el MCAT, exámenes en clase y sus tareas de casa.

Vectores

Objetivos de habilidad: Calcular distancia, ángulos entre vectores y magnitudes.

Plan de repaso:

Distancia y ángulos:

- Capítulo 1, secciones 1.7, 1.8
- Figura activa 1.6
- Problemas de capítulo 35, 41, 44

Uso de vectores:

- Capítulo 3, secciones 3.1, 3.2
- Exámenes rápidos 3.1-3.3
- Ejemplos 3.1-3.3
- Figura activa 3.3
- Problemas de capítulo 13

Fuerza

Objetivos de habilidad: Conocer y comprender las leyes de Newton y calcular fuerzas y pesos resultantes.

Plan de repaso:

Leyes de Newton:

- Capítulo 4, secciones 4.1-4.4
- Exámenes rápidos 4.1, 4.4
- Ejemplos 4.1-4.4
- Figura activa 4.8
- Problemas de capítulo 5, 11

Fuerzas resultantes:

- Capítulo 4, sección 4.5
- Exámenes rápidos 4.5, 4.6
- Ejemplos 4.8, 4.10, 4.11
- Problemas de capítulo 19, 37

Movimiento

Objetivos de habilidad: Comprender el movimiento en dos dimensiones y calcular rapidez y velocidad, aceleración centrípeta y aceleración en problemas de caída libre.

Plan de repaso:

Movimiento en una dimensión:

- Capítulo 2, secciones 2.1-2.6
- Exámenes rápidos 2.1-2.8
- Ejemplos 2.1-2.10
- Figura activa 2.15
- Problemas de capítulo 3, 10, 31, 50, 59

Movimiento en dos dimensiones:

- Capítulo 3, secciones 3.3, 3.4
- Exámenes rápidos 3.5-3.8
- Ejemplos 3.5-3.8
- Figuras activas 3.14, 3.15
- Problemas de capítulo 33

Aceleración centrípeta:

- Capítulo 7, sección 7.4
- Exámenes rápidos 7.6, 7.7
- Ejemplo 7.5

Equilibrio

Objetivos de habilidad: Calcular cantidad de movimiento e impulso, centro de gravedad y torque.

Plan de repaso:

Cantidad de movimiento:

- Capítulo 6, secciones 6.1-6.3
- Exámenes rápidos 6.2-6.6
- Ejemplos 6.1-6.4, 6.6
- Figuras activas 6.7, 6.10, 6.13
- Problemas de capítulo 23

Torque:

- Capítulo 8, secciones 8.1-8.4
- Ejemplos 8.1-8.6, 8.8
- Problemas de capítulo 5, 9

Trabajo

Objetivos de habilidad: Calcular fricción, trabajo, energía cinética, energía potencial y potencia.

Plan de repaso:

Fricción:

- Capítulo 4, sección 4.6
- Exámenes rápidos 4.7-4.9
- Figura activa 4.21

Trabajo:

- Capítulo 5, sección 5.1
- Examen rápido 5.1
- Ejemplo 5.1
- Figura activa 5.5

Energía:

- Capítulo 5, secciones 5.2, 5.3
- Ejemplos 5.4, 5.5
- Exámenes rápidos 5.2, 5.3

Potencia:

- Capítulo 5, sección 5.6
- Ejemplos 5.12, 5.13

Ondas

Objetivos de habilidad: Comprender la interferencia de las ondas y calcular las propiedades básicas de las ondas, de resortes y de péndulos.

Plan de repaso:

Propiedades de las ondas:

- Capítulos 13, secciones 13.1-13.4, 13.7-13.11
- Exámenes rápidos 13.1-13.6
- Ejemplos 13.6, 13.8-13.10
- Figuras activas 13.1, 13.8, 13.12, 13.13, 13.24, 13.26, 13.32, 13.33, 13.34, 13.35
- Problemas de capítulo 11, 17, 33, 45, 55, 61

Péndulo:

- Capítulo 13, sección 13.5
- Exámenes rápidos 13.7-13.9
- Ejemplo 13.7
- Figuras activas 13.15, 13.16
- Problema de capítulo 39

Materia

Objetivos de habilidad: Calcular presión, densidad, gravedad específica y relaciones de flujo.

Plan de repaso:

Propiedades:

- Capítulo 9, secciones 9.1-9.3
- Examen rápido 9.1
- Ejemplos 9.1, 9.2, 9.4
- Figura activa 9.7

Presión:

- Capítulo 9, secciones 9.2, 9.4-9.6
- Exámenes rápidos 9.2-9.6
- Ejemplos 9.1, 9.5-9.9
- Figuras activas 9.20, 9.21
- Problemas de capítulo 25, 43

Relaciones de flujo:

- Capítulo 9, secciones 9.7, 9.8
- Examen rápido 9.7
- Ejemplos 9.11-9.14
- Problema de capítulo 46

Sonido

Objetivos de habilidad: Comprender la interferencia de las ondas y calcular las propiedades de las ondas, la rapidez del sonido, los corrimientos Doppler y la intensidad.

Plan de repaso:

Propiedades del sonido:

- Capítulo 14, secciones 14.1-14.4, 14.6
- Exámenes rápidos 14.1, 14.2
- Ejemplos 14.1, 14.2, 14.4, 14.5
- Figuras activas 14.10
- Problemas de capítulo 27

Interferencia/batimientos:

- Capítulo 14, secciones 14.7, 14.8, 14.11
- Examen rápido 14.7
- Ejemplos 14.6, 14.11
- Figuras activas 14.18, 14.25
- Problemas de capítulo 37, 57



Stonehenge, en el sur de Inglaterra, fue construida hace miles de años para ayudar a mantener la sucesión de las estaciones. Al llegar el solsticio de verano, el Sol puede verse a través de estas enormes placas de piedra.

Introducción

1

El propósito de la física es proporcionar un entendimiento del mundo material mediante el desarrollo de teorías que surgen de observaciones experimentales. Una teoría física, por lo general expresada de manera matemática, describe cómo funciona un sistema físico. La teoría establece ciertas predicciones respecto al sistema físico que pueden ser verificadas después. Si las predicciones que se producen corresponden fielmente a lo que se observa en la realidad, entonces se establece la teoría, aunque permanezca provisional. Actualmente ninguna teoría ha proporcionado una descripción completa de todo fenómeno físico, incluso dentro de una determinada subdisciplina de la física. Cada teoría es una obra de mejoramiento.

Las leyes fundamentales de la física incluyen cantidades físicas como fuerza, velocidad, volumen y aceleración, las cuales se describen en términos de cantidades básicas. En mecánica, son convención las tres cantidades **longitud** (L), **masa** (M) y **tiempo** (T); las otras cantidades físicas pueden ser estructuradas a partir de estas tres.

1.1 Estándares de longitud, masa y tiempo

Para reportar el resultado de una medida de cierta cantidad física, debe definirse una *unidad* para la cantidad. Si, por ejemplo, se define la unidad básica de longitud que sea 1.0 metro y alguna persona que está familiarizada con el sistema de medida reporta que una pared es de 2.0 metros de alto, entonces la altura de la pared es dos veces la unidad básica de longitud. De la misma manera, si la unidad básica de la masa se define como 1.0 kilogramo y se dice que una persona tiene una masa de 75 kilogramos, entonces la persona tiene una masa 75 veces más grande que la unidad básica de masa.

En 1960 una comisión internacional coincidió en un sistema patrón de unidades para las cantidades básicas de la ciencia, denominado **SI** (Système International). Sus unidades de longitud, masa y tiempo son el metro, kilogramo y segundo, respectivamente.

- 1.1 Estándares de longitud, masa y tiempo
- 1.2 Elementos constitutivos de la materia
- 1.3 Análisis dimensional
- 1.4 Incertidumbre en la medición y cifras significativas
- 1.5 Conversión de unidades
- 1.6 Cálculos aproximados y de orden de magnitud
- 1.7 Sistemas de coordenadas
- 1.8 Trigonometría
- 1.9 Estrategia de solución de problemas

Longitud

En 1799 el metro se convirtió en el patrón legal de longitud en Francia, definido como una diezmillonésima de la distancia a partir del Ecuador hasta el Polo Norte. Hasta 1960, la longitud autorizada del metro fue la distancia entre dos líneas en una barra específica de una aleación de platino-iridio almacenado bajo condiciones controladas. Este modelo fue abandonado por varios motivos; el principal es que la medida de la separación entre las líneas no son lo suficientemente precisas. En 1960 el metro fue definido como 1 650 763.73 veces la longitud de onda de la luz rojo anaranjada emitida por una lámpara de kriptón-86. En octubre de 1983 esta definición también fue abandonada y **el metro se redefinió como la distancia recorrida por la luz en el vacío durante el intervalo de tiempo de 1/299 792 458 segundos**. Esta última definición establece la rapidez de la luz en 299 792 458 metros por cada segundo.

Definición de metro ►

Masa

La unidad de masa en el SI, el kilogramo, se define como la masa de un cilindro específico de aleación de platino-iridio que se guarda en la International Bureau of Weights and Measures en Sèvres, Francia (parecido al que se muestra en la figura 1.1a). Como se verá en el capítulo 4, la masa es una cantidad que se utiliza para medir la resistencia a un cambio en el movimiento de un objeto. Es más difícil provocar una alteración en el movimiento de un objeto de masa considerable, que un objeto con una masa más pequeña.

Definición de kilogramo ►

Tip 1.1 Ninguna coma en números con muchos dígitos

En la ciencia, los números con más de tres dígitos son escritos en grupos de tres, separados por un espacio, en lugar de comas; de tal modo que 10 000 es la misma que la notación común americana 10,000. De la misma manera, $\pi = 3.14159265$ se reescribe como 3.141 592 65.

Tiempo

Antes de 1960, el estándar de tiempo se definió en términos de la extensión promedio de un día solar en el año 1900. (Un día solar es el tiempo entre las apariciones consecutivas del Sol en el punto más alto que logra en el cielo cada día.) La unidad básica de tiempo, el segundo, se define como $(1/60)(1/60)(1/24) = 1/86400$ del promedio del día solar. En 1967 el segundo fue definido una vez más al tomar ventaja de la alta precisión lograda con un reloj atómico, que aplica la frecuencia característica de la luz emitida a causa del átomo de cesio-133 como su “reloj de referencia”. **Ahora el segundo se define como 9 192 631 700 veces el periodo de oscilación de radiación a causa del átomo de cesio**. El tipo de reloj atómico de cesio más reciente se muestra en la figura 1.1b.

Definición de segundo ►

Figura 1.1 a) El kilogramo estándar nacional núm. 20, una copia fiel del kilogramo estándar internacional que se guarda en Sèvres, Francia se aloja bajo una doble campana en una bóveda del National Institute of Standards and Technology. b) El reloj atómico de cesio; este reloj funcionará de manera exacta durante 20 millones de años.

Cortesía de National Institute of Standards and Technology, U.S. Dept. of Commerce



a

© 2005 Fotografía de Geoffrey Wheeler



b

Tabla 1.1 Valores aproximados de algunas longitudes observadas

	Longitud (m)
Distancia de la Tierra al cuásar conocido más alejado	1×10^{26}
Distancia de la Tierra a las galaxias normales conocidas más alejadas	4×10^{25}
Distancia de la Tierra a la galaxia cercana más grande (M31, la galaxia de Andrómeda)	2×10^{22}
Distancia de la Tierra a la estrella más cercana (Próxima Centauri)	4×10^{16}
Un año luz	9×10^{15}
Radio orbital promedio de la Tierra alrededor del Sol	2×10^{11}
Distancia promedio de la Tierra hacia la Luna	4×10^8
Radio promedio de la Tierra	6×10^6
Altitud representativa de satélites orbitando la Tierra	2×10^5
Longitud de un campo de fútbol	9×10^1
Longitud de una mosca doméstica	5×10^{-3}
Tamaño de las partículas de polvo más pequeñas	1×10^{-4}
Tamaño de las células de la mayoría de los seres vivos	1×10^{-5}
Diámetro del átomo de hidrógeno	1×10^{-10}
Diámetro del núcleo atómico	1×10^{-14}
Diámetro del protón	1×10^{-15}

Tabla 1.2 Valores aproximados de algunas masas

	Masa (kg)
Universo observable	1×10^{52}
Galaxia Vía Láctea	7×10^{41}
Sol	2×10^{30}
Tierra	6×10^{24}
Luna	7×10^{22}
Tiburón	1×10^2
Humano	7×10^1
Rana	1×10^{-1}
Mosquito	1×10^{-5}
Bacteria	1×10^{-15}
Átomo de hidrógeno	2×10^{-27}
Electrón	9×10^{-31}

Valores aproximados de longitud, masa e intervalos de tiempo

Los valores aproximados de algunas longitudes, masas e intervalos de tiempo se mencionan en las tablas 1.1, 1.2 y 1.3, respectivamente. Observe la amplia escala de valores. Estudie estas tablas para tener una idea de un kilogramo de masa (este libro tiene una masa de casi dos kilogramos), un intervalo de tiempo de 10^{10} segundos (un siglo es casi 3×10^9 segundos) o dos metros de longitud (la altura aproximada de un delantero en el equipo de basquetbol). En el apéndice A revise la notación en potencias de 10, tal como la expresión del número 50 000 en la forma 5×10^4 .

Los sistemas de unidades usualmente utilizados en física son el *Système International*, en el cual las unidades de longitud, masa y tiempo son el metro (m), kilogramo (kg) y segundo (s); el sistema cgs o gaussiano, en el que las unidades de longitud, masa y tiempo son los centímetros (cm), gramos (g) y segundos (s); y el sistema acostumbrado en Estados Unidos en el que las unidades de longitud, masa y tiempo son el pie (pie), slug y segundo. Las unidades SI son casi universalmente aceptadas en la ciencia y en la industria y serán aplicadas en todas las partes del texto. Se harán aplicaciones limitadas de las unidades gaussianas y de las que se acostumbran en Estados Unidos.

En la tabla 1.4 se mencionan algunos de los prefijos “métricos” (SI y cgs) que se utilizan con más frecuencia representados en potencias de 10 y sus abreviaciones. Por ejemplo,

Tabla 1.3 Valores aproximados de algunos intervalos de tiempo

	Intervalo de tiempo (s)
Edad del Universo	5×10^{17}
Edad de la Tierra	1×10^{17}
Edad promedio del estudiante universitario	6×10^8
Un año	3×10^7
Un día	9×10^4
Tiempo entre pulsos normales del corazón	8×10^{-1}
Periodo ^a de ondas sonoras audibles	1×10^{-3}
Periodo ^a de ondas de radio representativas	1×10^{-6}
Periodo ^a de vibración del átomo en un sólido	1×10^{-13}
Periodo ^a de ondas de luz visible	2×10^{-15}
Duración de una colisión nuclear	1×10^{-22}
Tiempo necesario para que la luz viaje a través de un protón	3×10^{-24}

^a Un *periodo* se define como el tiempo necesario para una vibración completa.

Tabla 1.4 Algunos prefijos para potencias de 10 aplicados con unidades “métricas” (SI y cgs)

Potencia	Prefijo	Abreviatura
10^{-18}	ato-	a
10^{-15}	femto-	f
10^{-12}	pico-	p
10^{-9}	nano-	n
10^{-6}	micro-	μ
10^{-3}	mili-	m
10^{-2}	centi-	c
10^{-1}	deci-	d
10^1	deca-	da
10^3	kilo-	k
10^6	mega-	M
10^9	giga-	G
10^{12}	tera-	T
10^{15}	peta-	P
10^{18}	exa-	E

10^{-3} m es equivalente a 1 milímetro (mm) y 10^3 m es 1 kilómetro (km). De la misma manera, 1 kg es igual a 10^3 g, y 1 megavolt (MV) es 10^6 volts (V). Es una buena idea memorizar los prefijos más comunes desde el principio: femto- hasta centi- y kilo- hasta giga- son utilizados rutinariamente por la mayoría de los físicos.

1.2 Elementos constitutivos de la materia

Un cubo de oro sólido de 1 kg (≈ 2 lb) tiene una longitud de arista de casi 3.73 cm (≈ 1.5 pulg). Si el cubo se corta a la mitad, las dos piezas resultantes retienen su identidad química como oro sólido. Pero ¿qué sucede si las piezas del cubo se cortan una vez más, de manera indefinida? Leucipo y Demócrito, filósofos griegos, no aceptaron la idea de que tales cortes pudieran continuar por siempre. Reflexionaron por último que el proceso finaliza cuando se produce una partícula que no pueda dividirse más. En griego, *atomos* significa “no divisible”. De este término surge el término en español *átomo*, alguna vez se creyó que era la partícula más pequeña de la materia, pero se encontró que está compuesta de partículas más elementales.

Naturalmente puede representarse al átomo como un diminuto Sistema solar, con un núcleo con carga densa positiva, ocupando la posición del Sol, y los electrones con carga negativa orbitando de manera parecida a los planetas. Este modelo del átomo, desarrollado por el gran físico danés Niels Bohr hace casi un siglo, condujo a comprender ciertas propiedades de los átomos más simples como el hidrógeno, pero deja de funcionar al explicar detalles más significativos de la estructura atómica.

Observe el tamaño de un átomo de hidrógeno, mencionado en la tabla 1.1 y el tamaño de un protón —los núcleos de un átomo de hidrógeno— unas 100 000 veces más pequeño. Si el protón fuera del tamaño de una bola de ping-pong, ¡el electrón sería una partícula diminuta casi del tamaño de una bacteria, orbitando al protón a un kilómetro de distancia! De la misma manera otros átomos están contruidos. De este modo, existe una cantidad extraordinaria de espacio vacío en la materia común.

Después del descubrimiento del núcleo a principios de 1900, surgieron preguntas relacionadas con su estructura. Hoy la composición exacta de los núcleos no ha sido definida por completo, pero en 1930 los científicos determinaron que dos entidades básicas —protones y neutrones— ocupan el núcleo. El *protón* es fundamental en la naturaleza, portador de carga positiva, igual en magnitud, pero de signo opuesto a la carga del electrón. El número de protones en un núcleo determina de qué elemento se trata. Por ejemplo, un núcleo que contiene sólo un protón es el núcleo de un átomo de hidrógeno, independientemente de cuántos neutrones estén presentes. Neutrones extras corresponden a diferentes isótopos de hidrógeno —deuterio y tritio— que reaccionan químicamente en la misma forma que el hidrógeno, pero que son más pesados. De la misma manera, un átomo que tiene dos protones en su núcleo, siempre es helio, aunque una vez más, son posibles diferentes números de neutrones.

Finalmente, en 1932 se comprobó la existencia de los *neutrones*. No tienen carga y tienen una masa casi igual a la del protón; una de sus finalidades básicas es de actuar como “pegamento” para mantener al núcleo unido. Si no estuvieran presentes los neutrones, la fuerza eléctrica de repulsión entre los protones con carga positiva ocasionaría que el núcleo se desintegrara.

La división no se detiene en este caso; ahora se piensa que en su momento protones, neutrones y una variedad de otras partículas exóticas están compuestos de seis partículas denominadas **quarks** (en consonancia con “horcón”, aunque en inglés rima algo con “tiburón”). A estas partículas se les ha dado los nombres *arriba*, *abajo*, *extraño*, *encanto*, *fondo* y *superior*. Los quarks arriba, encanto y superior cada uno tiene una carga igual a $+\frac{2}{3}$ del protón, mientras que los quarks abajo, extraño y fondo cada uno tiene una carga igual a $-\frac{1}{3}$ la carga del protón. El protón está compuesto de dos quarks arriba y un quark abajo (véase la figura 1.2), que produce la carga correcta para el protón, +1. El neutrón está compuesto de dos quarks abajo y un quark arriba y tiene una carga neta de cero.

Los quarks arriba y abajo son suficientes para describir toda la materia común, de tal modo que la existencia de los otros cuatro quarks, observados indirectamente en experi-



Don Farrall/Photodisc/Getty Images

Una pieza de oro está formada por átomos de oro.

En el centro de cada átomo hay un núcleo.

Dentro del núcleo hay protones (naranja) y neutrones (gris).

Los protones y los neutrones están compuestos por quarks. Un protón consiste en dos quarks arriba y uno abajo.

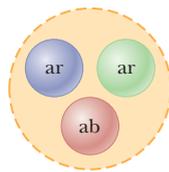
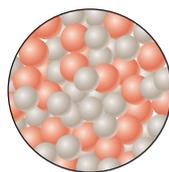
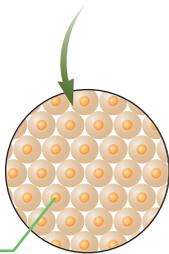


Figura 1.2 Niveles de organización en la materia.

mentos de alta energía, son un poco misteriosos. A pesar de la sólida evidencia indirecta, no han sido observados quark aislados. En consecuencia, la posible existencia de partículas todavía más fundamentales es puramente especulativa.

1.3 Análisis dimensional

En física la palabra *dimensión* indica la naturaleza física de una cantidad; por ejemplo, la distancia entre dos puntos puede ser medida en pies, metros o estadios, que son formas diferentes de expresar la dimensión de *longitud*.

Los símbolos aplicados en esta sección, para especificar las dimensiones de longitud, masa y tiempo, son L, M y T, respectivamente. El paréntesis [] con frecuencia se aplicará para indicar las dimensiones de una cantidad física. Por ejemplo, en esta notación las dimensiones de velocidad v son escritas $[v] = L/T$, y las dimensiones de área A son $[A] = L^2$. Las dimensiones de área, volumen, velocidad y aceleración se mencionan en la tabla 1.5, junto con sus unidades en tres sistemas comunes. Las dimensiones de otras cantidades, como la fuerza y la energía, serán descritas más adelante conforme sean introducidas.

En física con frecuencia es necesario ya sea deducir una expresión matemática o una ecuación o bien verificar su validez. Al procedimiento para realizar esto, se le conoce como **análisis dimensional**, que hace uso del hecho de que las **dimensiones pueden ser tratadas como cantidades algebraicas**. Tales cantidades, por ejemplo, pueden ser sumadas o restadas únicamente si tienen las mismas dimensiones. Si los términos en los lados opuestos de una ecuación tienen las mismas dimensiones, entonces la ecuación es correcta, aunque esto no puede garantizarse con bases dimensionales solamente. Sin embargo, el análisis dimensional tiene valor como verificación parcial de una ecuación y también puede utilizarse para desarrollar una comprensión de las relaciones entre las magnitudes físicas.

Este procedimiento puede utilizarse para ilustrar el desarrollo de algunas relaciones entre la aceleración, la velocidad, el tiempo y la distancia. La distancia x tiene la dimensión de longitud $[x] = L$. El tiempo t tiene la dimensión $[t] = T$. La velocidad v tiene las dimensiones de distancia sobre tiempo $[v] = L/T$, y la aceleración tiene las dimensiones de distancia sobre el tiempo al cuadrado $[a] = L/T^2$. Observe que la velocidad y la aceleración tienen dimensiones similares, excepto por una dimensión extra del tiempo en el denominador de la aceleración. Con esto, se tiene

$$[v] = \frac{L}{T} = \frac{L}{T^2} T = [a][t]$$

De esto se puede intuir que la velocidad es igual a la aceleración multiplicada por el tiempo, $v = at$, y que es cierto para el caso especial de movimiento con aceleración constante a partir del reposo. Al darse cuenta de que la velocidad tiene dimensiones de longitud dividida entre el tiempo y la distancia tiene dimensiones de longitud, es razonable suponer que

$$[x] = L = L \frac{T}{T} = \frac{L}{T} T = [v][t] = [a][t]^2$$

Tabla 1.5 Dimensiones y algunas unidades de área, volumen, velocidad y aceleración

Sistema	Área (L ²)	Volumen (L ³)	Velocidad (L/T)	Aceleración (L/T ²)
SI	m ²	m ³	m/s	m/s ²
cgs	cm ²	cm ³	cm/s	cm/s ²
Acostumbrado en Estados Unidos	pie ²	pie ³	pie/s	pie/s ²

Aquí parece que $x = at^2$ relaciona correctamente la distancia recorrida con la aceleración y el tiempo; sin embargo, esta expresión no es totalmente correcta en el caso de aceleración constante partiendo del reposo. La expresión correcta en este caso es $x = \frac{1}{2}at^2$. Estos ejemplos sirven para mostrar las limitaciones inherentes al uso del análisis dimensional para descubrir las relaciones entre las magnitudes físicas. Sin embargo, procedimientos tan sencillos todavía pueden ser de utilidad en el desarrollo de un modelo matemático preliminar para un sistema físico dado. Además, debido a que es fácil cometer errores en la solución de problemas, el análisis dimensional puede utilizarse para comprobar la consistencia de los resultados. Cuando las dimensiones de una ecuación no son consistentes, esto indica que se ha cometido un error en un paso previo.

■ EJEMPLO 1.1 Análisis de una ecuación

OBJETIVO Verificar una ecuación aplicando análisis dimensional.

PROBLEMA Demostrar que la expresión $v = v_0 + at$ es dimensionalmente correcta, donde v y v_0 representan velocidades, a es la aceleración y t es un intervalo de tiempo.

ESTRATEGIA Analice cada término, encontrando sus dimensiones y después verifique si todos los términos coinciden entre sí.

SOLUCIÓN

Halle las dimensiones para v y v_0 .

$$[v] = [v_0] = \frac{\text{L}}{\text{T}}$$

Halle las dimensiones de at .

$$[at] = [a][t] = \frac{\text{L}}{\text{T}^2} (\text{T}) = \frac{\text{L}}{\text{T}}$$

COMENTARIOS Todos los términos coinciden, por eso la ecuación es dimensionalmente correcta.

PREGUNTA 1.1 Verdadero o Falso: Una ecuación que es dimensionalmente correcta siempre es físicamente correcta, con una constante de proporcionalidad.

EJERCICIO 1.1 Determine si la ecuación $x = vt^2$ en cuanto a dimensiones es correcta. De no ser así, proporcione una expresión correcta, con una constante global de proporcionalidad.

RESPUESTA Incorrecta. La expresión $x = vt$ es dimensionalmente correcta.

■ EJEMPLO 1.2 Hallar una ecuación

OBJETIVO Deducir una ecuación mediante la aplicación del análisis dimensional.

PROBLEMA Encontrar una correspondencia entre una aceleración constante a , rapidez v y distancia r desde el origen para una partícula cuyo recorrido es una circunferencia.

ESTRATEGIA Inicie con el término que tiene la mayor parte de las dimensiones, a . Hallar sus dimensiones y después rescriba aquéllas en términos de las dimensiones de v y r . La de tiempo tendrá que ser eliminada con v , porque ésta es la única cantidad (otra, es a misma) en que aparece la dimensión de tiempo.

SOLUCIÓN

Escriba las dimensiones de a :

$$[a] = \frac{\text{L}}{\text{T}^2}$$

Resuelva las dimensiones de la rapidez para T:

$$[v] = \frac{\text{L}}{\text{T}} \rightarrow \text{T} = \frac{\text{L}}{[v]}$$

Sustituya la expresión para T dentro de la ecuación para $[a]$:

$$[a] = \frac{\text{L}}{\text{T}^2} = \frac{\text{L}}{(\text{L}/[v])^2} = \frac{[v]^2}{\text{L}}$$

Sustituyendo $\text{L} = [r]$ e intuyendo en la ecuación:

$$[a] = \frac{[v]^2}{[r]} \rightarrow a = \frac{v^2}{r}$$

COMENTARIO Ésta es la ecuación correcta para la magnitud de la aceleración centrípeta —aceleración hacia el centro del movimiento— que se explica en el capítulo 7. En este caso no es necesario introducir un factor numérico. Con frecuencia dicho factor se despliega como una constante k en frente del lado derecho, por ejemplo, $a = kv^2/r$. Con, $k = 1$ proporciona la expresión correcta. Una buena técnica a veces se introduce en los libros de texto basados en el cálculo, que implica el uso de potencias desconocidas de las dimensiones. Este problema podría establecerse como $[a] = [v]^b [r]^c$. Escribiendo las dimensiones e igualando las potencias de cada dimensión en ambos lados de la ecuación resultaría $b = 2$ y $c = -1$.

PREGUNTA 1.2 Verdadero o Falso: Sustituyendo v en lugar de r/t en la respuesta final también proporciona una ecuación dimensionalmente correcta.

EJERCICIO 1.2 En física, la energía E lleva dimensiones de masa por longitud al cuadrado divididas entre el tiempo al cuadrado. Utilice el análisis dimensional para obtener una relación para la energía en términos de la masa m y la rapidez v , con una constante de proporcionalidad. Sea c , la rapidez de la luz y la constante de la proporcionalidad igual a 1 para obtener la ecuación más famosa de la física. (Nótese, sin embargo, que la primera relación se asocia con la energía de movimiento y la segunda, con la energía de masas. Véase el capítulo 26.)

RESPUESTA $E = kmv^2 \rightarrow E = mc^2$ cuando $k = 1$ y $v = c$.

1.4 Incertidumbre en la medición y cifras significativas

La física es una ciencia en la que las leyes matemáticas son probadas a través de experimentos. Ninguna cantidad física puede ser determinada con precisión íntegra porque nuestros sentidos están físicamente limitados, incluso cuando los extendemos con microscopios, ciclotrones y otros mecanismos. En consecuencia, es importante desarrollar métodos para determinar la exactitud de las mediciones.

Todas las mediciones tienen incertidumbres asociadas con ellas, aunque no sean establecidas explícitamente. La exactitud de una medición depende de la sensibilidad del aparato, la habilidad de la persona que realiza la medición y el número de veces que se repita la medición. Una vez que se conocen las mediciones, junto con sus incertidumbres, sucede que los cálculos deben realizarse utilizando estas mediciones. Supongamos que dos mediciones se multiplican. Cuando se utiliza una calculadora para obtener este producto, este puede aparecer con ocho dígitos en la pantalla de la calculadora, pero a menudo sólo dos o tres de esos números tienen un significado. El resto no tienen ningún valor, ya que implica una mayor precisión de la que en realidad se había logrado en las mediciones originales. En el trabajo experimental, para determinar la cantidad de números a conservar se requiere de la aplicación de estadística matemática y la propagación de las incertidumbres. En un libro de texto no es práctico aplicar herramientas sofisticadas en los numerosos cálculos, así que se utiliza un método sencillo, llamado *cifras significativas*, para indicar el número aproximado de dígitos que debe mantenerse al final de un cálculo. A pesar de que el método no es matemáticamente riguroso, es fácil de aplicar y funciona bastante bien.

Considere que en un laboratorio se mide con una regla el área de una placa rectangular. Considere que la precisión a la cual se puede medir una dimensión particular de la placa es ± 0.1 cm. Si la longitud de la placa se observa que es 16.3 cm, es posible afirmar que sólo se encuentra en algún lugar entre 16.2 y 16.4 cm. En este caso, se dice que el valor observado tiene tres cifras significativas. De la misma manera, si se mide el ancho de la placa que es 4.5 cm, el valor real se encuentra entre 4.4 y 4.6 cm. Este valor observado sólo tiene dos cifras significativas. Los valores observados se podrían escribir como 16.3 ± 0.1 cm y 4.5 ± 0.1 cm. En general, **una cifra significativa es un dígito conocido con seguridad** (diferente al cero que se aplica para localizar un punto decimal). Tenga en cuenta que en cada caso, el número final tiene cierto grado de incertidumbre asociado con él y, por lo tanto no es 100% fiable. A pesar de la incertidumbre, ese número es mantenido y se considera importante, ya que nos transmite alguna información.

Suponga que se quiere hallar el área de la placa multiplicando los dos valores observados. El valor final puede estar entre $(16.3 - 0.1 \text{ cm})(4.5 - 0.1 \text{ cm}) = (16.2 \text{ cm})(4.4 \text{ cm}) = 71.28 \text{ cm}^2$ y $(16.3 + 0.1 \text{ cm})(4.5 + 0.1 \text{ cm}) = (16.4 \text{ cm})(4.6 \text{ cm}) = 75.44 \text{ cm}^2$. Afirmando saber algo de la centésima o incluso de la décima, no tiene sentido, porque es claro que incluso no se puede estar seguro de los lugares de los elementos, si es 1 en 71, el 5 en 75 o en alguna parte entre ellos. Sin duda las décimas y las centésimas no son significativas. Se tiene *alguna* información acerca del lugar de los elementos, de tal modo que la cifra es significativa. Multiplicando las cifras en medio del intervalo de incertidumbre resulta $(16.3 \text{ cm})(4.5 \text{ cm}) = 73.35 \text{ cm}^2$, que también está en medio del intervalo de incertidumbre. Ya que las centésimas y décimas no son significativas, se omiten y se toma la respuesta de 73 cm^2 , con una incertidumbre de $\pm 2 \text{ cm}^2$. Observe que la respuesta tiene dos cifras significativas, el mismo número de cifras que la cantidad conocida menos precisa que se está multiplicando, el ancho de 4.5 cm.

Los cálculos realizados en el párrafo anterior pueden indicar el número correcto de cifras significativas, pero consumen mucho tiempo. En su lugar, se pueden aplicar dos reglas de oro. La primera, acerca de la multiplicación y la división, es como sigue. **En la multiplicación (división) de dos o más cantidades, el número de cifras significativas en el producto final (cociente) es el mismo que el número de cifras significativas en el menos exacto de los factores que se están combinando, donde el menos exacto significa que tiene el menor número de cifras significativas.**

Al obtener el número final de cifras significativas, por lo general es necesario hacer algún redondeo. Si el último dígito que se omite es menor que 5, simplemente se excluye el dígito. Si el último dígito omitido es mayor que o igual que 5, se asciende este último dígito retenido en uno.¹

Es posible que los ceros sean o no cifras significativas. Los ceros utilizados para la posición del punto decimal en tales números como 0.03 y 0.0075 no son significativos (pero son útiles en evitar errores). Por lo tanto, 0.03 tiene una cifra significativa y 0.0075 tiene dos.

Cuando se colocan ceros después de otros dígitos en un número entero existe una posibilidad de interpretación falsa. Por ejemplo, considere que la masa de un objeto se da como 1 500 g. Este valor es confuso, porque no sabemos si los dos últimos ceros se están aplicando para localizar el punto decimal o si representan cifras significativas en la medida.

Aplicando la notación científica para indicar el número de cifras significativas se retira esta confusión. En este caso, la masa se expresa como $1.5 \times 10^3 \text{ g}$ si existen dos cifras significativas en el valor observado, $1.50 \times 10^3 \text{ g}$ si existen tres cifras significativas y $1.500 \times 10^3 \text{ g}$ si existen cuatro. De la misma manera, 0.000 15 se expresa en notación científica como 1.5×10^{-4} si tiene dos cifras significativas o como 1.50×10^{-4} si tiene tres cifras significativas. Los tres ceros entre el punto decimal y el dígito 1 en el número 0.000 15 no se cuentan como cifras significativas porque únicamente localizan el punto decimal. En este libro, **la mayoría de los ejemplos numéricos y problemas de fin de capítulo producirán respuestas que tienen dos o tres cifras significativas.**

Para la suma y la resta, es mejor concentrarse en el número de cifras decimales en las cantidades involucradas antes que en el número de cifras significativas. **Cuando los números son sumados (restados), el número de cifras decimales en el resultado es igual al número más pequeño de cifras decimales de cualquier término en la suma (diferencia).** Por ejemplo, si queremos calcular 123 (cero cifras decimales) + 5.35 (dos cifras decimales), la respuesta es 128 (cero cifras decimales) y no 128.35. Si calculamos la suma 1.000 1 (cuatro cifras decimales) + 0.000 3 (cuatro cifras decimales) = 1.000 4, el resultado tiene el número correcto de cifras decimales, específicamente, cuatro. Observe que las reglas para multiplicar cifras significativas no funciona en este caso porque la respuesta tiene cinco cifras significativas, incluso aunque uno de los términos en la suma 0.000 3, tiene sólo una cifra significativa. De la misma manera, si realizamos la resta $1.002 - 0.998 = 0.004$, el resultado tiene tres cifras decimales porque cada término en la resta tiene tres cifras decimales.

Tip 1.2 Cómo utilizar calculadoras

Las calculadoras fueron diseñadas por ingenieros para producir tantos dígitos como el chip de memoria de la calculadora lo permita, de tal modo que es seguro redondear la respuesta final al número correcto de cifras significativas.

¹Algunos prefieren redondear al dígito par más cercano cuando el último dígito es 5, lo que tiene la ventaja de redondear 5 hacia arriba la mitad de las veces y hacia abajo la otra mitad. Por ejemplo, 1.55 se redondea a 1.6, pero 1.45 podría redondearse a 1.4. Debido a que la cifra final importante es sólo un representante de una serie de valores dados por la incertidumbre, este refinamiento es muy pequeño y no se utiliza en este texto.

Para mostrar por qué se cumple con esta regla, regrese al primer ejemplo en el que se sumó 123 y 5.35 y escriba estos números como 123.xxx y 5.35x. Los dígitos representados con una x son completamente desconocidos y puede ser cualquier dígito desde 0 hasta 9. Ahora coloque en línea 123.xxx y 5.35x con respecto al punto decimal y realice la suma, aplicando la regla de que la suma de un dígito desconocido a un dígito conocido o desconocido produce otro desconocido:

$$\begin{array}{r} 123.xxx \\ + 5.35x \\ \hline 128.xxx \end{array}$$

La respuesta de 128.xxx significa que se justifica sólo de conformidad al número 128 porque todo después del punto decimal en la suma, en efecto, se desconoce. El ejemplo muestra que se introduce la incertidumbre controlada en una suma o en una resta mediante el término con el menor número de cifras decimales.

EJEMPLO 1.3 Instalación de una alfombra

OBJETIVO Aplicar las reglas para cifras significativas.

PROBLEMA Varios instaladores de alfombras realizan mediciones para la instalación de alfombras en las diferentes salas de un restaurante, informando de sus medidas con una precisión inconsistente, resumidas en la tabla 1.6. Calcular las áreas de a) el salón de banquetes, b) la sala de reuniones y c) el comedor, teniendo en cuenta las cifras significativas. d) ¿Qué superficie total de alfombra se requiere para estas habitaciones?

Tabla 1.6 Dimensiones de habitaciones disponibles en el ejemplo 1.3

	Largo (m)	Ancho (m)
Salón de banquetes	14.71	7.46
Sala de reuniones	4.822	5.1
Comedor	13.8	9

ESTRATEGIA Para los problemas de multiplicación de los incisos a)-c), cuente las cifras significativas en cada número. El resultado más pequeño es el número de cifras significativas en la respuesta. El inciso d) requiere una suma, donde la posición decimal con la precisión menor conocida para el área determina el número total de cifras significativas en la respuesta.

SOLUCIÓN

a) Calcule el área del salón de banquetes.

Cuenta las cifras significativas:

14.71 m → 4 cifras significativas

7.46 m → 3 cifras significativas

Para hallar el área, multiplique los números, manteniendo únicamente tres dígitos:

$14.71 \text{ m} \times 7.46 \text{ m} = 109.74 \text{ m}^2 \rightarrow 1.10 \times 10^2 \text{ m}^2$

b) Calcule el área de la sala de reuniones.

Cuenta las cifras significativas:

4.822 m → 4 cifras significativas

5.1 m → 2 cifras significativas

Para hallar el área, multiplique los números, manteniendo únicamente dos dígitos:

$4.822 \text{ m} \times 5.1 \text{ m} = 24.59 \text{ m}^2 \rightarrow 25 \text{ m}^2$

c) Calcule el área del comedor.

Cuenta las cifras significativas:

13.8 m → 3 cifras significativas

9 m → 1 cifra significativa

Para hallar el área, multiplique los números, manteniendo únicamente un dígito:

$13.8 \text{ m} \times 9 \text{ m} = 124.2 \text{ m}^2 \rightarrow 100 \text{ m}^2$

d) Calcule la superficie total requerida de alfombra, con el número adecuado de cifras significativas.

Sume las tres respuestas sin tener en cuenta las cifras importantes:

$$1.10 \times 10^2 \text{ m}^2 + 25 \text{ m}^2 + 100 \text{ m}^2 = 235 \text{ m}^2$$

El número menos preciso es de 100 m^2 , con una cifra significativa en el lugar decimal de las centenas:

$$235 \text{ m}^2 \rightarrow 2 \times 10^2 \text{ m}^2$$

COMENTARIOS Observe que la respuesta final al inciso d) sólo tiene una cifra significativa, en el lugar de las centenas, lo que resulta en una respuesta que tenía que ser redondeada hacia abajo en una parte considerable de su valor total. Esa es la consecuencia de tener información insuficiente. El valor de 9 m, sin ningún tipo de información adicional, representa un valor cierto que podría estar en cualquier parte del intervalo [8.5 m, 9.5 m), los que se redondean a 9 cuando se mantiene un solo dígito.

PREGUNTA 1.3 ¿Cómo cambiaría la respuesta final si se proporcionara el ancho como 9.0 m?

EJERCICIO 1.3 Un rancho cuenta con dos áreas rectangulares cercadas. La zona A tiene una longitud de 750 m y 125 m de ancho y la zona B tiene una longitud de 400 metros y 150 m de ancho. Calcule: a) el área de la zona A, b) el área de la zona B y c) el área total, con especial atención a las reglas de las cifras significativas. Supongamos que los ceros a la derecha no son significativos.

RESPUESTAS a) $9.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ b) $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ c) $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2$

Al realizar todo cálculo, especialmente uno que involucre un número de etapas, siempre existirán ligeras discrepancias que se introducen por el proceso de redondeo y el orden algebraico en que se realizan las etapas. Por ejemplo, considere $2.35 \times 5.89/1.57$. Este cálculo se puede realizar en tres órdenes diferentes. Primero se tiene $2.35 \times 5.89 = 13.842$, que se redondea a 13.8, seguida por $13.8/1.57 = 8.7898$, redondeada a 8.79. Segundo, $5.89/1.57 = 3.7516$, que se redondea a 3.75, resultado de $2.35 \times 3.75 = 8.8125$, redondeado a 8.81. Por último, $2.35/1.57 = 1.4968$ redondeada a 1.50 y $1.50 \times 5.89 = 8.835$ redondeado a 8.84. Así tres órdenes algebraicos diferentes, siguiendo las reglas de redondeo, conducen a respuestas de 8.79, 8.81 y 8.84, respectivamente. Se esperaba tal discrepancia menor, porque el último dígito significativo es sólo representativo de un intervalo de valores posibles, dependiendo de la incertidumbre experimental. Para evitar tal discrepancia, se lleva uno o más dígitos extras durante el cálculo, aunque conceptualmente no es consistente hacerlo porque las cifras adicionales no son significativas. De cualquier modo, en los ejemplos de este libro, los resultados intermedios serán redondeados al número adecuado de cifras significativas y sólo esos dígitos serán llevados adelante. En los conjuntos de problemas, sin embargo, los datos dados generalmente se suponen con una precisión de dos o tres dígitos, aun cuando no sean ceros. En la resolución de los problemas, el estudiante debe estar consciente de que diferencias ligeras en las prácticas de redondeo pueden dar lugar a respuestas que difieran de las del texto, en el último dígito significativo, lo cual es normal y no es motivo de preocupación. El método de cifras significativas tiene sus limitaciones en la determinación de la exactitud, pero es fácil de aplicar. En el trabajo experimental, se aplican técnicas estadísticas y de propagación matemática de incertidumbre de un resultado experimental.



En esta señal, el límite de velocidad está dado en kilómetros y millas por hora. ¿Qué tan exacta es la conversión?

1.5 Conversión de unidades

Algunas veces es necesario convertir unidades de un sistema a otro. Los factores de conversión entre los sistemas SI y el acostumbrado en Estados Unidos para unidades de longitud son los siguientes:

$$1 \text{ mi} = 1609 \text{ m} = 1.609 \text{ km} \quad 1 \text{ pie} = 0.3048 \text{ m} = 30.48 \text{ cm}$$

$$1 \text{ m} = 39.37 \text{ pulg} = 3.281 \text{ pies} \quad 1 \text{ pulg} = 0.0254 \text{ m} = 2.54 \text{ cm}$$

En el interior de la cubierta frontal de este texto hay un listado más extenso de los factores de conversión. En todas las igualdades de conversión dadas, el “1” a la izquierda, se supone con el mismo número de cifras significativas que la cantidad dada a la derecha de la igualdad.

Las unidades pueden ser tratadas como cantidades algebraicas que se pueden “cancelar” entre sí. Se puede hacer una fracción con la conversión que cancelará las unidades que no se quieren y se multiplica la fracción por la cantidad que merece la consideración. Por ejemplo, se quiere convertir 15.0 pulg a centímetros. Ya que $1 \text{ pulg} = 2.54 \text{ cm}$, hallamos que

$$15.0 \text{ pulg} = 15.0 \cancel{\text{ pulg}} \times \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1.00 \cancel{\text{ pulg}}} \right) = 38.1 \text{ cm}$$

Los dos ejemplos que siguen muestran cómo retratar con los problemas que incluyen más de una conversión y con potencias.

■ EJEMPLO 1.4 Acércate más, amigo

OBJETIVO Convertir unidades aplicando varios factores de conversión.

PROBLEMA Si un automóvil está viajando con una rapidez de 28.0 m/s , ¿el conductor está excediendo el límite de velocidad de 55.0 mi/h ?

ESTRATEGIA Los metros deben convertirse a millas y los segundos a horas, aplicando los factores de conversión que se mencionan en el interior de la cubierta frontal del libro. En este caso, se aplicarán tres factores.

SOLUCIÓN

Convierta metros a millas:

$$28.0 \text{ m/s} = \left(28.0 \frac{\cancel{\text{m}}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1.00 \text{ mi}}{1609 \cancel{\text{m}}} \right) = 1.74 \times 10^{-2} \text{ mi/s}$$

Convierta segundos a horas:

$$\begin{aligned} 1.74 \times 10^{-2} \text{ mi/s} &= \left(1.74 \times 10^{-2} \frac{\text{mi}}{\cancel{\text{s}}} \right) \left(60.0 \frac{\cancel{\text{s}}}{\text{min}} \right) \left(60.0 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) \\ &= 62.6 \text{ mi/h} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El conductor debe disminuir su velocidad porque está excediendo el límite de velocidad.

PREGUNTA 1.4 Repita la conversión, aplicando la relación $1.00 \text{ m/s} = 2.24 \text{ mi/h}$. ¿Por qué la respuesta es ligeramente diferente?

EJERCICIO 1.4 Convierta 152 mi/h a m/s .

RESPUESTA 67.9 m/s

■ EJEMPLO 1.5 Acelera a fondo

OBJETIVO Convertir una cantidad con potencias de una unidad.

PROBLEMA La luz del semáforo cambia a verde y el conductor de un automóvil de alto rendimiento pisa el acelerador hasta el fondo. El acelerómetro registra 22.0 m/s^2 . Convierta esta lectura a $\text{km}/\text{minuto}^2$.

ESTRATEGIA En este caso se requiere un factor para convertir metros a kilómetros y otros dos factores para convertir segundos cuadrados a minutos cuadrados.

SOLUCIÓN

Multiplique por los tres factores:

$$\frac{22.0 \cancel{\text{m}}}{1.00 \cancel{\text{s}}^2} \left(\frac{1.00 \text{ km}}{1.00 \times 10^3 \cancel{\text{m}}} \right) \left(\frac{60.0 \cancel{\text{s}}}{1.00 \text{ min}} \right)^2 = 79.2 \frac{\text{km}}{\text{min}^2}$$

COMENTARIOS Observe que en cada factor de conversión el numerador es igual al denominador cuando se consideran las unidades. ¡Un error común en relación con la segunda potencia es que se aplica a las unidades dentro del paréntesis mientras se olvida hacerlo en los números!

PREGUNTA 1.5 ¿Qué factor de conversión adicional para el tiempo se aplicaría para convertir la respuesta a km/h^2 ?

EJERCICIO 1.5 Convierta $4.50 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ a g/cm^3 .

RESPUESTA 4.50 g/cm^3

1.6 Cálculos aproximados y de orden de magnitud

Obtener una respuesta exacta de un cálculo es con frecuencia difícil o imposible, ya sea por causas matemáticas o porque la información disponible es limitada. En esta situación, los cálculos estimativos pueden producir respuestas aproximadas eficaces que permiten establecer si es necesario un cálculo más preciso. Además, es útil como una verificación parcial de si en efecto, se realizan cálculos exactos. Si se espera una respuesta favorable, pero se obtiene una respuesta trivial exacta en alguna parte existe un error.

Para diversos problemas, conociendo el valor aproximado de una cantidad —más o menos dentro de un factor de 10— es suficiente. A este valor aproximado se le conoce como una estimación de **orden de magnitud** y requiere de la búsqueda de la potencia de 10 que se acerca al valor real de la cantidad. Por ejemplo, $75 \text{ kg} \sim 10^2 \text{ kg}$, donde el símbolo \sim significa “es del orden de” o bien “es aproximadamente”. Incrementar una cantidad en tres órdenes de magnitud significa que su valor aumenta en un factor de $10^3 = 1000$.

A veces el proceso de preparación de tales estimaciones da por resultado respuestas bastante burdas, pero incluso respuestas 10 o más veces más grandes o más pequeñas siguen siendo útiles. Por ejemplo, considere que está interesado en cuánta gente ha contraído cierta enfermedad. Algún cálculo estimativo debajo de 10000 es insignificante si se compara con la población en el mundo, pero un millón o más sería preocupante. De este modo, aun información relativamente inexacta puede proporcionar una guía valiosa.

En el desarrollo de estos cálculos estimativos, puede permitirse libertades con los números. Por ejemplo, $\pi \sim 1$, $27 \sim 10$ y $65 \sim 100$. Para obtener una estimación menos burda, es permisible utilizar números un poco más exactos (es decir, $\pi \approx 3$, $27 \sim 30$, $65 \sim 70$). Además, se puede obtener mejor precisión subestimando sistemáticamente más números que sobrestimando. Algunas cantidades son quizá por completo desconocidas, pero es normal hacer suposiciones sensatas, como lo muestran los ejemplos.

■ EJEMPLO 1.6 Cálculo estimativo de las células del cerebro

OBJETIVO Desarrollar una estimación simple.

PROBLEMA Calcule el número de células en el cerebro humano.

ESTRATEGIA Estime el volumen de un cerebro humano y divida por el volumen estimado de una célula. El cerebro se ubica en la parte superior de la cabeza, con un volumen que podría ser aproximadamente de un cubo de lado $\ell = 20 \text{ cm}$.

Las células del cerebro, constituido de casi 10% de neuronas y 90% de no nerviosas, difieren ampliamente en tamaño, con dimensiones fluctuando más o menos desde unas cuantas micras hasta un metro. Como una suposición, considere $d = 10$ micras como una dimensión representativa y tenga en mente que una célula es un cubo con cada lado que tiene esa longitud.

SOLUCIÓN

Estime el volumen de un cerebro humano:

$$V_{\text{cerebro}} = \ell^3 \approx (0.2 \text{ m})^3 = 8 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \approx 1.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

Estime el volumen de una célula:

$$V_{\text{célula}} = d^3 \approx (10 \times 10^{-6} \text{ m})^3 = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^3$$

Divida el volumen de un cerebro por el volumen de una célula:

$$\text{número de células} = \frac{V_{\text{cerebro}}}{V_{\text{células}}} = \frac{0.01 \text{ m}^3}{1 \times 10^{-15} \text{ m}^3} = 1 \times 10^{13} \text{ células}$$

COMENTARIOS Observe cómo se puso poca atención en obtener valores precisos. Alguna información general sobre un problema es necesaria si la estimación está dentro de un orden de magnitud del valor real. Aquí, el conocimiento de las dimensiones aproximadas de las células del cerebro y el cerebro humanos son esenciales para el desarrollo de la estimación.

PREGUNTA 1.6 ¿También sería sensato estimar 10^{12} células? ¿Y con respecto a 10^9 células? Explique.

EJERCICIO 1.6 Evaluar el número total de células en el cuerpo humano.

RESPUESTA 10^{14} (es posible que las respuestas cambien).

■ EJEMPLO 1.7 Apilar billetes de un dólar hasta la Luna

OBJETIVO Calcular el número necesario de objetos apilados para alcanzar una altura determinada.

PROBLEMA ¿Cuántos billetes de un dólar, apilados uno encima del otro, alcanzarían la Luna?

ESTRATEGIA La distancia a la Luna es de casi 400 000 km. Suponga el número de billetes de dólar en un milímetro y multiplique la distancia por este número, después convierta a unidades consistentes.

SOLUCIÓN

Se estima que 10 billetes apilados forman una capa de 1 mm. Convierta mm a km:

$$\frac{10 \text{ billetes}}{1 \text{ mm}} \left(\frac{10^3 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right) \left(\frac{10^3 \text{ m}}{1 \text{ km}} \right) = \frac{10^7 \text{ billetes}}{1 \text{ km}}$$

Multiplique este valor por la distancia lunar aproximada:

$$\# \text{ de billetes de dólar} \sim (4 \times 10^5 \text{ km}) \left(\frac{10^7 \text{ billetes}}{1 \text{ km}} \right) = 4 \times 10^{12} \text{ billetes}$$

COMENTARIOS Éste es el mismo orden de magnitud que el de la deuda nacional de Estados Unidos.

PREGUNTA 1.7 Basados en la respuesta, ¿cuántos centavos es necesario apilar para alcanzar la Luna?

EJERCICIO 1.7 ¿Cuántas piezas de cartulina, como las que encontramos en un block de papel, tendrían que apilarse una sobre otra, para igualar la altura del monumento a Washington que es de 170 m aproximadamente?

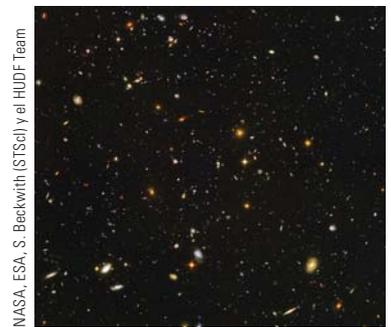
RESPUESTA $\sim 10^5$ (las respuestas pueden variar).

■ EJEMPLO 1.8 Número de galaxias en el Universo

OBJETIVO Calcular un volumen y una densidad numérica y combine.

PROBLEMA Teniendo en cuenta que los astrónomos pueden reconocer casi 10 millones de años luz en el espacio y que existen 14 galaxias en nuestro grupo local, a 2 millones de años luz del grupo local próximo, estime el número de galaxias en el Universo observable. (Nota: Un año luz es la distancia recorrida por la luz en un año, casi 9.5×10^{15} m.) (Véase la figura 1.3.)

ESTRATEGIA A partir de la información conocida, se puede estimar el número de galaxias por cada unidad de volumen. El grupo local de 14 galaxias está contenido en una esfera de un millón de años luz de radio, con el grupo Andrómeda en una esfera similar, de este modo existen casi 10 galaxias dentro de un volumen de radio de un millón de años luz. Multiplique esta densidad numérica por el volumen del Universo observable.



NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) y el HUDF Team

Figura 1.3 En esta fotografía interestelar, existen pocas estrellas (sólo galaxias sin fin).

SOLUCIÓN

Calcule el volumen aproximado V_{lg} del grupo local (lg) de galaxias:

$$V_{lg} = \frac{4}{3}\pi r^3 \sim (10^6 \text{ al})^3 = 10^{18} \text{ al}^3$$

Estime la densidad de galaxias:

$$\begin{aligned} \text{densidad de galaxias} &= \frac{\# \text{ de galaxias}}{V_{lg}} \\ &\sim \frac{10 \text{ galaxias}}{10^{18} \text{ al}^3} = 10^{-17} \frac{\text{galaxias}}{\text{al}^3} \end{aligned}$$

Calcule el volumen aproximado del Universo observable:

$$V_u = \frac{4}{3}\pi r^3 \sim (10^{10} \text{ al})^3 = 10^{30} \text{ al}^3$$

Multiplique la densidad de galaxias por V_u :

$$\begin{aligned} \# \text{ de galaxias} &\sim (\text{densidad de galaxias}) V_u \\ &= \left(10^{-17} \frac{\text{galaxias}}{\text{al}^3} \right) (10^{30} \text{ al}^3) \\ &= 10^{13} \text{ galaxias} \end{aligned}$$

(continúa)

COMENTARIOS Observe la naturaleza aproximada de los cálculos, que aplica $4\pi/3 \sim 1$ en dos ocasiones y $14 \sim 10$ por el número de galaxias en el grupo local. Esto se justifica por completo. Aplicar los números verdaderos no tiene sentido, porque las otras consideraciones —el tamaño del Universo observable y la idea de que la densidad de galaxia local es representativa de la densidad en cualquier lugar— también son aproximaciones muy burdas. Además de eso, nada existió en el problema que necesitará utilizar volúmenes de esfera, en lugar de volúmenes de cubos. A pesar de estas elecciones arbitrarias, la respuesta también proporciona información veraz, porque elimina muchas de las respuestas posibles. Antes de hacer los cálculos, una consideración de mil millones de galaxias parecería posible.

PREGUNTA 1.8 De las 10 galaxias en el grupo local, sólo una no es galaxia enana. Estime el número de galaxias en el Universo que no son enanas.

EJERCICIO 1.8 a) Teniendo en cuenta que la estrella más cercana está a casi cuatro años luz, determine la densidad de estrellas por año luz cúbico en nuestra galaxia. b) Estime el número de estrellas en la Vía Láctea, si esta es, de manera burda, un disco de 100 000 años luz horizontalmente y 1000 años luz de espesor.

RESPUESTA a) 0.02 estrellas/al³ b) 2×10^{11} estrellas (Cambiarán las estimaciones. Probablemente la respuesta verdadera es el doble de este número.)

1.7 Sistemas de coordenadas

Muchos aspectos de la física se relacionan con la ubicación en el espacio, por lo que se necesita la definición de un sistema de coordenadas. Se puede localizar un punto en una recta con una coordenada, un punto en un plano, con dos coordenadas y un punto en el espacio con tres.

Un sistema coordenado que se utiliza para especificar la ubicación en el espacio consiste en lo siguiente:

- Un punto de referencia fijo O , conocido como *origen*
- Un conjunto de ejes específicos o direcciones, con una escala apropiada y etiquetas en los ejes
- Instrucciones de señalamiento de un punto en el espacio con respecto al origen y a los ejes

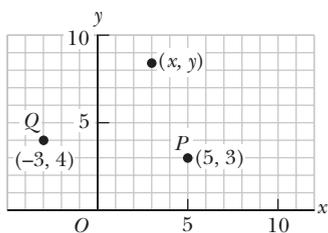


Figura 1.4 Ubicación de puntos en un sistema cartesiano de coordenadas en dos dimensiones. Todo punto es etiquetado con coordenadas (x, y) .

Un sistema coordenado conveniente y usualmente aplicado es el **sistema cartesiano de coordenadas**, algunas veces denominado **sistema coordenado rectangular**. En la figura 1.4 se ilustra tal sistema en dos dimensiones. Se etiqueta un punto arbitrario en este sistema con las coordenadas (x, y) . Por ejemplo el punto P en la figura tiene coordenadas $(5, 3)$. Si iniciamos en el origen O , se alcanza P moviéndose 5 metros horizontalmente hacia la derecha y en seguida 3 metros en dirección vertical hacia arriba. De la misma manera, el punto Q tiene coordenadas $(-3, 4)$, que corresponde dirigirse 3 metros horizontalmente hacia la izquierda del origen y 4 metros en dirección vertical hacia arriba desde allí.

Por lo general se elige x positiva como derecha del origen y hacia arriba desde el origen y positiva, pero en dos dimensiones esta selección es en gran extremo un tema de prueba. (De cualquier modo, en tres dimensiones existen coordenadas de “mano derecha” y “mano izquierda” que conducen a discrepancias en el signo menos de ciertas operaciones. Esto será atendido cuando se requiera.)

Algunas veces es más conveniente ubicar un punto en el espacio mediante sus **coordenadas polares planas** (r, θ) , como en la figura 1.5. En este sistema coordenado, son seleccionados un origen O y una línea de referencia como se muestra. En tal caso se especifica un punto para la distancia r desde el origen hasta el punto y mediante el ángulo θ entre la línea de referencia y una línea trazada desde el origen hasta el punto. Por lo general la línea estándar de referencia se considera el eje x positivo de un sistema cartesiano de coordenadas. Se tiene en cuenta que el ángulo θ es positivo cuando se mide en la dirección contraria a las manecillas del reloj desde la línea de referencia y negativo cuando se mide en la dirección de las manecillas del reloj. Por ejemplo, si se especifica un punto mediante las coordenadas polares 3 m y 60° , este punto se ubica moviéndose 3 m desde el origen con un ángulo de 60° arriba de la línea de referencia (en dirección contraria a las manecillas del reloj). Un punto especificado por las coordenadas polares 3 m y -60° se ubica 3 m lejos del origen y 60° debajo de la línea de referencia (en la dirección de las manecillas del reloj).

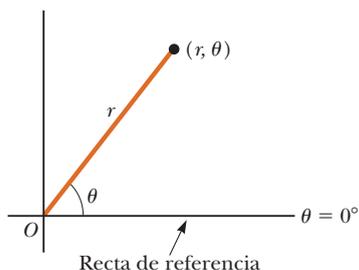


Figura 1.5 Las coordenadas polares de un punto en el plano están representadas por la distancia r y el ángulo θ , donde θ se mide en sentido contrario al de las manecillas del reloj, a partir del eje x positivo.

1.8 Trigonometría

Considere el triángulo rectángulo de la figura activa 1.6, donde el lado y es opuesto al ángulo θ , el lado x es adyacente al ángulo θ y el lado r es la hipotenusa del triángulo. Las funciones trigonométricas básicas definidas en el triángulo mencionado son las razones de las longitudes de los lados del triángulo. Estas relaciones son conocidas como las funciones seno (sen), coseno (cos) y tangente (tan). En términos de θ , las funciones trigonométricas básicas son como sigue:²

$$\begin{aligned}\text{sen } \theta &= \frac{\text{lado opuesto a } \theta}{\text{hipotenusa}} = \frac{y}{r} \\ \text{cos } \theta &= \frac{\text{lado adyacente a } \theta}{\text{hipotenusa}} = \frac{x}{r} \\ \text{tan } \theta &= \frac{\text{lado opuesto a } \theta}{\text{lado adyacente a } \theta} = \frac{y}{x}\end{aligned}$$

[1.1]

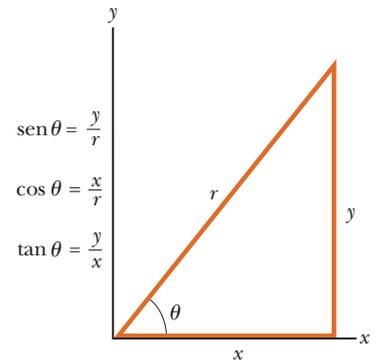


Figura activa 1.6

Algunas funciones trigonométricas de un triángulo rectángulo.

Por ejemplo, si el ángulo θ es igual a 30° , entonces la razón de y a r siempre es 0.50; es decir, $\text{sen } 30^\circ = 0.50$. Observe que las funciones seno, coseno y tangente son cantidades sin unidades porque cada una representa la razón de dos longitudes.

Otra relación importante, denominada **teorema de Pitágoras**, existe entre las longitudes de los lados de un triángulo rectángulo:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad [1.2]$$

Por último, con frecuencia será necesario hallar los valores de las relaciones inversas. Por ejemplo, se sabe que el seno de un ángulo es 0.866, pero necesita conocer el ángulo mismo. Es posible expresar la función seno inverso como $\text{sen}^{-1}(0.866)$, que es la manera corta de hacer la pregunta “¿Qué ángulo tiene un seno de 0.866?” Al oprimir dos teclas de su calculadora revela que este ángulo es 60.0° . Intente esto y demuestre que $\text{tan}^{-1}(0.400) = 21.8^\circ$. Asegúrese que su calculadora está programada para grados, y no para radianes. Además, la función inversa de la tangente puede regresar sólo valores entre -90° y $+90^\circ$, de este modo cuando un ángulo está en el segundo o tercer cuadrante, es necesario sumar 180° a la respuesta en la pantalla de la calculadora.

Las definiciones de las funciones trigonométricas y las funciones trigonométricas inversas, así como el teorema de Pitágoras, pueden ser aplicados a *todo* triángulo rectángulo, independientemente de si sus lados corresponden a las coordenadas x y y .

Estos resultados de la trigonometría son eficaces en la conversión de coordenadas rectangulares a coordenadas polares, o bien, a la inversa, como se muestran en los ejemplos de más adelante.

Tip 1.3 Grados contra radianes

Cuando calcule funciones trigonométricas, cerciórese de que su calculadora está programada en grados o radianes, consistente con la medida en grados que está utilizando en un problema determinado.

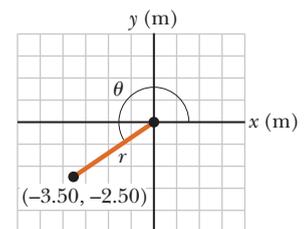
■ EJEMPLO 1.9 Coordenadas cartesianas y polares

OBJETIVO Comprender cómo se convierte del plano de coordenadas rectangulares al plano de coordenadas polares y a la inversa.

PROBLEMA a) Las coordenadas cartesianas de un punto en el plano xy son $(x, y) = (-3.50 \text{ m}, -2.50 \text{ m})$ como se muestra en la figura activa 1.7. Hallar las coordenadas polares de este punto. **b)** Convierta $(r, \theta) = (5.00 \text{ m}, 37.0^\circ)$ a coordenadas rectangulares.

Figura activa 1.7

(Ejemplo 1.9) Conversión de coordenadas cartesianas a coordenadas polares.



ESTRATEGIA Aplique las funciones trigonométricas y sus inversas, junto con el teorema de Pitágoras.

(continúa)

²Mucha gente utiliza el nemotécnico *SOHCAHTOA* para recordar las formulas trigonométricas básicas: Seno = Opuesto/Hipotenusa, Coseno = Adyacente/Hipotenusa y Tangente = Opuesto/Adyacente. (Agradecimientos al profesor Don Chodrow por señalar esto.)

SOLUCIÓN

a) Convierta de cartesiana a polar

Saque la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación 1.2 para encontrar la coordenada radial:

Use la ecuación 1.1 para la función tangente para encontrar el ángulo con la tangente inversa, sume 180° debido a que el ángulo está en realidad en el tercer cuadrante:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(-3.50 \text{ m})^2 + (-2.50 \text{ m})^2} = 4.30 \text{ m}$$

$$\tan \theta = \frac{y}{x} = \frac{-2.50 \text{ m}}{-3.50 \text{ m}} = 0.714$$

$$\theta = \tan^{-1}(0.714) = 35.5^\circ + 180^\circ = 216^\circ$$

b) Convierta de polar a cartesiana

Utilice las definiciones trigonométricas, ecuación 1.1.

$$x = r \cos \theta = (5.00 \text{ m}) \cos 37.0^\circ = 3.99 \text{ m}$$

$$y = r \sin \theta = (5.00 \text{ m}) \sin 37.0^\circ = 3.01 \text{ m}$$

COMENTARIOS Cuando empezamos con vectores en dos dimensiones en el capítulo 3, por costumbre se utiliza un proceso similar para hallar la dirección y magnitud de un vector determinado a partir de sus componentes o bien, a la inversa, para hallar los componentes a partir de la magnitud y dirección del vector.

PREGUNTA 1.9 Inicie con la respuesta del inciso b), trabaje al revés para recuperar el radio y el ángulo determinado. ¿Por qué existen ligeras diferencias con respecto a las cantidades originales?

EJERCICIO 1.9 a) Halle la coordenada polar que corresponde a $(x, y) = (-3.25 \text{ m}, 1.50 \text{ m})$. b) Hallar la coordenada cartesiana correspondiente a $(r, \theta) = (4.00 \text{ m}, 53.0^\circ)$.

RESPUESTAS a) $(r, \theta) = (3.58 \text{ m}, 155^\circ)$ b) $(x, y) = (2.41 \text{ m}, 3.19 \text{ m})$

EJEMPLO 1.10 ¿Qué tan alto es el edificio?

OBJETIVO Aplicar resultados básicos de trigonometría.

PROBLEMA Una persona mide la altura de un edificio al caminar una distancia de 46.0 m desde su base y dirige el haz de luz de una lámpara hacia la parte superior. Cuando el haz de luz es elevado con un ángulo de 39.0° con respecto a la horizontal, como se muestra en la figura 1.8, éste incide justo en la parte superior del edificio.

a) Si la lámpara se sostiene a una altura de 2.00 m, hallar la altura del edificio y b) calcule la longitud del rayo de luz.

ESTRATEGIA Considere el triángulo rectángulo que muestra la figura. Se conoce el ángulo, 39.0° , y la longitud del lado adyacente a éste. Como la altura del edificio es el lado opuesto al ángulo, podemos usar la función tangente. Con los lados adyacente y opuesto conocidos, en este caso podemos encontrar la hipotenusa con el teorema de Pitágoras.

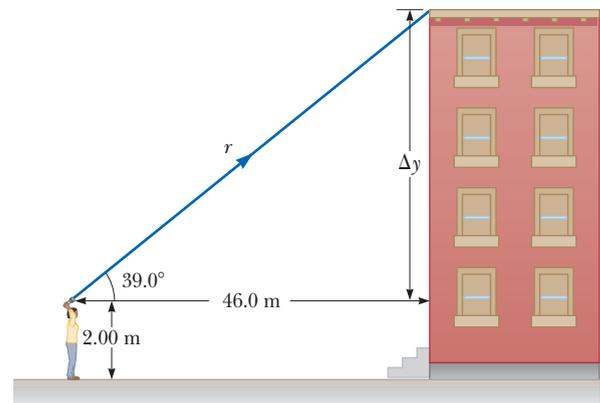


Figura 1.8 (Ejemplo 1.10)

SOLUCIÓN

a) Determine la altura del edificio.

Aplice la tangente del ángulo conocido:

$$\tan 39.0^\circ = \frac{\Delta y}{46.0 \text{ m}}$$

Despejando la altura:

$$\Delta y = (\tan 39.0^\circ)(46.0 \text{ m}) = (0.810)(46.0 \text{ m}) = 37.3 \text{ m}$$

Suma 2.00 m a Δy para obtener la altura:

$$\text{Altura} = 39.3 \text{ m}$$

b) Calcule la longitud del rayo de luz.

Utilice el teorema de Pitágoras:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(37.3 \text{ m})^2 + (46.0 \text{ m})^2} = 59.2 \text{ m}$$

COMENTARIOS En un capítulo posterior, con frecuencia se aplica la trigonometría del triángulo rectángulo al trabajar con vectores.

PREGUNTA 1.10 ¿Cómo podría encontrarse la distancia recorrida por el haz de luz sin aplicar el teorema de Pitágoras?

PREGUNTA 1.10 Mientras está parado encima de un edificio de 50.0 m de alto, descubre a un amigo de pie en la esquina de la calle. Utilizando un transportador y una plomada, encuentra que el ángulo entre la horizontal y la dirección hacia el punto en la acera donde su amigo está de pie es de 25.0° . Sus ojos están ubicados 1.75 m arriba de la parte superior del edificio. ¿A qué distancia desde el nivel del edificio se encuentra su amigo?

RESPUESTA 111 m

1.9 Estrategia de solución de problemas

La mayoría de los cursos en física general requieren que el estudiante aprenda a utilizar sus habilidades en la solución de problemas y por lo general los exámenes incluyen problemas que prueban dichas habilidades. Esta breve sección presenta algunas sugerencias sensatas que ayudarán a incrementar su confianza en la solución de problemas. Además un planteamiento organizado para la solución de problemas intensifica su comprensión de los conceptos físicos y reduce la tensión del examen. En todas las partes del libro, existirá un número de secciones etiquetadas “Estrategia de solución de problemas” muchas de ellas adaptaciones adecuadas de la lista que se proporciona a continuación (y que se explican en la figura 1.9).

Estrategia general para la solución de problemas

Problema

1. **Lea** el problema cuidadosamente por lo menos dos veces. Asegúrese de que comprende la naturaleza del problema antes de proceder más allá.
2. **Trace** un diagrama mientras vuelve a leer el problema.
3. **Etiquete** todas las cantidades físicas en el diagrama, utilizando letras que le recuerden esas cantidades (por ejemplo, m para la masa). Seleccione un sistema coordinado y etiquételo.

Estrategia

4. **Identifique** los principios físicos, los que se conocen y los que se desconocen y ordénelos. Coloque círculos alrededor de los que se desconocen.
5. **Ecuaciones**, la relación entre las cantidades físicas etiquetadas serán rescritas a continuación. Naturalmente, las ecuaciones elegidas son consistentes con los principios físicos identificados en la etapa anterior.

Solución

6. **Resuelva** el conjunto de ecuaciones para las cantidades desconocidas en términos de las que se conocen. Realice esto algebraicamente, sin sustituir valores hasta la siguiente etapa, excepto donde los términos son cero.
7. **Sustituya** los valores conocidos, junto con sus unidades. Obtener un valor numérico con unidades para cada incógnita.

Verifique la respuesta

8. **Verifique** su respuesta. ¿Corresponden las unidades? ¿La respuesta es sensata? ¿Los signos más o menos tienen sentido? ¿Su respuesta es consistente con el orden de magnitud que evaluó?

Este mismo procedimiento, con variaciones mínimas, será seguido en todo el curso. Las primeras tres etapas son extremadamente importantes, porque de ellas adquiere orientación intelectual. Identifique los conceptos y principios físicos adecuados que lo apoyan en la selección de las ecuaciones correctas. Las ecuaciones en sí son esenciales, porque cuando las interpreta comprende además la relación entre las cantidades físicas. Esta comprensión viene a través de mucha práctica diaria.

Las ecuaciones son la herramienta de la física: al resolver problemas, tiene que tenerlas a mano, algo parecido a un plomero y sus llaves de tuercas. Conocer las ecuaciones

1. Lea el problema

2. Trace un diagrama

3. Etiquete las cantidades físicas

4. Identifique el (los) principio(s);
liste los datos

5. Seleccione la(s) ecuación(es)

6. Resuelva la(s) ecuación(es)

7. Sustituya los valores conocidos

8. Verifique la respuesta

Figura 1.9 Una guía para resolver problemas.

Tip 1.4 Utilice álgebra simbólica

Siempre que sea posible resuelva simbólicamente los problemas y después sustituya los valores conocidos. Este proceso ayuda a evitar errores y aclara las relaciones entre las cantidades físicas

y comprender lo que ellas significan y cómo aplicarlas. Al igual que no puede tener una conversación sin conocer la lengua local, no puede resolver problemas en física sin conocer y comprender las ecuaciones. Esta comprensión crece conforme estudia y aplica los conceptos y las ecuaciones que se relacionan.

Completar el álgebra siempre y cuando sea posible, sustituyendo números sólo al final, también es importante, porque le ayuda a pensar en términos de las cantidades físicas involucradas, no simplemente los números que ellos representan. Varios estudiantes que se inician en la física son impacientes al sustituir, pero una vez que se han sustituido los números es difícil entender la relación y facilita el cometer errores.

El esquema físico y organización de su trabajo hará el producto final más comprensible y fácil de seguir. Aunque la física es una disciplina desafiante, su oportunidad de triunfo es excelente si se mantiene en una actitud positiva y continua intentándolo.

EJEMPLO 1.11 Viaje redondo por aire

OBJETIVO Explicar la estrategia de solución de problemas.

PROBLEMA Un avión viaja $x = 4.50 \times 10^2$ km al este y después recorre una distancia desconocida al norte. Por último, regresa a su punto de partida recorriendo una distancia de $r = 525$ km. ¿Qué distancia viajó el avión en su dirección al norte?

ESTRATEGIA Al finalizar la lectura del problema (etapa 1), se traza un diagrama (etapa 2) en la figura 1.10 y se etiqueta (etapa 3). Según el diagrama, se reconoce un triángulo rectángulo y se identifica el principio involucrado (etapa 4): el teorema de Pitágoras. El lado y es la cantidad desconocida y se conocen los otros lados.

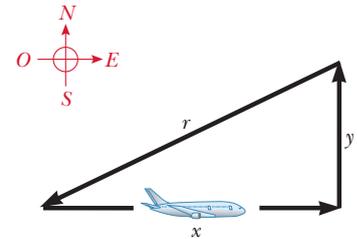


Figura 1.10 (Ejemplo 1.11)

SOLUCIÓN

Escriba el teorema de Pitágoras (etapa 5):

$$r^2 = x^2 + y^2$$

Resuelva simbólicamente para y (etapa 6):

$$y^2 = r^2 - x^2 \quad \rightarrow \quad y = +\sqrt{r^2 - x^2}$$

Sustituya los números, con unidades (etapa 7):

$$y = \sqrt{(525 \text{ km})^2 - (4.50 \times 10^2 \text{ km})^2} = 2.70 \times 10^2 \text{ km}$$

COMENTARIOS Observe que la solución negativa ha sido omitida, porque no es físicamente significativa. Al comprobar (etapa 8), observe que las unidades son correctas y que se puede obtener una respuesta aproximada utilizando las cantidades con facilidad, 500 km y 400 km. Realizado de este modo, se tiene una respuesta de 300 km, que es aproximadamente la misma que la calculada de 270 km.

PREGUNTA 1.11 ¿Cuál es la respuesta si tanto la distancia recorrida hacia el este y la distancia de regreso se duplican?

EJERCICIO 1.11 Un avión vuela 345 km al sur, después regresa y vuela 615 km al noreste, hasta que se encuentra al este de su punto de partida. Si ahora el avión regresa y se dirige a casa, ¿qué distancia viajó?

RESPUESTA 509 km

RESUMEN**1.1 Estándares de longitud, masa y tiempo**

Las cantidades físicas en el estudio de la mecánica pueden ser expresadas en términos de tres cantidades fundamentales: longitud, masa y tiempo, que tienen las unidades SI: metros (m), kilogramos (kg) y segundos (s), respectivamente.

1.2 Elementos constitutivos de la materia

La materia está hecha de átomos, constituidos de un núcleo relativamente pequeño de protones y neutrones dentro de una nube

de electrones. Los protones y neutrones están compuestos de partículas incluso más pequeñas, conocidas como quarks.

1.3 Análisis dimensional

El análisis dimensional puede utilizarse para verificar ecuaciones y toma parte en su deducción. Cuando coinciden las dimensiones en ambos lados de la ecuación, con frecuencia la ecuación es correcta hasta un factor numérico. Cuando las dimensiones no coinciden, la ecuación es incorrecta.

1.4 Incertidumbre en la medición y cifras significativas

Ninguna cantidad física puede determinarse con precisión íntegra. El concepto de cifras significativas proporciona un método básico de manejo de estas incertidumbres. Una cifra significativa es un dígito conocido confiable, diferente de cero, utilizado para ubicar el punto decimal. Las dos reglas de las cifras significativas son las siguientes:

1. Cuando se multiplica o se divide utilizando dos o más cantidades, el resultado tiene el mismo número de cifras significativas que la cantidad con el menor número de cifras significativas.
2. Cuando las cantidades se suman o se restan el número de cifras decimales en el resultado es el mismo que en la cantidad con el menor número de cifras decimales.

El uso de la notación científica puede evitar confusiones en las cifras significativas. En el redondeo, si el último dígito omitido es menor que 5, simplemente se excluye; de otra manera el último dígito retenido se lleva al siguiente en uno.

1.5 Conversión de unidades

Las unidades en las ecuaciones físicas siempre deben ser consistentes. En la solución de problemas de física, es mejor iniciar con unidades consistentes, utilizando la tabla de factores de conversión del interior de la cubierta, como sea necesario.

La conversión de unidades es un asunto de multiplicar la cantidad conocida por una fracción con una unidad en el numerador y su equivalente en las otras unidades en el denominador, ordenado de tal modo que las unidades no deseadas en la cantidad conocida se cancelen a favor de las unidades deseadas.

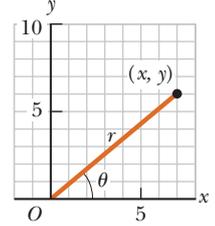
1.6 Cálculos aproximados y de orden de magnitud

Algunas veces es útil hallar una respuesta aproximada a una pregunta, ya sea porque la matemática es difícil o porque la información es incompleta. También se puede aplicar una evaluación rápida para verificar un cálculo más detallado. En el cálculo de orden de magnitud, cada valor es sustituido por

la potencia de 10 más cercana, que algunas veces debe suponerse o estimar cuando se desconoce el valor, en tal caso se realizan los cálculos. Para evaluaciones rápidas que incluyen valores conocidos, primero puede ser redondeado cada valor a una cifra significativa.

1.7 Sistemas de coordenadas

El sistema cartesiano coordinado consiste en dos ejes perpendiculares, por lo general conocidos como eje x y eje y , con cada eje etiquetado con todos los números desde el infinito negativo al infinito positivo. Los puntos son ubicados para especificar los valores x y y . Las coordenadas polares consisten en una coordenada radial r , que es la distancia desde el origen, y una coordenada angular θ que es el desplazamiento angular desde el eje x positivo.



Un punto en el plano puede ser descrito con coordenadas cartesianas (x, y) o en coordenadas polares (r, θ) .

1.8 Trigonometría

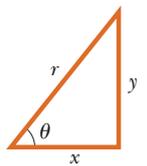
Las tres funciones trigonométricas básicas de un triángulo rectángulo son el seno, coseno y tangente, que se definen como sigue:

$$\begin{aligned} \text{sen } \theta &= \frac{\text{lado opuesto a } \theta}{\text{hipotenusa}} = \frac{y}{r} \\ \text{cos } \theta &= \frac{\text{lado adyacente a } \theta}{\text{hipotenusa}} = \frac{x}{r} \\ \text{tan } \theta &= \frac{\text{lado opuesto a } \theta}{\text{lado adyacente a } \theta} = \frac{y}{x} \end{aligned} \quad [1.1]$$

El **teorema de Pitágoras** es una importante relación entre las longitudes de los lados de un triángulo rectángulo:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad [1.2]$$

donde r es la hipotenusa del triángulo, x y y son los otros dos lados.



PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una pista de aterrizaje-despegue mide 32.30 m por 210 m, con el ancho medido con más precisión que el largo. Halle el área, tomando en cuenta las cifras significativas. a) $6.7830 \times 10^3 \text{ m}^2$ b) $6.783 \times 10^3 \text{ m}^2$ c) $6.78 \times 10^3 \text{ m}^2$ d) $6.8 \times 10^3 \text{ m}^2$ e) $7 \times 10^3 \text{ m}^2$
2. Considere dos cantidades, A y B , que tienen diferentes dimensiones. Determine cuál de las operaciones aritméticas que siguen *podría* ser físicamente significativa. a) $A + B$ b) $B - A$ c) $A - B$ d) A/B e) AB
3. La segunda ley del movimiento de Newton (capítulo 4) dice que la masa de un objeto por su aceleración es igual a la fuerza neta sobre el objeto. ¿Cuál de los siguientes proporciona las unidades correctas para la fuerza? a) $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ b) $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ c) $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}^2$ d) $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ e) ninguna de éstas
4. Aplique las reglas para las cifras significativas y halle la respuesta al problema de suma $21.4 + 15 + 17.17 + 4.003$. a) 57.573 b) 57.57 c) 57.6 d) 58 e) 60

- El codo romano es una antigua unidad de medida equivalente a casi 445 mm. Convertir la altura de un basquetbolista de 2 m de altura a codos. a) 2.52 codos b) 3.12 codos c) 4.49 codos d) 5.33 codos e) ninguno de éstos
- Se anuncia una casa que tiene 1 420 pies cuadrados bajo techo. ¿Cuál es el área de la casa en m^2 ? a) $115 m^2$ b) $132 m^2$ c) $176 m^2$ d) $222 m^2$ e) ninguno de éstos
- Responda a cada pregunta sí o no. ¿Deben dos cantidades tener las mismas dimensiones a) si usted las está sumando? b) ¿Si usted las está multiplicando? c) ¿Si las está restando? d) ¿Si las está dividiendo? e) ¿Si las está comparando?
- Halle la coordenada polar que corresponde a un punto ubicado en $(-5.00, 12.00)$ en coordenadas cartesianas. a) $(13.0, -67.4^\circ)$ b) $(13.0, 113^\circ)$ c) $(14.2, -67.4^\circ)$ d) $(14.2, 113^\circ)$ e) $(19, -72.5^\circ)$
- ¿Cuál de las siguientes relaciones es dimensionalmente consistente con una expresión que produce un valor para la aceleración? Ésta tiene unidades de distancia divididas entre tiempo al cuadrado. En estas ecuaciones, x es la distancia, t es el tiempo y v es la velocidad con unidades de distancia divididas entre el tiempo. a) v/t^2 b) v/x^2 c) v^2/t d) v^2/x e) ninguna de éstas
- El precio de la gasolina en una estación en particular es 1.5 euros por litro. Una estudiante estadounidense puede utilizar 33 euros para comprar gasolina. Sabiendo que cuatro cuartos hacen un galón y que un litro se encuentra cerca de un cuarto, ella razona rápidamente: ¿cuántos galones de gasolina puede comprar? a) menos de 1 galón b) alrededor de 5 galones c) alrededor de 8 galones d) más de 10 galones
- En una distancia horizontal de 45 m medida desde un árbol, el ángulo de elevación a la parte superior del árbol es 26° . ¿Qué tan alto es el árbol? a) 22 m b) 31 m c) 45 m d) 16 m e) 11 m
- Una calculadora muestra un resultado como 1.3652480×10^7 kg. La incertidumbre estimada en el resultado es de $\pm 2 \times 10^5$ kg. ¿Cuántos dígitos deben ser incluidos como cifra significativa cuando el resultado está escrito hacia abajo? a) cero b) una c) dos d) tres e) cuatro

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Estime el orden de magnitud de la longitud, en metros, de cada uno de los siguientes: a) un ratón, b) un taco de billar, c) una cancha de basquetbol, d) un elefante, e) una calle.
- ¿Qué tipos de fenómenos naturales podrían servir como modelo de tiempo?
- Halle el orden de magnitud de su edad en segundos.
- Un objeto con una masa de 1 kg pesa aproximadamente 2 lb. Utilice esta información para estimar la masa de los objetos que siguen: a) una pelota de béisbol b) su libro de física c) una camioneta.
- BIO** a) Estime el número de latidos de su corazón en un mes. b) Estime el número de latidos de un corazón humano en una vida promedio.
- Estime el número de átomos en 1 cm^3 de un sólido. (Observe que el diámetro de un átomo es casi 10^{-10} m.)
- En ocasiones se proporciona la altura de un caballo en unidades de “palmas”. ¿Por qué es un estándar deficiente de longitud?
- ¿Cuántos intervalos de longitud y de tiempo conocidos en las tablas 1.2 y 1.3 podría verificar, utilizando únicamente el equipo hallado en un dormitorio típico?
- a) Si una ecuación es dimensionalmente correcta, ¿significa que esto debe ser verdadero? b) Si una ecuación no es dimensionalmente correcta, ¿significa que la ecuación no puede ser verdadera? Explique sus respuestas.
- ¿Por qué se considera el sistema métrico de unidades superior a la mayoría de otros sistemas de unidades?
- ¿Cómo puede estimar un valor incluso cuando está fuera de un orden de magnitud? Explique y proporcione un ejemplo.

■ PROBLEMAS

ENHANCED

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*
- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

1.3 Análisis dimensional

- El periodo de un péndulo simple, definido como el tiempo necesario para una oscilación completa, se mide en unidades de tiempo y se proporciona mediante

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

donde ℓ es la longitud del péndulo y g es la aceleración debida a la gravedad, en unidades de longitud dividida entre tiempo al cuadrado. Muestre que esta ecuación es dimensionalmente consistente. (Puede verificar la fórmula utilizando sus llaves en el extremo de una cuerda y un cronómetro.)

- a) Suponga que el desplazamiento de un objeto se relaciona al tiempo de acuerdo con la expresión $x = Bt^2$. ¿Cuáles son las dimensiones de B ? b) Un desplazamiento se relaciona con el tiempo como $x = A \sin(2\pi ft)$, donde A y f son constantes. Halle las dimensiones de A . (Sugerencia: Una función trigonométrica que aparece en una ecuación debe ser adimensional.)
- S** Una forma que cubre un área A y tiene una altura uniforme h tiene un volumen $V = Ah$. a) Muestre que $V = Ah$ es dimensionalmente correcta. b) Muestre que el volumen de un cilindro y de una caja rectangular pueden ser rescritas en la forma $V = Ah$ identificando A en cada caso. (Observe que A , en ocasiones llamada “huella” del objeto, puede tener cualquier forma y que la altura, en general, se sustituye por el espesor promedio del objeto.)
- Cada una de las ecuaciones que siguen fueron proporcionadas por un estudiante durante un examen: a) $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 + \sqrt{mgh}$ b) $v = v_0 + at^2$ c) $ma = v^2$. Realice un análisis dimensional de cada ecuación y explique por qué la ecuación no puede ser correcta.
- La ley de la gravitación universal de Newton se representa mediante

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

donde F es la fuerza gravitacional, M y m son masas y r es una longitud. La fuerza tiene unidades SI $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$. ¿Cuáles son las unidades SI de la constante de proporcionalidad G ?

- CIC** La energía cinética EC (capítulo 5) tiene dimensiones $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$. Puede describirse en términos de la cantidad de movimiento p (capítulo 6) y la masa m como

$$EC = \frac{p^2}{2m}$$

a) Establezca las unidades adecuadas para la cantidad de movimiento utilizando análisis dimensional. b) Con respecto al problema 5, proporcione las unidades de fuerza, escriba una ecuación simple que relacione una fuerza constante F que se ejerce sobre un objeto, un intervalo de tiempo t durante el cual se aplica la fuerza y la cantidad de movimiento que resulta del objeto, p .

1.4 Incertidumbre en el sistema de medida y cifras significativas

- Se va a instalar una alfombra en una sala de longitud de 9.72 m y ancho de 5.3 m. Encuentre el área de la sala reteniendo el número apropiado de cifras significativas.

- CIC** Use su calculadora para determinar $(\sqrt{8})^3$ para tres cifras significativas de dos maneras: a) Encuentra $\sqrt{8}$ a cuatro cifras significativas, luego eleve al cubo este número y redondee con tres cifras significativas. b) Encuentre $\sqrt{8}$ a tres cifras significativas, a continuación, eleve este número al cubo y redondee a tres cifras significativas. c) ¿Cuál respuesta es más precisa? Explique.

- Cuántas cifras significativas existen en a) 78.9 ± 0.2 , b) 3.788×10^9 , c) 2.46×10^{-6} , d) 0.003 2
- Ahora la rapidez de la luz se define como 2.997 924 58 $\times 10^8$ m/s. Expresar la rapidez de la luz a) a tres cifras significativas, b) a cinco cifras significativas y c) a siete cifras significativas.
- CIC** Un bloque de oro tiene 5.62 cm de longitud, 6.35 cm de ancho y 2.78 cm de altura. a) Calcule la longitud por el ancho y redondee la respuesta al número adecuado de cifras significativas. b) Ahora multiplique el resultado redondeado del inciso a) por la altura y redondee una vez más, obtenga el volumen. c) Repita el proceso, primero hallando el ancho por la altura, redondee y a continuación obtenga el volumen multiplicando por la longitud. d) Explique por qué las respuestas no coinciden en la tercera cifra significativa.
- Se mide el radio de un círculo de (10.5 ± 0.2) m. Calcule a) el área y b) la circunferencia del círculo y proporcione la incertidumbre de cada valor.
- Los bordes de una caja de zapatos se miden en 11.4 cm, 17.8 cm y 29 cm. Determine el volumen de la caja conservando el número apropiado de cifras significativas en su respuesta.
- Lleve a cabo las operaciones aritméticas que siguen: a) la suma de los valores observados 756, 37.2, 0.83 y 2.5; b) el producto $0.003 2 \times 356.3$; c) el producto $5.620 \times \pi$.

1.5 Conversión de unidades

- Una braza es una unidad de longitud, por lo general reservada para medir la profundidad del agua. Una braza tiene aproximadamente 6 pies de longitud. Considere la distancia desde la Tierra hasta la Luna 250 000 mi y utilice la aproximación que se proporciona para hallar la distancia en brazas.
- Una pequeña tortuga se mueve a una velocidad de 186 furlongs en dos semanas. Halle la velocidad de la tortuga en centímetros por segundo. Tenga en cuenta que un furlong = 220 yardas y dos semanas = 14 días.
- Un firkin es una antigua unidad inglesa de volumen igual a 9 galones. ¿A cuántos metros cúbicos equivalen 6.00 firkins?
- Hallar la altura o longitud de estas maravillas naturales en kilómetros, metros y centímetros: a) El sistema de cuevas más largo en el mundo es el sistema Mammoth Cave en Central Kentucky, con una longitud de trazo mapeada de 348 mi. b) En Estados Unidos, la cascada con la caída más grande es Ribbon Falls en California, con 1 612 pies. c) Con 20 320 pies, Mount McKinley en Alaska es la montaña más alta de Estados Unidos. d) El cañón más profundo en Estados Unidos es King’s Canyon en California, con una profundidad de 8 200 pies.

19. Un automóvil viaja a una velocidad de 38.0 m/s en una carretera interestatal donde el límite de velocidad es de 75.0 mi/h. ¿El conductor va a exceso de velocidad? Justifique su respuesta.
20. Un determinado coche tiene una eficiencia de combustible de 25.0 millas por galón (mi/galón). Expresa esta eficiencia en kilómetros por litro (km/L).
21. El diámetro de una esfera mide 5.36 pulg. Calcule: a) el radio de la esfera en centímetros, b) la superficie de la esfera en centímetros cuadrados y c) el volumen de la esfera en centímetros cúbicos.
22. **BIO** Suponga que su cabello crece a razón de 1/32 pulg por día. Halle la razón con la que crece en nanómetros por segundo. Como la distancia entre átomos en una molécula es del orden de 0.1 nm, su respuesta sugiere qué tan rápido los átomos son reunidos en esta síntesis de proteína.
23. La rapidez de la luz es de casi 3.00×10^8 m/s. Convierta esta cifra a millas por hora.
24. **M** Una casa tiene 50.0 pies de largo, 26 pies de ancho y 8.0 pies de altura de techo. ¿Cuál es el volumen en el interior de la casa en metros cúbicos y en centímetros cúbicos?
25. Con frecuencia la cantidad de agua en un recipiente se mide en acre-pie. Un acre-pie es un volumen que cubre un área de un acre a la profundidad de un pie. Un acre es 43 560 pies². Halle el volumen en unidades SI de un recipiente que contiene 25.0 acre-pies de agua.
26. La base de una pirámide cubre un área de 13.0 acres (1 acre = 43 560 pies²) y tiene una altura de 481 pies (figura P1.26). Si el volumen de una pirámide se conoce por la expresión $V = bh/3$, donde b es el área de la base y h es la altura, halle el volumen de esta pirámide en metros cúbicos.



Figura P1.26

27. Un recipiente de un cuarto de helado tiene la forma de cubo. ¿Cuál es la longitud de un lado, en centímetros? (Utilice la conversión 1 galón = 3.786 litros.)

1.6 Cálculos aproximados y de orden de magnitud

Nota: En el desarrollo de las respuestas a los problemas en esta sección, establezca sus consideraciones principales, incluyendo los valores numéricos asignados a los parámetros utilizados en la solución.

28. Estime el número de pasos que tomaría para recorrer una distancia igual a la circunferencia de la Tierra.
29. **BIO** Estime el número de respiraciones de un ser humano durante una vida promedio.
30. **BIO** Estime el número de gente en el mundo que sufren a causa del resfriado común en cualquier día determinado. (Las respuestas pueden variar. Recuerde que una persona sufre a causa de un resfriado por casi una semana.)
31. **BIO C/C** a) ¿Aproximadamente cuántos microorganismos se hallan en el tracto intestinal humano? (Una escala de longitud de una bacteria representativa es de 10^{-6} m. Estime el volumen intestinal y considere un centésimo de él ocupado por bacterias.) b) Explique su respuesta del inciso a). ¿Estas bacterias son benéficas, peligrosas o neutras? ¿Qué funciones de ellas podrían ser útiles?
32. **BIO** Considere una célula de un ser humano como una esfera de radio 1.0 μm . a) Determine el volumen de una célula. b) Estime el volumen de su cuerpo. c) Estime el número de las células de su cuerpo.
33. La llanta de un automóvil se especifica al menos para 50 000 millas. Estime el número de revoluciones que la llanta realiza en su vida media.
34. **BIO C/C** Bacterias y otros procariotes se encuentran en el subsuelo profundo, en el agua y en el aire. Una micra (10^{-6} m) es una escala de longitud representativa asociada con estos microbios. a) Estime el número total de bacterias y otros procariotes en la biosfera de la Tierra. b) Estime la masa total de todos los microbios semejantes. c) Explique la importancia relativa de los humanos y los microbios en la ecología del planeta Tierra. ¿El *Homo sapiens* puede sobrevivir sin ellos?

1.7 Sistemas de coordenadas

35. **M** Se ubica un punto en un sistema de coordenadas polares mediante las coordenadas $r = 2.5$ m y $\theta = 35^\circ$. Halle las coordenadas x y y de este punto, suponiendo que los dos sistemas tienen el mismo origen.
36. Se selecciona cierta esquina de una habitación como origen de un sistema coordenado rectangular. Si una mosca reptante sobre una pared adyacente en un punto que tiene coordenadas (2.0, 1.0), donde las unidades son metros, ¿cuál es la distancia de la mosca desde la esquina de la habitación?
37. Expresa la ubicación de la mosca del problema 36 en coordenadas polares.
38. Dos puntos en un sistema coordenado rectangular tienen las coordenadas (5.0, 3.0) y (-3.0, 4.0), donde las unidades son centímetros. Calcule la distancia entre estos puntos.
39. Se conocen dos puntos por sus coordenadas polares $(r, \theta) = (2.00 \text{ m}, 50.0^\circ)$ y $(r, \theta) = (5.00 \text{ m}, -50.0^\circ)$, respectivamente. ¿Cuál es la distancia entre ellos?
40. **S** Conocidos los puntos (r_1, θ_1) y (r_2, θ_2) en coordenadas polares, obtenga una fórmula general para la distancia entre ellos. Simplifique tanto como sea posible aplicando la identidad $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$. *Su-*

gerencia: escriba las expresiones para los dos puntos en coordenadas cartesianas y sustituya dentro de la fórmula usual de distancia.

1.8 Trigonometría

41. **M** Para el triángulo que se muestra en la figura P1.41, ¿cuáles son a) la longitud del lado desconocido, b) la tangente de θ y c) el seno de ϕ ?

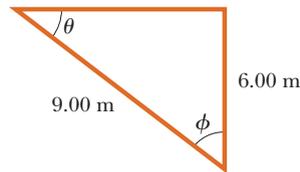


Figura P1.41

42. Una escalera de 9.00 m de largo se inclina contra el lado de un edificio. Si el ángulo de inclinación de la escalera es de 75.0° con la horizontal, ¿cuál es la distancia horizontal desde la parte inferior de la escalera al edificio?

43. Una fuente se ubica en el centro de un estanque circular como se muestra en la figura P1.43. Sin mojar sus pies, un estudiante camina alrededor del estanque y mide la circunferencia de 15.0 m. A continuación el estudiante se sitúa en el borde del estanque y utiliza un transportador para medir el ángulo de elevación del chorro de agua con la parte inferior de la fuente que es de 55.0° . ¿Cuál es la altura de la fuente?

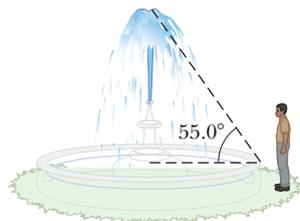


Figura P1.43

44. Un triángulo rectángulo tiene una hipotenusa de 3.00 m de longitud y uno de sus ángulos es de 30° . ¿Cuáles son las longitudes de a) el lado opuesto al ángulo de 30° y b) el lado adyacente al ángulo de 30° ?

45. En la figura P1.45, halle a) el lado opuesto a θ , b) el lado adyacente a ϕ , c) $\cos \theta$, d) $\sin \phi$ y e) $\tan \phi$.

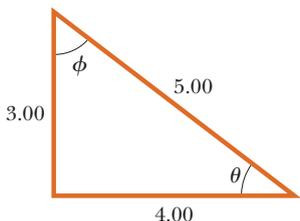


Figura P1.45

46. En cierto triángulo rectángulo, los dos lados que son perpendiculares entre sí miden 5.00 m y 7.00 m de largo, respectivamente. ¿Cuál es la longitud del tercer lado del triángulo?

47. En el problema 46, ¿cuál es la tangente del ángulo para el cual 5.00 m es el lado opuesto?

48. **PG S** Una mujer mide el ángulo de elevación de la parte superior de una montaña como 12.0° . Después camina 1.00 km más cerca de la montaña a nivel de piso, encuentra que el ángulo es de 14.0° . a) Trace un gráfico del problema, omitiendo la altura de los ojos de la mujer por encima de la superficie de la Tierra. *Sugerencia:* Utilice dos triángulos. b) Seleccione nombres variables para la altura de la montaña (indicación: y) y la distancia original de la mujer desde la montaña (indicación: x) y etiquete el gráfico. c) Utilice las marcas en el gráfico y la función tangente, escriba dos ecuaciones trigonométricas que relacionen las dos variables elegidas. d) Halle la altura

y de la montaña primero resolviendo una ecuación para x y sustituyendo el resultado dentro de la otra ecuación.

49. Un topógrafo mide la distancia de un lado a otro de un río recto, mediante el siguiente método. Comienza directamente al otro lado desde un árbol en la orilla opuesta, camina $x = 100$ m a lo largo de la orilla del río para establecer una línea base. A continuación observa al otro lado del árbol. El ángulo desde su línea base hacia el árbol es $\theta = 35.0^\circ$ (figura P1.49). ¿Cuál es el ancho del río?

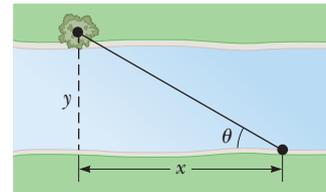


Figura P1.49

50. **S** Con respecto al problema 48. Considere que la altura de la montaña es y , la distancia original de la mujer desde la montaña es x y el ángulo de elevación que mide desde la horizontal hacia la parte superior de la montaña es θ . Si se mueve una distancia d más cerca de la montaña y mide un ángulo de elevación ϕ , halle una ecuación general para la altura de la montaña y en términos de d , ϕ y θ , omitiendo la altura de sus ojos por encima de la superficie del suelo.

Problemas adicionales

51. a) Una de las leyes fundamentales del movimiento establece que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza resultante en él, e inversamente proporcional a su masa. Si la constante de proporcionalidad se define sin unidades, determine las dimensiones de la fuerza. b) El newton es la unidad SI de fuerza. De acuerdo con los resultados del inciso a), ¿cómo puede expresar una fuerza que tiene unidades en newtons mediante la aplicación de las unidades fundamentales de masa, longitud y tiempo?

52. a) Halle un factor de conversión para convertir de millas por hora a kilómetros por hora. b) Por un tiempo, la ley federal decretó que la velocidad máxima en una autopista sería 55 mi/h. Utilice el factor de conversión del inciso a) para hallar la rapidez en kilómetros por hora. c) Se ha elevado la velocidad máxima en la autopista a 65 mi/h en algunos lugares. En kilómetros por hora, ¿de cuánto es el incremento sobre el límite de 55 mi/h?

53. **BIO** Un centímetro cúbico (1.0 cm^3) de agua tiene una masa de $1.0 \times 10^{-3} \text{ kg}$. a) Determine la masa de 1.0 m^3 de agua. b) Considerando que las sustancias biológicas son 98% agua, estime la masa de una célula con un diámetro de $1.0 \mu\text{m}$, c) un riñón humano d) y una mosca. Considere el riñón de manera aproximada como una esfera con un radio de 4.0 cm y la mosca, de manera burda como un cilindro de 4.0 mm de largo y 2.0 mm de diámetro.

54. Usualmente las bebidas suaves son vendidas en recipientes de aluminio. En orden de magnitud, a) ¿cuántos recipientes son tirados o reciclados cada año por los consumidores en Estados Unidos? b) ¿Cuántas toneladas de aluminio representa esto? En su solución, establezca las cantidades que mide o estima y los valores que toma para ellas.
55. El desplazamiento de un objeto móvil bajo aceleración uniforme es cierta función del tiempo y la aceleración. Suponga que se escribe este desplazamiento como $s = ka^m t^n$, donde k es una constante adimensional. Muestre mediante análisis dimensional que esta expresión se satisface si $m = 1$ y $n = 2$. ¿El análisis puede proporcionar el valor de k ?
56. Suponga que toma 7.00 minutos llenar el tanque de gasolina con 30.0 galones. a) Calcule la velocidad a la que se llena el tanque en galones por segundo. b) Calcule la tasa a la que se llena el tanque en metros cúbicos por segundo. c) Determine el intervalo de tiempo, en horas, requerido para llenar un volumen de 1.00 m^3 en la misma proporción. (1 galón estadounidense = 231 pulg^3 .)
57. **M** Un galón de pintura (volumen = $3.79 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) alcanza para pintar una superficie de 25.0 m^2 . ¿Cuál es el espesor de la pintura fresca en la pared?
58. **S** La esfera 1 tiene área de superficie A_1 y volumen V_1 y la esfera 2 tiene área de superficie A_2 y volumen V_2 . Si el radio de la esfera 2 es el doble del radio de la esfera 1, ¿cuál es la razón de a) las áreas, A_2/A_1 y b) los volúmenes, V_2/V_1 ?
59. **M** Suponga que hay 100 millones de automóviles en Estados Unidos y que el consumo medio de combustible es de 20 mi/gal de gasolina. Si la distancia media recorrida por cada vehículo es de 10 000 mi/año, ¿qué cantidad de gasolina podría ahorrarse al año si el consumo medio de combustible aumentara a 25 mi/gal?
60. En el momento de la impresión de este libro, la deuda nacional estadounidense fue de aproximadamente \$10 billones. a) Si los pagos se hicieran a razón de \$1000 por segundo, ¿cuántos años tardaría en pagar la deuda, en el supuesto de que no le fueran cargados intereses? b) Un billete de un dólar tiene aproximadamente 15.5 cm de largo. Si 10 billones de billetes de dólar fueran de pun-

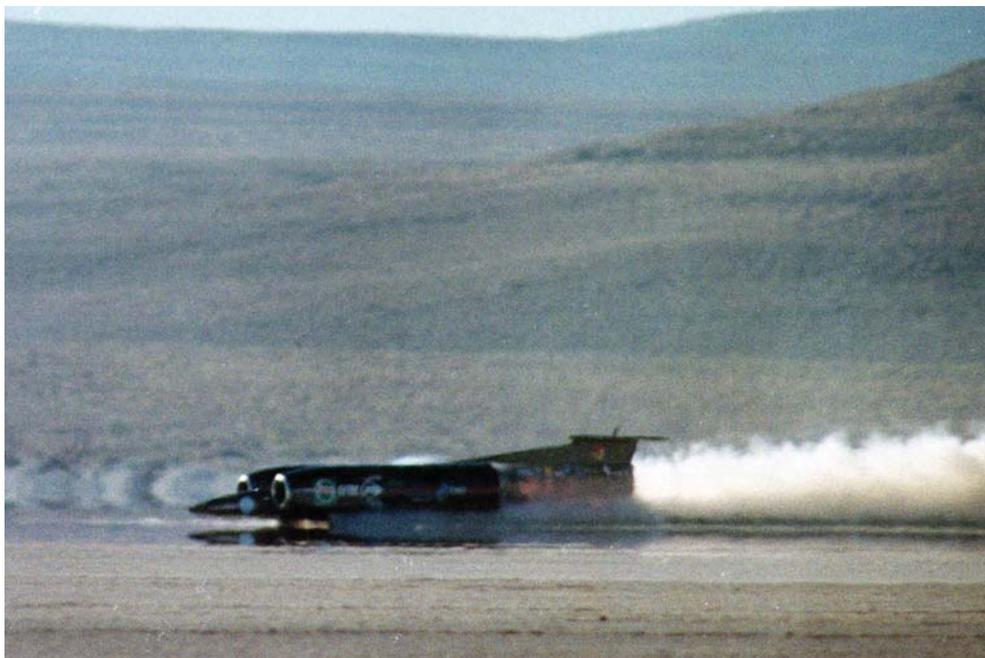
ta a punta alrededor del Ecuador de la Tierra, ¿cuántas veces tendría que rodear el planeta? Tome el radio de la Tierra en el Ecuador como 6378 kilómetros. (*Nota:* Antes de hacer alguno de estos cálculos, intente adivinar la respuesta. Es posible que se sorprenda.)

61. a) ¿Cuántos segundos existen en un año? b) Si un micrometeorito (una esfera con un diámetro en el orden de 10^{-6} metros) golpea cada metro cuadrado de la Luna cada segundo, estime el número de años que le tomaría cubrir la Luna con micrometeoritos a una profundidad de un metro. (*Sugerencia:* Considere una caja cúbica, de 1 m de lado, sobre la Luna y encuentre cuánto tiempo tardaría en llenar la caja.)
62. Imagine que es el entrenador de un equipo de béisbol profesional. Uno de sus pasatiempos para el juego es mantener la pelota en su mano. Algunas de las veces se pierden las pelotas cuando el jugador la golpea fuera del campo. Estime cuántas pelotas tiene que comprar por cada temporada a fin de cubrir tales pérdidas. Considere que su equipo participa en 81 juegos en casa en una temporada.
63. La estrella de neutrones más cercana (una estrella colapsada hecha principalmente de neutrones) está aproximadamente a $3.00 \times 10^{18} \text{ m}$ de la Tierra. Teniendo en cuenta que la Vía Láctea (figura P1.63) es más o menos un disco de diámetro $\sim 10^{21} \text{ m}$, y espesor de $\sim 10^{19} \text{ m}$, estime el número de estrellas de neutrones en la Vía Láctea con una precisión cercana a este orden de magnitud.



Richard Payne/NASA

Figura P1.63



El poseedor del récord actual absoluto de velocidad en tierra es el diseño británico ThrustSSC, un coche con motor turbofan gemelo que alcanzó 763 millas por hora (1228 km/h) para la milla (1.6 km), rompiendo la barrera del sonido. El coche fue conducido por Andy Green (Reino Unido) el 15 de octubre de 1997 en el desierto Black Rock en Gerlach, Nevada.

Movimiento en una dimensión

2

La vida es movimiento. Nuestros músculos coordinan microscópicamente el movimiento que nos permite caminar y desplazarnos. Nuestros corazones bombean sin descanso por décadas, moviendo la sangre a través de nuestros cuerpos. Los mecanismos de las paredes de la célula mueven de manera selectiva átomos y moléculas hacia adentro y hacia afuera de las mismas. Desde la persecución prehistórica del antilope a través de la sabana, hasta el seguimiento de satélites en el espacio, el dominio del movimiento ha sido crucial para la sobrevivencia y éxito nuestros como especie.

Al estudio del movimiento y de los conceptos físicos como la fuerza y la masa se le conoce como **dinámica**. La parte de la dinámica que describe el movimiento sin importar sus causas se le conoce como **cinemática**. En este capítulo, el enfoque es sobre la cinemática en una dimensión: movimiento a lo largo de una línea recta. Esta clase de movimiento y, en realidad *cualquier* movimiento, involucra los conceptos de desplazamiento, velocidad y aceleración. Aquí se utilizan para estudiar el movimiento de objetos que se someten a una aceleración constante. En el capítulo 3 se reproducirá esta explicación para objetos moviéndose en dos dimensiones.

La primera evidencia registrada del estudio de la mecánica puede ser atribuida a la gente de la antigua Sumeria y Egipto, quienes estuvieron interesados principalmente en comprender los movimientos de los cuerpos celestes. Los primeros estudios más sistemáticos y detallados del cielo fueron realizados por los griegos desde el año 300 a.C. hasta el 300 d.C. Los antiguos científicos y la gente común consideraron a la Tierra como el centro del Universo. Este **modelo geocéntrico** fue extensamente aceptado por personajes notables como Aristóteles (384-322 a.C.) y Claudio Ptolomeo (hacia 140 d.C.) y, debido a la autoridad de Aristóteles, el modelo geocéntrico fue la teoría del Universo aceptada hasta el siglo xvii.

Hacia el año 250 a.C. el filósofo griego Aristarco trabajó los detalles de un modelo del Sistema solar en términos de una Tierra esférica que gira en su eje y revoluciona alrededor del Sol. Propuso que el cielo parece girar desde el Oeste porque la Tierra estaba girando hacia el Este. A este modelo no se le dio mucha importancia porque se creía que una Tierra girando generaría vientos poderosos que se mueven a través del aire. Ahora se sabe que la Tierra transporta el aire y diferentes cosas con ella mientras se mueve.

Al astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) se le acredita como el iniciador de la revolución que finalmente sustituye el modelo geocéntrico. En su sistema, conocido como **modelo heliocéntrico**, la Tierra y los otros planetas giran en órbitas circulares alrededor del Sol.

- 2.1 Desplazamiento
- 2.2 Velocidad
- 2.3 Aceleración
- 2.4 Diagramas de movimiento
- 2.5 Movimiento en una dimensión con aceleración constante
- 2.6 Objetos en caída libre

Este conocimiento inicial formó los fundamentos para el trabajo de Galileo Galilei (1564-1642), a quien se le reconoce como el principal facilitador de la entrada de la física en la era moderna. En 1609 se convierte en uno de los primeros en hacer observaciones astronómicas con un telescopio. Observó montañas en la Luna, los grandes satélites de Júpiter, manchas en el Sol y las fases de Venus. Las observaciones de Galileo lo convencieron de la certeza de la teoría de Copérnico. Su estudio cuantitativo del movimiento configuró los fundamentos del trabajo revolucionario de Newton en el siglo siguiente.

2.1 Desplazamiento

El movimiento involucra el desplazamiento de un objeto desde un lugar en el espacio y tiempo hacia otro. Describir el movimiento requiere algún sistema coordenado conveniente y un origen específico. Un **marco de referencia** es una elección de ejes coordenados que definen el punto de inicio para medir cualquier cantidad, una primera etapa esencial en la solución implícita de cualquier problema en mecánica (figura 2.1). Por ejemplo, en la figura activa 2.2a, un automóvil se traslada a lo largo del eje x . Las coordenadas del auto en cualquier momento describen su posición en el espacio y lo más importante, su *desplazamiento* en algún tiempo de interés dado.

Definición de desplazamiento ►

El **desplazamiento** Δx de un objeto se define como su *cambio de posición* y está dado por

$$\Delta x \equiv x_f - x_i \quad [2.1]$$

donde la posición inicial del auto se marca con x_i y la posición final x_f . (Los índices i y f establecen el inicio y el final, respectivamente.)

Unidad SI: metro (m)

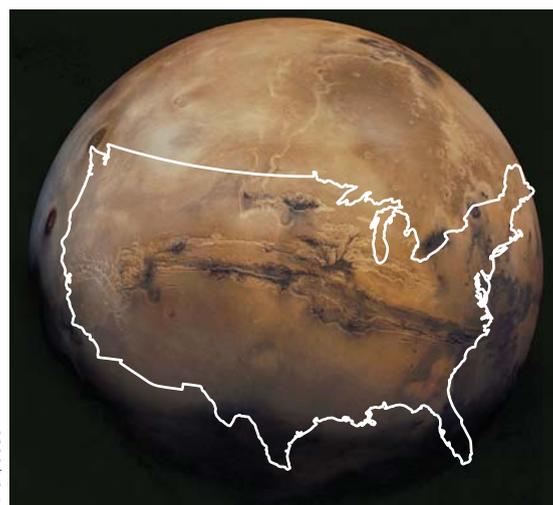
Tip 2.1 ¡Un desplazamiento no es una distancia!

El desplazamiento de un objeto *no* es lo mismo que la distancia que recorre. Arroje una pelota de tenis hacia arriba y atrápela. La pelota recorre una *distancia* igual a dos veces la altura máxima que alcanza, pero su *desplazamiento* es cero.

Utilizaremos la letra griega delta, Δ , para indicar un cambio en cualquier cantidad física. A partir de la definición de desplazamiento, vemos que Δx (se lee “delta equis”) es positiva si x_f es mayor que x_i y es negativa si x_f es menor que x_i . Por ejemplo, si el auto se mueve desde el punto **A** hasta el punto **B** de tal modo que la posición inicial es $x_i = 30$ m y la posición final es $x_f = 52$ m, el desplazamiento es $\Delta x = x_f - x_i = 52 \text{ m} - 30 \text{ m} = +22 \text{ m}$. Sin embargo, si el automóvil se mueve desde el punto **C** hasta el punto **E**, en tal caso la posición inicial es $x_i = 38$ m y la posición final es $x_f = -53$ m, y el desplazamiento es $\Delta x = x_f - x_i = -53 \text{ m} - 38 \text{ m} = -91 \text{ m}$. Una respuesta positiva indica un desplazamiento en la dirección x positiva, mientras que una respuesta negativa indica desplazamiento en la dirección x negativa. La figura activa 2.2b despliega la representación gráfica de la posición del automóvil como una función del tiempo.

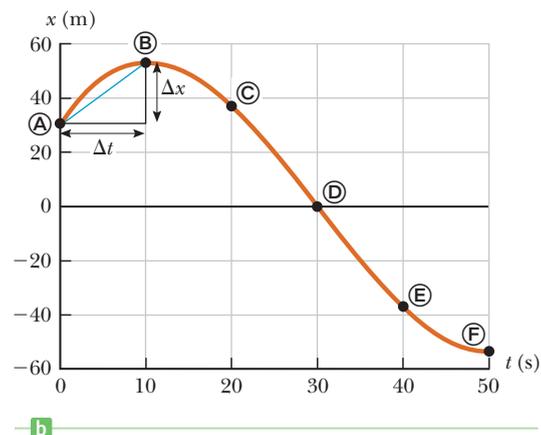
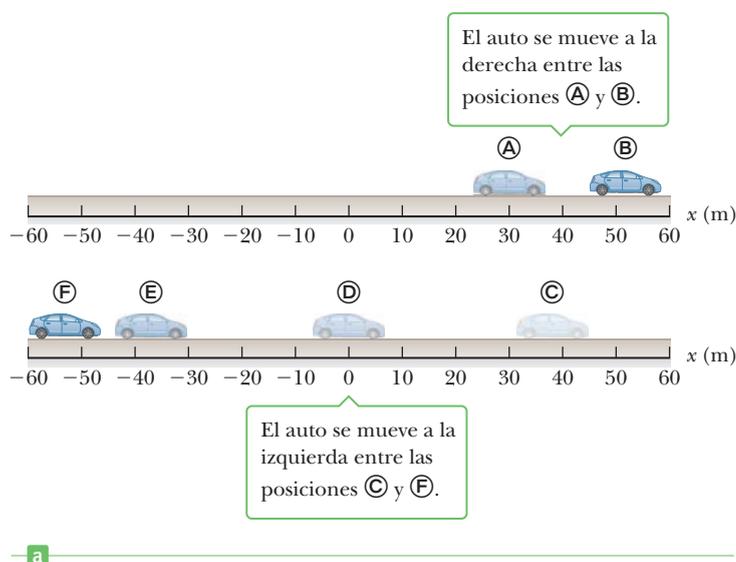


a



b

Figura 2.1 a) ¿Qué tan grande es el cañón? Sin un marco de referencia, es difícil decirlo. b) El cañón es Valles Marineris en Marte, y con un marco de referencia proporcionado por un esquema superpuesto de los Estados Unidos, su tamaño es fácil de entender.

**Figura activa 2.2**

a) Un automóvil se mueve de atrás hacia adelante a lo largo de una línea recta que se toma como el eje x . Debido a que estamos interesados sólo en la traslación del automóvil, podemos representarlo como un partícula. b) Gráfica de posición en términos del tiempo para el movimiento de la "partícula".

Debido a que el desplazamiento tiene una magnitud (tamaño) y una dirección, es una cantidad vectorial, como lo son la velocidad y la aceleración. En general, **una cantidad vectorial se caracteriza por tener una magnitud y una dirección**. En contraste, **una cantidad escalar tiene magnitud, pero no dirección**. Las cantidades escalares como la masa y la temperatura se especifican por completo mediante un valor numérico con unidades adecuadas; no se involucra dirección alguna.

Las cantidades vectoriales frecuentemente se indican en negritas con una flecha encima de la parte superior de la letra. Por ejemplo, \vec{v} representa velocidad y \vec{a} indica una aceleración, ambas cantidades vectoriales. No obstante, en este capítulo no es necesario utilizar esa notación porque en el movimiento en una dimensión un objeto sólo puede moverse en una de dos direcciones, y estas direcciones se especifican fácilmente mediante los signos más y menos.

2.2 Velocidad

En el uso cotidiano, los términos *rapidez* y *velocidad* son intercambiables. Sin embargo, en física existe una distinción evidente entre ellos: rapidez es una cantidad escalar, sólo tiene magnitud, mientras que la velocidad es un vector, pues tiene magnitud y dirección.

¿Por qué la velocidad es un vector? Si se quiere ir a una ciudad a 70 km de distancia en el tiempo de una hora, no es suficiente conducir con una rapidez de 70 km/h; también necesita viajar en la dirección correcta. Esto es evidente, pero muestra que la velocidad proporciona considerablemente más información que la rapidez, como se hará más preciso en la definición formal.

La **rapidez promedio** de un objeto en un intervalo de tiempo determinado es la distancia total recorrida dividida entre el tiempo total transcurrido:

$$\text{Rapidez promedio} \equiv \frac{\text{distancia total}}{\text{tiempo total}}$$

Unidades SI: metros por segundo (m/s)

Tip 2.2 Los vectores tienen tanto una magnitud como una dirección

Los escalares tienen tamaño. Los vectores, también, tienen tamaño, pero además indican una dirección.

◀ Definición de rapidez promedio

Simbólicamente, esta ecuación se podría describir $v = d/t$, con la letra v en el entendido de que es la rapidez promedio (no una velocidad), d representa la longitud de la trayectoria y t el tiempo transcurrido durante el movimiento. La longitud del trayecto es llamada a menudo “distancia total”, pero puede ser engañoso, porque la distancia tiene un diferente y preciso significado matemático basado en las diferencias en las coordenadas entre los puntos iniciales y los puntos finales. La distancia (despreciando la curvatura de la superficie) está dada por el teorema de Pitágoras, $\Delta s = \sqrt{(x_f - x_i)^2 + (y_f - y_i)^2}$, que depende sólo de los criterios de valoración, (x_i, y_i) y (x_f, y_f) , y no en lo que sucede en el medio. La misma ecuación da la magnitud de un desplazamiento. La distancia en línea recta de Atlanta, Georgia, a San Petersburgo, Florida, por ejemplo, es de unas 500 millas. Si alguien conduce un coche esa distancia en 10 h, la velocidad media del vehículo es de $500 \text{ mi}/10 \text{ h} = 50 \text{ mi/h}$, aunque la velocidad del coche varía mucho durante el viaje. Sin embargo, si el conductor toma desvíos escénicos de la ruta directa a lo largo del camino, o se regresa, aumenta la longitud del desplazamiento, mientras que la distancia entre las dos ciudades se mantiene igual. Un viaje a Jacksonville, Florida, por ejemplo, podría añadir 100 millas a la longitud del viaje, por lo que la velocidad media del coche entonces sería de $600 \text{ mi}/10 \text{ h} = 60 \text{ mi/h}$. La magnitud de la velocidad media, sin embargo, siguen siendo 50 mi/h .

■ EJEMPLO 2.1 La tortuga y la liebre

OBJETIVO Aplicar el concepto de rapidez promedio.

PROBLEMA Una tortuga y una liebre se enzarzan en una carrera para una distancia de 4.00 km. La liebre corre 0.500 km y después se detiene a dormir 90.0 min. Al despertar, recuerda la carrera y corre dos veces más rápido. Finalizando el recorrido en un tiempo total de 1.75 h, la liebre gana la carrera. **a)** Calcule la rapidez promedio de la liebre. **b)** ¿Cuál fue su rapidez promedio antes de detenerse para una siesta? Suponga que no tomó desviaciones o retornos.

ESTRATEGIA Determinar la rapidez promedio total en el inciso a) es cuestión de sólo dividir la distancia total entre el tiempo total. La solución del inciso b) necesita dos ecuaciones y dos incógnitas; el último producto son las dos diferentes velocidades promedio: v_1 antes y v_2 después de la siesta. Una ecuación se conoce en el enunciado del problema ($v_2 = 2v_1$), mientras que la otra surge del hecho de que la liebre corrió sólo 15 minutos porque se durmió 90 minutos.

SOLUCIÓN

a) Determine la rapidez promedio total de la liebre.

Aplice la ecuación para rapidez promedio:

$$\begin{aligned} \text{Rapidez promedio} &\equiv \frac{\text{distancia total}}{\text{tiempo total}} = \frac{4.00 \text{ km}}{1.75 \text{ h}} \\ &= 2.29 \text{ km/h} \end{aligned}$$

b) Determine la rapidez promedio antes de su siesta.

Sume los tiempos de carrera y ajuste la suma igual a 0.25 h:

$$t_1 + t_2 = 0.250 \text{ h}$$

Sustituya $t_1 = d_1/v_1$ y $t_2 = d_2/v_2$:

$$(1) \quad \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} = 0.250 \text{ h}$$

Sustituya $v_2 = 2v_1$ y los valores de d_1 y d_2 en la ecuación (1):

$$(2) \quad \frac{0.500 \text{ km}}{v_1} + \frac{3.50 \text{ km}}{2v_1} = 0.250 \text{ h}$$

Resuelva la ecuación (2) para v_1 :

$$v_1 = 9.00 \text{ km/h}$$

COMENTARIOS Como se ve en este ejemplo, la rapidez promedio puede ser calculada independientemente de cualquier variación en la rapidez en todo el intervalo de tiempo dado.

PREGUNTA 2.1 Al duplicar la rapidez promedio de un objeto, ¿se duplica siempre la magnitud de su desplazamiento en una cantidad determinada de tiempo? Explique.

EJERCICIO 2.1 Estime la rapidez promedio de la nave espacial *Apolo* en metros por segundo, dado que la nave tarda cinco días en llegar a la Luna desde la Tierra. (La Luna está a $3.8 \times 10^8 \text{ m}$ de la Tierra.)

RESPUESTA $\sim 900 \text{ m/s}$

A diferencia de la rapidez promedio, la **velocidad promedio** es una cantidad vectorial, que tiene una magnitud y una dirección. Considere una vez más el automóvil de la figura 2.2, moviéndose a lo largo del camino (el eje x). Haga que la posición del automóvil sea x_i en algún tiempo t_i y x_f en un tiempo posterior t_f . En el intervalo de tiempo $\Delta t = t_f - t_i$ el desplazamiento del automóvil es $\Delta x = x_f - x_i$.

La velocidad promedio \bar{v} durante un intervalo de tiempo Δt es el desplazamiento Δx dividido entre Δt :

$$\bar{v} \equiv \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad [2.2]$$

Unidades SI: metros por segundo (m/s)

A diferencia de la rapidez promedio, que siempre es positiva, la velocidad promedio de un objeto en una dimensión puede ser positiva o negativa, dependiendo del signo del desplazamiento. (El intervalo de tiempo Δt siempre es positivo.) Por ejemplo, en la figura 2.2a la velocidad promedio del automóvil es positiva en la ilustración superior, un signo positivo indica movimiento a la derecha a lo largo del eje x . De la misma manera, una velocidad promedio negativa para el automóvil, en la ilustración inferior de la figura, indica que se mueve a la izquierda a lo largo del eje x .

Como ejemplo, se puede utilizar la información de la tabla 2.1 para determinar la velocidad promedio en el intervalo de tiempo desde el punto A hasta el punto B (considere dos cifras significativas):

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{52 \text{ m} - 30 \text{ m}}{10 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 2.2 \text{ m/s}$$

Además de metros por segundo, otras unidades comunes para la velocidad promedio son pies por segundo (pies/s) en el sistema acostumbrado en Estados Unidos y centímetro por segundo (cm/s) en el sistema cgs.

Para explicar más ampliamente la diferencia entre rapidez y velocidad, considere que está viendo una carrera desde un pequeño dirigible. En una carrera vemos un automóvil seguir la trayectoria en línea recta desde P hasta Q como se muestra en la figura 2.3 durante el intervalo de tiempo Δt , y en una segunda carrera un auto sigue la trayectoria curva durante el mismo intervalo. De la definición en la ecuación 2.2, los dos autos tienen la misma velocidad promedio porque tienen el mismo desplazamiento $\Delta x = x_f - x_i$ durante el mismo intervalo de tiempo Δt . De cualquier modo, el auto que toma el camino curvo recorrió una distancia mayor y tuvo la rapidez promedio más alta.

Definición de velocidad promedio

Tabla 2.1 Posición del automóvil en diferentes tiempos

Posición	t (s)	x (m)
A	0	30
B	10	52
C	20	38
D	30	0
E	40	-37
F	50	-53



Figura 2.3 Una carrera de velocidad vista desde un pequeño dirigible. Un auto sigue la trayectoria en línea recta roja desde P hasta Q, y un segundo auto sigue la trayectoria curva azul.

Examen rápido

2.1 La figura 2.4 muestra la trayectoria inusual de un confundido jugador de fútbol. Después de recibir el balón en su propia meta, corre hacia el campo contrario cerca de la zona de anotación, invierte la dirección y corre de regreso hasta que es atrapado en la ubicación exacta donde en principio atrapó el balón. Durante esta corrida, que le tomó 25 segundos, ¿cuál es a) la distancia total que viajó, b) su desplazamiento y c) su velocidad promedio en la dirección x ? d) ¿Cuál es su rapidez promedio?

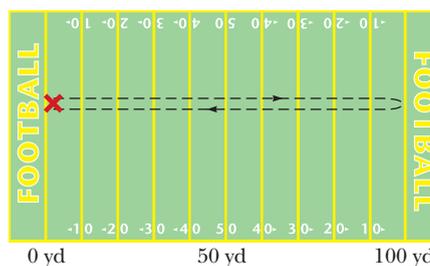


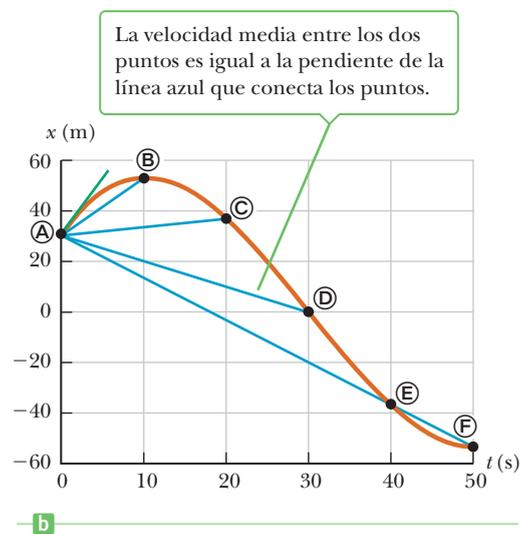
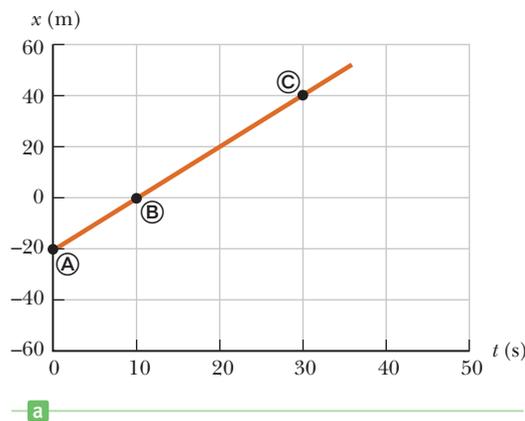
Figura 2.4 (Examen rápido 2.1) La trayectoria de un confundido jugador de fútbol.

Interpretación gráfica de la velocidad

Si un automóvil se mueve a lo largo del eje x desde A hasta B y luego hasta C, y así sucesivamente, se pueden dibujar las posiciones de estos puntos como una función del tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento. El resultado es una **representación gráfica**

Figura activa 2.5

a) Gráfica de la posición *vs.* tiempo para el movimiento de un automóvil moviéndose a lo largo del eje *x* con velocidad constante. b) Gráfica de la posición *vs.* tiempo para el movimiento de un automóvil con velocidad cambiante, utilizando la información de la tabla 2.1.

**Tip 2.3 Pendientes de gráficas**

Con frecuencia la palabra *pendiente* se utiliza en referencia a las gráficas de datos físicos. Independientemente de la clase de datos, la *pendiente* se conoce mediante

$$\text{Pendiente} = \frac{\text{cambio en el eje vertical}}{\text{cambio en el eje horizontal}}$$

La pendiente tiene unidades.

Tip 2.4 Velocidad promedio vs. rapidez promedio

La velocidad promedio *no* es lo mismo que rapidez promedio. Si usted corre desde $x = 0$ m hasta $x = 25$ m y regresa a su punto de partida en un intervalo de tiempo de 5 s, la velocidad promedio es cero, mientras que la rapidez promedio es 10 m/s.

posición vs. tiempo parecida a la figura activa 2.5. En la figura 2.5a, la gráfica es una línea recta porque el automóvil se mueve con velocidad constante. El mismo desplazamiento Δx se presenta en cada intervalo de tiempo Δt . En este caso, la velocidad promedio siempre es la misma y es igual a $\Delta x / \Delta t$. La figura 2.5b es una gráfica de la información de la tabla 2.1. Aquí, la gráfica posición *vs.* tiempo no es una línea recta ya que la velocidad del auto está cambiando. No obstante, entre dos puntos cualesquiera se puede dibujar una línea recta justo como en la figura 2.5a, y la pendiente de esa recta es la velocidad promedio $\Delta x / \Delta t$ en ese intervalo de tiempo. En general, **la velocidad promedio de un objeto durante el intervalo de tiempo Δt es igual a la pendiente de la línea recta que une los puntos inicial y final en una gráfica de la posición del objeto en términos del tiempo.**

A partir de la información de la tabla 2.1 y la gráfica en la figura 2.5b, se ve que el automóvil se mueve en la dirección *x* positiva cuando viaja desde **A** hasta **B**, alcanza una posición de 52 m en el tiempo $t = 10$ s, después invierte la dirección y se dirige de regreso. En los primeros 10 s de su movimiento, conforme el automóvil viaja desde **A** hasta **B**, su velocidad promedio es 2.2 m/s, como se calculó de manera previa. En los primeros 40 segundos, a medida que el auto va desde **A** hasta **E**, su desplazamiento es $\Delta x = -37 \text{ m} - (30 \text{ m}) = -67 \text{ m}$. De tal modo que la velocidad promedio en este intervalo, la cual es igual a la pendiente de la recta azul en la figura 2.5b desde **A** hasta **E**, es $\bar{v} = \Delta x / \Delta t = (-67 \text{ m}) / (40 \text{ s}) = -1.7 \text{ m/s}$. En general, existirá una velocidad promedio diferente entre pares de puntos distintos cualesquiera.

Velocidad instantánea

La velocidad promedio no considera los detalles de lo que sucede durante un intervalo de tiempo. Por ejemplo, en un viaje en automóvil, usted puede aumentar o disminuir su velocidad tantas veces en respuesta al tráfico y a las condiciones del camino e incluso en rara ocasión por infracción de un oficial de policía con respecto a su velocidad. Lo más importante para la policía (y para su propia seguridad) es la rapidez de su auto y la dirección en la que se dirige en un instante particular del tiempo, que juntos determinan la **velocidad instantánea** del automóvil.

Así, al conducir un automóvil entre dos puntos, la velocidad promedio debe calcularse en un intervalo de tiempo, pero la magnitud de la velocidad instantánea puede leerse en el velocímetro del automóvil.

Definición de velocidad instantánea

La velocidad instantánea v es el límite de la velocidad promedio conforme el intervalo de tiempo Δt se hace infinitesimalmente pequeño:

$$v \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

[2.3]

Unidades SI: metro por segundo (m/s)

Tabla 2.2 Posición de un automóvil con instantes de tiempo específicos

t (s)	x (m)
1.00	5.00
1.01	5.47
1.10	9.67
1.20	14.3
1.50	26.3
2.00	34.7
3.00	52.5

Tabla 2.3 Valores calculados de los intervalos de tiempo, desplazamiento y velocidades promedio para el automóvil de la tabla 2.2

Intervalo de tiempo (s)	Δt (s)	Δx (m)	\bar{v} (m/s)
1.00 a 3.00	2.00	47.5	23.8
1.00 a 2.00	1.00	29.7	29.7
1.00 a 1.50	0.50	21.3	42.6
1.00 a 1.20	0.20	9.30	46.5
1.00 a 1.10	0.10	4.67	46.7
1.00 a 1.01	0.01	0.470	47.0

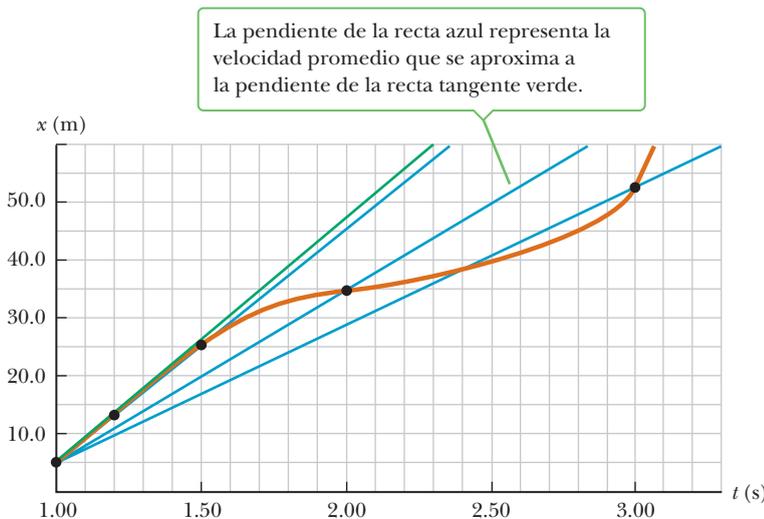
La notación $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ significa que la relación $\Delta x/\Delta t$ se evalúa de manera reiterada para intervalos de tiempo Δt cada vez más pequeños. Conforme Δt es extremadamente cercana a cero, la relación $\Delta x/\Delta t$ se aproxima cada vez más a un número fijo, que se define como la velocidad instantánea.

Para comprender mejor la definición formal, considere la información que se obtiene del vehículo por radar (tabla 2.2). En $t = 1.00$ s, el automóvil está en $x = 5.00$ m y en $t = 3.00$ s, esto es en $x = 52.5$ m. La velocidad promedio calculada para este intervalo $\Delta x/\Delta t = (52.5 \text{ m} - 5.00 \text{ m})/(3.00 \text{ s} - 1.00 \text{ s}) = 23.8 \text{ m/s}$. Este resultado podría ser utilizado como una evaluación para la velocidad en $t = 1.00$ s, pero no sería muy exacto ya que los cambios de rapidez son considerables en el intervalo de tiempo de 2 segundos. Utilizando el resto de la información, se puede construir la tabla 2.3. Cuando el intervalo de tiempo es más pequeño, la velocidad promedio es más cercana y se aproxima a la velocidad instantánea. Utilizando el intervalo final de sólo 0.0100 s se determina que la velocidad promedio es $\bar{v} = \Delta x/\Delta t = 0.470 \text{ m}/0.0100 \text{ s} = 47.0 \text{ m/s}$, ya que 0.0100 s es un intervalo de tiempo muy breve, probablemente la velocidad instantánea real es muy cercana a esta última velocidad promedio, conocidos los límites en la capacidad del automóvil en acelerar. Por último, utilizando el factor de conversión del interior de la cubierta frontal del libro, se ve que es 105 millas/h, una violación probable del límite de velocidad.

Como se puede ver en la figura 2.6, las cuerdas formadas por las líneas azules gradualmente se aproximan a una recta tangente conforme el intervalo de tiempo se hace más pequeño. **La pendiente de la recta tangente a la curva posición vs. tiempo en un “tiempo determinado” se define como la velocidad instantánea en ese tiempo.**

La rapidez instantánea de un objeto, que es una cantidad escalar, se define como la magnitud de la velocidad instantánea. Similar a la rapidez promedio, la rapidez instantánea (que por lo general llamaremos, simplemente “rapidez”) no tiene dirección asociada

◀ Definición de rapidez instantánea

**Figura 2.6** Representación gráfica del movimiento del automóvil a partir de la información de la tabla 2.2.

con ella y, por lo tanto, no tiene signo algebraico. Por ejemplo, si un objeto tiene una velocidad instantánea de +15 m/s a lo largo de una línea determinada y otro objeto tiene una velocidad instantánea de -15 m/s a lo largo de la misma línea, ambas tienen una rapidez instantánea de 15 m/s.

EJEMPLO 2.2 Movimiento lento de un tren

OBJETIVO Obtener velocidades instantáneas y promedio a partir de una gráfica.

PROBLEMA Un tren se mueve lentamente a lo largo de un tramo recto de vía de acuerdo con la gráfica de posición con tiempo en la figura 2.7a. Determine **a)** la velocidad promedio para el viaje completo, **b)** la velocidad promedio para los primeros 4.00 s de movimiento, **c)** la velocidad promedio durante los próximos 4.00 s de movimiento, **d)** la velocidad instantánea en $t = 2.00$ s y **e)** la velocidad instantánea en $t = 9.00$ s.

ESTRATEGIA Las velocidades promedio pueden ser obtenidas sustituyendo la información dentro de la definición. La velocidad instantánea en $t = 2.00$ s es la misma que la velocidad promedio en ese punto porque la gráfica posición vs. tiempo es una línea recta, indicando velocidad constante. Para determinar la velocidad instantánea cuando $t = 9.00$ s necesita dibujar una recta tangente a la curva en ese punto y encontrar su pendiente.

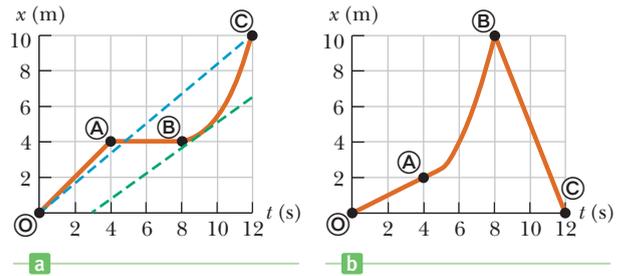


Figura 2.7 a) Ejemplo 2.2 b) Ejercicio 2.2

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad promedio desde \odot hasta \odot .

Calcule la pendiente de la recta azul discontinua:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{10.0 \text{ m}}{12.0 \text{ s}} = +0.833 \text{ m/s}$$

b) Determine la velocidad promedio durante los primeros 4 segundos del movimiento del tren.

Una vez más, determine la pendiente:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4.00 \text{ m}}{4.00 \text{ s}} = +1.00 \text{ m/s}$$

c) Determine la velocidad promedio durante los siguientes 4 segundos.

En este caso, no existe cambio en la posición de \textcircled{A} a \textcircled{B} , de tal modo que el desplazamiento Δx es cero:

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0 \text{ m}}{4.00 \text{ s}} = 0 \text{ m/s}$$

d) Determine la velocidad instantánea en $t = 2.00$ s.

Ésta es la misma que la velocidad promedio que se encontró en el inciso b), porque la gráfica es una línea recta:

$$v = 1.00 \text{ m/s}$$

e) Determine la velocidad instantánea en $t = 9.00$ s.

La recta tangente se presenta al cruzar el eje x en (3.0 s, 0 m) y roza la curva en (9.0 s, 4.5 m). La velocidad instantánea en $t = 9.00$ s es igual a la pendiente de la línea tangente a través de estos puntos.

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{4.5 \text{ m} - 0 \text{ m}}{9.0 \text{ s} - 3.0 \text{ s}} = 0.75 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Desde el origen hasta \textcircled{A} , el tren se mueve con rapidez constante en la dirección x positiva para los primeros 4.00 s, porque la curva posición vs. tiempo se eleva fijamente hacia valores positivos. Desde \textcircled{A} hasta \textcircled{B} , el tren se detiene en $x = 4.00$ m por 4.00 s. De \textcircled{B} a \textcircled{C} , el tren viaja aumentando su rapidez en la dirección x positiva.

PREGUNTA 2.2 ¿Tendría sentido una recta vertical en una gráfica de posición, en términos del tiempo? Explique.

EJERCICIO 2.2 La figura 2.7b muestra la gráfica de otra corrida del tren. Determine **a)** la velocidad promedio desde \odot hasta \odot , **b)** las velocidades instantánea y promedio desde \odot hasta \textcircled{A} , **c)** la velocidad instantánea aproximada en $t = 6.0$ s, y **d)** la velocidad instantánea y promedio en $t = 9.0$ s.

RESPUESTAS a) 0 m/s b) ambas son +0.5 m/s c) 2 m/s d) ambas son -2.5 m/s

2.3 Aceleración

Desplazándose de un lugar a otro en su automóvil, rara vez viaja distancias considerables con velocidad constante. La velocidad del automóvil se incrementa cuando pisa firme el pedal del acelerador y disminuye cuando aplica los frenos. Además, la velocidad también cambia cuando rodea una curva, alterando su dirección de movimiento. El cambio de velocidad de un objeto al transcurrir el tiempo se le conoce como **aceleración**.

Aceleración promedio

Un automóvil se mueve a lo largo de una autopista recta como en la figura 2.8. En el momento t_i tiene una velocidad de v_i y en el momento t_f su velocidad es v_f , con $\Delta v = v_f - v_i$ y $\Delta t = t_f - t_i$.

La aceleración promedio \bar{a} durante el intervalo de tiempo Δt es el cambio en la velocidad Δv dividida entre Δt :

$$\bar{a} \equiv \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \quad [2.4]$$

Unidades SI: metros por segundo por segundo (m/s^2)

Por ejemplo, considere el automóvil que se muestra en la figura 2.8 que acelera desde una velocidad inicial de $v_i = +10 \text{ m/s}$ hasta una velocidad final $v_f = +20 \text{ m/s}$ en un intervalo de tiempo de 2 s. (Ambas velocidades están hacia la derecha, elegida como la dirección positiva.) Estos valores pueden ser insertados en la ecuación 2.4 para determinar la aceleración promedio:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{20 \text{ m/s} - 10 \text{ m/s}}{2 \text{ s}} = +5 \text{ m/s}^2$$

La aceleración es una cantidad vectorial que tiene dimensiones de longitud dividida entre el tiempo al cuadrado. Las unidades comunes de aceleración son metros por segundo por segundo ($(\text{m/s})/\text{s}$, que por lo general se describe m/s^2) y pies por segundo por segundo (pies/s^2). Una aceleración promedio de $+5 \text{ m/s}^2$ significa que, en promedio, el automóvil incrementa su velocidad en 5 m/s cada segundo en la dirección x positiva.

Para el caso de movimiento en una línea recta, la dirección de la velocidad de un objeto y la dirección de su aceleración están relacionadas como sigue: **cuando la velocidad y aceleración de un objeto están en la misma dirección, la rapidez de un objeto se incrementa con el tiempo. Cuando la velocidad y la aceleración de un objeto están en direcciones opuestas, la rapidez del objeto disminuye con el tiempo.**

Para aclarar este punto, considere la velocidad de un automóvil que cambia desde -10 m/s hasta -20 m/s en un intervalo de tiempo de 2 s. El signo menos indica que las velocidades del automóvil están en la dirección x negativa; ¡ello *no* significa que el automóvil esté disminuyendo su velocidad! La aceleración promedio del automóvil en este intervalo de tiempo es

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{-20 \text{ m/s} - (-10 \text{ m/s})}{2 \text{ s}} = -5 \text{ m/s}^2$$

El signo menos indica que el vector aceleración también está en la dirección x negativa. Debido a que los vectores velocidad y aceleración están en la misma dirección, la rapidez del automóvil debe aumentar conforme se mueve a la izquierda. Aceleración positiva y negativa especifican direcciones relativas a los ejes elegidos, no “aumento” o bien “disminución” de velocidad. Los términos *aumento de velocidad* o bien *disminución de velocidad* se refieren a un aumento y a una disminución en la rapidez, respectivamente.

Examen rápido

2.2 ¿Verdadero o Falso? a) Un automóvil debe tener siempre una aceleración en la misma dirección que su velocidad. b) Es posible para un automóvil que disminuye su velocidad tener una aceleración positiva. c) Un objeto con una aceleración constante diferente de cero nunca puede detenerse y permanecer en reposo.

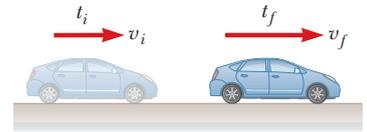


Figura 2.8 Un automóvil se mueve a la derecha acelerando desde una velocidad de v_i hasta una velocidad de v_f en el intervalo de tiempo $\Delta t = t_f - t_i$.

Definición de aceleración promedio

Tip 2.5 Aceleración negativa

La aceleración negativa no necesariamente significa que un objeto esté disminuyendo su velocidad. Si la aceleración es negativa y la velocidad también es negativa, ¡el objeto está aumentando su velocidad!

Tip 2.6 Desaceleración

La palabra *desaceleración* significa una reducción en la rapidez, una disminución de velocidad. La confusión está con la aceleración negativa, que en ocasiones puede aumentar. (Véase el tip 2.5.)

Un objeto con una aceleración no cero puede tener una velocidad de cero, pero sólo de forma instantánea. Cuando una pelota se lanza hacia arriba, su velocidad es cero cuando alcanza su altura máxima. Sin embargo, la gravedad acelera incluso la bola en ese punto; de lo contrario, no caería.

Aceleración instantánea

Con frecuencia el valor de la aceleración promedio es diferente en intervalos de tiempo diferentes, de tal manera que es útil definir la **aceleración instantánea**, que es semejante a la velocidad instantánea explicada en la sección 2.2.

Definición de aceleración instantánea

La aceleración instantánea a es el límite de la aceleración promedio conforme el intervalo de tiempo Δt tiende a cero:

$$a \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{2.5}$$

Unidades SI: metros por segundo por segundo (m/s²)

En este caso una vez más, la notación $\lim_{\Delta t \rightarrow 0}$ significa que la relación $\Delta v/\Delta t$ se evalúa para valores de Δt cada vez más pequeños. En el límite, Δt tiende a cero y el límite tiende hacia un valor fijo, que es la aceleración instantánea.

La figura 2.9, una **gráfica de velocidad vs. tiempo**, traza la velocidad de un objeto en términos del tiempo. Por ejemplo, la gráfica podría representar el movimiento de un automóvil a lo largo de una calle con mucho tráfico. La aceleración promedio del automóvil entre los tiempos t_i y t_f se puede hallar mediante la determinación de la pendiente de la recta que une los puntos \textcircled{P} y \textcircled{Q} . Si pensamos que el punto \textcircled{Q} se acerca más y más al punto \textcircled{P} , la recta se aproxima cada vez más y se convierte en tangente en \textcircled{P} . **La aceleración instantánea de un objeto en un tiempo determinado es igual a la pendiente de la recta tangente a la gráfica velocidad vs. tiempo en ese tiempo.** Desde ahora, se utilizará el término *aceleración* para referirnos a “aceleración instantánea”.

En el caso especial para el que la gráfica velocidad vs. tiempo del movimiento de un objeto es una línea recta, la aceleración instantánea de un objeto en cualquier punto es igual a su aceleración promedio. Esto también significa que la recta tangente de la gráfica se sobrepone a la misma gráfica. En ese caso, se dice que la aceleración del objeto es *uniforme*, lo que significa que tiene un valor constante. Los problemas de aceleración constante son importantes en cinemática y se estudiarán extensamente en este capítulo y en el que sigue.

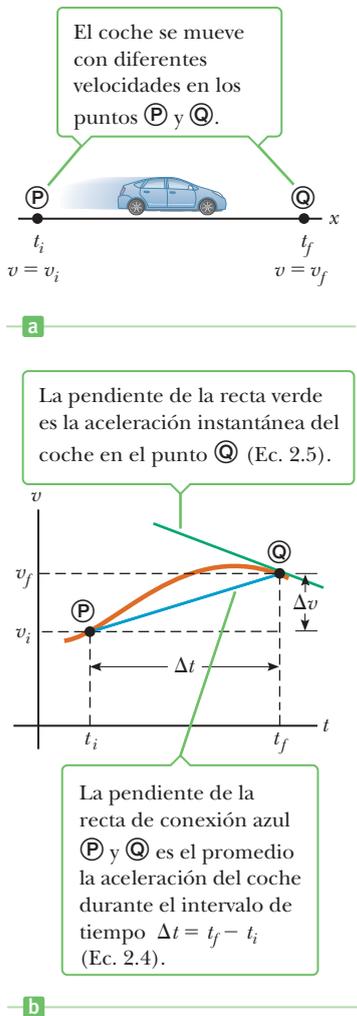
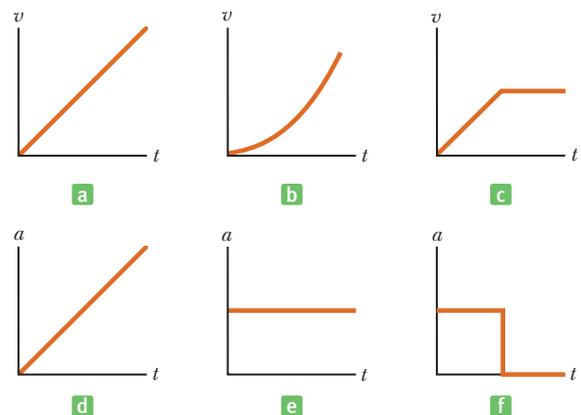


Figura 2.9 a) Un automóvil, modelado como una partícula, moviéndose a lo largo del eje x desde \textcircled{P} hasta \textcircled{Q} , tiene velocidad v_{xi} en $t = t_i$ y la velocidad v_{xf} en $t = t_f$. b) gráfica de velocidad vs. tiempo para un objeto en movimiento en línea recta.

Examen rápido

2.3 Los incisos a), b) y c) de la figura 2.10 representan tres gráficas de las velocidades de diferentes objetos moviéndose en trayectorias de línea recta como funciones del tiempo. Las aceleraciones posibles de cada objeto como función del tiempo se muestran en los incisos d), e) y f). Empareje cada una de las gráficas velocidad vs. tiempo con la gráfica aceleración vs. tiempo que describa mejor el movimiento.

Figura activa 2.10 (Examen rápido 2.3) Empareje cada gráfica velocidad vs. tiempo con su correspondiente gráfica aceleración vs. tiempo.



■ EJEMPLO 2.3 Atrapando una pelota en vuelo

OBJETIVO Aplicar la definición de aceleración instantánea.

PROBLEMA Un jugador de béisbol se mueve en una trayectoria en línea recta con la finalidad de atrapar una pelota en vuelo golpeada hacia los jardines. Su velocidad como función del tiempo se muestra en la figura 2.11a. Encuentre la aceleración instantánea en los puntos A, B y C.

ESTRATEGIA En cada punto, la gráfica velocidad *vs.* tiempo es un segmento de línea recta, de tal manera que la aceleración instantánea será la pendiente de ese segmento. Seleccione dos puntos en cada segmento y utilícelos para calcular la pendiente.

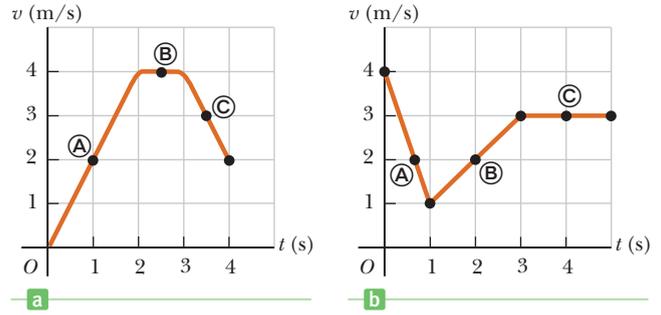


Figura 2.11 a) (Ejemplo 2.3) b) (Ejercicio 2.3)

SOLUCIÓN

Aceleración en A.

La aceleración en A es igual a la pendiente de la recta que une los puntos (0 s, 0 m/s) y (2.0 s, 4.0 m/s):

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{4.0 \text{ m/s} - 0}{2.0 \text{ s} - 0} = +2.0 \text{ m/s}^2$$

Aceleración en B.

$\Delta v = 0$, debido a que el segmento es horizontal:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{4.0 \text{ m/s} - 4.0 \text{ m/s}}{3.0 \text{ s} - 2.0 \text{ s}} = 0 \text{ m/s}^2$$

Aceleración en C.

La aceleración en C es igual a la pendiente de la recta que une los puntos (3.0 s, 4.0 m/s) y (4.0 s, 2.0 m/s):

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{2.0 \text{ m/s} - 4.0 \text{ m/s}}{4.0 \text{ s} - 3.0 \text{ s}} = -2.0 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS Considere que el jugador se mueve desde el inicio en la dirección *x* positiva. Para los primeros 2.0 s, el jugador se mueve en la dirección *x* positiva (la velocidad es positiva) y acelera constantemente (la curva se eleva sin parar) hasta una rapidez máxima de 4.0 m/s. El jugador se mueve por 1.0 s con una rapidez estable de 4.0 m/s y después disminuye su velocidad en el último segundo (la curva *v vs. t* está cayendo), aún se mueve en la dirección *x* positiva (*v* siempre es positiva).

PREGUNTA 2.3 ¿Alguna vez puede ser vertical la recta tangente a una gráfica de velocidad *vs.* tiempo? Explique.

EJERCICIO 2.3 Repita el problema, utilizando la figura 2.11b.

RESPUESTA Las aceleraciones en A, B y C son -3.0 m/s^2 , 1.0 m/s^2 y 0 m/s^2 , respectivamente.

2.4 Diagramas de movimiento

Algunas veces son confundidas velocidad y aceleración una con otra, pero son conceptos diferentes, que se pueden explicar con la ayuda de diagramas de movimiento. La figura activa 2.12 (página 36) es la representación de un **diagrama de movimiento** de un objeto en intervalos de tiempo consecutivo, con vectores de velocidad y aceleración dibujados en cada posición, rojo para los vectores de velocidad y púrpura para los vectores de aceleración. Los intervalos de tiempo entre posiciones adyacentes en el diagrama de movimiento son considerados iguales.

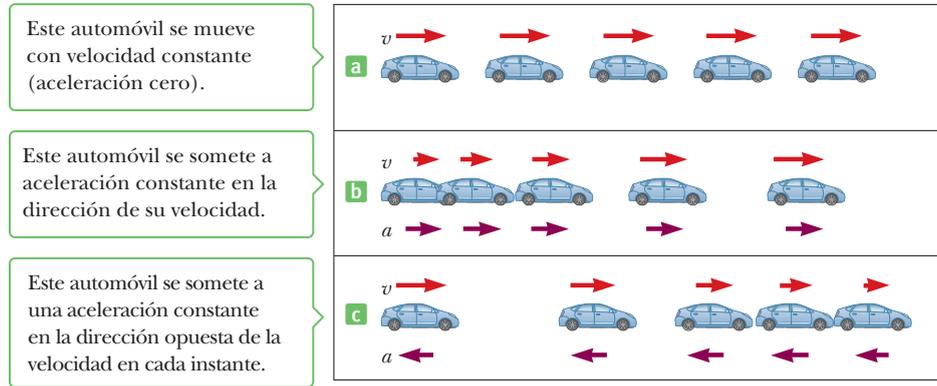
Un diagrama de movimiento es parecido a las imágenes que resultan de una fotografía estroboscópica de un objeto en movimiento. Cada imagen está hecha como el destello de luz de un flash estroboscópico. La figura 2.12 representa tres conjuntos de fotografías estroboscópicas de automóviles en movimiento a lo largo de un camino recto de izquierda a derecha. Los intervalos de tiempo entre destellos del estroboscopio son iguales en cada diagrama.

En la figura activa 2.12a, las imágenes del automóvil están igualmente espaciadas: el automóvil se mueve la misma distancia en cada intervalo de tiempo. Esto significa que el automóvil se mueve con *velocidad constante positiva* y tiene *aceleración cero*. Todas las flechas rojas tienen la misma longitud (velocidad constante) y no existen flechas púrpura (aceleración cero).

En la figura activa 2.12b, las imágenes del automóvil cada vez están más separadas conforme avanza el tiempo y se incrementa el vector velocidad con el tiempo, porque el desplazamiento del automóvil entre posiciones adyacentes crece con el avance del tiempo. El

Figura activa 2.12

Diagramas de movimiento de un vehículo en movimiento a lo largo de una carretera recta en una sola dirección. La velocidad en cada instante se indica con una flecha roja, y la aceleración constante se indica por una flecha púrpura.



automóvil se está moviendo con una *velocidad positiva* y una *aceleración positiva* constante. Las flechas rojas en cada imagen están consecutivamente más largas, y las flechas púrpura apuntan a la derecha.

En la figura activa 2.12c, conforme el automóvil se mueve hacia la derecha disminuye su velocidad porque su desplazamiento entre posiciones adyacentes disminuyen con el tiempo. En este caso, el automóvil se mueve desde el principio hacia la derecha con aceleración constante negativa. El vector velocidad disminuye con el tiempo (las flechas rojas cada vez son más cortas) y, por último, alcanzan el cero, lo que sucedería al aplicar los frenos. Observe que los vectores aceleración y velocidad *no* están en la misma dirección. El automóvil se mueve con una *velocidad positiva*, pero con una *aceleración negativa*.

Intente construir sus propios diagramas para diferentes problemas que involucran cinemática.

Examen rápido

2.4 Las tres gráficas en la figura activa 2.13 representan la posición *vs.* tiempo para objetos que se mueven a lo largo del eje *x*. ¿Cuál de estas gráficas, si existe alguna, no es físicamente posible?

2.5 La figura 2.14a es el diagrama de una imagen de múltiples destellos de un disco de aire que se mueve hacia la derecha sobre una superficie horizontal. Las imágenes delineadas están separadas por intervalos de tiempo iguales, y las imágenes primera y última muestran el disco en reposo. a) En la figura 2.14b, ¿cuál gráfica de color muestra mejor la posición del disco como una función del tiempo? b) En la figura 2.14c, ¿cuál gráfica de color muestra mejor la velocidad como una función del tiempo? c) En la figura 2.14d, ¿cuál gráfica de color muestra mejor la aceleración del disco como una función del tiempo?

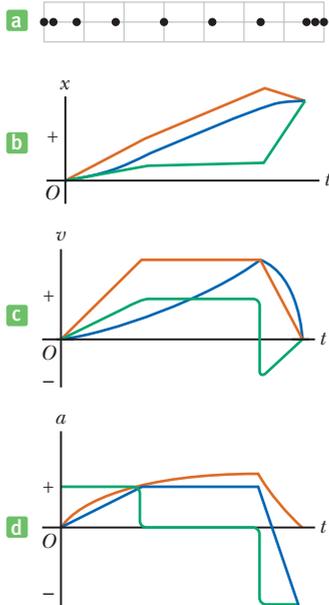


Figura 2.14 (Examen rápido 2.5) Seleccione las gráficas correctas.

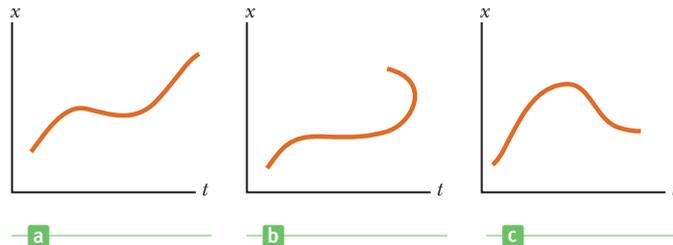


Figura activa 2.13 (Examen rápido 2.4) ¿Qué curva posición *vs.* tiempo es imposible?

2.5 **Movimiento en una dimensión con aceleración constante**

Muchas aplicaciones en mecánica involucran objetos móviles con *aceleración constante*. Esta clase de movimiento es importante porque se aplica a numerosos objetos en la naturaleza, tal

como un objeto en caída libre cerca de la superficie de la Tierra (suponiendo que se puede omitir la resistencia del aire). Una gráfica de aceleración en función del tiempo con aceleración constante se muestra en la figura activa 2.15a. **Cuando un objeto se mueve con aceleración constante, la aceleración instantánea en cualquier punto en un intervalo de tiempo es igual al valor de la aceleración promedio en el intervalo completo de tiempo.** En consecuencia, la velocidad se incrementa o disminuye con la misma relación en todo el movimiento, y una gráfica de v en términos de t proporciona una línea recta con pendientes ya sea positiva, cero, o bien, negativa.

Ya que la aceleración promedio es igual a la aceleración instantánea cuando a es constante, se puede eliminar de la ecuación la barra utilizada para denotar valores promedio que la define para aceleración, escribiendo $\bar{a} = a$, de tal modo que la ecuación 2.4 es

$$a = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$$

El encargado de registrar el tiempo del movimiento siempre tiene la libertad de elegir el tiempo inicial, así, por conveniencia, sea $t_i = 0$ y t_f cualquier tiempo arbitrario t . Además, sea $v_i = v_0$ (la velocidad inicial en $t = 0$) y $v_f = v$ (la velocidad en cualquier tiempo arbitrario t). Con esta notación, se puede expresar la aceleración como

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

o bien

$$v = v_0 + at \quad (\text{para } a \text{ constante}) \quad [2.6]$$

La ecuación 2.6 establece que la aceleración a cambia constantemente la velocidad inicial v_0 en una cantidad at . Por ejemplo, si un automóvil inicia con una velocidad de $+2.0$ m/s hacia la derecha y acelera en la misma dirección con $a = +6.0$ m/s², tendrá una velocidad de $+14$ m/s después de 2.0 s transcurridos:

$$v = v_0 + at = +2.0 \text{ m/s} + (6.0 \text{ m/s}^2)(2.0 \text{ s}) = +14 \text{ m/s}$$

La interpretación gráfica de v se muestra en la figura activa 2.15b. La velocidad varía linealmente con el tiempo de acuerdo con la ecuación 2.6, tal como para aceleración constante.

Debido a que la velocidad es creciente o disminuye *uniformemente* con el tiempo, se puede expresar la velocidad promedio en cualquier intervalo de tiempo como el promedio aritmético de la velocidad inicial v_0 y la velocidad final v :

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (\text{para } a \text{ constante}) \quad [2.7]$$

Recuerde que esta expresión es válida sólo cuando la aceleración es constante, en cuyo caso la velocidad se incrementa de manera uniforme.

Ahora podemos utilizar este resultado junto con la ecuación que define la velocidad promedio, ecuación 2.2, para obtener una expresión para el desplazamiento de un objeto como una función del tiempo. Una vez más, se elige $t_i = 0$ y $t_f = t$, por conveniencia, se escribe $\Delta x = x_f - x_i = x - x_0$. Esto resulta en

$$\Delta x = \bar{v}t = \left(\frac{v_0 + v}{2} \right) t$$

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_0 + v)t \quad (\text{para } a \text{ constante}) \quad [2.8]$$

Podemos obtener otra expresión útil para el desplazamiento al sustituir la ecuación para v (ecuación 2.6) en la ecuación 2.8:

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v_0 + v_0 + at)t$$

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \quad (\text{para } a \text{ constante}) \quad [2.9]$$

Esta ecuación también se puede describir en términos de la posición x , a partir de $\Delta x = x - x_0$. La figura 2.15c muestra una gráfica de x en función de t para la ecuación 2.9, la cual se relaciona con la gráfica de velocidad v vs. tiempo: el área bajo la curva en la figura activa 2.15b es igual a $v_0 t + \frac{1}{2}at^2$ que es igual al desplazamiento Δx . De hecho, **el área bajo la gráfica v en términos de t para cualquier objeto es igual al desplazamiento Δx del objeto.**

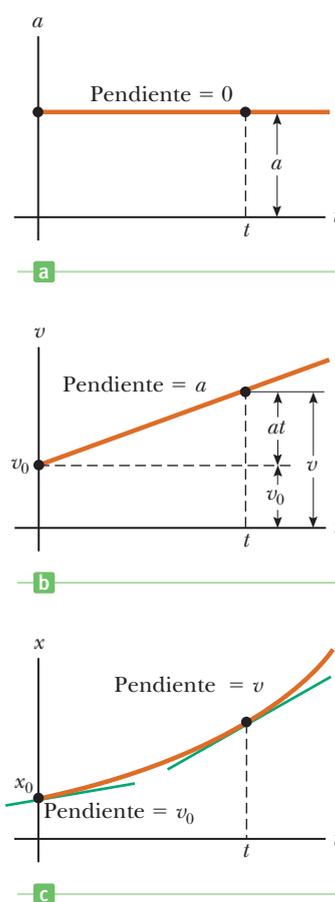


Figura activa 2.15 Una partícula se mueve a lo largo del eje x con aceleración constante a . a) aceleración $vs.$ gráfica de tiempo b) gráfica de velocidad $vs.$ tiempo y c) grafica de posición $vs.$ tiempo.

Tabla 2.4 Ecuaciones para el movimiento en línea recta bajo aceleración constante

Ecuación	Información proporcionada por la ecuación
$v = v_0 + at$	Velocidad como una función del tiempo
$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	Desplazamiento como una función del tiempo
$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x$	Velocidad como una función del desplazamiento

Nota: El movimiento es a lo largo del eje x . En $t = 0$, la velocidad de la partícula es v_0 .

Finalmente, podemos obtener una expresión que no contenga al tiempo para poder resolver la ecuación 2.6 para t y sustituirla en la ecuación 2.8, lo que resulta en

$$\Delta x = \frac{1}{2}(v + v_0)\left(\frac{v - v_0}{a}\right) = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad (\text{para } a \text{ constante}) \quad [2.10]$$

Las ecuaciones 2.6 y 2.9 juntas pueden resolver cualquier problema de movimiento en una dimensión con aceleración constante, pero las ecuaciones 2.7, 2.8 y especialmente 2.10 algunas veces son convenientes. Las tres ecuaciones más útiles —2.6, 2.9 y 2.10— se mencionan en la tabla 2.4.

La mejor manera de ganar confianza en el uso de estas ecuaciones es trabajar una cantidad de problemas. Por lo general, existe más de una manera para resolver un problema determinado, dependiendo de qué ecuaciones son elegidas y qué cantidades se proporcionan. La diferencia se encuentra principalmente en el álgebra.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Movimiento en una dimensión a una aceleración constante

Se recomienda el siguiente procedimiento para la solución de problemas que involucran movimiento acelerado.

1. **Lea** el problema.
2. **Trace** un diagrama, seleccione un sistema coordenado, etiquete puntos inicial y final e indique con flechas las direcciones de las velocidades y aceleraciones.
3. **Etiquete** todas las cantidades, circulando las incógnitas. Convierta las unidades como se necesite.
4. **Ecuaciones**, puede seleccionarlas de la tabla 2.4. Todos los problemas de cinemática en este capítulo pueden resolverse con las primeras dos ecuaciones, y con frecuencia la tercera es conveniente.
5. **Resuelva** para las incógnitas. Hacerlo de esta manera con frecuencia involucra la solución de dos ecuaciones para dos incógnitas. Por lo general, es más conveniente sustituir todos los valores conocidos, antes de resolver.
6. **Verifique** su respuesta, aplicando sentido común y cálculos estimativos.

Tip 2.7 Los cerdos no vuelan

Después de resolver un problema, piense con respecto a su respuesta y decida si parece razonable. Si no es así busque el error.

La mayoría de estos problemas se reduce al escribir las ecuaciones cinemáticas de la tabla 2.4 y después sustituir los valores correctos en las constantes a , v_0 y x_0 a partir de la información que se conoce. Hacer esto genera dos ecuaciones, una lineal y otra cuadrática, para dos cantidades desconocidas.

■ EJEMPLO 2.4 Las 500 millas de Daytona

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones básicas de cinemática.

PROBLEMA **a)** Un automóvil de carreras acelera desde el reposo a razón constante de 5.00 m/s^2 . ¿Cuál es la velocidad del automóvil después de que ha recorrido 1.00×10^2 pies? **b)** ¿Cuánto tiempo ha transcurrido? **c)** Calcule la velocidad promedio de dos maneras diferentes.

ESTRATEGIA **a)** Debemos leer el problema, dibujar el diagrama como en la figura 2.16 y seleccionar un sistema de coordenadas (etapas 1 y 2). Queremos determinar la velocidad v después de cierto desplazamiento Δx conocido. También se conoce la aceleración

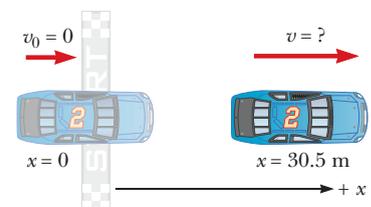


Figura 2.16 (Ejemplo 2.4)

a , cuando la velocidad inicial es v_0 (etapa 3, los señalamientos están completos), así que la tercera ecuación en la tabla 2.4 es más útil para resolver el inciso a). Conociendo la velocidad, la primera ecuación en la tabla 2.4 se utiliza para determinar el tiempo en el inciso b). El inciso c) requiere la sustitución en las ecuaciones 2.2 y 2.7, respectivamente.

SOLUCIÓN

a) Convierta las unidades de Δx al SI; utilice la información de la cubierta frontal interna del libro.

$$1.00 \times 10^2 \text{ pies} = (1.00 \times 10^2 \text{ pies}) \left(\frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ pies}} \right) = 30.5 \text{ m}$$

Escriba la ecuación cinemática para v^2 (etapa 4):

$$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$$

Resuelva para v , tome la raíz cuadrada positiva, ya que el automóvil se mueve hacia la derecha (etapa 5):

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a \Delta x}$$

Sustituya $v_0 = 0$, $a = 5.00 \text{ m/s}^2$ y $\Delta x = 30.5 \text{ m}$:

$$v = \sqrt{v_0^2 + 2a \Delta x} = \sqrt{(0)^2 + 2(5.00 \text{ m/s}^2)(30.5 \text{ m})} = 17.5 \text{ m/s}$$

b) ¿Cuánto tiempo ha transcurrido?

Aplice la primera ecuación de la tabla 2.4:

$$v = at + v_0$$

Sustituya valores y resuelva para el tiempo t :

$$17.5 \text{ m/s} = (5.00 \text{ m/s}^2)t$$

$$t = \frac{17.5 \text{ m/s}}{5.00 \text{ m/s}^2} = 3.50 \text{ s}$$

c) Calcule la velocidad promedio de dos maneras diferentes.

Aplice la definición de velocidad promedio en la ecuación 2.2:

$$\bar{v} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{30.5 \text{ m}}{3.50 \text{ s}} = 8.71 \text{ m/s}$$

Aplice la definición de velocidad promedio en la ecuación 2.7:

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = \frac{0 + 17.5 \text{ m/s}}{2} = 8.75 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Las respuestas son fáciles de verificar. Otra técnica es utilizar $\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ para determinar t y después emplear la ecuación $v = v_0 + at$ para encontrar v . Tenga en cuenta que las dos ecuaciones distintas para calcular la velocidad promedio, debido al redondeo, dan respuestas un poco diferentes.

PREGUNTA 2.4 ¿Cuál es la rapidez final si el desplazamiento se incrementa en un factor de 4?

EJERCICIO 2.4 Suponga que el conductor en este ejemplo aplica los frenos, deteniendo el automóvil en 4.00 s. Determine a) la aceleración y b) la distancia que recorre el automóvil mientras frena, suponiendo que la aceleración es constante y encuentre c) la velocidad promedio.

RESPUESTAS a) -4.38 m/s^2 b) 35.0 m c) 8.75 m/s

EJEMPLO 2.5 Persecución de un automóvil

OBJETIVO Resolver un problema que involucra dos objetos, uno móvil con aceleración constante y el otro con velocidad constante.

PROBLEMA Un automóvil que viaja con una rapidez constante de 24.0 m/s pasa un letrero panorámico detrás del cual se encuentra escondido un patrullero, como se muestra en la figura 2.17. Un segundo después de que el automóvil con exceso de velocidad pasa el letrero, el patrullero inicia la persecución con una aceleración constante de 3.00 m/s^2 . a) ¿Cuánto tiempo le toma al patrullero dar alcance al automóvil? b) ¿Qué tan rápido va el patrullero en ese momento?

ESTRATEGIA Resuelva este problema que involucra dos ecuaciones cinemáticas simultáneas de posición, una para el patrullero y la otra para el automóvil.

Elija $t = 0$ que corresponde al tiempo en que el patrullero inicia la persecución, cuando el automóvil está en $x_{\text{auto}} = 24.0 \text{ m}$ debido a su inicio anticipado ($24.0 \text{ m/s} \times 1.00 \text{ s}$). El patrullero alcanza al automóvil cuando sus posiciones son las mismas, lo que sugiere igualar $x_{\text{patrullero}} = x_{\text{auto}}$ y resolver para el tiempo, lo cual se puede utilizar después para determinar la rapidez del patrullero en el inciso b).

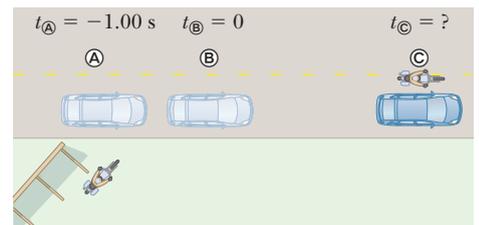


Figura 2.17 (Ejemplo 2.5) Un automóvil con exceso de velocidad pasa a un patrullero escondido. ¿Cuándo alcanzará el patrullero al automóvil?

(continúa)

SOLUCIÓN

a) ¿Cuánto tiempo le toma al patrullero dar alcance al automóvil?

Escriba la ecuación para el desplazamiento del automóvil:
 Considere $x_0 = 24.0$ m, $v_0 = 24.0$ m/s y $a_{\text{auto}} = 0$. Resuelva para x_{auto} :

Escriba la ecuación para la posición del patrullero; considere $x_0 = 0$, $v_0 = 0$ y $a_{\text{patrullero}} = 3.00$ m/s²:

Ajuste $x_{\text{patrullero}} = x_{\text{auto}}$ y resuelva la ecuación cuadrática. (La fórmula cuadrática aparece en el apéndice A, ecuación A.8.) Sólo la raíz positiva tiene significado.

b) Determine la rapidez del patrullero en este tiempo.

Sustituya el tiempo en la ecuación de velocidad del patrullero:

$$\Delta x_{\text{auto}} = x_{\text{auto}} - x_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a_{\text{auto}} t^2$$

$$x_{\text{auto}} = x_0 + vt = 24.0 \text{ m} + (24.0 \text{ m/s})t$$

$$x_{\text{patrullero}} = \frac{1}{2} a_{\text{patrullero}} t^2 = \frac{1}{2} (3.00 \text{ m/s}^2) t^2 = (1.50 \text{ m/s}^2) t^2$$

$$(1.50 \text{ m/s}^2) t^2 = 24.0 \text{ m} + (24.0 \text{ m/s})t$$

$$(1.50 \text{ m/s}^2) t^2 - (24.0 \text{ m/s})t - 24.0 \text{ m} = 0$$

$$t = 16.9 \text{ s}$$

$$v_{\text{patrullero}} = v_0 + a_{\text{patrullero}} t = 0 + (3.00 \text{ m/s}^2)(16.9 \text{ s})$$

$$= 50.7 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS El patrullero, que viaja casi dos veces más rápido que el automóvil, ¡debe desviarse o aplicar sus frenos firmemente para evitar una colisión! Este problema también puede resolverse gráficamente trazando la posición en términos del tiempo para cada vehículo en la misma gráfica. La intersección de las dos gráficas corresponde al tiempo y posición en que el patrullero da alcance al automóvil.

PREGUNTA 2.5 ¿La solución gráfica corresponde a la búsqueda de la intersección en el plano xt de las dos curvas?

EJERCICIO 2.5 Un automovilista con licencia vencida viaja por una calle a 10.0 m/s, y un policía en motocicleta, que tarda otros 5.00 s para terminar su dona, se da a la persecución con una aceleración de 2.00 m/s². Determine a) el tiempo necesario para alcanzar al automóvil y b) la distancia que recorre el patrullero mientras da alcance al automovilista.

RESPUESTAS a) 13.7 s b) 188 m

EJEMPLO 2.6 Longitud de pista

OBJETIVO Aplicar la cinemática al movimiento horizontal con dos fases.

PROBLEMA Un avión comercial aterriza con una rapidez de 1.60×10^2 mi/h y desacelera a razón de (10 mi/h)/s. Si la nave viaja con rapidez constante de 1.60×10^2 mi/h por 1.00 s después de aterrizar y antes de aplicar los frenos, ¿cuál es el desplazamiento total de la nave entre el aterrizaje en la pista y la llegada al reposo?

ESTRATEGIA Véase la figura 2.18. Primero, convierta todas las unidades de las cantidades al SI. El problema debe resolverse en dos partes, o fases, que corresponden al deslizamiento inicial después del aterrizaje, seguido por el frenado. Utilizando las ecuaciones cinemáticas, determinar el desplazamiento durante cada parte y sume los dos desplazamientos.

SOLUCIÓN

Convierta las unidades de rapidez y aceleración al SI:

$$v_0 = (1.60 \times 10^2 \text{ mi/h}) \left(\frac{0.447 \text{ m/s}}{1.00 \text{ mi/h}} \right) = 71.5 \text{ m/s}$$

$$a = (-10.0 \text{ (mi/h)/s}) \left(\frac{0.447 \text{ m/s}}{1.00 \text{ mi/h}} \right) = -4.47 \text{ m/s}^2$$

Tomando $a = 0$, $v_0 = 71.5$ m/s y $t = 1.00$ s, determine el desplazamiento mientras la nave se desliza:

$$\Delta x_{\text{deslizamiento}} = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 = (71.5 \text{ m/s})(1.00 \text{ s}) + 0 = 71.5 \text{ m}$$

Utilice la ecuación cinemática independiente del tiempo para determinar el desplazamiento mientras el avión frena.

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x_{\text{frenado}}$$

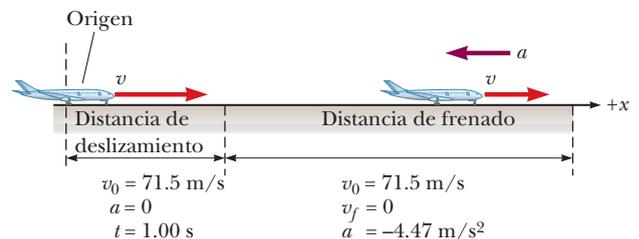


Figura 2.18 (Ejemplo 2.6) Distancia de deslizamiento y frenado para un avión comercial aterrizando.

Considere $a = -4.47 \text{ m/s}^2$ y $v_0 = 71.5 \text{ m/s}$. El signo negativo en a significa que la nave está disminuyendo su velocidad.

Sume los dos resultados para determinar el desplazamiento total.

$$\Delta x_{\text{frenado}} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (71.5 \text{ m/s})^2}{2.00(-4.47 \text{ m/s}^2)} = 572 \text{ m}$$

$$\Delta x_{\text{desplazamiento}} + \Delta x_{\text{frenado}} = 72 \text{ m} + 572 \text{ m} = 644 \text{ m}$$

COMENTARIOS Para determinar el desplazamiento mientras frena, se tendría que utilizar las dos ecuaciones cinemáticas que involucran al tiempo, a saber, $\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$ y $v = v_0 + a t$, pero debido a que no estamos interesados en el tiempo, es más fácil utilizar la ecuación independiente del tiempo.

PREGUNTA 2.6 ¿Cómo cambiaría la respuesta si el avión se desliza por 2.00 s antes de que el piloto aplique los frenos?

EJERCICIO 2.6 Un jet aterriza a 80.0 m/s; el piloto aplica los frenos 2.00 s después de aterrizar. Determine la aceleración que se requiere para detener el jet dentro de $5.00 \times 10^2 \text{ m}$.

RESPUESTA -9.41 m/s^2

■ EJEMPLO 2.7 El Acela: el Porsche de los trenes americanos

OBJETIVO Determinar las aceleraciones y desplazamientos de una gráfica velocidad $vs.$ tiempo.

PROBLEMA El tren eléctrico de alta velocidad conocido como el *Acela* actualmente está en servicio en la ruta Washington-Nueva York-Boston. El *Acela* está formado por dos poderosas máquinas y seis vagones que pueden transportar 304 pasajeros a velocidades superiores a 170 mi/h. Con la finalidad de cubrir las curvas de manera cómoda a alta velocidad, los vagones del tren se inclinan 6° con respecto a la vertical, impidiendo que los pasajeros sean empujados lateralmente. En la figura 2.19a (página 42) se muestra una gráfica de velocidad $vs.$ tiempo. **a)** Describa el movimiento del *Acela*. **b)** Determine el pico de aceleración del *Acela* en millas por hora por segundo ((mi/h)/s) conforme la velocidad del tren aumenta de 45 a 170 mi/h. **c)** Determine en millas el desplazamiento del tren entre $t = 0$ y $t = 200 \text{ s}$. **d)** Determine en millas la aceleración promedio

de *Acela* y su desplazamiento en el intervalo desde 200 s hasta 300 s. (El tren tiene frenos regenerativos, ¡lo que significa que se retroalimenta la energía en las líneas de servicio cada vez que se detiene!) **e)** Determine el desplazamiento total en el intervalo desde 0 hasta 400 segundos.

ESTRATEGIA Para el inciso a), recuerde que la pendiente de la recta tangente en cualquier punto de la gráfica velocidad $vs.$ tiempo proporciona la aceleración en ese tiempo. Para encontrar el pico de aceleración en el inciso b), examine la gráfica y localice el punto en el cual la pendiente es más pronunciada. En los incisos c) al e), evalúe el área bajo la curva que proporciona el desplazamiento durante un periodo determinado, con áreas debajo del eje tiempo, como en el inciso e), réstelo del total. La aceleración promedio en el inciso d) se puede obtener al sustituir en la definición de aceleración promedio los números tomados de la gráfica, $a = \Delta v / \Delta t$.

SOLUCIÓN

a) Describa el movimiento.

Casi a partir de -50 a 50 s , el *Acela* cruza con una velocidad constante en la dirección $+x$. A continuación, el tren acelera en la dirección $+x$ desde 50 hasta 200 s , logrando una velocidad máxima cercana a 170 mi/h tras lo cual frena hasta el reposo en 350 s y regresa, adquiriendo velocidad constantemente en la dirección $-x$.

b) Determine el pico de aceleración.

Calcule la pendiente de la recta tangente más pronunciada, que conecta los puntos $(50 \text{ s}, 50 \text{ mi/h})$ y $(100 \text{ s}, 150 \text{ mi/h})$ (la recta azul tenue en la figura 2.19b):

$$a = \text{pendiente} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(1.5 \times 10^2 - 5.0 \times 10^1) \text{ mi/h}}{(1.0 \times 10^2 - 5.0 \times 10^1) \text{ s}} = 2.0 \text{ (mi/h)/s}$$

c) Determine el desplazamiento entre 0 y 200 s .

Utilizando triángulos y rectángulos y aproxime el área de la figura 2.19c (véase la página 42):

$$\begin{aligned} \Delta x_{0 \rightarrow 200 \text{ s}} &= \text{área}_1 + \text{área}_2 + \text{área}_3 + \text{área}_4 + \text{área}_5 \\ &\approx (5.0 \times 10^1 \text{ mi/h})(5.0 \times 10^1 \text{ s}) \\ &\quad + (5.0 \times 10^1 \text{ mi/h})(5.0 \times 10^1 \text{ s}) \\ &\quad + (1.6 \times 10^2 \text{ mi/h})(1.0 \times 10^2 \text{ s}) \\ &\quad + \frac{1}{2}(5.0 \times 10^1 \text{ s})(1.0 \times 10^2 \text{ mi/h}) \\ &\quad + \frac{1}{2}(1.0 \times 10^2 \text{ s})(1.7 \times 10^2 \text{ mi/h} - 1.6 \times 10^2 \text{ mi/h}) \\ &= 2.4 \times 10^4 \text{ (mi/h)s} \end{aligned}$$

(continúa)

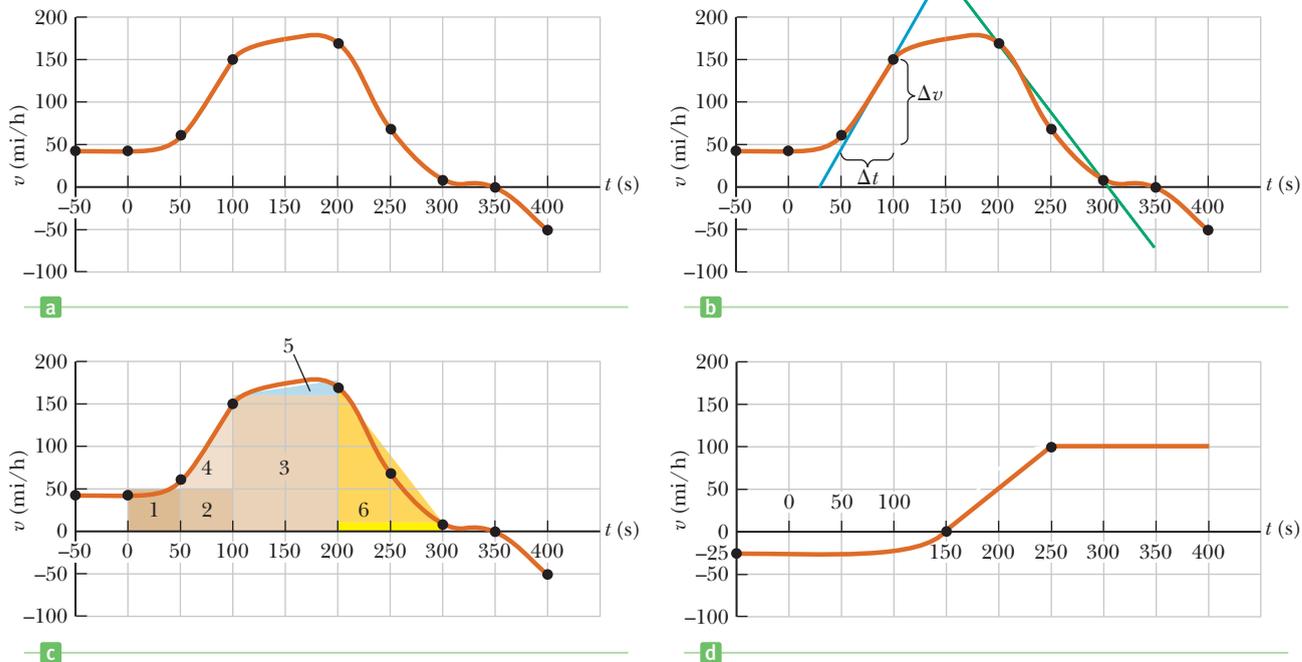


Figura 2.19 (Ejemplo 2.7) a) Gráfica de velocidad *vs.* tiempo para el *Acela*. b) La pendiente de la recta azul tangente más pronunciada proporciona el pico de aceleración y la pendiente de la recta verde es la aceleración promedio entre 200 y 300 s. c) El área bajo la gráfica velocidad *vs.* tiempo en algún intervalo de tiempo proporciona el desplazamiento del *Acela* en ese intervalo de tiempo. d) (Ejercicio 2.7).

Convierta las unidades a millas al convertir horas a segundos:

d) Determine la aceleración promedio desde 200 hasta 300 s y el desplazamiento.

La pendiente de la recta verde es la aceleración promedio desde 200 hasta 300 s (figura 2.19b):

El desplazamiento desde 200 hasta 300 s es igual al área₆, que es el área de un triángulo más el área de un rectángulo muy estrecho bajo el triángulo:

e) Determine el desplazamiento total desde 0 hasta 400 s.

El desplazamiento total es la suma de todos los desplazamientos individuales. Todavía necesitamos calcular el desplazamiento para los intervalos de tiempo desde 300 hasta 350 s y desde 350 hasta 400 s. El último es negativo porque está abajo del eje del tiempo.

Determine el desplazamiento total sumando las partes:

$$\Delta x_{0 \rightarrow 200 \text{ s}} \approx 2.4 \times 10^4 \frac{\text{mi} \cdot \text{s}}{\text{h}} \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) = 6.7 \text{ mi}$$

$$\begin{aligned} \bar{a} = \text{pendiente} &= \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{(1.0 \times 10^1 - 1.7 \times 10^2) \text{ mi/h}}{1.0 \times 10^2 \text{ s}} \\ &= -1.6 \text{ (mi/h)/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{200 \rightarrow 300 \text{ s}} &\approx \frac{1}{2}(1.0 \times 10^2 \text{ s})(1.7 \times 10^2 - 1.0 \times 10^1) \text{ mi/h} \\ &\quad + (1.0 \times 10^1 \text{ mi/h})(1.0 \times 10^2 \text{ s}) \\ &= 9.0 \times 10^3 \text{ (mi/h)(s)} = 2.5 \text{ mi} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{300 \rightarrow 350 \text{ s}} &\approx \frac{1}{2}(5.0 \times 10^1 \text{ s})(1.0 \times 10^1 \text{ mi/h}) \\ &= 2.5 \times 10^2 \text{ (mi/h)(s)} \end{aligned}$$

$$\Delta x_{350 \rightarrow 400 \text{ s}} \approx \frac{1}{2}(5.0 \times 10^1 \text{ s})(-5.0 \times 10^1 \text{ mi/h})$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{0 \rightarrow 400 \text{ s}} &\approx (2.4 \times 10^4 + 9.0 \times 10^3 + 2.5 \times 10^2 \\ &\quad \rightarrow -1.3 \times 10^3) \text{ (mi/h)(s)} = 8.9 \text{ mi} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Existe una variedad de formas para determinar el área aproximada bajo una gráfica. La selección de la técnica es de preferencia personal.

PREGUNTA 2.7 De acuerdo con la gráfica en la figura 2.19a, ¿en qué tiempos diferentes la aceleración es cero?

EJERCICIO 2.7 Suponga que se proporciona la gráfica velocidad *vs.* tiempo de otro tren en la figura 2.19d. Determine a) la aceleración instantánea máxima y b) el desplazamiento total en el intervalo desde 0 s hasta 4.00×10^2 s.

RESPUESTAS a) 1.0 (mi/h)/s b) 4.7 mi

2.6 Objetos en caída libre

Cuando se omite la resistencia del aire, todos los objetos caen bajo la influencia de la gravedad a la superficie de la Tierra cayendo hacia ella con la misma aceleración constante. Hoy esta idea puede parecer evidente, pero ésta no fue aceptada hasta cerca del año 1600. Antes de ese tiempo, las enseñanzas del gran filósofo Aristóteles (384-322 a.C.) sostenían que los objetos pesados caían más rápido que los ligeros.

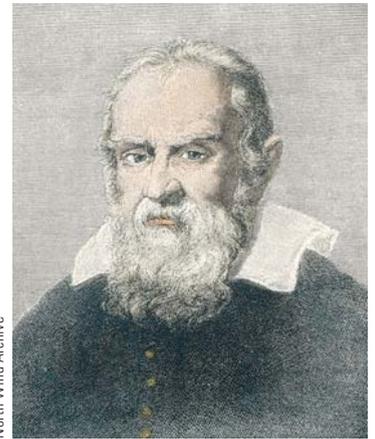
De acuerdo con la leyenda, Galileo descubrió la ley de caída libre de objetos al observar que dos pesas diferentes se dejaban caer de manera simultánea desde la Torre inclinada de Pisa golpeando la superficie de la Tierra aproximadamente en el mismo tiempo. Aunque es improbable que este experimento se haya llevado a cabo, se sabe que Galileo realizó muchos experimentos sistemáticos con objetos móviles sobre planos inclinados. En sus experimentos rodó bolas cuesta abajo en un plano levemente inclinado y midió la distancia que cubrían en intervalos de tiempo consecutivos. El propósito del plano inclinado fue reducir la aceleración y permitirle a Galileo hacer medidas precisas de los intervalos. (Alguna gente se refiere a este experimento como “dilución de la gravedad”.) De manera gradual fue aumentando la pendiente del plano inclinado y finalmente fue capaz de formular conclusiones matemáticas acerca de los objetos en caída libre, dado que un proyectil en caída libre es equivalente a un proyectil en marcha cuesta abajo en un plano inclinado vertical. Los logros de Galileo en la ciencia de la mecánica preparan el camino para Newton en el desarrollo de las leyes de movimiento, que se estudiarán en el capítulo 4.

Intente el siguiente experimento. Deje caer simultáneamente un martillo y una pluma desde la misma altura. El martillo golpea primero el piso porque la fricción con el aire tiene un gran efecto sobre la pluma que es más ligera. El 2 de agosto de 1971, este mismo experimento fue conducido en la Luna por el astronauta David Scott, y el martillo y la pluma cayeron exactamente con la misma aceleración, como se esperaba, golpeando la superficie lunar al mismo tiempo. Al caso idealizado del movimiento donde se omite la resistencia del aire, se le conoce como *caída libre*.

La expresión *objeto en caída libre* no necesariamente se refiere a un objeto que se deja caer desde el reposo. **Un objeto en caída libre es cualquier objeto moviéndose libremente bajo la influencia sólo de la gravedad, independientemente de su movimiento inicial.** Los objetos que se lanzan hacia arriba o bien hacia abajo y aquellos liberados desde el reposo son considerados en caída libre.

Se indica la magnitud de la **aceleración en caída libre** mediante el símbolo g . El valor de g disminuye con el aumento de la altitud y también varía ligeramente con la latitud. En la superficie de la Tierra, el valor de g es aproximadamente 9.80 m/s^2 . A menos que se establezca otra situación, utilizaremos este valor para g en la realización de los cálculos. Para estimaciones rápidas, utilice $g \approx 10 \text{ m/s}^2$.

Si se pasa por alto la resistencia del aire y se supone que la aceleración en caída libre no varía con la altitud en una distancia vertical corta, entonces el movimiento de un objeto en caída libre es el mismo que el movimiento en una dimensión bajo aceleración constante. Esto significa que pueden ser aplicadas las ecuaciones cinemáticas desarrolladas en la sección 2.6. Esto es convencional para definir hacia “arriba” como la dirección y positiva, y utilizaremos a y como la variable posición. En este caso la aceleración es $a = -g = -9.80 \text{ m/s}^2$. En el capítulo 7, se estudia la variación en g con la altitud.



North Wind Archive

Galileo Galilei Físico y astrónomo italiano (1564-1642)

Galileo formuló las leyes que gobiernan el movimiento de objetos en caída libre. Además, investigó el movimiento de un objeto sobre un plano inclinado, estableció el concepto de movimiento relativo, inventó el termómetro y descubrió que el movimiento de un péndulo oscilante podría utilizarse para medir intervalos de tiempo. Después diseñó y construyó su propio telescopio, descubrió cuatro de las lunas de Júpiter, encontró que la superficie de nuestra Luna es rugosa, descubrió manchas solares y las fases de Venus y demostró que la Vía Láctea está constituida por un gran número de estrellas. Galileo defendió públicamente la afirmación de Nicolás Copérnico de que el Sol está en el centro del Universo (el sistema heliocéntrico). Publicó *Diálogo acerca de los sistemas de dos mundos nuevos* para apoyar el modelo de Copérnico, una perspectiva que la Iglesia consideró herejía. Después de ser hecho prisionero en Roma en 1633 con cargo de herejía, fue sentenciado a prisión y después confinado a su villa en Arcetri, cerca de Florencia, donde murió en 1642.

Examen rápido

2.6 Un jugador de tenis efectúa el saque lanzando la pelota verticalmente hacia arriba. Mientras la pelota está en caída libre, ¿su aceleración a) se incrementa, b) disminuye, c) aumenta y después disminuye, d) disminuye y después aumenta, o bien e) permanece constante?

2.7 Conforme la pelota de tenis del examen rápido 2.6 viaja a través del aire, ¿su velocidad a) aumenta, b) disminuye, c) disminuye y después aumenta, d) aumenta y después disminuye, o bien e) permanece la misma?

2.8 Un paracaidista salta de un helicóptero que está suspendido en el aire. Pocos segundos después, salta otro paracaidista, de tal manera que ambos caen con la misma aceleración a lo largo de la misma línea vertical con respecto al helicóptero. ¿La distancia vertical entre ellos a) aumenta, b) disminuye, o bien c) permanece igual? ¿La diferencia en sus velocidades d) aumenta, e) disminuye, o bien f) permanece igual? (Considere g constante.)

EJEMPLO 2.8

Un lanzamiento no tan malo para un novato

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones cinemáticas para un objeto en caída libre con una velocidad inicial diferente de cero.

PROBLEMA Se lanza una piedra desde la parte superior de un edificio con una velocidad inicial de 20.0 m/s en una trayectoria rectilínea hacia arriba, desde una altura inicial de 50.0 m sobre el nivel del suelo. La piedra libra el borde del techo de su camino hacia abajo, como se muestra en la figura 2.20. Determine **a)** el tiempo necesario para que la piedra alcance su altura máxima, **b)** la altura máxima, **c)** el tiempo necesario para que la piedra regrese a la altura de la cual fue lanzada y la velocidad de la piedra en ese instante, **d)** el tiempo necesario para que la piedra alcance la superficie de la tierra y **e)** la velocidad y posición de la piedra en $t = 5.00$ s. Omita la resistencia del aire.

ESTRATEGIA El diagrama en la figura 2.20 establece un sistema coordenado con $y_0 = 0$ en el nivel en que se libera la piedra desde la mano del lanzador con y positiva hacia arriba. Escriba las ecuaciones cinemáticas de la velocidad y posición para la piedra y sustituya la información que se proporciona. Todas las respuestas surgen de estas dos ecuaciones al usar álgebra simple mediante la sustitución del tiempo. Por ejemplo, en el inciso a) la piedra llega al reposo por un instante en su altura máxima, así se sustituye $v = 0$ y se resuelve para el tiempo. Después se sustituye el tiempo en la ecuación de desplazamiento, obteniendo la altura máxima.

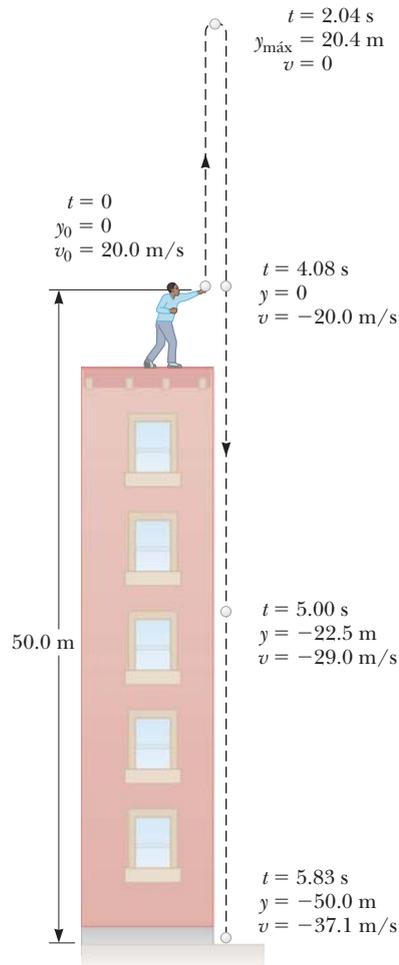


Figura 2.20 (Ejemplo 2.8) Un objeto en caída libre es lanzado hacia arriba con una velocidad inicial de $v_0 = +20.0$ m/s. Las posiciones y velocidades están dadas para varios tiempos.

SOLUCIÓN

a) Determine el instante en el que una piedra alcanza su altura máxima.

Escriba las ecuaciones cinemáticas de la velocidad y la posición:

Sustituya $a = -9.80$ m/s², $v_0 = 20.0$ m/s y $y_0 = 0$ en las dos ecuaciones anteriores:

Sustituya $v = 0$, la velocidad en la altura máxima, en la ecuación (1) y resuelva para el tiempo:

b) Calcule la altura máxima de la piedra.

Sustituya el tiempo $t = 2.04$ s en la ecuación (2):

c) Determine el tiempo que le toma a la piedra regresar a su posición inicial y la velocidad de la piedra en ese tiempo.

Haga $y = 0$ en la ecuación (2) y resuelva para t :

$$v = at + v_0$$

$$\Delta y = y - y_0 = v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

$$(1) \quad v = (-9.80 \text{ m/s}^2)t + 20.0 \text{ m/s}$$

$$(2) \quad y = (20.0 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$0 = (-9.80 \text{ m/s}^2)t + 20.0 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{-20.0 \text{ m/s}}{-9.80 \text{ m/s}^2} = 2.04 \text{ s}$$

$$y_{\text{máx}} = (20.0 \text{ m/s})(2.04 \text{ s}) - (4.90 \text{ m/s}^2)(2.04 \text{ s})^2 = 20.4 \text{ m}$$

$$0 = (20.0 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$= t(20.0 \text{ m/s} - 4.90 \text{ m/s}^2 t)$$

$$t = 4.08 \text{ s}$$

Sustituya el tiempo en la ecuación (1) para obtener la velocidad:

$$v = 20.0 \text{ m/s} + (-9.80 \text{ m/s}^2)(4.08 \text{ s}) = -20.0 \text{ m/s}$$

d) Determine el tiempo necesario para que la piedra alcance la superficie de la tierra.

En la ecuación (2), haga que $y = -50.0 \text{ m}$:

$$-50.0 \text{ m} = (20.0 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

Aplique la fórmula cuadrática y tome la raíz positiva:

$$t = 5.83 \text{ s}$$

e) Determine la velocidad y posición de la piedra en $t = 5.00 \text{ s}$.

Sustituya valores en las ecuaciones (1) y (2):

$$v = (-9.80 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ s}) + 20.0 \text{ m/s} = -29.0 \text{ m/s}$$

$$y = (20.0 \text{ m/s})(5.00 \text{ s}) - (4.90 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ s})^2 = -22.5 \text{ m}$$

COMENTARIOS Observe cómo todo surge de las dos ecuaciones cinemáticas. Una vez que son escritas y se identifican correctamente las constantes como en las ecuaciones (1) y (2), el resto es relativamente fácil. Si la piedra fuera lanzada hacia abajo, la velocidad inicial tendría que ser negativa.

PREGUNTA 2.8 ¿Cómo cambiaría la respuesta del inciso b), la altura máxima, si la persona lanza la pelota brincando hacia arriba en el instante en que libera la pelota?

EJERCICIO 2.8 Se lanza un proyectil en una trayectoria rectilínea hacia arriba a 60.0 m/s desde una altura de 80.0 m , en el borde de un acantilado. El proyectil cae, librando el acantilado y golpeando abajo la superficie de la tierra. Determine a) la altura máxima del proyectil arriba del punto de lanzamiento, b) el tiempo que tarda en golpear la superficie de la tierra en la base del acantilado y c) su velocidad en el impacto.

RESPUESTAS a) 184 m b) 13.5 s c) -72.3 m/s

■ EJEMPLO 2.9 Deducción de la altura máxima

OBJETIVO Determinar la altura máxima de un proyectil lanzado, utilizando símbolos.

PROBLEMA Refiérase al ejemplo 2.8. Utilice manipulación simbólica para determinar **a)** el tiempo $t_{\text{máx}}$ que le toma a la pelota alcanzar su altura máxima y **b)** una expresión para la altura máxima independiente del tiempo. Las respuestas se expresan sólo en términos de las cantidades v_0 , g y y_0 .

ESTRATEGIA Cuando la pelota alcanza su altura máxima, su velocidad es cero, de tal modo que para el inciso a) resuelva la ecuación cinemática de velocidad para el tiempo t y haga $v = 0$. Para el inciso b), sustituya la expresión para el tiempo encontrado en el inciso a) dentro de la ecuación de desplazamiento y resuelva para la altura máxima.

SOLUCIÓN

a) Determine el tiempo que tarda la pelota en alcanzar su altura máxima.

Escriba la ecuación cinemática de velocidad:

$$v = at + v_0$$

Mueva v_0 al lado izquierdo de la ecuación:

$$v - v_0 = at$$

Divida ambos lados entre a :

$$\frac{v - v_0}{a} = \frac{dt}{dt} = t$$

Regrese a la ecuación de modo que t esté a la izquierda y sustituya $v = 0$, que corresponde a la velocidad en la altura máxima:

$$(1) \quad t = \frac{-v_0}{a}$$

Sustituya t por $t_{\text{máx}}$ y $a = -g$:

$$(2) \quad t_{\text{máx}} = \frac{v_0}{g}$$

b) Determine la altura máxima.

Escriba la ecuación para la posición y en cualquier tiempo:

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$$

(continúa)

Sustituya $t = -v_0/a$, que corresponde al tiempo que tarda en llegar a $y_{\text{máx}}$, la altura máxima:

$$y_{\text{máx}} = y_0 + v_0 \left(\frac{-v_0}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{-v_0}{a} \right)^2$$

$$= y_0 - \frac{v_0^2}{a} + \frac{1}{2} \frac{v_0^2}{a}$$

Combine los dos últimos términos y sustituya $a = -g$:

$$(3) \quad y_{\text{máx}} = y_0 + \frac{v_0^2}{2g}$$

COMENTARIOS Observe que $g = +9.8 \text{ m/s}^2$, de tal modo que el segundo término total es positivo. Las ecuaciones (1) a (3) son mucho más útiles que una respuesta numérica porque el efecto de cambiar un valor puede ser visto inmediatamente. Por ejemplo, duplicar la velocidad inicial v_0 cuadruplica el desplazamiento arriba del punto de liberación. Además, observe que $y_{\text{máx}}$ podría obtenerse con más facilidad a partir de la ecuación independiente del tiempo, $v^2 - v_0^2 = 2a\Delta y$.

PREGUNTA 2.9 ¿En qué factor el desplazamiento máximo se incrementaría arriba del techo si el edificio fuera transportado a la Luna, donde $a = -\frac{1}{6}g$?

EJERCICIO 2.9 a) Utilizando símbolos, determine el tiempo t_T que le toma a la pelota alcanzar la superficie de la Tierra si se libera desde el reposo a la altura y_0 . b) En términos de t_T , ¿cuánto tiempo t_L sería necesario si el edificio estuviera en Marte, donde $a = -0.385g$?

RESPUESTAS a) $t_T = \sqrt{\frac{2y_0}{g}}$ b) $t_L = 1.61t_T$

■ EJEMPLO 2.10 Un cohete balístico

OBJETIVO Resolver un problema que involucra un ascenso impulsado seguido por un movimiento en caída libre.

PROBLEMA Un cohete se mueve en una trayectoria rectilínea hacia arriba, iniciando desde el reposo con una aceleración de $+29.4 \text{ m/s}^2$; al final de 4.00 s se acaba el combustible y continúa deslizándose hacia arriba, alcanzando una altura máxima antes de caer de regreso hacia la Tierra. **a)** Determine la velocidad del cohete y la posición al final de 4.00 s . **b)** Determine la altura máxima que alcanza el cohete. **c)** Determine la velocidad en el instante antes de que el cohete choca con la superficie de la Tierra.

ESTRATEGIA Considere $y = 0$ en el punto de lanzamiento y y positiva hacia arriba, como en la figura 2.21. El problema está constituido por dos fases. En la fase 1 el cohete tiene una aceleración neta *hacia arriba* de 29.4 m/s^2 y se pueden aplicar las ecuaciones de cinemática con aceleración constante a para determinar la altura y velocidad del cohete al final de la fase 1 cuando se termina el combustible. En la fase 2 el cohete se encuentra en caída libre y tiene una aceleración de -9.80 m/s^2 , con velocidad inicial y posición conocidas mediante los resultados de la fase 1. Aplique las ecuaciones cinemáticas para caída libre.

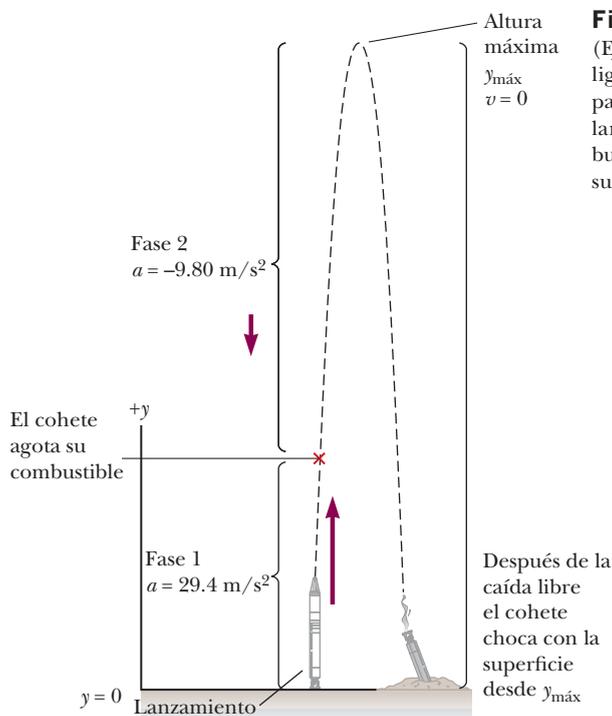


Figura 2.21 (Ejemplo 2.10) Dos fases ligadas de movimiento para un cohete que es lanzado, utiliza su combustible y choca con la superficie.

SOLUCIÓN

a) Fase 1. Determine la velocidad y posición del cohete después de 4.00 s .

Escriba las ecuaciones cinemáticas de la velocidad y posición:

$$(1) \quad v = v_0 + at$$

$$(2) \quad \Delta y = y - y_0 = v_0t + \frac{1}{2}at^2$$

Adapte estas ecuaciones a la fase 1, sustituyendo $a = 29.4 \text{ m/s}^2$, $v_0 = 0$ y $y_0 = 0$:

Sustituya $t = 4.00 \text{ s}$ en las ecuaciones (3) y (4) para determinar la velocidad v y la posición y del cohete en el tiempo en el que se agota el combustible. Esto será conocido como v_b y y_b , respectivamente.

b) Fase 2. Determinar la altura máxima que alcanza el cohete.

Adapte la ecuación (1) y (2) a la fase 2, sustituya $a = -9.8 \text{ m/s}^2$, $v_0 = v_b = 118 \text{ m/s}$ y $y_0 = y_b = 235 \text{ m}$:

Sustituya $v = 0$ (la velocidad del cohete en la altura máxima) en la ecuación (5) para obtener el tiempo que tarda el cohete en alcanzar su altura máxima:

Sustituya $t = 12.0 \text{ s}$ en la ecuación (6) para determinar la altura máxima del cohete:

c) Fase 2. Determinar la velocidad del cohete en el momento del impacto.

Determine el tiempo de impacto haciendo $y = 0$ en la ecuación (6) y aplique la fórmula cuadrática:

Sustituya este valor de t en la ecuación (5):

$$(3) \quad v = (29.4 \text{ m/s}^2)t$$

$$(4) \quad y = \frac{1}{2}(29.4 \text{ m/s}^2)t^2 = (14.7 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$v_b = 118 \text{ m/s} \quad \text{y} \quad y_b = 235 \text{ m}$$

$$(5) \quad v = (-9.8 \text{ m/s}^2)t + 118 \text{ m/s}$$

$$(6) \quad y = 235 \text{ m} + (118 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$0 = (-9.8 \text{ m/s}^2)t + 118 \text{ m/s} \rightarrow t = \frac{118 \text{ m/s}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 12.0 \text{ s}$$

$$y_{\text{máx}} = 235 \text{ m} + (118 \text{ m/s})(12.0 \text{ s}) - (4.90 \text{ m/s}^2)(12.0 \text{ s})^2 = 945 \text{ m}$$

$$0 = 235 \text{ m} + (118 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$t = 25.9 \text{ s}$$

$$v = (-9.80 \text{ m/s}^2)(25.9 \text{ s}) + 118 \text{ m/s} = -136 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Es posible pensar que es más natural separar este problema en tres fases, finalizando la segunda fase en la altura máxima e iniciando la tercera fase con una caída libre desde la altura máxima hacia la superficie de la tierra. Aunque este planteamiento proporciona las respuestas correctas, es una complicación innecesaria. Así, dos fases son suficientes, una para cada aceleración diferente.

PREGUNTA 2.10 Si, más bien, queda algo de combustible, ¿a qué altura debe encender el motor una vez más para interrumpir la caída del cohete y permitir un aterrizaje perfectamente suave? (Considere la misma aceleración que durante el ascenso inicial.)

EJERCICIO 2.10 Un cohete experimental diseñado para aterrizar verticalmente se precipita en caída libre desde una altura de $2.00 \times 10^2 \text{ m}$, iniciando en el reposo. A una altura de 80.0 m , los motores del cohete se encienden y proporcionan una aceleración constante hasta que el cohete aterriza. ¿Qué aceleración se necesita si la rapidez en el aterrizaje es cero? (Omita la resistencia del aire.)

RESPUESTA 14.7 m/s^2

RESUMEN

2.1 Desplazamiento

El **desplazamiento** de un objeto moviéndose sobre el eje x se define como el cambio en la posición del objeto,

$$\Delta x \equiv x_f - x_i \quad [2.1]$$

donde x_i es la posición inicial del objeto y x_f la posición final.

Una cantidad **vectorial** se caracteriza por tener una magnitud y una dirección. Una cantidad **escalar** sólo tiene magnitud.

2.2 Velocidad

La **rapidez promedio** de un objeto se conoce mediante

$$\text{Rapidez promedio} \equiv \frac{\text{distancia total}}{\text{tiempo total}}$$

La **velocidad promedio** \bar{v} durante un intervalo de tiempo Δt es el desplazamiento Δx dividido entre Δt .

$$\bar{v} \equiv \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} \quad [2.2]$$

La velocidad promedio es igual a la pendiente de la recta que une los puntos inicial y final de una gráfica de la posición del objeto en función del tiempo.

La pendiente de la recta tangente a la curva de posición contra el tiempo en algún punto es igual a la **velocidad instantánea** en ese tiempo. La **rapidez instantánea** de un objeto se define como la magnitud de la velocidad instantánea.

2.3 Aceleración

La **aceleración promedio** \bar{a} de un objeto que se somete a un cambio en la velocidad Δv durante un intervalo de tiempo Δt es

$$\bar{a} \equiv \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i} \quad [2.4]$$

La **aceleración instantánea** de un objeto en cierto tiempo es igual a la pendiente de la recta tangente a una gráfica velocidad *vs.* tiempo en ese instante.

2.5 Movimiento en una dimensión con aceleración constante

Las ecuaciones más útiles que describen el movimiento de un objeto móvil con aceleración constante a lo largo del eje *x* son las siguientes:

$$v = v_0 + at \quad [2.6]$$

$$\Delta x = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \quad [2.9]$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad [2.10]$$

Todos los problemas pueden resolverse sólo con las dos primeras ecuaciones; la última es conveniente cuando el tiempo no es una entrada explícita en el problema. Después de que las constantes son identificadas de manera apropiada, la mayoría de los problemas se reducen a una o dos ecuaciones con una o dos incógnitas respectivamente.

2.6 Objetos en caída libre

Un objeto en caída libre en presencia de la gravedad de la Tierra exhibe una aceleración dirigida hacia el centro del planeta. Si se omite la resistencia del aire y si la altura del objeto en caída libre es pequeña al compararla con el radio de la Tierra, entonces podemos suponer que la aceleración en caída libre $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ es constante en el intervalo del movimiento. Las ecuaciones 2.6, 2.9 y 2.10 se aplican con $a = -g$.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Se dispara una flecha en trayectoria vertical hacia arriba en el aire con una rapidez inicial de 15.0 m/s. ¿Después de cuánto tiempo la punta de la flecha está hacia abajo con una rapidez de 8.00 m/s? a) 0.714 s b) 1.24 s c) 1.87 s d) 2.35 s e) 3.22 s
 - Una gota de aceite cae perpendicularmente a la carretera desde el motor de un automóvil en movimiento cada 5 s. La figura POM2.2 muestra el patrón de las gotas que quedan atrás en el pavimento. ¿Cuál es la velocidad media del coche durante esta parte de su movimiento? a) 20 m/s b) 24 m/s c) 30 m/s d) 100 m/s e) 120 m/s
-
- Figura POM2.2**
- Cuando se aplican las ecuaciones de cinemática para un objeto móvil en una dimensión, ¿cuál de los enunciados siguientes *debe* ser verdadero? a) La velocidad del objeto debe permanecer constante. b) La aceleración del objeto debe permanecer constante. c) La velocidad del objeto debe incrementarse con el tiempo. d) La posición del objeto debe incrementarse con el tiempo. e) La velocidad del objeto siempre debe estar en la misma dirección que su aceleración.
 - Un malabarista lanza un pino de boliche verticalmente hacia arriba en el aire. Después que el pino se libera de su mano y mientras está en el aire, ¿cuál enunciado es verdadero? a) La velocidad del pino siempre está en la misma dirección que su aceleración. b) La velocidad del pino jamás está en la misma dirección que su aceleración. c) La aceleración del pino es cero. d) La velocidad del pino es opuesta a su aceleración en su trayectoria ascendente. e) La velocidad del pino está en la misma dirección que su aceleración en su trayectoria ascendente.
 - Un automóvil de carreras inicia desde el reposo y logra una rapidez final *v* en un tiempo *t*. Si la aceleración del automóvil es constante durante este tiempo, ¿cuál de los siguientes enunciados es verdadero? a) El automóvil recorre una distancia *vt*. b) La rapidez promedio del automóvil es *v/2*. c) La aceleración del automóvil es *v/t*. d) La velocidad del automóvil permanece constante. e) Ninguno de éstos
 - Cuando el piloto invierte la hélice de un barco en movimiento hacia el norte, el barco se mueve con una aceleración dirigida hacia el sur. Suponga que la aceleración de la embarcación se mantiene constante en magnitud y dirección. ¿Qué sucede con el barco? a) Con el tiempo se detiene y permanece así. b) Con el tiempo se detiene y luego se acelera en dirección norte. c) Con el tiempo se detiene y luego se acelera en dirección hacia el sur. d) Nunca se detiene, pero pierde velocidad moviéndose más lentamente cada vez y para siempre. e) Nunca se detiene sino que continúa con velocidad ascendente en dirección hacia el norte.
 - Un objeto se mueve a lo largo del eje *x*; su posición se mide en cada instante. La información está organizada en una gráfica exacta de *x* en función de *t*. ¿Cuál de las siguientes cantidades *no se pueden* obtener de esta gráfica? a) la velocidad en cualquier instante b) la aceleración en cualquier instante c) el desplazamiento durante algún intervalo de tiempo d) la velocidad promedio durante algún intervalo de tiempo e) la rapidez de la partícula en cualquier instante.
 - Un patinador parte del reposo y se mueve hacia abajo por una colina con una aceleración constante en una línea recta, viajando durante 6 s. En un segundo ensayo, parte del reposo y se mueve en la misma línea recta con la misma aceleración durante sólo 2 s. ¿Cómo es su desplazamiento desde su punto de partida en esta segunda prueba comparado con el primer ensayo? a) un tercio más grande b) tres veces más grande c) un noveno más grande d) nueve veces mayor e) $1\sqrt{3}$ veces más grande.

9. Las carreras son cronometradas con una precisión de $1/1000$ de un segundo. ¿Qué distancia podría patinar una persona con una velocidad de 8.5 m/s en ese tiempo? a) 85 mm b) 85 cm c) 8.5 m d) 8.5 mm e) 8.5 km
10. En la parte superior de un edificio un estudiante lanza una pelota roja hacia arriba con velocidad v_0 y enseguida lanza una pelota azul hacia abajo con la misma velocidad inicial v_0 . Un instante antes de que las dos pelotas toquen tierra, ¿cuáles de los siguientes enunciados son verdaderos? (Elija todos los enunciados correctos; omita la fricción del aire.) a) La velocidad de la pelota roja es menor que la de la pelota azul. b) La velocidad de la pelota roja es mayor que la de la pelota azul. c) Sus velocidades son iguales. d) La velocidad de cada pelota es mayor que v_0 . e) La aceleración de la pelota azul es mayor que la de la pelota roja.
11. Se lanza una pelota hacia abajo desde la parte superior de una torre de 40.0 m con una rapidez inicial de 12 m/s . Suponiendo que se omite la resistencia del aire, ¿cuál es la rapidez de la pelota justo antes de que golpee la superficie de la tierra? a) 28 m/s b) 30 m/s c) 56 m/s d) 784 m/s e) Se requiere más información.
12. Se lanza una pelota directamente hacia arriba en el aire. ¿Para qué situación la velocidad y aceleración instantáneas son cero? a) en su trayectoria hacia arriba b) en la parte superior de la trayectoria de vuelo c) en su trayectoria hacia abajo d) a la mitad del camino hacia arriba y a la mitad de la trayectoria hacia abajo e) ninguna de éstas

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Si la velocidad de una partícula es diferente de cero, ¿puede la aceleración de la partícula ser cero? Explique.
2. Si la velocidad de la partícula es cero, ¿puede la aceleración de la partícula ser cero? Explique.
3. Si un automóvil viaja hacia el Este, ¿puede su aceleración estar hacia el Oeste? Explique.
4. a) ¿Es posible aplicar las ecuaciones de la tabla 2.4 en situaciones donde la aceleración cambie con el tiempo? b) ¿Es posible aplicarlas cuando la aceleración es cero?
5. Dos automóviles se están moviendo en la misma dirección en carriles paralelos a lo largo de una carretera. En un cierto instante, la velocidad del automóvil A es superior a la velocidad del automóvil B. ¿Significa eso que la aceleración de A es mayor que la de B en ese instante? Explique.
6. En la figura PC2.6 se muestran fotografías tomadas de un disco moviéndose de izquierda a derecha bajo condiciones diferentes. El intervalo de tiempo entre imágenes es constante. Considerando positiva la dirección a la derecha, describa el movimiento del disco en cada caso. Para qué caso a) ¿la aceleración es positiva? b) ¿la aceleración es negativa? c) ¿la velocidad es constante?
7. a) ¿Puede la velocidad instantánea de un objeto en un instante de tiempo ser mayor en magnitud que la velocidad promedio en un intervalo de tiempo que contiene ese instante? b) ¿Puede ésta ser menor?
8. Se lanza una pelota verticalmente hacia arriba. a) ¿Cuáles son su velocidad y aceleración cuando logra su altura máxima? b) ¿Cuál es la aceleración de la pelota justo antes de golpear la tierra?
9. Considere la siguiente combinación de signos y evalúe para la velocidad y aceleración de una partícula con respecto al eje x en una dimensión:

Velocidad	Aceleración
a. Positiva	Positiva
b. Positiva	Negativa
c. Positiva	Cero
d. Negativa	Positiva
e. Negativa	Negativa
f. Negativa	Cero
g. Cero	Positiva
h. Cero	Negativa

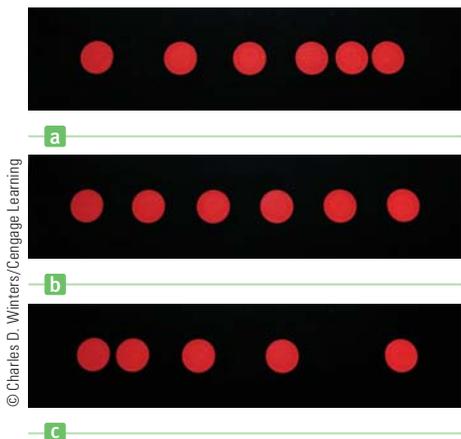


Figura PC2.6

Describa qué está haciendo la partícula en cada caso y proporcione un ejemplo de la vida cotidiana para un automóvil en un eje Este-Oeste de una dimensión; se considera el este como la dirección positiva.

10. Una pelota rueda en línea recta a lo largo de la dirección horizontal. Utilizando diagramas de movimiento (o bien fotografías de varios destellos), describa la velocidad y la aceleración de la pelota para cada una de las situaciones siguientes: a) La pelota se mueve a la derecha con velocidad constante. b) La pelota se mueve desde la derecha hacia la izquierda y disminuye su velocidad de manera continua. c) La pelota se mueve desde la derecha hacia la izquierda aumentando su velocidad de manera continua. d) La pelota se mueve a la derecha, primero aumentando su velocidad en una razón constante y después disminuyendo su velocidad en una razón constante.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos; 2. denota problema intermedio,
3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

2.1 Desplazamiento**2.2 Velocidad**

1. **BIO** La rapidez de un impulso nervioso en el cuerpo humano es de casi 100 m/s. Si accidentalmente se aplasta la punta de su dedo del pie en la oscuridad, estime el tiempo que tarda el impulso nervioso en viajar a su cerebro.

2. La luz viaja con una rapidez de casi 3×10^8 m/s.
a) ¿Cuántas millas viaja un pulso de luz en un intervalo de tiempo de 0.1 s, que es casi el parpadeo de un ojo?
b) Compare esta distancia con el diámetro de la Tierra.

3. Una persona viaja en automóvil de una ciudad a otra con velocidades constantes diferentes entre las dos ciudades. Esta persona viaja por 30.0 min a 80.0 km/h, 12.0 min a 100 km/h y 45.0 min a 40.0 km/h y gasta 15.0 min en almorzar y cargar gasolina. a) Calcule la rapidez promedio para el viaje. b) Calcule la distancia entre las ciudades inicial y final a lo largo de la ruta.

4. El actual tiempo y récord mundial en la carrera de los 200 m bajo techo es 19.92 s. Está en manos de Frank Fredericks de Namibia (1996), mientras que el tiempo récord de la carrera de una milla bajo techo es 228.5 s. Está en manos de Hicham El Guerrouj, de Marruecos (1997). Encuentre la velocidad media en metros por segundo que corresponde a estos tiempos récord para a) el evento de los 200 m y b) el evento de una milla.

5. Dos botes inician juntos y compiten a través de un lago de 60 km de ancho y de regreso. El bote A cruza a 60 km/h y regresa a 60 km/h. El bote B cruza a 30 km/h, y su tripulación, dándose cuenta de que están quedándose atrás, regresan a 90 km/h. El tiempo en el momento del regreso es omitido y el bote que completa primero el viaje gana. a) ¿Qué bote gana y por cuánto? (¿O bien es un empate?)
b) ¿Cuál es la velocidad promedio del bote ganador?

6. Una gráfica de posición en términos del tiempo para cierto movimiento particular a lo largo del eje x se muestra en la figura P2.6. Determine la velocidad promedio en los intervalos de tiempo desde a) 0 hasta 2.00 s, b) 0 hasta 4.00 s, c) 2.00 hasta 4.00 s, d) 4.00 hasta 7.00 s y e) 0 hasta 8.00 s.

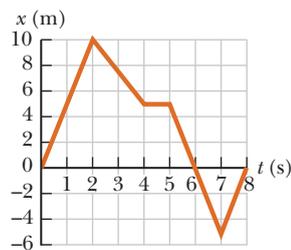


Figura P2.6 (Problemas 6 y 17)

pués continúa hacia el Norte viajando 130 km en 2.00 h. a) ¿Cuál es el desplazamiento total? b) ¿Cuál es su velocidad promedio?

8. Un jugador de tenis se mueve en una trayectoria en línea recta como se muestra en la figura P2.8. Determine su velocidad promedio en los intervalos de tiempo desde a) 0 hasta 1.0 s, b) 0 hasta 4.0 s, c) 1.0 s hasta 5.0 s y d) 0 hasta 5.0 s.

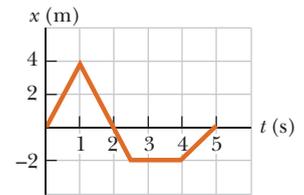


Figura P2.8

9. Un avión de reacción tiene una velocidad de despegue de la $v_{to} = 75$ m/s y puede moverse a lo largo de la pista con una aceleración media de 1.3 m/s². Si la longitud de la pista es de 2.5 km, ¿el avión puede utilizar esta pista en forma segura? Argumente su respuesta.

10. Dos automóviles viajan en la misma dirección a lo largo de una autopista recta, uno con rapidez constante de 55 mi/h y el otro a 70 mi/h. Suponiendo que iniciaron en el mismo punto, ¿por cuánto llegó primero a su destino a 10 millas el más rápido? b) ¿Qué distancia debe conducir el auto más rápido para que tenga 15 min de ventaja al más lento?

11. El guepardo puede alcanzar una velocidad máxima de 114 km/h (71 mi/h). Mientras persigue a su presa en un corto *sprint*, un guepardo parte del reposo y corre 45 m en línea recta, alcanzando una velocidad final de 72 km/h. a) Determine la aceleración media del guepardo en el corto *sprint*, y b) encuentre su desplazamiento en $t = 3.5$ s.

12. **S** Un atleta nada la longitud L de una alberca en un tiempo t_1 y hace el viaje de regreso hasta la posición de inicio en un tiempo t_2 . Si está nadando inicialmente en la dirección x positiva, establezca simbólicamente las velocidades promedio en a) la primera mitad, b) en la segunda mitad, c) viaje completo. d) ¿Cuál es su velocidad promedio para el viaje completo?

13. **M** Una persona hace un viaje, conduciendo con rapidez constante de 89.5 km/h, excepto por 22.0 min para un descanso. Si la rapidez promedio de la persona 77.8 km/h, a) ¿cuánto tiempo invirtió en el viaje y b) qué tan lejos viajó la persona?

14. Una tortuga puede correr con una rapidez de 0.10 m/s y una liebre corre 20 veces más rápido. En una competencia, ambos inician al mismo tiempo, pero la liebre se

detiene a descansar por 2.0 minutos. La tortuga gana por un caparazón (20 cm). a) ¿Cuánto duró la competencia? b) ¿Cuál es la distancia de la carrera?

15. Para calificar a las finales en una carrera, un auto de carreras debe lograr una velocidad promedio de 250 km/h sobre una pista con una longitud total de 1 600 m. Si un auto particular cubre la primera mitad de la pista con una velocidad promedio de 230 km/h, ¿qué velocidad promedio mínima debe tener en la segunda mitad del evento con la finalidad de calificar?
16. **CIC S** En una carrera un atleta en una pista, larga y recta, con una velocidad constante v_1 , está a una distancia d atrás de un segundo corredor que corre con una velocidad constante v_2 . a) ¿Bajo qué circunstancias el primer atleta es capaz de rebasar al segundo atleta? b) Determine el tiempo t que le toma al primer atleta rebasar al segundo, en términos de d , v_1 y v_2 . c) ¿A qué distancia mínima d_2 a partir del atleta líder se debe localizar la línea de meta de tal modo que el atleta que le sigue pueda por lo menos ocupar el primer lugar? Expresé d_2 en términos de d , v_1 y v_2 utilizando los resultados del inciso b).
17. Una gráfica de posición en función del tiempo para una cierta partícula móvil a lo largo del eje x se muestra en la figura P2.6. Determine la velocidad instantánea en los instantes a) $t = 1.00$ s, b) $t = 3.00$ s, c) $t = 4.50$ s y d) $t = 7.50$ s.
18. Un automóvil de carreras se mueve de forma tal que su posición se ajusta a la relación

$$x = (5.0 \text{ m/s})t + (0.75 \text{ m/s}^3)t^3$$

donde x se mide en metros y t en segundos. a) Trace una gráfica de la posición del automóvil en términos del tiempo. b) Calcule la velocidad instantánea del automóvil en $t = 4.0$ s, utilizando intervalos de tiempo de 0.40 s, 0.20 s y 0.10 s. c) Compare la velocidad promedio durante los primeros 4.0 s con los resultados del inciso b).

19. Un corredor A está inicialmente a 4 millas al Oeste de un asta bandera, está corriendo con una velocidad constante de 6.0 mi/h al Este. Un corredor B está inicialmente a 3.0 mi al Este del asta bandera y está corriendo con velocidad constante de 5.0 mi/h al Oeste. ¿A qué distancia están los corredores del asta bandera cuando se reúnen?

2.3 Aceleración

20. Una partícula parte del reposo y acelera como se muestra en la figura P2.20. Determine a) la velocidad de la partícula en el instante $t = 10.0$ s y en $t = 20.0$ s y b) la distancia recorrida en los primeros 20.0 s.
21. Un balón de 50.0 g que viaja a 25.0 m/s rebota en una pared de ladrillos a 22.0 m/s. Una cámara de alta velocidad graba este evento. Si el balón está en contacto con la pared 3.50 ms, ¿cuál es la magnitud de la aceleración media de la pelota durante este intervalo de tiempo?
22. **BIO** La persona promedio pierde el conocimiento con una aceleración de $7g$ (es decir, siete veces la aceleración

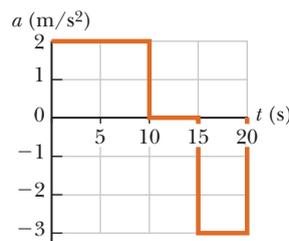


Figura P2.20

de la gravedad en la Tierra). Considere un automóvil diseñado para acelerar con esta proporción. ¿Cuánto tiempo sería necesario para que el automóvil acelere desde el reposo hasta 60.0 millas por hora? (¡El automóvil necesitaría cohetes de refuerzo!)

23. Cierta automóvil es capaz de acelerar a razón de 0.60 m/s^2 . ¿Cuánto tiempo le toma a este auto ir desde una velocidad de 55 mi/h hasta una de 60 mi/h?
24. La gráfica velocidad en términos del tiempo para un objeto móvil a lo largo de una trayectoria recta se muestra en la figura P2.24. i) Determine la aceleración promedio de un objeto durante los intervalos de tiempo de a) 0 a 5.0 s, b) 5.0 a 15 s y c) 0 a 20 s. ii) Determine la aceleración instantánea en a) 2.0 s, b) 10 s y c) 18 s.

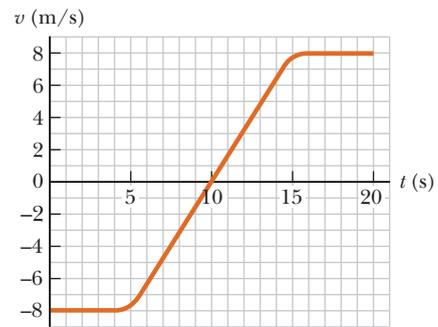


Figura P2.24

25. Una catapulta de vapor lanza un jet desde el portaaviones *John C. Stennis* le proporciona una velocidad de 175 mi/h en 2.50 s. a) Determine la aceleración promedio de la nave. b) Suponiendo que la aceleración es constante, determine la distancia que la nave recorre.

2.5 Movimiento en una dimensión con aceleración constante

26. Resolver el ejemplo 2.5, "Persecución de un automóvil" por un método gráfico. En la misma gráfica, trace la posición en función del tiempo para el automóvil y la policía. A partir de la intersección de las dos curvas, determine la hora en que el policía alcanza el coche.
27. **M** Un objeto en movimiento con aceleración uniforme tiene una velocidad de 12.0 cm/s en el sentido positivo de las x cuando su coordenada x es de 3.00 cm. Si su coordenada x 2.00 s más tarde es 25.00 cm, ¿cuál es su aceleración?
28. En 1865 Julio Verne propuso enviar un hombre a la Luna disparando una cápsula espacial desde un cañón de 220 m de largo con una velocidad final de 10.97 km/s. ¿Qué aceleración considerable y poco práctica tendría que experimentar el viajero durante su lanzamiento? (Un humano puede estar en aceleración de $15g$ por un tiempo breve.) Compare su respuesta con la aceleración en caída libre, 9.80 m/s^2 .
29. Un camión cubre 40.0 m en 8.50 s mientras disminuye su velocidad de manera uniforme hasta una velocidad de 2.80 m/s. a) Determine la velocidad original del camión. b) Determine su aceleración.

30. **PG** Una lancha de carreras incrementa su velocidad de manera uniforme desde $v_i = 20.0$ m/s hasta $v_f = 30.0$ m/s en una distancia de 2.00×10^2 m. a) Dibuje un sistema coordinado para esta situación y etiquete las cantidades relevantes, incluyendo vectores. b) Para la información que se proporciona, ¿qué ecuación simple es más adecuada para determinar la aceleración? c) Resuelva la ecuación elegida en el inciso b) de manera simbólica para la aceleración del bote en términos de v_f , v_i y Δx . d) Sustituya los valores conocidos, para obtener la aceleración. e) Determine el tiempo que tarda el bote al viajar la distancia conocida.
31. Un avión Cessna tiene una velocidad de despegue de 120 km/h. a) ¿Qué aceleración constante mínima requiere la nave si está en el aire después de un recorrido de 240 m? b) ¿Cuánto tiempo le toma a la nave estar en el aire?
32. Un objeto se mueve con aceleración constante 4.00 m/s² y durante un intervalo de tiempo alcanza una velocidad final de 12.0 m/s. a) Si su velocidad inicial es de 6.00 m/s, ¿cuál es su desplazamiento durante el intervalo de tiempo? b) ¿Cuál es la distancia que recorre durante este intervalo? c) Si su velocidad original es -6.00 m/s, ¿cuál es su desplazamiento durante este intervalo? d) ¿Cuál es la distancia total que viaja durante el intervalo en el inciso c)?
33. **CIC** En una carrera de prueba, cierto automóvil acelera de manera uniforme desde cero hasta 24.0 m/s en 2.95 s. a) ¿Cuál es la magnitud de la aceleración del automóvil? b) ¿Cuánto tiempo le toma al automóvil cambiar su velocidad desde 10.0 hasta 20.0 m/s? c) ¿Duplicar el tiempo siempre duplicará el cambio en la velocidad? ¿Por qué?
34. **CIC** Un jet aterriza con una velocidad de 100 m/s y puede acelerar con una razón máxima de -5.00 m/s² y llegar al reposo. a) Desde el instante en que la nave toca la pista, ¿cuál es el tiempo mínimo necesario que requiere antes de llegar al reposo? b) ¿Esta nave puede aterrizar en el aeropuerto de una pequeña isla tropical cuando la longitud de la pista es de 0.800 km?
35. **CIC** Speedy Sue conduce a 30.0 m/s y entra a un túnel de un solo carril. A continuación observa una camioneta moviéndose lentamente 155 m más adelante viajando a 5.00 m/s. Sue aplica los frenos, pero sólo puede acelerar a -2.00 m/s² porque la carretera está mojada. ¿Ocurrirá un choque? Establezca su respuesta. Si su respuesta es sí, calcule a qué distancia dentro del túnel y en qué tiempo se presenta el choque. Si su respuesta es no, calcule la distancia de acercamiento más próxima entre el automóvil de Sue y la camioneta.
36. Un registro de viaje a lo largo de una trayectoria rectilínea es como sigue:
1. Se inicia desde el reposo con una aceleración constante de 2.77 m/s² por 15.0 s.
 2. Se mantiene la velocidad constante por los próximos 2.05 min.
 3. Se aplica una aceleración negativa constante de -9.47 m/s² por 4.39 s.
 - a) ¿Cuál es el desplazamiento total para el viaje?
 - b) ¿Cuáles fueron las magnitudes de la velocidad promedio en los tramos 1, 2 y 3 del viaje, así como para el viaje completo?
37. Un tren viaja cuesta abajo en una vía recta a 20 m/s cuando el ingeniero aplica los frenos, lo que resulta en una aceleración de -1.0 m/s² mientras el tren está en movimiento. ¿Qué distancia se mueve el tren durante 40 s a partir del instante en que se aplican los frenos?
38. Un automóvil acelera de manera uniforme desde el reposo hasta una velocidad de 40.0 mi/h en 12.0 s. Determine a) la distancia que recorre el automóvil durante este tiempo y b) la aceleración constante del automóvil.
39. Un automóvil inicia desde el reposo y viaja por 5.0 s con una aceleración uniforme de $+1.5$ m/s². Entonces el conductor aplica los frenos, ocasionando una aceleración uniforme de -2.0 m/s². Si los frenos son aplicados por 3.0 s, a) ¿qué tan rápido va el automóvil al final del periodo de frenado? b) ¿Qué tan lejos llega el automóvil?
40. **S** Un automóvil inicia desde el reposo y viaja por t_1 segundos con una aceleración uniforme a_1 . Entonces el conductor aplica los frenos, ocasionando una aceleración uniforme a_2 . Si los frenos se aplican por t_2 segundos, a) ¿cuál es la velocidad del automóvil justo antes de iniciar el periodo de frenado? b) ¿A qué distancia llega el automóvil antes que el conductor inicie el frenado? c) Utilizando las respuestas de los incisos a) y b) como la velocidad inicial y posición para el movimiento del automóvil durante el frenado, ¿cuál es la distancia total que recorre el automóvil? Las respuestas están en términos de las variables a_1 , a_2 , t_1 y t_2 .
41. En las 500 millas de Daytona, un Ford Thunderbird y un Mercedes Benz se mueven uno al lado del otro en un camino recto a 71.5 m/s. El conductor del Thunderbird se da cuenta de que debe hacer una parada en los fosos y disminuye su velocidad de manera suave hasta detenerse en una distancia de 250 m. Espera 5.00 s en los fosos y después acelera, alcanzando su velocidad previa de 71.5 m/s después de una distancia de 350 m. En este punto, ¿a qué distancia ha quedado el Thunderbird detrás del Mercedes Benz, que ha continuado con velocidad constante?
42. Cierta tranvía en San Francisco puede detenerse en 10 s cuando viaja a velocidad máxima. En una ocasión, el conductor ve un perro a la distancia d frente al tranvía lo que obliga a frenar de manera súbita. El tranvía alcanza al perro 8.0 s después y el perro salta justo a tiempo fuera de la vía. Si el tranvía viaja 4.0 m más allá de la posición del perro antes de detenerse, ¿a qué distancia estaba del tranvía del perro? (*Sugerencia:* Necesitará tres ecuaciones.)
43. **M** Un jugador de *hockey* está de pie sobre sus patines en un estanque congelado cuando un contrincante, que se mueve con velocidad constante de 12 m/s, patina llevando el disco de goma. Después de 3.0 s, el primero reacciona mentalmente para perseguir a su oponente. Si acelera de manera uniforme a 4.0 m/s², a) ¿cuánto tiempo tarda en atrapar a su oponente y b) qué distancia ha viajado en ese tiempo? (Suponga que el jugador con el disco de goma permanece en movimiento con velocidad constante.)

44. Un tren de 400 m de largo se mueve sobre una vía recta con una velocidad de 82.4 km/h. El ingeniero aplica los frenos en un crucero, y más tarde pasa el último vagón por el crucero con una velocidad de 16.4 km/h. Suponiendo aceleración constante, calcule cuánto tarda el tren bloqueando el crucero. Haga caso omiso del ancho del crucero.

2.6 Objetos en caída libre

45. Se lanza una pelota verticalmente hacia arriba con una velocidad de 25.0 m/s. a) ¿A qué altura se eleva? b) ¿Cuánto tarda en lograr su punto más alto? c) ¿Cuánto tarda la pelota en tocar la superficie de la tierra después de que logra su punto más alto? d) ¿Cuál es su velocidad cuando regresa al nivel de donde inició?
46. Una pelota es lanzada directamente hacia abajo con una velocidad inicial de 8.00 m/s, desde una altura de 30.0 m. Después de qué intervalo de tiempo golpea el suelo?
47. Cierta cuerpo en caída libre necesita 1.50 s para viajar los últimos 30.0 m antes que golpee la superficie de la tierra. a) Encuentre la velocidad del objeto cuando está a 30.0 m sobre la tierra. b) Encuentre la distancia total que se desplaza el objeto durante la caída.
48. **CIC** Un guerrero en la base de la pared de un castillo de 3.65 m de altura lanza una roca en una trayectoria rectilínea hacia arriba con una rapidez de 7.40 m/s a una altura de 1.55 m por encima de la superficie de la tierra. a) ¿La roca alcanzará la parte superior de la pared? b) Si es así, ¿cuál es la velocidad de la roca en la parte superior? Si no, ¿qué velocidad inicial debe tener la roca para alcanzar la parte superior? c) Determine el cambio en la velocidad de una roca lanzada directamente hacia abajo desde la parte superior de la pared con una velocidad inicial de 7.40 m/s y que se mueve entre los mismos dos puntos. d) ¿El cambio en la velocidad de la roca en movimiento hacia abajo coincide con la magnitud del cambio en la velocidad de la roca moviéndose hacia arriba entre las mismas elevaciones? Explique físicamente por qué.
49. **BIO** Un daño cerebral traumático como las contusiones resulta cuando la cabeza experimenta una aceleración considerable. Por lo general, una aceleración menor a 800 m/s² mantenida por alguna extensión de tiempo no ocasiona daño, mientras que una aceleración mayor a 1000 m/s² constante por al menos 1 ms ocasionará daño. Considere un niño rodando fuera de una cama que está a 0.40 m encima del piso. Si el piso es de madera dura, la cabeza del niño pondrá en reposo en aproximadamente 2.0 mm. Si el piso está alfombrado, esta distancia de detención se incrementa en casi 1.0 cm. Calcule la magnitud y dirección de la desaceleración de los dos casos, para determinar los riesgos de daño. Suponga que el pequeño permanece horizontal durante la caída al piso. Observe que una caída más complicada podría resultar en una velocidad de la cabeza mayor o menor que la rapidez calculada.
50. Se libera una pequeña valija postal desde un helicóptero que está descendiendo con velocidad constante de 1.50 m/s. Después de 2.00 s, a) ¿cuál es la velocidad de la valija? y b) ¿a qué distancia se encuentra la valija debajo
- del helicóptero? c) ¿Cuáles son sus respuestas para los incisos a) y b) si el helicóptero se eleva con velocidad constante de 1.50 m/s?
51. Un jugador de tenis lanza una pelota en trayectoria rectilínea hacia arriba y entonces la atrapa después de 2.00 s en el mismo punto en que la liberó. a) ¿Cuál es la aceleración de la pelota mientras está en vuelo? b) ¿Cuál es la velocidad de la pelota cuando logra su altura máxima? Determine c) la velocidad inicial de la pelota y d) la altura máxima que alcanza.
52. **S** Se deja caer un paquete desde un helicóptero que está descendiendo con una velocidad constante v_0 . Después de que transcurren t segundos, a) ¿cuál es la velocidad del paquete en términos de v_0 , g y t ? b) ¿A qué distancia d está del helicóptero en términos de g y t ? c) ¿Cuáles son las respuestas de los incisos a) y b) si el helicóptero se está elevando con la misma velocidad constante?
53. **CIC** Se lanza un cohete a escala directamente hacia arriba con una velocidad inicial de 50.0 m/s. Se acelera a 2.00 m/s² de manera constante hacia arriba hasta que los motores se apagan a una altitud de 150 m. a) ¿Qué puede decir con respecto al movimiento de los motores después de que se apagan? b) ¿Cuál es la altura máxima que alcanza el cohete? c) ¿Cuánto tarda el cohete después del despegue vertical en alcanzar su altura máxima? d) ¿Cuánto tarda el cohete en el aire?
54. Una pelota de béisbol viaja directamente hacia arriba después de ser golpeada por el bate. Un aficionado observa que transcurren 3.00 s para que la pelota alcance su altura máxima. Calcule a) la velocidad inicial de la pelota y b) la altura que alcanza.

Problemas adicionales

55. Un tractocamión jala dos tráileres, uno detrás del otro, con una velocidad constante de 100 km/h. Le toma 0.600 s al gran mecanismo de maniobra cruzar por completo un puente de 400 m de largo. ¿Cuánto tiempo permanece sobre el puente de manera parcial o total todo el tractocamión?
56. **M BIO** El coronel de la fuerza aérea, John P. Stapp, participó en el estudio para determinar si un piloto de jet podría sobrevivir a una eyección de emergencia. El 19 de marzo de 1954, se montó en un trineo-cohete que se mueve por una pista a una velocidad de 632 mi/h (véase la figura P2.56). Él y el trineo llegaron al reposo de modo seguro en 1.40 s. Determinar en unidades del SI a) la aceleración negativa que experimentó y b) la distancia que viajó durante esta aceleración negativa.

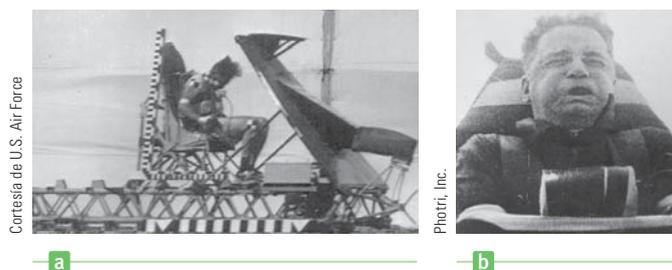


Figura P2.56

57. Se dispara una bala a través de un tablero de 10.0 cm de espesor de tal manera que la línea de movimiento de la bala es perpendicular a la cara del tablero. Si la velocidad inicial de la bala es 400 m/s y emerge por el otro lado del tablero con una velocidad de 300 m/s, determine a) la aceleración de la bala cuando pasa a través del tablero y b) el tiempo total de la bala en contacto con el tablero.
58. Una lancha de carreras se mueve a 30.0 m/s y se aproxima sin estela a una boya que se encuentra a 100 m adelante. El piloto disminuye la velocidad del bote con una aceleración constante de -3.50 m/s^2 reduciendo el estrangulamiento del motor. a) ¿Cuánto tiempo tarda en alcanzar la boya? b) ¿Cuál es la velocidad del bote cuando éste alcanza la boya?
59. Un estudiante lanza un conjunto de llaves verticalmente hacia arriba a su compañero en un club estudiantil, quien se encuentra en una ventana 4.00 m más arriba. El compañero con su brazo extendido atrapa las llaves 1.50 s después. a) ¿Con qué velocidad inicial fueron lanzadas las llaves? b) ¿Cuál fue la velocidad de las llaves en el momento que son atrapadas?
60. **S** Un estudiante lanza un conjunto de llaves verticalmente hacia arriba a su compañero en un club estudiantil, quien se encuentra en una ventana a una distancia h más arriba. El compañero con su brazo extendido atrapa las llaves en un tiempo t después. a) ¿Con qué velocidad inicial fueron lanzadas las llaves? b) ¿Cuál fue la velocidad de las llaves en el momento que son atrapadas? (Las respuestas están en términos de h , g y t .)
61. **BIO** Se afirma que un insecto conocido como escupidor (*Philaenus spumarius*) es el mejor saltador en el reino animal. Este insecto puede acelerar a 4000 m/s^2 en una distancia de 2.0 mm cuando endereza sus patas especialmente diseñadas “para saltar”. a) Suponiendo una aceleración uniforme, ¿cuál es la velocidad del insecto después que éste ha acelerado a través de una distancia corta y cuánto tarda en alcanzar esa velocidad? b) ¿Qué altura saltaría el insecto si se omite la resistencia del aire? Observe que la altura actual obtenida es casi 0.7 m, de tal manera que la resistencia del aire es importante en este caso.
62. **C/C** Dibuje los diagramas de movimiento (véase la sección 2.5) para a) un objeto que se mueve hacia la derecha a velocidad constante, b) un objeto que se mueve hacia la derecha y acelerando a una razón constante, c) un objeto que se mueve hacia la derecha y desacelerando a una razón constante, d) un objeto en movimiento hacia la izquierda y acelerando a una razón constante y e) un objeto que se mueve hacia la izquierda y desacelerando a una razón constante. f) ¿Cómo podrían cambiar sus dibujos si los cambios de velocidad no son uniformes, es decir, si la velocidad no se cambia a una razón constante?
63. **M** Se lanza una pelota hacia arriba desde la superficie de la tierra con una velocidad inicial de 25 m/s. En el mismo instante, otra pelota se deja caer desde un edificio de 15 m de altura. ¿Después de cuánto tiempo las pelotas estarían a la misma altura?
64. Para acreditar la clase de educación física en una universidad, una estudiante debe correr 1.0 millas en 12 min. Después de correr por 10 min, aún le quedan 500 yardas. Si su aceleración máxima es 0.15 m/s^2 , ¿puede hacerlo? Si la respuesta es no, establezca qué aceleración necesitaría para tener éxito.
65. En el capítulo 5 se definió el centro de masa de un objeto. El centro de masa se mueve con aceleración constante cuando las fuerzas constantes actúan sobre el objeto. Una gimnasta salta hacia arriba, con su centro de masa en movimiento a 2.80 m/s, conforme deja el suelo. ¿A qué altura por encima de este punto está su centro de masa en a) 0.100 s, b) 0.200 s, c) 0.300 s y d) después de 0.500 s?
66. **S** Dos estudiantes están en un balcón a una distancia h sobre el nivel de la calle. Un estudiante lanza una pelota verticalmente hacia abajo con una velocidad v_0 ; en el mismo instante, el otro estudiante lanza una pelota verticalmente hacia arriba con la misma velocidad. Responda simbólicamente lo siguiente en términos de v_0 , g , h y t . a) Escriba la ecuación cinemática para la coordenada y de cada pelota. b) Ajuste las ecuaciones encontradas en el inciso a) e iguale para la altura 0 y resuelva para t simbólicamente aplicando la fórmula cuadrática. ¿Cuál es la diferencia en tiempo de las dos pelotas en el aire? c) Aplique la ecuación cinemática independiente del tiempo para determinar la velocidad de cada pelota cuando golpean la superficie de la tierra. d) ¿Qué distancia las separa en el tiempo t después de que son liberadas y antes que golpeen la superficie de la tierra?
67. Se suelta una pelota desde una ventana en un piso superior de un edificio y es atrapada por una persona en la parte baja del edificio cuando la pelota se mueve con una velocidad v_f . Esta vez se reproduce la caída, pero una persona abajo en la calle lanza otra pelota hacia arriba con una velocidad v_f exactamente al mismo tiempo que se deja caer la pelota desde la ventana. Inicialmente las dos pelotas están separadas por 28.7 m. a) ¿En qué tiempo coinciden? b) ¿A qué altura se cruzan con respecto a la ventana?
68. El conductor de un camión aplica los frenos cuando ve un árbol bloqueando el camino. El camión disminuye su velocidad de manera uniforme con una aceleración de -5.60 m/s^2 por 4.20 s, haciendo marcas de deslizamiento a lo largo de 62.4 m que finalizan en el árbol. ¿Con qué velocidad el camión golpea el árbol?
69. **C/C** Emily desafía a su esposo David, a que atrape un billete de un dólar como sigue. Ella sostiene el billete verticalmente como en la figura P2.69, con el centro del billete entre los dedos índice y pulgar de David. Éste debe atrapar el billete después de que Emily lo libera sin mover su mano hacia abajo. Si su tiempo de reacción es 0.2 s, ¿él tendrá éxito? Explique sus motivos. (Este desafío es un buen truco que querría intentar con sus amigos.)



Figura P2.69

70. Una alpinista se encuentra en la parte superior de un risco a 50.0 m que sobresale de un estanque de aguas tranquilas. Lanza dos piedras verticalmente hacia abajo separadas 1.00 s y observa que ocasionan un solo chasquido. La primera piedra tiene una velocidad inicial de -2.00 m/s. a) ¿Cuánto tiempo después de liberar la primera piedra las dos golpean el agua? b) ¿Qué velocidad inicial debe tener la segunda piedra, ya que golpean simultáneamente el agua? c) ¿Cuál fue la velocidad de cada piedra en el instante que golpean el agua?
71. Se transporta hielo en un trineo impulsado por un motor cohete partiendo desde el reposo sobre un gran lago congelado y se acelera a $+40$ pies/s². Después de algún tiempo t_1 , se apaga el motor y el trineo se mueve con velocidad constante v por un tiempo t_2 . Si la distancia total recorrida por el trineo es 17500 pies y el tiempo total es 90 s, determine a) los tiempos t_1 y t_2 y b) la velocidad v , en la marca de 17500 pies, el trineo comienza a acelerar a -20 pie/s². c) ¿Cuál es la posición final del trineo cuando llega al reposo? d) ¿Cuánto tiempo le toma llegar al reposo?
72. En Bosnia, la última prueba de valor para un joven es saltar desde un puente de 400 años (destruido en 1993 y reconstruido en 2004) hacia el río Neretva, 23 m abajo del puente. a) ¿Cuánto tiempo hizo en el último salto? b) ¿Qué tan rápido viajó el saltador hasta impactarse con el río? c) Si la rapidez del sonido en el aire es 340 m/s, ¿cuánto tiempo después de que el saltador tocó el agua un espectador sobre el puente escucha el chasquido?
73. Una persona ve un destello que pasa cerca de un avión que vuela a la distancia. La persona escucha el trueno 5.0 s después de ver el destello y ve al avión por arriba 10 s después de escuchar el trueno. La rapidez del sonido en el aire es 1100 pies/s. a) Determine la distancia de la nave hasta la persona en el instante del destello. (Omita el tiempo que tarda la luz recorrer desde el destello hasta el ojo.) b) Considere que la nave viaja con velocidad constante hacia la persona, determine la velocidad de la nave. Busque la velocidad de la luz en el aire y sostenga la aproximación utilizada en el inciso a).
74. **C|C** Un deslizador sobre una pista de aire lleva una bandera de longitud ℓ a través de un fotoportal fijo, que mide el intervalo de tiempo Δt_d durante el cual la bandera bloquea un haz de luz infrarrojo que cruza a través del fotoportal. La relación $v_d = \ell/\Delta t_d$ es la velocidad promedio del deslizador en esta parte de su movimiento. Suponga que el deslizador se mueve con aceleración constante. a) ¿Necesariamente v_d es igual a la velocidad instantánea del deslizador cuando se encuentra a medio camino a través del fotoportal en el intervalo? Explique. b) ¿ v_d es igual a la velocidad instantánea del deslizador cuando está a la mitad del camino a través del fotoportal a tiempo?
75. Un doble de cine sentado en la rama de un árbol quiere caer verticalmente sobre un caballo galopando bajo el árbol. La velocidad constante del caballo es 10.0 m/s, inicialmente el hombre está a 3.00 m por encima del nivel de la silla de montar. a) ¿Cuál debe ser la distancia horizontal entre la silla y la rama cuando el hombre hace su movimiento? b) ¿Cuánto tiempo está en el aire?

Dave el *Hombre bala* Smith, se precipita a través del aire a lo largo de una trayectoria parabólica, dependiendo de la velocidad inicial correcta y el ángulo del cañón para enviarlo a salvo sobre la cerca de la frontera entre Estados Unidos y México y caer en una red.



AP Photo/Denis Poroy

3

Vectores y movimiento en dos dimensiones

- 3.1 Vectores y sus propiedades
- 3.2 Componentes de un vector
- 3.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración en dos dimensiones
- 3.4 Movimiento en dos dimensiones
- 3.5 Velocidad relativa

En nuestra explicación del movimiento en una dimensión en el capítulo 2, se utilizó el concepto de vectores sólo a un nivel limitada. En estudios posteriores del movimiento, la manipulación de las cantidades vectoriales se hará cada vez más importante, de tal manera que gran parte de este capítulo está dedicado a técnicas vectoriales. En tal caso se aplicarán estas herramientas matemáticas para el movimiento en dos dimensiones, especialmente la de proyectiles y para la comprensión del movimiento relativo.



Jon Feingersh/Stone/Getty Images

Figura 3.1 Un vector, como la velocidad, tiene una magnitud que se muestra en el velocímetro del auto de carreras, y una dirección que se manifiesta en el parabrisas delantero. La masa del coche es una cantidad escalar, como lo es el volumen de la gasolina en su tanque de combustible.

3.1 Vectores y sus propiedades

Cada una de las cantidades físicas que se encuentran en este libro puede ser clasificada como una *cantidad vectorial* o una *cantidad escalar*. Como se observa en el capítulo 2, un vector tiene dirección y magnitud (tamaño). Un escalar se puede especificar íntegramente mediante su magnitud con unidades adecuadas; no tiene dirección. Un ejemplo de cada tipo de cantidad se muestra en la figura 3.1.

Como se describió en el capítulo 2, desplazamiento, velocidad y aceleración son cantidades vectoriales. La temperatura es un ejemplo de una cantidad escalar. Si la temperatura de un objeto es -5°C , esa información especifica por completo la temperatura del objeto, no se necesita dirección alguna. También la masa, intervalos de tiempo y volumen son escalares. Las cantidades escalares pueden ser manipuladas con las reglas de la aritmética ordinaria. Los vectores se pueden sumar y restar entre sí y multiplicarse, pero existe un número de diferencias importantes, como se verá en las secciones que siguen.

Cuando se escribe una cantidad vectorial, con frecuencia se representa con una flecha sobre la letra (\vec{A}). Como se mencionó en la sección 2.1, en este libro una cantidad vectorial será representada por el tipo negrita con una flecha en la parte superior (por ejemplo, \vec{A}). La

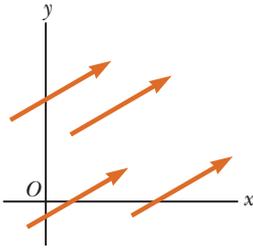


Figura 3.2 Estos cuatro vectores son iguales porque tienen longitudes iguales y apuntan en la misma dirección.

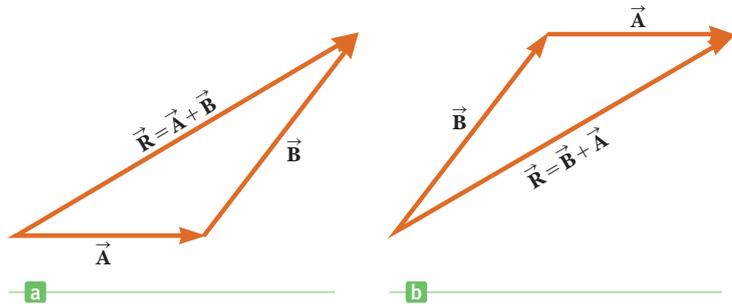


Figura activa 3.3

a) Cuando el vector \vec{B} se suma al vector \vec{A} , el vector suma \vec{R} es el vector que va desde el extremo de \vec{A} hacia la punta de \vec{B} . b) En este caso la resultante va desde el extremo de \vec{B} hacia la punta de \vec{A} . Estas construcciones comprueban que $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$.

magnitud del vector \vec{A} será representada en cursivas, como A . Éstas, además se utilizarán para representar escalares.

Igualdad de dos vectores Dos vectores \vec{A} y \vec{B} son iguales si tienen la misma magnitud y la misma dirección. Esta propiedad permite trasladar un vector paralelo a sí mismo en un diagrama, sin afectarlo. En realidad, para la mayoría de los propósitos cualquier vector se puede trasladar paralelo a sí mismo sin ser afectado. (Véase la figura 3.2.)

Suma de vectores Cuando dos o más vectores se suman, todos deben tener las mismas unidades. Por ejemplo, no tiene sentido sumar un vector velocidad, que tiene unidades de metros por segundo, a un vector de desplazamiento, que tiene unidades sólo de metros. Los escalares obedecen las mismas reglas. De la misma manera, no tendría sentido sumar temperaturas a volúmenes o masas a intervalos de tiempo.

Los vectores se pueden sumar geométrica y algebraicamente. (Esta última se explica al final de la siguiente sección.) Para sumar el vector \vec{B} al vector \vec{A} en forma geométrica, primero se dibuja \vec{A} sobre una hoja de papel para el trazado de gráficas con alguna escala, como $1 \text{ cm} = 1 \text{ m}$, de modo que su dirección se especifique con respecto a un sistema coordinado. A continuación dibuje el vector \vec{B} en la misma escala con el extremo inicial en la punta de \vec{A} , como en la figura activa 3.3a. El vector \vec{B} debe dibujarse a lo largo de la dirección que hace el ángulo adecuado con respecto al vector \vec{A} . El **vector resultante** $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ es el vector que se dibuja desde el extremo inicial de \vec{A} hacia el extremo final de \vec{B} . Este procedimiento se conoce como el **método del triángulo de la suma**.

Cuando dos vectores se suman, su adición es independiente del orden de la suma: $\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A}$. Esta correspondencia puede verse desde la construcción geométrica en la figura activa 3.3b y se le conoce como la **ley conmutativa de la suma**.

Además, este mismo planteamiento general se puede utilizar para sumar más de dos vectores como se hace en la figura 3.4 para cuatro vectores. El vector suma resultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C} + \vec{D}$ es el vector que se dibuja desde el extremo inicial del primer vector hacia el extremo final del último. Una vez más, el orden en el cual los vectores se sumen poco importa.

Negativo de un vector El negativo de un vector \vec{A} se define como el vector que da cero cuando se suma a \vec{A} . Esto significa que \vec{A} y $-\vec{A}$ tienen la misma magnitud, pero direcciones opuestas.

Resta de vectores La resta de vectores hace uso de la definición del negativo de un vector. Se define la operación $\vec{A} - \vec{B}$ como el vector $-\vec{B}$ se suma al vector \vec{A} :

$$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) \quad [3.1]$$

En realidad la resta vectorial es un caso especial de suma de vectores como se muestra en la figura 3.5.

Tip 3.1 Suma vectorial vs. suma escalar

$\vec{A} + \vec{B} = \vec{C}$ es muy diferente de $A + B = C$. La primera es una suma vectorial, que se debe manejar gráficamente o con componentes, mientras que la segunda es una simple suma aritmética de números.

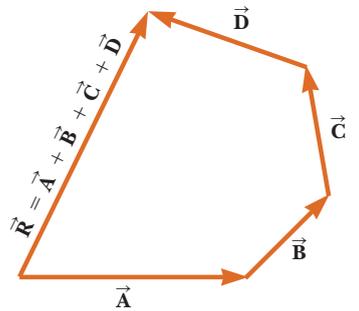


Figura 3.4 Una construcción geométrica para la suma de cuatro vectores. El vector resultante \vec{R} es el vector que complementa el polígono.

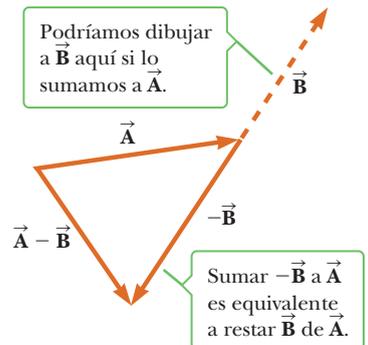


Figura 3.5 Esta construcción muestra cómo se resta el vector \vec{B} del vector \vec{A} . El vector $-\vec{B}$ tiene la misma magnitud que el vector \vec{B} , pero apunta en la dirección opuesta.

Multiplicación o división de un vector mediante un escalar Al multiplicar o dividir un vector mediante un escalar proporciona un vector. Por ejemplo, si el vector \vec{A} se multiplica por el número escalar 3, el resultado, rescrito como $3\vec{A}$, es un vector con una magnitud tres veces la de \vec{A} y apuntando en la misma dirección. Si el vector \vec{A} se multiplica por el número escalar -3 , el resultado es $-3\vec{A}$, un vector con una magnitud tres veces la de \vec{A} y apuntando en dirección opuesta (debido al signo negativo).

Examen rápido

3.1 La magnitud de dos vectores \vec{A} y \vec{B} son 12 unidades y 8 unidades, respectivamente. ¿Cuáles son los valores más grande y más pequeño posibles para la magnitud del vector resultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$? a) 14.4 y 4 b) 12 y 8 c) 20 y 4 d) ninguno de éstos.

EJEMPLO 3.1 De paseo

OBJETIVO Hallar la suma de dos vectores utilizando una gráfica.

PROBLEMA Un automóvil recorre 20.0 km hacia el norte y después 35.0 km en una dirección 60° al noroeste, como en la figura 3.6. Utilizando una gráfica, determine la magnitud y dirección de un vector simple que proporciona el efecto neto del viaje del automóvil. A este vector se le conoce como *desplazamiento resultante* del automóvil.

ESTRATEGIA Dibuje una gráfica y represente los vectores de desplazamiento como flechas. Ubique gráficamente el vector resultante de la suma de los dos vectores de desplazamiento. Mida su longitud y ángulo con respecto a la vertical.

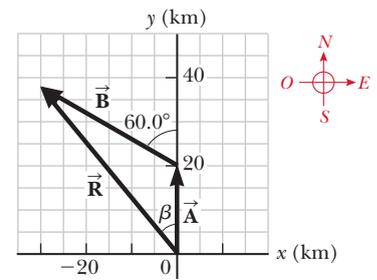


Figura 3.6 (Ejemplo 3.1) Un método gráfico para buscar el vector de desplazamiento resultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$.

SOLUCIÓN

Sean \vec{A} que representa el primer vector de desplazamiento, 20.0 km al norte y \vec{B} el segundo vector de desplazamiento, extendido al noroeste. Con cuidado grafique los dos vectores, dibujando un vector resultante \vec{R} con su base tocando la base de \vec{A} y extendiendo hacia la punta de \vec{B} . Mida la longitud de este vector, que es de casi 48 km. El ángulo β , se mide con un transportador, es de casi 39° noroeste.

COMENTARIOS Observe que en este caso la aritmética normal no funciona: ¡la respuesta correcta de 48 km no es igual a $20.0 \text{ km} + 35.0 \text{ km} = 55.0 \text{ km}$!

PREGUNTA 3.1 Considere la suma de dos vectores. ¿Bajo qué condiciones la suma de las magnitudes de los vectores igualaría la magnitud del vector resultante?

EJERCICIO 3.1 Determine gráficamente la magnitud y dirección del desplazamiento si un hombre camina 30.0 km 45° noreste y después camina hacia el este 20.0 km.

RESPUESTA 46 km, 27° noreste.

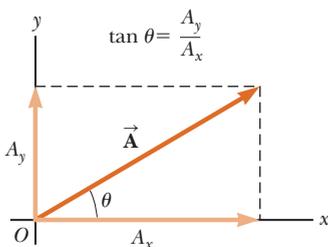


Figura 3.7 Cualquier vector \vec{A} que se encuentra en el plano se puede representar mediante sus componentes rectangulares A_x y A_y .

3.2 Componentes de un vector

Un método de la adición vectorial hace uso de la proyección de un vector a lo largo de los ejes de un sistema coordenado rectangular. Estas proyecciones se conocen como **componentes**. Cualquier vector puede ser descrito íntegramente mediante sus componentes.

Considere un vector \vec{A} en un sistema coordenado rectangular, como se muestra en la figura 3.7. \vec{A} se puede expresar como la suma de dos vectores; \vec{A}_x , paralelo al eje x , y \vec{A}_y , paralelo al eje y . Matemáticamente,

$$\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y$$

donde \vec{A}_x y \vec{A}_y , son los vectores componentes de \vec{A} . La proyección de \vec{A} a lo largo del eje x , A_x , se le conoce como el componente x de \vec{A} y la proyección \vec{A} a lo largo del eje y , A_y ,

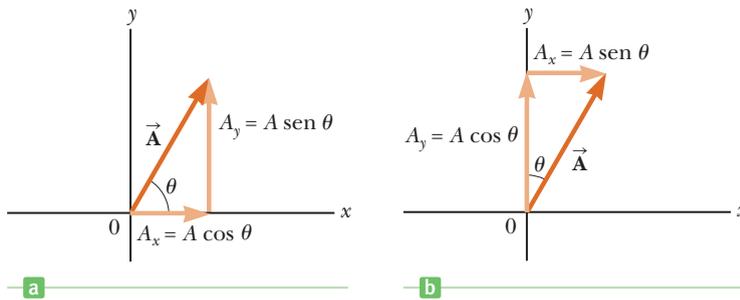


Figura 3.8 No siempre se necesita definir el ángulo θ con respecto al eje x positivo.

se le conoce como el componente y de \vec{A} . Estos componentes pueden ser ya sea números positivos o bien negativos con unidades. A partir de la definición de seno y coseno, vemos que $\cos \theta = A_x/A$ y $\sin \theta = A_y/A$ y de este modo los componentes de \vec{A} son

$$A_x = A \cos \theta \quad [3.2a]$$

$$A_y = A \sin \theta \quad [3.2b]$$

Estos componentes forman dos lados de un triángulo rectángulo que tiene una hipotenusa con magnitud A . Esto surge de que la magnitud y dirección de \vec{A} están relacionadas a sus componentes a través del teorema de Pitágoras y la definición de la tangente:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad [3.3]$$

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x} \quad [3.4]$$

Al resolver para el ángulo θ , que se mide por convención desde el eje positivo x , se puede escribir la ecuación 3.4 en la forma:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right)$$

¡Esta fórmula proporciona la respuesta correcta sólo la mitad de las veces! La función tangente inversa sólo proporciona valores desde -90° hasta $+90^\circ$, de tal modo que la respuesta en la pantalla de su calculadora sólo será correcta si el vector que resulta se encuentra en el primero o cuarto cuadrantes. Si se encuentra en el segundo o tercer cuadrantes, al sumar 180° al número en la pantalla de la calculadora siempre le proporcionará la respuesta correcta. El ángulo en la ecuación 3.2 y 3.4 debe medirse desde el eje x positivo. Son posibles otras elecciones de línea de referencia, pero en tal caso se deben hacer ciertos ajustes. (Véanse típ 3.2 y figura 3.8.)

Si se elige un sistema coordenado diferente del que se muestra en la figura 3.7, deben modificarse los componentes del vector. En muchas aplicaciones es más conveniente expresar los componentes de un vector en un sistema coordenado que tenga ejes que no sean horizontales o verticales, sino perpendiculares entre sí. Considere un vector \vec{B} que forma un ángulo θ' con el eje x' que se define en la figura 3.9. Los componentes rectangulares de \vec{B} a lo largo de los ejes de la figura se conocen mediante $B_{x'} = B \cos \theta'$ y $B_{y'} = B \sin \theta'$, como en las ecuaciones 3.2. Por lo tanto la magnitud y dirección de \vec{B} se obtienen de expresiones equivalentes a las ecuaciones 3.3 y 3.4.

Típ 3.2 Componentes x y y

La ecuación 3.2 para los componentes x y y de un vector asocia el coseno con el componente x y el seno con el componente y como en la figura 3.8a. Esta asociación se debe *al hecho* de que se elige el ángulo θ con respecto al eje positivo x . Si el ángulo fuera medido con respecto al eje y , como en la figura 3.8b, los componentes serían proporcionados por $A_x = A \sin \theta$ y $A_y = A \cos \theta$.

Típ 3.3 Tangentes inversas en calculadoras: la mitad a la vez

La función tangente inversa en las calculadoras devuelve un ángulo entre -90° y $+90^\circ$. Si el vector se encuentra en el segundo o tercer cuadrantes, el ángulo, se mide desde el eje x positivo, será el ángulo que devuelve su calculadora más 180° .

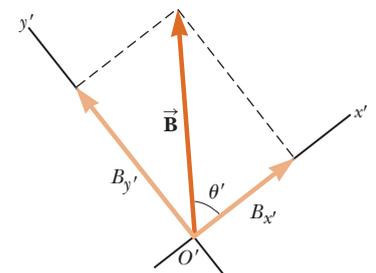


Figura 3.9 Los componentes del vector \vec{B} en un sistema coordenado inclinado.

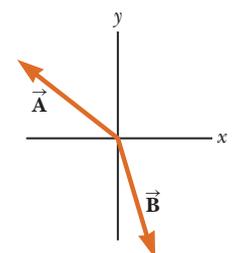


Figura 3.10 (Exámenes rápidos 3.2 y 3.3)

Examen rápido

3.2 La figura 3.10 muestra dos vectores que se encuentran en el plano xy . Establezca los signos de las componentes x y y de \vec{A} , \vec{B} y $\vec{A} + \vec{B}$.

3.3 ¿Qué vector tiene un ángulo con respecto al eje x positivo que está en el rango de la función tangente inversa?

EJEMPLO 3.2 ¡Ayuda en camino!

OBJETIVO Hallar las componentes de un vector, conocida una magnitud y dirección y viceversa.

PROBLEMA a) Halle los componentes horizontal y vertical del desplazamiento de $d = 1.00 \times 10^2$ m de un superhéroe que vuela desde la parte superior de un edificio alto a lo largo de la trayectoria que se muestra en la figura 3.11a. b) Suponga que el superhéroe sale en la otra dirección a lo largo de un vector de desplazamiento \vec{B} hacia la parte superior de un asta bandera donde las componentes del desplazamiento están dadas mediante $B_x = -25.0$ m y $B_y = 10.0$ m. Halle la magnitud y dirección del vector de desplazamiento.

ESTRATEGIA a) El triángulo formado por el desplazamiento y sus componentes se muestran en la figura 3.11b. Trigonometría simple proporciona los componentes con respecto al sistema coordenado x y y estándar: $A_x = A \cos \theta$ y $A_y = A \sin \theta$ (ecuaciones 3.2). Observe que $\theta = -30.0^\circ$, es negativo porque se mide en la dirección de las manecillas del reloj desde el eje x positivo. b) Aplique las ecuaciones 3.3 y 3.4 para hallar la magnitud y dirección del vector.

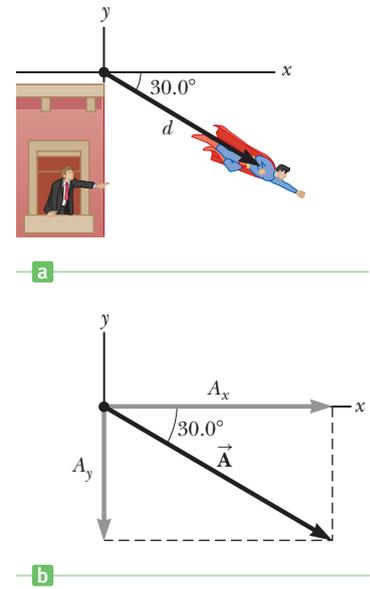


Figura 3.11 (Ejemplo 3.2)

SOLUCIÓN

a) Halle los componentes del vector de \vec{A} a partir de su magnitud y su dirección.

Aplique las ecuaciones 3.2 para hallar los componentes del vector de desplazamiento \vec{A} :

$$A_x = A \cos \theta = (1.00 \times 10^2 \text{ m}) \cos (-30.0^\circ) = +86.6 \text{ m}$$

$$A_y = A \sin \theta = (1.00 \times 10^2 \text{ m}) \sin (-30.0^\circ) = -50.0 \text{ m}$$

b) Halle la magnitud y dirección del vector de desplazamiento \vec{B} a partir de sus componentes.

Calcule la magnitud de \vec{B} a partir del teorema de Pitágoras:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \sqrt{(-25.0 \text{ m})^2 + (10.0 \text{ m})^2} = 26.9 \text{ m}$$

Calcule la dirección de \vec{B} y utilice la tangente inversa recordando sumar 180° a su respuesta en la pantalla de su calculadora, porque el vector se encuentra en el segundo cuadrante:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{B_y}{B_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{10.0}{-25.0} \right) = -21.8^\circ$$

$$\theta = 158^\circ$$

COMENTARIOS En el inciso a), observe que $\cos(-\theta) = \cos \theta$; sin embargo, $\sin(-\theta) = -\sin \theta$. El signo negativo de A_y refleja el hecho de que el desplazamiento en la dirección y es *hacia abajo*.

PREGUNTA 3.2 ¿Qué otras funciones, si existe alguna, se pueden utilizar para hallar el ángulo en el inciso b)?

EJERCICIO 3.2 a) Considere al superhéroe que ha volado 150 m en un ángulo de 120° con respecto al eje x positivo. Halle los componentes del vector de desplazamiento. b) Suponga que el superhéroe sale con un desplazamiento que tiene una componente x de 32.5 m y una componente y de 24.3 m. Encuentre la magnitud y dirección del vector de desplazamiento.

RESPUESTAS a) $A_x = -75$ m, $A_y = 130$ m b) 40.6 m, 36.8°

Álgebra de la suma vectorial

El método gráfico de la suma vectorial es valioso para la comprensión de cómo se pueden manejar los vectores, pero la mayoría de las veces se suman algebraicamente en términos de sus componentes. Considere $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$. En este caso los componentes del vector resultante \vec{R} están dados por

$$R_x = A_x + B_x \quad [3.5a]$$

$$R_y = A_y + B_y \quad [3.5b]$$

Así que los componentes x se suman sólo a los componentes x , y los componentes y sólo a los componentes y . La magnitud y dirección de \vec{R} se puede hallar en lo sucesivo con las ecuaciones 3.3 y 3.4.

La resta de dos vectores funciona de la misma manera porque se trata de la adición a otro vector del negativo de un vector. Cuando sume o reste vectores trace un bosquejo, con la finalidad de obtener una solución geométrica aproximada.

EJEMPLO 3.3 Tome un paseo

OBJETIVO Sumar vectores algebraicamente y determinar el vector resultante.

PROBLEMA Un excursionista inicia un viaje caminando primero 25.0 km 45.0° al sureste desde su base. Al segundo día camina 40.0 km en una dirección 60.0° al noreste, en cuyo punto descubre la torre del guardabosque. **a)** Establezca los componentes de los desplazamientos del excursionista en el primero y segundo días. **b)** Calcule los componentes del desplazamiento total del excursionista para el viaje. **c)** Determine la magnitud y dirección del desplazamiento desde la base.

ESTRATEGIA Este problema es simplemente una aplicación de la suma vectorial utilizando componentes, ecuaciones 3.5. Se indican los vectores de desplazamiento en el primero y segundo días mediante \vec{A} y \vec{B} , respectivamente. Utilizando la base como origen de las coordenadas, se obtienen los vectores que se muestran en la figura 3.12a. Después de hallar los componentes x y y para cada vector, se suman “en la forma de componentes”. Por último, se determina la magnitud y dirección del vector resultante \vec{R} , utilizando el teorema de Pitágoras y la función tangente inversa.

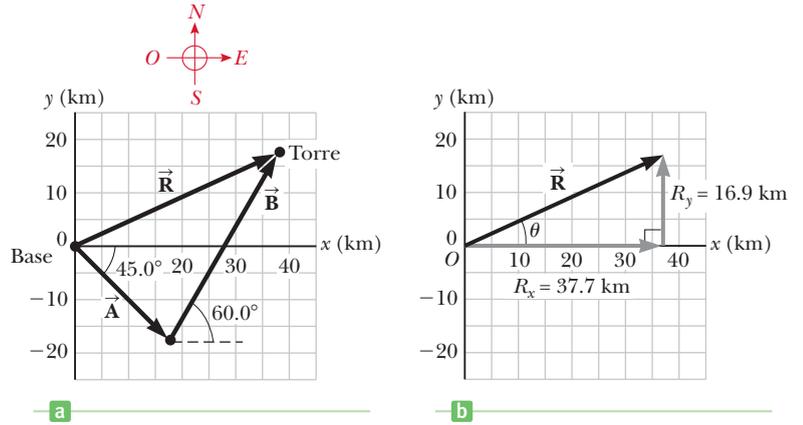


Figura 3.12 (Ejemplo 3.3) a) La trayectoria del excursionista y el vector resultante. b) Componentes del desplazamiento desde la base.

SOLUCIÓN

a) Halle los componentes de \vec{A} .

Aplique las ecuaciones 3.2 para hallar las componentes de \vec{A} :

$$A_x = A \cos (-45.0^\circ) = (25.0 \text{ km})(0.707) = 17.7 \text{ km}$$

$$A_y = A \sin (-45.0^\circ) = -(25.0 \text{ km})(0.707) = -17.7 \text{ km}$$

Encuentre los componentes de \vec{B} :

$$B_x = B \cos 60.0^\circ = (40.0 \text{ km})(0.500) = 20.0 \text{ km}$$

$$B_y = B \sin 60.0^\circ = (40.0 \text{ km})(0.866) = 34.6 \text{ km}$$

b) Calcule los componentes del vector resultante, $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$.

Para encontrar R_x sume los componentes x de \vec{A} y \vec{B} :

$$R_x = A_x + B_x = 17.7 \text{ km} + 20.0 \text{ km} = 37.7 \text{ km}$$

Para hallar R_y sume los componentes y de \vec{A} y \vec{B} :

$$R_y = A_y + B_y = -17.7 \text{ km} + 34.6 \text{ km} = 16.9 \text{ km}$$

c) Halle la magnitud y dirección de \vec{R} .

Aplique el teorema de Pitágoras para obtener la magnitud:

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{(37.7 \text{ km})^2 + (16.9 \text{ km})^2} = 41.3 \text{ km}$$

Calcule la dirección de \vec{R} utilizando la función tangente inversa:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{16.9 \text{ km}}{37.7 \text{ km}} \right) = 24.1^\circ$$

COMENTARIOS La figura 3.12b muestra un esquema de los componentes de \vec{R} y sus direcciones en el espacio. Del mismo modo, se puede calcular además la magnitud y dirección de la resultante.

PREGUNTA 3.3 Un segundo excursionista sigue la misma trayectoria el primer día, pero después camina 15.0 km al este en el segundo día antes de regresar y alcanzar la torre del guardabosque. ¿El vector de desplazamiento resultante del segundo excursionista es el mismo que el del primer excursionista o es diferente?

EJERCICIO 3.3 Un barco deja un puerto recorriendo 50.0 km 45.0° al noroeste y después 70.0 km en una dirección 30.0° al noreste. Hallar a) el vector de desplazamiento del barco y b) la magnitud y dirección del vector de desplazamiento.

RESPUESTA a) $R_x = 25.3$ km, $R_y = 70.4$ km b) 74.8 km, 70.2° noreste

3.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración en dos dimensiones

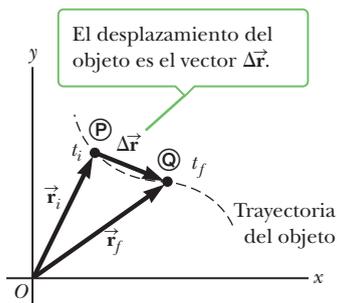


Figura 3.13 Un objeto se mueve a lo largo de una trayectoria curva entre los puntos P y Q. El vector de desplazamiento $\Delta \vec{r}$ es la diferencia de los vectores de posición: $\Delta \vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i$.

En un movimiento en una dimensión, como se explicó en el capítulo 2, la dirección de una cantidad vectorial como la velocidad o bien la aceleración puede ser tomada en cuenta al especificar la cantidad ya sea positiva o negativa. Por ejemplo, la velocidad de un cohete es positiva si éste va hacia arriba y negativa si va hacia abajo. Esta solución simple no está disponible en dos o tres dimensiones. En cambio, se debe hacer uso completo del concepto vectorial.

Considere un objeto que se mueve a través del espacio como se muestra en la figura 3.13. Cuando el objeto está en algún punto P en el tiempo t_i , su posición se describe mediante el vector de posición \vec{r}_i , dibujado desde el origen hasta P. Cuando el objeto se ha movido hacia algún otro punto Q en el tiempo t_f , su vector de posición es \vec{r}_f . Del diagrama vectorial en la figura 3.13, el vector de posición final es la suma del vector de posición inicial y el desplazamiento $\Delta \vec{r}$: $\vec{r}_f = \vec{r}_i + \Delta \vec{r}$. A partir de esta correspondencia, se obtienen las siguientes:

El **desplazamiento** de un objeto se define como el cambio en su vector de posición, o bien

$$\Delta \vec{r} \equiv \vec{r}_f - \vec{r}_i \quad [3.6]$$

Unidad SI: metro (m)

Ahora se presentan varias generalizaciones de las definiciones de velocidad y aceleración expuestas en el capítulo 2.

Velocidad promedio ►

La **velocidad promedio** de un objeto durante un intervalo de tiempo Δt es su desplazamiento dividido entre Δt :

$$\vec{v}_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad [3.7]$$

Unidades SI: metros por segundo (m/s)

Debido a que el desplazamiento es una cantidad vectorial y el intervalo de tiempo es una cantidad escalar, se concluye que la velocidad promedio es una cantidad *vectorial* dirigida a lo largo de $\Delta \vec{r}$.

Velocidad instantánea ►

La **velocidad instantánea** \vec{v} de un objeto es el límite de su velocidad promedio cuando Δt tiende a cero:

$$\vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad [3.8]$$

Unidades SI: metros por segundo (m/s)

La dirección del vector velocidad instantánea es el recorrido a lo largo de una línea que es tangente a la trayectoria del objeto y en la dirección de su movimiento.

La **aceleración promedio** de un objeto durante un intervalo de tiempo Δt es el cambio en su velocidad $\Delta \vec{v}$ dividido entre Δt , o bien

$$\vec{a}_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad [3.9]$$

Unidades SI: metro por segundo cuadrado (m/s^2)

◀ Aceleración promedio

El vector **aceleración instantánea** \vec{a} de un objeto es el límite de su vector aceleración promedio conforme Δt tiende a cero:

$$\vec{a} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad [3.10]$$

Unidades SI: metro por segundo cuadrado (m/s^2)

◀ Aceleración instantánea

Es importante reconocer que un objeto puede acelerar en diferentes formas. Primero, la magnitud del vector velocidad (la rapidez) puede cambiar con el tiempo. Segundo, la dirección del vector velocidad puede cambiar con el tiempo, incluso si la rapidez es constante, como puede suceder a lo largo de una trayectoria curva. Tercero, tanto la magnitud y la dirección del vector velocidad pueden cambiar al mismo tiempo.

■ Examen rápido

3.4 ¿Cuál de los objetos que siguen no puede estar acelerando? a) Un objeto móvil con rapidez constante; b) un objeto móvil con una velocidad constante; c) un objeto móvil a lo largo de una curva.

3.5 Considere los siguientes controles en un automóvil: pedal para acelerar, freno, volante. Los controles en esta lista que ocasionan una aceleración del automóvil son a) los tres controles, b) el pedal de aceleración y el freno, c) sólo el freno, o bien d) sólo el pedal de aceleración.

3.4 Movimiento en dos dimensiones

En el capítulo 2 se estudió el movimiento de objetos a lo largo de trayectorias en línea recta, como el eje x . En este capítulo, examinamos objetos que se mueven en las dos direcciones x y y de manera simultánea bajo aceleración constante. Un caso especial importante de este movimiento en dos dimensiones se le conoce como **movimiento de un proyectil**.

Cualquiera que haya lanzado alguna clase de objeto en el aire ha observado un movimiento de un proyectil. Si se omiten los efectos de la resistencia del aire y la rotación de la Tierra, la trayectoria del proyectil dentro del campo de gravedad de la Tierra es una curva en forma de parábola, como se muestra en la figura activa 3.14.

La dirección x positiva es horizontal y hacia la derecha, y la dirección y es vertical y positiva hacia arriba. El hecho experimental más importante acerca del movimiento

◀ Movimiento de un proyectil

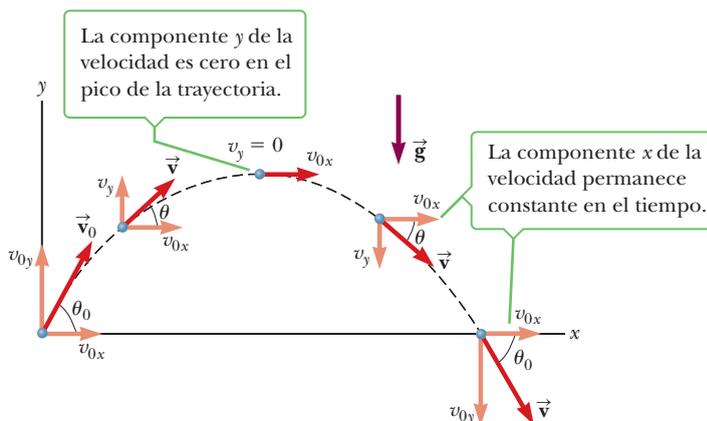
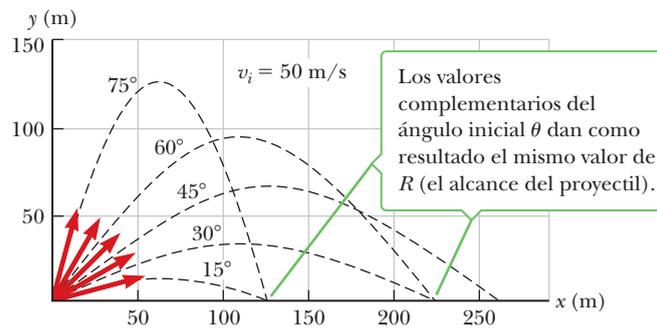


Figura activa 3.14

Trayectoria parabólica de una partícula que deja el origen con una velocidad de \vec{v}_0 . Observe que \vec{v} cambia con el tiempo. Sin embargo, la componente x de la velocidad, v_x , permanece constante en el tiempo, igual que su velocidad inicial v_{0x} . Además, $v_y = 0$ en el pico de la trayectoria, pero la aceleración siempre es igual a la aceleración en caída libre y actúa verticalmente hacia abajo.

Figura activa 3.15 Se lanza un proyectil desde el origen con una rapidez inicial de 50 m/s en diferentes ángulos de proyección.



de un proyectil en dos dimensiones es que **los movimientos horizontal y vertical son completamente independientes entre sí**. Esto significa que el movimiento en una dirección no tiene efecto sobre el movimiento en la otra dirección. Si una pelota es lanzada en una trayectoria parabólica, como en la figura activa 3.14, el movimiento en la dirección y se verá muy semejante al de una pelota lanzada en una trayectoria recta hacia arriba bajo la influencia de la gravedad. La figura activa 3.15 muestra el efecto de diferentes ángulos iniciales; observe que los ángulos complementarios dan el mismo alcance horizontal.

La figura 3.16 es un experimento que ilustra la independencia del movimiento horizontal y vertical. La pistola apunta directamente a la bola objetivo y es disparada en el instante en que ésta es liberada. En ausencia de gravedad, el proyectil daría en el blanco porque el objetivo no se movería. Sin embargo, el proyectil aún da en el blanco en presencia de la gravedad. Eso significa que el proyectil está cayendo con el mismo desplazamiento vertical que el objetivo, a pesar de su movimiento horizontal. El experimento también funciona iniciando como en la figura 3.17, cuando la velocidad inicial es la componente vertical.

Tip 3.4 Aceleración en el punto más alto

La aceleración en la dirección y *no* es cero en la parte superior de la trayectoria del proyectil. Sólo la componente y de la velocidad es cero. Si la aceleración también fuera cero, ¡el proyectil jamás llegaría abajo!

En general, las ecuaciones de aceleración constante desarrolladas en el capítulo 2 vienen por separado para la dirección x y la dirección y . Una diferencia importante es que ahora la velocidad tiene dos componentes, no precisamente una como en ese capítulo. Suponga que en $t = 0$ el proyectil deja el origen con una velocidad inicial \vec{v}_0 . Si el vector velocidad forma un ángulo θ_0 con la horizontal, donde a θ_0 se le conoce como *ángulo de proyección*, entonces, a partir de las definiciones de las funciones coseno y seno y la figura 3.14, se tiene

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 \quad \text{y} \quad v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$$

donde v_{0x} es la velocidad inicial (en $t = 0$) en la dirección x y v_{0y} es la velocidad inicial en la dirección y .

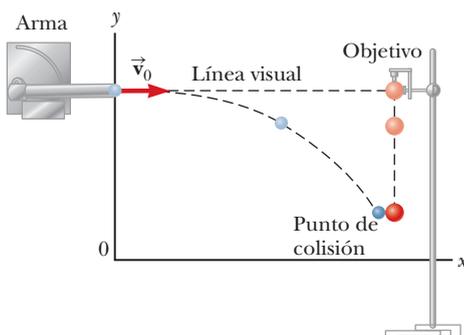


Figura 3.16 Una bala se dispara a un objetivo en el mismo instante en que el objetivo es liberado. Ambos caen verticalmente a la misma velocidad y colisionan.



Figura 3.17 Fotografía multiflash de la demostración proyectil-objetivo. Si el arma se dirige directamente al objetivo y se dispara en el mismo instante en que el objetivo empieza a caer, el proyectil dará en el blanco.

Ahora, las ecuaciones 2.6, 2.9 y 2.10 desarrolladas en el capítulo 2 para el movimiento con aceleración constante en una dimensión llevan hacia el caso en dos dimensiones; existe un conjunto de tres ecuaciones para cada dirección con las velocidades iniciales modificadas como ya se explicó. En la dirección x , con a_x constante, se tiene

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad [3.11a]$$

$$\Delta x = v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad [3.11b]$$

$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x \Delta x \quad [3.11c]$$

donde $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$. En la dirección y , se tiene

$$v_y = v_{0y} + a_y t \quad [3.12a]$$

$$\Delta y = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad [3.12b]$$

$$v_y^2 = v_{0y}^2 + 2a_y \Delta y \quad [3.12c]$$

donde $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$ y a_y es constante. La rapidez del objeto v puede ser calculada a partir de los componentes de la velocidad aplicando el teorema de Pitágoras:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

El ángulo que forma el vector velocidad con el eje x se conoce por

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right)$$

Esta fórmula para θ , como se estableció previamente, se debe aplicar con precaución, porque la función tangente inversa sólo proporciona valores entre -90° y $+90^\circ$. Es necesario sumar 180° para vectores que se encuentran en el segundo o el tercer cuadrantes.

Las ecuaciones de cinemática son fáciles de adaptar y simplificar para proyectiles cerca de la superficie de la Tierra. En ese caso, suponiendo que la fricción del aire es despreciable, la aceleración en la dirección x es 0 (porque se omite la resistencia del aire). **Esto significa que $a_x = 0$ y el componente de velocidad del proyectil a lo largo de la dirección x permanece constante.** Si el valor inicial de la componente de velocidad en la dirección x es $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$, entonces éste también es el valor de v en cualquier tiempo posterior, así

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 = \text{constante} \quad [3.13a]$$

mientras que el desplazamiento horizontal es simplemente

$$\Delta x = v_{0x} t = (v_0 \cos \theta_0) t \quad [3.13b]$$

Para el movimiento en la dirección y , se hace la sustitución $a_y = -g$ y $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$ en las ecuaciones 3.12, lo que proporciona

$$v_y = v_0 \sin \theta_0 - gt \quad [3.14a]$$

$$\Delta y = (v_0 \sin \theta_0) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad [3.14b]$$

$$v_y^2 = (v_0 \sin \theta_0)^2 - 2g \Delta y \quad [3.14c]$$

Los hechos importantes del movimiento de un proyectil se pueden resumir como sigue:

1. Siempre que se omita la resistencia del aire, la componente horizontal de la velocidad v_x permanece constante porque no existe componente horizontal de la aceleración.
2. La componente vertical de la aceleración es igual a la aceleración en caída libre $-g$.
3. La componente vertical de la velocidad v_y y el desplazamiento en la dirección y son idénticos a los de un cuerpo en caída libre.
4. El movimiento de proyectil puede describirse como una sobreposición de dos movimientos independientes en las direcciones x y y .

EJEMPLO 3.4 Movimiento de proyectil con diagramas

OBJETIVO Aproximar respuestas en el movimiento de proyectiles utilizando un diagrama de movimiento.

PROBLEMA Se dispara una bala de tal manera que sus componentes vertical y horizontal de velocidad son 40 y 20 m/s, respectivamente. Utilice un diagrama de movimiento para evaluar el tiempo total de vuelo de la bala y la distancia que recorre antes de golpear la superficie de la tierra.

ESTRATEGIA Utilice el diagrama, evaluando la aceleración de la gravedad como -10 m/s^2 . Por simetría, sube y regresa a la superficie de la tierra con la misma velocidad y que cuando salió, excepto por el signo opuesto. Con esto en mente y el hecho de que la aceleración de la gravedad disminuye la velocidad en la dirección $+y$ en 10 m/s cada segundo, podemos encontrar el tiempo total de vuelo y después el alcance horizontal.

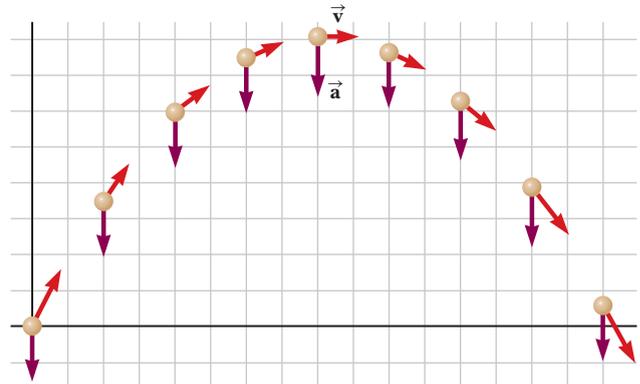


Figura 3.18 (Ejemplo 3.4) Diagrama de movimiento de un proyectil.

SOLUCIÓN

En el diagrama de movimiento que se muestra en la figura 3.18, todos los vectores de aceleración son los mismos, apuntando hacia abajo con magnitud casi de 10 m/s^2 . Por simetría, se sabe que la bala golpeará la superficie de la tierra con la misma rapidez en la dirección y y como cuando fue lanzada, de tal modo que la velocidad en la dirección y va desde 40 hasta -40 m/s en etapas de -10 m/s cada segundo; por lo tanto, transcurren casi 8 segundos durante el movimiento.

El vector velocidad cambia de dirección de manera constante, pero la velocidad horizontal jamás varía porque la aceleración en la dirección horizontal es cero. Debido a eso, el desplazamiento de la bala en la dirección x se conoce por la ecuación 3.13b, $\Delta x \approx v_{0x}t = (20 \text{ m/s})(8 \text{ s}) = 160 \text{ m}$.

COMENTARIOS Este ejemplo destaca la independencia de los componentes x y y en los problemas de movimiento de proyectil.

PREGUNTA 3.4 ¿La magnitud del vector velocidad en el impacto es mayor que, menor que, o bien igual a la magnitud del vector velocidad inicial? ¿Por qué?

EJERCICIO 3.4 Evalúe la altura máxima en este mismo problema.

RESPUESTA 80 m

Examen rápido

3.6 Suponga que lleva una pelota y corre con rapidez constante, quiere lanzarla y atraparla cuando caiga. ¿Podría a) lanzar la pelota en un ángulo de casi 45° sobre la horizontal y mantener la misma rapidez, b) lanzar la pelota con una trayectoria recta hacia arriba en el aire y disminuir su velocidad hasta atrapar la pelota, o bien, c) lanzar la pelota en una trayectoria recta hacia arriba en el aire y mantener la misma rapidez?

3.7 Cuando un proyectil se mueve en su trayectoria parabólica, los vectores de velocidad y aceleración son perpendiculares entre sí a) en todas partes a lo largo de la trayectoria del proyectil, b) en el pico de su trayectoria, c) en ningún lugar a lo largo de su trayectoria, o bien, d) no se proporciona suficiente información.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS**Movimiento de proyectil**

- Seleccione** un sistema coordenado y dibuje la trayectoria del proyectil incluyendo posiciones inicial y final, velocidades y aceleraciones.
- Resuelva** el vector velocidad inicial en componentes x y y .
- Considere** el movimiento horizontal y el movimiento vertical de manera independiente.
- Siga** la técnica para resolver problemas con velocidad constante para explicar el movimiento horizontal del proyectil.
- Siga** la técnica para resolver problemas con aceleración constante para explicar el movimiento vertical del proyectil.

■ EJEMPLO 3.5 Exploradores sin recursos

OBJETIVO Resolver un problema de movimiento de un proyectil en dos dimensiones en el que un objeto tiene una velocidad inicial horizontal.

PROBLEMA Un avión de rescate en Alaska deja caer un paquete de provisiones de emergencia a unos excursionistas sin recursos, como se muestra en la figura 3.19. El avión viaja horizontalmente a 40.0 m/s con una altura de 1.00×10^2 m sobre de la superficie de la tierra. **a)** ¿Dónde golpea el paquete la superficie de la tierra con respecto al punto en que éste fue liberado? **b)** ¿Cuáles son los componentes horizontal y vertical de la velocidad del paquete justo antes de que golpee la superficie de la tierra? **c)** Encuentre el ángulo de impacto.

ESTRATEGIA En este caso, sólo se toman las ecuaciones 3.13 y 3.14, con las cantidades conocidas y resolviendo para las cantidades desconocidas que quedan. Dibuje el problema utilizando un sistema coordenado como en la figura 3.19. En el inciso a), ajuste el componente y de las ecuaciones de desplazamiento igual a -1.00×10^2 m —el nivel de la superficie de la tierra donde aterrizó el paquete— y resuelva para el tiempo que le toma al paquete en alcanzar la superficie de la tierra. Para determinar el alcance, sustituya este tiempo en la ecuación de desplazamiento para el componente x . En el inciso b), sustituya el tiempo encontrado en el inciso a) en las componentes de velocidad. Observe que la velocidad inicial sólo tiene un componente x , lo que simplifica la matemática. La solución al inciso c) requiere la función inversa de la tangente.

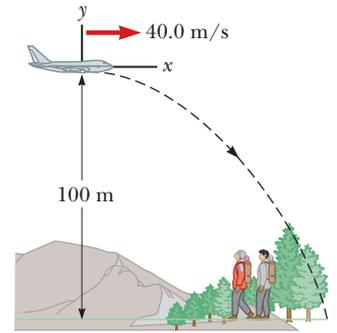


Figura 3.19 (Ejemplo 3.5) Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie del suelo, se libera un paquete desde el avión de rescate que viaja a lo largo de la trayectoria que se muestra.

SOLUCIÓN

a) Determine el alcance del paquete.

Utilice la ecuación 3.14b para calcular el desplazamiento y :

$$\Delta y = y - y_0 = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Sustituya $y_0 = 0$ y $v_{0y} = 0$, haga $y = -1.00 \times 10^2$ m —la posición vertical final del paquete con respecto a la nave— y resuelva para el tiempo:

$$y = -(4.90 \text{ m/s}^2)t^2 = -1.00 \times 10^2 \text{ m}$$

$$t = 4.52 \text{ s}$$

Aplique la ecuación 3.13b para hallar el desplazamiento x :

$$\Delta x = x - x_0 = v_{0x}t$$

Sustituya $x_0 = 0$, $v_{0x} = 40.0$ m/s y el tiempo:

$$x = (40.0 \text{ m/s})(4.52 \text{ s}) = 181 \text{ m}$$

b) Determine los componentes de la velocidad del paquete en el impacto:

Encuentre el componente x de la velocidad en el tiempo del impacto:

$$v_x = v_0 \cos \theta = (40.0 \text{ m/s}) \cos 0^\circ = 40.0 \text{ m/s}$$

Determine el componente y de la velocidad en el tiempo de impacto:

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt = 0 - (9.80 \text{ m/s}^2)(4.52 \text{ s}) = -44.3 \text{ m/s}$$

c) Determine el ángulo de impacto.

Escriba la ecuación 3.4 y sustituya valores:

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{-44.3 \text{ m/s}}{40.0 \text{ m/s}} = -1.11$$

Aplique las funciones inversas de la tangente en ambos lados:

$$\theta = \tan^{-1}(-1.11) = -48.0^\circ$$

COMENTARIOS Observe cómo el movimiento en la dirección x y el movimiento en la dirección y se manejan por separado.

PREGUNTA 3.5 Despreciando los efectos de fricción del aire, ¿qué trayectoria recorre el paquete cuando es observado por el piloto? ¿Por qué?

EJERCICIO 3.5 Un cantinero desliza un tarro con cerveza a 1.50 m/s hacia un cliente en el extremo de una barra sin fricción que tiene 1.20 m de alto. El cliente se prepara para atrapar el tarro y falla, el tarro abandona el extremo de la barra. **a)** ¿A qué distancia desde el final de la barra el tarro golpea el piso? **b)** ¿Cuáles son la rapidez y dirección del tarro en el impacto?

RESPUESTAS a) 0.742 m b) 5.08 m/s, $\theta = -72.8^\circ$

EJEMPLO 3.6 Salto de longitud

OBJETIVO Resolver un problema de movimiento en dos dimensiones que involucra un objeto que inicia y finaliza a la misma altura.

PROBLEMA Un saltador de longitud (figura 3.20) deja la superficie de la tierra en un ángulo de 20.0° con la horizontal y con una rapidez de 11.0 m/s . **a)** ¿Cuánto tiempo le toma alcanzar su altura máxima? **b)** ¿Cuál es su altura máxima? **c)** ¿Qué distancia saltó? (Considere que su movimiento es equivalente al de una partícula, no considere el movimiento de sus brazos y piernas.) **d)** Aplique la ecuación 3.14c para hallar la altura máxima que logra.

ESTRATEGIA Una vez más, considere las ecuaciones de un proyectil, complete las cantidades conocidas y resuelva para las incógnitas. En la altura máxima, la velocidad en la dirección y es cero, de este modo ajustando la ecuación 3.14a igual a cero y resolviendo proporciona el tiempo que le toma para alcanzar su altura máxima. Por simetría, teniendo en cuenta que su trayectoria inicia y termina a la misma altura, duplicando este tiempo se conoce el tiempo total del salto.



Figura 3.20 (Ejemplo 3.6) Esta fotografía de exposición múltiple de un saltador de longitud muestra que, en realidad, el movimiento no es equivalente al movimiento de una partícula. El centro de masa del saltador sigue una parábola, más para extender la longitud del salto antes del impacto, el saltador tira de sus pies por lo que golpea el suelo después de lo que de lo hubiera hecho de otro modo.

SOLUCIÓN

a) Determine el tiempo $t_{\text{máx}}$ que le toma alcanzar la altura máxima.

Haga $v_y = 0$ en la ecuación 3.14a y resuelva para $t_{\text{máx}}$:

$$\begin{aligned} v_y &= v_0 \sen \theta_0 - g t_{\text{máx}} = 0 \\ \text{(1)} \quad t_{\text{máx}} &= \frac{v_0 \sen \theta_0}{g} \\ &= \frac{(11.0 \text{ m/s})(\sen 20.0^\circ)}{9.80 \text{ m/s}^2} = \mathbf{0.384 \text{ s}} \end{aligned}$$

b) Determine la altura máxima que logra.

Sustituya el tiempo $t_{\text{máx}}$ en la ecuación 3.14b para el desplazamiento y :

$$\begin{aligned} y_{\text{máx}} &= (v_0 \sen \theta_0) t_{\text{máx}} - \frac{1}{2} g (t_{\text{máx}})^2 \\ y_{\text{máx}} &= (11.0 \text{ m/s})(\sen 20.0^\circ)(0.384 \text{ s}) \\ &\quad - \frac{1}{2}(9.80 \text{ m/s}^2)(0.384 \text{ s})^2 \\ y_{\text{máx}} &= \mathbf{0.722 \text{ m}} \end{aligned}$$

c) Encuentre la distancia horizontal que salta.

Primero encuentre el tiempo para el salto, que es dos veces $t_{\text{máx}}$:

$$t = 2t_{\text{máx}} = 2(0.384 \text{ s}) = 0.768 \text{ s}$$

Sustituya este resultado en la ecuación para el desplazamiento x :

$$\begin{aligned} \text{(2)} \quad \Delta x &= (v_0 \cos \theta_0) t \\ &= (11.0 \text{ m/s})(\cos 20.0^\circ)(0.768 \text{ s}) = \mathbf{7.94 \text{ m}} \end{aligned}$$

d) Aplique otro método para determinar la altura máxima.

Aplique la ecuación 3.14c, resolviendo para Δy :

$$\begin{aligned} v_y^2 - v_{0y}^2 &= -2g \Delta y \\ \Delta y &= \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{-2g} \end{aligned}$$

Sustituya $v_y = 0$ en la altura máxima y el hecho de que $v_{0y} = (11.0 \text{ m/s}) \sen 20.0^\circ$:

$$\Delta y = \frac{0 - [(11.0 \text{ m/s}) \sen 20.0^\circ]^2}{-2(9.80 \text{ m/s}^2)} = \mathbf{0.722 \text{ m}}$$

COMENTARIOS Aunque la representación del movimiento del saltador de longitud como la de un proyectil es una simplificación exagerada, los valores que se obtienen son razonables.

PREGUNTA 3.6 Verdadero o Falso: Debido a que el componente x del desplazamiento no depende de manera explícita de g , la distancia horizontal recorrida no depende de la aceleración de gravedad.

EJERCICIO 3.6 Un saltamontes salta una distancia horizontal de 1.00 m a partir del reposo, con una velocidad inicial en un ángulo de 45.0° con respecto a la horizontal. Determine a) la rapidez inicial del saltamontes y b) la altura máxima que alcanza.

RESPUESTAS a) 3.13 m/s b) 0.250 m

■ EJEMPLO 3.7 La ecuación de alcance

OBJETIVO Hallar una ecuación para el desplazamiento horizontal máximo de un proyectil disparado desde el nivel de la superficie de la tierra.

PROBLEMA Un atleta que participa en una competencia de salto de longitud, salta en el aire con una velocidad v_0 en un ángulo θ_0 con la horizontal. Obtenga una expresión para la distancia del salto en términos de v_0 , θ_0 y g .

ESTRATEGIA Utilice los resultados del ejemplo 3.6, eliminando el tiempo t de las ecuaciones (1) y (2).

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación (1) del ejemplo 3.6 para hallar el tiempo de vuelo, t :

$$t = 2t_{\text{máx}} = \frac{2v_0 \text{sen } \theta_0}{g}$$

Sustituya esta expresión para t en la ecuación (2) del ejemplo 3.6:

$$\Delta x = (v_0 \cos \theta_0)t = (v_0 \cos \theta_0) \left(\frac{2v_0 \text{sen } \theta_0}{g} \right)$$

Simplifique:

$$\Delta x = \frac{2v_0^2 \cos \theta_0 \text{sen } \theta_0}{g}$$

Sustituya la identidad $2 \cos \theta_0 \text{sen } \theta_0 = \text{sen } 2\theta_0$ para reducir la expresión anterior a una función trigonométrica simple:

$$(1) \quad \Delta x = \frac{v_0^2 \text{sen } 2\theta_0}{g}$$

COMENTARIOS El uso de una identidad trigonométrica en la etapa final no es necesario, pero hace más fácil responder a la pregunta 3.7.

PREGUNTA 3.7 ¿Qué ángulo θ_0 produce el salto más largo?

EJERCICIO 3.7 Obtenga una expresión para el desplazamiento máximo del atleta en la dirección vertical, $\Delta y_{\text{máx}}$, en términos de v_0 , θ_0 y g .

RESPUESTA $\Delta y_{\text{máx}} = \frac{v_0^2 \text{sen}^2 \theta_0}{2g}$

■ EJEMPLO 3.8 Esto sí que es un brazo

OBJETIVO Resolver un problema de cinemática en dos dimensiones con una velocidad inicial no horizontal, iniciando y terminando en diferentes alturas.

PROBLEMA Se lanza una piedra hacia arriba desde la parte superior de un edificio en un ángulo de 30.0° con la horizontal y con una rapidez inicial de 20.0 m/s, como en la figura 3.21. El punto de liberación está a 45.0 m sobre la superficie de la tierra. a) ¿Cuánto tiempo le toma a la piedra golpear la superficie de la tierra? b) Determine la rapidez de la piedra en el impacto. c) Encuentre el alcance horizontal de la piedra. Omite la resistencia del aire.

ESTRATEGIA Elija coordenadas como en la figura, con el origen en el punto de liberación. a) Complete las constantes de la ecuación 3.14b para el desplazamiento y y ajuste el desplazamiento igual a -45.0 m, el desplazamiento y cuando la piedra golpea la superficie de la tierra. Aplique la fórmula cuadrática, resuelva para el tiempo. Para solucionar el inciso b), sustituya el tiempo del inciso a) en los componentes de la velocidad y sustituya el mismo tiempo en la ecuación del desplazamiento x para resolver el inciso c).

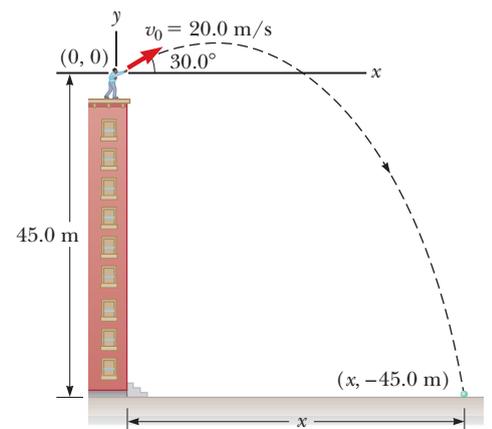


Figura 3.21 (Ejemplo 3.8)

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Determine el tiempo de vuelo.

Determine los componentes x y y de la velocidad inicial:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 = (20.0 \text{ m/s})(\cos 30.0^\circ) = +17.3 \text{ m/s}$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta_0 = (20.0 \text{ m/s})(\sin 30.0^\circ) = +10.0 \text{ m/s}$$

Calcule el desplazamiento y tomando $y_0 = 0$, $y = -45.0 \text{ m}$ y $v_{0y} = 10.0 \text{ m/s}$:

$$\Delta y = y - y_0 = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

$$-45.0 \text{ m} = (10.0 \text{ m/s})t - (4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

Reordene la ecuación en la forma estándar y aplique la fórmula cuadrática (véase el apéndice A) para hallar la raíz positiva:

$$t = 4.22 \text{ s}$$

b) Halle la rapidez en el impacto.

Sustituya el valor de t encontrado en el inciso a) dentro de la ecuación 3.14a para determinar la componente y de la velocidad en el impacto:

$$v_y = v_{0y} - gt = 10.0 \text{ m/s} - (9.80 \text{ m/s}^2)(4.22 \text{ s})$$

$$= -31.4 \text{ m/s}$$

Utilice este valor de v_y , el teorema de Pitágoras y el hecho de que $v_x = v_{0x} = 17.3 \text{ m/s}$ para calcular la rapidez de la piedra en el impacto:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(17.3 \text{ m/s})^2 + (-31.4 \text{ m/s})^2}$$

$$= 35.9 \text{ m/s}$$

c) Calcule el alcance horizontal de la piedra.

Sustituya el tiempo de vuelo en la ecuación del alcance:

$$\Delta x = x - x_0 = (v_0 \cos \theta)t = (20.0 \text{ m/s})(\cos 30.0^\circ)(4.22 \text{ s})$$

$$= 73.1 \text{ m}$$

COMENTARIOS El ángulo en el cual se lanza la piedra afecta el vector velocidad en todo el movimiento consecutivo, pero no afecta la rapidez en una altura determinada. Ésta es una consecuencia de la conservación de energía, que se describe en el capítulo 5.

PREGUNTA 3.8 Verdadero o Falso: Con las condiciones previas sin cambio, si la piedra se lanza con la mitad de cierta rapidez, ésta viajará la mitad de la distancia.

EJERCICIO 3.8 Suponga que la piedra se lanza desde la misma altura como en el ejemplo en un ángulo de 30.0° abajo de la horizontal. Si golpea la superficie de la tierra 57.0 m más allá, encuentre a) el tiempo de vuelo, b) la rapidez inicial y c) la rapidez y el ángulo del vector velocidad con respecto a la horizontal en el impacto. (*Sugerencia:* para el inciso a), aplique la ecuación para el desplazamiento x para eliminar $v_0 t$ de la ecuación para el desplazamiento y .)

RESPUESTAS a) 1.57 s b) 41.9 m/s c) 51.3 m/s , -45.0°

Aceleración constante en dos dimensiones

Hasta ahora hemos estudiado únicamente problemas en los que un objeto con una velocidad inicial sigue una trayectoria determinada sólo por la aceleración de la gravedad. En el caso más general, otros agentes pueden ocasionar aceleraciones, como la fricción con el aire, fricción superficial, o bien, los motores. Estas aceleraciones, consideradas juntas, forman una cantidad vectorial con componentes a_x y a_y . Cuando ambas componentes son constantes, se pueden aplicar las ecuaciones 3.11 y 3.12 para estudiar el movimiento, como en el siguiente ejemplo.

■ EJEMPLO 3.9 El cohete

OBJETIVO Resolver un problema que involucra aceleración en dos direcciones.

PROBLEMA Un avión de reacción viaja horizontalmente con $1.00 \times 10^2 \text{ m/s}$ y deja caer un cohete desde una altura considerable. (Véase la figura 3.22.) Inmediatamente el cohete enciende sus motores acelerando a 20.0 m/s^2 en la dirección x mientras va cayendo bajo la influencia de la gravedad en la dirección y . Cuando el cohete ha caído 1.00 km , halle a) su velocidad en la dirección y , b) su velocidad en la dirección x y c) la magnitud y dirección de su velocidad. Omita la fricción con el aire y la aerodinámica de elevación.

ESTRATEGIA Ya que el cohete mantiene una orientación horizontal (es decir, a través de un giroscopio), los componentes x y y de la aceleración son independientes entre sí.

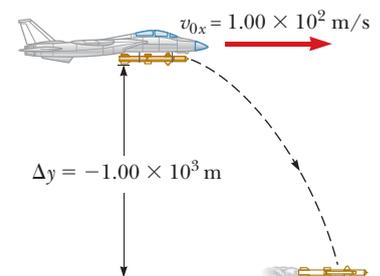


Figura 3.22 (Ejemplo 3.9)

Aplique la ecuación independiente del tiempo para la velocidad en la dirección y para encontrar la componente y de la velocidad después de que el cohete cae 1.00 km. A continuación calcule el tiempo de la caída y utilícelo para encontrar la velocidad en la dirección x .

SOLUCIÓN

a) Halle la velocidad en la dirección y .

Aplique la ecuación 3.14c:

Sustituya $v_{0y} = 0$, $g = -9.80 \text{ m/s}^2$ y $\Delta y = -1.00 \times 10^3 \text{ m}$ y resuelva para v_y :

$$\begin{aligned} v_y^2 &= v_{0y}^2 - 2g\Delta y \\ v_y^2 - 0 &= 2(-9.8 \text{ m/s}^2)(-1.00 \times 10^3 \text{ m}) \\ v_y &= -1.40 \times 10^2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Halle la velocidad en la dirección x .

Encuentre el tiempo que tarda en caer el cohete $1.00 \times 10^3 \text{ m}$, utilice el componente y de la velocidad:

$$\begin{aligned} v_y &= v_{0y} + a_y t \\ -1.40 \times 10^2 \text{ m/s} &= 0 - (9.80 \text{ m/s}^2)t \rightarrow t = 14.3 \text{ s} \end{aligned}$$

Sustituya t , v_0 y a_x en la ecuación 3.11a para encontrar la velocidad en la dirección x :

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} + a_x t = 1.00 \times 10^2 \text{ m/s} + (20.0 \text{ m/s}^2)(14.3 \text{ s}) \\ &= 386 \text{ m/s} \end{aligned}$$

c) Calcule la magnitud y dirección de la velocidad.

Encuentre la magnitud aplicando el teorema de Pitágoras y los resultados de los incisos a) y b):

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(-1.40 \times 10^2 \text{ m/s})^2 + (386 \text{ m/s})^2} \\ &= 411 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Aplique la función tangente inversa para calcular el ángulo: $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_y}{v_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-1.40 \times 10^2 \text{ m/s}}{386 \text{ m/s}}\right) = -19.9^\circ$

COMENTARIOS Observe la analogía: las ecuaciones de cinemática para las direcciones x y y se manejan exactamente de la misma manera. Se tiene una aceleración diferente de cero en la dirección x sin incrementar de manera considerable la dificultad del problema.

PREGUNTA 3.9 Verdadero o Falso: Omite la fricción del aire, un proyectil con una aceleración horizontal permanece en el aire más que un proyectil en caída libre.

EJERCICIO 3.9 Considere una motocicleta impulsada por un cohete que es lanzada horizontalmente desde el reposo por encima de un cañón de 1.00 km de ancho. a) ¿Qué aceleración constante, mínima, deben proporcionar los motores en la dirección x de tal modo que la motocicleta cruce con seguridad si el lado opuesto está 0.750 km más abajo que el punto de partida? b) ¿Con qué rapidez aterriza la motocicleta si se mantiene constante esta componente horizontal de la aceleración? Desprecie la fricción con el aire, pero recuerde que la gravedad todavía actúa en la dirección y negativa.

RESPUESTAS a) 13.1 m/s^2 b) 202 m/s

En un despliegue de destreza parecido al que se describe en el ejercicio 3.9, el temerario motociclista Evel Knievel intentó saltar por encima de Hells Canyon, parte del sistema Snake River en Idaho, en su Harley-Davidson X-2, *Motocicleta del cielo*, impulsada por cohete. Perdió el conocimiento al arranque y liberó una palanca, desplegando de manera prematura su paracaídas y cayendo antes de llegar del otro lado. Aterrizó con seguridad en el cañón.

3.5 Velocidad relativa

La velocidad relativa vincula las mediciones de dos observadores diferentes, uno moviéndose con respecto al otro. La velocidad observada de un objeto depende de la velocidad del observador con respecto al objeto. Por ejemplo, en una autopista los automóviles se mueven frecuentemente en la misma dirección con magnitudes de velocidad considerables con respecto a la superficie de la tierra, pero en relación unos con otros difícilmente se mueven del todo. Para un observador en reposo al lado del camino, un automóvil podría

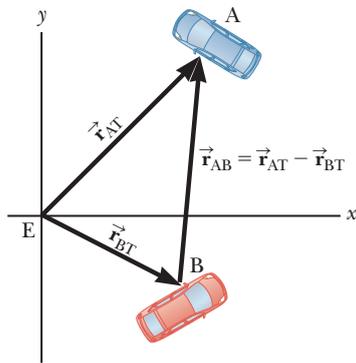


Figura 3.23 La posición del automóvil A relativo al automóvil B se puede hallar mediante resta de vectores. La razón de cambio del vector resultante con respecto al tiempo es la ecuación de velocidad relativa.

estar viajando a 60 mi/h, pero para un observador viajando en un camión en la misma dirección a 50 mi/h, el automóvil parecería estar sólo viajando a 10 mi/h.

Así, la medición de la velocidad depende del **marco de referencia** del observador. Los marcos de referencia son simplemente sistemas coordenados. La mayoría de las veces utilizamos un **marco de referencia estacionario** con respecto a la superficie de la tierra, pero ocasionalmente usaremos un **marco de referencia móvil** asociado con un autobús, automóvil o avión moviéndose con velocidad constante relativa a la superficie de la Tierra.

Los cálculos de la velocidad relativa en dos dimensiones pueden ser confusos, de tal manera que es importante y útil un planteamiento sistemático. Sea T un observador, considerado fijo con respecto a la superficie de la Tierra. Considere dos automóviles etiquetados como A y B e introduzca la siguiente notación (véase la figura 3.23):

\vec{r}_{AT} = posición del automóvil A como lo observa T (en un sistema coordenado fijo con respecto a la tierra).

\vec{r}_{BT} = posición del automóvil B como lo observa T.

\vec{r}_{AB} = posición del automóvil A como se observa desde el automóvil B.

De acuerdo con la notación anterior, la primera letra nos señala hacia dónde apunta el vector, la segunda letra nos indica dónde inicia el vector de posición. Los vectores de posición del automóvil A y del automóvil B relativos a E, \vec{r}_{AT} y \vec{r}_{BT} se muestran en la figura. ¿Cómo determinamos \vec{r}_{AB} , la posición del automóvil A visto desde el automóvil B? Simplemente se dibuja una flecha apuntando a partir del automóvil B hacia el automóvil A, la cual se puede obtener al restar \vec{r}_{BT} de \vec{r}_{AT} :

$$\vec{r}_{AB} = \vec{r}_{AT} - \vec{r}_{BT} \quad [3.15]$$

Ahora, la razón de cambio de estas cantidades con el tiempo nos proporciona la correspondencia entre las velocidades asociadas:

$$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_{AT} - \vec{v}_{BT} \quad [3.16]$$

El sistema coordenado del observador E no necesita estar fijo a la Tierra, aunque frecuentemente lo está. Tome nota cuidadosamente del diseño de los subíndices; en lugar de memorizar la ecuación 3.16 es mejor estudiar la deducción breve a partir de la figura 3.23. Además observe que la ecuación no funciona para observadores viajando a una fracción considerable de la rapidez de la luz, que es cuando la teoría de Einstein de la relatividad especial entra en juego.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Velocidad relativa

1. **Marque** cada objeto que se incluye (por lo general tres) con una letra que le recuerde qué es (por ejemplo, T para la Tierra).
2. **Vea** a través del problema por medio de frases como “La velocidad de A relativa a B” y escriba las velocidades como \vec{v}_{AB} . Cuando se menciona una velocidad, pero no se establece claramente como relativa a algo, casi siempre es relativa a la Tierra.
3. **Tome** las tres velocidades que encontró y arme una ecuación parecida a la ecuación 3.16, con subíndices en un orden similar.
4. **Existirán** dos componentes desconocidos. Resuelva para ellos con los componentes x y y de la ecuación desarrollada en la etapa 3.

■ EJEMPLO 3.10 Practique lanzamientos en el tren

OBJETIVO Resolver un problema de velocidad relativa en una dimensión.

PROBLEMA Un tren viaja con una rapidez de 15.0 m/s relativa a la Tierra. Un pasajero de pie en el fondo del tren lanza una pelota con una rapidez de 15.0 m/s relativa desde el extremo posterior del tren, en la dirección opuesta al movimiento del mismo. **a)** ¿Cuál es la velocidad de la pelota relativa a la Tierra? **b)** ¿Cuál es la velocidad de la pelota con respecto a la Tierra si se tira a la misma velocidad en la dirección opuesta?

ESTRATEGIA Resuelva estos problemas colocando los subíndices adecuados en las velocidades y reordene como en la ecuación 3.16. En la primera oración del enunciado del problema, se informa que el tren viaja a “15.0 m/s relativa a la Tierra”. Esta cantidad es \vec{v}_{Ti} , con T para tren y Ti para Tierra. El pasajero lanza la pelota a “15.0 m/s relativa al tren”, de tal modo que esta cantidad es \vec{v}_{BT} , donde B es

para la pelota. La segunda oración pregunta la velocidad de la pelota relativa a la Tierra, \vec{v}_{BTi} . El resto del problema puede resolverse identificando las componentes correctas de las cantidades conocidas y resolviendo para las incógnitas, aplicando una ecuación semejante a la 3.16. El inciso b) sólo requiere un cambio de signo.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál es la velocidad de la pelota, relativa a la Tierra?

Escriba los componentes x de las cantidades conocidas:

$$\begin{aligned} (\vec{v}_{Ti})_x &= +15 \text{ m/s} \\ (\vec{v}_{BT})_x &= -15 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Siga la ecuación 3.16:

$$(1) (\vec{v}_{BT})_x = (\vec{v}_{BTi})_x - (\vec{v}_{Ti})_x$$

Sustituya los valores conocidos y resuelva:

$$\begin{aligned} -15 \text{ m/s} &= (\vec{v}_{BTi})_x - 15 \text{ m/s} \\ (\vec{v}_{BTi})_x &= 0 \end{aligned}$$

b) ¿Cuál es la velocidad de la pelota relativa a la Tierra si se tira a la misma la velocidad en la dirección opuesta?

Sustituya $(\vec{v}_{BT})_x = +15 \text{ m/s}$ en la ecuación (1):

$$+15 \text{ m/s} = (\vec{v}_{BTi})_x - 15 \text{ m/s}$$

Resuelva para $(\vec{v}_{BTi})_x$:

$$(\vec{v}_{BTi})_x = +3.0 \times 10^1 \text{ m/s}$$

PREGUNTA 3.10 Describa el movimiento de la pelota como lo vería un observador en la superficie del suelo.

EJERCICIO 3.10 Un tren está viajando a 27 m/s relativa a la Tierra y un pasajero de pie en el tren lanza una pelota a 15 m/s con respecto al tren en la misma dirección con la que éste se mueve. a) Halle la rapidez de la pelota con respecto a la Tierra. b) Repita el ejercicio si la pelota es lanzada en dirección opuesta.

RESPUESTA a) -12 m/s b) -42 m/s

EJEMPLO 3.11 Cruzando un río

OBJETIVO Resolver un problema de movimiento relativo simple en dos dimensiones.

PROBLEMA El bote en la figura 3.24 se dirige hacia el norte cuando cruza un río ancho con una velocidad de 10.0 km/h relativa al agua. El río tiene una velocidad uniforme de 5.00 km/h hacia el este. Calcule la velocidad del bote con respecto a un observador ubicado en la rivera.

ESTRATEGIA Una vez más, vea frases clave. “El bote (tiene)... una velocidad de 10.0 km/h relativa al agua” dada por \vec{v}_{BR} . “El río tiene una velocidad uniforme de 5.00 km/h hacia el este” dada por \vec{v}_{RE} , porque esto involucra velocidad con respecto a la Tierra. El observador en la rivera está en un marco de referencia en reposo con respecto a la Tierra. Ya que se busca la velocidad del bote con respecto a ese observador, esta última velocidad se designa \vec{v}_{BT} . Tome como el este la dirección $+x$ y como el norte la dirección $+y$.

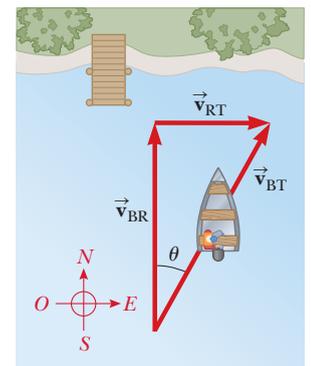


Figura 3.24 (Ejemplo 3.11)

SOLUCIÓN

Ordene las tres ecuaciones dentro de la ecuación de velocidad relativa apropiada:

$$\vec{v}_{BR} = \vec{v}_{BT} - \vec{v}_{RT}$$

(continúa)

Escriba los vectores de velocidad en términos de sus componentes. Por conveniencia, éstos se organizan en la tabla que sigue:

Vector	Componente x (km/h)	Componente y (km/h)
\vec{v}_{BR}	0	10.0
\vec{v}_{BT}	v_x	v_y
\vec{v}_{RT}	5.00	0

Encuentre la componente x de la velocidad:

$$0 = v_x - 5.00 \text{ km/h} \rightarrow v_x = 5.00 \text{ km/h}$$

Halle la componente y de la velocidad:

$$10.0 \text{ km/h} = v_y - 0 \rightarrow v_y = 10.0 \text{ km/h}$$

Calcule la magnitud de \vec{v}_{BT} :

$$v_{BT} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{(5.00 \text{ km/h})^2 + (10.0 \text{ km/h})^2} = 11.2 \text{ km/h}$$

Determine la dirección de \vec{v}_{BT} :

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_x}{v_y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{5.00 \text{ m/s}}{10.0 \text{ m/s}}\right) = 26.6^\circ$$

COMENTARIOS El bote viaja con una rapidez de 11.2 km/h en la dirección 26.6° al noreste con respecto a la Tierra.

PREGUNTA 3.11 Si la rapidez del bote relativa al agua se incrementa, ¿qué le sucede al ángulo?

EJERCICIO 3.11 Considere que el río fluye hacia el este a 3.00 m/s, y el bote está viajando al sur a 4.00 m/s con respecto a la rivera. Determine la rapidez y la dirección del bote relativas a la Tierra.

RESPUESTA 5.00 m/s, 53.1° al sureste

EJEMPLO 3.12 Opuesto a la corriente

OBJETIVO Resolver un problema complejo de movimiento relativo en dos dimensiones.

PROBLEMA Si el capitán del bote del ejemplo 3.11 se mueve con la misma rapidez de 10.0 km/h relativa al agua, pero ahora quiere viajar hacia el norte, como en la figura 3.25a, ¿en qué dirección se dirige? ¿Cuál es la rapidez del bote, de acuerdo con un observador en la rivera? El río está fluyendo al este a 5.00 km/h.

ESTRATEGIA Proceda como en el ejemplo anterior. En esta situación, se debe encontrar la orientación del bote y su velocidad con respecto al agua, utilizando el hecho de que el bote viaja hacia el norte.

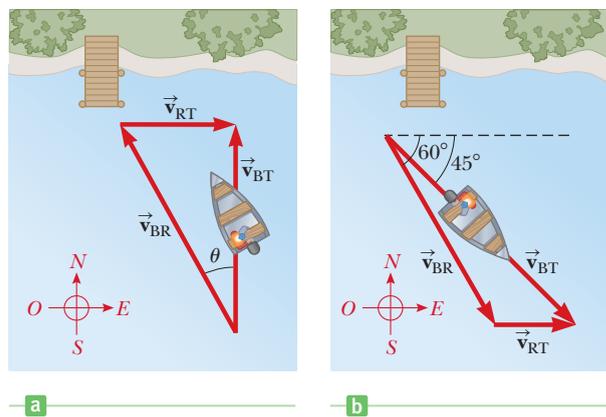


Figura 3.25
a) (Ejemplo 3.12)
b) (Ejercicio 3.12)

SOLUCIÓN

Ordene las tres cantidades, como antes:

$$\vec{v}_{BR} = \vec{v}_{BT} - \vec{v}_{RT}$$

Organice una tabla de componentes de velocidad:

Vector	Componente x (km/h)	Componente y (km/h)
\vec{v}_{BR}	$-(10.0 \text{ km/h}) \sin \theta$	$(10.0 \text{ km/h}) \cos \theta$
\vec{v}_{BT}	0	v
\vec{v}_{RT}	5.00 km/h	0

La componente x de la ecuación de velocidad relativa puede ser utilizada para hallar θ :

$$-(10.0 \text{ m/s}) \sin \theta = 0 - 5.00 \text{ km/h}$$

$$\sin \theta = \frac{5.00 \text{ km/h}}{10.0 \text{ km/h}} = \frac{1.00}{2.00}$$

Aplique la función seno inverso y encuentre θ , que es la orientación del bote, noreste:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1.00}{2.00}\right) = 30.0^\circ$$

La componente y de la ecuación de velocidad relativa se puede utilizar para calcular v :

$$(10.0 \text{ km/h}) \cos \theta = v \rightarrow v = 8.66 \text{ km/h}$$

COMENTARIOS De la figura 3.25, vemos que este problema se puede resolver con el teorema de Pitágoras, porque el problema incluye un triángulo rectángulo: el componente x de la velocidad del bote cancela exactamente la velocidad del río. Cuando éste no es el caso, es necesaria una técnica más general, como se muestra en el ejercicio siguiente. Observe que en el componente x de la ecuación de velocidad relativa se ha incluido un signo menos en el término $-(10.0 \text{ km/h})\sin \theta$ porque el componente x de la velocidad del bote con respecto a la rivera es negativo.

PREGUNTA 3.12 La rapidez en este ejemplo es la misma que en el ejemplo 3.11. ¿Por qué el ángulo no es el mismo que antes?

EJERCICIO 3.12 Considere que el río fluye hacia el este a 5.00 km/h , y el bote viaja a 45.0° al sureste con respecto a la Tierra. Determine a) la rapidez del bote con respecto a la Tierra y b) la rapidez del bote con respecto a la rivera si la orientación del bote es 60.0° al sureste. (Véase la figura 3.25b.) Tendrá que resolver dos ecuaciones con dos incógnitas. (Como alternativa, puede utilizar la ley de senos.)

RESPUESTAS a) 16.7 km/h b) 13.7 km/h

RESUMEN

3.1 Vectores y sus propiedades

Dos vectores \vec{A} y \vec{B} se pueden sumar geoméricamente con el **método del triángulo**. Los dos vectores se dibujan a escala en un papel para graficar, con el extremo inicial del segundo vector ubicado en el extremo final del primero. El vector **resultante** es el vector que se dibuja desde el extremo inicial del primer vector hacia el extremo final del segundo.

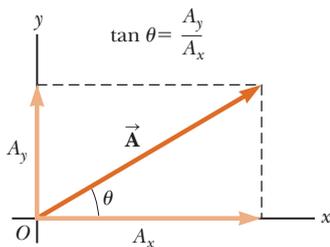
El negativo de un vector \vec{A} es un vector con la misma magnitud que \vec{A} , pero apuntando en la dirección opuesta. Se puede multiplicar un vector por un escalar, cambiando su magnitud y su dirección si el escalar es negativo.

3.2 Componentes de un vector

Un vector \vec{A} puede separarse en dos componentes: uno apuntando en la dirección x y el otro en la dirección y . Estos componentes forman dos lados de un triángulo rectángulo que tiene una hipotenusa con magnitud A y están dados por

$$A_x = A \cos \theta \quad [3.2a]$$

$$A_y = A \sin \theta \quad [3.2b]$$



Un vector puede escribirse en términos de componentes en las direcciones x y y .

La magnitud y dirección de \vec{A} se relacionan con sus componentes a través del teorema de Pitágoras y la definición de la tangente:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \quad [3.3]$$

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x} \quad [3.4]$$

En la ecuación (3.4), $\theta = \tan^{-1}(A_y/A_x)$ da el vector correcto sólo para vectores con $-90^\circ < \theta < 90^\circ$. Si el vector tiene un componente x negativo, se debe agregar 180° a la respuesta en la pantalla de la calculadora.

Si $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$, entonces los componentes del vector resultante \vec{R} son

$$R_x = A_x + B_x \quad [3.5a]$$

$$R_y = A_y + B_y \quad [3.5b]$$

3.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración en dos dimensiones

El desplazamiento de un objeto en dos dimensiones se define como el cambio en el vector de posición del objeto:

$$\Delta \vec{r} \equiv \vec{r}_f - \vec{r}_i \quad [3.6]$$

La velocidad promedio de un objeto durante el intervalo de tiempo Δt es

$$\vec{v}_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad [3.7]$$

Tomando arbitrariamente el límite de esta expresión como un pequeño Δt , obtenemos la velocidad instantánea \vec{v} :

$$\vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad [3.8]$$

La dirección del vector de velocidad instantánea es a lo largo de la recta tangente a la trayectoria del objeto y en la dirección de su movimiento.

La aceleración promedio de un objeto con una velocidad cambiante $\Delta \vec{v}$ en el intervalo de tiempo Δt es

$$\vec{a}_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad [3.9]$$

Tomando arbitrariamente el límite de esta expresión como un pequeño Δt obtenemos el vector aceleración instantánea \vec{a} :

$$\vec{a} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad [3.10]$$

3.4 Movimiento en dos dimensiones

Las ecuaciones generales de cinemática en dos dimensiones para objetos con aceleración constante son, para la dirección x ,

$$v_x = v_{0x} + a_x t \quad [3.11a]$$

$$\Delta x = v_{0x} t + \frac{1}{2} a_x t^2 \quad [3.11b]$$

$$v_x^2 = v_{0x}^2 + 2a_x \Delta x \quad [3.11c]$$

donde $v_{0x} = v_0 \cos \theta_0$, y para la dirección y

$$v_y = v_{0y} + a_y t \quad [3.12a]$$

$$\Delta y = v_{0y} t + \frac{1}{2} a_y t^2 \quad [3.12b]$$

$$v_y^2 = v_{0y}^2 + 2a_y \Delta y \quad [3.12c]$$

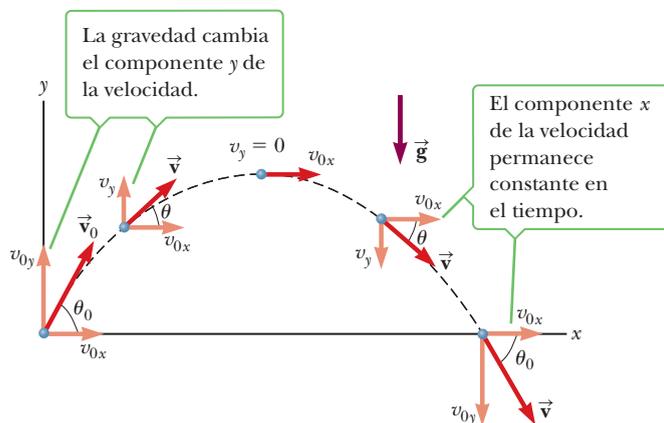
donde $v_{0y} = v_0 \sin \theta_0$. La rapidez v del objeto en cualquier instante puede calcularse a partir de los componentes de velocidad en ese instante utilizando el teorema de Pitágoras:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$$

El ángulo que el vector velocidad forma con el eje x se conoce mediante

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right)$$

Los movimientos horizontal y vertical de un proyectil son completamente independientes uno del otro.



La gravedad actúa sobre el componente y de la velocidad y no tiene ningún efecto en el componente x , lo que demuestra la independencia del movimiento horizontal y vertical de los proyectiles.

Las ecuaciones cinemáticas se adaptan y simplifican fácilmente para proyectiles cercanos a la superficie de la Tierra.

Las ecuaciones en la dirección horizontal, o bien x , son

$$v_x = v_{0x} = v_0 \cos \theta_0 = \text{constante} \quad [3.13a]$$

$$\Delta x = v_{0x} t = (v_0 \cos \theta_0) t \quad [3.13b]$$

mientras que las ecuaciones para el movimiento en la dirección vertical, o bien y , son

$$v_y = v_0 \sin \theta_0 - gt \quad [3.14a]$$

$$\Delta y = (v_0 \sin \theta_0) t - \frac{1}{2} g t^2 \quad [3.14b]$$

$$v_y^2 = (v_0 \sin \theta_0)^2 - 2g \Delta y \quad [3.14c]$$

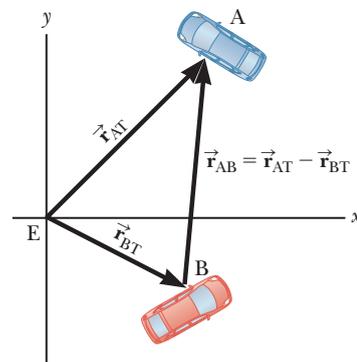
Los problemas son resueltos mediante la manipulación algebraica de una o más de estas ecuaciones, que frecuentemente reduce el sistema a dos ecuaciones con dos incógnitas.

3.5 Velocidad relativa

Sea T un observador fijo y B un segundo observador viajando con velocidad \vec{v}_{BT} como lo observa T. Si T mide la velocidad de un objeto A como \vec{v}_{AT} , entonces B medirá la velocidad de A como

$$\vec{v}_{AB} = \vec{v}_{AT} - \vec{v}_{BT} \quad [3.16]$$

La ecuación 3.16 puede deducirse a partir de la posición relativa entre Δt y tomando el límite cuando Δt tiende a cero.



La razón de cambio de la diferencia de los dos vectores de posición \vec{r}_{AT} y \vec{r}_{BT} al transcurrir el tiempo da como resultado la ecuación de velocidad relativa, ecuación 3.16.

La solución de problemas de velocidad relativa incluye identificar las velocidades adecuadas y marcarlas correctamente, sustituyendo en la ecuación 3.16 y después resolver para las cantidades desconocidas.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un crucero viaja hacia el norte a 4.50 m/s mientras el guardacostas se dirige a 45.0° hacia el noroeste a 5.20 m/s. ¿Cuál es la velocidad del crucero con respecto al guardacostas? a) $v_x = 3.68$ m/s; $v_y = 0.823$ m/s b) $v_x = -3.68$ m/s; $v_y = 8.18$ m/s c) $v_x = 3.68$ m/s; $v_y = 8.18$ m/s d) $v_x = -3.68$ m/s; $v_y = -0.823$ m/s e) $v_x = 3.68$ m/s; $v_y = 1.82$ m/s
- Un esquiador deja el extremo de una rampa horizontal de salto a 22.0 m/s y cae 3.20 m antes de aterrizar. Omitiendo la fricción, ¿qué distancia horizontal recorre el esquiador en el aire antes de aterrizar? a) 9.8 m b) 12.2 m c) 14.3 m d) 17.8 m e) 21.6 m
- Una catapulta lanza una gran piedra con un rapidez de 45.0 m/s formando un ángulo de 55.0° con la horizon-

- tal. ¿Qué altura máxima alcanza la piedra? (Omita la fricción del aire.) a) 45.7 m b) 32.7 m c) 69.3 m d) 83.2 m e) 102 m
- Un vector que se encuentra en el plano xy tiene componentes de signo opuesto. ¿En qué cuadrante debe estar el vector? a) el primer cuadrante b) el segundo cuadrante c) el tercer cuadrante d) el cuarto cuadrante e) en el segundo o cuarto cuadrantes
 - Un astronauta de la NASA golpea una pelota de golf en la Luna. ¿Cuál de las cantidades que siguen, si existe alguna, permanece constante conforme la pelota viaja a través del vacío lunar? a) rapidez b) aceleración c) velocidad d) componente horizontal de la velocidad e) componente vertical de la velocidad
 - Un automóvil que se mueve con rapidez constante alrededor de una pista circular a) tiene aceleración cero, b) tiene una componente de aceleración en la dirección de su velocidad, c) tiene una aceleración dirigida alejándose desde el centro de su trayectoria, d) tiene una aceleración dirigida hacia el centro de su trayectoria, o bien e) tiene una aceleración con una dirección que no se puede determinar a partir de la información que se proporciona.
 - Un atleta corre tres cuartos del camino alrededor de una pista circular. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? a) Su rapidez promedio es mayor que la magnitud de su velocidad promedio. b) La magnitud de su velocidad promedio es mayor que su rapidez promedio. c) Su rapidez promedio es igual a la magnitud de su velocidad promedio. d) Su rapidez promedio es la misma que la magnitud de su velocidad promedio si su rapidez instantánea es constante. e) Ninguno de los enunciados desde a) hasta d) es verdadero.
 - Se lanza un proyectil desde la superficie de la Tierra con una cierta velocidad inicial y en un ángulo por encima de la horizontal, alcanzando su altura máxima después del tiempo $t_{\text{máx}}$. Se lanza otro proyectil con la misma velocidad inicial y ángulo desde la superficie de la Luna, donde la aceleración de la gravedad es un sexto de aquella de la Tierra. Omitiendo la resistencia del aire (en la Tierra) y variaciones en la aceleración de la gravedad con la altura, ¿cuánto tiempo le toma al proyectil en la Luna alcanzar su altura máxima? a) $t_{\text{máx}}$ b) $t_{\text{máx}}/6$ c) $\sqrt{6}t_{\text{máx}}$ d) $36t_{\text{máx}}$ e) $6t_{\text{máx}}$
 - Un marinero deja caer una llave de tuercas desde la parte superior de un mástil vertical del velero mientras el bote se mueve rápido y fijamente recto hacia adelante. ¿Dónde

golpeará la llave la cubierta? a) delante de la base del mástil b) en la base del mástil c) detrás de la base del mástil d) en el lado de la base del mástil hacia el viento e) ninguna de las elecciones desde a) hasta d) es correcta.

- Se lanza una pelota de béisbol desde los jardines hacia el receptor. Cuando la pelota alcanza su punto más alto, ¿qué enunciado es verdadero? a) Su velocidad y su aceleración ambas son cero. b) Su velocidad no es cero, pero su aceleración es cero. c) Su velocidad es perpendicular a su aceleración. d) Su aceleración depende del ángulo en el cual se lanzó la pelota. e) Ninguno de los enunciados desde a) hasta d) es verdadero.
- Un estudiante lanza una pesada pelota roja desde el balcón de un edificio alto con una rapidez inicial v_0 . Al mismo tiempo, un segundo estudiante deja caer una pelota azul ligera desde el mismo balcón. Omitiendo la resistencia del aire, ¿cuál enunciado es verdadero? a) La pelota azul llega primero a la superficie del suelo. b) Las pelotas alcanzan la superficie del suelo al mismo tiempo. c) La pelota roja llega primero a la superficie del suelo. d) Las dos pelotas golpean la superficie del suelo con la misma rapidez. e) Ninguno de los enunciados desde a) hasta d) es verdadero.
- Conforme se transporta un manzano en un camión que se mueve hacia la derecha con una velocidad constante, al agitarse uno de sus frutos se desprende y cae hacia el fondo del camión. De las curvas que se muestran en la figura POM3.12, i) ¿cuál describe mejor la trayectoria que sigue la manzana que ve un observador fijo en la superficie del suelo, que observa que el camión se mueve desde su izquierda hacia su derecha? ii) ¿Cuál describe mejor la trayectoria que ve un observador sentado en el camión?



Figura POM3.12

- ¿Cuáles de las siguientes cantidades son vectores? a) la velocidad de un automóvil deportivo b) la temperatura c) el volumen de agua en una lata d) el desplazamiento a la red de un jugador de tenis desde la línea de saque de la cancha e) la altura de un edificio

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si \vec{B} se suma a \vec{A} , ¿bajo qué condiciones el vector resultante tiene una magnitud igual a $A + B$? ¿Bajo qué condiciones el vector resultante es igual a cero?
- ¿Bajo qué condiciones un vector tendría componentes que son iguales en magnitud?
- A medida que un proyectil se mueve en su trayectoria, ¿existe algún punto a lo largo de ésta donde los vectores de velocidad y aceleración son a) perpendiculares entre sí b) paralelos entre sí?
- Construya diagramas de movimiento que muestren la velocidad y la aceleración de un proyectil en varios puntos

- a lo largo de su trayectoria, suponiendo que a) el proyectil es lanzado horizontalmente y b) el proyectil es lanzado en un ángulo θ con la horizontal.
- Explique si las siguientes partículas tienen o no una aceleración: a) una partícula se mueve en una línea recta con rapidez constante y b) una partícula se mueve alrededor de una curva con rapidez constante.
 - Se lanza horizontalmente una pelota desde la parte superior de un edificio. Un segundo después se lanza horizontalmente otra pelota desde el mismo punto con la misma velocidad. ¿En qué punto del movimiento las pelotas estarán más cerca una de otra? ¿Cuál será la diferencia de tiempo entre ellas cuando las pelotas golpeen la superficie de la tierra? ¿Puede cambiarse la velocidad de lanzamiento de la segunda pelota de tal manera que lleguen a la superficie del suelo en el mismo instante?
 - Una nave se desplaza a través del espacio con una velocidad constante. Súbitamente, una fuga lateral de gas en la nave provoca que se acelere de manera constante en una dirección perpendicular a la velocidad inicial. La orientación de la nave no cambia, de tal manera que la aceleración permanece perpendicular a la dirección original de la velocidad. ¿Cuál es la forma de la trayectoria seguida por la nave?
 - Establezca cuáles de los siguientes objetos móviles obedecen las ecuaciones de movimiento de proyectil desarrolladas en este capítulo. a) Una pelota es lanzada en una dirección arbitraria. b) Un *jet* cruza el cielo con sus motores impulsándolo hacia adelante. c) Un cohete abandona la plataforma de lanzamiento. d) Un cohete se mueve a través del cielo después de que sus motores han fallado. e) Una piedra es lanzada bajo el agua.
 - Dos proyectiles son lanzados con la misma rapidez inicial, uno en un ángulo θ con respecto al nivel de la superficie del suelo y el otro en ángulo $90^\circ - \theta$. Los dos proyectiles golpean la superficie del suelo a la misma distancia desde el punto de lanzamiento. ¿Los dos proyectiles están en el aire la misma cantidad de tiempo?
 - Una pelota es lanzada hacia arriba en el aire por un pasajero en un tren que se mueve con velocidad constante. a) Describa la trayectoria de la pelota como la ve el pasajero. Describa la trayectoria como la ve un observador fijo en el exterior del tren. b) ¿Cómo cambiarían estas observaciones si el tren estuviera acelerando a lo largo de la vía?
 - Un proyectil es lanzado en un ángulo con la horizontal con alguna velocidad inicial v_i y la resistencia del aire es insignificante. a) ¿Es el proyectil un cuerpo en caída libre? b) ¿Cuál es su aceleración en la dirección vertical? c) ¿Cuál es su aceleración en la dirección horizontal?

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

3.1 Vectores y sus propiedades

- El vector \vec{A} tiene una magnitud de 29 unidades y apunta en la dirección y positiva. Cuando el vector \vec{B} se suma a \vec{A} , el vector resultante $\vec{A} + \vec{B}$ apunta en la dirección y negativa con una magnitud de 14 unidades. Determine la magnitud y dirección de \vec{B} .
- El vector \vec{A} tiene una magnitud de 8.00 unidades y forma un ángulo de 45.0° con el eje x positivo. También el vector \vec{B} tiene una magnitud de 8.00 unidades y se dirige a lo largo del eje x negativo. Aplicando métodos gráficos, determine a) el vector suma $\vec{A} + \vec{B}$ y b) el vector diferencia $\vec{A} - \vec{B}$.
- I.** El vector \vec{A} es de 3.00 unidades de longitud y apunta a lo largo del eje x positivo. El vector \vec{B} es de 4.00 unidades de longitud y apunta a lo largo del eje y negativo. Aplique métodos gráficos para encontrar la magnitud y dirección de los vectores a) $\vec{A} + \vec{B}$ y b) $\vec{A} - \vec{B}$.
- C|C** Tres desplazamientos son $\vec{A} = 200$ m hacia el sur, $\vec{B} = 250$ m al oeste y $\vec{C} = 150$ m en 30.0° al noreste. a) Elabore un diagrama por separado para cada una de las siguientes formas posibles de la suma de estos vectores: $\vec{R}_1 = \vec{A} + \vec{B} + \vec{C}$; $\vec{R}_2 = \vec{B} + \vec{C} + \vec{A}$; $\vec{R}_3 = \vec{C} + \vec{B} + \vec{A}$. b) Explique lo que se puede concluir a partir de la comparación de los diagramas.
- Un vagón en una montaña rusa se mueve 200 pies horizontalmente y después se eleva 135 pies en un ángulo de 30.0° arriba de la horizontal. A continuación, viaja 135 pies en un ángulo de 40.0° debajo de la horizontal. Aplique técnicas gráficas para encontrar el desplazamiento del vagón en la montaña rusa desde el punto de partida al extremo de este movimiento.
- C|C** Un avión vuela 200 km hacia el oeste desde la ciudad A hacia la ciudad B, y después 300 km en la dirección 30.0° al noroeste desde la ciudad B a la ciudad C. a) En

línea recta, ¿a qué distancia está la ciudad C desde la ciudad A? b) Con respecto a la ciudad A, ¿en qué dirección está la ciudad C? c) ¿Por qué la respuesta sólo es aproximadamente correcta?

7. Un avión vuela desde su base hacia el lago A, una distancia de 280 km en una dirección de 20.0° al noreste. Después de agotarse el combustible, el avión vuela hacia el lago B, que está a 190 km y 30.0° al noroeste desde el lago A. Establezca gráficamente la distancia y la dirección desde el lago B hacia la base.

8. Una fuerza \vec{F}_1 de magnitud 6.00 unidades actúa sobre un objeto en el origen en una dirección $\theta = 30.0^\circ$ por encima del eje x positivo (figura P3.8). Una segunda fuerza \vec{F}_2 de magnitud 5.00 unidades actúa en el objeto en la dirección positiva del eje y . Encuentre gráficamente la magnitud y dirección de la fuerza resultante $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

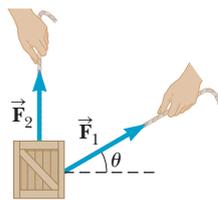


Figura P3.8

9. Un hombre perdido en un laberinto hace tres desplazamientos consecutivos de tal manera que al final de su viaje está justo de regreso donde comenzó. El primer desplazamiento es 8.00 m hacia el oeste, y el segundo es 13.0 m hacia el norte. Utilice el método gráfico para hallar la magnitud y dirección del tercer desplazamiento.

3.2 Componentes de un vector

10. Una persona camina 25.0° al noreste 3.10 kilómetros. ¿Qué tan lejos al norte y qué tan lejos al este tendrá que caminar para llegar al mismo lugar?
11. La magnitud de un vector \vec{A} es 35.0 unidades y apunta en la dirección 325° en el sentido contrario a las manecillas del reloj desde el eje x positivo. Calcule los componentes x y y de este vector.
12. Un patinador artístico se desliza a lo largo de una trayectoria circular de 5.00 m de radio. Si se desliza sólo una mitad alrededor del círculo, determine a) la magnitud del vector de desplazamiento y b) qué distancia patinó. c) ¿Cuál es la magnitud del desplazamiento si patina todo el camino alrededor del círculo?

13. Una chica que entrega periódico cubre su ruta viajando 3.00 calles al oeste, 4.00 calles al norte y después 6.00 calles al este. a) ¿Cuál es su desplazamiento resultante? b) ¿Cuál es la distancia total que viajó?

14. **CIC** Un excursionista parte de su campamento y se desplaza las siguientes distancias mientras explora sus alrededores: 75.0 m al norte, 2.50×10^2 m al este, 125 m en un ángulo de 30.0° al noreste y 1.50×10^2 m al sur. a) Determine el desplazamiento resultante desde el campamento. (Considere el este como la dirección x positiva y el norte como la dirección y positiva.) b) ¿Cambiar el orden en el que el excursionista hace los desplazamientos conocidos alteraría su posición final? Explique.

15. Un vector tiene un componente x de -25.0 unidades y un componente y de 40.0 unidades. Determine la magnitud y dirección del vector.

16. Un mariscal de campo toma el balón desde la línea de golpeo, corre hacia atrás 10.0 yardas y a continuación corre lateralmente en paralelo a la línea de golpeo 15.0 yardas. En este punto lanza un pase recto de 50.0 yardas hacia adelante, perpendicular a la línea de golpeo. ¿Cuál es el desplazamiento resultante del balón?

17. **M** El ojo de un huracán pasa sobre la isla Grand Bahama en una dirección 60.0° al noroeste con una rapidez de 41.0 km/h. Tres horas después el curso del huracán cambia repentinamente hacia el norte, y su rapidez disminuye a 25.0 km/h. ¿A qué distancia desde Grand Bahama está el huracán 4.50 h después de que pasa sobre la isla?

18. Un pequeño mapa muestra que Atlanta está a 730 millas en dirección 5.00° al noreste desde Dallas. El mismo mapa muestra que Chicago está a 560 millas en dirección 21.0° al noroeste desde Atlanta. Considere que la Tierra es plana y utilice la información que se proporciona para hallar el desplazamiento desde Dallas hasta Chicago.



Figura P3.18

19. Una aeronave parte desde un aeropuerto y toma la ruta que se muestra en la figura P3.19. La nave primero vuela hacia la ciudad A, localizada a 175 km en dirección 30.0° al noreste. A continuación, vuela 150 km 20.0° al oeste del norte, hacia la ciudad B. Por último, la nave vuela 190 km hacia el oeste, hacia la ciudad C. Determine la ubicación de la ciudad C con respecto al punto de partida.

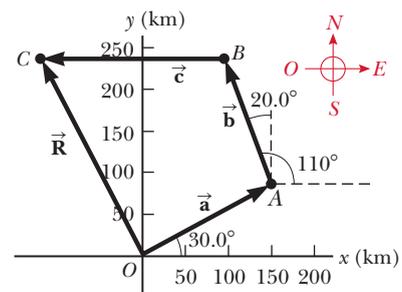


Figura P3.19

20. La vista desde un helicóptero en la figura P3.20 muestra a dos individuos jalando una mula testaruda. Determine a) la fuerza simple que es equivalente a las dos fuerzas que se muestran y b) la fuerza que tendría que ejercer una tercera persona sobre la mula para que la fuerza neta sea cero. Las fuerzas se miden en newtons (N).

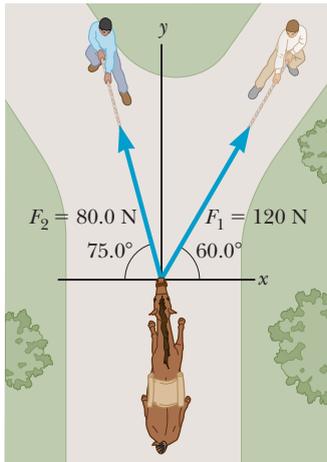


Figura P3.20

21. Un golfista novato hace tres golpes para meter la pelota. Los desplazamientos consecutivos de la pelota son 4.00 m hacia el norte, 2.00 m al noreste y 1.00 m 30.0° al suroeste (figura P3.21). Partiendo del mismo punto inicial, ¿un golfista experto podría hacer el hoyo en un solo desplazamiento?

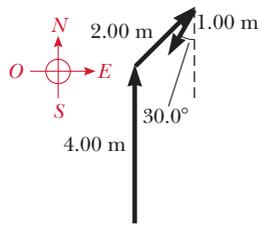


Figura P3.21

3.3 Desplazamiento, velocidad y aceleración en dos dimensiones

3.4 Movimiento en dos dimensiones

22. Uno de los lanzamientos más rápidos registrados en las ligas mayores de béisbol fue hecho por Tim Lincecum a 101 mi/h en el 2009 (figura P3.22). Si alguien lanzara horizontalmente con esta velocidad, ¿a qué distancia caería verticalmente la bola al momento de alcanzar el plato de bateo, a 60.5 pies?



Figura P3.22 Tim Lincecum lanza una pelota de béisbol.

23. **PG** Un estudiante está en el borde de un acantilado y lanza horizontalmente una piedra sobre el borde con una rapidez de 18.0 m/s. El acantilado está a 50.0 m arriba de una playa plana y horizontal, como se muestra en la figura P3.23. a) ¿Cuáles son las coordenadas de la posición inicial de la piedra? b) ¿Cuáles son los componentes de la

velocidad inicial? c) Escriba las ecuaciones para los componentes x y y de la velocidad de la piedra con el tiempo. d) Escriba las ecuaciones para la posición de la piedra con el tiempo, utilizando las coordenadas de la figura P3.23. e) ¿En cuánto tiempo, después de liberada, la piedra golpea la playa abajo del acantilado? f) ¿Con qué rapidez y en qué ángulo de impacto aterriza la piedra?

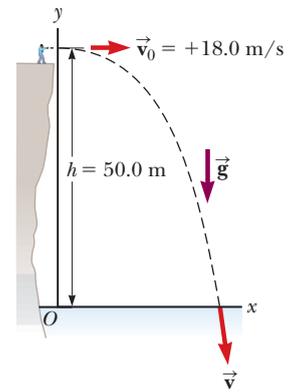


Figura P3.23

24. **CIC S** Una roca se lanza hacia arriba desde el nivel del suelo de tal manera que la altura máxima de su vuelo es igual a su alcance horizontal R . a) ¿En qué ángulo θ es lanzada la piedra? b) En términos del alcance R original, ¿cuál es el alcance $R_{\text{máx}}$ que la roca puede alcanzar si se lanza a la misma velocidad, pero en el ángulo óptimo para el alcance máximo? c) ¿Cambiaría su respuesta al inciso a) si la roca se lanza con la misma velocidad en un planeta diferente? Explique.
25. El mejor saltador en el reino animal es el puma, que puede saltar una altura de 3.7 m cuando deja la superficie de la tierra en un ángulo de 45° . ¿Con qué rapidez, en unidades SI, el animal debe dejar la superficie de la tierra para alcanzar esa altura?
26. **CIC** La distancia más larga registrada en el deporte de lanzamiento de pacas de paja es 81.1 m. Este registro de lanzamiento fue conseguido por Steve Urner de Estados Unidos en 1981. Suponiendo que el ángulo de lanzamiento inicial fue 45° y omitiendo la resistencia del aire, establezca a) la rapidez inicial del proyectil y b) el tiempo total de vuelo del proyectil. c) Cualitativamente, ¿cómo cambiarían las respuestas si el ángulo de lanzamiento fuera mayor que 45° ? Explique.
27. **M** Un pateador debe golpear un balón de fútbol desde un punto 36.0 m (40 yardas) de la línea de gol. La mitad de la gente espera que la pelota esquive el travesaño, que tiene 3.05 m de alto. Cuando es pateado, el balón deja el suelo con una velocidad de 20.0 m/s en un ángulo de 53.0° con la horizontal. a) ¿Por cuánto la pelota esquiva el travesaño o no llega a él? b) ¿La pelota se acerca al travesaño mientras sigue subiendo o al caer?
28. **PG** Desde la ventana de un edificio, se lanza una pelota desde una altura y_0 sobre la superficie del suelo con una velocidad inicial de 8.00 m/s y en un ángulo de 20.0° debajo de la horizontal. Golpea la superficie de la tierra 3.00 s después. a) Si la base del edificio se toma como el origen de las coordenadas, con la dirección y positiva hacia arriba, ¿cuáles son las coordenadas iniciales de la pelota? b) Con la dirección x positiva elegida hacia afuera de la ventana, determine los componentes x y y de la velocidad inicial. c) Determine las ecuaciones para los componentes x y y de la posición como función del tiempo. d) ¿A qué distancia horizontal desde la base del edificio la pelota golpea la superficie de la tierra? e) Determine

la altura de la cual se lanzó la pelota. f) ¿Cuánto tiempo le toma a la pelota alcanzar un punto 10.0 m debajo del nivel de lanzamiento?

29. Se lanza un ladrillo hacia arriba desde la parte superior de un edificio, en un ángulo de 25° con la horizontal y con una rapidez inicial de 15 m/s. Si el ladrillo está en vuelo por 3.00 s, ¿qué tan alto es el edificio?
30. Se dispara un proyectil de artillería con una velocidad inicial de 300 m/s a 55.0° sobre la horizontal. Para evitar una avalancha, explota 42.0 s después del disparo en la ladera de una montaña. ¿Cuáles son las coordenadas x y y donde explota el proyectil, con respecto a su punto de disparo?
31. Un automóvil está estacionado en lo alto de un mirador sobre el océano con una inclinación que forma un ángulo de 24.0° bajo la horizontal. El negligente conductor deja el automóvil en neutral y el freno de mano está defectuoso. El automóvil empieza a moverse desde el reposo por el plano inclinado con una aceleración constante de 4.00 m/s^2 una distancia de 50.0 m hacia el borde del mirador, que está a 30.0 m sobre el océano. Determine a) la posición del automóvil con respecto a la base del mirador cuando el automóvil cae en el océano y b) la cantidad de tiempo que el automóvil está en el aire.
32. Un bombero que está a $d = 50.0 \text{ m}$ de un edificio en llamas dirige un chorro de agua desde el nivel del pavimento en un ángulo de $\theta_i = 30.0^\circ$ sobre la horizontal (figura P3.32). Si la rapidez con la que el chorro sale de la manguera es $v_i = 40.0 \text{ m/s}$, ¿a qué altura el chorro de agua golpeará el edificio?

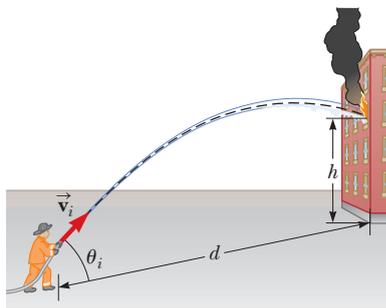


Figura P3.32

33. Se lanza un proyectil con una rapidez inicial de 60.0 m/s en un ángulo de 30.0° sobre la horizontal. El proyectil aterriza en la ladera de una colina 4.00 s después. Omítala fricción del aire. a) ¿Cuál es la velocidad del proyectil en el punto más alto de su trayectoria? b) ¿Cuál es la distancia en línea recta desde donde el proyectil fue lanzado hasta el sitio en que éste da en su objetivo?
34. Un patio de juegos está en la azotea de una escuela de la ciudad, 6.00 m por encima de la calle (figura P3.34). La pared vertical del edificio es $h = 7.00 \text{ m}$ de altura, para formar una baranda 1 m de altura alrededor del patio de

recreo. Una pelota ha caído a la calle, y un transeúnte la devuelve con el lanzamiento en un ángulo de $\theta = 53.0^\circ$ sobre la horizontal en un punto $d = 24.0 \text{ m}$ desde la base de la pared del edificio. La pelota tarda 2.20 s para llegar a un punto de la pared vertical. a) Encuentre la velocidad a la que se lanzó la pelota. b) Halle la distancia vertical con la que la bola rebasa la pared. c) Determine la distancia horizontal desde la pared hasta el punto en el techo donde cae la pelota.

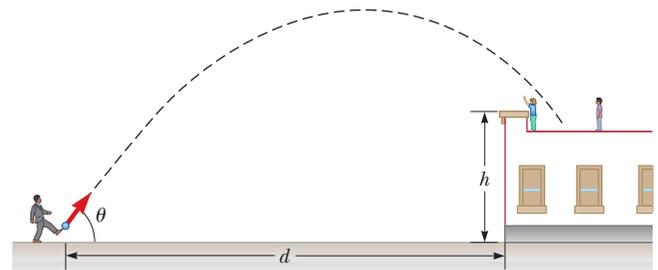


Figura P3.34

3.5 Velocidad relativa

35. **PG** Un *jet* comercial que se mueve inicialmente a 3.00×10^2 millas/h hacia el este, entra en una región donde el viento está soplando a $1.00 \times 10^2 \text{ mi/h}$ en una dirección 30.0° al noreste. a) Determine los componentes de la velocidad del *jet* con respecto al aire, \vec{v}_{JA} . b) Determine los componentes de la velocidad del aire relativos a la Tierra, \vec{v}_{AT} . c) Escriba una ecuación parecida a la ecuación 3.16 para las velocidades \vec{v}_{JA} , \vec{v}_{AT} y \vec{v}_{JT} . d) ¿Cuál es la rapidez y dirección de la nave relativas a la superficie del suelo?
36. **M** Un automóvil viaja hacia el este con una velocidad de 50.0 km/h. Las gotas de lluvia están cayendo a una velocidad constante verticalmente con respecto a la Tierra. Las huellas de la lluvia en las ventanas laterales del coche forman un ángulo de 60.0° con la vertical. Encuentre la velocidad de la lluvia con respecto a a) el coche y b) la Tierra.
37. **CIC** Un rayo cae en el techo de un vagón de tren en movimiento que está acelerando hacia el norte a una razón de 2.50 m/s^2 . a) ¿Cuál es la aceleración del rayo con respecto al vagón de tren? b) ¿Cuál es la aceleración del rayo en relación con la Tierra? c) Describa la trayectoria del rayo vista por un observador fijo en la Tierra.
38. Un guardacostas detecta un buque no identificado a una distancia de 20.0 km en dirección 15.0° al noreste. El buque navega a 26.0 km/h en un curso de 40.0° al noreste. La Guardia Costera desea enviar una lancha rápida para interceptar e investigar la nave. a) Si la lancha viaja a 50.0 km/h, ¿en qué dirección podría adelantarse? Expresé la dirección como en una brújula con respecto al norte. b) Encuentre el tiempo necesario para que la lancha intercepte el buque.
39. Un avión mantiene una velocidad de 630 km/h relativa al aire a través del que está volando, al hacer un viaje a

una ciudad a 750 kilómetros de distancia hacia el norte.

- a) ¿Qué intervalo de tiempo es necesario para el viaje si el avión vuela a través de un viento en contra que sopla a 35.0 km/h hacia el sur? b) ¿Qué intervalo de tiempo es necesario si hay un viento de cola con la misma velocidad? c) ¿Qué intervalo de tiempo es necesario si hay un viento lateral que sopla a 35.0 km/h hacia el este relativo a la tierra?
40. **BIO** Suponga que un salmón Chinook necesita saltar una cascada de 1.50 m de alto. Si el pez inicia desde una distancia de 1.00 m a partir de la base de la saliente sobre la cual fluye la cascada, determine los componentes x y y de la velocidad inicial que el salmón necesitaría para alcanzar precisamente la saliente en la parte superior de su trayectoria. ¿Puede el pez realizar este salto? (Recuerde que un salmón Chinook puede saltar fuera del agua con una rapidez de 6.26 m/s.)
41. **CIC** Un río tiene una rapidez estable de 0.500 m/s. Un estudiante nada corriente arriba una distancia de 1.00 km y nada de regreso al punto de partida. a) Si el estudiante puede nadar con una rapidez de 1.20 m/s en aguas tranquilas, ¿cuánto tiempo le toma el viaje? b) ¿Cuánto tiempo se requiere en aguas tranquilas para la misma distancia de nado? c) Intuitivamente, ¿por qué el nado le toma más tiempo cuando existe una corriente?
42. **CIC S** *Ésta es una versión simbólica del problema 41.* Un río tiene una rapidez estable de v_r . Un estudiante nada corriente arriba una distancia d y regresa al punto de partida. a) Si el estudiante puede nadar con una rapidez v en aguas tranquilas, ¿cuánto tiempo t_{arriba} le toma al estudiante nadar corriente arriba una distancia d ? Expresar la respuesta en términos de d , v y v_r . b) Utilice las mismas variables, ¿cuánto tiempo t_{abajo} le toma nadar de regreso corriente abajo hacia el punto de partida? c) Sume las respuestas encontradas en los incisos a) y b) y muestre que el tiempo t_a necesario para el viaje completo puede ser rescrito como

$$t_a = \frac{2d/v}{1 - v_r^2/v^2}$$

- d) ¿Cuánto tiempo t_b le toma al viaje en aguas tranquilas? e) ¿Cuál es el tiempo mayor, t_a o bien t_b ? ¿Siempre es así?
43. Un bombardero vuela horizontalmente sobre un terreno a nivel con una rapidez de 275 m/s relativa a la superficie del suelo y con una altitud de 3.00 km. a) El bombardero libera una bomba. ¿Qué distancia viaja la bomba horizontalmente entre su liberación y su impacto sobre la superficie? Omita los efectos de la resistencia del aire. b) De repente, disparos de la gente en tierra, imposibilitan al bombardero antes de que pueda decir, “¡Bombas fuera!” Por lo tanto, el piloto mantiene el curso original de la nave, altitud y rapidez a través de una tormenta antiaérea. ¿Dónde está la nave con respecto al punto de impacto de la bomba cuando ésta golpea en la superficie de la tierra? c) La nave tiene un visor de bombardeo telescópico ajustado de tal manera que la bomba acierte en el blanco visto en el visor en el momento de liberarla. ¿En qué ángulo desde la vertical se ajusta el visor de bombardeo?

Problemas adicionales

44. **S** Una pasarela móvil en un aeropuerto tiene una rapidez v_1 y una longitud L . Una mujer sobre la pasarela se mueve desde un extremo hacia el otro, mientras que un hombre se apresura para alcanzar su vuelo caminando sobre la pasarela con rapidez v_2 relativa a la pasarela móvil. a) ¿Cuánto tiempo le toma a la mujer recorrer la distancia L ? b) ¿Cuánto tiempo le toma al hombre viajar esta distancia?
45. ¿Cuánto tiempo le toma a un automóvil viajando en el carril izquierdo de una autopista a 60.0 km/h alcanzar (a la par) a otro automóvil que viaja en el carril derecho a 40.0 km/h cuando las defensas delanteras de los automóviles inicialmente están separadas 100 m?
46. Puede aplicar cualquier sistema coordenado parecido para resolver un problema de movimiento de proyectil. Para demostrar la verdad del enunciado, considere una pelota lanzada desde la parte superior de un edificio con una velocidad \vec{v} en un ángulo θ con respecto a la horizontal. La altura del edificio es de 50.0 m, la velocidad inicial horizontal es de 9.00 m/s, y la velocidad inicial vertical es de 12.0 m/s. Seleccione sus coordenadas tal que el eje y positivo esté hacia arriba y el eje x esté hacia la derecha y el origen se encuentre en el punto donde la pelota se libera. a) Con esta selección, determine la altura máxima de la pelota sobre la superficie del suelo y el tiempo que le toma alcanzar la altura máxima. b) Reproduzca sus cálculos seleccionando el origen en la base del edificio.
47. **CIC** Un saltador escandinavo salta en esquí en un ángulo de 10.0° debajo de la horizontal, viaja 108 m de manera horizontal y 55.0 m verticalmente antes de aterrizar. a) Omitiendo los efectos de fricción y aerodinámicos, calcule la rapidez necesaria del esquiador al dejar la rampa. b) Los saltadores escandinavos olímpicos pueden realizar tales saltos con una rapidez de 23.0 m/s, que es considerablemente menor que la respuesta encontrada en el inciso a). Explique cómo es posible esto.
48. **S** En un restaurante, un cliente desliza una taza vacía para café sobre el mostrador para una segunda carga. La taza se desliza fuera del mostrador y golpea el piso a una distancia d desde la base del mostrador. Si su altura es h , a) determine una expresión para el tiempo t que le toma a la taza caer al piso en términos de las variables h y g . b) ¿Con qué rapidez deja la taza el mostrador? Responda en términos de las variables d , g y h . c) En los mismos términos, ¿cuál es la rapidez de la taza inmediatamente antes de que golpee el suelo? d) En términos de h y d , ¿cuál es la dirección de la velocidad de la taza inmediatamente antes de que golpee el suelo?
49. **M** Las ciudades A y B en la figura P3.49 están separadas 80.0 km. Una pareja se pone de acuerdo para reunirse en el lago, L, conduciendo, una desde la ciudad A y la otra desde la ciudad B. Salen simultáneamente y conducen 2.50 h en las direcciones mostradas. El automóvil 1 tiene una rapidez de 90.0 km/h. Si los automóviles llegan de manera simultánea al lago, ¿cuál es la rapidez del automóvil 2?

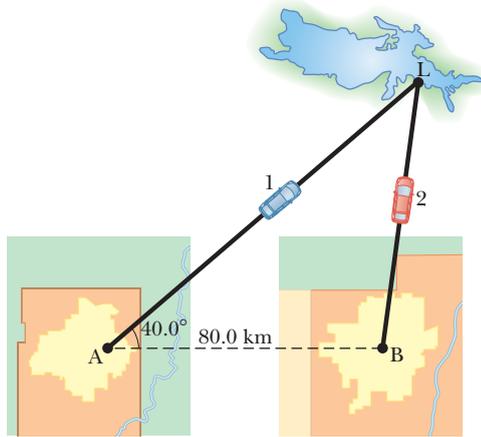


Figura P3.49

50. **BIO** Un salmón Chinook tiene una rapidez máxima bajo el agua de 3.58 m/s , pero puede saltar fuera de ella con una rapidez de 6.26 m/s . Al moverse corriente arriba más allá de una cascada el salmón no necesita saltar hacia la parte superior de la caída, sino sólo apuntar a donde la rapidez del agua es menor que 3.58 m/s , después puede nadar hacia arriba de la caída lo que le queda de la distancia. Ya que el salmón debe avanzar hacia adelante en el agua, suponga que puede nadar hacia la parte superior si la rapidez del agua es 3.00 m/s . Si el agua tiene una rapidez de 1.50 m/s cuando pasa sobre una saliente, ¿a qué distancia debajo de la saliente el agua se moverá con una rapidez de 3.00 m/s ? (Observe que el agua experimenta movimiento de proyectil una vez que deja la saliente.) Si el salmón es capaz de saltar verticalmente desde la base de la caída, ¿cuál es la altura máxima de la cascada que el salmón puede librar?

51. Se lanza un cohete en un ángulo de 53.0° sobre la horizontal con una rapidez inicial de 100 m/s . El cohete se mueve por 3.00 s a lo largo de su línea inicial de movimiento con una aceleración de 30.0 m/s^2 . En este momento, sus motores fallan, y el cohete procede a moverse como un proyectil. Determine a) la altitud máxima que alcanza el cohete, b) su tiempo total de vuelo y c) su alcance horizontal.

52. Dos remeros en canoas idénticas ejercen el mismo esfuerzo remando y, por lo tanto, mantienen la misma rapidez relativa al agua. Uno rema directamente corriente arriba, mientras que el otro rema directamente corriente abajo. Con la corriente abajo como dirección positiva un observador en la orilla determina las velocidades de las dos canoas en -1.2 m/s y $+2.9 \text{ m/s}$, respectivamente. a) ¿Cuál es la rapidez del agua relativa a la orilla? b) ¿Cuál es la rapidez de cada canoa relativa al agua?

53. a) Si una persona puede saltar una distancia horizontal máxima (utilizando un ángulo de proyección de 45°) de 3.0 m sobre la Tierra, ¿cuál sería su alcance máximo en la Luna, donde la aceleración en caída libre es $g/6$ y $g = 9.80 \text{ m/s}^2$? b) Reproduzca sus cálculos para Marte, donde la aceleración debido a la gravedad es $0.38g$.

54. **C/C** Una camioneta se mueve hacia el este con una velocidad constante de 9.50 m/s en un tramo horizontal ilimitado de carretera. Un niño montado en la parte de atrás de la camioneta

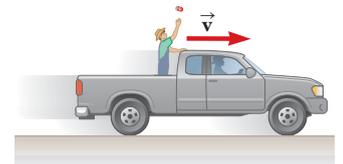


Figura P3.54

- lanza una lata de refresco hacia arriba (figura P3.54) y captura el proyectil en el mismo lugar en la cama de la camioneta, pero 16.0 m más adelante en la carretera. a) En el marco de referencia de la camioneta, ¿a qué ángulo con la vertical el niño debe lanzar la lata? b) ¿Cuál es la velocidad inicial de la lata en relación con la camioneta? c) ¿Cuál es la forma de la trayectoria de la lata vista por el niño? Un observador en el suelo mira el niño lanzar y atrapar la lata. En este marco de referencia del observador, d) describa la forma de la trayectoria de la lata y determine e) la velocidad inicial de la lata.

55. **M** Se batea un jonrón de tal manera que la pelota apenas libra una pared de 21 m de alto, ubicada a 130 m de la base del bateador. La pelota se golpea en un ángulo de 35° respecto a la horizontal y se omite la resistencia del aire. Determine a) la rapidez inicial de la pelota, b) el tiempo que le toma a la pelota alcanzar la pared y c) los componentes de la velocidad y la rapidez de la pelota cuando alcanza la pared. (Considere que la pelota se golpea a una altura de 1.0 m sobre la superficie de la tierra.)

56. Se lanza una pelota recta hacia arriba y regresa a las manos del lanzador después de 3.00 s en el aire. Se lanza una segunda pelota en un ángulo de 30.0° con respecto a la horizontal. ¿Con qué rapidez se debe lanzar la segunda pelota de tal manera que alcance la misma altura que la que se lanzó de manera vertical?

57. Un mariscal de campo lanza un balón hacia un receptor con una rapidez inicial de 20 m/s en un ángulo de 30° sobre la horizontal. En ese instante el receptor está a 20 m del mariscal. ¿En qué dirección y con qué rapidez constante el receptor corre para atrapar el balón al nivel en que fue lanzado?

58. Un jugador de basquetbol de 2.00 m de altura está de pie sobre el piso a 10.0 m de la canasta, como en la figura P3.58. Si lanza la pelota en un ángulo de 40.0° con respecto a la horizontal, ¿con qué rapidez inicial debe lanzar la pelota de manera tal que pase a través del aro sin golpear el tablero? La altura de la canasta es de 3.05 m .

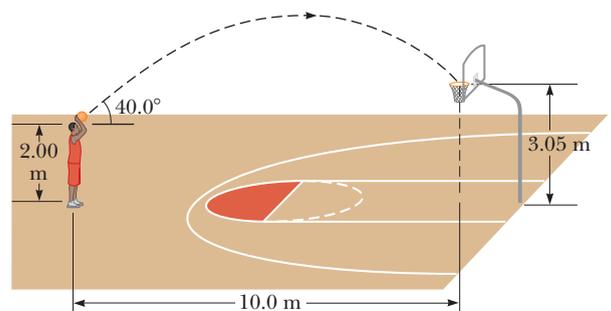


Figura P3.58

59. C/C S Se hace una demostración en una conferencia y se dispara un proyectil a un objetivo en caída libre como se muestra en la figura P3.59. El proyectil sale del rifle en el mismo instante en que el objetivo está cayendo desde el reposo. Suponiendo que el rifle está inicialmente apuntando al objetivo, muestre que el proyectil golpeará el objetivo. (Una restricción de este experimento es que el proyectil debe alcanzar el objetivo antes que éste golpee el piso.)

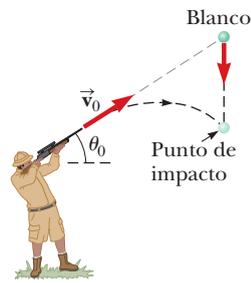


Figura P3.59

60. BIO La figura P3.60 explica la diferencia en proporciones entre las anatomías masculina (m) y femenina (f). Los desplazamientos \vec{d}_{1m} y \vec{d}_{1f} desde la parte inferior de los pies hasta el ombligo tienen magnitudes de 104 y 84.0 cm, respectivamente. Los desplazamientos \vec{d}_{2m} y \vec{d}_{2f} tienen magnitudes de 50.0 y 43.0 cm, respectivamente. a) Determine el vector suma de los desplazamientos \vec{d}_{d1} y \vec{d}_{d2} en cada caso. b) La figura masculina es 180 cm de alto; la femenina, 1.68 m. Normalizar los desplazamientos de cada figura a una altura de 200 cm y reformule las sumas vectoriales como en el inciso a). En tal caso encontrar la diferencia de vectores entre las dos sumas.

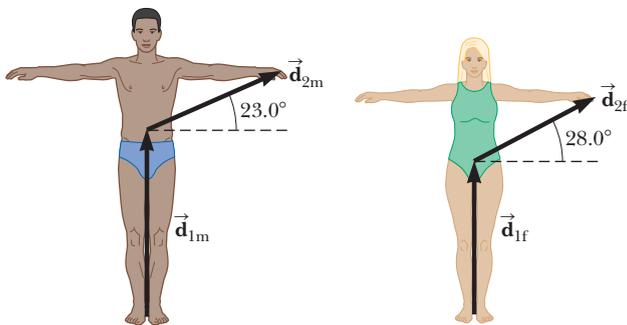


Figura P3.60

- 61. C/C** Al lanzar una pelota en un ángulo de 45° , una chica puede tirar la pelota una distancia horizontal máxima R a nivel de campo. ¿A qué distancia puede lanzar la misma pelota verticalmente hacia arriba? Considere que sus músculos proporcionan la misma rapidez en cada caso. (¿Este supuesto es válido?)
- 62. S** La ecuación de una parábola es $y = ax^2 + bx + c$, donde a , b y c son constantes. Las coordenadas x y y de un proyectil lanzado desde el origen como una función del tiempo se conocen mediante $x = v_{0x}t$ y $y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$, donde v_{0x} y v_{0y} son los componentes de la velocidad inicial. a) Elimine t a partir de estas dos ecuaciones y muestre que la trayectoria de un proyectil es una parábola y tiene la forma $y = ax + bx^2$. b) ¿Cuáles son los valores de a , b y c para el proyectil?
- 63.** Un cazador quiere cruzar un río que tiene 1.5 km de ancho y fluye con una rapidez de 5.0 km/h paralela a sus

riberas. El cazador utiliza una pequeña lancha de motor que se mueve con una rapidez máxima de 12 km/h con respecto al agua. ¿Cuál es el tiempo mínimo necesario para cruzar?

- 64. S** Cuando los jardineros en el béisbol lanzan la pelota, por lo general se permiten un rebote, en el supuesto de que la bola llega de esa manera a su objetivo en breve. Suponga que después del rebote, la pelota una vez más rebota con el mismo ángulo θ que tiene cuando fue liberada (como en la figura P3.64), pero pierde la mitad de su rapidez. a) Considerando que la pelota siempre se lanza con la misma rapidez inicial, ¿en qué ángulo θ se lanza la pelota con la finalidad de ir la misma distancia D con un rebote cuando una pelota se lanza hacia arriba a 45.0° sin rebote? b) Determine la relación de tiempos para los lanzamientos con un rebote y sin rebote.

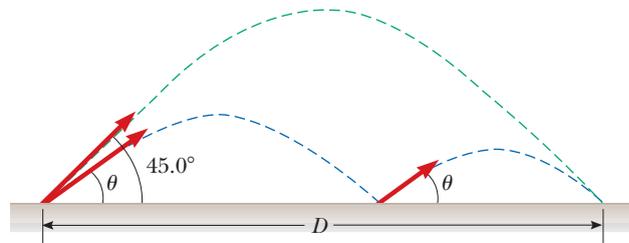


Figura P3.64

- 65.** Un acróbata es disparado desde un cañón a 45.0° con respecto a la horizontal con una rapidez inicial de 25.0 m/s. A una distancia horizontal de 50.0 m desde el cañón se ubica una red. ¿A qué altura por encima del cañón se coloca la red con la finalidad de atrapar al acróbata?
- 66. BIO** Un salmón Chinook es capaz de moverse corriente arriba más rápido saltando fuera del agua periódicamente; este comportamiento se le conoce como *cabeceo*. Considere un salmón nadando en aguas tranquilas y saltando fuera del agua con una rapidez de 6.26 m/s en un ángulo de 45° , flota a través del aire una distancia L antes de regresar al agua y después nada una distancia L bajo el agua con una rapidez de 3.58 m/s antes de iniciar otra maniobra de cabeceo. Determine la rapidez promedio del pez.
- 67. C/C** Un estudiante decide medir la velocidad inicial de un perdigón que dispara con su arma. Apuntando horizontalmente, coloca el objetivo en una pared vertical a una distancia x desde el arma. El perdigón golpea el objetivo a una distancia y abajo del arma. a) Muestre que la posición del perdigón cuando viaja a través del aire se conoce por $y = Ax^2$, donde A es una constante. b) Expresé la constante A en términos de la velocidad inicial (al salir por la boca del arma) y la aceleración en caída libre. c) Si $x = 3.00$ m y $y = 0.210$ m, ¿cuál es la rapidez inicial del perdigón?
- 68.** Un bote de motor se orienta directamente al norte con una rapidez de 20 nudos (1 nudo = 0.514 m/s). El viento está soplando hacia el este con una rapidez de 17 nudos. a) Determine la magnitud y dirección de la velocidad del

viento observada en el bote. b) ¿Cuál es el componente de la velocidad del viento en la dirección paralela al movimiento del bote? (Véase el problema 4.58 para una explicación de cómo un bote de motor puede moverse “dentro del viento”).

69. Una pelota del golf con una rapidez inicial de 50.0 m/s aterriza exactamente a 240 m del lugar de lanzamiento a nivel del campo. a) Omitiendo la fricción del aire, ¿cuáles dos ángulos de proyección lograrían este resultado? b) ¿Cuál es la altura máxima que alcanza la pelota, utilizando los dos ángulos calculados en el inciso a)?

70. **CIC** Un arquitecto que diseña jardines planifica una cascada en el parque de una ciudad. El agua fluye a 0.750 m/s y sale del extremo de un canal en la parte superior de una pared vertical con $h = 2.35$ m de altura para caer en un estanque (figura P3.70). a) ¿A qué distancia de la pared caerá el agua? ¿El espacio detrás de la cascada sería del ancho suficiente para que alguien camine? b) Para vender su plano al consejo de la ciudad, el arquitecto quiere construir un modelo a escala, un doceavo del tamaño real. ¿Qué tan rápido fluye el agua en el canal del modelo?

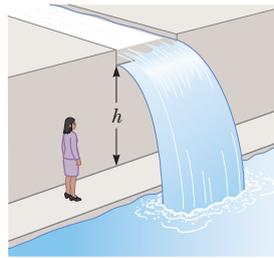


Figura P3.70

71. Una estrategia en la pelea con bolas de nieve es lanzar una en un ángulo más alto sobre el nivel de la tierra. A continuación, mientras su oponente está viendo esa bola, lanzar una segunda retardada en un ángulo más bajo que llegue antes o al mismo tiempo que la primera. Considere que ambas bolas de nieve se lanzan con una rapidez de 25.0 m/s. La primera se lanza con un ángulo de 70.0° con respecto a la horizontal. a) ¿En qué ángulo se lanza la segunda bola de nieve para que llegue al mismo punto que la primera? b) ¿Cuántos segundos después debe lanzarse la segunda bola con respecto a la primera con la finalidad de que las dos lleguen al mismo tiempo?

72. Se dispara un dardo mientras se mantiene horizontal a una altura de 1.00 m sobre el nivel de la tierra mientras está en reposo con respecto al mismo nivel. Desde la pistola, el dardo recorre una distancia horizontal de 5.00 m. Un estudiante sostiene la misma pistola en una posición horizontal mientras se desliza hacia abajo en un plano a 45.0° con una rapidez constante de 2.00 m/s. ¿Qué distancia recorrerá el dardo si el estudiante dispara la pistola cuando

se encuentra 1.00 m sobre la superficie de la tierra?

73. Una vez más el decidido coyote está preparado para intentar capturar al elusivo correcaminos. El coyote porta un par de potentes patines de ruedas marca Acme, que le proporcionan una aceleración horizontal constante de 15 m/s^2 ,

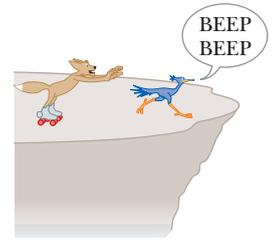


Figura P3.73

como se muestra en la figura P3.73. El coyote inicia desde el reposo a 70 m del borde de un risco en el instante que el correcaminos pasa rápidamente en dirección del precipicio. a) Si el correcaminos se mueve con rapidez constante, determine la rapidez mínima que debe tener para alcanzar el precipicio antes que el coyote. b) Si el precipicio está a 100 m por encima de la base del mismo, determine en dónde aterriza el coyote. (Suponga que sus patines todavía están funcionando cuando está en vuelo y que su componente horizontal de aceleración permanece constante en 15 m/s^2 .)

74. Una camioneta cargada con sandías se detiene repentinamente para evitar caer de un puente destruido (figura P3.74). La parada rápida provoca una serie de sandías volando fuera del camión. Una sandía pasa por encima de la borda con una velocidad inicial $v_i = 10.0 \text{ m/s}$ en la dirección horizontal. Un corte transversal del terraplén tiene la forma de la mitad inferior de una parábola con su vértice en el borde de la carretera y con la ecuación $y^2 = (16.0 \text{ m})x$, donde x y y se miden en metros. ¿Cuáles son las coordenadas x y y de la sandía cuando se estrella en el terraplén?

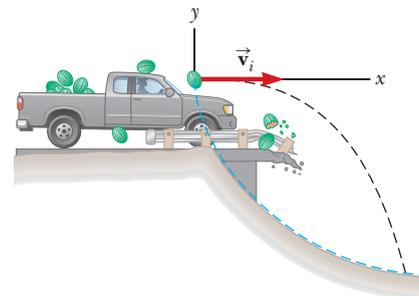


Figura P3.74 La curva azul discontinua muestra la forma parabólica del terraplén.

Por la aplicación de forma intuitiva de las leyes de Newton de movimiento, estos dos borregos cimarrones compiten para ser el macho dominante. Cada uno de ellos ejerce fuerzas contra la Tierra a través de esfuerzos musculares de sus piernas, con la ayuda de las fuerzas de fricción que les impiden el deslizamiento. Las fuerzas de reacción de la Tierra actúan de nuevo en los borregos y hacen que se lancen hacia adelante y se den un tope. El objetivo es forzar al borrego oponente a perder el equilibrio.

© Suzann-Julien. Utilizado bajo licencia de Shutterstock.com



4

Leyes de movimiento

- 4.1 Fuerzas
- 4.2 Primera ley de Newton
- 4.3 Segunda ley de Newton
- 4.4 Tercera ley de Newton
- 4.5 Aplicaciones de las leyes de Newton
- 4.6 Fuerzas de fricción

La mecánica clásica describe la relación entre el movimiento de objetos encontrados en nuestro mundo cotidiano y las fuerzas que actúan en ellos. Siempre y cuando el sistema bajo estudio no involucre objetos comparables en tamaño a un átomo o viajando casi con la rapidez de la luz, la mecánica clásica proporciona una excelente descripción de la naturaleza.

Este capítulo introduce las tres leyes de movimiento de Newton y de la gravedad. Las tres leyes son naturales y razonables. La primera ley establece que debe aplicarse una fuerza a un objeto con la finalidad de cambiar su velocidad. Cambiar la velocidad de un objeto significa acelerarlo, lo que da a entender una correspondencia entre fuerza y aceleración. Ésta, la segunda ley, establece que la fuerza neta sobre un objeto es igual a la masa del objeto por su aceleración. Por último, la tercera ley menciona que tan pronto como se empuja algo, este impulso regresa con igual fuerza en la dirección opuesta. En pocas palabras, éstas son las tres leyes.

Las tres leyes de Newton, junto con su invención del cálculo, abren rutas de investigación y descubrimiento que se aplican habitualmente hoy en día en todas las áreas de las matemáticas, ciencias, ingeniería y la tecnología. La teoría de la gravitación universal de Newton tiene un impacto parecido, inicia una revolución en la mecánica del espacio y en la astronomía que continúa hasta nuestros días. Con el surgimiento de esta teoría, podrían ser calculadas con gran precisión las órbitas de todos los planetas y comprender las mareas. Incluso la teoría conduce a la predicción de “estrellas negras”, ahora conocidos como hoyos negros, se observó hace más de dos siglos antes de cualquier evidencia de su existencia.¹ Las tres leyes de movimiento de Newton, junto con su ley de la gravitación, se consideran entre los logros más grandes de la mente humana.

¹ En 1783, John Michell combinó la teoría de Newton de la luz y la teoría de la gravitación, vaticinando la existencia de “estrellas negras” de las que la luz misma no podría escapar.

4.1 Fuerzas

Usualmente imaginamos una **fuerza** como empujar o jalar un objeto, tal vez rápidamente, como cuando se golpea una pelota de tenis con una raqueta. (Véase la figura 4.1.) Podemos golpear la pelota, con diferentes magnitudes de velocidad, y dirigirla a diferentes partes de la cancha del oponente. Esto significa que se puede controlar la magnitud de la fuerza aplicada y también su dirección, de tal manera que la fuerza es una cantidad vectorial, parecida a la velocidad y aceleración.

Si usted jala un resorte (figura 4.2a), el resorte se deforma. Si jala un carro lo suficiente (figura 4.2b), éste se mueve. Cuando pateas un balón (figura 4.2c), se deforma por corto tiempo y se pone en movimiento. Todos éstos son ejemplos de **fuerzas de contacto**, llamadas así porque resultan del contacto físico entre dos objetos.

Otra clase de fuerzas no implica contacto físico directo alguno. Los primeros científicos, incluido Newton, se inquietaron con el concepto de fuerzas que actúan entre dos objetos desconectados. Con todo, Newton aplicó el concepto “acción a distancia” en su ley de la gravedad, mientras que una masa con determinada ubicación, por ejemplo el Sol, afecta el movimiento de un objeto distante, como la Tierra, a pesar de que no existe conexión física evidente entre los dos objetos. Para vencer la dificultad conceptual asociada con la acción a distancia, Michael Faraday (1791-1867) introduce el concepto de *campo*. Las fuerzas correspondientes se conocen como **campos de fuerza**. De acuerdo con este planteamiento, un objeto de masa M , como el Sol, crea una influencia invisible que se extiende en todo el espacio. Un segundo objeto de masa m , como la Tierra, interactúa con el *campo* del Sol, no directamente con el Sol mismo. De esta manera la fuerza de atracción gravitacional entre los dos objetos, que se ilustra en la figura 4.2d, es un ejemplo de un campo de fuerza. La fuerza de gravedad mantiene objetos unidos a la Tierra, además de originar lo que conocemos como *peso* de esos objetos.

Otro ejemplo común de un campo de fuerza es la fuerza eléctrica que ejerce una carga eléctrica sobre otra (figura 4.2e). Un tercer ejemplo es la fuerza ejercida por un imán de barra en una pieza de hierro (figura 4.2f).

Todas las fuerzas fundamentales conocidas en la naturaleza son campos de fuerza. Éstas son, en orden de intensidad decreciente, 1) la fuerza nuclear fuerte entre partículas subatómicas, 2) las fuerzas electromagnéticas entre cargas eléctricas, 3) la fuerza nuclear débil que surge en ciertos procesos de decaimiento radiactivo y 4) la fuerza gravitacional entre objetos. La fuerza fuerte mantiene el núcleo de un átomo en vuelo separado debido a la fuerza eléctrica repulsiva de los protones. La fuerza débil se incluye en la mayoría de los procesos radiactivos y juega un papel importante en las reacciones nucleares que genera la emisión energética del Sol. Las fuerzas fuerte y débil funcionan sólo a escala nuclear, con un alcance muy corto del orden de 10^{-15} m. Fuera de este alcance, no tienen influencia. De cualquier modo, la física clásica sólo se relaciona con las fuerzas gravitacional y electromagnética, que tienen un alcance infinito.



Juergen Hasenkopf/Alamy

Figura 4.1 Una jugadora de tenis aplica una fuerza de contacto de la bola con la raqueta, acelerando y dirigiendo la pelota hacia la cancha.

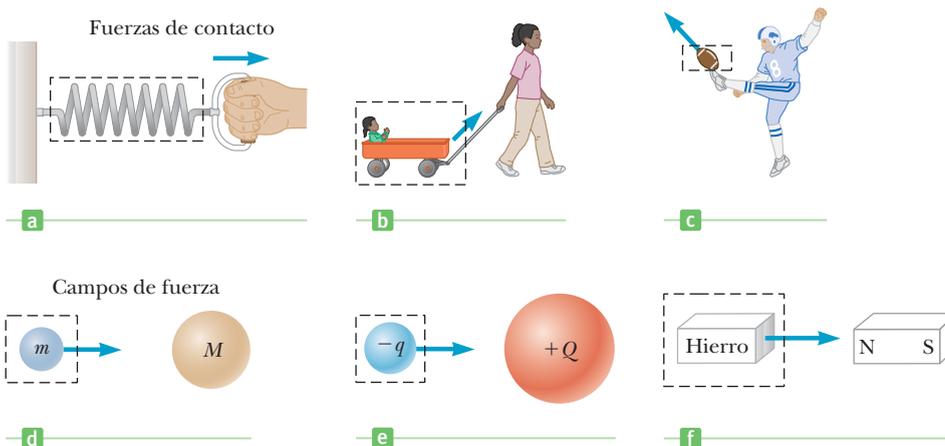


Figura 4.2 Ejemplo de fuerzas aplicadas a diferentes objetos. En cada caso, una fuerza actúa en el objeto al que rodea la línea discontinua. Algo en el ambiente externo al área en la caja ejerce la fuerza.

Las fuerzas ejercidas en un objeto pueden cambiar la forma del mismo. Por ejemplo, el golpear una pelota de tenis con una raqueta, como en la figura 4.1, deforma la pelota en cierto grado. Incluso objetos que por lo general se consideran rígidos e inflexibles se deforman bajo la acción de fuerzas externas. Con frecuencia las deformaciones son permanentes, como el caso de un choque entre automóviles.

4.2 Primera ley de Newton

Considere un libro sobre una mesa. Es evidente que el libro permanece en reposo si se deja solo. Ahora piense que lo empuja con una fuerza horizontal lo suficientemente grande para vencer la fuerza de fricción entre el libro y la mesa, poniendo el libro en movimiento. Ya que la magnitud de la fuerza aplicada supera la magnitud de la fuerza de fricción, el libro acelera. Cuando la fuerza aplicada es retirada, en breve la fricción retrasa el libro hasta detenerlo.

Ahora piense en empujar el libro a lo largo de un piso suave y encerado. Una vez más el libro llega al reposo una vez que la fuerza deja de aplicarse, pero no tan rápido como antes. Por último, si el libro se mueve sobre una superficie sin fricción horizontal (figura 4.3b), continúa moviéndose en una línea recta con velocidad constante hasta que golpea una pared o algún otro obstáculo.

Antes del año 1600, los científicos pensaban que el estado natural de la materia era el estado de reposo. No obstante, Galileo concibió experimentos (como un objeto móvil sobre una superficie sin fricción, recién descrito) y concluyó que **no es la naturaleza de un objeto detenerse, una vez que se pone en movimiento, sino que continúa en su estado original de movimiento**. Este planteamiento después se formalizó como la **primera ley de movimiento de Newton**:

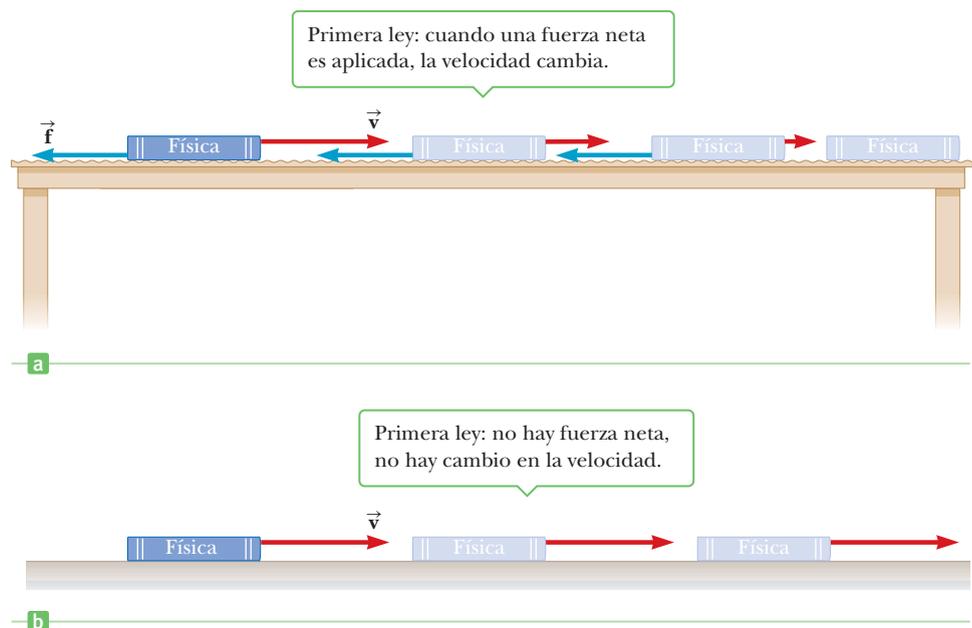
Primera ley de Newton ►

Un objeto se mueve con una velocidad que es constante en magnitud y en dirección, a no ser que actúe en él una fuerza resultante diferente de cero.

La fuerza neta sobre un objeto se define como la suma vectorial de todas las fuerzas externas ejercidas sobre el objeto. Las fuerzas externas vienen del ambiente del objeto. Si una velocidad del objeto no está cambiando ya sea en magnitud o dirección, entonces la aceleración y la fuerza neta que actúan sobre él deben ser cero.

Las fuerzas internas se originan dentro del objeto mismo y no pueden cambiar la velocidad del objeto (aunque pueden alterar la rapidez de rotación, como se describe en el

Figura 4.3 La primera ley del movimiento. a) Un libro se mueve a una velocidad inicial \vec{v} en una superficie de fricción. Debido a que hay una fuerza de fricción en dirección horizontal, el libro se desacelera hasta el reposo. b) Un libro se mueve a una velocidad \vec{v} sobre una superficie sin fricción. En la ausencia de una fuerza neta, el libro se sigue moviendo a una velocidad v .



capítulo 8). Como resultado, las fuerzas internas no están incluidas en la segunda ley de Newton. En realidad no es posible que se “jale usted mismo hacia arriba sin ayuda”.

Una consecuencia de la primera ley es la factibilidad de viajar en el espacio. Después de unos momentos de potentes impulsos, la nave se desliza por meses o años, su velocidad sólo disminuye cambiando con el tiempo bajo la influencia relativamente débil del Sol y los planetas distantes.

Masa e inercia

Piense que golpea una pelota de golf desde el punto de partida, con un palo de golf. Si es un buen golfista, la pelota viajará más de 200 yardas sobre el campo de golf. Ahora piense en levantar una bola de boliche y golpearla con el mismo palo (un experimento que no se recomienda). Probablemente el palo se rompa, podría dislocarse la muñeca, y la bola de boliche, en el mejor de los casos, caería del soporte de la pelota, medio girará y llegará al reposo.

A partir de este experimento mental, concluimos que aunque ambas pelotas resisten cambios en su estado de movimiento, la bola de boliche ofrece mucha más resistencia efectiva. La tendencia de un objeto a continuar en su estado original de movimiento o reposo se conoce como **inercia**.

Aunque la inercia es la tendencia de un objeto a continuar su movimiento en ausencia de una fuerza, la **masa** es una medida de la resistencia de un objeto a cambiar en su movimiento debido a una fuerza. A mayor masa de un cuerpo, menor es la aceleración bajo la acción de una fuerza aplicada determinada. La unidad SI de la masa es el kilogramo. Masa es una cantidad escalar que obedece las reglas de la aritmética ordinaria.

La inercia se puede usar para explicar la operación de una clase de cinturón de seguridad. En un accidente, el propósito del cinturón de seguridad es mantener de manera firme al pasajero en el lugar relativo al automóvil, para evitar lesiones serias. La figura 4.4 explica cómo funciona una clase de tirantes de sujeción. Bajo condiciones normales, la rueda dentada da vueltas libremente, lo que permite que la montura se enrolle o desenrolle desde la polea cuando se mueve el pasajero. En un accidente, el automóvil se somete a una aceleración considerable y rápidamente llega al reposo. Debido a su inercia, el bloque grande bajo el asiento continúa deslizándose hacia adelante a lo largo del carril. El pasador de unión entre el bloque y la varilla ocasiona que ésta gire alrededor de su centro y encajar la rueda dentada. En este punto, la rueda dentada se traba en el lugar, y la montura no se desenrolla.

4.3 Segunda ley de Newton

La primera ley de Newton explica qué le sucede a un objeto que no tiene fuerza neta que actúe en él, ya sea que el objeto permanezca en reposo o continúe moviéndose en línea recta con rapidez constante. La segunda ley de movimiento de Newton responde a la pregunta de qué le sucede a un objeto que *tiene* una fuerza neta que actúa en él.

Piense en empujar un bloque de hielo a lo largo de una superficie horizontal sin fricción. Cuando ejerce una fuerza horizontal sobre el bloque, éste se mueve con una aceleración de, digamos, 2 m/s^2 . Si aplica una fuerza dos veces más grande, la aceleración se duplica a 4 m/s^2 . Empujando tres veces tan firme, triplica la aceleración, y así sucesivamente. De tales observaciones, se concluye que **la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa en él**.

La masa también afecta a la aceleración. Suponga que coloca bloques idénticos de hielo uno sobre otro mientras empuja con fuerza constante la pila de ellos. Si la fuerza aplicada a un bloque produce una aceleración de 2 m/s^2 , entonces la aceleración cae a la mitad de ese valor, 1 m/s^2 , cuando dos bloques son empujados; a un tercio de su valor inicial cuando son empujados tres bloques, y así sucesivamente. Podemos concluir que **la aceleración de un objeto es inversamente proporcional a su masa**. Estas observaciones son resumidas en la **segunda ley de Newton**:

La aceleración \vec{a} de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa en él e inversamente proporcional a su masa.



Studio Lévy and Sons

A no ser que actúe una fuerza externa en él, un objeto en reposo permanecerá en reposo y un objeto en movimiento continuará en movimiento con velocidad constante. En este caso, la pared del edificio no ejerció una fuerza lo suficientemente grande sobre el tren en movimiento para detenerlo.

APLICACIÓN

Cinturón de seguridad

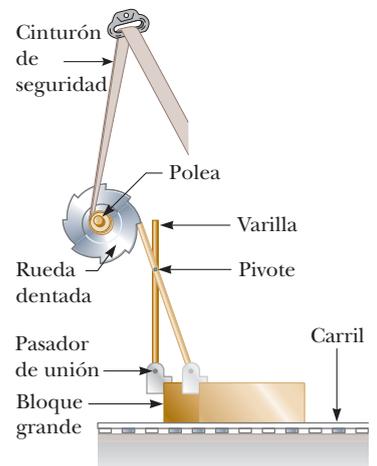


Figura 4.4 Un arreglo mecánico para un cinturón de seguridad de un automóvil.

Tip 4.1 La fuerza ocasiona cambios en el movimiento

El movimiento se puede presentar incluso en ausencia de fuerzas. Éstas ocasionan *cambios* en el movimiento.



Isaac Newton
Físico y matemático inglés
(1642-1727)

Newton fue uno de los más talentosos científicos. Antes de cumplir 30 años, estableció los conceptos básicos y las leyes de la mecánica, descubrió la ley de la gravitación universal e inventó los métodos matemáticos del cálculo. Como una consecuencia de sus teorías, Newton fue capaz de explicar los movimientos de los planetas, el retroceso y flujo de las mareas y muchas características especiales de los movimientos de la Luna y la Tierra. Además, interpretó muchas observaciones fundamentales relacionadas con la naturaleza de la luz. Sus contribuciones a las teorías físicas dominaron el pensamiento científico por dos siglos y siguen siendo importantes hoy.

Tip 4.2 $m\vec{a}$ no es una fuerza

La ecuación 4.1 *no* dice que el producto $m\vec{a}$ es una fuerza. Todas las fuerzas ejercidas en un objeto se suman como vectores para generar la fuerza neta del lado izquierdo de la ecuación. En este caso esta fuerza neta es igual al producto de la masa y la aceleración resultante del objeto. *No* incluye una “fuerza $m\vec{a}$ ” en su análisis.

Figura 4.5 La segunda ley del movimiento. Para el bloque de masa m , la fuerza neta $\Sigma\vec{F}$ actúa sobre el bloque es igual a la de masa m multiplicada por la aceleración de un vector \vec{a} .



La constante de proporcionalidad es igual a uno; de este modo, en términos matemáticos el enunciado anterior puede ser rescrito

$$\vec{a} = \frac{\Sigma\vec{F}}{m}$$

donde \vec{a} es la aceleración del objeto, m es la masa y $\Sigma\vec{F}$ es la suma vectorial de todas las fuerzas que actúan en él. Multiplicando por m , se tiene

$$\Sigma\vec{F} = m\vec{a} \tag{4.1}$$

Generalmente los físicos se refieren a esta ecuación como ‘ $F = ma$ ’. La figura 4.5 muestra la relación entre la masa, la aceleración y la fuerza neta. La segunda ley es una ecuación vectorial, equivalente a las tres ecuaciones por componente siguientes:

$$\Sigma F_x = ma_x \quad \Sigma F_y = ma_y \quad \Sigma F_z = ma_z \tag{4.2}$$

Cuando no existe fuerza neta en un objeto, su aceleración es cero, lo que significa que la velocidad es constante.

Unidades de fuerza y masa

La unidad SI de la fuerza es el **newton**. Cuando 1 newton de fuerza actúa sobre un objeto que tiene una masa de 1 kg, produce una aceleración de 1 m/s² en el objeto. A partir de esta definición y la segunda ley de Newton, se ve que el newton puede expresarse en términos de las unidades básicas de masa, longitud y tiempo como

$$1 \text{ N} \equiv 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \tag{4.3}$$

En el sistema estandarizado de Estados Unidos, la unidad de fuerza es la **libra**. La conversión de newtons a libras está dada por

$$1 \text{ N} = 0.225 \text{ lb} \tag{4.4}$$

Las unidades de masa, aceleración y fuerza en el SI y el sistema estandarizado en Estados Unidos se resumen en la tabla 4.1.

Examen rápido

- 4.1** ¿Cuál de los enunciados que siguen son verdaderos? a) Un objeto puede moverse incluso cuando ninguna fuerza actúa sobre él. b) Si un objeto no está en movimiento, ninguna fuerza externa actúa en él. c) Si una fuerza simple actúa en un objeto, el objeto acelera. d) Si un objeto acelera, una fuerza está actuando en él. e) Si un objeto no está acelerando, ninguna fuerza externa está actuando en él. f) Si la fuerza neta que actúa en un objeto está en la dirección x positiva, el objeto sólo se mueve en la dirección x positiva.

Tabla 4.1 Unidades de masa, aceleración y fuerza

Sistema	Masa	Aceleración	Fuerza
SI	kg	m/s ²	N = kg · m/s ²
Habitual en Estados Unidos	slug	pies/s ²	lb = slug · pies/s ²

EJEMPLO 4.1 Aerobote

OBJETIVO Aplicar la segunda ley de Newton en una dimensión, junto con las ecuaciones de cinemática.

PROBLEMA Un aerobote con masa 3.50×10^2 kg, incluyendo pasajeros, tiene un motor que produce una fuerza horizontal neta de 7.70×10^2 N después de considerar las fuerzas de resistencia (véase la figura 4.6). **a)** Hallar la aceleración del aerobote.

b) Partiendo desde el reposo, ¿cuánto tiempo le toma al aerobote alcanzar una rapidez de 12.0 m/s? c) Después de alcanzar esta rapidez, el piloto apaga el motor, y el aerobote se desliza hasta detenerse en una distancia de 50.0 m. Encontrar la fuerza de resistencia, suponiendo que es constante.

ESTRATEGIA En el inciso a), aplique la segunda ley de Newton para hallar la aceleración, y en el inciso b) utilice esta aceleración en la ecuación cinemática en una dimensión para la velocidad. Cuando se apaga el motor en el inciso c), sólo las fuerzas de resistencia actúan en el bote, de tal modo que su aceleración neta puede ser encontrada a partir de $v^2 - v_0^2 = 2a \Delta x$. En tal caso la segunda ley de Newton proporciona la fuerza de resistencia.

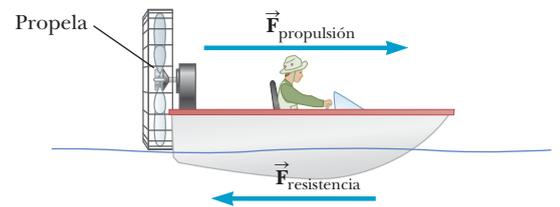


Figura 4.6 (Ejemplo 4.1)

SOLUCIÓN

a) Halle la aceleración del aerobote.

Aplique la segunda ley de Newton y resuelva para la aceleración:

$$ma = F_{\text{neta}} \rightarrow a = \frac{F_{\text{neta}}}{m} = \frac{7.70 \times 10^2 \text{ N}}{3.50 \times 10^2 \text{ kg}} = 2.20 \text{ m/s}^2$$

b) Encuentre el tiempo necesario para alcanzar una rapidez de 12.0 m/s.

Aplique la ecuación de velocidad cinemática:

$$v = at + v_0 = (2.20 \text{ m/s}^2)t = 12.0 \text{ m/s} \rightarrow t = 5.45 \text{ s}$$

c) Halle la fuerza de resistencia después de apagar el motor.

Utilizando la cinemática, determine la aceleración neta debido a las fuerzas de resistencia:

$$v^2 - v_0^2 = 2a \Delta x$$

$$0 - (12.0 \text{ m/s})^2 = 2a(50.0 \text{ m}) \rightarrow a = -1.44 \text{ m/s}^2$$

Sustituya la aceleración en la segunda ley de Newton, encontrando la fuerza de resistencia:

$$F_{\text{resistencia}} = ma = (3.50 \times 10^2 \text{ kg})(-1.44 \text{ m/s}^2) = -504 \text{ N}$$

COMENTARIOS El propulsor ejerce una fuerza en el aire, empujándolo detrás del bote. Al mismo tiempo, la fuerza del aire ejerce una fuerza en los impulsores y, en consecuencia, en el aerobote. Las fuerzas siempre vienen en pares de esta clase, las cuales se formalizan en la siguiente sección como la tercera ley de movimiento de Newton. La respuesta negativa para la aceleración en el inciso c) significa que el aerobote está disminuyendo su velocidad.

PREGUNTA 4.1 ¿Qué otras fuerzas actúan en el aerobote? Descríbalas.

EJERCICIO 4.1 Considere que el piloto, iniciando desde el reposo, abre parcialmente el estrangulamiento. Con una aceleración constante, el aerobote cubre una distancia de 60.0 m en 10.0 s. Determine la fuerza neta que actúa en el bote.

RESPUESTA $4.20 \times 10^2 \text{ N}$

Tip 4.3 La segunda ley de Newton es una ecuación vectorial

Al aplicar la segunda ley de Newton, suma todas las fuerzas sobre el objeto como vectores y entonces determine el vector de aceleración resultante al dividir entre m . No encuentre las magnitudes individuales de las fuerzas y las sume como escalares.

EJEMPLO 4.2 Caballos jalando una barcaza

OBJETIVO Aplicar la segunda ley de Newton en un problema de dos dimensiones.

PROBLEMA Dos caballos están jalando una barcaza con masa de $2.00 \times 10^3 \text{ kg}$ a lo largo de un canal, como se muestra en la figura 4.7. El cable conectado al primer caballo hace un ángulo de $\theta_1 = 30.0^\circ$ con respecto a la dirección del canal, mientras que el cable conectado al segundo caballo hace un ángulo de $\theta_2 = 45.0^\circ$. Determine la aceleración inicial de la barcaza, empezando desde el reposo, si cada caballo ejerce una fuerza de magnitud $6.00 \times 10^2 \text{ N}$ sobre la barcaza. Desprecie las fuerzas de resistencia en la barcaza.

ESTRATEGIA Aplicando trigonometría, determine el vector fuerza ejercido por cada caballo sobre la barcaza. Sume las

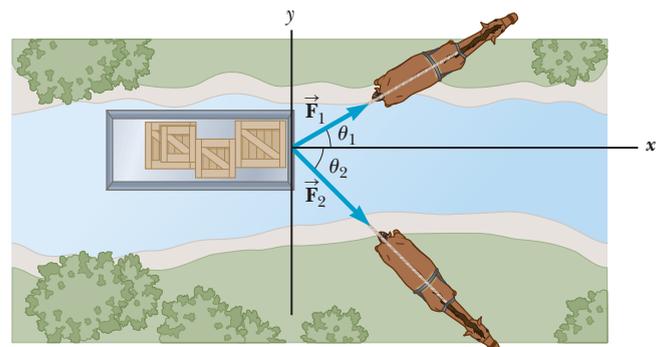


Figura 4.7 (Ejemplo 4.2)

(continúa)

componentes x juntas para obtener la componente x de la fuerza resultante y después haga lo mismo con la componente y . Divida entre la masa de la barcaza para obtener la aceleración en las direcciones x y y .

SOLUCIÓN

Determine los componentes x de las fuerzas ejercidas por los caballos.

$$F_{1x} = F_1 \cos \theta_1 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \cos (30.0^\circ) = 5.20 \times 10^2 \text{ N}$$

$$F_{2x} = F_2 \cos \theta_2 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \cos (-45.0^\circ) = 4.24 \times 10^2 \text{ N}$$

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} = 5.20 \times 10^2 \text{ N} + 4.24 \times 10^2 \text{ N} \\ = 9.44 \times 10^2 \text{ N}$$

Encuentre la fuerza total en la dirección x , sumando las componentes x :

Determine las componentes y de las fuerzas ejercidas por los caballos:

$$F_{1y} = F_1 \sin \theta_1 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \sin 30.0^\circ = 3.00 \times 10^2 \text{ N}$$

$$F_{2y} = F_2 \sin \theta_2 = (6.00 \times 10^2 \text{ N}) \sin (-45.0^\circ) \\ = -4.24 \times 10^2 \text{ N}$$

Encuentre la fuerza total en la dirección y sumando las componentes y :

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} = 3.00 \times 10^2 \text{ N} - 4.24 \times 10^2 \text{ N} \\ = -1.24 \times 10^2 \text{ N}$$

Determine los componentes de la aceleración, dividiendo los componentes de la fuerza entre la masa:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{9.44 \times 10^2 \text{ N}}{2.00 \times 10^3 \text{ kg}} = 0.472 \text{ m/s}^2$$

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{-1.24 \times 10^2 \text{ N}}{2.00 \times 10^3 \text{ kg}} = -0.0620 \text{ m/s}^2$$

Halle la magnitud de la aceleración:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \sqrt{(0.472 \text{ m/s}^2)^2 + (-0.0620 \text{ m/s}^2)^2} \\ = 0.476 \text{ m/s}^2$$

Determine la dirección de la aceleración:

$$\tan \theta = \frac{a_y}{a_x} = \frac{-0.0620 \text{ m/s}^2}{0.472 \text{ m/s}^2} = -0.131$$

$$\theta = \tan^{-1}(-0.131) = -7.46^\circ$$

COMENTARIOS Observe que el ángulo está en el cuarto cuadrante, en el rango de la función tangente inversa; así que no es necesario sumar 180° a la respuesta. Los caballos ejercen una fuerza sobre la barcaza a través de la tensión en los cables, mientras la barcaza ejerce una fuerza igual y opuesta en los caballos, una vez más a través de los cables. Si esto no fuera cierto, los caballos se moverían fácilmente hacia adelante, como si no tuvieran carga. Este ejemplo es otra ilustración de fuerzas que actúan en pares.

PREGUNTA 4.2 Verdadero o Falso: En general, la aceleración neta siempre está dirigida hacia los caballos que ejercen la fuerza de mayor magnitud.

EJERCICIO 4.2 Repita el ejemplo 4.2, pero considere que el caballo de arriba jala en un ángulo de 40.0° , y el caballo de abajo, a 20.0° .

RESPUESTA 0.520 m/s^2 , 10.0°

La fuerza gravitacional

La **fuerza gravitacional** es la fuerza de atracción recíproca entre dos objetos cualesquiera en el Universo. Aunque la fuerza gravitacional puede ser muy intensa entre dos objetos muy grandes, es la más débil de las fuerzas fundamentales. Se puede realizar una buena demostración de qué tan débil es, con un globo pequeño. Frota el globo contra su cabello, lo que le proporciona una carga eléctrica diminuta. A través de las fuerzas eléctricas, en este caso el globo se adhiere a la pared, resistiendo el jaloneo gravitacional de toda la Tierra!

Además de la contribución a la comprensión del movimiento, Newton estudió ampliamente la gravedad. **La ley de gravitación universal de Newton establece que cualquier partícula en el Universo atrae a cualquier otra partícula, con una fuerza que es proporcional al producto de las masas de las partículas e inversamente proporcional al cuadrado de la**

distancia entre ellas. Si las partículas tienen masas m_1 y m_2 y están separadas mediante una distancia r , como en la figura 4.8, la magnitud de la fuerza gravitacional, F_g , es

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [4.5]$$

donde $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ es la **constante de gravitación universal**. La fuerza de gravitación la estudiaremos en más detalle en el capítulo 7.

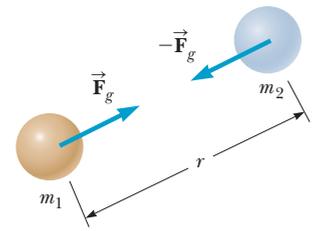


Figura 4.8 La fuerza gravitacional entre dos partículas es de atracción.

Peso

La magnitud de la fuerza gravitacional que actúa en un objeto de masa m cerca de la superficie de la Tierra se le conoce como **peso**, w , del objeto, dada por

$$w = mg \quad [4.6]$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

Unidades SI: newton (N)

De la ecuación 4.5, otra definición del peso de un objeto con masa m puede ser rescrita como

$$w = G \frac{M_T m}{r^2} \quad [4.7]$$

donde M_T es la masa de la Tierra y r es la distancia desde el objeto al centro de la Tierra. Si el objeto está en reposo sobre la superficie de la Tierra, entonces r es igual al radio de la Tierra R_T . Ya que r^2 está en el denominador de la ecuación 4.7, el peso disminuye conforme r aumenta. De tal modo que el peso de un objeto en la parte superior de una montaña es menor que el peso del mismo objeto a nivel del mar.

Al comparar las ecuaciones 4.6 y 4.7, vemos que

$$g = G \frac{M_T}{r^2} \quad [4.8]$$

A diferencia de la masa, el peso no es una propiedad inherente de un objeto a causa de que puede tomar valores diferentes, dependiendo del valor de g en una ubicación determinada. Por ejemplo, si un objeto tiene una masa de 70.0 kg, entonces su peso en una ubicación donde $g = 9.80 \text{ m/s}^2$ es $mg = 686 \text{ N}$. En un globo a una gran altura, donde g podría ser 9.76 m/s^2 , el peso del objeto sería 683 N. Además el valor de g varía ligeramente debido a la densidad de la materia en un lugar determinado. **En este texto, a menos que se indique lo contrario, el valor de g se entiende que es 9.80 m/s^2 , su valor cerca de la superficie de la Tierra.**

La ecuación 4.8 es un resultado general que se puede utilizar para calcular la aceleración de un objeto cayendo cerca de la superficie de cualquier objeto pesado si el radio y la masa del objeto más pesado son conocidos. Utilizando los valores en la tabla 7.3 (página 223) se puede demostrar que $g_{\text{Sol}} = 274 \text{ m/s}^2$ y $g_{\text{Luna}} = 1.62 \text{ m/s}^2$. Un hecho importante es que, para cuerpos esféricos, las distancias son calculadas desde los centros de los objetos, una consecuencia de la ley de Gauss (se explica en el capítulo 15), que se cumple para ambas fuerzas gravitacional y eléctrica.

Examen rápido

4.2 ¿Qué tiene mayor valor, un newton de oro pesado en la Tierra o un newton de oro pesado en la Luna? a) El newton de oro en la Tierra. b) El newton de oro en la Luna. c) El valor es el mismo, a pesar de todo.

4.3 Responda a cada declaración, con Verdadero o Falso: a) Ninguna fuerza de gravedad actúa sobre un astronauta en una estación espacial en órbita. b) A una distancia de tres radios terrestres a partir del centro de La Tierra, la aceleración de la gravedad es 1/9 de su valor superficial. c) Si dos planetas son idénticos, cada uno con gravedad de superficie g y volumen V , se unen formando un planeta con volumen $2V$ y gravedad superficial $2g$. d) Un kilogramo de oro puede tener mayor valor en la Tierra que en la Luna.



NASA/Eugene Cernan

La unidad de soporte de vida atada a la espalda del astronauta Harrison Schmitt pesaba 300 lb en la Tierra y tenía una masa de 136 kg. Durante su entrenamiento, se utilizó una maqueta de 50 libras con una masa de 23 kg. Aunque la maqueta tenía el mismo peso que la unidad real tendría en la Luna, la menor masa significaba que también tendría una baja inercia. El peso de la unidad es causado por la aceleración del campo de gravedad local, pero el astronauta también debe acelerar todo lo que transporta a fin de moverlo. En consecuencia, la unidad real utilizada en la Luna, con el mismo peso, pero una mayor inercia, fue más difícil de manejar para el astronauta que la maqueta de la unidad en la Tierra.

EJEMPLO 4.3 Fuerzas de mundos distantes

OBJETIVO Calcular la magnitud de una fuerza gravitacional, utilizando la ley de gravitación de Newton.

PROBLEMA a) Halle la fuerza gravitatoria ejercida por el Sol sobre un hombre de 70.0 kg situado en el Ecuador de la Tierra al mediodía, cuando el hombre está más cercano al Sol. b) Calcule la fuerza gravitatoria del Sol sobre el hombre a la medianoche, cuando está más alejado del Sol. c) Calcule la diferencia en la aceleración del Sol, entre el mediodía y la medianoche. (Para valores, véase la tabla 7.3 en la página 223.)

ESTRATEGIA Para obtener la distancia del Sol al hombre al mediodía, reste el radio de la Tierra de la distancia al Sol. A la medianoche, agregue el radio de la Tierra. Mantenga suficientes cifras para que el redondeo no elimine la pequeña diferencia entre las dos respuestas. Para el inciso c), reste la respuesta de b) de a) y divida entre la masa del hombre.

SOLUCIÓN

a) Halle la fuerza gravitatoria ejercida por el Sol sobre el hombre en el Ecuador de la Tierra al mediodía.

Escriba la ley de la gravitación, ecuación 4.5, en términos de la distancia desde el Sol a la Tierra, r_S , y del radio de la Tierra, R_T :

$$(1) \quad F_{\text{Sol}}^{\text{mediodía}} = \frac{mM_S G}{r^2} = \frac{mM_S G}{(r_S - R_T)^2}$$

Sustituya valores en la ecuación (1) y mantenga dos dígitos extra:

$$\begin{aligned} F_{\text{Sol}}^{\text{mediodía}} &= \frac{(70.0 \text{ kg})(1.991 \times 10^{30} \text{ kg})(6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3/\text{s}^2)}{(1.496 \times 10^{11} \text{ m} - 6.38 \times 10^6 \text{ m})^2} \\ &= 0.415 \text{ 19 N} \end{aligned}$$

b) Calcule la fuerza gravitatoria del Sol sobre el hombre a la medianoche.

Escriba la ley de la gravitación, sumando esta vez el radio de la Tierra:

$$(2) \quad F_{\text{Sol}}^{\text{mediodía}} = \frac{mM_S G}{r^2} = \frac{mM_S G}{(r_S + R_T)^2}$$

Sustituya valores en la ecuación (2):

$$\begin{aligned} F_{\text{Sol}}^{\text{mediodía}} &= \frac{(70.0 \text{ kg})(1.991 \times 10^{30} \text{ kg})(6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3/\text{s}^2)}{(1.496 \times 10^{11} \text{ m} + 6.38 \times 10^6 \text{ m})^2} \\ &= 0.415 \text{ 12 N} \end{aligned}$$

c) Calcular la diferencia en la aceleración solar del hombre, entre el mediodía y la medianoche.

Escriba una expresión para la diferencia en la aceleración y sustituya valores:

$$\begin{aligned} a &= \frac{F_{\text{Sol}}^{\text{mediodía}} - F_{\text{Sol}}^{\text{medianoche}}}{m} = \frac{0.415 \text{ 19 N} - 0.415 \text{ 12 N}}{70.0 \text{ kg}} \\ &\cong 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

COMENTARIOS La atracción gravitacional entre el Sol y los objetos sobre la Tierra se mide fácilmente y se le ha sacado provecho en experimentos, para establecer si la atracción gravitacional depende de la composición del objeto. Como el ejercicio lo muestra, la fuerza gravitacional sobre la Tierra debido a la Luna es mucho más débil que la fuerza gravitacional sobre la Tierra debido al Sol. Paradójicamente, los efectos de la Luna en las mareas son dos veces más que del Sol, ya que las mareas dependen de las *diferencias* en la fuerza gravitacional a través de la Tierra, y aquellas diferencias son más grandes para la fuerza gravitacional de la Luna debido a que la Luna está más cerca de la Tierra que del Sol.

PREGUNTA 4.3 Marte se encuentra a 1.5 veces más lejos del Sol que la Tierra. Sin realizar algún cálculo explícito, para una cifra significativa, cuál es la fuerza gravitacional del Sol en un hombre de 70.0 kg, de pie sobre Marte.

EJERCICIO 4.3 Durante la luna nueva, la Luna se encuentra directamente sobre la cabeza al mediodía. a) Determine la fuerza ejercida por la Luna sobre un hombre de 70.0 kg en el Ecuador de la Tierra al mediodía. b) Calcule la fuerza gravitacional de la Luna sobre el hombre a la medianoche. c) Calcule la diferencia entre la aceleración del hombre debida a la Luna entre el mediodía y la medianoche. *Nota:* La distancia de la Tierra a la Luna es 3.84×10^8 m. La Luna tiene una masa de 7.36×10^{22} kg.

RESPUESTAS a) 2.41×10^{-3} N b) 2.25×10^{-3} N c) 2.3×10^{-6} m/s²

■ EJEMPLO 4.4 Peso en el Planeta X

OBJETIVO Comprender el efecto de la masa y el radio de un planeta sobre el peso de un objeto, en la superficie del mismo.

PROBLEMA Un astronauta en una misión espacial aterriza sobre un planeta con tres veces la masa y dos veces el radio de la Tierra. ¿Cuál es su peso w_X en este planeta como un múltiplo de su peso en la Tierra w_T ?

ESTRATEGIA Escriba M_X y r_X , la masa y el radio del planeta, en términos de M_T y R_T , la masa y radio de la Tierra, respectivamente, y sustituya en la ley de la gravitación.

SOLUCIÓN

A partir del enunciado del problema, se tiene la correspondencia que sigue: $M_X = 3M_T$ $r_X = 2R_T$

Sustituya las expresiones anteriores en la ecuación 4.5 y simplifique, asocie algebraicamente los términos que dan el peso sobre la Tierra:

$$w_X = G \frac{M_X m}{r_X^2} = G \frac{3M_T m}{(2R_T)^2} = \frac{3}{4} G \frac{M_T m}{R_T^2} = \frac{3}{4} w_T$$

COMENTARIOS Este problema muestra la influencia recíproca entre la masa y el radio de un planeta al determinar el peso de objetos sobre su superficie. Debido al radio mucho más pequeño de la Tierra, el peso de un objeto en Júpiter es sólo 2.64 veces su peso en la Tierra, a pesar del hecho de que Júpiter tiene más de 300 veces más masa.

PREGUNTA 4.4 Un volumen de piedra tiene una masa aproximada de tres veces un volumen similar de hielo. Considere que un mundo está hecho de hielo, mientras que otro con el mismo radio está hecho de roca. Si g es la aceleración de la gravedad en la superficie del mundo de hielo, ¿cuál es la aceleración aproximada de gravedad en el mundo de roca? (*Sugerencia:* Establezca la masa de una roca en términos de la masa de un cubo de hielo que tiene el mismo tamaño.)

EJERCICIO 4.4 Un astronauta aterriza en Ganímedes, una luna gigante de Júpiter que es más grande que Mercurio. Ganímedes tiene una cuadragésima parte de la masa de la Tierra y dos quintos de su radio. Determine el peso del astronauta de pie en Ganímedes en términos de su peso en la Tierra w_T .

RESPUESTA $w_G = (5/32)w_T$

4.4 Tercera ley de Newton

En la sección 4.1 determinamos que se ejerce una fuerza sobre un objeto cuando se pone en contacto con algún otro. Por ejemplo, considere la tarea de introducir un clavo dentro de un bloque de madera, como se ilustra en la figura 4.9a (página 96). Para acelerar el clavo y conducirlo hacia dentro del bloque, el martillo debe ejercer una fuerza neta sobre el clavo. De cualquier modo, Newton se dio cuenta que una sola fuerza aislada (como la fuerza que ejerce el martillo sobre el clavo) no podría existir. Más bien, las **fuerzas en la naturaleza siempre existen en pares**. De acuerdo con Newton, cuando el clavo es impulsado dentro del bloque por la fuerza ejercida por el martillo, éste disminuye su velocidad y se detiene por la fuerza ejercida por el clavo.

Newton describe tales pares de fuerzas con su **tercera ley**:

Si interactúan el objeto 1 y el objeto 2, la fuerza \vec{F}_{12} ejercida por el objeto 1 en el objeto 2 es igual en magnitud, pero opuesta en dirección a la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por el objeto 2 en el objeto 1.

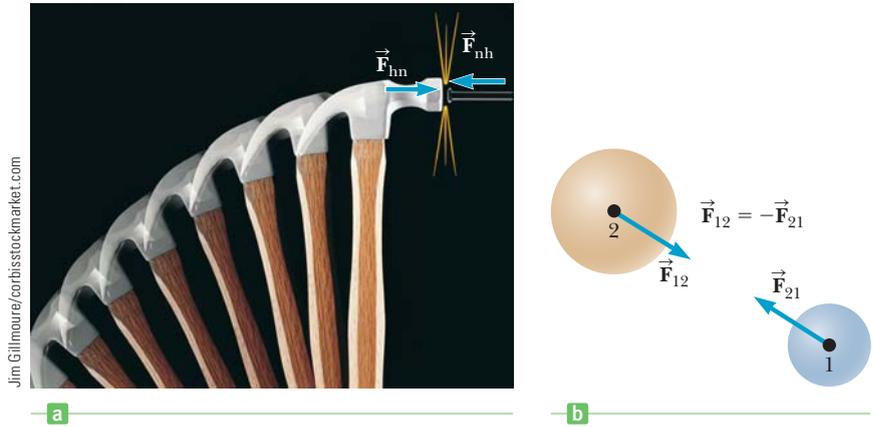
Esta ley que se ilustra en la figura 4.9b: establece que **no puede existir una simple fuerza aislada**. La fuerza \vec{F}_{12} ejercida por el objeto 1 sobre el objeto 2 en ocasiones es denominada *fuerza de acción*, y la otra fuerza \vec{F}_{21} ejercida por el objeto 2 sobre el objeto 1 es conocida como *fuerza de reacción*. En realidad, la fuerza puede ser etiquetada por cualquiera de las dos fuerzas de acción o de reacción. **La fuerza de acción es igual en magnitud a la fuerza de reacción y opuesta en dirección. En todos los casos, las fuerzas de acción y reacción actúan en diferentes objetos.** Por ejemplo, la fuerza que actúa en un proyectil en caída libre es la fuerza ejercida por la Tierra sobre el proyectil, \vec{F}_g , y la magnitud de esta fuerza es el peso mg . La reacción a la fuerza \vec{F}_g es la fuerza ejercida por el proyectil sobre la Tierra, $\vec{F}'_g = -\vec{F}_g$. La fuerza de reacción \vec{F}'_g puede acelerar la Tierra hacia el proyectil justo

◀ Tercera ley de Newton

Tip 4.4 Pares acción-reacción

Al aplicar la tercera ley de Newton, recuerde que una fuerza de acción y su fuerza de reacción actúan siempre en *diferentes* objetos. Dos fuerzas externas actuando en el mismo objeto, incluso si son de igual magnitud y en dirección opuesta, *no pueden* ser un par acción-reacción.

Figura 4.9 La tercera ley de Newton. a) La fuerza ejercida por el martillo sobre el clavo es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza ejercida por el clavo sobre el martillo. b) La fuerza \vec{F}_{12} ejercida por el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por el objeto 2 sobre el objeto 1.



como la fuerza de acción \vec{F}_g acelera al proyectil hacia la Tierra. De cualquier modo, a causa de que la Tierra tiene mucho más masa, su aceleración debido a su fuerza de reacción es insignificamente pequeña.

La tercera ley de Newton afecta continuamente nuestras actividades cotidianas. Sin ella, ninguna clase de locomoción sería posible, ya fuera a pie, en una bicicleta o en un vehículo motorizado. Por ejemplo, al caminar se ejerce una fuerza de fricción contra la superficie de la tierra. La fuerza de reacción de la superficie de la tierra contra nuestros pies nos impulsa hacia adelante. De la misma manera, los neumáticos de una bicicleta ejercen una fuerza de fricción contra la superficie de la tierra, y la reacción de ésta empuja a la bicicleta hacia adelante. Como se verá brevemente, la fricción juega un papel principal en tales fuerzas de reacción.

Como otro ejemplo de la tercera ley de Newton, considere los helicópteros. La mayoría de ellos tiene un conjunto de grandes aspas giratorias en un plano horizontal arriba del cuerpo del aparato y otro conjunto giratorio más pequeño en un plano vertical en la cola del mismo. Otros helicópteros tienen dos conjuntos de grandes aspas arriba del cuerpo girando en direcciones opuestas. ¿Por qué los helicópteros siempre tienen dos conjuntos de aspas? En la primera clase de helicóptero, el motor aplica una fuerza a las aspas, ocasionando que cambien su movimiento rotacional. Sin embargo, de acuerdo con la tercera ley de Newton las aspas deben ejercer una fuerza en el motor de igual magnitud y en dirección opuesta. Esta fuerza ocasionaría que el cuerpo del helicóptero dé vueltas en la dirección contraria a las aspas. Un helicóptero rotatorio sería imposible de controlar, de tal modo que se utiliza un segundo conjunto de aspas. Las aspas pequeñas en la cola del aparato proporcionan una fuerza opuesta a la que tiende a girar al cuerpo del helicóptero, manteniendo el aparato dirigido en una posición estable. En helicópteros con dos conjuntos de grandes aspas que giran en sentidos opuestos, los motores aplican fuerzas en direcciones opuestas, de tal modo que no existe fuerza neta rotatoria del helicóptero.

Como ya se mencionó, la Tierra ejerce una fuerza \vec{F}_g sobre cualquier objeto. Si el objeto es un monitor en reposo sobre una mesa, como en la figura 4.10a, la fuerza de reacción a \vec{F}_g es la fuerza que ejerce el monitor sobre la Tierra, \vec{F}'_g . El monitor no se acelera hacia

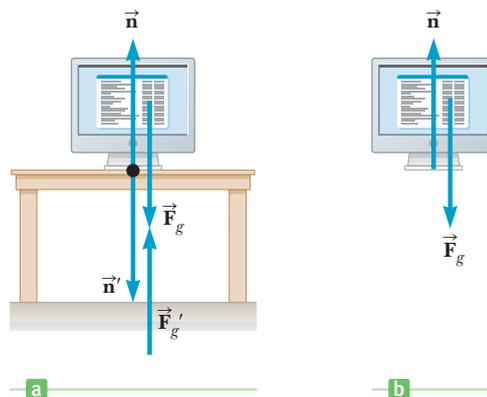
APLICACIÓN

Vuelo de un helicóptero

Tip 4.5 Igual y opuesta pero no es una fuerza de reacción

Un error común en la figura 4.10b es considerar la fuerza normal sobre el objeto como la fuerza de reacción a la fuerza de la gravedad, porque en este caso, estas dos fuerzas son iguales en magnitud y opuestas en dirección. Sin embargo, esto es imposible, debido a que actúan en el mismo objeto.

Figura 4.10 Cuando se coloca un monitor sobre una mesa, las fuerzas que actúan en el aparato son la fuerza normal \vec{n} ejercida por la mesa y la fuerza de gravedad, \vec{F}_g , como se ilustra en b). La reacción a \vec{n} es la fuerza ejercida por el monitor sobre la mesa, \vec{n}' . La reacción a \vec{F}_g es la fuerza ejercida por el monitor sobre la Tierra, \vec{F}'_g .



abajo ya que la sostiene la mesa. Por lo tanto, la mesa ejerce una fuerza hacia arriba \vec{n} , conocida como la **fuerza normal**, sobre el monitor. (*Normal*, un término técnico de matemáticas, que en este contexto significa “perpendicular”.) La fuerza normal es una fuerza elástica que surge a causa de la cohesión de la materia y es de origen electromagnético. Equilibra la fuerza de gravitación que actúa sobre el monitor, evitando que este caiga a través de la mesa y puede tener cualquier valor necesario, hasta el punto de romper la mesa. La reacción a \vec{n} es la fuerza ejercida por el monitor sobre la mesa, \vec{n}' . Debido a eso,

$$\vec{F}_g = -\vec{F}_g' \quad \text{y} \quad \vec{n} = -\vec{n}'$$

Las fuerzas \vec{n} y \vec{n}' tienen la misma magnitud que \vec{F}_g . Observe que las fuerzas de acción sobre el monitor son \vec{F}_g y \vec{n} , como se muestra en la figura 4.10b. Las dos fuerzas de reacción, \vec{F}_g' y \vec{n}' , son ejercidas por el monitor en objetos diferentes a este. Recuerde que las dos fuerzas en un par acción-reacción siempre actúan en dos objetos diferentes.

Debido a que el monitor no está acelerando en ninguna dirección ($\vec{a} = 0$), de la segunda ley de Newton tenemos que $m\vec{a} = 0 = \vec{F}_g + \vec{n}$. Sin embargo, $F_g = -mg$, así que $n = mg$, un resultado útil.

Examen rápido

4.4 Un pequeño automóvil deportivo colisiona de frente contra un camión. La enorme fuerza de impacto (en magnitud) actúa sobre a) el automóvil, b) el camión, c) ninguno, la fuerza es la misma en ambos. ¿Cuál es el vehículo que se somete a la mayor aceleración en magnitud? d) el automóvil, e) el camión, f) las aceleraciones son las mismas.

APLICACIÓN

Colisión de vehículos

EJEMPLO 4.5 Acción-reacción y el patinaje sobre hielo

OBJETIVO Ilustrar la tercera ley de Newton del movimiento.

PROBLEMA Un hombre de masa $M = 75.0$ kg y una mujer de la masa de $m = 55.0$ kg están de pie uno frente al otro en una pista de hielo, usando patines de hielo. La mujer empuja al hombre con una fuerza horizontal de $F = 85.0$ N en la dirección x positiva. Suponga que no hay fricción contra el hielo. **a)** ¿Cuál es la aceleración del hombre? **b)** ¿Cuál es la fuerza de reacción que actúa sobre la mujer? **c)** Calcular la aceleración de la mujer.

ESTRATEGIA Los incisos a) y c) son aplicaciones sencillas de la segunda ley. Una aplicación de la tercera ley resuelve el inciso b).

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál es la aceleración del hombre?

Escriba la segunda ley para el hombre:

$$Ma_H = F$$

Resuelva para la aceleración del hombre y sustituya valores:

$$a_H = \frac{F}{M} = \frac{85.0 \text{ N}}{75.0 \text{ kg}} = 1.13 \text{ m/s}^2$$

b) ¿Cuál es la fuerza de reacción que actúa sobre la mujer?

Aplique la tercera ley de Newton del movimiento, encontrando que la fuerza de reacción R que actúa sobre la mujer tiene la misma magnitud y dirección contraria:

$$R = -F = -85.0 \text{ N}$$

c) Calcule la aceleración de la mujer.

Escriba la segunda ley de Newton para la mujer:

$$ma_M = R = -F$$

Resuelva para la aceleración de la mujer y sustituya valores:

$$a_M = \frac{-F}{m} = \frac{-85.0 \text{ N}}{55.0 \text{ kg}} = -1.55 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS Tenga en cuenta que las fuerzas son iguales y opuestas entre sí, pero las aceleraciones no, ya que las dos masas difieren entre sí.

PREGUNTA 4.5 Nombre otras dos fuerzas que actúan sobre el hombre y las dos fuerzas de reacción que se combinan con ellos.

(continúa)

EJERCICIO 4.5 Un astronauta de 148 kg de masa total en el espacio ejerce una fuerza de 265 N en un satélite de libre flotación de masa 635 kg, empujándolo en la dirección x positiva. a) ¿Cuál es la fuerza de reacción ejercida por el satélite sobre el astronauta? Calcule las aceleraciones de b) el astronauta y c) el satélite.

RESPUESTAS a) -265 N b) -1.79 m/s² c) 0.417 m/s²



Figura 4.11 La segunda ley de Newton aplicada a una cuerda proporcionala $T - T' = ma$. Sin embargo, si $m = 0$, entonces $T = T'$. Así, la tensión en una cuerda sin masa es la misma en todos los puntos en la cuerda.

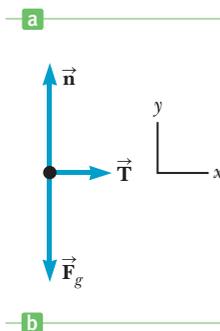


Figura 4.12 a) Una caja está siendo jalada hacia la derecha sobre una superficie sin fricción. b) El diagrama de cuerpo libre que representa las fuerzas ejercidas sobre la caja.

Tip 4.6 Diagramas de cuerpo libre

La *etapa más importante* en la solución de un problema por medio de la segunda ley de Newton es dibujar el diagrama de cuerpo libre correcto. Incluya sólo aquellas fuerzas que actúan directamente sobre el objeto bajo estudio.

Tip 4.7 Una partícula en equilibrio

Una fuerza neta igual a cero sobre una partícula *no* significa que la partícula no se esté moviendo. Significa que la partícula no se está *acelerando*. Si la partícula tiene una velocidad inicial diferente de cero y una fuerza neta igual a cero está actuando sobre ella, continúa moviéndose con la misma velocidad.

4.5 Aplicaciones de las leyes de Newton

Esta sección aplica las leyes de Newton a objetos en movimiento bajo la influencia de fuerzas externas constantes. Suponemos que los objetos se comportan como partículas, de manera que no es necesario considerar la posibilidad de movimiento rotacional. Además, despreciamos cualquier efecto de la fricción y las masas de cualquier cuerda o lazo incluidos. Con estas aproximaciones, la magnitud de la fuerza ejercida a lo largo de una cuerda, conocida como **tensión**, es la misma en todos los puntos en la cuerda. Esto se aclara por la cuerda en la figura 4.11, que muestra las fuerzas \vec{T} y \vec{T}' que actúan en ella. Si la cuerda tiene masa m , entonces la segunda ley de Newton aplicada a la cuerda proporciona $T - T' = ma$. De cualquier modo, si despreciamos la masa m , como en los próximos ejemplos, entonces $T = T'$.

Cuando se aplican las leyes de Newton a un objeto, sólo nos interesan aquellas fuerzas que actúan *sobre el objeto*. Por ejemplo, en la figura 4.10b, las únicas fuerzas externas que actúan sobre el monitor son \vec{n} y \vec{F}_g . Las reacciones a estas fuerzas, \vec{n}' y \vec{F}_g' , actúan sobre la mesa y sobre la Tierra, respectivamente, y no aparecen aplicadas en la segunda ley de Newton para el monitor.

Considere una caja que se está jalando a la derecha sobre una superficie horizontal, sin fricción, como en la figura 4.12a. Suponga que quiere encontrar la aceleración de la caja y la fuerza que ejerce la superficie en ella. La fuerza horizontal ejercida sobre la caja actúa a través de la cuerda. La fuerza que la cuerda ejerce sobre la caja se indica mediante \vec{T} (debido a que es una fuerza de tensión). La magnitud de \vec{T} es igual a la tensión en la cuerda. Lo que se intenta mediante las palabras “tensión en la cuerda” es precisamente la fuerza leída en una balanza de resorte cuando la cuerda en el problema ha sido cortada e insertada en la balanza entre los extremos que se cortaron. Se dibuja una circunferencia discontinua alrededor de la caja en la figura 4.12a, para destacar la importancia de aislar la caja de sus alrededores.

Ya que nos interesa sólo el movimiento de la caja, se debe tener la capacidad para identificar todas las fuerzas que actúan sobre ella. Estas fuerzas se ilustran en la figura 4.12b. Además de la exhibición de la fuerza \vec{T} , el diagrama de fuerza para la caja incluye la fuerza de gravedad \vec{F}_g ejercida por la Tierra y la fuerza normal \vec{n} ejercida por el piso. Tal diagrama de fuerza se conoce como **diagrama de cuerpo libre** ya que el ambiente se sustituye por una serie de fuerzas relacionadas en un cuerpo libre de otra manera. La construcción correcta de un diagrama de cuerpo libre es una fase esencial en la aplicación de las leyes de Newton. ¡Un diagrama inexacto muy probablemente nos conducirá a respuestas incorrectas!

Las *reacciones* a las fuerzas que hemos mencionado —específicamente, la fuerza ejercida mediante la cuerda en la mano que está jalando, la fuerza ejercida por la caja sobre la Tierra y la fuerza ejercida por la caja sobre el piso— no se incluyen en el diagrama de cuerpo libre debido a que actúan en otros objetos, y no sobre la caja. En consecuencia, no influyen directamente en el movimiento de ésta. Sólo se incluyen las fuerzas que actúan directamente sobre ella.

Ahora apliquemos la segunda ley de Newton a la caja. Primero, elegimos un sistema coordenado adecuado. En este caso es conveniente utilizar uno que se muestra en la figura 4.12b, con el eje x horizontal y el eje y vertical. Se puede aplicar la segunda ley de Newton en la dirección x , en la dirección y , o en ambas, dependiendo de lo que se esté pidiendo determinar en el problema. La segunda ley de Newton aplicada a la caja en las direcciones x y y produce las dos ecuaciones siguientes:

$$ma_x = T \quad ma_y = n - mg = 0$$

A partir de estas ecuaciones, tenemos que la aceleración en la dirección x es constante, proporcionada por $a_x = T/m$ y que la fuerza normal está dada por $n = mg$. Ya que la aceleración es constante, las ecuaciones de cinemática pueden ser aplicadas para obtener información adicional acerca de la velocidad y el desplazamiento del objeto.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Segunda ley de Newton

Los problemas que involucran la segunda ley de Newton pueden ser muy complejos. El siguiente protocolo rompe el proceso de solución en objetivos intermedios, más pequeños:

1. **Lea** el problema esmeradamente por lo menos una vez.
2. **Trace** una imagen del sistema, identifique el objeto de interés básico e indique las fuerzas con flechas.
3. **Etiquete** cada fuerza en la imagen de cierta manera que inducirá a pensar lo que las cantidades físicas representan (digamos, T para la tensión).
4. **Trace** un diagrama de cuerpo libre del objeto de interés, en función de la imagen etiquetada. Si se incluyen objetos adicionales, dibuje diagramas de cuerpo libre por separado para ellos. Elija coordenadas convenientes para cada objeto.
5. **Aplique la segunda ley de Newton.** Los componentes x y y de la segunda ley de Newton se toman de la ecuación vectorial y se describen individualmente. Esto por lo general da como resultado dos ecuaciones y dos incógnitas.
6. **Resuelva** para la cantidad desconocida deseada y sustituya los números.

En el caso especial de equilibrio, el proceso anterior se simplifica ya que la aceleración es cero.

Objetos en equilibrio

Los objetos que están ya sea en reposo o moviéndose con velocidad constante se dice que están en equilibrio. Ya que $\vec{a} = 0$, al aplicar la segunda ley de Newton a un objeto en equilibrio, tenemos

$$\sum \vec{F} = 0 \quad [4.9]$$

Este enunciado establece que la suma *vectorial* de todas las fuerzas (la fuerza neta) que actúa sobre un objeto en equilibrio es cero. La ecuación 4.9 es equivalente al conjunto de ecuaciones por componente dadas por

$$\sum F_x = 0 \quad \text{y} \quad \sum F_y = 0 \quad [4.10]$$

En este libro no se consideran problemas en tres dimensiones, pero la extensión de la ecuación 4.10 para un problema de este tipo puede hacerse mediante la adición de una tercera ecuación: $\sum F_z = 0$.

■ Examen rápido

4.5 Piense en las dos situaciones que se muestran en la figura 4.13 en las que no existe aceleración. En ambos casos el hombre jala con una fuerza de magnitud F . La lectura en la balanza del inciso i) de la figura a) ¿es mayor que, b) menor que, o bien c) igual a la lectura en el inciso ii)?

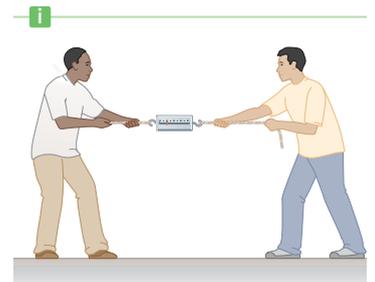
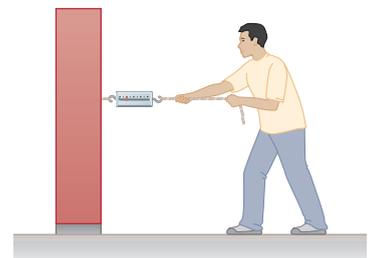


Figura 4.13 (Examen rápido 4.5)
i) Una persona jala una balanza de resorte unida a un muro con una fuerza de magnitud F . ii) Dos personas jalan una balanza de resorte colocada entre dos cuerdas con fuerzas de magnitud F en direcciones opuestas.

EJEMPLO 4.6 Semáforos en reposo

OBJETIVO Aplicar la segunda ley a un problema de equilibrio que necesita dos diagramas de cuerpo libre.

PROBLEMA Un semáforo pesa 1.00×10^2 N cuelga de un cable vertical atado a otros dos que están unidos a un soporte, como en la figura 4.14a. Los cables superiores forman un ángulo de 37.0° y 53.0° con la horizontal. Determine la tensión en cada uno de los tres cables.

ESTRATEGIA Existen tres incógnitas, de tal manera que necesitamos generar tres ecuaciones que las relacionen, que después podamos resolver. Se puede obtener una ecuación aplicando la segunda ley de Newton al semáforo, que tiene fuerzas sólo en la dirección y . Dos ecuaciones más se pueden determinar al aplicar la segunda ley en el nudo que une los cables: una ecuación para la componente x y otra para la componente y .

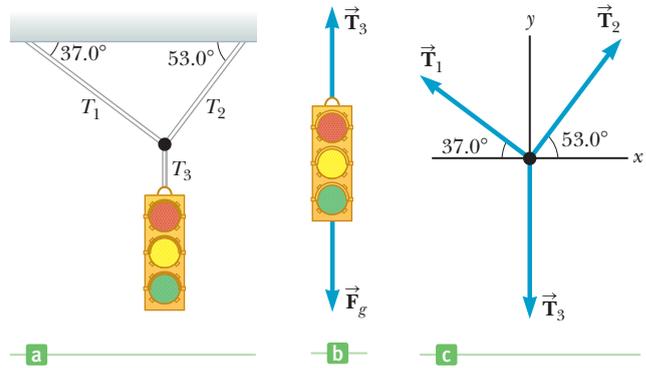


Figura 4.14 (Ejemplo 4.6) a) Un semáforo suspendido mediante cables. b) Diagrama de cuerpo libre para el semáforo. c) Diagrama de cuerpo libre para el nudo en la unión de los cables.

SOLUCIÓN

Encuentre T_3 a partir de la figura 4.14b, utilizando la condición de equilibrio:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow T_3 - F_g = 0$$

$$T_3 = F_g = 1.00 \times 10^2 \text{ N}$$

Utilizando la figura 4.14c, resuelva las tres tensiones en las componentes x y y , por conveniencia, construya una tabla:

Fuerza	Componente x	Componente y
\vec{T}_1	$-T_1 \cos 37.0^\circ$	$T_1 \sin 37.0^\circ$
\vec{T}_2	$T_2 \cos 53.0^\circ$	$T_2 \sin 53.0^\circ$
\vec{T}_3	0	$-1.00 \times 10^2 \text{ N}$

Aplice la condición de equilibrio para el nudo, utilizando las componentes en el cable:

(1) $\sum F_x = -T_1 \cos 37.0^\circ + T_2 \cos 53.0^\circ = 0$

(2) $\sum F_y = T_1 \sin 37.0^\circ + T_2 \sin 53.0^\circ - 1.00 \times 10^2 \text{ N} = 0$

Existen dos ecuaciones y dos incógnitas. Resuelva la ecuación (1) para T_2 :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{\cos 37.0^\circ}{\cos 53.0^\circ} \right) = T_1 \left(\frac{0.799}{0.602} \right) = 1.33 T_1$$

Sustituya el resultado para T_2 en la ecuación (2):

$$T_1 \sin 37.0^\circ + (1.33 T_1)(\sin 53.0^\circ) - 1.00 \times 10^2 \text{ N} = 0$$

$$T_1 = 60.1 \text{ N}$$

$$T_2 = 1.33 T_1 = 1.33(60.1 \text{ N}) = 79.9 \text{ N}$$

COMENTARIOS Es muy fácil tener errores de signo en esta clase de problemas. Una manera de evitarlos es medir siempre el ángulo de un vector desde la dirección x positiva. En tal caso las funciones trigonométricas del ángulo automáticamente darán el signo correcto para los componentes. Por ejemplo, \vec{T}_1 forma un ángulo de $180^\circ - 37^\circ = 143^\circ$ con respecto al eje x positivo y su componente x , $T_1 \cos 143^\circ$, es negativo, como debe ser.

PREGUNTA 4.6 ¿Cómo cambiaría la respuesta si un segundo semáforo se une debajo del primero?

EJERCICIO 4.6 Considere que el semáforo está colgado de tal manera que las tensiones T_1 y T_2 son iguales a 80.0 N. Hallar los nuevos ángulos que se forman con respecto al eje x . (Por simetría, estos ángulos serán los mismos.)

RESPUESTA Los dos ángulos son de 38.7° .

■ EJEMPLO 4.7 Trineo sobre una colina sin fricción

OBJETIVO Utilizar la segunda ley de Newton y la fuerza normal en un problema de equilibrio.

PROBLEMA Un trineo es atado a un árbol sobre una colina cubierta de nieve, sin fricción, como se muestra en la figura 4.15a. Si el trineo pesa 77.0 N, determine la fuerza ejercida por la cuerda \vec{T} y la magnitud de la fuerza \vec{n} ejercida por la colina sobre el trineo.

ESTRATEGIA Cuando un objeto está sobre la pendiente, es conveniente usar coordenadas inclinadas, como en la figura 4.15b, de tal modo que la fuerza normal \vec{n} está en la dirección y y la fuerza de tensión \vec{T} está en la dirección x . En ausencia de fricción, la colina no ejercerá fuerza sobre el trineo en la dirección x . Como el trineo está en reposo, aplique las condiciones para el equilibrio, $\Sigma F_x = 0$ y $\Sigma F_y = 0$, que proporcionan dos ecuaciones para las dos incógnitas, la tensión y la fuerza normal.

SOLUCIÓN

Aplique la segunda ley de Newton al trineo, con $\vec{a} = 0$:

Extraiga la componente x de esta ecuación para encontrar T . La componente x de la fuerza normal es cero y se proporciona el peso del trineo mediante $mg = 77.0$ N.

Escriba la segunda ley de Newton para la componente y . La componente y de la tensión es cero, de tal modo que esta ecuación proporcionará la fuerza normal.

COMENTARIOS A diferencia de su valor sobre una superficie horizontal, n es menor que el peso del trineo cuando éste se encuentra sobre la pendiente. Esto es sólo en parte a causa de la fuerza de gravedad (la componente x) que actúa jalando el trineo hacia abajo de la pendiente. La componente y de la fuerza de gravedad equilibra la fuerza normal.

PREGUNTA 4.7 Considere el mismo escenario en una colina con una pendiente muy pronunciada. ¿La magnitud de la tensión en la cuerda tiene que ser más grande, más pequeña o permanecer igual que antes? ¿Cómo se afectaría la fuerza normal?

EJERCICIO 4.7 Suponga que un niño de peso w sube al trineo. Si la fuerza de tensión que se observa es de 60.0 N, determine el peso del niño y la magnitud de la fuerza normal que actúa sobre el trineo.

RESPUESTAS $w = 43.0$ N, $n = 104$ N

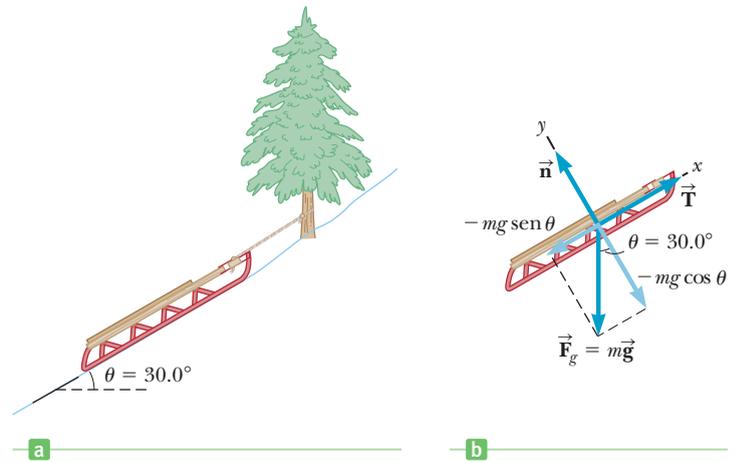


Figura 4.15 (Ejemplo 4.7) a) Un trineo atado a un árbol sobre una colina sin fricción. b) Un diagrama de cuerpo libre para el trineo.

$$\Sigma \vec{F} = \vec{T} + \vec{n} + \vec{F}_g = 0$$

$$\Sigma F_x = T + 0 - mg \sin \theta = T - (77.0 \text{ N}) \sin 30.0^\circ = 0$$

$$T = 38.5 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = 0 + n - mg \cos \theta = n - (77.0 \text{ N})(\cos 30.0^\circ) = 0$$

$$n = 66.7 \text{ N}$$

■ Examen rápido

4.6 Para la chica que está siendo jalada hacia adelante en el trineo, figura 4.16, la magnitud de la fuerza normal ejercida por la tierra sobre el trineo es a) ¿igual al peso total de la chica más el trineo, b) mayor que el peso total, c) menor que el peso total, o bien d) posiblemente mayor o menor que el peso total, dependiendo del tamaño del peso relativo a la tensión en la cuerda?

Objetos con aceleración y la segunda ley de Newton

Cuando una fuerza neta actúa sobre un objeto, el objeto acelera, y podemos aplicar la segunda ley de Newton para estudiar el movimiento.

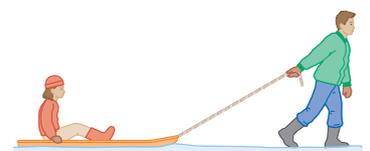


Figura 4.16 (Examen rápido 4.6)

EJEMPLO 4.8 **Cómo mover una caja**

OBJETIVO Aplicar la segunda ley de movimiento para un sistema que no está en equilibrio, junto con una ecuación cinemática.

PROBLEMA El peso combinado de la caja y la carretilla en la figura 4.17 es 3.00×10^2 N. Si el hombre jala de la cuerda con una fuerza constante de 20.0 N, ¿cuál es la aceleración del sistema (caja más carretilla) y qué distancia recorrerá en 2.00 s? Considere que el sistema inicia desde el reposo y que no existen fuerzas de fricción que se opongan al movimiento.

ESTRATEGIA Puede determinar la aceleración del sistema a partir de la segunda ley de Newton. Ya que la fuerza ejercida en el sistema es constante, su aceleración es constante. Por lo tanto, puede aplicarse una ecuación cinemática para determinar la distancia recorrida en 2.00 s.

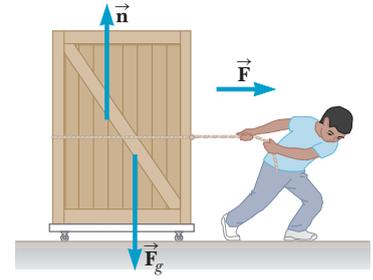


Figura 4.17 (Ejemplo 4.8)

SOLUCIÓN

Determine la masa del sistema de la definición de peso, $w = mg$:

$$m = \frac{w}{g} = \frac{3.00 \times 10^2 \text{ N}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 30.6 \text{ kg}$$

Encuentre la aceleración del sistema de acuerdo con la segunda ley:

$$a_x = \frac{F_x}{m} = \frac{20.0 \text{ N}}{30.6 \text{ kg}} = 0.654 \text{ m/s}^2$$

Aplique la cinemática para hallar la distancia recorrida en 2.00 s, con $v_0 = 0$:

$$\Delta x = \frac{1}{2} a_x t^2 = \frac{1}{2} (0.654 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ s})^2 = 1.31 \text{ m}$$

COMENTARIOS Observe que la fuerza constante aplicada de 20.0 N se supone que actúa en el sistema todo el tiempo durante su movimiento. Si la fuerza fuera retirada en algún momento, el sistema continuaría moviéndose con velocidad constante y, en consecuencia, la aceleración es cero. En este caso, se puede omitir el efecto de las ruedas.

PREGUNTA 4.8 ¿Qué efecto tiene duplicar el peso sobre la aceleración y el desplazamiento?

EJERCICIO 4.8 Un hombre jala una caja de 50.0 kg horizontalmente desde el reposo mientras ejerce una fuerza horizontal constante, desplazando la caja 3.00 m en 2.00 s. Encuentre la fuerza que el hombre ejerce sobre la caja. (Desprecie la fricción.)

RESPUESTA 75.0 N

EJEMPLO 4.9 **Automóvil sin control**

OBJETIVO Aplicar la segunda ley y las ecuaciones de cinemática a un problema que involucra un objeto moviéndose sobre un plano inclinado.

PROBLEMA a) Un automóvil de masa m está sobre un camino cubierto de hielo inclinado en un ángulo $\theta = 20.0^\circ$, como en la figura 4.18a. Determine la aceleración del automóvil, suponiendo que no hay fricción en el plano. b) Si la longitud del camino es de 25.0 m y el automóvil inicia desde el reposo en la parte superior, ¿cuánto tiempo le toma llegar hasta la parte inferior? c) ¿Cuál es la rapidez del automóvil en la parte inferior?

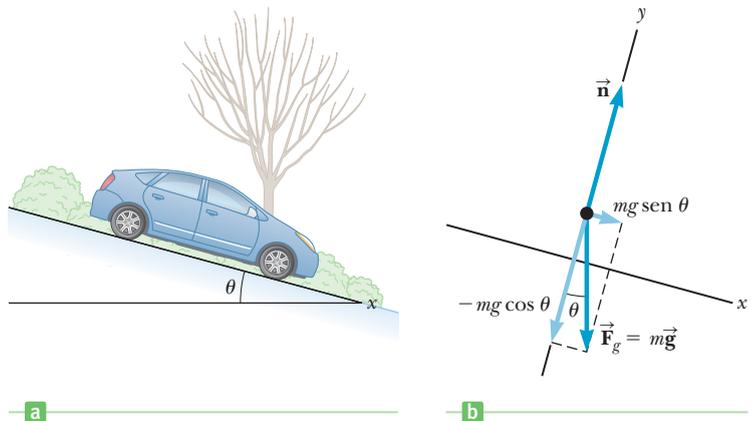


Figura 4.18 (Ejemplo 4.9)

ESTRATEGIA Seleccione coordenadas inclinadas como en la figura 4.18b de tal modo que la fuerza normal \vec{n} esté en la dirección y positiva, perpendicular al camino y el eje x positivo hacia abajo en la pendiente. En tal caso la fuerza de gravedad \vec{F}_g tiene una componente x , $mg \sin \theta$ y una componente y , $-mg \cos \theta$. La segunda ley de Newton en términos de las componentes forma un sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas para la aceleración cuesta abajo en la pendiente, a_x , la fuerza normal. Los incisos b) y c) pueden resolverse con las ecuaciones de cinemática.

SOLUCIÓN

a) Determine la aceleración del automóvil.

Aplique la segunda ley de Newton:

Extraiga las componentes x y y de la segunda ley:

Divida la ecuación (1) entre m y sustituya los valores conocidos:

b) Determine el tiempo que le toma al automóvil alcanzar la parte inferior de la pendiente.

Utilice la ecuación 3.11b para el desplazamiento, con $v_{0x} = 0$:

c) Determine la rapidez del automóvil en la parte inferior del camino.

Utilice la ecuación 3.11a para la velocidad, una vez más con $v_{0x} = 0$:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{n}$$

$$(1) \quad ma_x = \sum F_x = mg \sen \theta$$

$$(2) \quad 0 = \sum F_y = -mg \cos \theta + n$$

$$a_x = g \sen \theta = (9.80 \text{ m/s}^2) \sen 20.0^\circ = 3.35 \text{ m/s}^2$$

$$\Delta x = \frac{1}{2} a_x t^2 \rightarrow \frac{1}{2} (3.35 \text{ m/s}^2) t^2 = 25.0 \text{ m}$$

$$t = 3.86 \text{ s}$$

$$v_x = a_x t = (3.35 \text{ m/s}^2)(3.86 \text{ s}) = 12.9 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Observe que la respuesta final para la aceleración depende sólo de g y el ángulo θ , no de la masa. La ecuación 2), que proporciona la fuerza normal, en este caso no es útil, pero es esencial cuando la fricción se hace presente.

PREGUNTA 4.9 Si el automóvil está estacionado sobre una pendiente más moderada, ¿cómo se afectará el tiempo requerido para que se deslice hasta la parte inferior de la colina? Explique.

EJERCICIO 4.9 a) Considere un disco de *hockey* que se desliza hacia abajo en una rampa sin fricción con una aceleración de 5.00 m/s^2 . ¿Qué ángulo forma la rampa con la horizontal? b) Si la rampa tiene un longitud de 6.00 m , ¿cuánto tiempo le toma al disco alcanzar la parte inferior de la misma? c) Ahora suponga que se duplica la masa del disco. ¿Cuál es la nueva aceleración del disco hacia abajo en la rampa?

RESPUESTA a) 30.7° b) 1.55 s c) Sin cambio, 5.00 m/s^2

EJEMPLO 4.10 Pesando un pescado en un elevador

OBJETIVO Explore el efecto de la aceleración en el peso aparente de un objeto.

PROBLEMA Una mujer pesa un pescado con una balanza de resorte unida al techo de un elevador, como se muestra en las figuras 4.19a y 4.19b. Mientras el elevador está en reposo, observa un peso de 40.0 N . a) ¿Qué peso se lee en la escala si el elevador acelera hacia arriba a 2.00 m/s^2 ? b) ¿Cuál es la lectura en la escala si el elevador acelera hacia abajo a 2.00 m/s^2 , como en la figura 4.19b? c) Si se rompe el cable del elevador, ¿cuál es la lectura en la escala?

ESTRATEGIA Escriba la segunda ley de Newton para el pescado, incluya la fuerza \vec{T} ejercida por la balanza y la fuerza de gravedad, $m\vec{g}$. La balanza no mide el peso verdadero, ésta mide la fuerza T que ejerce sobre el pescado, de tal modo que cada caso se resuelve para esta fuerza, que es el peso aparente que se mide en la balanza.

SOLUCIÓN

a) Halle la lectura en la escala cuando el elevador acelera hacia arriba como en la figura 4.19a.

Cuando el ascensor acelera hacia arriba, la balanza de resorte lee un valor mayor que el peso de los peces.

Cuando el ascensor acelera hacia abajo, la balanza de resorte lee un valor menor que el peso de los peces.

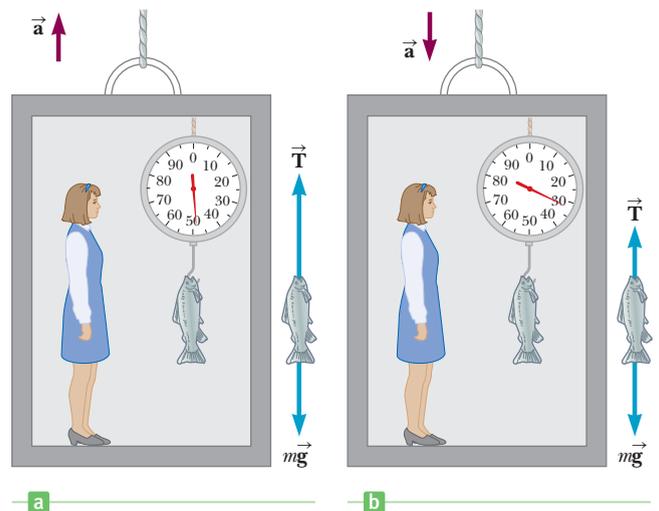


Figura 4.19 (Ejemplo 4.10)

(continúa)

Aplique la segunda ley de Newton al pescado, considere la dirección positiva hacia arriba como:

Resuelva para T :

Encuentre la masa del pescado a partir de su peso de 40.0 N:

Calcule el valor de T , sustituyendo $a = +2.00 \text{ m/s}^2$:

b) Determine la lectura en la escala cuando el elevador acelera hacia abajo, como en la figura 4.19b.

El análisis es el mismo, el único cambio es la aceleración, que ahora es negativa: $a = -2.00 \text{ m/s}^2$.

c) Determine la lectura en la escala después de que el cable del elevador se rompe.

Ahora $a = -9.80 \text{ m/s}^2$, la aceleración debido a la gravedad:

$$ma = \sum F = T - mg$$

$$T = ma + mg = m(a + g)$$

$$m = \frac{w}{g} = \frac{40.0 \text{ N}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 4.08 \text{ kg}$$

$$T = m(a + g) = (4.08 \text{ kg})(2.00 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2) = 48.1 \text{ N}$$

$$T = m(a + g) = (4.08 \text{ kg})(-2.00 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2) = 31.8 \text{ N}$$

$$T = m(a + g) = (4.08 \text{ kg})(-9.80 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2) = 0 \text{ N}$$

COMENTARIOS ¡Dese cuenta de lo importante que es tener los signos correctos en este problema! La aceleración puede aumentar o disminuir el peso aparente de un objeto. Los astronautas experimentan cambios muy grandes en el peso aparente, desde varias veces su peso normal durante el ascenso hasta la ingravidez en caída libre.

PREGUNTA 4.10 Iniciando desde el reposo, un elevador acelera hacia arriba, después alcanza y mantiene una velocidad constante hasta llegar al piso deseado, cuando inicia la disminución de su velocidad. Describa la lectura de la escala durante este tiempo.

EJERCICIO 4.10 Halle la aceleración inicial de un cohete si los astronautas a bordo experimentan ocho veces su peso normal durante el ascenso vertical inicial. (*Sugerencia:* En este ejercicio, la fuerza en la balanza se sustituye por la fuerza normal.)

RESPUESTA 68.6 m/s^2

■ EJEMPLO 4.11 Máquina de Atwood

OBJETIVO Aplicar la segunda ley de Newton para resolver simbólicamente un problema simple de dos cuerpos.

PROBLEMA Dos objetos de masa m_1 y m_2 , con $m_2 > m_1$, están conectados mediante una cuerda ligera, inextensible y colgada sobre una polea sin fricción, como en la figura activa 4.20a. Tanto la cuerda como la polea tienen masas despreciables. Hallar la magnitud de la aceleración del sistema y la tensión en la cuerda.

ESTRATEGIA La masa más pesada, m_2 , acelera hacia abajo, en la dirección y negativa. Debido a que la cuerda no se puede deformar, la aceleración en las dos masas es igual en magnitud, pero *opuesta* en dirección, de tal modo que a_1 es positiva y a_2 es negativa y $a_2 = -a_1$. En cada masa actúa una fuerza de tensión \vec{T} en la dirección hacia arriba y una fuerza de gravedad en la dirección hacia abajo. La figura activa 4.20 muestra los diagramas de cuerpo libre para las dos masas. La segunda ley de Newton para cada masa, junto con la ecuación que relaciona las aceleraciones, constituye un conjunto de tres ecuaciones para las tres incógnitas: a_1 , a_2 y T .

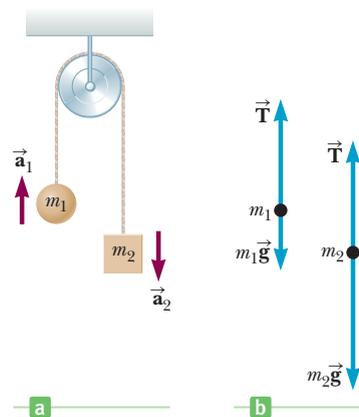


Figura activa 4.20 (Ejemplo 4.11) Máquina de Atwood. a) Dos objetos colgados unidos mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción. b) Diagramas de cuerpo libre para los objetos.

SOLUCIÓN

Aplique individualmente la segunda ley para cada una de las dos masas:

$$(1) \quad m_1 a_1 = T - m_1 g$$

$$(2) \quad m_2 a_2 = T - m_2 g$$

Sustituya $a_2 = -a_1$ en la ecuación (2) y multiplique ambos lados por -1 :

$$(3) \quad m_2 a_1 = -T + m_2 g$$

Sume las ecuaciones (1) y (3) y resuelva para a_1 :

$$(m_1 + m_2)a_1 = m_2 g - m_1 g$$

$$a_1 = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) g$$

Sustituya este resultado en la ecuación (1) para encontrar T :

$$T = \left(\frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) g$$

COMENTARIOS La aceleración del segundo bloque es la misma que para el primero, pero negativa. Cuando m_2 comparada con m_1 es muy grande, la aceleración del sistema se aproxima a g , como se esperaba, ya que m_2 está cayendo casi libremente bajo la influencia de la gravedad. En realidad, m_2 está sólo un poco restringida por lo ligero de m_1 .

PREGUNTA 4.11 ¿Cómo se podría utilizar por una persona esta máquina simple para levantar objetos muy pesados?

EJERCICIO 4.11 Considere en el mismo arreglo Atwood otra cuerda que está unida en la parte inferior de m_1 y es aplicada una fuerza constante f , retrasando el movimiento hacia arriba de m_1 . Si $m_1 = 5.00$ kg y $m_2 = 10.00$ kg, ¿qué valor de f reducirá la aceleración del sistema en 50%?

RESPUESTA 24.5 N

4.6 Fuerzas de fricción

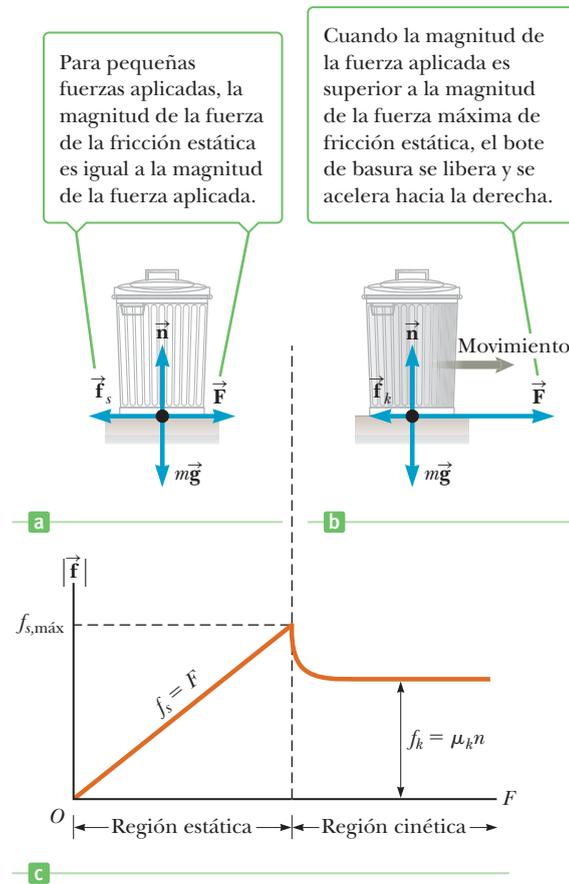
Un objeto en movimiento sobre una superficie o bien a través de un medio viscoso como aire o agua encuentra resistencia cuando interactúa con sus alrededores. Esta resistencia se conoce como **fricción**. Las fuerzas de fricción son esenciales en nuestra vida diaria. La fricción hace posible tomar y sostener cosas, conducir un automóvil, caminar y correr. Incluso estar de pie en un sitio es imposible sin la fricción, el menor cambio le ocasionaría al instante deslizarse y caerse.

Imagine que ha llenado un bote de plástico con desechos y quiere arrastrar el bote a través de la superficie de su patio de concreto. Si aplica una fuerza horizontal externa \vec{F} al bote, que actúe hacia la derecha como se muestra en la figura activa 4.21a (página 106), el bote permanece fijo si \vec{F} es pequeña. La fuerza que contrarresta a \vec{F} e impide que el bote se traslade, actúa hacia la izquierda, opuesta a la dirección de \vec{F} y se le conoce como **fuerza de fricción estática**, \vec{f}_s . Mientras el bote no se esté moviendo, $\vec{f}_s = -\vec{F}$. Si \vec{F} se incrementa, \vec{f}_s también aumenta. De la misma manera, si \vec{F} disminuye, \vec{f}_s también lo hace. Los experimentos demuestran que la fuerza de fricción surge de la naturaleza de las dos superficies. Debido a su rugosidad, el contacto se hace en unos cuantos puntos.

Si se incrementa la magnitud de \vec{F} , como en la figura activa 4.21b, el bote finalmente se desliza. Cuando el bote está en el límite del deslizamiento, f_s es un máximo, como se muestra en la figura activa 4.21c. Cuando F excede $f_{s,\text{máx}}$, el bote se acelera hacia la derecha. Cuando el bote está en movimiento, la fuerza de fricción es menor que $f_{s,\text{máx}}$ (figura 4.21c). A la fuerza de fricción para un objeto en movimiento se le denomina **fuerza de fricción cinética**, \vec{f}_k . La fuerza neta $F - f_k$ en la dirección x que produce una aceleración a la derecha, de acuerdo a la segunda ley de Newton. Si $F - f_k$, la aceleración es cero y el bote se mueve hacia la derecha con velocidad constante. Si se retira la fuerza aplicada, la fuerza de fricción actúa hacia la izquierda proporcionando una aceleración del bote en la dirección x negativa y, por último, llega al reposo, una vez más compatible con la segunda ley de Newton.

Experimentalmente, para una buena aproximación, las dos $f_{s,\text{máx}}$ y f_k para un objeto sobre una superficie son proporcionales a la fuerza normal ejercida por la superficie sobre el objeto. Las observaciones experimentales pueden resumirse de la siguiente manera:

Figura activa 4.21 a) y b) Al jalar un bote de basura, la dirección de la fuerza de fricción (\vec{f}_s en el inciso a) y \vec{f}_k en el inciso b)) entre el bote y la superficie rugosa, es opuesta a la dirección de la fuerza aplicada \vec{F} . c) Una gráfica de la magnitud de la fuerza de fricción en función de la fuerza aplicada. Observe que $f_{s,\text{máx}} > f_k$



- La magnitud de la fuerza de fricción estática entre dos superficies cualesquiera en contacto puede tener los valores

$$f_s \leq \mu_s n \quad [4.11]$$

donde la constante adimensional μ_s se le conoce como el **coeficiente de fricción estática**, y n es la magnitud de la fuerza normal ejercida por una superficie sobre otra. Además la ecuación 4.11 se cumple para $f_s = f_{s,\text{máx}} \equiv \mu_s n$ cuando un objeto está en el límite del deslizamiento. Esta situación se le conoce como *movimiento inminente*. El sentido estricto de la desigualdad se cumple cuando el componente paralelo de la fuerza aplicada a la superficie es menor que $\mu_s n$.

- La magnitud de la fuerza de fricción cinética que actúa entre dos superficies es

$$f_k = \mu_k n \quad [4.12]$$

donde μ_k es el **coeficiente de fricción cinética**.

- Los valores de μ_k y μ_s dependen de la naturaleza de las superficies, pero μ_k por lo general es menor que μ_s . La tabla 4.2 menciona algunos valores reportados.
- La dirección de la fuerza de fricción ejercida por una superficie sobre un objeto es opuesta al movimiento presente (fricción cinética) o bien el movimiento inminente (fricción estática) del objeto relativo a la superficie.
- Los coeficientes de fricción son casi independientes del área de contacto entre las superficies.

Aunque el coeficiente de fricción cinética varía con la rapidez del objeto, Desprecie cualquier variación. Con facilidad se demuestra la naturaleza aproximada de las ecuaciones 4.11 y 4.12 al intentar deslizar un objeto hacia abajo de un plano inclinado con aceleración constante. En especial con rapidez baja, es probable caracterizar el movimiento mediante episodios alternos de parar y deslizar.

Tip 4.8 Utilice signo de igualdad en situaciones límite

En la ecuación 4.11 el signo de la igualdad se utiliza *sólo* cuando las superficies están más o menos por romperse libremente y se inicia el deslizamiento. No caiga en la trampa común de utilizar $f_s = \mu_s n$ en *toda* situación en reposo o en equilibrio.

Tabla 4.2 Coeficientes de fricción^a

	μ_s	μ_k
Acero sobre acero	0.74	0.57
Aluminio sobre acero	0.61	0.47
Cobre sobre acero	0.53	0.36
Caucho sobre concreto	1.0	0.8
Madera sobre madera	0.25–0.5	0.2
Vidrio sobre vidrio	0.94	0.4
Madera encerada sobre nieve húmeda	0.14	0.1
Madera encerada sobre nieve seca	—	0.04
Metal sobre metal (lubricada)	0.15	0.06
Hielo sobre hielo	0.1	0.03
Teflón sobre teflón	0.04	0.04
Uniones sinoviales en humanos	0.01	0.003

^aTodos los valores son aproximados.

Examen rápido

- 4.7** Si presiona con su mano un libro plano contra una pared vertical, ¿en qué dirección se ejerce la fuerza de fricción de la pared sobre el libro? a) hacia abajo, b) hacia arriba, c) fuera de la pared, d) hacia dentro de la pared
- 4.8** Una caja está colocada sobre la plataforma de una camioneta. Cuando ésta acelera hacia el este, la caja se mueve con ella, sin deslizarse sobre la plataforma de la camioneta. ¿En qué dirección se ejerce la fuerza de fricción de la plataforma de la camioneta sobre la caja? a) Hacia el oeste. b) Hacia el este. c) No existe fuerza de fricción, debido a que la caja no se desliza.
- 4.9** Suponga que su amiga está sobre un trineo y le pide que la traslade a través de una superficie horizontal y plana. Tiene que elegir de a) empujar desde atrás aplicando una fuerza hacia abajo sobre sus hombros a 30° debajo de la horizontal (figura 4.22a) o bien b) atando una cuerda al frente del trineo y jalar con una fuerza a 30° sobre la horizontal (figura 4.22b). ¿Qué opción le sería más fácil y por qué?

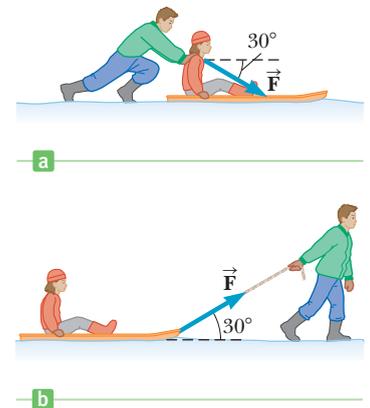


Figura 4.22 (Examen rápido 4.9)

EJEMPLO 4.12 Un bloque sobre una rampa

OBJETIVO Aplicar el concepto de fricción estática a un objeto en reposo sobre un plano inclinado.

PROBLEMA Suponga que un bloque con una masa de 2.50 kg está en reposo sobre una rampa. Si el coeficiente de fricción estática entre el bloque y la rampa es 0.350, ¿qué ángulo máximo puede formar la rampa con la horizontal antes que el bloque inicie el deslizamiento hacia abajo?

ESTRATEGIA Ésta es una aplicación de la segunda ley de Newton que involucra un objeto en equilibrio. Elija coordenadas inclinadas, como en la figura activa 4.23. Utilice el hecho de que el bloque se desliza más o menos cuando la fuerza estática tiene su valor máximo, $f_s = \mu_s n$.

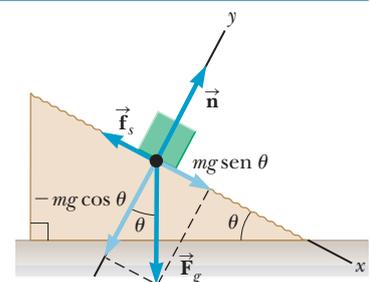


Figura activa 4.23 (Ejemplo 4.12)

SOLUCIÓN

Escriba las leyes de Newton para un sistema en reposo en la forma de componentes. La fuerza de gravedad tiene dos componentes, precisamente como en los ejemplos 4.7 y 4.9. Reordene la ecuación (2) para obtener una expresión para la fuerza normal n :

$$(1) \quad \sum F_x = mg \sin \theta - \mu_s n = 0$$

$$(2) \quad \sum F_y = n - mg \cos \theta = 0$$

$$n = mg \cos \theta$$

(continúa)

Sustituya la expresión para n en la ecuación 1) y resuelva para $\tan \theta$:

$$\sum F_x = mg \sen \theta - \mu_s mg \cos \theta = 0 \quad \rightarrow \quad \tan \theta = \mu_s$$

Aplique la función tangente inversa para obtener la respuesta:

$$\tan \theta = 0.350 \quad \rightarrow \quad \theta = \tan^{-1}(0.350) = 19.3^\circ$$

COMENTARIOS Es interesante que el resultado final sólo depende del coeficiente de fricción estática. Además, observe la similitud de las ecuaciones (1) y (2) con las ecuaciones desarrolladas en los ejemplos 4.7 y 4.9. Reconocer tales patrones es la clave para resolver con éxito los problemas.

PREGUNTA 4.12 ¿Qué tanto afectaría el coeficiente de fricción estática al ángulo máximo?

EJERCICIO 4.12 La rampa en el ejemplo 4.12 es rugosa hacia arriba y se repite el experimento. a) ¿Cuál es el nuevo coeficiente de fricción estática si el ángulo máximo que resulta es 30.0° ? b) Determine la fuerza de fricción estática máxima que actúa sobre el bloque.

RESPUESTA a) 0.577 b) 12.3 N

EJEMPLO 4.13 El disco de *hockey* que se desliza

OBJETIVO Aplicar el concepto de fricción cinética.

PROBLEMA El disco de *hockey* en la figura 4.24, al ser golpeado por un bastón, le proporciona una rapidez inicial de 20.0 m/s sobre un estanque congelado. El disco permanece sobre el hielo y se desliza 1.20×10^2 m, disminuyendo su velocidad constantemente hasta detenerse. Determine el coeficiente de fricción cinética entre el disco y el hielo.

ESTRATEGIA El disco se desliza lentamente “de manera constante”, lo cual significa que la aceleración es constante. En consecuencia, podemos utilizar la ecuación cinemática $v_2^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$ para encontrar a , la aceleración en la dirección x . Las componentes x y y de la segunda ley de Newton proporcionan entonces dos ecuaciones y dos incógnitas para el coeficiente de fricción cinética, μ_k , y la fuerza normal n .

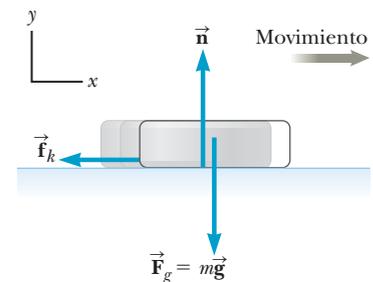


Figura 4.24 (Ejemplo 4.13) Después de proporcionarle al disco una velocidad inicial hacia la derecha, las fuerzas externas que actúan sobre él son la fuerza de gravedad, \vec{F}_g , la fuerza normal \vec{n} y la fuerza de fricción cinética, \vec{f}_k .

SOLUCIÓN

Resuelva la ecuación cinemática independiente del tiempo para la aceleración a :

$$v^2 = v_0^2 + 2a \Delta x$$

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2 \Delta x}$$

Sustituya $v = 0$, $v_0 = 20.0$ m/s y $\Delta x = 1.20 \times 10^2$ m. Observe el signo negativo en la respuesta: \vec{a} es opuesto a \vec{v} :

$$a = \frac{0 - (20.0 \text{ m/s})^2}{2(1.20 \times 10^2 \text{ m})} = -1.67 \text{ m/s}^2$$

Determine la fuerza normal a partir de la componente y de la segunda ley:

$$\sum F_y = n - F_g = n - mg = 0$$

$$n = mg$$

Obtenga una expresión para la fuerza de fricción cinética y sustitúyala en la componente x de la segunda ley:

$$f_k = \mu_k n = \mu_k mg$$

$$ma = \sum F_x = -f_k = -\mu_k mg$$

Resuelva para μ_k y sustituya valores:

$$\mu_k = -\frac{a}{g} = \frac{1.67 \text{ m/s}^2}{9.80 \text{ m/s}^2} = 0.170$$

COMENTARIOS Observe que el problema se divide en tres partes: cinemática, segunda ley de Newton en la dirección y y después la segunda ley de Newton en la dirección x .

PREGUNTA 4.13 ¿Cómo se afectaría la respuesta si el disco es golpeado por un astronauta sobre una porción de hielo en Marte, donde la aceleración de la gravedad es $0.35g$, con todas las cantidades restantes dadas iguales?

EJERCICIO 4.13 Un cohete experimental aterriza sobre patines en el lecho de un lago seco. Si está viajando a 80.0 m/s cuando desciende, ¿qué distancia se desliza antes de llegar al reposo? Considere que el coeficiente de fricción cinética entre los patines y el lecho del lago es 0.600.

RESPUESTA 544 m

El enfoque de sistema

A menudo los problemas de dos cuerpos se pueden tratar como objetos simples y resolverse planteando un sistema. Cuando los objetos están unidos de manera rígida, es decir, mediante una cuerda de masa despreciable que no se estira, esta aproximación puede simplificar considerablemente el análisis. Cuando los dos cuerpos se consideran juntos, una o más fuerzas terminarán convirtiéndose en fuerzas internas del sistema, en lugar de fuerzas externas que afectan cada uno de los cuerpos. Los dos planteamientos se utilizan en el ejemplo 4.14.

■ EJEMPLO 4.14 Objetos unidos

OBJETIVO Utilizar el método general y el planteamiento de un sistema para resolver un problema de dos cuerpos unidos que involucran gravedad y fricción.

PROBLEMA a) Un bloque con masa $m_1 = 4.00$ kg y una pelota con masa $m_2 = 7.00$ kg están conectados mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción, como se muestra en la figura 4.25a. El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la superficie es 0.300. Encuentre la aceleración de los dos objetos y la tensión en la cuerda. b) Verifique la respuesta para la aceleración aplicando el planteamiento de un sistema.

ESTRATEGIA Los objetos unidos se manejan aplicando la segunda ley de Newton separadamente para cada objeto. Los diagramas de cuerpo libre para el bloque y la pelota se muestran en la figura 4.25b, con la dirección $+x$ hacia la derecha y la dirección $+y$ hacia arriba. La magnitud de la aceleración para los dos objetos tiene el mismo valor, $|a_1| = |a_2| = a$. El bloque con masa m_1 se mueve en la dirección x positiva, y la pelota con masa m_2 se mueve en la dirección y negativa, de tal modo que $a_1 = -a_2$. Utilizando la segunda ley de Newton, se pueden desarrollar dos ecuaciones que incluyen las incógnitas T y a que se pueden resolver de manera simultánea. En el inciso b), considere las dos masas como un simple objeto, con la fuerza de gravedad en la pelota aumentando la rapidez de los objetos combinados y la fuerza de fricción en el bloque haciéndola disminuir. Entonces las fuerzas de tensión se convierten en internas y no aparecen en la segunda ley.

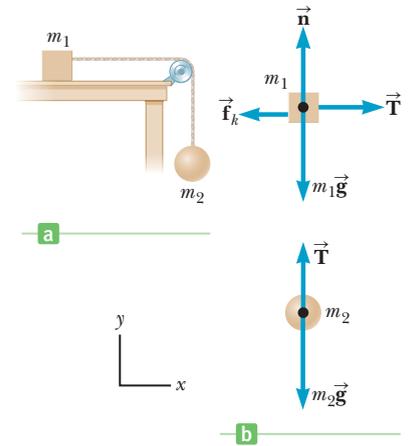


Figura 4.25 (Ejemplo 4.14) a) Dos objetos conectados por una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción. b) Diagramas de cuerpo libre para los objetos.

SOLUCIÓN

a) Determine la aceleración de los objetos y la tensión en la cuerda.

Escriba los componentes de la segunda ley de Newton para el bloque de masa m_1 :

La ecuación para la componente y resulta $n = m_1g$. Sustituya este valor para n y $f_k = \mu_k n$ en la ecuación para la componente x :

Aplice la segunda ley de Newton a la pelota; recuerde que $a_2 = -a_1$:

Reste la ecuación (2) de la ecuación (1), eliminando T y dejando una ecuación que pueda ser resuelta para a_1 :

$$\sum F_x = T - f_k = m_1 a_1 \quad \sum F_y = n - m_1 g = 0$$

$$(1) \quad T - \mu_k m_1 g = m_1 a_1$$

$$\sum F_y = T - m_2 g = m_2 a_2 = -m_2 a_1$$

$$(2) \quad T - m_2 g = -m_2 a_1$$

$$m_2 g - \mu_k m_1 g = (m_1 + m_2) a_1$$

$$a_1 = \frac{m_2 g - \mu_k m_1 g}{m_1 + m_2}$$

(continúa)

Sustituya los valores conocidos para obtener la aceleración:

$$a_1 = \frac{(7.00 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) - (0.300)(4.00 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{(4.00 \text{ kg} + 7.00 \text{ kg})}$$

$$= 5.17 \text{ m/s}^2$$

Sustituya los valores para a_1 en la ecuación (1) para encontrar la tensión T :

$$T = 32.4 \text{ N}$$

b) Determine la aceleración utilizando el planteamiento de un sistema, donde el sistema consiste en los dos bloques.

Aplique la segunda ley de Newton para el sistema y resuelva para a :

$$(m_1 + m_2)a = m_2g - \mu_k n = m_2g - \mu_k m_1g$$

$$a = \frac{m_2g - \mu_k m_1g}{m_1 + m_2}$$

COMENTARIOS Aunque el planteamiento de un sistema parece rápido y fácil, sólo puede ser aplicado en casos especiales y no puede dar información alguna acerca de las fuerzas internas, como la tensión. Para determinar la tensión, debe considerar el diagrama de cuerpo libre de uno de los bloques por separado como lo hizo en el inciso a) del ejemplo 4.14.

PREGUNTA 4.14 Si se incrementa la masa m_2 , ¿la aceleración del sistema aumenta, disminuye o permanece igual? ¿La tensión aumenta, disminuye o permanece igual?

EJERCICIO 4.14 ¿Qué sucedería si se une una masa adicional a la pelota en el ejemplo 4.14? ¿Qué tan grande debe ser esta masa para incrementar la aceleración descendente en 50%? ¿Por qué no es posible sumar la masa suficiente para duplicar la aceleración?

RESPUESTA 14.0 kg. Duplicar la aceleración a 10.3 m/s^2 simplemente no es posible al suspender más masa debido a que todos los objetos, independientemente de su masa, tienen caída libre a 9.8 m/s^2 cerca de la superficie de la Tierra.

■ EJEMPLO 4.15 Dos bloques y una cuerda

OBJETIVO Aplicar la segunda ley de Newton y la fricción estática en un sistema de dos cuerpos.

PROBLEMA Un bloque de masa de $m = 5.00 \text{ kg}$ viaja sobre la parte superior de un segundo bloque de masa de $M = 10.0 \text{ kg}$. Una persona ata una cuerda al bloque de abajo y jala el sistema horizontalmente a lo largo de una superficie sin fricción, como en la figura 4.26a. La fricción entre los dos bloques mantiene al bloque de 5.00 kg sin deslizarse. Si el coeficiente de fricción estática es 0.350, a) ¿qué fuerza máxima se puede ejercer mediante la cuerda en el bloque de 10.0 kg sin ocasionar que el bloque de 5.00 kg se deslice? b) Aplique el enfoque de sistema para calcular la aceleración.

ESTRATEGIA Trace un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. La fuerza de fricción estática causa que el bloque superior se mueva horizontalmente, y el máximo de tal fuerza corresponde a $f_s = \mu_s n$. Esta misma fricción estática retrasa el movimiento del bloque inferior. Mientras que el bloque superior no se desliza, la aceleración de los dos bloques es igual. Escriba la segunda ley de Newton para cada bloque y elimine la aceleración a por sustitución, resolviendo para la tensión T . Una vez que conozca la tensión, use el enfoque de sistema para calcular la aceleración.

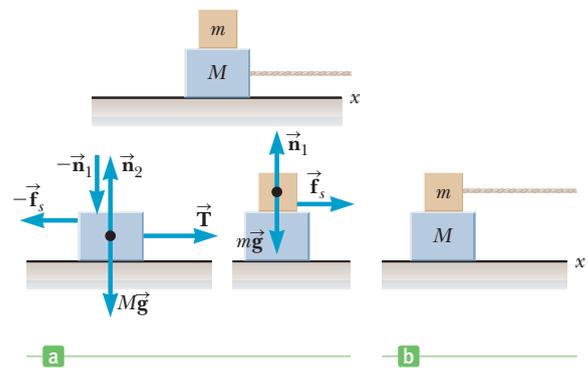


Figura 4.26 a) (Ejemplo 4.15) b) (Ejercicio 4.15)

SOLUCIÓN

a) Determine la fuerza máxima ejercida por la cuerda.

Escriba las dos componentes de la segunda ley de Newton para el bloque superior:

$$\text{Componente } x: \quad ma = \mu_s n_1$$

$$\text{Componente } y: \quad 0 = n_1 - mg$$

Resuelva la componente y para n_1 , sustituya el resultado en la componente x y después resuelva para a :

$$n_1 = mg \rightarrow ma = \mu_s mg \rightarrow a = \mu_s g$$

Escriba el componente x de la segunda ley de Newton para el bloque inferior:

$$(1) \quad Ma = -\mu_s mg + T$$

Sustituya la expresión para $a = \mu_s g$ en la ecuación (1) y resuelva para la tensión T :

Ahora evalúe para obtener la respuesta:

b) Aplique el enfoque de sistema para calcular la aceleración.

Escriba la segunda ley para la componente x de la fuerza en el sistema:

Resuelva para la aceleración y sustituya valores:

$$M\mu_s g = T - \mu_s mg \rightarrow T = (m + M)\mu_s g$$

$$T = (5.00 \text{ kg} + 10.0 \text{ kg})(0.350)(9.80 \text{ m/s}^2) = 51.5 \text{ N}$$

$$(m + M)a = T$$

$$a = \frac{T}{m + M} = \frac{51.5 \text{ N}}{5.00 \text{ kg} + 10.0 \text{ kg}} = 3.43 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS Observe que la componente y para el bloque de 10.0 kg no fue requerida debido a que no existe fricción entre esos bloques y la superficie subyacente. Además, es interesante observar que el bloque superior fue acelerado por la fuerza de fricción estática. La aceleración del sistema también podría haber sido calculada con $a = \mu_s g$. ¿El resultado concuerda con la respuesta encontrada por el enfoque de sistema?

PREGUNTA 4.15 ¿Qué sucedería si la fuerza de tensión excediera de 51.5 N?

EJERCICIO 4.15 Suponga que la cuerda está unida al bloque superior en el ejemplo 4.15 (véase la figura 4.26b). Determine la fuerza máxima que puede ejercer la cuerda en el bloque sin ocasionar que el bloque se deslice.

RESPUESTA 25.7 N

FÍSICA APLICADA 4.1 Automóviles y fricción

Las fuerzas de fricción son importantes en el análisis del movimiento de automóviles y otros vehículos con ruedas. ¿Cómo hacen tales fuerzas para ayudar e impedir el movimiento de un automóvil?

EXPLICACIÓN Existen varios tipos de fuerzas de fricción que debemos considerar; las principales son la fuerza de fricción entre los neumáticos y la superficie del camino y la fuerza de retraso producida por la resistencia del aire.

Suponiendo que el automóvil es un vehículo de masa m con tracción en las cuatro ruedas y conforme cada rueda gira para impulsar el automóvil hacia adelante, el neumático ejerce una fuerza hacia atrás sobre el camino. La reacción a esta fuerza hacia atrás es una fuerza hacia adelante \vec{f} ejercida por el camino sobre los neumáticos (figura 4.27). Si suponemos que la misma fuerza hacia adelante \vec{f} se ejerce en cada neumático, la fuerza neta hacia adelante en el automóvil es $4\vec{f}$, por lo tanto, la aceleración del automóvil es $\vec{a} = 4\vec{f}/m$.

Normalmente la fricción entre las ruedas del automóvil en movimiento y el camino es una fricción estática, a menos que el automóvil se deslice.

Cuando el automóvil está en movimiento, debemos tener presente además la fuerza de resistencia del aire, \vec{R} , que actúa en la dirección opuesta a la velocidad del automóvil. Por lo

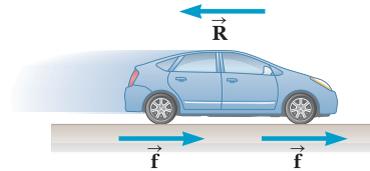


Figura 4.27 (Aplicación de la física 4.1) Las fuerzas horizontales que actúan sobre el automóvil son las fuerzas *hacia adelante* \vec{f} ejercidas por el camino sobre cada neumático y la fuerza de resistencia del aire \vec{R} , que actúa *opuesta* a la velocidad del automóvil. (Los neumáticos del automóvil ejercen una fuerza hacia atrás sobre el camino, no mostrada en el diagrama.)

tanto, la fuerza neta que se ejerce en el automóvil es $4\vec{f} - \vec{R}$, de tal modo que la aceleración del automóvil es $\vec{a} = (4\vec{f} - \vec{R})/m$. Con velocidades de conducción normales, la magnitud de \vec{R} es proporcional a la primera potencia de la rapidez, $R = bv$, donde b es una constante, de esta manera la fuerza de resistencia del aire se incrementa con el aumento de la rapidez. Cuando R es igual a $4f$, la aceleración es cero y el automóvil se mueve con rapidez constante. Para minimizar esta fuerza de resistencia, a menudo los automóviles de carreras tienen perfiles y líneas de contorno muy bajos. ■

FÍSICA APLICADA 4.2 Arrastre del aire

El arrastre del aire no siempre es indeseable. ¿Cuáles son algunas aplicaciones que dependen de él?

EXPLICACIÓN Considere una paracaidista en el aire, como en la figura 4.28 (página 112). A pesar de caer desde una altura de varios miles de metros, ella jamás excede una

rapidez de casi 120 millas por hora. Esto se debe a que, aparte de la fuerza descendente de la gravedad $m\vec{g}$, también existe una fuerza ascendente de la resistencia del aire, \vec{R} . Antes que ella alcance una rapidez final constante la magnitud de \vec{R} es menor que su peso. Conforme su rapidez hacia abajo se incrementa, la fuerza de resistencia del aire

aumenta. La suma vectorial de la fuerza de gravedad y la fuerza de resistencia del aire proporciona una fuerza total que disminuye con el tiempo, de tal modo que su aceleración disminuye. Una vez que las dos fuerzas se equilibran entre sí, la fuerza neta es cero, de igual manera la aceleración es cero, y ella alcanza una **rapidez terminal**.

Incluso la rapidez terminal por lo general es lo suficientemente alta que un impacto es fatal, aunque existen historias sorprendentes de supervivencia. En un caso, un hombre cayó de espaldas sobre un terreno recién arado y sobrevivió. (De cualquier modo, virtualmente se fracturó todos los huesos de su cuerpo.) En otro caso, un asistente de vuelo sobrevivió a una caída desde 30 000 pies sobre un banco de nieve. En ningún caso la persona habría tenido alguna oportunidad de sobrevivir sin el efecto del arrastre del aire.

Los paracaídas y las alas flexibles crean una fuerza de arrastre mucho más grande debido a la extensión de su área y pueden reducir la rapidez terminal a sólo algunos metros por segundo. Incluso algunos aficionados de este deporte han desarrollado juegos especiales con alas, permitiendo deslizamientos prolongados hasta la superficie de la tierra. En cada caso, un área de sección transversal mayor intersecta



Figura 4.28 (Aplicación de la física 4.2)

más aire, creando un arrastre del aire mayor, de manera que la rapidez terminal es inferior.

El arrastre del aire también es importante en los viajes espaciales. Sin él, el regreso a la Tierra necesitaría una gran cantidad de combustible. El arrastre del aire ayuda a retardar las cápsulas y naves espaciales, y se han propuesto técnicas de aerocaptura para los viajes a otros planetas. Estas técnicas reducen de manera significativa las necesidades de combustible al utilizar el arrastre del aire para retardar la caída de la nave espacial. ■

RESUMEN

4.1 Fuerzas

En la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales: 1) la fuerza nuclear fuerte entre partículas subatómicas; 2) las fuerzas electromagnéticas entre cargas eléctricas; 3) la fuerza nuclear débil, que surge de ciertos procesos de decaimiento radiactivo y 4) la fuerza gravitacional entre objetos. Éstas en conjunto se conocen como campo de fuerzas. La física clásica se relaciona sólo con las fuerzas de gravedad y electromagnética.

Fuerzas como la fricción o aquellas que caracterizan el golpe a una pelota con un bate se les conoce como fuerzas de contacto. Una o más fuerzas de contacto, a nivel fundamental, tienen una naturaleza electromagnética.

4.2 Primera ley de Newton

La **primera ley de Newton** establece que un objeto se mueve con velocidad constante, a menos que actúe una fuerza sobre él.

La tendencia para que un objeto mantenga su estado original de movimiento o reposo se le conoce como **inercia**. **Masa** es la cantidad física que mide la resistencia de un objeto a los cambios en su velocidad.

4.3 Segunda ley de Newton

La **segunda ley de Newton** establece que la aceleración de un objeto es directamente proporcional a su masa. La fuerza neta que actúa sobre un objeto es igual al producto de su masa por su aceleración:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad [4.1]$$

Una fuerza neta $\sum \vec{F}$ actuando sobre una masa m crea una aceleración proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a la masa.

La ley de la gravitación universal de Newton es

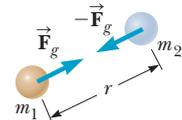
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [4.5]$$

El **peso** w de un objeto es la magnitud de la fuerza de gravedad ejercida sobre ese objeto y se conoce mediante

$$w = mg \quad [4.6]$$

donde $g = F_g/m$ es la aceleración de la gravedad.

La solución de problemas con la segunda ley de Newton implica encontrar todas las fuerzas que actúan en un sistema y escribir la ecuación 4.1 para las componentes x y y por separado. Entonces estas ecuaciones se resuelven algebraicamente para las cantidades desconocidas.



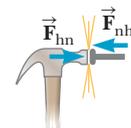
La fuerza de gravedad entre cualquiera de los dos objetos es proporcional a las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

4.4 Tercera ley de Newton

La **tercera ley de Newton** establece que si dos objetos interactúan, la fuerza \vec{F}_{12} que ejerce el objeto 1 sobre el objeto 2 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza \vec{F}_{21} que ejerce el objeto 2 sobre el objeto 1:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

En la naturaleza jamás se puede presentar una fuerza aislada.



La tercera ley de Newton en acción: el martillo dirige al clavo dentro de la pared y el clavo lleva a la cabeza del martillo lentamente al reposo con una fuerza igual y opuesta.

4.5 Aplicaciones de las leyes de Newton

Un **objeto en equilibrio** no tiene una fuerza externa neta que actúe en él, y la segunda ley, en la forma de componentes, implica que $\Sigma F_x = 0$ y $\Sigma F_y = 0$ para tal objeto. Estas dos ecuaciones son útiles para la solución de problemas en estática, en los cuales el objeto está en reposo o en movimiento con velocidad constante.

Un objeto bajo aceleración necesita las mismas dos ecuaciones, pero con el término aceleración incluido: $\Sigma F_x = ma_x$ y $\Sigma F_y = ma_y$. Cuando la aceleración es constante, las ecuaciones de cinemática pueden complementar la segunda ley de Newton.

4.6 Fuerzas de fricción

La magnitud de la fuerza máxima de fricción estática, $f_{s,\text{máx}}$, entre un objeto y una superficie es proporcional a la magnitud de la fuerza normal que actúa sobre el objeto. Esta fuerza máxima se presenta cuando el objeto está en el límite del deslizamiento. En general,

$$f_s \leq \mu_s n \quad [4.11]$$

donde μ_s es el **coeficiente de fricción estática**. Cuando un objeto se desliza sobre una superficie, la dirección de la fuerza de fricción cinética, \vec{f}_k , sobre el objeto es opuesta a la dirección del movimiento del objeto relativo a la superficie y proporcional a la magnitud de la fuerza normal. La magnitud de \vec{f}_k es

$$f_k = \mu_k n \quad [4.12]$$

donde μ_k es el **coeficiente de fricción cinética**. En general, $\mu_k < \mu_s$.

La solución de problemas que implican fricción es la razón para utilizar estas dos fuerzas de fricción en la segunda ley de Newton. La fuerza de fricción estática debe manejarse con cuidado porque se refiere a una fuerza máxima, la cual no siempre se menciona en un problema determinado.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Se aplica una fuerza horizontal de 95.0 N a una caja de 60.0 kg sobre una superficie a nivel y rugosa. Si se acelera la caja a 1.20 m/s^2 , ¿cuál es la magnitud de la fuerza de fricción cinética sobre la caja? a) 23.0 N b) 45.0 N c) 16.0 N d) 33.0 N e) 8.80 N
- Si un bloque se desliza por un plano inclinado sin fricción, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera? a) La velocidad y aceleración aumentan. b) Su velocidad y aceleración se mantienen constantes. c) Aumenta su velocidad y su aceleración se mantiene constante. d) Su velocidad y aceleración disminuyen. e) Aumenta su velocidad y su aceleración disminuye.
- Si la masa y el radio de la Tierra se duplicaran repentinamente, ¿cuál sería el nuevo valor de la aceleración de la gravedad cerca de la superficie de la Tierra? a) 9.80 m/s^2 b) 4.90 m/s^2 c) 2.45 m/s^2 d) 19.6 m/s^2 e) 12.6 m/s^2
- Si una fuerza externa neta constante no nula actúa sobre un objeto durante un periodo determinado, ¿cuál de las siguientes afirmaciones debe ser verdad durante ese tiempo? a) El objeto se mueve. b) La magnitud de la velocidad del objeto aumenta. (c) La aceleración del objeto es cada vez mayor. d) El objeto se acelera. e) La velocidad del objeto se mantiene constante.
- Dos monos de igual masa se sujetan de una liana simple de masa despreciable que cuelga verticalmente de un árbol, con un mono unos cuantos metros arriba del otro. ¿Cuál es la relación de la tensión en la liana sobre el mono de arriba y la tensión en la liana entre los dos monos? a) $\frac{1}{2}$ b) 1 c) 1.5 d) 2 e) Se necesita más información.
- Una caja permanece inmóvil después de que se ha colocado sobre una rampa inclinada en ángulo con la horizontal. ¿Cuáles de los siguientes enunciados deben ser verdaderos acerca de la magnitud de la fuerza de fricción que actúa sobre la caja? a) Es más grande que el peso de la caja. b) Por lo menos es casi igual que el peso de la caja. c) Es igual a $\mu_s n$. d) Es mayor que la componente de la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo de la rampa. e) Es igual a la componente de la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo de la rampa.
- En la fotografía de la página 89, una locomotora ha atravesado el muro de una estación ferroviaria. Durante la colisión, ¿qué puede decirse acerca de la fuerza ejercida por la locomotora sobre el muro? a) La fuerza ejercida por la locomotora sobre el muro fue mayor que la fuerza de éste contra la locomotora. b) La fuerza ejercida por la locomotora sobre el muro fue la misma en magnitud que aquella ejercida por el muro sobre la locomotora. c) La fuerza ejercida por la locomotora sobre el muro fue menor que aquella ejercida por el muro sobre la locomotora. d) No puede decirse que el muro "ejerza" alguna fuerza; después de todo, se vino abajo.
- Si un objeto de masa m se mueve con velocidad constante v , la fuerza neta sobre el objeto es a) mg b) mv c) ma d) 0 e) Ninguna de estas respuestas es correcta.
- Cuatro fuerzas actúan sobre un objeto, dadas por $\vec{A} = 40 \text{ N}$ hacia el este, $\vec{B} = 50 \text{ N}$ hacia el norte, $\vec{C} = 70 \text{ N}$ hacia el oeste y $\vec{D} = 90 \text{ N}$ hacia el sur. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza neta sobre el objeto? a) 50 N b) 70 N c) 131 N d) 170 N e) 250 N

10. Si un objeto está en equilibrio, ¿cuál de los siguientes enunciados *no* es verdadero? a) La rapidez del objeto permanece constante. b) La aceleración del objeto es cero. c) La fuerza neta que actúa sobre el objeto es cero. d) El objeto debe estar en reposo. e) La velocidad es constante.
11. El administrador de un restaurante empuja horizontalmente una caja de melones con una fuerza de 150 N de magnitud. La caja se mueve a lo largo del piso con una aceleración constante en la misma dirección que la fuerza aplicada. ¿Cuál enunciado es más preciso con respecto a la magnitud de la fuerza de fricción cinética que actúa sobre la caja? a) Es mayor que 150 N. b) Es menor que 150 N. c) Es igual a 150 N. d) La fuerza de fricción cinética está disminuyendo constantemente. e) La fuerza de fricción debe ser cero.
12. Un camión cargado con arena acelera a lo largo de una autopista. La fuerza impulsora sobre el camión permanece constante. ¿Qué le sucede a la aceleración del camión cuando su remolque pierde arena a una proporción constante a través de un orificio en su fondo? a) Disminuye con una relación estable. b) Aumenta con una relación estable. c) Aumenta y después disminuye. d) Disminuye y después aumenta. e) Permanece constante.
13. Se coloca una gran caja de masa m en la parte posterior de un camión, pero sin atar. Conforme el camión acelera hacia adelante con una aceleración a , la caja permanece en reposo relativo al camión. ¿Qué fuerza ocasiona que la caja se acelere hacia adelante? a) la fuerza normal b) la fuerza de gravedad c) la fuerza de fricción entre la caja y la plataforma del camión d) la fuerza “ ma ” e) ninguna de éstas
14. Dos objetos están conectados mediante una cuerda que pasa sobre una polea sin fricción como en la figura 4.20, donde $m_1 < m_2$ y a_1 y a_2 son las respectivas magnitudes de las aceleraciones. ¿Cuál enunciado matemático es verdadero con respecto a la magnitud de la aceleración a_2 de la masa m_2 ? a) $a_2 < g$ b) $a_2 > g$ c) $a_2 = g$ d) $a_2 < a_1$ e) $a_2 > a_1$
15. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son verdaderos? a) El peso de un astronauta es el mismo sobre la Luna que sobre la Tierra. b) La masa de un astronauta es la misma sobre la Estación Espacial Internacional que sobre la Tierra. c) La gravedad de la Tierra no tiene efecto en el astronauta dentro de la Estación Espacial Internacional. d) La masa de un astronauta es mayor sobre la Tierra que sobre la Luna. e) Ninguno de estos enunciados es verdadero.
16. Un objeto de masa m se somete a una aceleración \vec{a} hacia abajo de un plano inclinado rugoso. ¿Cuáles de las siguientes fuerzas *no* aparecen en el diagrama de cuerpo libre para el objeto? Elija las respuestas correctas. a) la fuerza de gravedad b) $m\vec{a}$ c) la fuerza normal del plano inclinado sobre el objeto d) la fuerza de fricción hacia abajo sobre el plano inclinado e) la fuerza de fricción hacia arriba del plano inclinado f) la fuerza del objeto sobre el plano inclinado

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una pasajera sentada en la parte posterior de un autobús reclama haber sido dañada cuando el conductor frenó, ocasionando que una maleta volara hacia ella desde el frente del autobús. Si usted fuera el juez de este caso, ¿qué mandato haría? ¿Por qué?
2. Un explorador espacial se mueve a través del espacio más allá de cualquier planeta o estrella. Observa una gran roca, que considera una muestra de un planeta alienígena, flotando alrededor de la cabina de la nave. Para almacenarla en el compartimiento, ¿debe empujar suavemente o golpearla con el pie? ¿Por qué?
3. a) Si el oro se vende por peso, ¿lo compraría en Denver o en Death Valley? b) Si fuera vendido por masa, ¿en cuál de las dos ubicaciones preferiría comprar? ¿Por qué?
4. Si empuja una caja pesada que está en reposo, debe ejercer alguna fuerza para iniciar su movimiento. De cualquier modo, una vez que la caja se desliza, usted aplica una fuerza más pequeña para mantener su movimiento. ¿Por qué?
5. Una persona sostiene una pelota con la mano, a) identifique todas las fuerzas externas que actúan sobre la pelota y la reacción a cada una. b) Si se deja caer la pelota, ¿qué fuerza se ejerce sobre ella mientras está cayendo? Identifique la fuerza de reacción en este caso. (Omita la resistencia del aire.)
6. Una levantadora de pesas se coloca sobre una báscula. a) Si levanta hacia arriba y hacia abajo una barra con pesas, ¿qué le sucede a la lectura de la báscula? b) Suponga que es lo suficientemente fuerte para que en efecto lance la barra con pesas hacia arriba. ¿Cómo varía la lectura de la báscula ahora?
7. a) ¿Qué fuerzas causan que un automóvil se mueva? b) ¿Un aeroplano de hélice? c) ¿Un bote de remos?
8. Analice el movimiento de una roca que cayó en el agua en términos de velocidad y aceleración de la caída. Suponga que una fuerza de resistencia está actuando sobre la roca y aumenta a medida que se incrementa la velocidad de ésta.
9. En la película *It Happened One Night* (Columbia Pictures, 1934), Clark Gable está de pie dentro de una estación de autobuses frente a Claudette Colbert, quien está sentada. Repentinamente el autobús inicia su movimiento hacia adelante, y Clark cae en el regazo de Claudette. ¿Por qué sucedió esto?
10. Explique el movimiento de una roca que se deja caer en agua en términos de su rapidez y aceleración conforme está cayendo. Considere una fuerza resistiva que está actuando sobre la roca la cual se incrementa conforme la velocidad de la roca aumenta.
11. Identifique el par acción-reacción en las situaciones que siguen: a) el paso de un hombre, b) una bola de nieve golpea a una chica en la espalda, c) un jugador de béisbol atrapa una pelota, d) una ráfaga de viento golpea una ventana.

- Trace un diagrama de cuerpo libre para cada uno de los objetos que siguen: a) un proyectil en movimiento en presencia de la resistencia del aire, b) un cohete que deja la plataforma de lanzamiento con sus motores funcionando, c) un atleta corriendo a lo largo de una pista.
- En un esfuerzo extraordinario entre dos atletas, cada uno jala la cuerda con una fuerza de 200 N. ¿Cuál es la tensión

en la cuerda? Si la cuerda no se mueve, ¿qué fuerza horizontal ejerce cada atleta contra la superficie de la tierra?

- Suponga que está conduciendo un automóvil con gran rapidez. ¿Por qué tiene que evitar el aplicar súbitamente los frenos cuando quiere detenerse en una distancia corta? (Los automóviles recientes tienen frenos antibloqueo que evitan este problema.)

PROBLEMAS

ENHANCED **WebAssign** Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

4.1 Fuerzas

4.2 Primera ley de Newton

4.3 Segunda ley de Newton

4.4 Tercera ley de Newton

- El calamar gigante es el invertebrado más pesado, el cual se estima que tiene un peso de casi 2 toneladas distribuidos en su longitud de 70 pies. ¿Cuál es su peso en newtons?
- Un jugador de fútbol acelera un balón desde el reposo hasta una rapidez de 10 m/s durante el tiempo en que su pie está en contacto con el balón (casi 0.20 s). Si el balón tiene una masa de 0.50 kg, ¿qué fuerza promedio ejerce el jugador sobre el balón?
- Un objeto de 6.0 kg se somete a una aceleración de 2.0 m/s². a) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza resultante que actúa en él? b) Si esta misma fuerza se aplica a un objeto de 4.0 kg, ¿qué aceleración se produce?
- CIC** Se ejercen una o más fuerzas externas en cada objeto encerrado con línea discontinua como se muestra en la figura 4.2. Identifique la reacción de cada una de estas fuerzas.
- Una bolsa de azúcar pesa 5.00 lb en la Tierra. ¿Cuánto pesaría en newtons sobre la Luna, donde la aceleración en caída libre es un sexto la de la Tierra? Reproduzca para Júpiter, donde g es 2.64 veces que sobre la Tierra. Halle la masa de la bolsa de azúcar en kilogramos en cada una de las tres ubicaciones.
- Un tren de carga tiene una masa de 1.5×10^7 kg. Si la locomotora puede ejercer un jalón constante de 7.5×10^5 N, ¿cuánto tiempo le toma a la locomotora incrementar la rapidez del tren desde el reposo hasta 80 km/h?
- Un hombre de 75 kg parado en un ascensor nota que a medida que sube el ascensor, en la escala se lee 825 N. ¿Cuál es la aceleración del ascensor?
- CIC** Considere una esfera metálica sólida (E) de unos cuantos centímetros de diámetro y una pluma (P). Para

cada cantidad que se menciona a continuación, indique si la cantidad es la misma, mayor, o menor en el caso de E o en el de F. Explique la razón de su respuesta en cada caso. El listado es: a) la fuerza gravitacional, b) el tiempo que le llevará caer una cierta distancia en el aire, c) el tiempo que le llevará caer una cierta distancia en el vacío, d) la fuerza total sobre el objeto cuando cae en el vacío.

- BIO** Un pez salta verticalmente fuera del agua, suponga que sólo dos fuerzas importantes actúan en él: una fuerza F ascendente ejercida por la cola del pez y la fuerza descendente debida a la gravedad. El registro de un salmón Chi-nook tiene una longitud de 1.50 m y una masa de 61.0 kg. Este pez se mueve hacia arriba a 3.00 m/s cuando su cabeza rompe la superficie del agua, y tiene una velocidad ascendente de 6.00 m/s después de que $2/3$ de su longitud han dejado el agua; suponga que la aceleración es constante y determine a) la aceleración del salmón y b) la magnitud de la fuerza F durante este intervalo.
- Una bala de 5.0 g sale de la boquilla de un rifle con una rapidez de 320 m/s. ¿Qué fuerza se ejerce (suponiéndola constante) sobre la bala mientras está recorriendo el barril del rifle de 0.82 m de longitud?
- Un bote se mueve a través del agua con dos fuerzas que actúan sobre él. Una es de 2000 N empujando hacia adelante por el agua en la proela y la otra es una fuerza resistiva de 1800 N debida al agua que rodea la proa. a) ¿Cuál es la aceleración del bote de 1000 kg? b) Si el bote parte del reposo, ¿qué distancia se moverá en 10.0 s? c) ¿Cuál es su velocidad al final de ese tiempo?
- Dos fuerzas son aplicadas a un automóvil en un esfuerzo para moverlo, como se muestra en

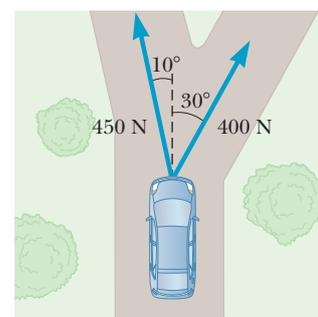


Figura P4.12

la figura P4.12. a) ¿Cuál es la resultante de estas dos fuerzas? b) Si el automóvil tiene una masa de 3000 kg, ¿qué aceleración tiene? Omite la fricción.

13. Un automóvil de 970 kg parte del reposo en una carretera horizontal y acelera hacia el este por 5.00 s, cuando llega a una velocidad de 25.0 m/s. ¿Cuál es la fuerza promedio ejercida sobre el automóvil durante este tiempo?

14. **S** Un objeto de masa m se deja caer desde el techo de un edificio de altura h . Mientras el objeto está cayendo, un viento que sopla paralelo a la fachada del edificio ejerce una fuerza F horizontal constante sobre el objeto. a) ¿Cuánto tiempo le toma al objeto golpear la superficie de la tierra? Expresé el tiempo t en función de g y h . b) Halle una expresión en términos de m y F para la aceleración a_x del objeto en la dirección horizontal (tome como dirección x positiva). c) ¿A qué distancia horizontal se desplaza el objeto antes de golpear la superficie de la tierra? Responda en términos de m , g , F y h . d) Halle la magnitud de la aceleración del objeto mientras está cayendo, utilizando las variables F , m y g .

15. Después de caer desde el reposo partiendo de una altura de 30 m, una pelota de 0.50 kg rebota hacia arriba, logrando una altura de 20 m. Si el contacto entre la pelota y la superficie de la tierra dura 2.0 ms, ¿qué fuerza promedio se ejerció sobre la pelota?

16. **M** La fuerza ejercida por el viento sobre las velas de un barco es de 390 N hacia el norte. El agua ejerce una fuerza de 180 N hacia el este. Si el bote (incluyendo su tripulación) tiene una masa de 270 kg, ¿cuáles son su magnitud y dirección de su aceleración?

4.5 Aplicaciones de las leyes de Newton

17. **C/C** a) En la figura P4.17 determine la tensión en cada cable que soporta al ladrón de 600 N. b) Suponga que el cable horizontal fue amarrado más arriba sobre la pared. ¿La tensión en la otra cuerda se incrementaría, disminuiría o sería la misma? ¿Por qué?

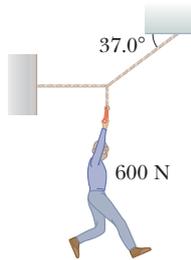


Figura p4.17

18. **BIO** Cierta ortodoncista utiliza un soporte de alambre para alinear el diente torcido de un paciente como en la figura P4.18. Se ajusta la tensión en el alambre para

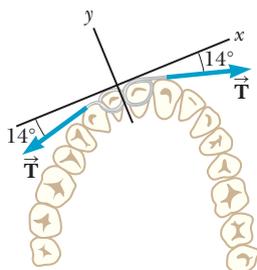


Figura P4.18

que tenga una magnitud de 18.0 N. Determine la magnitud de la fuerza neta ejercida por el alambre sobre el diente torcido.



Figura P4.19

19. Un alimentador de aves de 150 N está soportado por tres cables como se muestra en la figura P4.19. Determine la tensión en cada cable.

20. **BIO** La pierna y el vendaje enyesado en la figura P4.20 pesa 220 N (w_1). Determine el peso w_2 y el ángulo α necesario de tal modo que la pierna más el vendaje no ejerzan una fuerza en la unión de la cadera.

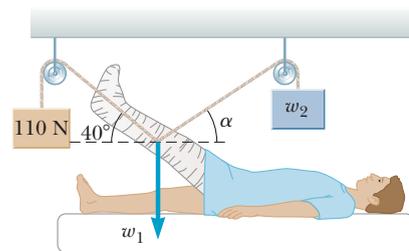


Figura P4.20

21. Dos bloques, cada uno de 3.50 kg de masa, están unidos a la parte superior de un elevador como en la figura P4.21. a) Si el elevador se acelera hacia arriba a 1.60 m/s^2 , determine las tensiones T_1 y T_2 en la parte superior e inferior de la cuerda. b) Si las cuerdas pueden soportar una tensión máxima de 85.0 N, ¿qué aceleración máxima puede tener el elevador antes de que la primera cuerda se rompa?

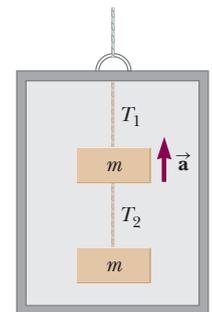


Figura P4.21 (Problemas 21 y 22)

22. **S** Dos bloques, cada uno de masa m , están unidos a la parte superior de un elevador como en la figura P4.21. El elevador tiene una aceleración hacia arriba a . La cuerda tiene masa despreciable. a) Determine las tensiones T_1 y T_2 en la parte superior e inferior de la cuerda en términos de m , a y g . b) Compare las dos tensiones y determine qué cuerda se rompería primero si a es lo suficientemente grande. c) ¿Cuáles son las tensiones si el cable del elevador se rompe?

23. La distancia entre dos postes de teléfono es de 50.0 m. Cuando un ave de 1.00 kg se posa equidistante sobre el alambre de teléfono entre los postes, el cable se curva 0.200 m. Trace un diagrama de cuerpo libre del ave. ¿Cuánta tensión produce el ave en el alambre? Omite el peso del alambre.

24. Los sistemas mostrados en la figura P4.24 se encuentran en equilibrio. Si las escalas de resortes se calibran en newtons, ¿qué leen? Omite las masas de las poleas y las

cuerdas y suponga que las poleas y el plano inclinado de la figura P4.24d carecen de rozamiento.

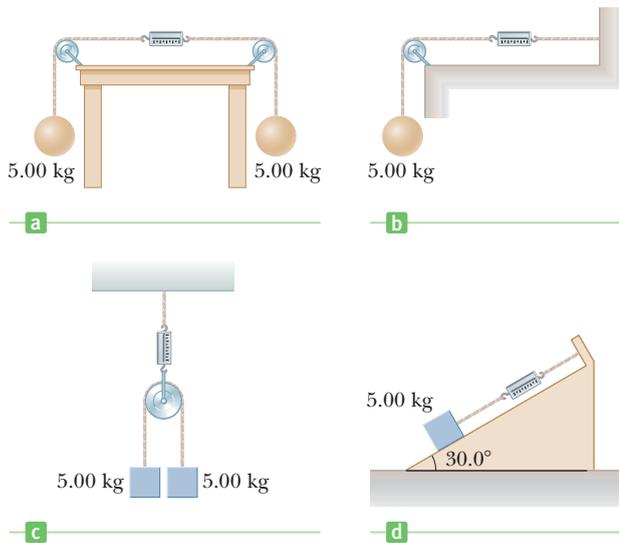


Figura P4.24

25. Se eleva un cubo con agua de 5.0 kg desde un pozo mediante una cuerda. Si la aceleración hacia arriba del cubo es 3.0 m/s^2 , encuentre la fuerza ejercida por la cuerda en el cubo.

26. Una caja de masa $m = 32 \text{ kg}$ viaja en la plataforma de un camión unida por un cable a la parte posterior de la cabina como se muestra en la figura P4.26. El cable puede soportar una tensión máxima de 68 N antes de romperse. Despreciando la fricción entre la caja y la plataforma de la camioneta, encuentre la aceleración máxima que el camión puede tener antes de que el cable se rompa.

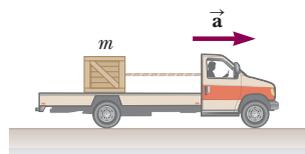


Figura P4.26

27. **S** Dos bloques de masas m y $2m$ están sostenidos en equilibrio sobre un plano inclinado sin fricción como se muestra en la figura P4.27. En términos de m y θ , halle a) la magnitud de la tensión T_1 en la parte superior de la cuerda y b) la magnitud de la de la tensión T_2 en la cuerda inferior que conecta los dos bloques.

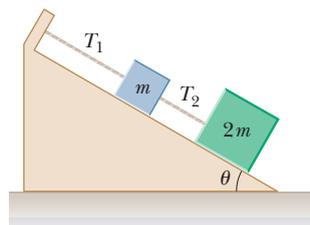


Figura P4.27

28. Dos cajas de 10.0 kg y 5.00 kg, respectivamente, están conectadas mediante una cuerda ligera que pasa sobre una po-

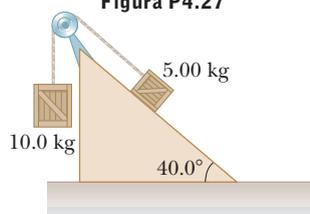


Figura P4.28

lea sin fricción como en la figura P4.28. La caja de 5.00 kg se encuentra sobre un plano inclinado uniforme con ángulo de 40.0° . a) Determine la aceleración de la caja de 5.00 kg y b) la tensión en la cuerda.

29. **M** Suponga que los tres bloques descritos en la figura P4.29 se mueven sobre una superficie sin fricción y que actúa una fuerza de 42 N como se muestra en el bloque de 3.0 kg. Determine a) la aceleración que se proporciona al sistema, b) la tensión en la cuerda que une el bloque de 3.0 kg y el de 1.0 kg y c) la fuerza ejercida por el bloque de 1.0 kg en el bloque de 2.0 kg.

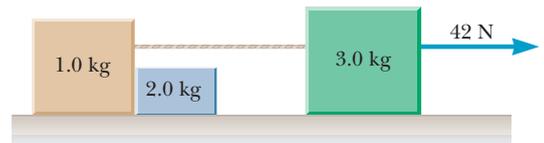


Figura P4.29

30. Un bloque de masa $m = 5.8 \text{ kg}$ es jalado con un ángulo $\theta = 25^\circ$ de inclinación como se muestra en la figura P4.30 con una fuerza de magnitud $F = 32 \text{ N}$. a) Determine la aceleración del bloque si el plano inclinado es sin fricción. b) Determine la aceleración del bloque si el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano inclinado es de 0.10.

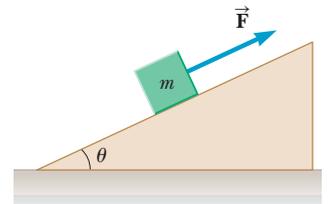


Figura P4.30

31. **BIO** Un arreglo parecido al que se muestra en la figura P4.31 a menudo se utiliza en hospitales para apoyar y aplicar una fuerza de tracción a una pierna lastimada. a) Calcule la fuerza de tensión en la cuerda que soporta la pierna. b) ¿Cuál es la fuerza de tracción que se ejerce en la pierna? Suponga que la fuerza de tracción es horizontal.

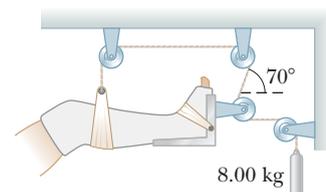


Figura P4.31

32. **PG** Dos bloques de masas m_1 y m_2 ($m_1 > m_2$), se colocan sobre una mesa sin fricción en contacto mutuo. Se aplica una fuerza horizontal de magnitud F al bloque de masa m_1 en la figura P4.32.

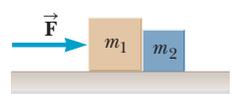


Figura P4.32

a) Si P es la magnitud de la fuerza de contacto entre los bloques, trace un diagrama de cuerpo libre para cada bloque. b) ¿Cuál es la fuerza neta en el sistema consistente en los dos bloques? c) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa

en m_1 ? d) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa en m_2 ? e) Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para cada bloque. f) Resuelva el sistema que resulta de dos ecuaciones y dos incógnitas, exprese la aceleración a y la fuerza de contacto P en términos de las masas y fuerza. g) ¿Cómo cambiaría la respuesta si la fuerza ha sido aplicada a m_2 ? (Sugerencia: Utilice la simetría; ¡no calcule!) ¿La fuerza de contacto es más grande, más pequeña o en este caso la misma? ¿Por qué?

33. Un planeador de 276 kg es arrastrado por un avión de 1950 kg a lo largo de una pista horizontal con una aceleración $\vec{a} = 2.20 \text{ m/s}^2$ hacia la derecha como en la figura P4.33. Encuentre a) el impulso proporcionado por las hélices del avión y b) la magnitud de la tensión en el cable de conexión entre el avión y el planeador.

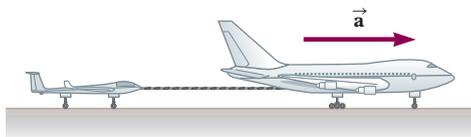


Figura P4.33

34. **CIC** En la figura P4.34 la cuerda B masa despreciable, tensa, sin deformar une el bloque 1 y el bloque 2 de mayor masa. La cuerda A ejerce una fuerza en el bloque 1 para que acelere hacia adelante. a) ¿Cómo se compara la magnitud de la fuerza ejercida por la cuerda A en el bloque 1 con la magnitud de la fuerza ejercida por la cuerda B en el bloque 2? b) ¿Cómo se compara la aceleración del bloque 1 con la aceleración del bloque 2? c) ¿La cuerda B ejerce una fuerza sobre el bloque 1? Explique su respuesta.

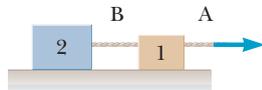


Figura P4.34

35. **CIC** a) Un elevador de masa m que se mueve hacia arriba tiene dos fuerzas que actúan sobre él: la fuerza de tensión ascendente en el cable y la fuerza hacia abajo debido a la gravedad. Cuando el elevador se acelera hacia arriba, ¿qué es mayor, T o w ? b) Cuando el elevador se mueve hacia arriba con una velocidad constante, ¿qué es mayor, T o w ? c) Cuando el elevador se mueve hacia arriba, pero la aceleración es hacia abajo, ¿qué es mayor, T o w ? d) Suponga que el elevador tiene una masa de 1500 kg y una aceleración de 2.5 m/s^2 hacia arriba. Determine T . ¿Su respuesta es compatible con la del inciso a)? e) Ahora el elevador del inciso d) se mueve hacia arriba con una velocidad constante de 10 m/s . Determine T . ¿Su respuesta es compatible con la del inciso b)? f) Inicialmente moviéndose hacia arriba con una velocidad constante, el elevador comienza a acelerar hacia abajo a 1.50 m/s^2 . Determine T . ¿Su respuesta es compatible con la del inciso c)?

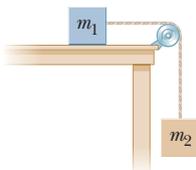


Figura P4.36

(Problemas 36, 40 y 45)

36. Un objeto con masa $m_1 = 5.00 \text{ kg}$ está en reposo sobre una mesa horizontal sin fricción conectada a un cable que pasa sobre una po-

lea y después está unida a un objeto colgante de masa s . Encuentre a) la aceleración de cada objeto y b) la tensión en el cable.

37. Un automóvil de 1000 kg jala un remolque de 300 kg. Juntos tienen una aceleración de 2.15 m/s^2 en la dirección x positiva. Despreciando las fuerzas de fricción en el remolque, determine a) la fuerza neta sobre el automóvil, b) la fuerza neta sobre el remolque, c) la fuerza ejercida por el remolque sobre el automóvil y d) la fuerza resultante ejercida por el automóvil sobre el camino.

38. Dos objetos con masas de 3.00 kg y 5.00 kg, respectivamente, están conectados mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción, como en la figura P4.38. Determine a) la tensión en la cuerda, b) la aceleración de cada objeto y c) la distancia que cada objeto recorrerá en el primer segundo de movimiento si ambos objetos inician desde el reposo.

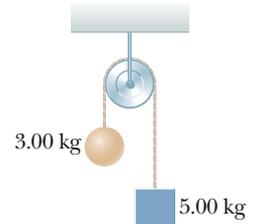


Figura P4.38

4.6 Fuerzas de fricción

39. Un estibador carga cajas en un barco y encuentra que una caja de 20 kg, al principio en reposo sobre una superficie horizontal, necesita una fuerza horizontal de 75 N para ponerse en movimiento. De cualquier modo, después que la caja está en movimiento, se necesita una fuerza de 60 N para mantenerla moviéndose con una rapidez constante. Determine los coeficientes de fricción estática y cinética entre la caja y el piso.
40. En la figura P4.36, $m_1 = 10 \text{ kg}$ y $m_2 = 4.0 \text{ kg}$. El coeficiente de fricción estática entre m_1 y la superficie horizontal es 0.50, y el coeficiente de fricción cinética es 0.30. a) Si el sistema se libera desde el reposo, ¿cuál será su aceleración? b) Si el sistema se pone en movimiento con m_2 moviéndose hacia abajo, ¿cuál será la aceleración del sistema?
41. Una caja de 1000 N se empuja a lo largo de un piso a nivel con rapidez constante mediante una fuerza \vec{F} de 300 N a un ángulo de 20.0° por debajo de la horizontal, como se muestra en la figura P4.41a. a) ¿Cuál es el coeficiente de fricción cinética entre la caja y el piso? b) Si la fuerza de 300 N jala el bloque con un ángulo de 20.0° por arriba de la horizontal, como se muestra en la figura P4.41b, ¿cuál será la aceleración de la caja? Considere que el coeficiente de fricción es el mismo que el que se encontró en el inciso a).

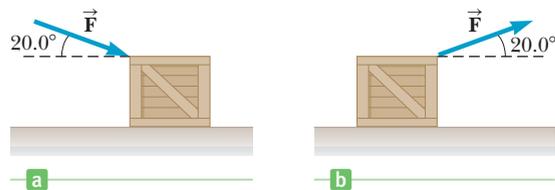


Figura P4.41

42. **CIC S** Un bloque de masa $3m$ se coloca en una superficie horizontal sin fricción, y un segundo bloque de masa

m se coloca en la parte superior del primer bloque. Las superficies de los bloques son rugosas. Una fuerza constante de magnitud F se aplica al primer bloque como se muestra en la figura

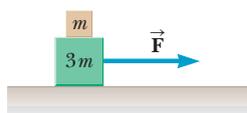


Figura P4.42

P4.42. a) Construya diagramas de cuerpo libre para cada bloque. b) Identifique la fuerza horizontal que hace que el bloque de masa m acelere. c) Suponga que el bloque superior no se desliza sobre el bloque inferior y determine la aceleración de cada bloque en términos de m y F .

43. Considere un camión transportando una carga pesada; por ejemplo, vigas de acero. Un peligro importante para el conductor es que la carga pueda deslizarse hacia adelante, aplastando la cabina, si el camión se detiene repentinamente en un accidente o incluso al frenar. Por ejemplo, suponga una carga de 10 000 kg colocada sobre la plataforma de un camión de 20 000 kg moviéndose a 12.0 m/s. Suponga que la carga no está atada al camión y tiene un coeficiente de fricción estática de 0.500 con la plataforma del camión. a) Calcule la distancia mínima para detenerlo sin que la carga se deslice hacia adelante con respecto al camión. b) ¿Alguna parte de la información no es necesaria para la solución?
44. Una caja de 45.0 kg de masa se está transportando sobre la plataforma de una camioneta. El coeficiente de fricción estática entre la caja y la plataforma es 0.350, y el coeficiente de fricción cinética es 0.320. a) La camioneta acelera hacia adelante a nivel del suelo. ¿Cuál es la aceleración máxima que puede tener la camioneta de tal modo que la caja no se deslice con respecto a la plataforma de la misma? b) La camioneta excede ligeramente esta aceleración y a continuación se mueve con aceleración constante con la caja deslizándose a lo largo de su plataforma. ¿Cuál es la aceleración de la caja con respecto a la superficie de la tierra?
45. **M** Los objetos con masas $m_1 = 10.0$ kg y $m_2 = 5.00$ kg, respectivamente, están unidos mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción como en la figura P4.36. Si, cuando el sistema parte desde el reposo, m_2 cae 1.00 m en 1.20 s, determine el coeficiente de fricción cinética entre m_1 y la mesa.
46. **S** Un disco de *hockey* se golpea con un bastón que le proporciona una rapidez inicial v_0 en la dirección x positiva. El coeficiente de fricción cinética entre el hielo y el disco es μ_k . a) Obtenga una expresión para la aceleración del disco. b) Utilice el resultado del inciso a) para obtener una expresión para la distancia d que se desliza el disco. La respuesta es sólo en términos de las variables v_0 , μ_k y g .

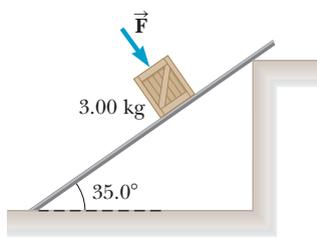


Figura P4.47

47. El coeficiente de fricción estática entre la caja de 3.00 kg y el plano inclinado 35.0° de la figura P4.47 es 0.300. ¿Cuál es la fuerza mínima \vec{F} perpendicular al plano que debe ser aplicada a la caja para evitar que ésta se deslice hacia abajo del plano?

48. Una estudiante decide mover una caja de libros dentro de su habitación jalándola con una cuerda unida a ésta. Jala con una fuerza de 80.0 N en un ángulo de 25.0° sobre la horizontal. La caja tiene una masa de 25.0 kg, y el coeficiente de fricción cinética entre la caja y el piso es 0.300. a) Encuentre la aceleración de la caja. b) A continuación mueve la caja hacia arriba sobre un plano inclinado 10.0° , manteniendo una fuerza de 80.0 N dirigida a 25.0° sobre la línea del plano inclinado. Si el coeficiente de fricción no cambia, ¿cuál es la nueva aceleración de la caja?

49. **CIC** Sobre un objeto que cae bajo la fuerza de la gravedad actúa la fuerza de fricción de la resistencia del aire. La magnitud de esta fuerza es casi proporcional a la rapidez del objeto, que puede ser reescrita como $f = bv$. Suponga que $b = 15$ kg/s y $m = 50$ kg. a) ¿Qué rapidez terminal alcanza el objeto mientras está cayendo? b) ¿Su respuesta al inciso a) depende de la rapidez inicial del objeto? Explique.

50. Un automóvil viaja a 50.0 km/h en una autopista plana. a) Si el coeficiente de fricción entre el camino y los neumáticos en un día con lluvia es 0.100, ¿cuál es la distancia mínima en la cual se detiene el automóvil? b) ¿Cuál es la distancia en que se detiene cuando la superficie está seca y el coeficiente de fricción es 0.600?

51. Un bloque de 3.00 kg inicia en la parte superior de una plano inclinado 30.0° y se desliza 2.00 m hacia abajo sobre el plano en 1.50 s. Determine a) la aceleración del bloque, b) el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano inclinado, c) la fuerza de fricción que actúa sobre el bloque y d) la rapidez del bloque después de que se deslizó 2.00 m.

52. Un bloque de 15.0 lb reposa sobre un suelo horizontal. a) ¿Qué fuerza ejerce el piso sobre el bloque? b) Una cuerda es atada al bloque y se mueve verticalmente sobre una polea. El otro extremo está conectado a un objeto de 10.0 lb colgando libremente. ¿Cuál es ahora la fuerza ejercida por el suelo en el bloque de 15.0 lb? c) Si el objeto de 10.0 lb en el inciso b) es remplazado por un objeto de 20.0 lb. ¿Cuál es la fuerza ejercida por el suelo sobre el bloque de 15.0 lb?

53. Para cumplir con el requisito del Servicio Postal de Estados Unidos, el calzado de los empleados debe tener un coeficiente de fricción estática de 0.500 o más en una superficie resbalosa específica. Un típico zapato deportivo tiene un coeficiente de 0.800. En caso de emergencia, ¿cuál es el intervalo de tiempo mínimo en que una persona partiendo del reposo se puede mover de 3.00 m sobre la superficie resbalosa si está usando a) el calzado requerido por el Servicio Postal y b) un calzado deportivo normal?

54. Objetos de masas $m_1 = 4.00$ kg y $m_2 = 9.00$ kg están conectados mediante una cuerda ligera que pasa sobre una polea sin fricción como en la figura P4.54. El objeto m_1 se mantiene en reposo sobre el piso y m_2 en reposo sobre un plano inclinado con un án-

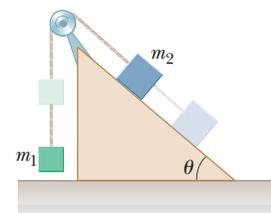


Figura P4.54

gulo $\theta = 40.0^\circ$. Los objetos son liberados desde el reposo y m_2 se desliza 1.00 m hacia abajo sobre el plano inclinado en 4.00 s. Calcule a) la aceleración de cada objeto, b) la tensión en la cuerda y c) el coeficiente de fricción cinética entre m_2 y el plano inclinado.

55. **BIO** La persona en la figura P4.55 pesa 170 lb. Cada muleta hace un ángulo de 22.0° con la vertical (como se ve desde el frente). La mitad del peso de la persona se soporta mediante las muletas, la otra mitad mediante las fuerzas ejercidas verticalmente por la superficie de la tierra en sus pies. Suponiendo que él está en reposo y la fuerza ejercida por la superficie de la tierra sobre las muletas actúa a lo largo de ellas, calcule a) el coeficiente de fricción más pequeño posible entre las muletas y la superficie de la tierra y b) la magnitud de la fuerza de compresión que soporta cada muleta.

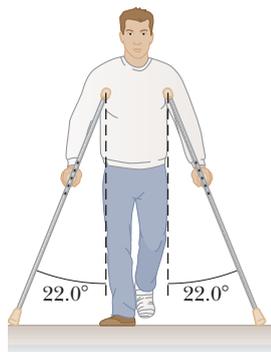


Figura P4.55

El agua ejerce una fuerza a lo largo de la quilla (fondo) del bote que evita movimientos laterales, como se muestra en la figura. Una vez que el bote inicia su movimiento hacia adelante, el agua también ejerce una fuerza de arrastre hacia atrás sobre el bote, opuesta hacia el movimiento hacia adelante. Si está soplando un viento hacia el este de 17 nudos (1 nudo = 0.514 m/s), ¿Cuál es la aceleración inicial del velero?

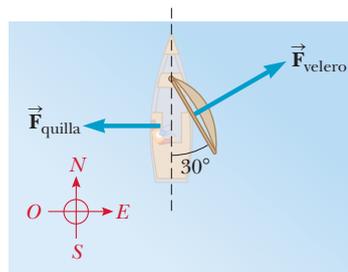


Figura P4.58

Problemas adicionales

56. Como una protesta contra los gritos del árbitro, un lanzador en el juego de béisbol envía una pelota recta hacia arriba en el aire con una rapidez de 20.0 m/s. En el proceso, mueve su mano a lo largo de una distancia de 1.50 m. Si la pelota tiene una masa de 0.150 kg, halle la fuerza que el lanzador ejerce sobre la pelota para proporcionarle su rapidez ascendente.

57. **CIC** Tres objetos están conectados sobre una mesa como se muestra en la figura P4.57. La mesa rugosa tiene un coeficiente de fricción cinética de 0.350. Los objetos tienen masas de $m_1 = 4.00$ kg, $m_2 = 1.00$ kg y $m_3 = 2.00$ kg como se muestran, y las poleas son sin fricción. a) Trace un diagrama de cuerpo libre para cada uno de los objetos. b) Determine la aceleración de cada objeto y las direcciones de cada uno de ellos. c) Calcule las tensiones en las dos cuerdas. d) Si la mesa fuera uniforme, ¿las tensiones se incrementarían, disminuirían o serían las mismas? Explique.

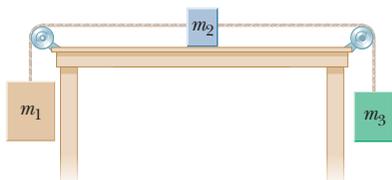


Figura P4.57

59. a) ¿Cuál es la fuerza resultante que ejercen los dos cables que soportan el semáforo de la figura P4.59? b) ¿Cuál es el peso del semáforo?

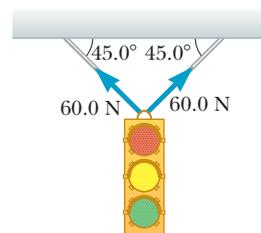


Figura P4.59

60. a) ¿Cuál es la fuerza de fricción mínima necesaria para mantener en equilibrio el sistema de la figura P4.60? b) ¿Qué coeficiente de fricción estática entre el bloque de 100 N y la mesa garantiza el equilibrio? c) Si el coeficiente de fricción cinética entre el bloque de 100 N y la mesa es 0.250, ¿qué pesa debe colgarse al sustituir la de 50.0 N que permita al sistema moverse con una rapidez constante una vez que el arreglo está en movimiento?

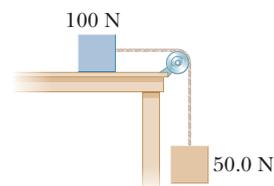


Figura P4.60

61. Un chico se desliza cuesta abajo en una colina sobre un trineo, alcanzando la superficie a nivel en la parte inferior con una rapidez de 7.0 m/s. Si el coeficiente de fricción entre el patín del trineo y la nieve es 0.050, el peso del chico y el trineo es de 600 N, ¿qué distancia recorre el trineo sobre la superficie a nivel antes de llegar al reposo?

62. Una mujer en un aeropuerto jala su maleta de 20.0 kg a velocidad constante tirando de una correa en un ángulo θ horizontal por encima de la horizontal (figura 4.62). Ella tira de la correa con una fuerza de 35.0 N, y la fuerza de fricción en la maleta es de 20.0 N. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre de la maleta. b) ¿Qué ángulo debe hacer la correa con la horizontal? c) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza normal que ejerce la tierra sobre la maleta?

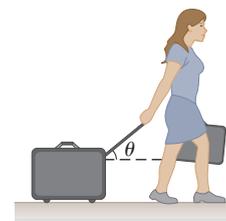


Figura P4.62

58. La fuerza ejercida por el viento sobre un velero es casi perpendicular a las velas y proporcional a la componente de la velocidad del viento perpendicular a la vela. Para el velero de 800 kg que se muestra en la figura P4.58, la constante de proporcionalidad es

$$F_{\text{vela}} = \left(550 \frac{\text{N}}{\text{m/s}} \right) v_{\text{viento} \perp}$$

63. **CIC** Una caja yace en reposo en la parte posterior de un camión. El coeficiente de fricción estática entre la caja y la plataforma del camión es 0.300. a) Cuando el camión acelera hacia adelante, ¿qué fuerza acelera la caja? b) Determine la aceleración máxima que el camión puede tener antes que la caja se deslice.

64. Tres objetos se conectan mediante una cuerda ligera como se muestra en la figura P4.64. La cuerda une el objeto de 4.00 kg y el de 5.00 kg y pasa sobre una polea sin fricción. Calcule a) la aceleración de cada objeto y b) la tensión en las dos cuerdas.

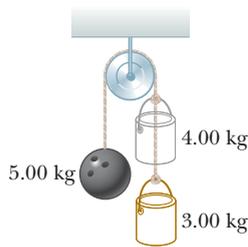


Figura P4.64

65. **M** Un plano sin fricción de 10.0 m de longitud tiene una inclinación de 35.0° . Un trineo inicia en la parte inferior con una rapidez inicial de 5.00 m/s hacia arriba del plano. Cuando el trineo alcanza el punto en el cual se detiene momentáneamente, un segundo trineo se desliza desde la parte superior del plano con una rapidez inicial v_i . Los dos trineos alcanzan la parte inferior del plano en el mismo instante. a) Determine la distancia que recorrió el primer trineo hacia arriba del plano. b) Calcule la rapidez inicial del segundo trineo.

66. Una clavadora de 70.0 kg salta de una plataforma a 10 m por encima del agua, cayendo verticalmente hacia ésta partiendo del reposo. Si su movimiento descendente se detiene 2.00 s después de que entra al agua, ¿qué fuerza ascendente promedio ejerce el agua sobre ella?

67. **M** Un bloque de aluminio de 2.00 kg y uno de cobre de 6.00 kg se unen mediante una cuerda ligera sobre una polea sin fricción. A los dos bloques se les permite moverse sobre una cuña de acero fija (de ángulo $\theta = 30.0^\circ$) como se muestra en la figura P4.67. Utilice la tabla 4.2, para determinar a) la aceleración de los dos bloques y b) la tensión en la cuerda.

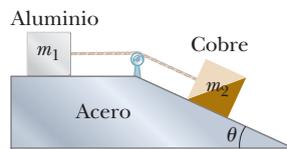


Figura P4.67

68. **S** Un objeto de masa m_1 cuelga de una cuerda que pasa por una polea fija P_1 , como se muestra en la figura P4.68. La cuerda se conecta a una segunda polea P_2 muy ligera. Una segunda cuerda pasa alrededor de esta polea con un extremo sujeto a una pared y el otro a un objeto

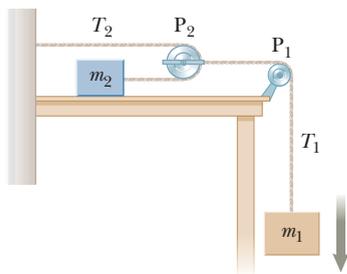


Figura P4.68

de masa m_2 sobre una mesa horizontal sin rozamiento. a) Si a_1 y a_2 son las aceleraciones de m_1 y m_2 , respectivamente, ¿cuál es la relación entre estas aceleraciones? Encuentre expresiones para b) las tensiones en las cuerdas y c) las aceleraciones a_1 y a_2 , en términos de las masas m_1 y m_2 , y g .

69. Dos cajas de frutas sobre una superficie horizontal sin fricción están unidas mediante una cuerda ligera como se muestra en la figura P4.69, donde $m_1 = 10$ kg y $m_2 = 20$ kg. Se aplica una fuerza de 50 N a la caja de 20 kg. a) Calcule la aceleración de cada caja y la tensión en la cuerda. b) Reproduzca el problema para el caso cuando el coeficiente de fricción cinética entre cada caja y la superficie es 0.10.

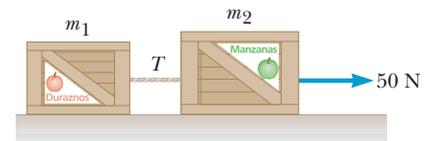


Figura P4.69

70. **CIC** *Medición de los coeficientes de fricción.* Se coloca una moneda cerca del borde de un libro que se encuentra sobre una mesa y ese borde del libro se levanta hasta que la moneda se desliza hacia abajo sobre el plano inclinado como se muestra en la figura P4.70. Se mide el ángulo de inclinación, θ_c , conocido como ángulo crítico. a) Trace un diagrama de cuerpo libre para la moneda cuando se encuentra en el límite del deslizamiento e identifique todas las fuerzas que actúan sobre ella. Su diagrama de cuerpo libre incluye una fuerza de fricción estática que actúa hacia arriba del plano. b) ¿La magnitud de la fuerza de fricción es igual a $\mu_s n$ para ángulos menores que θ_c ? Explique. ¿Qué puede concluir acerca de la magnitud de la fuerza de fricción para cualquier ángulo $\theta \leq \theta_c$? c) Muestre que el coeficiente de fricción estática se conoce mediante $\mu_s = \tan \theta_c$. d) Una vez que la moneda inicia el deslizamiento hacia abajo sobre el plano, el ángulo se puede ajustar a un valor nuevo $\theta'_c \leq \theta_c$ tal que la moneda se mueva hacia abajo sobre el plano con rapidez constante. ¿Cómo haría la observación que le permita obtener el coeficiente de fricción cinética?



Figura P4.70

71. **CIC** Un pescador inspecciona los postes de su bote para su próxima pesca. Empuja paralelamente a lo largo del poste ligero, ejerciendo una fuerza de 240 N en la parte inferior de un lago poco profundo. El poste se encuentra en el plano vertical que contiene la quilla del bote. En un momento, el poste hace un ángulo de 35.0° con la vertical, y el agua ejerce una fuerza de arrastre horizontal de 47.5 N sobre el bote, opuesto a su velocidad hacia delante de magnitud 0.857 m/s. La masa del bote incluyendo su carga y el trabajador es 370 kg. a) El agua ejerce

una fuerza de empuje vertical ascendente sobre el bote. Calcule la magnitud de esta fuerza. b) Considere que las fuerzas son constantes en un intervalo de tiempo breve. Determine la velocidad del bote 0.450 s después del momento descrito. c) Si el ángulo del poste con respecto a la vertical aumenta, pero la fuerza ejercida contra el fondo permanece igual, ¿qué le sucedería a la fuerza boyante y la aceleración del bote?

72. **CIC** Una cuerda con masa m_r se une a un bloque con masa m_b como en la figura P4.72. Ambos, la cuerda y el bloque, yacen en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción. La cuerda no se estira. El extremo libre de la cuerda se jala hacia la derecha con una fuerza horizontal F . a) Trace el diagrama de cuerpo libre para la cuerda y el bloque, observe que la tensión en la cuerda no es uniforme. b) Determine la aceleración del sistema en términos de m_b , m_r y F . c) Encuentre la magnitud de la fuerza que ejerce la cuerda en el bloque. d) ¿Qué le sucede a la fuerza en el bloque cuando la masa de la cuerda se aproxima a cero? ¿Qué puede establecer acerca de la tensión en una cuerda *ligera* que une un par de objetos en movimiento?

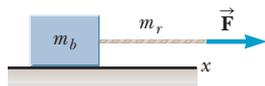


Figura P4.72

73. Una camioneta acelera hacia abajo en una colina (figura P4.73), al ir desde el reposo hasta 30.0 m/s en 6.00 s. Durante la aceleración, un juguete ($m = 0.100$ kg) cuelga de una cuerda desde el cielo raso de la camioneta. La aceleración es tal que la cuerda permanece perpendicular al cielo raso. Determine a) el ángulo θ y b) la tensión en la cuerda.

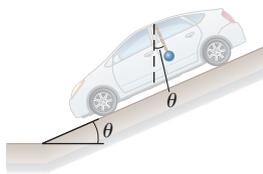


Figura P4.73

74. Un estudiante de física curioso, que desea combinar placer con investigación científica, pasea en una montaña rusa sentado sobre una báscula de baño. (No lo intente ya que están prohibidos paquetes pesados, sin estar fijados.) El fondo del asiento del vagón es un plano paralelo a la vía. El asiento tiene un respaldo perpendicular y un cinturón de seguridad que se ajusta alrededor del pecho del estudiante en un plano paralelo al fondo del asiento. El estudiante levanta sus pies desde el piso de tal modo que su peso en la escala de la báscula indica 200 lb cuando el vagón está horizontal. En un punto durante el paseo, el vagón baja con fricción despreciable sobre una pendiente recta a 30.0° por debajo de la horizontal. ¿Qué lectura se registra en la escala en ese punto?
75. El paracaídas en un automóvil de carreras de 8820 N de peso se abre al final de la competencia de un cuarto de milla cuando el automóvil está viajando a 35 m/s. ¿Cuál es la fuerza de retraso total que debe proporcionar el paracaídas para detener el automóvil en una distancia de 1000 m?
76. **M** En el despegue de un aeroplano, la acción combinada del aire alrededor de los motores y las alas de un aeroplano ejerce una fuerza de 8000 N sobre la nave, dirigida

hacia arriba en un ángulo de 65.0° sobre la horizontal. La nave se eleva con velocidad constante en la dirección vertical mientras continúa acelerando en la dirección horizontal. a) ¿Cuál es el peso de la nave? b) ¿Cuál es la aceleración horizontal?

77. La tabla intercalada entre otras dos en la figura P4.77 pesa 95.5 N. Si el coeficiente de fricción entre las tablas es 0.663, ¿cuál debe ser la magnitud de las fuerzas de compresión (suponiéndolas horizontales) que actúan sobre ambos lados del centro de la tabla para evitar que se deslice?

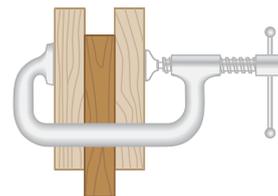


Figura P4.77

78. Un trineo que pesa 60.0 N se jala horizontalmente a través de la nieve de tal modo que el coeficiente de fricción cinética entre el trineo y la nieve es 0.100. Un pingüino que pesa 70.0 N viaja sobre el trineo, como en la figura P4.78. Si el coeficiente de fricción estática entre el pingüino y el trineo es 0.700, halle la fuerza horizontal máxima que se puede ejercer en el trineo antes que el pingüino empiece a deslizarse.

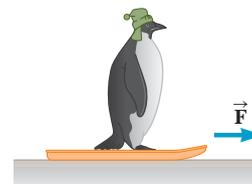


Figura P4.78

79. Un hombre de 72 kg está de pie sobre una balanza de resorte en un elevador. Partiendo desde el reposo, el elevador asciende, alcanzando su rapidez máxima de 1.2 m/s en 0.80 s. El elevador viaja con esta rapidez constante por 5.0 s, se somete a una aceleración *negativa* uniforme por 1.5 s y después llega al reposo. ¿Qué registro hace la balanza a) Antes que el elevador empiece a moverse? b) Durante los primeros 0.80 s del ascenso del elevador? c) Mientras el elevador está viajando con rapidez constante? d) Durante la aceleración negativa del elevador?

80. Un mago jala un mantel por debajo de una taza de 200 g ubicada a 30.0 cm del borde del paño. El paño ejerce una fuerza de fricción de 0.100 N sobre la taza y es arrastrada con una aceleración constante de 3.00 m/s². ¿Qué distancia relativa a la mesa se mueve la taza antes que el paño se retire por completo de debajo de ella? Observe que el paño debe moverse más de 30 cm relativo a la mesa durante el proceso.



Figura P4.81

81. Un ingenioso niño desea alcanzar una manzana en un árbol sin trepar por él. Sentado en una silla unida a una cuerda que pasa sobre una polea sin fricción (figura P4.81),

jala el extremo libre de la cuerda con tal fuerza que la lectura en la balanza del resorte es 250 N. El peso real del pequeño es de 320 N, y el de la silla es de 160 N los pies del pequeño no tocan el suelo. a) Muestre que la aceleración del sistema es *positiva* y encuentre su magnitud. b) Determine la fuerza que ejerce el pequeño sobre la silla.

82. Un helicóptero de bomberos transporta un recipiente de agua de 620 kg en el extremo de un cable de 20.0 m de largo. Volando de regreso desde un incendio con una rapidez constante de 40.0 m/s, el cable hace un ángulo de 40.0° con respecto a la vertical. Determine la fuerza ejercida por la resistencia del aire sobre el recipiente.

83. **S** Una caja de peso F_g es empujada por una fuerza \vec{P} sobre la horizontal como se muestra en la figura P4.83. El coeficiente de fricción estática es μ_s y \vec{P} es dirigida en un ángulo θ por debajo de la horizontal. a) Demostrar que el mínimo valor de P que se mueve la caja está dado por

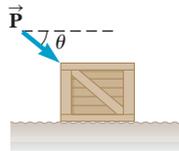


Figura P4.83

$$P = \frac{\mu_s F_g \sec \theta}{1 - \mu_s \tan \theta}$$

b) Halle la condición de θ en términos de μ_s para que el movimiento de la caja sea nulo para cualquier valor de P .

84. **C/C** En la figura P4.84, ignore las masas de las poleas y del cable. Todas las superficies están libres de fricción. a) ¿Cómo es la aceleración del bloque 1 comparada con la aceleración del bloque 2? Explique su razonamiento. b) La masa del bloque 2 es $m_2 = 1.30$ kg. Deduzca una expresión para la aceleración del bloque de masa m_2 en función de la masa m_1 del bloque 1. c) ¿Qué significa el resultado del inciso b) si m_1 es muy mucho menor que 1.30 kg? d) ¿Qué significa el resultado del inciso b) si m_1 tiende a infinito? e) En este último caso, ¿cuál es la tensión de la cuerda? f) ¿Podría prever las respuestas a los incisos c), d) y e) sin resolver primero el inciso b)? Explique.

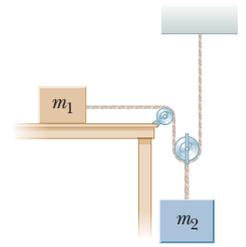


Figura P4.84

85. **S** ¿Qué fuerza horizontal se debe aplicar al bloque de masa M como se muestra en la figura P4.85 para que los bloques permanezcan inmóviles con respecto a M ? Suponga que en las superficies y la polea no hay fricción. Suponga que la fuerza ejercida por la cuerda acelera m_2 .

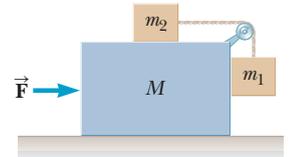


Figura P4.85

Un estudiante trabaja con el sistema pogo-stickstudent, midiendo el aumento de su altura en cada salto. El trabajo que se transforma en energía potencial gravitatoria a la máxima altura, se convirtió en energía cinética al caer y se almacena como fuente de energía potencial después del contacto con el suelo.



Chris Vuille

5

Energía

- 5.1 Trabajo
- 5.2 Energía cinética y el teorema trabajo-energía
- 5.3 Energía potencial gravitacional
- 5.4 Energía potencial elástica
- 5.5 Sistemas y conservación de energía
- 5.6 Potencia
- 5.7 Trabajo realizado por una fuerza variable

Energía es uno de los conceptos más importantes en el mundo de la ciencia. El uso cotidiano de la energía se asocia con el combustible necesario para el transporte y calefacción, con electricidad para la iluminación y aparatos eléctricos y con los alimentos que consumimos. De cualquier modo, estas asociaciones no dicen qué es la energía, sólo lo que *hace*, y lo que produce requiere combustible. Debido a eso, el objetivo en este capítulo es desarrollar una mejor comprensión de la energía y cómo cuantificarla.

La energía está presente en el Universo en una variedad de formas, que incluyen energía mecánica, química, electromagnética y nuclear. Incluso la masa inerte de la materia común contiene una gran cantidad de energía. Aunque la energía se puede transformar de una clase a otra, a la fecha todas las observaciones y experimentos sugieren que la cantidad total de energía en el Universo nunca cambia. Esto también es verdadero para un sistema aislado, un conjunto de objetos que pueden intercambiar energía entre sí, pero no con el resto del Universo. Si una forma de energía en un sistema aislado disminuye, entonces otra forma de energía debe aumentar en el sistema. Por ejemplo, si el sistema consiste en un motor conectado a una batería, ésta convierte la energía química a energía eléctrica, y el motor convierte energía eléctrica a energía mecánica. En todas las ciencias es esencial comprender cómo cambia la energía de una forma a otra.

Este capítulo se concentra principalmente en la *energía mecánica*, que es la suma de la *energía cinética*, es decir la energía asociada con el movimiento, y la *energía potencial*, la energía asociada con la posición relativa. Con frecuencia utilizar una aproximación de energía para resolver ciertos problemas es mucho más fácil que utilizar fuerzas y las tres leyes de Newton. Estos dos diferentes planteamientos se unen a través del concepto de *trabajo*.

5.1 Trabajo

En física, el trabajo tiene un significado diferente del que se utiliza comúnmente. En la definición de la física, un programador realiza muy poco trabajo al mecanografiar continuamente en una computadora. Por el contrario, un constructor puede hacer mucho

trabajo colocando bloques de cemento. En física, se realiza trabajo sólo si un objeto se desplaza de un punto a otro mientras se le aplica una fuerza. Si se duplica cualquiera de los dos, ya sea la fuerza o el desplazamiento, el trabajo se duplica. Duplique los dos, y el trabajo se cuadruplica. Realizar trabajo implica aplicar una fuerza a un objeto mientras se mueve una distancia determinada.

La definición de trabajo W puede ser tomada como

$$W = Fd \quad [5.1]$$

donde F es la magnitud de la fuerza que actúa sobre el objeto y d es la magnitud de desplazamiento del objeto. Esta definición, sin embargo, sólo da la magnitud del trabajo realizado sobre un objeto cuando la fuerza es constante y paralela al desplazamiento, que debe ser a lo largo de una recta. Una definición más formal es necesaria.

La figura 5.1 muestra un bloque que se somete a un desplazamiento $\Delta\vec{x}$ a lo largo de una línea recta mientras actúa en él una fuerza constante \vec{F} en la misma dirección. Se tiene la siguiente definición:

El trabajo W realizado sobre un objeto mediante una fuerza constante \vec{F} durante un desplazamiento lineal a lo largo del eje x es

$$W = F_x \Delta x \quad [5.2]$$

donde F_x es la componente x de la fuerza \vec{F} y $\Delta x = x_f - x_i$ es el desplazamiento del objeto.

Unidad SI: joule (J) = newton · metro (N · M) = kg · m²/s²

Tenga en cuenta que en una dimensión, $\Delta x = x_f - x_i$ es una magnitud vectorial, como se definió en el capítulo 2, no una magnitud que podría deducirse de la definición de un vector y su magnitud en el capítulo 3. Por lo tanto, Δx puede ser positivo o negativo. El trabajo como se define en la ecuación 5.2 se utiliza únicamente para los desplazamientos de cualquier objeto a lo largo del eje x , mientras que una fuerza constante actúa sobre él y, por lo tanto, es conveniente para muchos problemas unidimensionales. El trabajo es un número positivo si F_x y Δx son ambas positivas o negativas, en cualquier caso, como se explica en la siguiente sección, el trabajo aumenta la energía mecánica del objeto. Si F_x es positivo y Δx es negativa, o viceversa, entonces el trabajo es negativo, y el objeto pierde energía mecánica. La definición en la ecuación 5.2 funciona incluso cuando la fuerza constante \vec{F} no es paralela al eje x . El trabajo es realizado sólo por la parte de la fuerza que actúa paralelamente a la dirección del movimiento del objeto.

Es fácil ver la diferencia entre la definición física y la definición común de trabajo. El programador ejerce muy poca fuerza sobre las teclas de un teclado, al producir sólo pequeños desplazamientos, de tal manera que se realiza relativamente poco trabajo físico. El constructor debe aplicar mayor fuerza en los bloques de cemento y moverlos distancias significativas y así realizar una cantidad de trabajo mucho más grande. No obstante, incluso tareas muy fastidiosas no pueden evidenciar trabajo según la definición de la física. Por ejemplo, un chofer de camión puede conducir por varias horas, pero si él no ejerce una fuerza, entonces $F_x = 0$ en la ecuación 5.2, y él no realiza trabajo alguno. De la misma manera, un estudiante, al hacer presión contra un muro por horas en un ejercicio isométrico, tampoco realiza trabajo, debido a que el desplazamiento Δx en la ecuación 5.2 es cero.¹ Atlas, en la mitología griega, sostiene el mundo sobre sus hombros, pero eso, también, no calificaría como trabajo en la definición de la física.

Trabajo es una cantidad escalar, un número, en lugar de un vector; en consecuencia, es más fácil de manejar. Ninguna dirección se asocia con él. Debido a eso, el trabajo no depende explícitamente del tiempo, que puede ser una ventaja en problemas que involucren

◀ Definición intuitiva de trabajo

◀ Trabajo realizado por una fuerza constante a lo largo de un desplazamiento en línea recta

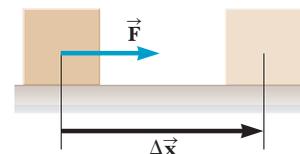


Figura 5.1 Una fuerza constante \vec{F} en la misma dirección que el desplazamiento, $\Delta\vec{x}$, realiza trabajo $F\Delta x$.

Tip 5.1 El trabajo es una cantidad escalar

El trabajo es un simple número, un escalar, no un vector, de tal modo que no existe dirección asociada con él. Además, la energía y la transferencia de energía son también escalares.

¹ En realidad, gasta energía mientras realiza ejercicio isométrico a causa de que sus músculos se contraen y se relajan de manera continua en el proceso. Este movimiento muscular interno se califica como trabajo de acuerdo con la definición de la física.

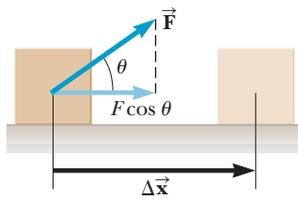


Figura 5.2 Una fuerza constante \vec{F} ejercida en un ángulo θ con respecto al desplazamiento, $\Delta \vec{x}$, realiza trabajo $(F \cos \theta) \Delta x$.

Trabajo realizado por una fuerza constante en un ángulo al desplazamiento

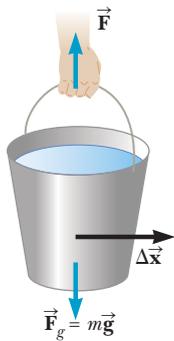


Figura 5.3 Ningún trabajo se realiza sobre una cubeta cuando ésta se traslada horizontalmente a causa de la fuerza aplicada \vec{F} que es perpendicular al desplazamiento.

Tip 5.2 El trabajo es realizado por algo, sobre algo

El trabajo no resulta por sí mismo. El trabajo se realiza por algo en el entorno, sobre el objeto de interés.

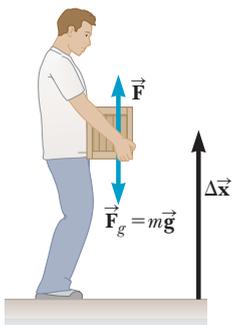


Figura 5.4 El estudiante realiza trabajo positivo cuando levanta la caja, debido a que la fuerza aplicada \vec{F} está en la misma dirección que el desplazamiento. Cuando baja la caja hacia el piso, él realiza un trabajo negativo.

sólo velocidades y posiciones. Debido a que las unidades de trabajo son las de la fuerza y distancia, la unidad SI es el **newton-metro** ($\text{N} \cdot \text{m}$). Otro nombre para el newton-metro es el **joule (J)**. La unidad de trabajo estándar en Estados Unidos es el **pie-libra**, ya que en ese sistema las distancias se miden en pies y las fuerzas, en libras.

Una definición alterna relaciona el trabajo realizado sobre un objeto con el ángulo que el desplazamiento forma con respecto a la fuerza. Esta definición utiliza el triángulo mostrado en la figura 5.2. Las componentes del vector \vec{F} se pueden escribir como $F_x = F \cos \theta$ y $F_y = F \sin \theta$. Sin embargo, sólo la componente x , que es paralela a la dirección del movimiento, hace una contribución distinta de cero no nula al trabajo realizado en el objeto.

El trabajo W realizado sobre un objeto mediante una fuerza constante \vec{F} durante un desplazamiento en línea recta $\Delta \vec{x}$ es

$$W = (F \cos \theta)d \quad [5.3]$$

donde d es la magnitud del desplazamiento del objeto y θ es el ángulo entre los vectores \vec{F} y el vector desplazamiento, $\Delta \vec{x}$.

Unidad SI: joule (J)

La definición de la ecuación 5.3 también se puede utilizar de manera más general cuando el desplazamiento no es específicamente a lo largo del eje x o cualquier otro eje.

En la figura 5.3 un hombre transporta horizontalmente una cubeta con agua, con velocidad constante. La fuerza ascendente ejercida en la cubeta por la mano del hombre es perpendicular a la dirección del movimiento, de esta manera no se realiza trabajo sobre la cubeta. Además, esto puede ser visto en la ecuación 5.3 debido a que ángulo entre la fuerza ejercida por la mano y la dirección de movimiento es de 90° , dando $\cos 90^\circ = 0$ y $W = 0$. De la misma manera, la fuerza de gravedad no realiza trabajo sobre la cubeta.

El trabajo siempre requiere un sistema de más de un objeto. Por ejemplo, un clavo no puede realizar trabajo en sí mismo, pero un martillo puede hacer trabajo sobre el clavo impulsándolo hacia dentro de una tabla. En general, un objeto puede estar en movimiento bajo la influencia de varias fuerzas externas. En ese caso, el trabajo total realizado sobre el objeto cuando éste se somete a algún desplazamiento es precisamente la suma de la cantidad de trabajo realizado por cada fuerza.

El trabajo puede ser negativo o positivo. En la definición de trabajo en la ecuación 5.3, F y d son magnitudes, que jamás son negativas. Debido a eso, el trabajo es positivo o negativo dependiendo de si $\cos \theta$ es positivo o negativo. En su momento, esto depende de la dirección de \vec{F} relativa a la dirección de $\Delta \vec{x}$. Cuando estos vectores apuntan en la misma dirección, el ángulo entre ellos es 0° , así $\cos 0^\circ = +1$, y el trabajo es positivo. Por ejemplo, cuando un estudiante levanta una caja como en la figura 5.4, el trabajo que hace en la caja es positivo debido a que la fuerza que se ejerce sobre la caja es hacia arriba, en la misma dirección que el desplazamiento. De cualquier modo, al bajar la caja lentamente de regreso, el estudiante todavía ejerce una fuerza hacia arriba sobre la caja, pero el movimiento de la caja es hacia abajo. Ahora, debido a que los vectores \vec{F} y $\Delta \vec{x}$ están en direcciones opuestas, el ángulo entre ellos es 180° y $\cos 180^\circ = -1$, y el trabajo realizado por el estudiante es negativo. En general, cuando la componente de \vec{F} paralela a $\Delta \vec{x}$ estas apuntan en la misma dirección que $\Delta \vec{x}$, por lo tanto el trabajo es positivo; de otra manera, es negativo.

Ya que las ecuaciones 5.1-5.3 consideran una fuerza constante en dirección y tamaño, son casos especiales de una definición más general de trabajo —que se realiza mediante una fuerza variable— se tratan de manera breve en la sección 5.7.

Examen rápido

5.1 En la figura 5.5 a)-d), un bloque se mueve hacia la derecha en la dirección positiva x un desplazamiento $\Delta \vec{x}$ mientras se aplica una fuerza \vec{F} en la misma dirección. ¿Cuál de lo siguiente es el orden correcto de la cantidad de trabajo realizado por la fuerza \vec{F} , del más positivo al más negativo? a) d, c, a, b b) c, a, b, d c) c, a, d, b

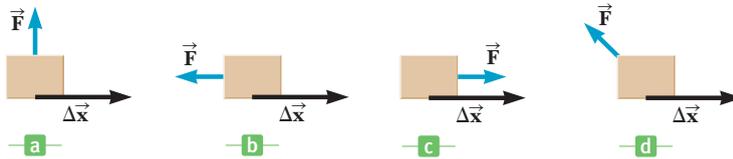


Figura 5.5 (Examen rápido 5.1) Se ejerce una fuerza \vec{F} sobre un objeto que se desplaza una distancia $\Delta\vec{x}$ hacia la derecha. La magnitud de la fuerza y el desplazamiento son iguales en los cuatro casos.

■ EJEMPLO 5.1 Transporte por trineo a través del río Yukón

OBJETIVO Aplicar las definiciones básicas de trabajo realizado por una fuerza constante.

PROBLEMA Un esquimal regresa de un fructífero viaje de pesca jalando un trineo cargado de salmón. La masa total del trineo y del salmón es 50.0 kg , y el esquimal ejerce una fuerza de $1.20 \times 10^2 \text{ N}$ sobre el trineo al jalar de la cuerda. **a)** ¿Cuánto trabajo realiza sobre el trineo si la cuerda está en posición horizontal a la superficie de la tierra ($\theta = 0^\circ$, figura 5.6) y jala el trineo 5.00 m ? **b)** ¿Cuánto trabajo realiza sobre el trineo si $\theta = 30.0^\circ$ y jala el trineo la misma distancia? (Considere al trineo como una partícula puntual, de tal manera que los detalles como el punto de unión de la cuerda no es relevante.) **c)** En una posición coordinada de 12.4 m , el esquimal alivia la fuerza aplicada. Una fuerza de fricción de 45.0 N entre el hielo y el trineo lleva al trineo hasta el reposo recorriendo una distancia de 18.2 m . ¿Cuál es el trabajo realizado por la fuerza de fricción en el trineo?

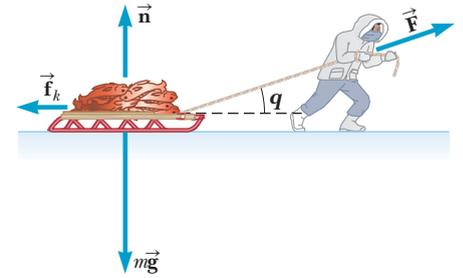


Figura 5.6 (Ejemplos 5.1 y 5.2) Un esquimal jala un trineo con una cuerda en un ángulo θ con la horizontal.

ESTRATEGIA Sustituya los valores conocidos de F y Δx en las ecuaciones básicas para el trabajo, ecuaciones 5.2 y 5.3.

SOLUCIÓN

a) Calcule el trabajo realizado cuando la fuerza es horizontal.

Aplique la ecuación 5.2, sustituyendo los valores conocidos:

$$W = F_x \Delta x = (1.20 \times 10^2 \text{ N})(5.00 \text{ m}) = 6.00 \times 10^2 \text{ J}$$

b) Determine el trabajo realizado cuando se ejerce la fuerza en un ángulo de 30° .

Utilice la ecuación 5.3, una vez más sustituyendo los valores conocidos:

$$W = (F \cos \theta) d = (1.20 \times 10^2 \text{ N})(\cos 30^\circ)(5.00 \text{ m}) = 5.20 \times 10^2 \text{ J}$$

c) ¿Cuánto trabajo realiza la fuerza de fricción de 45.0 N sobre el trineo cuando éste se desplaza desde la posición de 12.4 m a la posición de 18.2 m ?

Use la ecuación 5.2, sustituyendo F_x por f_k :

$$W_{\text{fric}} = F_x \Delta x = F_k (x_f - x_i)$$

Sustituya $f_k = -45.0 \text{ N}$ y las coordenadas de la posición inicial y final en x_i y x_f :

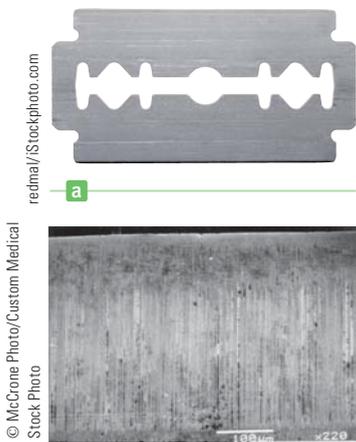
$$W_{\text{fric}} = (45.0 \text{ N})(18.2 \text{ m} - 12.4 \text{ m}) = -261 \text{ J}$$

COMENTARIOS La fuerza normal \vec{n} , la fuerza gravitacional $m\vec{g}$ y la componente hacia arriba de la fuerza aplicada no realizan trabajo sobre el trineo ya que son perpendiculares al desplazamiento. En este caso la masa del trineo no participa, pero es importante cuando se deban calcular los efectos de la fricción y en la próxima sección, donde se introduce el teorema trabajo-energía.

PREGUNTA 5.1 ¿Cómo cambia la respuesta para el trabajo efectuado por la fuerza aplicada si se duplica la carga? Explique.

EJERCICIO 5.1 Suponga que el esquimal está empujando el mismo trineo de 50 kg a través del terreno a nivel con una fuerza de 50.0 N . **a)** Si aplica $4.00 \times 10^2 \text{ J}$ de trabajo en el trineo mientras se ejerce la fuerza de manera horizontal, ¿a lo largo de qué distancia debe empujarlo? **b)** Si ejerce la misma fuerza en un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, y el trineo se traslada desde el inicio hasta el final de la misma distancia, ¿cuánto trabajo realiza sobre el trineo?

RESPUESTA a) 8.00 m b) 283 J



El borde de una hoja de afeitarse ve uniforme a simple vista, pero bajo un microscopio se comprueba que tiene abundantes irregularidades.

Trabajo y fuerzas disipativas

El *trabajo producido por fricción* es en extremo importante en la vida diaria, ya que es imposible llevar a cabo casi cualquier otra clase de trabajo sin él. Así, el esquimal en el último ejemplo, depende de la fricción de la superficie para jalar su trineo. De otra manera, la cuerda se deslizaría de sus manos y no ejercería fuerza alguna sobre el trineo; si se resbala, él caerá completamente sobre su cara. Los automóviles no funcionarían sin fricción, las bandas no podrían transportar, incluso ni nuestro tejido muscular.

El trabajo que se lleva a cabo al empujar o jalar un objeto es la aplicación de una fuerza simple. La fricción, por otro lado, es un proceso complejo ocasionado por numerosas interacciones microscópicas sobre el área completa de la superficie en contacto. Considere un bloque de metal que se desliza sobre una superficie de metal. “Dientes” microscópicos en el bloque encuentran por igual irregularidades microscópicas en la superficie subyacente. Presionando entre sí, los dientes se deforman, se calientan y se sueldan a la superficie opuesta. Se debe realizar trabajo rompiendo estos enlaces temporales, y esto viene en el gasto de la energía de movimiento del bloque, que se explicará en la siguiente sección. La energía que pierde el bloque lo calienta y a su entorno, con alguna energía convertida en sonido.

La fuerza de fricción de dos objetos en contacto y en movimiento relativo entre sí siempre disipa energía en estas formas relativamente complejas. Para nuestro propósito, la frase “trabajo realizado por fricción” indicará el efecto de estos procesos sólo en energía mecánica.

■ EJEMPLO 5.2 Más transporte por trineo

OBJETIVO Calcular el trabajo que se realiza por fricción cuando un objeto se guía por una fuerza aplicada.

PROBLEMA Suponga que en el ejemplo 5.1 el coeficiente de fricción cinética entre el trineo con una carga de 50.0 kg y la nieve es 0.200. a) Una vez más el esquimal jala 5.00 m el trineo, ejerciendo una fuerza de 1.20×10^2 N con un ángulo de 0° . Determine el trabajo realizado por fricción sobre el trineo y el trabajo neto. b) Reproduzca los cálculos si la fuerza aplicada se ejerce en un ángulo de 30.0° con la horizontal.

ESTRATEGIA Véase la figura 5.6. El trabajo por fricción depende de la magnitud del coeficiente de fricción cinética, la fuerza normal y el desplazamiento. Utilice la componente y de la segunda ley de Newton para determinar la fuerza normal \vec{n} , calcule el trabajo por fricción que se lleva a cabo utilizando la definición y súmelo con el resultado del ejemplo 5.1a) para obtener el trabajo neto sobre el trineo. De la misma manera se resuelve el inciso b), pero la fuerza normal es más pequeña ya que ésta tiene la ayuda de la fuerza aplicada \vec{F}_{ap} soportando la carga.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el trabajo realizado por fricción sobre el trineo y el trabajo neto si la fuerza aplicada es horizontal.

Primero, determine la fuerza normal a partir de la componente y de la segunda ley de Newton, que sólo incluye la fuerza normal y la fuerza de gravedad:

Use la fuerza normal para calcular el trabajo realizado por fricción:

Sume el trabajo de fricción con el trabajo realizado por la fuerza aplicada del ejemplo 5.1, para obtener el trabajo neto (las fuerzas normal y de gravedad son perpendiculares al desplazamiento, así que no contribuyen):

$$\sum F_y = n - mg = 0 \rightarrow n = mg$$

$$\begin{aligned} W_{\text{fric}} &= -f_k \Delta x = -\mu_k n \Delta x = -\mu_k mg \Delta x \\ &= -(0.200)(50.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ m}) \\ &= -4.90 \times 10^2 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{neto}} &= W_{\text{ap}} + W_{\text{fric}} + W_n + W_g \\ &= 6.00 \times 10^2 \text{ J} + (-4.90 \times 10^2 \text{ J}) + 0 + 0 \\ &= 1.10 \times 10^2 \text{ J} \end{aligned}$$

b) Vuelva a calcular el trabajo de fricción y el trabajo neto si la fuerza aplicada se ejerce en un ángulo de 30.0°.

Halle la fuerza normal de la componente y de la segunda ley de Newton:

Utilice la fuerza normal para calcular el trabajo realizado por fricción:

Sume esta respuesta con el resultado del ejemplo 5.1b) para obtener el trabajo neto (una vez más, las fuerzas normal y de gravedad no contribuyen):

$$\begin{aligned} \sum F_y &= n - mg + F_{ap} \text{ sen } \theta = 0 \\ n &= mg - F_{ap} \text{ sen } \theta \\ W_{fric} &= -f_k \Delta x = -\mu_k n \Delta x = -\mu_k (mg - F_{ap} \text{ sen } \theta) \Delta x \\ &= -(0.200)(50.0 \text{ kg} \cdot 9.80 \text{ m/s}^2 \\ &\quad - 1.20 \times 10^2 \text{ N sen } 30.0^\circ)(5.00 \text{ m}) \\ W_{fric} &= -4.30 \times 10^2 \text{ J} \\ W_{neto} &= W_{app} + W_{fric} + W_n + W_g \\ &= 5.20 \times 10^2 \text{ J} - 4.30 \times 10^2 \text{ J} + 0 + 0 = 9.0 \times 10^1 \text{ J} \end{aligned}$$

COMENTARIOS En este caso, lo más importante para destacar es que la fuerza aplicada ejercida en diferentes ángulos puede afectar drásticamente el trabajo realizado sobre el trineo. Jalar en el ángulo óptimo (11.3° en este caso) dará como resultado el mayor trabajo neto para la misma fuerza aplicada.

PREGUNTA 5.2 ¿Cómo cambia el trabajo neto realizado en cada caso si se duplica el desplazamiento?

EJERCICIO 5.2 a) El esquimal empuja el mismo trineo de 50.0 kg sobre la superficie de la tierra con una fuerza de 1.75×10^2 N ejercida horizontalmente, desplazándola una distancia de 6.00 m. Si el trabajo neto realizado sobre el trineo es 1.50×10^2 J, determine el coeficiente de fricción cinética. b) Repita el ejercicio si la fuerza aplicada es ascendente en un ángulo de 45.0° con la horizontal.

RESPUESTA a) 0.306 b) 0.270

5.2 Energía cinética y el teorema trabajo-energía

La solución de problemas utilizando la segunda ley de Newton puede ser difícil si las fuerzas que se incluyen son complejas. Un método alternativo es relacionar la velocidad de un objeto al trabajo neto realizado en él mediante fuerzas externas. Si el trabajo neto puede ser calculado para un desplazamiento determinado, el cambio en la velocidad del objeto es fácil de evaluar.

La figura 5.7 muestra un objeto de masa m que se mueve a la derecha bajo la acción de una fuerza neta constante \vec{F}_{neto} , también dirigida hacia la derecha. Ya que la fuerza es constante, se sabe a partir de la segunda ley de Newton el objeto se traslada con aceleración constante \vec{a} . Si el objeto se desplaza Δx , el trabajo realizado por \vec{F}_{neto} sobre el objeto es

$$W_{neto} = F_{neto} \Delta x = (ma)\Delta x \tag{5.4}$$

En el capítulo 2, se encontró que las siguientes relaciones se cumplen cuando un objeto es sometido a una aceleración constante:

$$v^2 = v_0^2 + 2a\Delta x \quad \text{o} \quad a\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2}$$

Podemos sustituir esta expresión en la ecuación 5.4 para obtener

$$W_{neto} = m \left(\frac{v^2 - v_0^2}{2} \right)$$

o bien

$$W_{neto} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \tag{5.5}$$

De este modo, el trabajo neto realizado sobre un objeto es igual a un cambio en una cantidad de la forma $\frac{1}{2}mv^2$. Debido a que este término lleva unidades de energía e incluye la velocidad del objeto, puede interpretarse como energía asociada con el movimiento del objeto, que conduce a la definición que sigue:

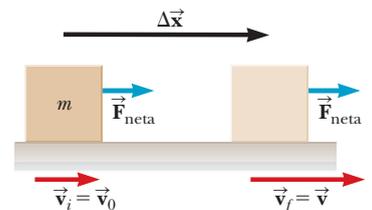


Figura 5.7 Un objeto se somete a un desplazamiento y un cambio de velocidad bajo la acción de una fuerza neta constante \vec{F}_{neto} .

Energía cinética ►

La **energía cinética** EC de un objeto de masa m en movimiento con velocidad v es

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 \quad [5.6]$$

Unidad SI: joule (J) = $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$

Como el trabajo, la energía cinética es una cantidad escalar. Utilizando esta definición en la ecuación 5.5, se llega a un resultado importante conocido como el **teorema trabajo-energía**:

Teorema trabajo-energía ►

El trabajo neto realizado sobre un objeto es igual al cambio en la energía cinética:

$$W_{\text{neto}} = EC_f - EC_i = \Delta EC \quad [5.7]$$

donde el cambio en la energía cinética es debido por completo al cambio en la rapidez del objeto.

Es necesaria la condición en la rapidez debido a que el trabajo que deforma o provoca que el objeto se caliente invalida la ecuación 5.7, aunque en la mayoría de los acontecimientos siga siendo aproximadamente correcta. A partir de esa ecuación, un trabajo neto positivo W_{neto} significa que la energía cinética final EC_f es mayor que la energía cinética inicial EC_i . Esto, en su momento, significa que la velocidad final del objeto es mayor que su velocidad inicial. De esta manera el trabajo neto positivo incrementa la velocidad de un objeto, y el trabajo neto negativo disminuye su velocidad.

Además, se puede cambiar la ecuación 5.7 y pensar en la energía cinética como el trabajo que un objeto en movimiento puede hacer hasta llegar al reposo. Por ejemplo, considere que un martillo está a punto de golpear un clavo, como en la figura 5.8. El movimiento del martillo tiene energía cinética y debido a eso puede hacer trabajo sobre el clavo. El trabajo realizado sobre el clavo es $F\Delta x$, donde F es la fuerza neta promedio ejercida sobre el clavo y Δx es la distancia que el clavo penetra dentro del muro. Este trabajo, más cantidades pequeñas de energía transformada en calor y sonido, es igual al cambio en energía cinética del martillo, ΔEC .

Por conveniencia, el teorema trabajo-energía fue deducido bajo el supuesto de que la fuerza neta que actuó en el objeto fue constante. Una deducción más general, que utiliza el cálculo, demostraría que la ecuación 5.7 es válida bajo cualquier circunstancia, que incluye la aplicación de una fuerza variable.



Figura 5.8 El martillo en movimiento tiene energía cinética y puede hacer trabajo sobre el clavo, impulsándolo hacia dentro de la tabla.

■ FÍSICA APLICADA 5.1 Dejando marcas de deslizamiento

Considere un automóvil viajando con una rapidez v y que después de aplicar los frenos se desliza una distancia d . Estime qué distancia se desliza si estuviera viajando con rapidez $2v$ cuando aplica los frenos.

EXPLICACIÓN Por simplicidad suponga que la fuerza de fricción cinética entre el automóvil y la superficie del camino es constante y lo mismo con el doble de velocidad.

A partir del teorema trabajo-energía, la fuerza neta ejercida en el automóvil por el desplazamiento del mismo, $F_{\text{neto}}\Delta x$, es igual en magnitud a su energía cinética inicial, $\frac{1}{2}mv^2$. Cuando la rapidez se duplica, la energía cinética del automóvil se cuadruplica. Por eso, para una cierta fuerza de fricción aplicada, la distancia recorrida debe aumentar cuatro veces cuando la rapidez inicial se duplica, y la distancia que el automóvil se desliza se evalúa para $4d$. ■

■ EJEMPLO 5.3 Análisis de colisiones

OBJETIVO Aplicar el teorema trabajo-energía con una fuerza conocida.

PROBLEMA El conductor de un automóvil de 1.00×10^3 kg viaja de un estado a otro a 35.0 m/s (casi 80.0 mi/h) repentinamente pisa el freno para evitar golpear un segundo vehículo frente a él, que se detuvo debido a un congestionamiento de tránsito (figura 5.9). Después de que los frenos son aplicados, una fuerza de fricción constante de 8.00×10^3 N actúa sobre el automóvil. Omita la resistencia del aire. **a)** ¿A qué distancia mínima deben aplicarse los frenos para evitar una colisión con el otro vehículo? **b)** Si la distancia entre los vehículos inicialmente es sólo de 30.0 m, ¿con qué velocidad se presentaría la colisión?

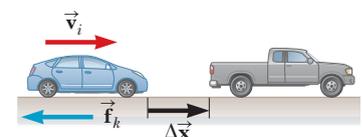


Figura 5.9 (Ejemplo 5.3) Un vehículo aplica los frenos justo antes de un accidente.

ESTRATEGIA Calcule el trabajo neto, que sólo incluye la fricción cinética, ya que las fuerzas normal y de gravedad son perpendiculares al movimiento. Entonces iguale el trabajo neto al cambio en energía cinética. Para obtener la distancia mínima en el inciso a), tome en cuenta la velocidad final v_f de cero precisamente cuando el vehículo frenando alcanza la parte posterior del vehículo en reposo. Resuelva para la incógnita, Δx . Para el inciso b) proceda de la misma manera, excepto que la incógnita es la velocidad final v_f .

SOLUCIÓN

a) Determine la distancia mínima necesaria de frenado.

Aplique el teorema trabajo-energía para el automóvil:

$$W_{\text{neto}} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Sustituya una expresión para el trabajo por fricción y haga $v_f = 0$:

$$-f_k \Delta x = 0 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Sustituya $v_i = 35.0 \text{ m/s}$, $f_k = 8.00 \times 10^3 \text{ N}$ y $m = 1.00 \times 10^3 \text{ kg}$. Resuelva para Δx :

$$-(8.00 \times 10^3 \text{ N}) \Delta x = -\frac{1}{2}(1.00 \times 10^3 \text{ kg})(35.0 \text{ m/s})^2$$

$$\Delta x = 76.6 \text{ m}$$

b) Con la distancia conocida de 30.0 m, el automóvil está muy cerca del otro vehículo; halle la rapidez en el impacto.

Escriba a continuación el teorema trabajo-energía:

$$W_{\text{neto}} = W_{\text{fric}} = -f_k \Delta x = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Multiplique por $2/m$ y reordene términos, resolviendo para la velocidad final v_f :

$$v_f^2 = v_i^2 - \frac{2}{m}f_k \Delta x$$

$$v_f^2 = (35.0 \text{ m/s})^2 - \left(\frac{2}{1.00 \times 10^3 \text{ kg}}\right)(8.00 \times 10^3 \text{ N})(30.0 \text{ m})$$

$$= 745 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$v_f = 27.3 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Este cálculo explica qué tan importante es el estar alerta en la autopista, el tener siempre presente una distancia suficiente para detenerse. Tarda casi un segundo en reaccionar a las luces de freno del automóvil que está al frente. En una autopista de alta velocidad, es posible que su automóvil viaje más de 30 metros antes de que pueda accionar los frenos. Desplazarse de defensa con defensa con tránsito a gran velocidad, como se presenta con frecuencia en las autopistas cerca de las grandes ciudades, es extremadamente inseguro.

PREGUNTA 5.3 De manera cualitativa, ¿cómo cambiaría la respuesta para la velocidad final en el inciso b) si está lloviendo durante el incidente? Explique.

EJERCICIO 5.3 Un policía investigador mide la marca del derrape de llantas de 27 m de longitud en un accidente. Considere una fuerza de fricción y masa del automóvil igual que en el problema anterior, ¿cuál era la velocidad mínima del automóvil cuando se traban los frenos?

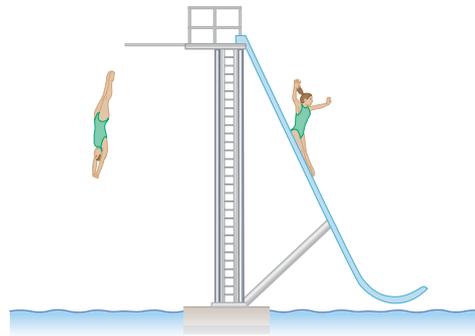
RESPUESTA 20.8 m/s

Fuerzas conservativas y no conservativas

Existen dos tipos generales de fuerzas. A la primera se le conoce como **fuerza conservativa**. Probablemente la gravedad es el mejor ejemplo de una fuerza conservativa. Para comprender el origen de la misma, piense en un clavadista que subió a la parte superior de una plataforma de 10 metros. El clavadista tiene que hacer trabajo contra la gravedad, al escalar. Sin embargo, una vez en la parte superior puede recuperar el trabajo, como energía cinética, al zambullirse. Su velocidad, precisamente antes de entrar en el agua, le dará una energía cinética igual al trabajo que hizo contra la gravedad al escalar hasta la parte superior de la plataforma menos el efecto de algunas fuerzas no conservativas, como la fuerza de arrastre del aire y la fricción muscular interna.

Por lo general, una **fuerza no conservativa** es disipadora, lo que significa que tiende a dispersar aleatoriamente la energía de los cuerpos sobre los que actúa. Esta dispersión de energía con frecuencia toma la forma de calor o sonido. La fricción cinética y la fuerza de resistencia del aire son buenos ejemplos. Fuerzas propulsoras, semejantes a la fuerza ejercida por un motor de reacción en un avión o por una propela en un submarino, también son no conservativas.

Figura 5.10 Debido a que el campo de gravedad es conservativo, la clavadora recupera como energía cinética el trabajo que hizo contra la gravedad al subir la escalera. Considerando el deslizamiento sin fricción, tenemos el mismo resultado.



El trabajo realizado para mover el libro es mayor a lo largo del camino rojizo que por el camino azul.

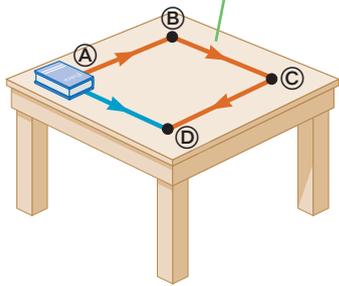


Figura 5.11 Ya que la fricción es una fuerza no conservativa, un libro empujado a lo largo de los tres segmentos A–B, B–C y C–D necesita tres veces más trabajo que empujar el libro directamente desde A hasta D.

El trabajo realizado en contra de una fuerza no conservativa no puede recuperarse fácilmente. Arrastrar objetos sobre una superficie rugosa requiere trabajo. Cuando el esquimal en el ejemplo 5.2 arrastró el trineo a través del terreno que tiene un coeficiente de fricción diferente de cero, el trabajo neto fue menor que en el caso sin fricción. La energía perdida se disipa en calentar el trineo y su entorno. Como se verá en el estudio de la termodinámica, tales pérdidas no pueden evitarse, no toda la energía puede recuperarse, por lo que a estas fuerzas se les conoce como no conservativas.

Otra manera de caracterizar a las fuerzas conservativas y no conservativas es medir el trabajo que lleva a cabo una fuerza sobre un objeto desplazado entre dos puntos a lo largo de diferentes trayectorias. El trabajo realizado por la gravedad sobre alguien que se desliza hacia abajo sin fricción, como en la figura 5.10, es igual al que se lleva a cabo sobre el clavador desde la misma altura. Esta igualdad no se cumple para fuerzas no conservativas. Por ejemplo, desplazar un libro directamente desde el punto A hasta el punto D en la figura 5.11 necesita una cierta cantidad de trabajo contra la fricción, pero deslizar el libro a lo largo de los otros tres lados del cuadrado, desde A hasta B, de B hasta C y, por último, de C hasta D, necesita tres veces más trabajo. Esta observación genera la siguiente definición de una fuerza conservativa:

Fuerza conservativa ►

Una fuerza es conservativa si el trabajo realizado al mover un objeto entre dos puntos es el mismo sin importar qué trayectoria se considere.

Las fuerzas no conservativas, como se ha visto, no tienen esta propiedad. El teorema trabajo-energía, ecuación 5.7, puede ser reescrita en términos del trabajo invertido por fuerzas conservativas W_c y el trabajo gastado por fuerzas no conservativas W_{nc} ya que el trabajo neto es precisamente la suma de éstas dos:

$$W_{nc} + W_c = \Delta EC \quad [5.8]$$

Tenemos que las fuerzas conservativas poseen otra propiedad útil. El trabajo que realizan se puede modificar como algo que se conoce como **energía potencial**, una cantidad que depende sólo de los puntos inicial y final de una curva, no de la trayectoria que sigue.

5.3 Energía potencial gravitacional

Un objeto con energía cinética (energía de movimiento) puede hacer trabajo sobre otro objeto, casi semejante al de un martillo en movimiento para conducir un clavo dentro de un muro. Un ladrillo en lo alto de una repisa también puede hacer trabajo: puede caer de la repisa, acelerar hacia abajo y golpear firmemente un clavo, conduciéndolo hacia dentro de la duela. Se dice que el ladrillo tiene asociada una **energía potencial**, debido a que desde su ubicación sobre la repisa puede hacer potencialmente trabajo.

La energía potencial es una propiedad de un **sistema**, en lugar de un solo objeto, ya que se debe a una posición física en el espacio relativa a un centro de fuerza, como el clavador y la Tierra de la figura 5.10. En este capítulo se define un sistema como un conjunto de objetos que interactúan vía las fuerzas u otros procesos al interior del sistema. Así tenemos que la energía potencial es otra manera de ver cómo se hace trabajo por medio de fuerzas conservativas.

Trabajo gravitacional y energía potencial

Utilizando el teorema trabajo-energía en problemas que implican gravitación requieren el cálculo del trabajo realizado por la gravedad. Para la mayoría de las trayectorias, por ejemplo, para una pelota que recorre un arco parabólico, el determinar el trabajo gravitacional realizado sobre la pelota requiere técnicas complicadas de cálculo. Afortunadamente, para campos conservativos existe una alternativa simple: la energía potencial.

La gravedad es una fuerza conservativa y, para toda fuerza conservativa, se puede encontrar una expresión especial conocida como una función de energía potencial. Al evaluar esa función en dos puntos cualesquiera en una trayectoria del objeto en movimiento y encontrando la diferencia nos dará como resultado el negativo del trabajo realizado por esa fuerza entre los dos puntos. Además, es una ventaja que la energía potencial, similar al trabajo y la energía cinética, sea una cantidad escalar.

La primera etapa es determinar el trabajo realizado por la gravedad sobre un objeto cuando éste se traslada de una posición a otra. El negativo de ese trabajo es el cambio en la energía potencial gravitacional del sistema y, a partir de esa expresión, es posible identificar la función de energía potencial.

En la figura activa 5.12 un libro de masa m cae desde una altura y_i hasta una altura y_f donde la coordenada y positiva representa las posiciones por encima de la superficie del suelo. Se desprecia la fuerza de fricción del aire, de tal modo que la única fuerza que actúa sobre el libro es la de gravedad. ¿Cuánto trabajo se realizó? La magnitud de la fuerza es mg y el del desplazamiento es $\Delta y = y_i - y_f$ (un número positivo), mientras los dos \vec{F} y $\Delta\vec{y}$ están apuntando hacia abajo, de manera que el ángulo entre ellos es cero. Aplicamos la definición de trabajo en la ecuación 5.3, con $d = y_i - y_f$:

$$W_g = Fd \cos \theta = mg(y_i - y_f) \cos 0^\circ = -mg(y_f - y_i) \quad [5.9]$$

La factorización del signo menos fue intencional, para aclarar la conexión con la energía potencial. La ecuación 5.9 del trabajo gravitacional se cumple para cualquier objeto, independientemente de su trayectoria en el espacio, ya que la fuerza gravitacional es conservativa. Ahora, W_g aparecerá como el trabajo realizado por la gravedad en el teorema trabajo-energía. Para el resto de esta sección, considere por simplicidad que estamos tratando sólo con sistemas que incluyen la gravedad y fuerzas no conservativas. Entonces la ecuación 5.8 se puede reescribir como

$$W_{\text{neto}} = W_{nc} + W_g = \Delta EC$$

donde W_{nc} es el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas. Al sustituir la expresión para W_g según la ecuación 5.9, se obtiene

$$W_{nc} - mg(y_f - y_i) = \Delta EC \quad [5.10a]$$

A continuación, sumamos $mg(y_f - y_i)$ en los dos lados:

$$W_{nc} = \Delta EC + mg(y_f - y_i) \quad [5.10b]$$

Ahora, por definición, haremos la conexión entre trabajo gravitacional y energía potencial gravitacional.

La energía potencial gravitacional de un sistema que consiste en la Tierra y un objeto de masa m cerca de la superficie terrestre se conoce mediante

$$EP_{nc} \equiv mgy \quad [5.11]$$

donde g es la aceleración de la gravedad y y es la posición vertical de la masa relativa a la superficie de la Tierra (o algún otro punto de referencia).

Unidad SI: joule (J)

En esta definición, $y = 0$ corresponde a la superficie de la Tierra, pero esto no es estrictamente necesario, como se explica en la siguiente subsección. Así tenemos que sólo importan las *diferencias* en la energía potencial.

Por esto, la energía potencial gravitacional asociada con un objeto ubicado cerca de la superficie terrestre es el peso del objeto mg por su posición vertical y sobre de la Tierra.

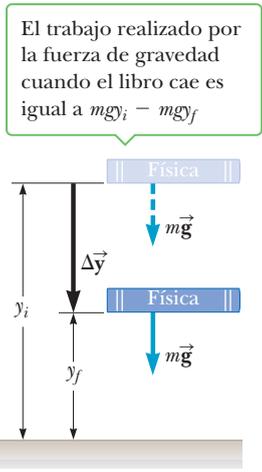


Figura activa 5.12
Un libro de masa m cae desde una altura y_i a una altura y_f .

◀ Energía potencial gravitacional

De esta *definición*, tenemos la correspondencia entre trabajo gravitacional y energía potencial gravitacional:

$$W_g = -(EP_f - EP_i) = -(mgy_f - mgy_i) \quad [5.12]$$

El trabajo realizado por la gravedad es el mismo que el negativo del cambio en la energía potencial gravitacional.

Por último, sustituyendo la ecuación 5.12 en la ecuación 5.10b se obtiene una extensión del teorema trabajo-energía:

$$W_{nc} = (EC_f - EC_i) + (EP_f - EP_i) \quad [5.13]$$

Esta ecuación nos dice que el trabajo realizado por dos fuerzas no conservativas, W_{nc} , es igual al cambio de la energía cinética más el cambio en la energía potencial gravitacional.

En general la ecuación 5.13 resultará verdadera, incluso cuando estén presentes otras fuerzas conservativas al lado de la gravedad. El trabajo realizado por estas fuerzas conservativas adicionales será modificado otra vez como cambios en la energía potencial y aparecerá en el lado derecho junto con la expresión para la energía potencial gravitacional.

Tip 5.3 Energía potencial toma dos

La energía potencial siempre tiene un sistema de al menos dos objetos interactuando, por ejemplo, la Tierra y una pelota de béisbol a través de la interacción la fuerza gravitacional.

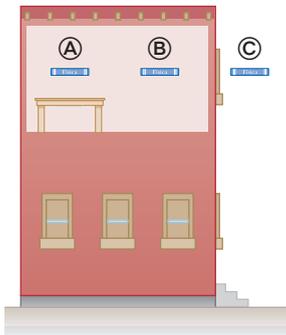


Figura 5.13 Cualquier nivel de referencia, la mesa, el piso de la habitación o la superficie del suelo afuera del edificio, se puede utilizar para representar energía potencial gravitacional de cero en el sistema libro-Tierra.

Niveles de referencia para la energía potencial gravitacional

En la solución de problemas que involucran a la energía potencial gravitacional, es importante optar por un punto de referencia en la cual la energía sea igual a cero. Dada la forma de la ecuación 5.11, ésta es la misma cuando elegimos el lugar donde $y = 0$. La elección es completamente arbitraria ya que la cantidad importante es la *variación de cambio* de energía potencial, y ésta será independiente de la elección del punto de referencia. De cualquier modo, una vez que se decide por esta posición, debe permanecer fija para un problema determinado.

Mientras sea posible siempre elegir la superficie de la Tierra como la posición de referencia para la energía potencial sea cero, el enunciado de un problema por lo general indicará una posición conveniente para utilizarse. Como un ejemplo, sea el caso de un libro con diferentes posiciones posibles, como en la figura 5.13. Cuando el libro está en **A**, un punto de referencia para la energía potencial es la superficie del escritorio. Cuando el libro está en **B**, el piso podría ser un punto de referencia más conveniente. Por último, una ubicación como **C**, donde el libro se mantiene por fuera de una ventana, sugeriría elegir la superficie de la Tierra como el nivel cero de energía potencial. De cualquier modo, la elección no marca diferencia. Cualquiera de los tres niveles de referencia podría utilizarse como nivel cero, independientemente de si el libro está en **A**, **B**, o bien **C**. El ejemplo 5.4 explica este punto importante.

■ EJEMPLO 5.4 Encere sus esquíes

OBJETIVO Calcular el cambio de energía potencial gravitacional para distintos niveles de referencia.

PROBLEMA Una esquiadora de 60.0 kg está en la parte superior de una pendiente, como se muestra en la figura 5.14. En el punto inicial **A**, se encuentra 10.0 m verticalmente arriba del punto **B**. **a)** Fijando en **B** el nivel cero para la energía potencial gravitacional, determine la energía potencial gravitacional de este sistema cuando la esquiadora está en **A** y después en **B**. Por último, determine el cambio de energía potencial del sistema esquiadora-Tierra cuando ella va desde el punto **A** hasta el punto **B**. **b)** Reproduzca este problema con el nivel cero en el punto **A**. **c)** Una vez más vuelva a resolver este problema con el nivel cero 2.00 m más alto que el punto **B**.

ESTRATEGIA Siga la definición y sea precavido con los signos. **A** es el punto inicial, con energía potencial gravitacional EP_i y **B** es el punto final, con energía potencial gravitacional EP_f . La ubicación señalada por $y = 0$ también es el punto cero para la energía potencial, porque $EP = mgy$.

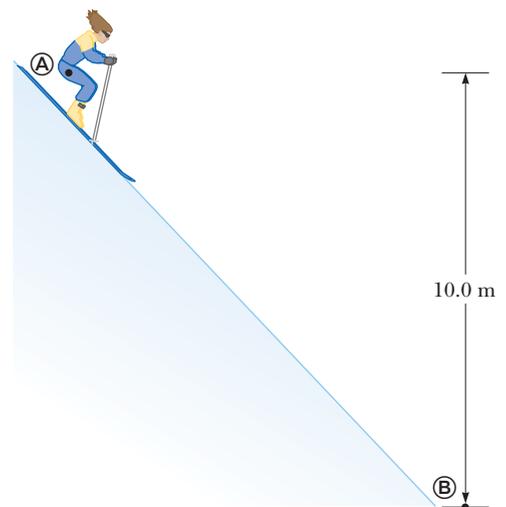


Figura 5.14 (Ejemplo 5.4)

SOLUCIÓN

a) Sea $y = 0$ en \textcircled{B} . Calcule la energía potencial en \textcircled{A} y en \textcircled{B} y calcule el cambio de energía potencial.

Determine EP_i , la energía potencial en \textcircled{A} , con la ecuación 5.10:

$$EP_i = mgy_i = (60.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ m}) = 5.88 \times 10^3 \text{ J}$$

$EP_f = 0$ en \textcircled{B} por selección. Determine la diferencia de energía potencial entre \textcircled{A} y \textcircled{B} :

$$EP_f - EP_i = 0 - 5.88 \times 10^3 \text{ J} = -5.88 \times 10^3 \text{ J}$$

b) Vuelva a hacer el problema si $y = 0$ en \textcircled{A} , el punto de referencia nuevo, de tal modo que $EP = 0$ en \textcircled{A} .

Determine EP_f observando que el punto \textcircled{B} ahora está en $y = -10.0 \text{ m}$:

$$EP_f = mgy_f = (60.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(-10.0 \text{ m}) \\ = -5.88 \times 10^3 \text{ J}$$

$$EP_f - EP_i = -5.88 \times 10^3 \text{ J} - 0 = -5.88 \times 10^3 \text{ J}$$

c) Repita el problema si $y = 0$ dos metros arriba de \textcircled{B} .

Calcule EP_i , la energía potencial en \textcircled{A} :

$$EP_i = mgy_i = (60.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(8.00 \text{ m}) = 4.70 \times 10^3 \text{ J}$$

Determine EP_f , la energía potencial en \textcircled{B} :

$$EP_f = mgy_f = (60.0 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)(-2.00 \text{ m}) \\ = -1.18 \times 10^3 \text{ J}$$

Calcule el cambio de energía potencial:

$$EP_f - EP_i = -1.18 \times 10^3 \text{ J} - 4.70 \times 10^3 \text{ J} \\ = -5.88 \times 10^3 \text{ J}$$

COMENTARIOS Estos cálculos muestran que el cambio en la energía potencial gravitacional, cuando la esquiadora va desde la parte superior de la pendiente hasta la parte inferior, es $-5.88 \times 10^3 \text{ J}$, *independientemente del nivel de referencia elegido*.

PREGUNTA 5.4 Si se aumenta el ángulo de la pendiente, ¿el cambio de energía potencial gravitacional entre las dos alturas a) se incrementa, b) disminuye, c) permanece igual?

EJERCICIO 5.4 Si el nivel cero para la energía potencial gravitacional se elige equidistante hacia abajo de la pendiente, 5.00 m arriba del punto \textcircled{B} , determine la energía potencial inicial, la energía potencial final y el cambio de la energía potencial conforme la esquiadora va desde el punto \textcircled{A} hasta \textcircled{B} en la figura 5.14.

RESPUESTA 2.94 kJ, -2.94 kJ, -5.88 kJ

La gravedad y conservación de energía mecánica

Los principios de conservación desempeñan un papel muy importante en la física. **Cuando una cantidad física se conserva, el valor numérico de la cantidad permanece igual en todo el proceso físico.** Aunque la forma de la cantidad puede cambiar en alguna forma, **su valor final es igual a su valor inicial.**

La energía cinética EC de un objeto que cae sólo bajo la influencia de la gravedad cambia de manera constante, como es la energía potencial gravitacional EP . Por lo tanto, es evidente que estas cantidades no se conservan. No obstante, ya que todas las fuerzas no conservativas se suponen ausentes, se puede asignar $W_{nc} = 0$ en la ecuación 5.13. Reordenando la ecuación, se llega con el siguiente resultado muy interesante:

$$EC_i + EP_i = EC_f + EP_f \quad [5.14]$$

De acuerdo con esta ecuación, **la suma de la energía cinética y la energía potencial gravitacional permanece constante todo el tiempo y, por lo tanto, es una cantidad que se conserva.** Indicamos la energía mecánica total mediante $E = EC + EP$ y señala que **la energía mecánica total se conserva.**

Para mostrar cómo funciona este concepto, piense en arrojar una roca de un acantilado; omita la fuerza de fricción con el aire. Conforme la roca cae, su rapidez aumenta, de tal modo que su energía cinética se incrementa. A medida que la roca se aproxima a la superficie de la Tierra, la energía potencial del sistema roca-Tierra disminuye. A medida que la roca se mueve hacia abajo, se pierde cualquier energía potencial, lo que se manifiesta como energía cinética, y la ecuación 5.14 indica que en ausencia de fuerzas no conservati-

Tip 5.4 Principios de conservación

Existen muchas leyes de conservación parecida a la conservación de energía mecánica en sistemas aislados, como en la ecuación 5.14. Por ejemplo, la cantidad de movimiento lineal, cantidad de movimiento angular y carga eléctrica todas son cantidades que se conservan como se verá más adelante. Las cantidades que se conservan pueden cambiar de forma durante las interacciones físicas, pero la suma total para un sistema nunca cambia.

Conservación de energía ►
mecánica

vas parecida a la de fricción del aire, el trato de la energía es exactamente el mismo. Esto es verdadero para todas las fuerzas conservativas, no precisamente la gravedad.

En cualquier sistema aislado de objetos que interactúan sólo a través de fuerzas conservativas, la energía mecánica total $E = EC + EP$, del sistema, permanece igual en todo momento.

Si la fuerza de gravedad es la *única* fuerza que hace trabajo dentro de un sistema, entonces el principio de conservación de energía mecánica adquiere la forma

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f \quad [5.15]$$

Esta forma de la ecuación es particularmente útil para resolver problemas que sólo involucran a la gravedad. Términos nuevos tienen que adicionarse cuando se presenten otras fuerzas conservativas, como se verá en breve. La forma de la ecuación es en particular útil para resolver problemas que involucran explícitamente sólo una masa y gravedad. En ese caso especial, que a menudo se presenta, observe que la masa se anula de la ecuación. Sin embargo, ello es posible sólo porque cualquier cambio en la energía cinética de la Tierra en respuesta al campo gravitacional del objeto de masa m ha sido (adecuadamente) pasado por alto. En general, debe haber términos de la energía cinética para cada objeto en el sistema y términos de energía potencial gravitacional para cada par de objetos. Se deben sumar términos adicionales cuando otras fuerzas conservativas están presentes, como veremos más adelante.

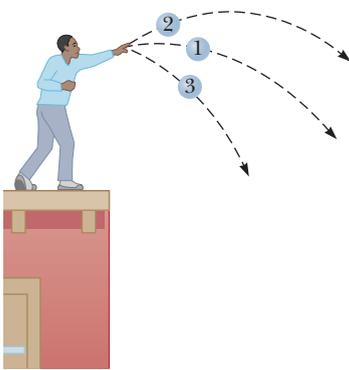


Figura activa 5.15
(Examen rápido 5.2) Tres pelotas idénticas se lanzan con la misma velocidad inicial desde la parte superior de un edificio.

■ Examen rápido

5.2 Tres pelotas idénticas son lanzadas desde la parte superior de un edificio, todas con la misma velocidad inicial. La primera pelota se lanza horizontalmente; la segunda, en algún ángulo arriba de la horizontal, y la tercera, en algún ángulo por debajo de la horizontal, como en la figura activa 5.15. Omitiendo la resistencia del aire, clasifique las magnitudes de velocidad de las pelotas cuando llegan a la superficie del suelo, desde la más rápida hasta la más lenta. a) 1, 2, 3. b) 2, 1, 3. c) 3, 1, 2. d) Las tres pelotas golpean la superficie del suelo con la misma rapidez.

5.3 Roberto, de masa m , se deja caer desde la rama de un árbol al mismo tiempo que Emma, también de masa m , inicia su descenso deslizándose sin fricción hacia abajo. Si ambos inician en la misma altura por encima del nivel del suelo, acerca de sus energías cinéticas, ¿cuál de lo siguiente es verdadero cuando alcanzan el ras del suelo?

- La energía cinética de Roberto es mayor que la de Emma.
- La energía cinética de Emma es mayor que la de Roberto.
- Tienen la misma energía cinética.
- La respuesta depende de la forma del deslizamiento.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Aplicación de la conservación de energía mecánica

Considere las etapas que siguen cuando se aplica la conservación de energía mecánica a problemas que incluyen la gravedad:

- Defina el sistema**, incluya todos los cuerpos que interactúan. Verifique la ausencia de fuerzas no conservativas.
- Elija una posición para $y = 0$** , el punto de referencia para la energía potencial gravitacional.
- Seleccione el cuerpo de interés e identifique dos puntos**, un punto donde conozca información y el otro donde quiera hallar algo acerca del cuerpo de interés.
- A continuación, escriba la ecuación de conservación de energía**, ecuación 5.15, para el sistema. **Identifique la cantidad desconocida** de interés.
- Resuelva para la cantidad desconocida**, que habitualmente es una velocidad o una posición y sustituya los valores conocidos.

Como se estableció anteriormente, por lo general es mejor hacer el álgebra con símbolos, en lugar de sustituir primero números, ya que es fácil verificar los símbolos debido a posibles errores. La excepción es cuando sin duda una cantidad es cero, en cuyo caso la sustitución inmediata simplifica considerablemente el álgebra resultante.

■ EJEMPLO 5.5 Clavadista

OBJETIVO Utilizar la conservación de energía para calcular la velocidad de un cuerpo que cae directamente en presencia de la gravedad.

PROBLEMA Un clavadista de masa m se deja caer desde un trampolín 10.0 m arriba de la superficie del agua, como se muestra en la figura 5.16. Desprecie la resistencia del aire. **a)** Utilice la conservación de energía mecánica para determinar su velocidad 5.00 m sobre de la superficie del agua. **b)** Determine su velocidad cuando golpea el agua.

ESTRATEGIA Refiérase a la estrategia para la solución de problemas. Etapa 1: el sistema está constituido por el clavadista y la Tierra. Conforme el clavadista cae, sólo actúa la fuerza de gravedad sobre él (despreciando la resistencia del aire), de tal manera que la energía mecánica del sistema se conserva, y se puede utilizar la conservación de la energía para los dos incisos a) y b). Etapa 2: decidimos $y = 0$ para la superficie del agua. Etapa 3: en el inciso a), $y = 10.0$ m y $y = 5.00$ m son los puntos de interés; mientras que en el inciso b), son de interés $y = 10.0$ m y $y = 0$ m.

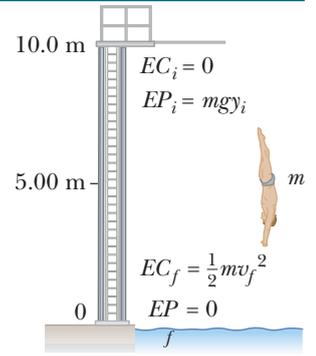


Figura 5.16 (Ejemplo 5.5) El cero de energía potencial gravitacional se toma en la superficie del agua.

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad del clavadista a la mitad del camino hacia abajo, en $y = 5.00$ m.

Etapa 4: escribimos la ecuación de conservación de energía y se sustituyen los términos apropiados:

$$EC_i + EP_i = EC_f + EP_f$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f$$

Etapa 5: sustituya $v_i = 0$, cancele la masa y resuelva para v_f :

$$0 + gy_i = \frac{1}{2}v_f^2 + gy_f$$

$$v_f = \sqrt{2g(y_i - y_f)} = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ m} - 5.00 \text{ m})}$$

$$v_f = 9.90 \text{ m/s}$$

b) Encuentre la velocidad del clavadista en la superficie del agua, $y = 0$.

Utilice el mismo procedimiento que en el inciso a); considere $y_f = 0$:

$$0 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + 0$$

$$v_f = \sqrt{2gy_i} = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ m})} = 14.0 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Observe que la velocidad a la mitad del camino no es la mitad de la velocidad final. Otro punto interesante es que la respuesta final no depende de la masa. Eso es realmente una consecuencia de dejar de lado el cambio en la energía cinética de la Tierra, el cual es válido cuando la masa del objeto, en este caso el clavadista, es mucho menor que la masa de la Tierra. En realidad, la Tierra también “cae” hacia el clavadista, lo que reduce la velocidad final, pero la reducción es tan pequeña que no se puede medir.

PREGUNTA 5.5 Cualitativamente, ¿cómo cambian las respuestas si el clavadista se sumerge corriendo hacia el final del trampolín?

EJERCICIO 5.5 Suponga que el clavadista salta del trampolín, con una velocidad inicial de 3.50 m/s hacia arriba. Use la conservación de energía para encontrar su velocidad cuando golpea el agua.

RESPUESTA 14.4 m/s

■ EJEMPLO 5.6 El salto de un insecto

OBJETIVO Utilizar la conservación de la energía mecánica y los conceptos de balística en dos dimensiones para calcular una velocidad.

PROBLEMA Un poderoso saltamontes se impulsa a sí mismo con un ángulo de 45° por encima de la horizontal y se eleva hasta su máxima altura de 1.00 m durante el salto. (Véase la figura 5.17.) ¿Con qué velocidad v_i dejó el piso? Desprecie la resistencia del aire.

ESTRATEGIA Este problema puede resolverse con la conservación de energía y la relación entre la velocidad inicial y su componente x . Separado del origen, el otro punto de interés es la altura máxima $y = 1.00$ m, donde el saltamontes tiene una velocidad v_x sólo en la dirección x . En este caso la conservación de energía proporciona una ecuación con dos incógnitas: la velocidad inicial v_i y la velocidad en la altura máxima, v_x . Sin embargo, debido a que no existen fuerzas en la dirección x , v_x es la misma que la componente x de la velocidad inicial.

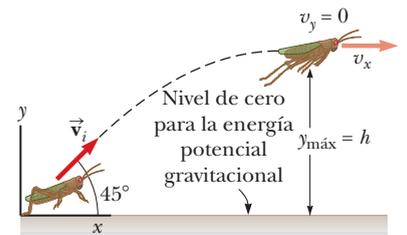


Figura 5.17 (Ejemplo 5.6)

(continúa)

SOLUCIÓN

Utilice la conservación de la energía:

Sustituya $y_i = 0$, $v_f = v_x$ y $y_f = h$:

Multiplique cada lado por $2/m$, para obtener una ecuación y dos incógnitas:

Elimine v_x mediante la sustitución de $v_x = v_i \cos 45^\circ$ en la ecuación (1), resolviendo para v_i y sustituyendo los valores conocidos:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = \frac{1}{2}mv_x^2 + mgh$$

$$(1) \quad v_i^2 = v_x^2 + 2gh$$

$$v_i^2 = (v_i \cos 45^\circ)^2 + 2gh = \frac{1}{2}v_i^2 + 2gh$$

$$v_i = 2\sqrt{gh} = 2\sqrt{(9.80 \text{ m/s}^2)(1.00 \text{ m})} = 6.26 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS De modo sorprendente, la respuesta final es un valor alto, lo que explica qué tan fuerte es el insecto con respecto a su tamaño.

PREGUNTA 5.6 Considerando que las otras cantidades conocidas permanecen igual, ¿cómo cambiaría la respuesta si el ángulo inicial fuera más pequeño? ¿Por qué?

EJERCICIO 5.6 Una catapulta lanza una roca en un ángulo de 30.0° con respecto a la horizontal. Determine la altura máxima alcanzada si la rapidez de la roca en su punto más alto es 30.0 m/s .

RESPUESTA 15.3 m

Tip 5.5 ¡No utilice trabajo realizado por la fuerza de gravedad y la energía potencial gravitacional!

La energía potencial gravitacional es sólo otra manera de incluir el trabajo realizado por la fuerza de gravedad en el teorema trabajo-energía. ¡No utilice a las dos en la ecuación al mismo tiempo o las contará dos veces!

La gravedad y las fuerzas no conservativas

Cuando se incluyen fuerzas no conservativas junto con la gravitación, se debe utilizar el teorema trabajo-energía completo, habitualmente con técnicas del capítulo 4. Resolver problemas requiere el procedimiento básico de la estrategia para la solución de problemas para los problemas de conservación de la energía de la sección anterior. La única diferencia se encuentra en sustituir la ecuación 5.13, la ecuación trabajo-energía con energía potencial, para la ecuación 5.15.

■ EJEMPLO 5.7

¡Der Stuka!

OBJETIVO Utilizar el teorema trabajo-energía con la energía potencial gravitacional para calcular el trabajo realizado por una fuerza no conservativa.

PROBLEMA El deslizamiento con agua es casi sin fricción, por esto puede proporcionar a estudiantes aburridos emociones de alta velocidad (figura 5.18). En tal tobogán, Der Stuka, nombrado así por el aterrador avión de bombardeo en picada alemán de la Segunda Guerra Mundial, está a 72 pies de altura (21.9 m), se localiza en Six Flags en Dallas, Texas, y en Wet'n Wild en Orlando, Florida. **a)** Determine la rapidez de una mujer de 60.0 kg en la parte inferior de tal caída, suponiendo que ninguna fricción está presente. **b)** Si la velocidad de la mujer es de 18.0 m/s en la parte inferior del tobogán, encuentre el trabajo realizado suponiendo que no hay fricción sobre la mujer.

ESTRATEGIA El sistema está compuesto por la mujer, la Tierra y el tobogán. La fuerza normal, siempre perpendicular al desplazamiento, no opera. Denomine como $y = 0 \text{ m}$ a la parte inferior del tobogán. Los dos puntos de interés son $y = 0 \text{ m}$ y $y = 21.9 \text{ m}$. Sin fricción, $W_{nc} = 0$, y se puede aplicar la conservación de energía mecánica, ecuación 5.15. Para el inciso b), se utiliza la ecuación 5.13, se sustituyen las dos velocidades, las alturas, y se resuelve para W_{nc} .



Wet'n Wild Orlando

Figura 5.18 (Ejemplo 5.7) Si el tobogán es sin fricción, la rapidez de la mujer en la parte inferior depende sólo de la altura del tobogán, no de la trayectoria que sigue.

SOLUCIÓN

a) Determine la rapidez de la mujer en la parte inferior del tobogán, suponiendo que no existe fricción.

Escriba a continuación la ecuación 5.15, para la conservación de energía:

Sustituya los valores $v_i = 0$ y $v_f = 0$:

Resuelva para v_f y sustituya los valores para g y y_i :

b) Determine el trabajo realizado sobre la mujer por fricción si $v_f = 18.0 \text{ m/s} < 20.7 \text{ m/s}$.

Escriba la ecuación 5.13, sustituyendo las expresiones para las energías cinética y potencial:

Sustituya $m = 60.0 \text{ kg}$, $v_f = 18.0 \text{ m/s}$ y $v_i = 0$, y resuelva para W_{nc} :

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f$$

$$0 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + 0$$

$$v_f = \sqrt{2gy_i} = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(21.9 \text{ m})} = 20.7 \text{ m/s}$$

$$W_{nc} = (EC_f - EC_i) + (EP_f - EP_i) = (\frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2) + (mgy_f - mgy_i)$$

$$W_{nc} = [\frac{1}{2} \cdot 60.0 \text{ kg} \cdot (18.0 \text{ m/s})^2 - 0] + [0 - 60.0 \text{ kg} \cdot (9.80 \text{ m/s}^2) \cdot 21.9 \text{ m}]$$

$$W_{nc} = -3.16 \times 10^3 \text{ J}$$

COMENTARIOS La rapidez hallada en el inciso a) es la misma que si la mujer cayera verticalmente a lo largo de una distancia de 21.9 m, lo que es consistente con nuestra suposición en el examen rápido 5.3. El resultado del inciso b) es negativo debido a que el sistema pierde energía mecánica. La fricción transforma parte de la energía mecánica en energía térmica y ondas mecánicas, absorbidas en parte por el sistema y en parte por el entorno.

PREGUNTA 5.7 Si el tobogán no tuviera fricción, ¿la forma del tobogán afectaría la respuesta final? Explique.

EJERCICIO 5.7 Suponga que un tobogán semejante al Der Stuka es de 35.0 m de alto, con una inclinación de 45.0° con respecto a la horizontal. a) Encuentre la rapidez de una mujer de 60.0 kg en la parte inferior del tobogán; suponga que no hay fricción. b) Si la mujer tiene una rapidez de 20.0 m/s en la parte inferior, encuentre el cambio de energía mecánica debido a la fricción y c) la magnitud de la fuerza de fricción, supuesta como constante.

RESPUESTAS a) 26.2 m/s b) $-8.58 \times 10^3 \text{ J}$ c) 173 N

EJEMPLO 5.8 A las pendientes

OBJETIVO Asociar la conservación de energía mecánica con el teorema trabajo-energía que incluye fricción sobre una superficie horizontal.

PROBLEMA Un esquiador inicia desde el reposo en la parte superior de un plano inclinado de 20.0 m de alto, como se muestra en la figura 5.19. En la parte inferior del plano, el esquiador encuentra una superficie horizontal donde el coeficiente de fricción cinética entre los esquís y la nieve es 0.210. a) Determine la rapidez del esquiador en la parte inferior. b) ¿Qué distancia recorre el esquiador sobre la superficie horizontal antes de llegar al reposo? Omita la resistencia del aire.

ESTRATEGIA Físicamente no es muy diferente ir hacia abajo por el plano inclinado sin fricción que ir hacia abajo por el tobogán de los ejemplos anteriores, por lo que se maneja de la misma manera utilizando la conservación de energía mecánica para encontrar la velocidad v_{B} en la parte inferior. En el plano inclinado, la superficie es rugosa, utilice el teorema trabajo-energía, la ecuación 5.13, con $W_{nc} = W_{\text{fricc}} = -f_k d$, donde f_k es la magnitud de la fuerza de fricción y d es la distancia recorrida sobre la superficie horizontal antes de llegar al reposo.

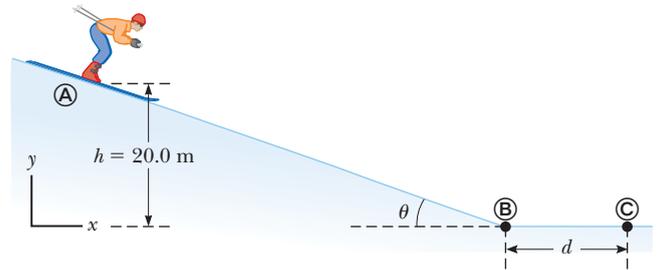


Figura 5.19 (Ejemplo 5.8) El esquiador se desliza hacia abajo de la pendiente y sobre una superficie a nivel, deteniéndose después de recorrer una distancia d desde la parte inferior de la colina.

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad del esquiador en la parte inferior.

Siga el procedimiento que se aplica en el inciso a) del ejemplo anterior cuando el esquiador se traslada desde la parte superior, punto A, hasta la parte inferior, punto B:

$$v_{\text{B}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(20.0 \text{ m})} = 19.8 \text{ m/s}$$

(continúa)

b) Encuentre la distancia recorrida sobre la superficie horizontal rugosa.

Aplique el teorema-trabajo energía conforme el esquiador se desliza desde \textcircled{B} hasta \textcircled{C} :

Sustituya $v_{\textcircled{C}} = 0$ y $f_k = \mu_k n = \mu_k mg$:

Resuelva para d :

$$W_{\text{neto}} = -f_k d = \Delta EC = \frac{1}{2} m v_{\textcircled{C}}^2 - \frac{1}{2} m v_{\textcircled{B}}^2$$

$$-\mu_k mg d = -\frac{1}{2} m v_{\textcircled{B}}^2$$

$$d = \frac{v_{\textcircled{B}}^2}{2\mu_k g} = \frac{(19.8 \text{ m/s})^2}{2(0.210)(9.80 \text{ m/s}^2)} = 95.2 \text{ m}$$

COMENTARIOS Sustituyendo las expresiones simbólicas $v_{\textcircled{B}} = \sqrt{2gh}$ en la ecuación para la distancia d muestra que d es linealmente proporcional a h : duplicando la altura se duplica la distancia recorrida.

PREGUNTA 5.8 Proporcione dos explicaciones del porqué los esquiadores típicamente adquieren una posición agachada cuando se dirigen hacia abajo de la pendiente.

EJERCICIO 5.8 Calcule la distancia horizontal que el esquiador recorre antes de llegar al reposo si además el plano inclinado tiene un coeficiente de fricción cinética igual a 0.210. Suponga que $\theta = 20.0^\circ$.

RESPUESTA 40.3 m

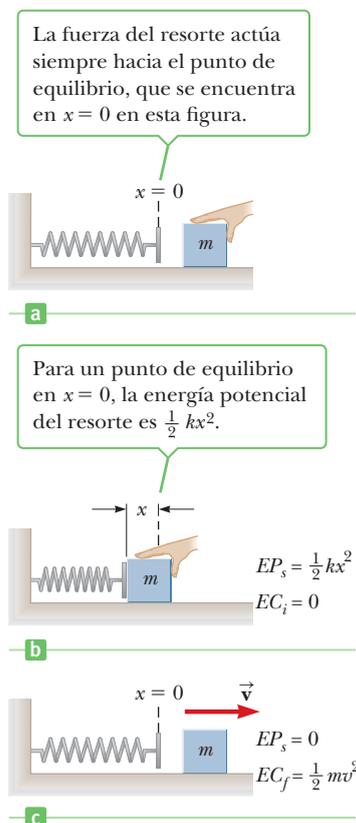


Figura activa 5.20 a) Un resorte en equilibrio, ni comprimido ni estirado. b) Un bloque de masa m sobre una superficie sin fricción es empujado contra el resorte. c) Cuando se libera el bloque esta energía se transfiere al bloque en la forma de energía cinética.

5.4 Energía potencial elástica

Los resortes son elementos importantes en la tecnología moderna. Se encuentran en máquinas de toda clase, en relojes, juguetes, automóviles y trenes. En este caso se introducirán los resortes; después se estudiarán en más detalle en el capítulo 13.

El trabajo realizado por una fuerza aplicada al estirar o comprimir un resorte puede ser recuperado al retirar la fuerza aplicada, como la gravedad, la fuerza del resorte es conservativa. Esto significa que se puede determinar una función de energía potencial y utilizarla en el teorema trabajo-energía.

La figura activa 5.20a muestra un resorte en su posición de equilibrio, donde el resorte no está comprimido ni estirado. Al empujar un bloque contra el resorte como en la figura activa 5.20b se comprime una distancia x . Aunque x parece ser simplemente una coordenada, para los resortes esto además representa un desplazamiento desde la posición de equilibrio, que para nuestros propósitos siempre será considerada como $x = 0$. Experimentalmente, tenemos que para duplicar un desplazamiento determinado se necesita duplicar la fuerza, mientras que triplicarlo requiere triplicar la fuerza. Esto significa que la fuerza ejercida por el resorte, F_r , debe ser proporcional al desplazamiento x , o bien

$$F_r = -kx \quad [5.16]$$

donde k es la constante de proporcionalidad, la *constante del resorte*, la cual se expresa en unidades de newtons por metro. La ecuación 5.16 se conoce como **ley de Hooke**, en honor a sir Robert Hooke, quien descubrió la relación. Habitualmente a la fuerza F_r se le conoce como *fuerza de restitución* debido a que el resorte siempre ejerce una fuerza en una dirección opuesta al desplazamiento de su extremo, tendiente a restituir todo lo que está unido al resorte a su posición original. Para valores positivos de x , la fuerza es negativa, apuntando de regreso hacia la posición de equilibrio en $x = 0$, y para x negativa, la fuerza es positiva, una vez más apuntado hacia $x = 0$. Para un resorte flexible, k es un número pequeño (aproximadamente 100 N/m), mientras que para un resorte rígido k es muy grande (aproximadamente 10000 N/m). El valor de la constante del resorte k se determina a partir de cómo se formó el resorte, la composición del material y el espesor del mismo. El signo menos asegura que la fuerza del resorte siempre está dirigida de regreso hacia el punto de equilibrio.

Como en el caso de la gravedad, una energía potencial, conocida como la **energía potencial elástica**, puede ser asociada con la fuerza del resorte. La energía potencial elástica

es otra manera de ver cómo se realiza el trabajo mediante un resorte durante el movimiento ya que éste es igual al negativo del trabajo realizado por el resorte. Además, se puede considerar que la energía almacenada se origina a causa del trabajo realizado al comprimir o estirar el resorte.

Considere un resorte horizontal y la masa m en la posición de equilibrio. Determinamos el trabajo realizado por el resorte cuando es comprimido por una fuerza aplicada desde el equilibrio hasta un desplazamiento x , como en la figura activa 5.20b. La fuerza del resorte apunta en la dirección opuesta al movimiento, de tal modo que se espera que el trabajo sea negativo. Cuando se estudia la fuerza constante de la gravedad cerca de la superficie de la Tierra, encontramos el trabajo realizado sobre un objeto al multiplicar la fuerza gravitacional por el desplazamiento vertical del objeto. Sin embargo, este procedimiento no puede ser aplicado con una fuerza variable. En lugar de eso, se aplica la fuerza promedio, \bar{F} :

$$\bar{F} = \frac{F_0 + F_1}{2} = \frac{0 - kx}{2} = -\frac{kx}{2}$$

Así que el trabajo *realizado por la fuerza del resorte* es

$$W_r = \bar{F}x = -\frac{1}{2}kx^2$$

En general, cuando se estira o se comprime el resorte desde x_i hasta x_f , el trabajo realizado por el resorte es

$$W_r = -\left(\frac{1}{2}kx_f^2 - \frac{1}{2}kx_i^2\right)$$

El trabajo realizado por el resorte puede ser incluido en el teorema trabajo-energía. Suponga que la ecuación 5.13 ahora incluye el trabajo realizado por el resorte en el lado izquierdo. Entonces esto se lee

$$W_{nc} - \left(\frac{1}{2}kx_f^2 - \frac{1}{2}kx_i^2\right) = \Delta EC + \Delta EP_g$$

donde EP_g es la energía potencial gravitacional. Ahora definimos la energía potencial elástica asociada con la fuerza del resorte, EP_r , mediante

$$EP_r = \frac{1}{2}kx^2 \quad [5.17]$$

Sustituyendo la expresión en la ecuación anterior y reordenando términos tenemos la forma nueva del teorema trabajo-energía, que incluye las energías gravitacional y elástica:

$$W_{nc} = (EC_f - EC_i) + (EP_{gf} - EP_{gi}) + (EP_{rf} - EP_{ri}) \quad [5.18]$$

donde W_{nc} es el trabajo realizado mediante fuerzas no conservativas, EC es la energía cinética, EP_g es la energía potencial gravitacional y EP_r es la energía potencial elástica. EP , utilizada antes para indicar sólo energía potencial gravitacional, en lo sucesivo indicará la energía potencial total de un sistema, que incluye energías potenciales debido a todas las fuerzas conservativas que actúan sobre el sistema.

Es importante recordar que el trabajo que llevan a cabo la gravedad y el resorte en cualquier sistema físico determinado está incluido ya en el lado derecho de la ecuación 5.18 como energía potencial y no se incluye a la izquierda como trabajo.

La figura activa 5.20c muestra cómo se puede recuperar la energía potencial elástica almacenada. Al liberar el bloque, el resorte regresa a su longitud original, y la energía potencial elástica almacenada se convierte en energía cinética del bloque. La energía potencial elástica almacenada en el resorte es cero cuando el resorte está en la posición de equilibrio ($x = 0$). Dada por la ecuación 5.17, la energía potencial también se almacena en el resorte cuando se estira. Además de eso, la energía potencial elástica alcanza un máximo cuando el resorte ha logrado su compresión o extensión máxima. Por último, ya que EP_r es proporcional a x^2 , la energía potencial siempre es positiva cuando el resorte no está en la posición de equilibrio.

En ausencia de fuerzas no conservativas, $W_{nc} = 0$, el lado izquierdo de la ecuación 5.18 es cero y resulta una forma extendida para la conservación de energía mecánica:

$$(EC - EP_g + EP_s)_i = (EC - EP_g + EP_s)_f \quad [5.19]$$

Los problemas que involucran resortes, gravedad y otras fuerzas se manejan exactamente de la misma manera como se explicó en la estrategia para la solución de problemas para la conservación de energía mecánica, excepto que en el problema debe definirse el punto de equilibrio de todo resorte, además del punto cero para la energía potencial gravitacional.

EJEMPLO 5.9 Un resorte horizontal

OBJETIVO Utilizar la conservación de la energía para calcular la velocidad de un bloque en un resorte horizontal con fricción y sin ella.

PROBLEMA Un bloque con 5.00 kg de masa está unido a un resorte horizontal cuya constante es $k = 4.00 \times 10^2 \text{ N/m}$, como se muestra en la figura 5.21. La superficie sobre la que descansa el bloque está libre de fricción. Si se jala el bloque a $x_i = 0.050 \text{ m}$ y se libera, **a)** determine la velocidad del bloque cuando alcanza primero el punto de equilibrio, **b)** determine la velocidad cuando $x = 0.025 \text{ m}$ y **c)** vuelva a resolver el inciso a) si la fricción actúa en el bloque, con coeficiente $\mu_k = 0.150$.

ESTRATEGIA En los incisos a) y b) no existen fuerzas no conservativas, de este modo puede ser aplicada la conservación de energía, ecuación 5.19. En el inciso c) son necesarios la definición de trabajo y el teorema trabajo-energía para tratar con las pérdidas de energía mecánica debido a la fricción.

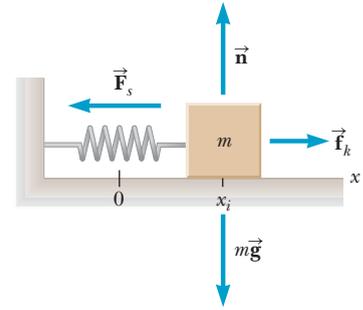


Figura 5.21 (Ejemplo 5.9) Una masa unida a un resorte.

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad del bloque en el punto de equilibrio.

Inicie con la ecuación 5.19:

$$(EC + EP_g + EP_r)_i = (EC + EP_g + EP_r)_f$$

Sustituya expresiones para la energía cinética del bloque y la energía potencial y fijar los términos de gravedad a cero:

$$(1) \quad \frac{1}{2}mv_i^2 + \frac{1}{2}kx_i^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + \frac{1}{2}kx_f^2$$

Sustituya $v_i = 0$, $x_f = 0$ y multiplique por $2/m$:

$$\frac{k}{m} x_i^2 = v_f^2$$

Resuelva para v_f y sustituya los valores conocidos:

$$v_f = \sqrt{\frac{k}{m} x_i} = \sqrt{\frac{4.00 \times 10^2 \text{ N/m}}{5.00 \text{ kg}} (0.050 \text{ m})} = 0.447 \text{ m/s}$$

b) Encuentre la velocidad del bloque en el punto intermedio.

Establezca $v_i = 0$ en la ecuación (1) y multiplique por $2/m$:

$$\frac{k}{m} x_i^2 = v_f^2$$

Resuelva para v_f y sustituya los valores conocidos:

$$v_f = \sqrt{\frac{k}{m} (x_i^2 - x_f^2)} = \sqrt{\frac{4.00 \times 10^2 \text{ N/m}}{5.00 \text{ kg}} [(0.050 \text{ m})^2 - (0.025 \text{ m})^2]} = 0.387 \text{ m/s}$$

c) Repita el inciso a), esta vez con fricción.

Aplique el teorema trabajo-energía. El trabajo realizado por la fuerza de gravedad y la fuerza normal es cero ya que estas fuerzas son perpendiculares al movimiento.

$$W_{\text{fric}} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 + \frac{1}{2}kx_f^2 - \frac{1}{2}kx_i^2$$

Sustituya $v_i = 0$, $x_f = 0$ y $W_{\text{fric}} = -\mu_k n x_i$:

$$-\mu_k n x_i = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} k x_i^2$$

Establezca $n = mg$ y resuelva para v_f :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_f^2 &= \frac{1}{2}kx_i^2 - \mu_k mgx_i \\ v_f &= \sqrt{\frac{k}{m}x_i^2 - 2\mu_k gx_i} \\ v_f &= \sqrt{\frac{4.00 \times 10^2 \text{ N/m}}{5.00 \text{ kg}}(0.05 \text{ m})^2 - 2(0.150)(9.80 \text{ m/s}^2)(0.050 \text{ m})} \\ v_f &= \mathbf{0.230 \text{ m/s}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La fricción o la resistencia debido a la inmersión en un fluido amortigua el movimiento de un objeto unido a un resorte, lo que eventualmente lleva al objeto hasta el reposo.

PREGUNTA 5.9 En el caso de la fricción, ¿qué porcentaje de la energía mecánica se perdió para el momento en que la masa alcanzó el punto de equilibrio? (*Sugerencia:* Utilice las respuestas de los incisos a) y c).)

EJERCICIO 5.9 Suponga que el sistema del resorte en el último ejemplo inicia en $x = 0$ y que al objeto unido se le da un retroceso hacia la derecha, de manera tal que tenga una rapidez inicial de 0.600 m/s. a) ¿Qué distancia desde el origen viaja el objeto antes de llegar al reposo, considerando que no existe fricción en la superficie? b) ¿Cómo cambia la respuesta si el coeficiente de fricción cinética es $\mu_k = 0.150$? (Utilice la fórmula cuadrática.)

RESPUESTAS a) 0.067 1 m b) 0.051 2 m

■ EJEMPLO 5.10 Acróbata de circo

OBJETIVO Utilizar la conservación de energía mecánica para resolver un problema en una dimensión que incluye energía potencial gravitacional y energía potencial elástica.

PROBLEMA Una acróbata de circo de 50.0 kg se deja caer desde una altura de 2.00 m con trayectoria recta hacia abajo sobre un trampolín con una constante de fuerza de $8.00 \times 10^3 \text{ N/m}$, como se muestra en la figura 5.22. ¿Para qué distancia máxima ella comprime el resorte?

ESTRATEGIA Están ausentes fuerzas no conservativas, por eso puede ser aplicada la conservación de energía mecánica. En los dos puntos de interés, la posición inicial de la acróbata y el punto de compresión máxima del resorte, su velocidad es cero, de tal modo que los términos de energía cinética serán cero. Elija $y = 0$ como el punto de máxima compresión, así la energía potencial gravitacional final es cero. Además, esta alternativa significa que la posición inicial de la acróbata es $y_i = h + d$, donde h es la altura inicial de la acróbata sobre la plataforma y d es la compresión máxima del resorte.

SOLUCIÓN

Aplique la conservación de energía mecánica:

Los únicos términos diferentes de cero son la energía potencial gravitacional y la energía potencial final del resorte.

Sustituya las cantidades dadas y reordene la ecuación en la forma cuadrática estándar:

Resuelva con la fórmula cuadrática (ecuación A.8):

$$(1) \quad (EC + EP_g + EP_r)_i = (EC + EP_g + EP_r)_f$$

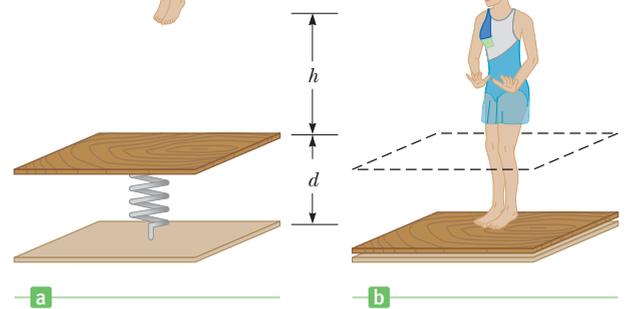
$$\begin{aligned} 0 + mg(h + d) + 0 &= 0 + 0 + \frac{1}{2}kd^2 \\ mg(h + d) &= \frac{1}{2}kd^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (50.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m} + d) &= \frac{1}{2}(8.00 \times 10^3 \text{ N/m})d^2 \\ d^2 - (0.123 \text{ m})d - 0.245 \text{ m}^2 &= 0 \end{aligned}$$

$$d = \mathbf{0.560 \text{ m}}$$



Figura 5.22 (Ejemplo 5.10) Una acróbata se deja caer sobre un trampolín, lo que ocasiona que se comprima.



COMENTARIOS La otra solución, $d = -0.437 \text{ m}$, puede ser rechazada ya que al principio d fue elegida para ser un número positivo. Por ejemplo, un cambio en el centro de masa de la acróbata al ponerse en cuclillas al hacer contacto con el trampo-

(continúa)

lín, afecta la compresión del resorte, pero ese efecto se desprecia. Habitualmente un amortiguador incluye resortes, y este ejemplo explica cómo funcionan. La acción del resorte de un amortiguador cambia un impacto peligroso en una desaceleración uniforme, conforme se convierte la energía cinética a energía potencial elástica.

PREGUNTA 5.10 ¿Es posible que la acróbata rebote hasta una altura mayor que su altura inicial? Si es así, ¿cómo lo hace?

EJERCICIO 5.10 Se deja caer un bloque de 8.00 kg en trayectoria recta hacia abajo desde una altura de 1.00 m y golpea una plataforma con resorte que tiene una constante de fuerza de 1.00×10^3 N/m. Halle la compresión máxima del resorte.

RESPUESTA $d = 0.482$ m

■ EJEMPLO 5.11 Un bloque lanzado hacia arriba sobre un plano inclinado sin fricción

OBJETIVO Utilizar la conservación de energía mecánica para resolver un problema que involucra energía potencial gravitacional, energía potencial elástica y una rampa.

PROBLEMA Un bloque de 0.500 kg reposa sobre una superficie horizontal, sin fricción, como se muestra en la figura 5.23. Se presiona la parte posterior del bloque contra un resorte que tiene una constante $k = 625$ N/m, comprimiendo el resorte en 10.0 cm hasta el punto **A**. Después de liberar el bloque, **a**) determine la distancia máxima d que el bloque recorre hacia arriba sobre el plano inclinado sin fricción si $\theta = 30.0^\circ$. **b**) ¿Qué tan rápido va el bloque a la mitad de su altura máxima?

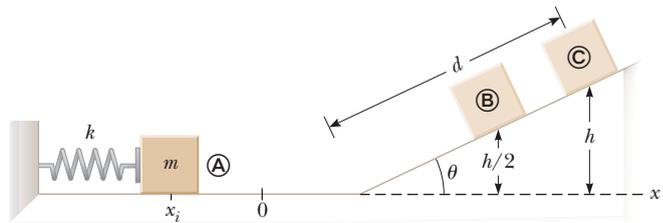


Figura 5.23 (Ejemplo 5.11)

ESTRATEGIA En ausencia de otras fuerzas, aplique la conservación de energía mecánica a los incisos a) y b). En el inciso a), el bloque inicia desde el reposo y además de manera instantánea hasta el reposo en la parte superior de la rampa, por eso las energías cinéticas en **A** y **C** son iguales a cero. Observe que la pregunta que se hace es para una distancia d a lo largo de la rampa, no la altura h . En el inciso b), el sistema tiene las energías cinética y potencial gravitacional en **B**.

SOLUCIÓN

a) Determine la distancia que el bloque recorre hacia arriba sobre la rampa.

Se aplica la conservación de energía mecánica:

Sustituya $v_i = v_f = 0$, $y_i = 0$, $y_f = h = d \sin \theta$ y $x_f = 0$:

Resuelva para la distancia d e inserte los valores conocidos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i + \frac{1}{2}kx_i^2 &= \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f + \frac{1}{2}kx_f^2 \\ \frac{1}{2}kx_i^2 &= mgh = mgd \sin \theta \\ d &= \frac{\frac{1}{2}kx_i^2}{mg \sin \theta} = \frac{\frac{1}{2}(625 \text{ N/m})(-0.100 \text{ m})^2}{(0.500 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \sin (30.0^\circ)} \\ &= \mathbf{1.28 \text{ m}} \end{aligned}$$

b) Determine la velocidad a la mitad de la altura, $h/2$.

Observe que $h = d \sin \theta = (1.28 \text{ m}) \sin 30.0^\circ = 0.640 \text{ m}$.

Una vez más utilice la conservación de energía:

Considere $v_i = 0$, $y_i = 0$, $y_f = \frac{1}{2}h$ y $x_f = 0$, produciendo

Multiplique por $2/m$ y resuelva para v_f :

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i + \frac{1}{2}kx_i^2 &= \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f + \frac{1}{2}kx_f^2 \\ \frac{1}{2}kx_i^2 &= \frac{1}{2}mv_f^2 + mg\left(\frac{1}{2}h\right) \\ \frac{k}{m}x_i^2 &= v_f^2 + gh \\ v_f &= \sqrt{\frac{k}{m}x_i^2 - gh} \\ &= \sqrt{\left(\frac{625 \text{ N/m}}{0.500 \text{ kg}}\right)(-0.100 \text{ m})^2 - (9.80 \text{ m/s}^2)(0.640 \text{ m})} \\ v_f &= \mathbf{2.50 \text{ m/s}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe que no fue necesario calcular la velocidad adquirida al soltar el resorte, sólo fue necesaria la energía mecánica en cada uno de los puntos de interés, donde el bloque estaba en reposo.

PREGUNTA 5.11 En realidad, un resorte continuará vibrando ligeramente después que la masa lo deja. ¿Cómo afectaría esto la respuesta al inciso a) y por qué?

EJERCICIO 5.11 Se dispara un bloque de 1.00 kg horizontalmente desde un resorte, como en el ejemplo anterior y recorre 0.500 m hacia arriba a lo largo de una rampa sin fricción llegando al reposo y deslizándose de regreso hacia abajo. Si la rampa forma un ángulo de 45.0° con respecto a la horizontal y el resorte estaba originalmente comprimido en 0.120 m, halle la constante del resorte.

RESPUESTA 481 N/m

■ FÍSICA APLICADA 5.2 Reconstrucción de un accidente

En ocasiones la gente involucrada en un accidente automovilístico hace demandas exageradas de dolor crónico debido a lesiones sutiles en el cuello o en la columna vertebral. La probabilidad de lesión puede determinarse encontrando el cambio de velocidad de un automóvil durante el accidente. Al cambio más extenso de velocidad, es probable que la persona experimente un daño de columna que resulte en un daño crónico. ¿Qué tan fácil es hacer estimaciones confiables para este cambio en la velocidad después del hecho?

EXPLICACIÓN El metal y el plástico de un automóvil actúan en forma muy parecida a un resorte, absorbiendo la energía cinética al flexionarse durante una colisión. Cuando la magnitud de la diferencia en la velocidad de los dos automóviles está debajo de 5 millas por hora, habitualmente no existe daño visible, debido a que los parachoques están diseñados para absorber el impacto y regresar a su forma

original a velocidades bajas. Con magnitudes de velocidad relativamente altas, existirá daño permanente al vehículo.

A pesar del hecho de que la estructura del automóvil no puede regresar a su forma original, sólo se necesita una cierta fuerza por metro para deformarlo, lo mismo que le toma cierta fuerza por metro comprimir un resorte. Cuanto mayor es la energía cinética original, el automóvil se comprime más, y mayor es el daño. Mediante el uso de la información obtenida de pruebas de choque, es posible obtener constantes elásticas efectivas para diferentes modelos de automóviles y establecer evaluaciones confiables del cambio de velocidad de un determinado vehículo durante un accidente. Investigaciones médicas han establecido la probabilidad de lesión en la columna vertebral para un cierto cambio de velocidad, y se pueden utilizar los cambios de velocidad estimados para ayudar a reducir el fraude a la aseguradora. ■

5.5 Sistemas y conservación de energía

Recuerde que el teorema trabajo-energía se puede reescribir como

$$W_{nc} + W_c = \Delta EC$$

donde W_{nc} representa el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas y W_c es el trabajo realizado por las fuerzas conservativas en un entorno físico conocido. Como hemos visto, todo trabajo realizado por fuerzas conservativas, como las fuerzas elástica y de gravedad, puede ser explicado por cambios de energía potencial. Así que es posible reescribir el teorema trabajo-energía de la siguiente manera:

$$W_{nc} = \Delta EC + \Delta EP = (EC_f - EC_i) + (EP_f - EP_i) \quad [5.20]$$

donde ahora, como se estableció previamente, EP incluye todas las energías potenciales. Esta ecuación es fácil de reordenar como:

$$W_{nc} = (EC_f + EP_f) - (EC_i + EP_i) \quad [5.21]$$

No obstante, recuerde que la energía mecánica total se proporciona mediante $E = EC + EP$. Haciendo esta sustitución en la ecuación 5.21, encontramos que el trabajo llevado a cabo en un sistema por todas las fuerzas conservativas es igual al cambio en la energía mecánica de ese sistema:

$$W_{nc} = E_f - E_i = \Delta E \quad [5.22]$$

Si la energía mecánica está cambiando, ésta tiene que ir a alguna parte. Cualquier energía sale del sistema y entra al entorno, o se establece en el sistema y se convierte en una forma no mecánica como la energía térmica.

Un ejemplo simple es el de un bloque que se desliza a lo largo de una superficie rugosa. La fricción origina energía térmica; una parte es absorbida por el bloque y la otra se

disipa en el medio que lo rodea. Cuando el bloque se calienta, algo que se conoce como *energía interna* incrementa. La energía interna de un sistema se relaciona con su temperatura resultando ésta de la actividad de sus partes, como los átomos móviles de un gas o la vibración de átomos en un sólido. (La energía interna será estudiada en más detalle en el capítulo 10-12.)

La energía puede ser transferida entre un sistema no aislado y su medio. Si se realiza trabajo positivo en el sistema, se transfiere energía desde el entorno hacia el sistema. Si se lleva a cabo trabajo negativo en el sistema, se transfiere energía desde el sistema hacia el medio.

Hasta ahora, se han encontrado tres métodos de almacenamiento de energía en un sistema: energía cinética, energía potencial y energía interna. Por otro lado, sólo se ha visto una manera de transferir energía hacia dentro o hacia fuera de un sistema: a través del trabajo. Otros métodos se estudiarán en capítulos posteriores, pero son resumidos aquí:

- **Trabajo**, en el sentido mecánico de este capítulo, se transfiere energía hacia un sistema desplazándolo a través de la aplicación de una fuerza.
- **Calor** es el proceso de transferencia de energía a través de colisiones microscópicas entre átomos o moléculas. Por ejemplo, una cuchara de metal en reposo dentro de una taza de café llega a calentarse debido a que una parte de la energía cinética de las moléculas en el café líquido se transfiere a la cuchara como energía interna.
- **Ondas mecánicas** transfieren energía creando un disturbio que se propaga a través del aire u otro medio. Por ejemplo, la energía en forma de sonido que deja su sistema estéreo a través de las bocinas y entra a sus oídos para estimular el proceso de audición. Otros ejemplos de ondas mecánicas son las ondas sísmicas y las olas.
- **Transmisión eléctrica** es cuando se transfiere energía a través de la corriente eléctrica. Es como la energía que entra a su sistema estéreo o cualquier otro dispositivo eléctrico.
- **Radiación electromagnética** es cuando se transfiere energía en la forma de ondas electromagnéticas como la luz, las microondas y las ondas de radio. Ejemplos de este método de transferencia incluyen cocinar una papa en un horno de microondas y el viaje de energía luminosa desde el Sol hacia la Tierra a través del espacio.

BIO APLICACIÓN

Movimiento flagelar;
bioluminiscencia

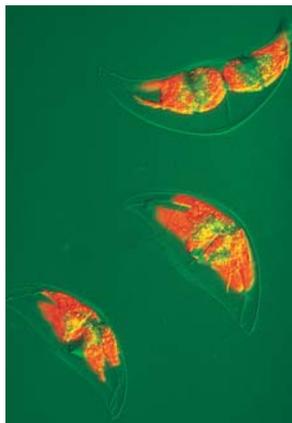


Figura 5.24 Esta pequeña planta, encontrada en aguas meridionales cálidas, exhibe bioluminiscencia, un proceso en el que la energía química se convierte en luz. Las áreas rojas son clorofila y brillan cuando se excitan con luz azul.

Conservación de energía en general

La característica más importante del planteamiento de la energía es la idea de que la energía se conserva; no se puede crear ni destruir, sólo transferir de una forma a otra. Éste es el principio de **conservación de energía**.

El principio de conservación de energía no está restringido a la física. En biología, las transformaciones de energía se llevan a cabo en innumerables maneras dentro de todos los organismos vivos. Un ejemplo es la transformación de energía química a energía mecánica que causa que los flagelos se muevan e impulsen un organismo. Algunas bacterias utilizan energía química para producir luz. (Véase la figura 5.24.) Aunque el mecanismo que produce estas emisiones lumínicas no es bien entendido, con frecuencia las criaturas dependen de esa luz para su existencia. Por ejemplo, ciertos peces tienen sacos llenos con bacterias luminiscentes debajo de sus ojos. La luz emitida atrae criaturas que se convierten en alimento para el pez.

Examen rápido

5.4 Un libro de masa m se proyecta con una rapidez v a lo largo de una superficie horizontal. El libro se desliza hasta que se detiene debido a la fuerza de fricción entre el libro y la superficie. Ahora se inclina la superficie 30° , y se proyecta el libro hacia arriba sobre la superficie con la misma rapidez inicial v . Cuando el libro llega al reposo, ¿cómo se compara la disminución de energía mecánica con aquella cuando el libro resbala sobre la superficie horizontal? a) Es la misma. b) Es mayor en la superficie inclinada. c) Es menor en la superficie inclinada. d) Se necesita más información.

En la ecuación 5.25 la fuerza F y la velocidad v deben ser paralelas, pero pueden cambiar con el tiempo. La unidad SI de la potencia es el joule/segundo (J/s), también conocido como **watt**, en honor a James Watt:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3 \quad [5.26a]$$

La unidad de potencia en el sistema tradicional de Estados Unidos es el caballo de fuerza (hp, del inglés *horse power*), donde

$$1 \text{ hp} \equiv 550 \frac{\text{pies} \cdot \text{libras}}{\text{s}} = 746 \text{ W} \quad [5.26b]$$

Tip 5.6 Watts ¿la diferencia?

No confundir el símbolo para watts W, con el símbolo W para el trabajo. Un watt es una unidad, lo mismo que joules por segundo. Trabajo es un concepto, que lleva unidades de joules.

El caballo de fuerza fue definido primero por Watt, quien necesitaba una unidad de potencia grande para clasificar el rendimiento de energía de su nuevo descubrimiento, la máquina de vapor.

Comúnmente el watt se utiliza en aplicaciones eléctricas, pero también se puede aplicar en otras áreas científicas. Por ejemplo, los motores de autos deportivos europeos se especifican en kilowatts.

En la generación de energía eléctrica, se acostumbra a utilizar el kilowatt-hora como una medida de la energía. Un kilowatt-hora (kWh) es la energía que se transfiere en 1 h con la relación constante de $1 \text{ kW} = 1000 \text{ J/s}$. Por lo tanto,

$$1 \text{ kWh} = (10^3 \text{ W})(3600 \text{ s}) = (10^3 \text{ J/s})(3600 \text{ s}) = 3.60 \times 10^6 \text{ J}$$

Es necesario darse cuenta que un kilowatt-hora es una unidad de energía, *no* de potencia. Cuando paga su recibo de consumo eléctrico, está pagando energía, y esto es porque su recibo menciona un cargo de electricidad de, digamos, aproximadamente 10 centavos/kWh. La cantidad de electricidad utilizada por un aparato doméstico se puede calcular multiplicando su potencia de especificación (por lo general expresada en watts y válida sólo para circuitos eléctricos domésticos normales) por el tiempo de funcionamiento del aparato doméstico. Por ejemplo, un foco eléctrico especificado en 100 W (= 0.100 kW) “consume” $3.6 \times 10^5 \text{ J}$ de energía en una hora.

EJEMPLO 5.12 Potencia entregada por el motor de un elevador

OBJETIVO Aplicar la definición fuerza por velocidad:

PROBLEMA Un elevador de $1.00 \times 10^3 \text{ kg}$ transporta una carga máxima de $8.00 \times 10^2 \text{ kg}$. Una fuerza de fricción constante de $4.00 \times 10^3 \text{ N}$ retarda su movimiento hacia arriba, como se muestra en la figura 5.26. ¿Qué potencia mínima, en kilowatts y caballos de fuerza, debe entregar el motor para levantar el elevador completamente cargado, con una rapidez constante de 3.00 m/s ?

ESTRATEGIA Para resolver este problema, es necesario establecer la fuerza que el motor del elevador debe entregar a través de la fuerza de tensión en el cable, \vec{T} . Sustituyendo esta fuerza junto con la rapidez v dada en $P = Fv$ se obtiene la potencia deseada. La tensión en el cable, T , se puede encontrar con la segunda ley de Newton.

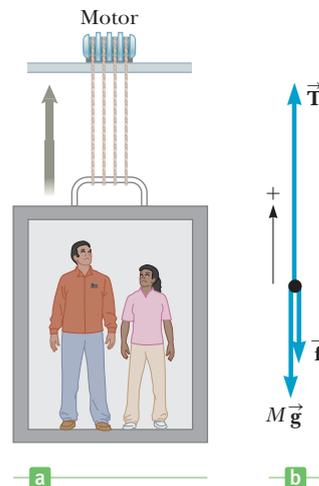


Figura 5.26 (Ejemplo 5.12) a) El motor ejerce una fuerza hacia arriba \vec{T} en el elevador. Una fuerza de fricción \vec{f} y la fuerza de gravedad $M\vec{g}$ que actúan hacia abajo. b) El diagrama de cuerpo libre para el elevador.

SOLUCIÓN

Aplice la segunda ley de Newton al elevador:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

La velocidad es constante, así que la aceleración es cero. Las fuerzas que actúan sobre el elevador son la fuerza de tensión en el cable, \vec{T} , la fricción \vec{f} y la gravedad $M\vec{g}$, donde M es la masa del elevador:

$$\vec{T} + \vec{f} + M\vec{g} = 0$$

Escriba la ecuación en términos de sus componentes:

$$T - f - Mg = 0$$

Resuelva esta ecuación para la tensión T y evalúela:

$$\begin{aligned} T &= f + Mg \\ &= 4.00 \times 10^3 \text{ N} + (1.80 \times 10^3 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ T &= 2.16 \times 10^4 \text{ N} \end{aligned}$$

Sustituya este valor de T por F en la ecuación de potencia:

$$\begin{aligned} P &= Fv = (2.16 \times 10^4 \text{ N})(3.00 \text{ m/s}) = 6.48 \times 10^4 \text{ W} \\ P &= 64.8 \text{ kW} = 86.9 \text{ hp} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La fuerza de fricción actúa para retardar el movimiento, lo que requiere más potencia. Para un elevador en descenso, la fuerza de fricción realmente puede reducir los requerimientos de potencia.

PREGUNTA 5.12 En general, ¿los requerimientos de potencia mínimos de un elevador en ascenso con velocidad constante son a) mayor que, b) menor que, o bien c) igual a los requerimientos de potencia mínima de un elevador descendiendo con velocidad constante?

EJERCICIO 5.12 Considere el mismo elevador con la misma carga descendiendo a 3.00 m/s. ¿Qué potencia mínima se requiere? (En este caso, el motor retira energía del elevador, pero no le permite que caiga libremente.)

RESPUESTA $4.09 \times 10^4 \text{ W} = 54.9 \text{ hp}$

■ EJEMPLO 5.13 Carrera *Shamu* BIO

OBJETIVO Calcular la potencia promedio necesaria para incrementar la energía cinética de un objeto.

PROBLEMA Las ballenas asesinas son conocidas por alcanzar 32 pies de longitud y tener una masa de más de 8000 kg. También son muy rápidas, capaces de acelerar hasta 30 mi/h en cuestión de segundos. Sin hacer caso de la considerable fuerza de arrastre del agua, calcule la potencia promedio que necesitaría una ballena asesina conocida como *Shamu*, con una masa de $8.00 \times 10^3 \text{ kg}$, para alcanzar una rapidez de 12.0 m/s en 6.00 s.

ESTRATEGIA Determine el cambio de energía cinética de *Shamu* y utilice el teorema trabajo-energía para obtener el trabajo mínimo. *Shamu* tiene que producir el resultado de este cambio. (Fuerzas de fricción internas y externas aumentan la cantidad necesaria de energía.) Divida entre el tiempo transcurrido para obtener la potencia promedio.

SOLUCIÓN

Calcule el cambio de energía cinética de *Shamu*. Mediante el teorema trabajo-energía, es igual al trabajo mínimo que *Shamu* debe hacer:

$$\begin{aligned} \Delta EC &= \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot 8.00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot (12.0 \text{ m/s})^2 - 0 \\ &= 5.76 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Divida entre el tiempo transcurrido (ecuación 5.23); observe que $W = \Delta EC$:

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{5.76 \times 10^5 \text{ J}}{6.00 \text{ s}} = 9.60 \times 10^4 \text{ W}$$

COMENTARIOS ¡Esta potencia es suficiente para que funcione un edificio de oficinas de tamaño moderado! Los requerimientos reales son mucho mayores debido a la fricción en el agua y tejidos musculares. Se puede hacer algo parecido con la energía potencial gravitacional, como lo explica el ejercicio.

PREGUNTA 5.13 Si *Shamu* pudiera duplicar su velocidad en el doble de tiempo, ¿con qué factor cambiaría la demanda de potencia promedio?

EJERCICIO 5.13 ¿Qué potencia promedio mínima debe generar una persona de 35 kg para subir las escaleras hasta la parte superior del monumento a Washington? El recorrido hacia arriba es casi como en un edificio de 170 m de alto y tarda 10 minutos. Incluya sólo el trabajo realizado contra la gravedad y desprecie la ineficiencia biológica.

RESPUESTA 97 W

EJEMPLO 5.14 Potencia de una lancha de carreras

OBJETIVO Combinar potencia, el teorema trabajo-energía y fuerzas no conservativas con cinemática en una dimensión.

PROBLEMA a) ¿Qué potencia promedio necesitaría una lancha de carreras de 1.00×10^3 kg para ir desde el reposo hasta 20.0 m/s en 5.00 s, suponiendo que el agua ejerce una fuerza de arrastre constante de magnitud $f_a = 5.00 \times 10^2$ N, y la aceleración es constante? b) Determine una expresión para la potencia instantánea en términos de la fuerza de arrastre f_a , la masa m , aceleración a y tiempo t .

ESTRATEGIA La potencia se proporciona mediante el motor, que origina una fuerza no conservativa. Utilice el teorema trabajo-energía junto con el trabajo realizado por el motor, W_{motor} y el trabajo que hace la fuerza de arrastre, W_{arrastre} , en el lado izquierdo. Utilice la cinemática en una dimensión para encontrar la aceleración y después el desplazamiento Δx . Resuelva el teorema trabajo-energía para W_{motor} y divida entre el tiempo transcurrido para obtener la potencia promedio. Para el inciso b), utilice la segunda ley de Newton para obtener un ejemplo para F_M y después sustituya en la definición de potencia instantánea.

SOLUCIÓN

a) Escriba el teorema trabajo-energía:

$$W_{\text{neto}} = \Delta EC = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$$

Complete los dos términos del trabajo y considere $v_i = 0$:

$$(1) \quad W_{\text{motor}} + W_{\text{arrastre}} = \frac{1}{2}mv_f^2$$

Para obtener el desplazamiento Δx , primero encuentre la aceleración utilizando la ecuación de velocidad de la cinemática:

$$v_f = at + v_i \rightarrow v_f = at$$

$$20.0 \text{ m/s} = a(5.00 \text{ s}) \rightarrow a = 4.00 \text{ m/s}^2$$

Sustituya a en la ecuación de cinemática independiente del tiempo y resuelva para Δx :

$$v_f^2 - v_i^2 = 2a \Delta x$$

$$(20.0 \text{ m/s})^2 - 0^2 = 2(4.00 \text{ m/s}^2) \Delta x$$

$$\Delta x = 50.0 \text{ m}$$

Ahora que conoce Δx , puede hallar la energía mecánica perdida debido a la fuerza de arrastre:

$$W_{\text{arrastre}} = -f_a \Delta x = -(5.00 \times 10^2 \text{ N})(50.0 \text{ m}) = -2.50 \times 10^4 \text{ J}$$

Resuelva la ecuación (1) para W_{motor} :

$$\begin{aligned} W_{\text{motor}} &= \frac{1}{2}mv_f^2 - W_{\text{arrastre}} \\ &= \frac{1}{2}(1.00 \times 10^3 \text{ kg})(20.0 \text{ m/s})^2 - (-2.50 \times 10^4 \text{ J}) \\ W_{\text{motor}} &= 2.25 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Calcule la potencia promedio:

$$\bar{P} = \frac{W_{\text{motor}}}{\Delta t} = \frac{2.25 \times 10^5 \text{ J}}{5.00 \text{ s}} = 4.50 \times 10^4 \text{ W} = 60.3 \text{ hp}$$

b) Establezca una ecuación simbólica para la potencia instantánea.

Utilice la segunda ley de Newton:

$$ma = F_M - f_a$$

Resuelva para la fuerza ejercida por el motor, F_M :

$$F_M = ma + f_a$$

Sustituya la expresión para F_M y $v = at$ en la ecuación 5.25 para obtener la potencia instantánea:

$$P = F_M v = (ma + f_a)(at)$$

$$P = (ma^2 + af_a)t$$

COMENTARIOS En realidad, la fuerza de arrastre por lo general es más grande con el incremento de la rapidez.

PREGUNTA 5.14 ¿Cómo se compara la potencia instantánea al final de 5.00 s con la potencia promedio?

EJERCICIO 5.14 ¿Qué potencia promedio se debe suministrar para empujar un bloque de 5.00 kg desde el reposo hasta 10.0 m/s cuando el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la superficie es 0.250? Suponga que la aceleración es uniforme.

RESPUESTA 111 W

Energía y potencia en un salto vertical **BIO**

El salto de pie consiste en dos partes: extensión y vuelo libre.² En la fase de extensión, la persona salta hacia arriba desde una posición en cuclillas, enderezando la piernas y esti-

² Para más información sobre este tema, véase E. J. Offenberg, *American Journal of Physics*, **38**, 829 (1969).

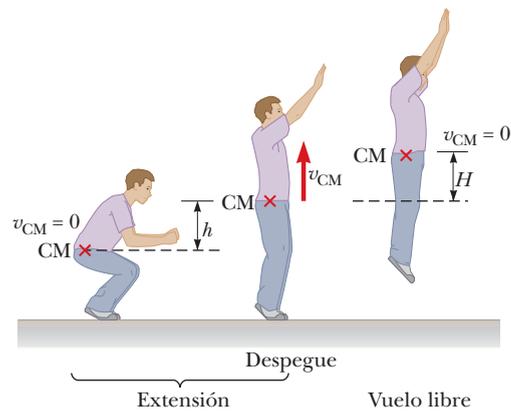


Figura 5.27 Extensión y vuelo libre en el salto vertical.

rando hacia arriba los brazos; la fase de vuelo libre se presenta cuando el saltador deja la superficie del piso. Debido a que el cuerpo es un objeto extendido y las diferentes partes se mueven con magnitudes de velocidad distintas, el movimiento del saltador se describe en términos de la posición y velocidad del **centro de masa (CM)**, que es el punto en el cuerpo en el que es posible considerar que toda la masa está concentrada. La figura 5.27 exhibe la posición y velocidad del CM en las diferentes etapas del salto.

Utilizando el principio de conservación de energía mecánica, se puede encontrar H , el máximo incremento de altura del CM, en términos de la velocidad v_{CM} de despegue de CM. Considerando EP_i la energía potencial gravitacional del sistema saltador-Tierra justo cuando aquel se eleva desde la superficie del piso es cero y observando que la energía cinética EC_f del saltador en el máximo es cero, se tiene

$$EP_i + EC_i = EP_f + EC_f$$

$$\frac{1}{2}mv_{CM}^2 = mgH \quad \text{o bien} \quad H = \frac{v_{CM}^2}{2g}$$

Podemos evaluar v_{CM} al suponer que la aceleración del CM es constante durante la fase de extensión. Si la profundidad del encogimiento es h y el tiempo para la extensión es Δt , encontramos que $v_{CM} = 2\bar{v} = 2h/\Delta t$. Mediciones en un grupo de estudiantes muestra valores representativos de $h = 0.40$ m y $\Delta t = 0.25$ s; el último valor se ajusta por la rapidez fija con la que el músculo se contrae. Al sustituir, obtenemos

$$v_{CM} = 2(0.40 \text{ m})/(0.25 \text{ s}) = 3.2 \text{ m/s}$$

y

$$H = \frac{v_{CM}^2}{2g} = \frac{(3.2 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)} = 0.52 \text{ m}$$

Mediciones en este mismo grupo de estudiantes determinaron que H fue entre 0.45 m y 0.61 m en todos los casos, lo que confirma la validez de nuestro simple cálculo.

Al relacionar los conceptos abstractos de energía, potencia y eficiencia con los seres humanos, es interesante calcular estos valores para el salto vertical. La energía cinética que se le proporciona a un cuerpo en un salto es $EC = \frac{1}{2}mv_{CM}^2$, y para una persona de 68 kg de masa, la energía cinética es

$$EC = \frac{1}{2}(68 \text{ kg})(3.2 \text{ m/s})^2 = 3.5 \times 10^2 \text{ J}$$

Aunque esto puede verse como un gasto considerable de energía, podemos hacer un simple cálculo para demostrar que salto y ejercicio por lo general no son buenas maneras para perder peso, a pesar de sus muchos beneficios para la salud. Ya que los músculos convierten 25% de la energía química en energía cinética (los músculos siempre producen mucha energía interna y energía cinética así como trabajo, esto es porque usted transpira cuando trabaja), utilizan hasta cuatro veces los 350 J (casi 1400 J) de energía química en un salto. Finalmente, esta energía química proviene de los alimentos que ingerimos, con un contenido de energía que se da en unidades de calorías del alimento, y una caloría de alimento es igual a 4200 J. ¡De tal manera que la energía total suministrada por el cuerpo

BIO APLICACIÓN

Dieta frente a ejercicio en programas de pérdida de peso

Tabla 5.1 Rendimiento de potencia máxima de seres humanos en diferentes periodos **BIO**

Potencia	Tiempo
2 hp, o bien 1500 W	6 s
1 hp, o bien 750 W	60 s
0.35 hp, o bien 260 W	35 min
0.2 hp, o bien 150 W	5 h
0.1 hp, o bien 75 W (nivel diario inofensivo)	8 h

como energía interna y energía cinética en un salto vertical es sólo aproximadamente un tercio de una caloría de alimento!

Por último, es interesante calcular la energía mecánica que puede ser generada por el cuerpo en actividades extremas por periodos breves. En este caso encontramos que

$$\bar{P} = \frac{EC}{\Delta t} = \frac{3.5 \times 10^2 \text{ J}}{0.25 \text{ s}} = 1.4 \times 10^3 \text{ W}$$

o (1400 W) (1 hp/746 W) = 1.9 hp. Por eso los seres humanos pueden producir casi 2 hp de energía mecánica por periodos del orden de segundos. La tabla 5.1 muestra el rendimiento de potencia máxima de los seres humanos por periodos diferentes mientras monta en bicicleta y rema, actividades en las que es posible observar rendimientos de potencia con exactitud.

5.7 Trabajo realizado por una fuerza variable

Suponga que un objeto se está desplazando a lo largo del eje x bajo la acción de una fuerza F_x que actúa en la dirección x y varía con la posición, como se muestra en la figura 5.28. El objeto se desplaza en la dirección en que aumenta x desde $x = x_i$ hasta $x = x_f$. En tal situación, no podemos utilizar la ecuación 5.2 para calcular el trabajo realizado por la fuerza ya que sólo se aplica esta correspondencia cuando \vec{F} es constante en magnitud y dirección. Sin embargo, si se piensa que el objeto se somete a un desplazamiento *pequeño* Δx como se muestra en la figura 5.28a, en este caso la componente x de la fuerza en F_x es casi constante en este intervalo, y el trabajo realizado por la fuerza se puede aproximar para este pequeño desplazamiento como

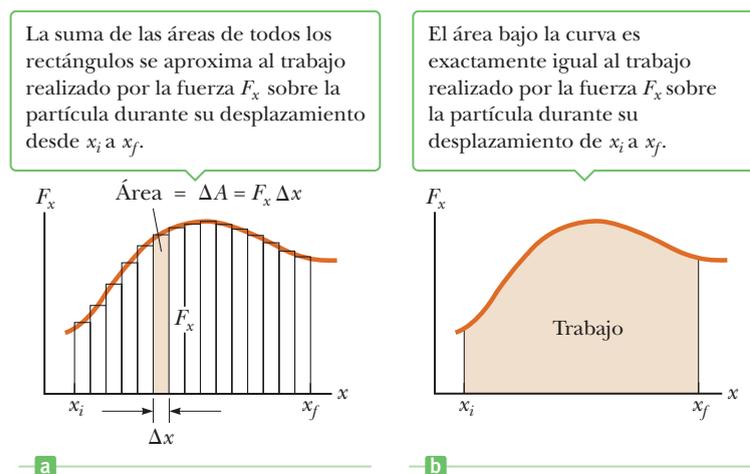
$$W_1 \cong F_x \Delta x \quad [5.27]$$

Esta cantidad es sólo el área del rectángulo sombreado en la figura 5.28a. Si se tiene en mente que la curva de F_x en función de x se divide en un gran número de tales intervalos, entonces el trabajo total realizado por el desplazamiento desde x_i hasta x_f es aproximadamente igual a la suma de las áreas de un gran número de rectángulos pequeños:

$$W_1 \cong F_1 \Delta x_1 + F_2 \Delta x_2 + F_3 \Delta x_3 + \dots \quad [5.28]$$

Ahora imagínese ir a través del mismo proceso con el doble de intervalos, cada mitad del tamaño del original Δx . Entonces los rectángulos tienen anchos muy pequeños y se aproximará mejor el área bajo la curva. Al continuar el proceso de aumentar el número de

Figura 5.28 a) El trabajo realizado por la componente de la fuerza F_x debido a que el desplazamiento pequeño Δx es $F_x \Delta x$, que es igual al área del rectángulo sombreado. b) El ancho Δx de cada rectángulo es cercano a cero.



intervalos mientras se permite que su tamaño se aproxime a cero, el número de términos en la suma crece sin límite, pero el valor de la suma se aproxima a un valor definido igual al área bajo la curva limitada por F_x y el eje x en la figura 5.28b. En otras palabras, **el trabajo realizado por una fuerza variable que actúa en un objeto que se somete a un desplazamiento es igual al área bajo la gráfica de F_x en función de x .**

Un sistema físico común en el que la fuerza varía con la posición consiste en un bloque sobre una superficie horizontal, sin fricción, unido a un resorte, como se explicó en la sección 5.4. Cuando el resorte se estira o se comprime una distancia pequeña x desde su posición de equilibrio $x = 0$, ejerce una fuerza en el bloque que se conoce mediante $F_x = -kx$, donde k es la constante de fuerza del resorte.

Ahora establezca el trabajo que lleva a cabo un agente externo en el bloque cuando el resorte se estira *lentamente* desde $x_i = 0$ hasta $x_f = x_{\text{máx}}$, como en la figura activa 5.29a. Este trabajo se puede calcular con facilidad observando que para cualquier valor del desplazamiento, la tercera ley de Newton menciona que la fuerza aplicada \vec{F}_{ap} es igual en magnitud a la fuerza del resorte \vec{F} y actúa en la dirección opuesta, de modo que $F_{\text{ap}} = -(-kx) = kx$. Una gráfica de F_{ap} en términos de x es una línea recta, como se muestra en la figura activa 5.29b. Así que el trabajo realizado por esta fuerza aplicada al estirar el resorte desde $x = 0$ hasta $x = x_{\text{máx}}$ es el área bajo la línea recta en esa figura, que en este caso es el área del triángulo sombreado:

$$W_{F_{\text{ap}}} = \frac{1}{2} kx_{\text{máx}}^2$$

Durante este mismo tiempo el resorte ha realizado exactamente la misma cantidad de trabajo, pero ese trabajo es negativo, ya que la fuerza del resorte apunta en la dirección opuesta al movimiento. La energía potencial del sistema es exactamente igual al trabajo realizado por la fuerza aplicada y es del mismo signo, lo cual es porque la energía potencial es considerada como trabajo almacenado.

Si el proceso del traslado del bloque se lleva a cabo poco a poco, la fuerza aplicada es de igual magnitud y en dirección opuesta en todo momento a la fuerza del resorte.

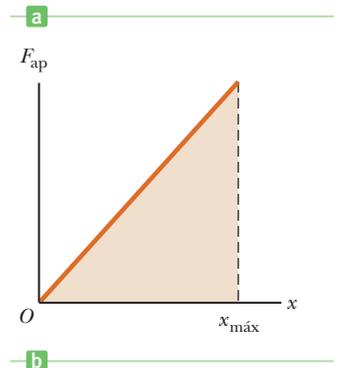
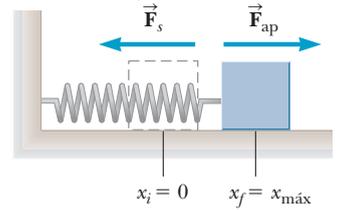


Figura activa 5.29 a) Un bloque que se está jalando desde $x_i = 0$ hasta $x_f = x_{\text{máx}}$ sobre una superficie sin fricción mediante una fuerza \vec{F}_{ap} . b) Una gráfica de F_{ap} en términos de x .

EJEMPLO 5.15 Trabajo necesario para estirar un resorte

OBJETIVO Aplicar el método gráfico para encontrar el trabajo.

PROBLEMA Un extremo de un resorte horizontal ($k = 80.0 \text{ N/m}$) se mantiene fijo mientras es aplicada una fuerza al extremo libre, estirando lentamente desde $x_{\text{A}} = 0$ hasta $x_{\text{B}} = 4.00 \text{ cm}$. **a)** Determine el trabajo realizado por la fuerza aplicada en el resorte. **b)** Determine el trabajo adicional que se hace al estirar el resorte desde $x_{\text{B}} = 4.00 \text{ cm}$ hasta $x_{\text{C}} = 7.00 \text{ cm}$.

ESTRATEGIA Para el inciso a) simplemente calcule el área del triángulo más pequeño en la figura 5.30, utilizando $A = \frac{1}{2}bh$, la mitad de la base por la altura. Para el inciso b), la manera más fácil de encontrar el trabajo adicional realizado desde $x_{\text{B}} = 4.00 \text{ cm}$ hasta $x_{\text{C}} = 7.00 \text{ cm}$ es calcular el área del triángulo más grande y restar el área del triángulo más pequeño.

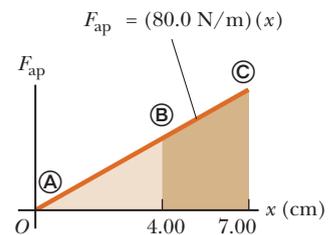


Figura 5.30 (Ejemplo 5.15) Una gráfica de la fuerza externa que se necesita para estirar un resorte que obedece la ley de Hooke en términos de la elongación del resorte.

SOLUCIÓN

a) Determine el trabajo desde $x_{\text{A}} = 0 \text{ cm}$ hasta $x_{\text{B}} = 4.00 \text{ cm}$.

Calcule el área del triángulo más pequeño:

$$W = \frac{1}{2} kx_{\text{B}}^2 = \frac{1}{2}(80.0 \text{ N/m})(0.040 \text{ m})^2 = 0.064 \text{ J}$$

b) Encuentre el trabajo desde $x_{\text{B}} = 4.00 \text{ cm}$ hasta $x_{\text{C}} = 7.00 \text{ cm}$.

Calcule el área del triángulo más grande y reste el área del triángulo más pequeño:

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} kx_{\text{C}}^2 - \frac{1}{2} kx_{\text{B}}^2 \\ W &= \frac{1}{2}(80.0 \text{ N/m})(0.070 \text{ m})^2 - 0.064 \text{ J} \\ &= 0.196 \text{ J} - 0.064 \text{ J} \\ &= 0.132 \text{ J} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Únicamente geometría simple (rectángulos y triángulos) puede resolverse exactamente con este método. Formas más complejas requieren de cálculo o la técnica de conteo de cuadros y se trabaja en el siguiente ejemplo.

PREGUNTA 5.15 Verdadero o Falso: Cuando se estiran resortes, la mitad del desplazamiento requiere la mitad del trabajo.

EJERCICIO 5.15 ¿Cuánto trabajo se necesita para estirar este mismo resorte desde $x_i = 5.00$ cm hasta $x_f = 9.00$ cm?

RESPUESTA 0.224 J

EJEMPLO 5.16 Cálculo del trabajo por conteo de cuadros

OBJETIVO Utilizar el método gráfico y conteo de cuadros para evaluar el trabajo realizado por una fuerza.

PROBLEMA Suponga que la fuerza aplicada para estirar una gruesa pieza de elástico que cambia con la posición como se indica en la figura 5.31a. Calcule el trabajo hecho por la fuerza aplicada.

ESTRATEGIA Para hallar el trabajo, simplemente cuente el número de cuadros bajo la curva y multiplique el número por el área de cada cuadro. La curva pasará por la mitad de algunos cuadros, en cuyo caso sólo se contabiliza una fracción.

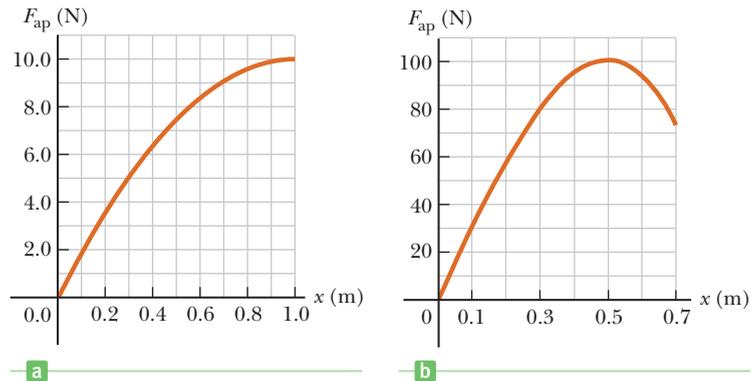


Figura 5.31 a) (Ejemplo 5.16) b) (Ejercicio 5.16)

SOLUCIÓN

Existen 62 cuadros completos o casi completos bajo la curva, seis cuadros que están casi a la mitad debajo de la curva y un área triangular desde $x = 0$ m hasta $x = 0.10$ m que es equivalente a un cuadro para un total de casi 66 cuadros. Ya que el área de cada cuadro es 0.10 J, el trabajo total realizado es casi 66×0.10 J = 6.6 J.

COMENTARIOS Matemáticamente existen otros métodos para hacer tales estimaciones, todas incluyen sumas hasta regiones que aproximen el área. Para obtener un mejor cálculo, los cuadros deberán ser más pequeños.

PREGUNTA 5.16 En el desarrollo de tales estimaciones, ¿es necesario que todos los cuadros tengan la misma longitud y ancho?

EJERCICIO 5.16 Suponga que la fuerza necesaria aplicada para jalar el lazo en la curva que se ve en la figura 5.31b. Determine el trabajo aproximado que se realiza mediante el conteo de cuadros.

RESPUESTA Casi 50 J. (Las respuestas individuales pueden variar.)

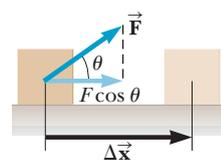
RESUMEN

5.1 Trabajo

El trabajo realizado en un objeto por una fuerza constante es

$$W = (F \cos \theta) d \quad [5.3]$$

donde F es la magnitud de la fuerza, d es el desplazamiento del objeto y θ es el ángulo entre la dirección de la fuerza \vec{F} y el desplazamiento $\Delta\vec{x}$. Resolver problemas simples requiere sustituir valores en la ecuación. Problemas más complejos, como aquellos que involucran fricción, con frecuencia utilizan la segunda ley de Newton, $m\vec{a} = \vec{F}_{\text{neto}}$, para determinar fuerzas.



Una fuerza constante \vec{F} aplicada durante un desplazamiento $\Delta\vec{x}$ realiza un trabajo $(F \cos \theta) \Delta x$.

5.2 Energía cinética y el teorema trabajo-energía

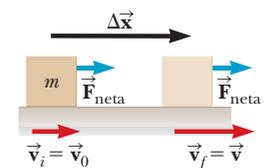
La energía cinética de un cuerpo con masa m y rapidez v se conoce mediante

$$EC \equiv \frac{1}{2}mv^2 \quad [5.6]$$

El teorema trabajo-energía establece que el trabajo neto hecho sobre un objeto de masa m es igual al cambio en su energía cinética, o bien

$$W_{\text{neto}} = EC_f - EC_i = \Delta EC \quad [5.7]$$

Trabajo y energía de cualquier clase lleva unidades de joules. Resolver problemas implica el cálculo del trabajo realizado



El trabajo neto realizado por una fuerza \vec{F}_{net} sobre un objeto, cambia la velocidad del objeto.

por cada fuerza que actúa sobre el objeto y sumarlas, lo cual es W_{neto} , seguido por la sustitución de cantidades conocidas en la ecuación 5.7, resolviendo para la cantidad desconocida.

Las fuerzas conservativas son especiales: el trabajo realizado contra ellas puede ser recuperado: se conserva. Un ejemplo es la gravedad. El trabajo realizado al levantar un objeto hasta cierta altura se almacena eficazmente en el campo de gravedad y puede ser recuperado como la energía cinética del objeto simplemente al dejarlo caer. En las fuerzas no conservativas, como la fricción en una superficie y la de arrastre, la energía se disipa en una forma que no se puede recuperar fácilmente. Para explicar tales fuerzas, el teorema trabajo-energía puede describirse como

$$W_{nc} + W_c = \Delta EC \quad [5.8]$$

donde W_{nc} es el trabajo que se realiza mediante fuerzas no conservativas y W_c es el trabajo que se hace mediante fuerzas conservativas.

5.3 Energía potencial gravitacional

La fuerza gravitacional es un campo conservativo. La energía potencial gravitacional es otra manera de explicar el trabajo gravitacional W_g :

$$\begin{aligned} W_g &= -(EP_f - EP_i) \\ &= -(mgy_f - mgy_i) \end{aligned} \quad [5.12]$$

Para determinar el cambio de energía potencial gravitacional conforme un objeto de masa m se desplaza entre dos puntos en un campo gravitacional, se sustituyen los valores de las coordenadas y del objeto.

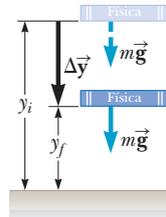
El teorema trabajo-energía se puede generalizar al incluir la energía potencial gravitacional:

$$W_{nc} = (EC_f - EC_i) + (EP_f - EP_i) \quad [5.13]$$

El trabajo gravitacional y la energía potencial gravitacional no aparecen en el teorema trabajo-energía al mismo tiempo, sólo uno o el otro, debido a que son equivalentes. Igualando el trabajo debido a fuerzas no conservativas con cero y sustituyendo las expresiones para EC y EP , se puede obtener una forma de conservación de energía mecánica con la gravitación:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgy_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgy_f \quad [5.15]$$

Para resolver problemas con esta ecuación, identifique dos puntos en el sistema, uno donde se conoce la información



El trabajo realizado por el fuerza de la gravedad cuando el libro cae es igual a $mgy_i - mgy_f$.

y el otro donde se desea conocer la información. Sustituya y resuelva para las cantidades que se desconocen.

El trabajo realizado por otras fuerzas, como cuando están presentes fuerzas de fricción, no siempre es cero. En ese caso, identifique dos puntos como antes, calcule el trabajo debido a las otras fuerzas y resuelva para la incógnita en la ecuación 5.13.

5.4 Energía potencial elástica

La fuerza del resorte es conservativa, y su energía potencial se conoce mediante

$$EP_s \equiv \frac{1}{2}kx^2 \quad [5.17]$$

La energía potencial de un resorte puede colocarse en el teorema trabajo-energía, el que entonces se lee

$$W_{nc} = (EC_f - EC_i) + (EP_{gf} - EP_{gi}) + (EP_{sf} - EP_{si}) \quad [5.18]$$

Cuando están ausentes las fuerzas no conservativas, $W_{nc} = 0$ y la energía mecánica se conserva.

5.5 Sistemas y conservación de energía

El principio de la conservación de energía establece que la energía no puede ser creada o destruida. Ésta puede transformarse, pero el contenido de energía total de cualquier sistema aislado siempre es constante. Lo mismo es verdad para el Universo. El trabajo realizado por todas las fuerzas no conservativas que actúan en un sistema es igual al cambio en la energía mecánica total del sistema:

$$W_{nc} = (EC_f + EP_f) - (EC_i + EP_i) = E_f = E_i \quad [5.21-5.22]$$

donde EP representa todas las energías potenciales presentes.

5.6 Potencia

La potencia promedio es la cantidad de energía transferida dividida entre el tiempo que le toma a la transferencia:

$$\bar{P} = \frac{W}{\Delta t} \quad [5.23]$$

Además esta expresión se puede reescribir

$$\bar{P} = F\bar{v} \quad [5.24]$$

donde \bar{v} es la rapidez promedio del objeto. La unidad de potencia es el watt ($W = J/s$). Para resolver problemas simples, sustituya cantidades conocidas en una de estas ecuaciones. Habitualmente problemas más difíciles necesitan del cálculo del trabajo realizado sobre el objeto, utilizando el teorema trabajo-energía o la definición de trabajo.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un trabajador empuja una carretilla 5.0 m a lo largo de una superficie a nivel, ejerciendo una fuerza horizontal constante de 50.0 N. Si una fuerza de fricción de 43 N actúa en la carretilla con una dirección opuesta a la del trabajador, ¿qué trabajo neto se hace sobre la carretilla? a) 250 J b) 215 J c) 35 J d) 15 J e) 45 J
- ¿Qué potencia mecánica promedio debe ser liberada por los músculos de un escalador de montaña de 70.0 kg quien sube una cumbre de 325 m de altura en 95.0 min? *Nota:* Debido a las deficiencias en la conversión de energía química a energía mecánica la cantidad calculada en este caso es sólo una fracción de la potencia que debe ser

- producida por el cuerpo del escalador. Véase el capítulo 12. a) 39.1 W b) 54.6 W c) 25.5 W d) 67.0 W e) 88.4 W
- Una caja de 40.0 N inicia deslizándose desde el reposo hacia abajo sobre una rampa rugosa de 6.00 m de longitud, inclinada a 30.0° con la horizontal. La magnitud de la fuerza de fricción entre la caja y la rampa es 6.0 N. ¿Cuál es la rapidez de la caja en la parte inferior del plano? a) 1.60 m/s b) 3.32 m/s c) 4.5 m/s d) 6.42 m/s e) 7.75 m/s
 - En un salto un esquiador sale a 15.0 m/s con un ángulo θ . ¿Con qué velocidad está viajando en su altura máxima de 4.50 m sobre el nivel del extremo del salto? (Omita la fricción del aire.) a) 11.7 m/s b) 16.3 m/s c) 12.2 m/s d) 8.55 m/s e) 17.4 m/s
 - El trabajo necesario para acelerar un objeto sobre una superficie sin fricción desde una rapidez v hasta $2v$ es a) igual al trabajo requerido para acelerar el objeto desde $v = 0$ hasta v , b) dos veces el trabajo requerido en acelerar el objeto desde $v = 0$ hasta v , c) tres veces el trabajo requerido para acelerar el objeto desde $v = 0$ hasta v , d) cuatro veces el trabajo requerido para acelerar el objeto desde $2v$ hasta $3v$, o bien e) no se puede saber sin el conocimiento de la aceleración.
 - Al sostener una honda con el brazo extendido, tira de la banda elástica ligera hacia atrás hasta su barbilla y la suelta para lanzar horizontalmente una piedra con una velocidad de 200 cm/s. Con el mismo procedimiento, se lanza un frijol con una velocidad de 600 cm/s. ¿Cuál es la relación de la masa del frijol a la masa de la piedra? a) 1/9 b) 1/3 c) 1 d) 3 e) 9
 - Jorge y David están cargando bloques de cemento idénticos en la camioneta de David. Jorge levanta su bloque verticalmente desde la superficie del piso hasta la camioneta, mientras que David desliza su bloque sobre rodillos sin fricción ni masa, hacia arriba por una rampa. ¿Cuál enunciado es verdadero? a) Jorge hace más trabajo que David. b) Jorge y David hacen la misma cantidad de trabajo. c) David hace más trabajo que Jorge. d) Ninguno de estos enunciados necesariamente es verdadero ya que se desconoce el ángulo de inclinación. e) Ninguno de estos enunciados necesariamente es verdadero porque no se proporciona la masa en ningún bloque.
 - Si se duplica la rapidez de una partícula, ¿qué le sucede a su energía cinética? a) Será cuatro veces más grande. b) Será dos veces más grande. c) Será $\sqrt{2}$ veces más grande. d) No cambia. e) Será la mitad.
 - Cierta camioneta tiene dos veces la masa de un automóvil. Ambos se mueven con la misma rapidez. Si la energía cinética de la camioneta es K , ¿cuál es la energía cinética del automóvil? a) $K/4$ b) $K/2$ c) $0.71K$ d) K e) $2K$
 - Una atleta salta verticalmente sobre un trampolín dejando la superficie con una velocidad de 8.5 m/s hacia arriba. ¿Qué altura máxima alcanza? a) 13 m b) 2.3 m c) 3.7 m d) 0.27 m e) No se pueden establecer las respuestas debido a que no se proporciona la masa de la atleta.
 - Si el trabajo neto realizado en una partícula es cero, ¿cuál de los siguientes enunciados debe ser verdadero? a) La velocidad es cero. b) La velocidad está disminuyendo. c) La velocidad no cambia. d) La velocidad no cambia. e) Es necesaria más información.
 - Un bloque de masa m se deja caer desde el cuarto piso de un edificio de oficinas y posteriormente golpea la banqueta con una rapidez v . ¿Desde qué piso se deja caer la masa para duplicar la rapidez de impacto? a) el sexto piso b) el octavo piso c) el décimo piso d) el décimo segundo piso e) el décimo sexto piso
 - Un automóvil acelera de manera uniforme desde el reposo. ¿Cuándo requiere la máxima energía? a) cuando el auto primero acelera a partir del reposo b) el momento en que alcanza su máxima rapidez c) cuando el automóvil alcanza la mitad de su rapidez máxima. d) La pregunta es engañosa a causa de que la energía que se necesita es constante. e) Se requiere más información.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Piense en una lucha con cuerda como en la figura P5.1, en la que dos grupos jalen de una cuerda y están en igual-



Figura PC5.1

- dad de modo que ningún movimiento toma lugar. ¿Se hace trabajo en la cuerda? ¿En los competidores? ¿Sobre la superficie del piso? ¿Se realiza trabajo en algo?
- BIO** Durante una prueba de esfuerzo de un sistema cardiovascular, un paciente camina y corre sobre una caminadora. a) La energía gastada por el paciente es equivalente a la energía al caminar y correr sobre la superficie de la tierra? Explique. b) ¿Qué efecto tiene, si existe alguno, la caminadora inclinándola hacia arriba? Analice.
 - a) Si la elevación de una pista de patinaje se mantiene constante, ¿la longitud de la pista o si tiene protuberancias harán una diferencia en la rapidez final del niño que juega en ella? Suponga que la pista es lo suficientemente lisa para considerarse sin fricción. b) Repita el inciso a), suponiendo fricción en la pista.

4. a) ¿La energía cinética puede ser negativa? b) ¿La energía potencial gravitacional de un sistema puede ser negativa? Explique.
5. Los caminos que van montaña arriba se forman en zigzag, con los caminos entrelazados de un lado a otro a lo largo de la superficie de la pendiente en tal forma que existe sólo un ascenso gradual en cualquier parte del camino. ¿Con esta configuración un automóvil necesita hacer menos trabajo para subir la montaña, comparado con un recorrido en un camino recto hacia arriba de la pendiente? ¿Por qué se utilizan las vías en zigzag?
6. Una bola de boliche se cuelga desde el techo de una sala de lectura con una cuerda firme. Se retira la bola desde su posición de equilibrio y se libera desde el reposo en la punta de la nariz de la demostradora, como se muestra en la figura PC5.6. a) Si la demostradora permanece quieta, explique por qué la bola no la golpea en su regreso de la oscilación. ¿Esta demostradora estaría segura si a la bola le fuera dado un empujón desde la posición inicial en su nariz?
7. Cuando un péndulo simple oscila de un lado a otro, las fuerzas que actúan en el objeto suspendido son la fuerza de gravedad, la tensión en la cuerda de soporte y la resistencia del aire. a) ¿Cuál de estas fuerzas, si existe alguna, no hace trabajo en el péndulo? b) ¿Cuál de estas fuerzas realiza trabajo negativo todo el tiempo durante el movimiento del péndulo? c) Describa el trabajo que se hace por la fuerza de gravedad mientras el péndulo está oscilando.
8. Analice si se realiza algún trabajo por cada uno de los agentes que siguen y, de ser así, si el trabajo es positivo o negativo: a) un pollo rasca la superficie de la tierra, b) una persona estudiando, c) una grúa levanta una cubeta de concreto, d) la fuerza de gravedad en la cubeta del inciso c), e) los músculos de las piernas de una persona en el acto de sentarse.
9. Cuando un jugador patea el balón, ¿hace algo de trabajo en el balón mientras el dedo de su pie está en contacto con él? ¿Está haciendo algo de trabajo en la pelota después de que pierde contacto con su dedo? ¿Algunas fuerzas están haciendo trabajo en la pelota mientras está en vuelo?
10. El conductor de un automóvil aplica los frenos para evitar una colisión con los ciervos que cruzan la autopista.

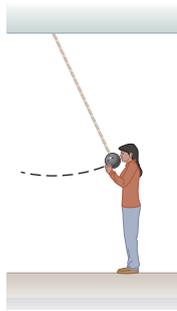


Figura PC5.6

¿Qué le sucede a la energía cinética del automóvil conforme llega al reposo?

11. Se conecta una pesa a un resorte que está suspendido verticalmente del techo. Si la pesa se desplaza hacia abajo desde su posición de equilibrio y se libera, oscilará hacia arriba y hacia abajo. a) Si se omite la resistencia del aire, ¿se conservará la energía mecánica total del sistema (la pesa más Tierra más resorte)? b) ¿Cuántas formas de energía potencial existen para esta situación?
12. En la mayor parte de las situaciones encontradas en este capítulo, las fuerzas de fricción tienden a reducir la energía cinética de un objeto. Sin embargo, algunas veces las fuerzas de fricción incrementan la energía cinética de un objeto. Describa algunas situaciones en que la fricción origina un incremento en la energía cinética.
13. Suponga que está regresando libros a su estante en una biblioteca. Levanta un libro desde el piso hasta la parte superior del estante. La energía cinética del libro sobre el piso fue cero, y la energía cinética del mismo en la parte superior del estante es cero, de tal manera que no existe cambio de energía cinética. A pesar de que hizo trabajo al levantar el libro. ¿Deja de cumplirse el teorema de trabajo-energía?
14. Los pies de una persona de masa m en posición vertical ejercen una fuerza igual a mg sobre el piso, y éste ejerce una fuerza igual y opuesta hacia arriba sobre los pies, que se llama la fuerza normal. Durante la fuerza de extensión de un salto vertical (véase la página 151), los pies ejercen una fuerza sobre el piso que es mayor que mg , de tal modo que la fuerza normal es mayor que mg . Como aprendió en el capítulo 4, se puede utilizar este resultado y la segunda ley de Newton para calcular la aceleración del saltador:

$$a = F_{\text{neta}}/m = (n - mg)/m.$$
 Aplicando ideas de energía, se sabe que el trabajo se realiza en el saltador al proporcionarle energía cinética. Pero en este caso la fuerza normal no puede realizar trabajo alguno a causa de que los pies no experimentan desplazamiento alguno. ¿Cómo se transfiere la energía al saltador?
15. Un satélite terrestre está en órbita circular con una altitud de 500 km. Explique por qué el trabajo realizado por la fuerza gravitacional que actúa en el satélite es cero. Aplicando el teorema trabajo-energía, ¿qué puede decir acerca de la velocidad del satélite?

PROBLEMAS

ENHANCED **WebAssign** Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

5.1 Trabajo

1. Un levantador de pesas levanta un conjunto de pesas de 350 N desde el nivel del suelo hasta una posición sobre su cabeza, una distancia vertical de 2.00 m. ¿Cuánto trabajo hace el levantador de pesas, suponiendo que mueve las pesas con rapidez constante?
2. En 1990 Walter Arfeuille de Bélgica levantó un objeto de 281.5 kg a lo largo de una distancia de 17.1 cm utilizando sólo sus dientes. a) ¿Cuánto trabajo hizo Arfeuille sobre el objeto? b) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza que ejerce sobre el objeto durante el levantamiento, considerando que es constante?
3. El número récord de levantamiento de botes, que incluye la lancha y 10 miembros de su tripulación, fue lograda por Sami Heinonen y Juha Räsänen de Suecia en el 2000. Levantaron una masa total de 653.2 kg aproximadamente 4 pulg del suelo un total de 24 veces. Evalúe el trabajo mecánico total llevado a cabo por los dos hombres al levantar 24 veces el bote, considere que aplicaron la misma fuerza al bote durante cada elevación. (Desprecie cualquier trabajo que pudieron haber realizado al permitir que el barco cayera al suelo.)
4. **CIC** Una clienta en un supermercado empuja un carro con una fuerza de 35 N dirigida en un ángulo de 25° por debajo de la horizontal. La fuerza sólo es suficiente para cubrir diferentes fuerzas de fricción, de tal modo que se traslade el carro con rapidez constante. a) Determine el trabajo realizado por la clienta cuando se traslada 50.0 m a lo largo del pasillo. b) ¿Cuál es el *trabajo neto* realizado en el carro? ¿Por qué? c) La clienta va al pasillo que sigue, empujando horizontalmente y manteniendo la misma rapidez que antes. Si el trabajo hecho por la fuerza de fricción no cambia, ¿la fuerza aplicada por la clienta sería más grande, más pequeña, o es la misma? ¿Qué hay acerca del trabajo realizado sobre el carro por la clienta?
5. **CIC** Partiendo del reposo, un bloque de 5.00 kg se desliza 2.50 m hacia abajo sobre un plano rugoso inclinado 30.0° . El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y el plano es $\mu_k = 0.436$. Determine a) el trabajo realizado por la fuerza de gravedad, b) el trabajo realizado por fricción entre el bloque y el plano inclinado y c) el trabajo realizado por la fuerza normal. d) Cualitativamente, ¿cómo cambiarían las respuestas si se utiliza una rampa corta en un ángulo muy pronunciado para atravesar las mismas alturas verticales?
6. Se aplica una fuerza horizontal de 150 N para empujar una caja de 40.0 kg una distancia de 6.00 m sobre una superficie horizontal rugosa. Si la caja se traslada con rapidez constante, determine a) el trabajo que invierte la fuerza de 150 N y b) el coeficiente de fricción cinética entre la caja y la superficie.
7. Un trineo cargado con ladrillos tiene una masa total de 18.0 kg y se jala con velocidad constante mediante una cuerda inclinada 20.0° arriba de la horizontal. El trineo se traslada una distancia de 20.0 m sobre una superficie horizontal. El coeficiente de fricción cinética entre el trineo y la superficie es 0.500. a) ¿Cuál es la tensión en la

cuerda? b) ¿Cuánto trabajo es realizado por la cuerda en el trineo? c) ¿Cuál es la energía mecánica perdida a causa de la fuerza de fricción?

8. **M** Un bloque de masa $m = 2.50$ kg se empuja una distancia $d = 2.20$ m a lo largo de una mesa horizontal sin fricción mediante una fuerza constante $F = 16.0$ N dirigida en un ángulo $\theta = 25.0^\circ$ debajo de la horizontal como se muestra en la figura P5.8. Establezca el trabajo realizado por a) la fuerza aplicada, b) la fuerza normal ejercida por la mesa, c) la fuerza de gravedad y d) la fuerza neta en el bloque.

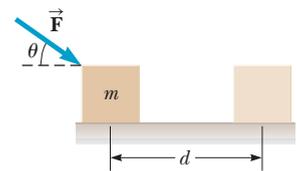


Figura P5.8

5.2 Energía cinética y el teorema trabajo-energía

9. Un mecánico empuja un automóvil de 2.50×10^3 kg desde el reposo hasta una rapidez v , realizando 5000 J de trabajo en el proceso. En ese tiempo, el automóvil se traslada 25.0 m. Despreciando la fricción entre el automóvil y el camino, determine a) v y b) la fuerza horizontal ejercida en el automóvil.
10. Una bola de boliche de 7.00 kg se mueve a 3.00 m/s. ¿Qué tan rápido debe moverse una pelota de ping-pong de tal manera que las dos tengan la misma energía cinética?
11. Un corredor de 65.0 kg tiene una velocidad de 5.20 m/s en un instante durante un evento de larga distancia. a) ¿Cuál es la energía cinética del corredor en ese instante? b) Si duplica su velocidad para llegar a la meta, ¿por qué factor hace que su energía cinética cambie?
12. **CIC** Un trabajador que empuja una caja de madera de 35.0 kg con una rapidez constante para 12.0 m a lo largo de un piso de madera realiza 350 J de trabajo al aplicar una fuerza horizontal constante de magnitud F_0 sobre la caja. a) Establezca el valor de F_0 . b) Si ahora el trabajador aplica una fuerza mayor que F_0 , describa el movimiento consecutivo de la caja. c) Describa qué le sucedería a la caja si la fuerza aplicada es menor que F_0 .
13. Un jugador de béisbol de 70 kg inicia su deslizamiento sobre la segunda base cuando se mueve con una rapidez de 4.0 m/s. El coeficiente de fricción entre su uniforme y la superficie de la tierra es 0.70. Se desliza de tal modo que su rapidez es cero al momento que alcanza la base. a) ¿Cuánta energía mecánica se pierde debido a la fricción que actúa sobre el jugador? b) ¿Cuál es la distancia que se desliza?
14. Un guepardo de 62 kg en carrera alcanza una velocidad máxima de 32 m/s. a) ¿Cuál es la máxima energía cinética del guepardo? b) Encuentre la velocidad del guepardo cuando su energía cinética es la mitad del valor hallado en el inciso a).
15. Una bala de 7.80 g que se mueve a 575 m/s penetra el tronco de un árbol hasta una profundidad de 5.50 cm. a) Aplique consideraciones de trabajo y energía para encontrar la fuerza de fricción promedio que detiene la bala. b) Suponiendo que la fuerza de fricción es constante, determine cuánto tiempo transcurre entre el momento

en que la bala entra al árbol y el momento en que se interrumpe su movimiento.

16. Una partícula de 0.60 kg tiene una rapidez de 2.0 m/s en el punto A y una energía cinética de 7.5 J en el punto B. ¿Cuál es a) su energía cinética en A? b) ¿Cuál en el punto B? c) ¿Cuál es el trabajo total realizado en la partícula conforme se traslada desde A hasta B?
17. Un enorme crucero con una masa de 6.50×10^7 kg tiene una velocidad de 12.0 m/s en un instante. a) ¿Cuál es la energía cinética de la nave en este momento? b) ¿Cuánto trabajo se requiere para detenerlo? c) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza constante para detenerlo, si tiene un desplazamiento de 2.50 kilómetros?
18. Un hombre que empuja una caja de masa $m = 92.0$ kg a una velocidad $v = 0.850$ m/s se encuentra con una superficie horizontal rugosa de longitud $l = 0.65$ m como en la figura P5.18. Si el coeficiente de fricción cinética entre la caja y la superficie áspera es 0.358 y se ejerce una fuerza horizontal constante de 275 N en la caja, encuentre a) la magnitud y la dirección de la fuerza neta sobre la caja mientras está en la superficie rugosa, b) el trabajo neto realizado en la caja mientras se está en la superficie rugosa y c) la velocidad de la caja cuando llega al final de la superficie rugosa.

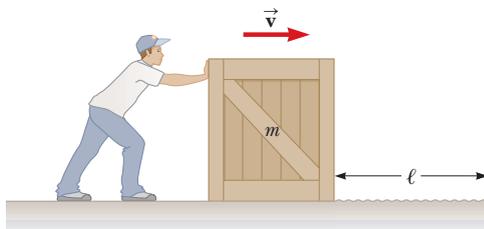


Figura P5.18

5.3 Energía potencial gravitacional

5.4 Energía potencial en resortes

19. Una piedra de 0.20 kg se mantiene a 1.3 m del borde superior de un pozo de agua y luego se deja caer en él. El pozo tiene una profundidad de 5.0 m. Tomando $y = 0$ en el borde superior del pozo, ¿cuál es la energía potencial gravitatoria del sistema piedra-Tierra a) antes de que la piedra se libere y b) cuando llegue al fondo del pozo? c) ¿Cuál es el cambio en la energía potencial gravitatoria del sistema desde la liberación hasta que llega al fondo del pozo?
20. Cuando un objeto de 2.50 kg cuelga verticalmente de cierto resorte ligero que se describe mediante la ley de Hooke, el resorte se estira 2.76 cm. a) ¿Cuál es la constante de fuerza del resorte? b) Si el objeto de 2.50 kg es retirado, ¿qué distancia se estira el resorte si un bloque de 1.25 kg se cuelga de él? c) ¿Cuánto trabajo debe hacer un agente externo para estirar el mismo resorte 8.00 cm desde su posición sin estirar?
21. Un acelerómetro en un sistema de control consiste en un objeto de 4.70 g deslizándose sobre un riel horizontal. Se conecta un resorte de masa pequeña entre el objeto y un reborde en un extremo del riel. La grasa en el riel hace despreciable la fricción estática, pero amortigua rápida-

mente vibraciones del deslizamiento del objeto. Cuando se somete a una aceleración continua de 0.800g, el objeto debe estar localizado a 0.500 cm desde su posición de equilibrio. Determine la constante de fuerza que se necesita para el resorte.

22. **PG** Una atleta de 60.0 kg salta en el aire verticalmente hacia arriba desde un trampolín con una rapidez inicial de 9.0 m/s. El objetivo de este problema es encontrar la altura máxima que alcanza y su rapidez a la mitad de dicha altura. a) ¿Cuáles son los objetos que interactúan y cómo lo hacen? b) Seleccione la altura en la que la rapidez de la atleta es 9.0 m/s cuando $y = 0$. ¿Cuál es su energía cinética en este punto? ¿Cuál es la energía potencial gravitacional asociada con la atleta? c) ¿Cuál es su energía cinética en la altura máxima? ¿Cuál es la energía potencial gravitacional asociada con la atleta? d) Escriba una ecuación general para la conservación de energía en este caso y resuelva para la altura máxima. Sustituya y obtenga la respuesta numérica. e) Escriba la ecuación general de conservación de energía y resuelva para la velocidad a la mitad de la altura máxima. Sustituya y obtenga una respuesta numérica.
23. **M** Se utiliza un martinete de 2 100 kg para enterrar una viga de acero dentro del suelo. El martinete cae 5.00 m antes de tener contacto con la parte superior de la viga y enterrarla 12.0 cm más allá de la superficie de la tierra y llegar al reposo. Aplicando consideraciones de energía, calcule la fuerza promedio que la viga ejerce en el martinete mientras éste llega al reposo.
24. **S** Dos bloques están conectados por una cadena ligera que pasa por dos poleas sin fricción, como en la figura P5.24. El bloque de masa m_2 está unido a un resorte de fuerza constante k y $m_1 > m_2$. Si el sistema se suelta desde el reposo y el resorte en un principio no se estira o se comprime, encuentre una expresión para el máximo desplazamiento d de m_2 .
25. Un acróbata sale del extremo de una rampa en una motocicleta con una rapidez de 35.0 m/s como en la figura P5.25. Si su rapidez es de 33.0 m/s cuando alcanza el pico de la trayectoria, ¿cuál es la altura máxima que alcanza? Desprecie la fricción y la resistencia del aire.

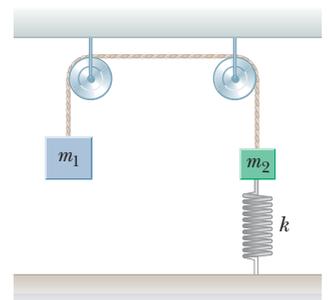


Figura P5.24

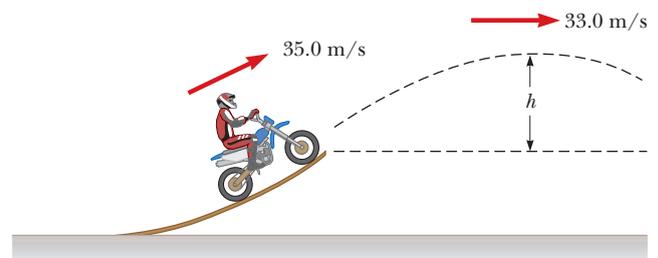


Figura P5.25

26. Con frecuencia las suspensiones de un camión tienen “resortes de soporte” que se emplean con cargas pesadas. En tales arreglos es un muelle con un resorte en una bobina de soporte montado en el eje, como se muestra en la figura P5.26. Cuando se comprime el muelle principal en distancia y_0 , se emplea el resorte de soporte y entonces ayuda a soportar cualquier carga adicional. Suponga que la constante del muelle es 5.25×10^5 N/m, la del resorte de soporte es 3.60×10^5 N/m y $y_0 = 0.500$ m. a) ¿Cuál es la compresión del muelle para una carga de 5.00×10^5 N? b) ¿Cuánto trabajo se realiza en la compresión del resorte?

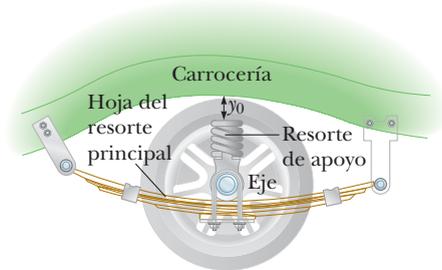


Figura P5.26

27. **BIO** Los *chin-ups* son un ejercicio que se puede utilizar para reforzar el músculo del bíceps. Este músculo puede ejercer una fuerza de casi 800 N cuando se contrae una distancia de 7.5 cm en un hombre de 75 kg.³ ¿Cuánto trabajo pueden realizar los bíceps de los músculos (uno en cada brazo) en una sola contracción? Compare la cantidad de trabajo con la energía que necesita para elevar 40 cm una persona de 75 kg mediante *chin-up*. ¿Piensa que el músculo del bíceps es el único músculo involucrado al levantar la barbilla?
28. **BIO** Una pulga es capaz de saltar casi 0.5 m. Se ha dicho que si la pulga fuera tan grande como un humano, ¿sería capaz de saltar sobre un edificio de 100 pisos! Cuando un animal salta, convierte el trabajo que realiza al contraer los músculos en energía potencial gravitacional (con algunas etapas en medio). La fuerza máxima ejercida por un músculo es proporcional a su área de sección transversal, y el trabajo realizado por el músculo es esta fuerza por la longitud de la contracción. Si ampliamos una pulga en un factor de 1000, la sección transversal de su músculo se incrementaría en 1000^2 y la longitud de la contracción se incrementaría en 1000. ¿Qué tan alto sería capaz de saltar esta “superpulga”? (No se le olvide que la masa de la “superpulga” también se incrementa.)
29. Se dispara un proyectil de 50.0 kg en un ángulo de 30.0° por encima de la horizontal con una velocidad inicial de 1.20×10^2 m/s desde la parte superior de un risco a 142 m sobre el nivel del suelo, donde la superficie se toma como $y = 0$. a) ¿Cuál es la energía mecánica total inicial del proyectil? b) Suponga que el proyectil está viajando a 85.0 m/s en su altura máxima de $y = 427$ m. ¿Cuánto trabajo

se realiza sobre el proyectil debido a la fricción del aire? c) ¿Cuál es la velocidad del proyectil inmediatamente antes de golpear la superficie si la fricción del aire hace una y media veces trabajo sobre el proyectil al bajar que el realizado al subir?

30. **S** Se dispara un proyectil de masa m horizontalmente con una velocidad inicial de v_0 desde una altura h sobre una superficie desértica y plana. Omitiendo la fricción del aire, en el instante antes que el proyectil golpee la superficie, determine lo siguiente en términos de m , v_0 , h y g : a) el trabajo realizado por la fuerza de gravedad en el proyectil, b) el cambio de energía cinética del proyectil desde que fue disparado y c) la energía cinética final del proyectil. d) ¿Cambian algunas de las respuestas si se modifica el ángulo inicial?
31. **PG** Un resorte horizontal unido a un muro tiene una constante de fuerza de 850 N/m. Se une un bloque de 1.00 kg de masa al resorte y oscila libremente en una superficie sin fricción, horizontal como en la figura 5.20. El objetivo inicial de este problema es encontrar la velocidad en el punto de equilibrio después de que se libera el bloque. a) ¿Qué objetos constituyen el sistema y a través de qué fuerzas interactúan? b) ¿Cuáles son los dos puntos de interés? c) Determine la energía almacenada en el resorte cuando la masa es estirada 6.00 cm desde el equilibrio y una vez más cuando la masa pasa a través del equilibrio después de liberarla desde el reposo. d) Escriba la ecuación de conservación de energía para esta situación y resuelva a favor de la rapidez de la masa cuando pasa por el equilibrio. Sustituya para obtener un valor numérico. e) ¿Cuál es la rapidez en el punto a la mitad del camino? ¿Por qué no está a la mitad la rapidez en el equilibrio?

5.5 Sistemas y conservación de energía

32. Una saltadora de 50 kg corre con garrocha a 10 m/s para saltar sobre la barra. Su rapidez cuando está por encima de ésta es 1.0 m/s. Despreciando la resistencia del aire, así como cualquier cantidad de energía absorbida por la garrocha, determine su altitud cuando cruza la barra.
33. Un pequeño y un trineo con una masa combinada de 50.0 kg se desliza hacia abajo por una pendiente. Si el trineo inicia desde el reposo y tiene una rapidez de 3.00 m/s al final, ¿cuál es la altura de la colina?
34. Cierta resorte ligero de 35.0 cm de longitud sin estirar se describe mediante la ley de Hooke. Cuando un extremo está unido en la parte superior del marco de una puerta y un objeto de 7.50 kg cuelga del otro extremo, la longitud del resorte es 41.5 cm. a) Determine la constante del resorte. b) La carga y el resorte son retirados. Dos personas jalen en direcciones opuestas en los extremos del resorte, cada una con una fuerza de 190 N. Determine la longitud del resorte en esta situación.
35. **CIC** A lo largo de una pista horizontal, un bloque de 0.250 kg tiene una rapidez de 1.50 m/s inmediatamente antes de colisionar con un resorte ligero de constante de fuerza 4.60 N/m ubicado en el extremo de la pista. a) ¿Cuál es la compresión máxima del resorte si la pista es sin fricción? b) Si la pista no es sin fricción, ¿la compresión máxima

³ G. P. Pappas et al., “Nonuniform shortening in the biceps brachii during elbow flexion,” *Journal of Applied Physiology* **92**, 2381, 2002.

del resorte sería más grande que, menor que o igual al valor que se obtiene en el inciso a)?

36. Un bloque de masa $m = 5.00$ kg se libera desde el punto A y se desliza hacia abajo de la pista sin fricción mostrada en la figura P5.36. Establezca a) la rapidez de la esfera en los puntos B y C y b) el trabajo neto realizado por la fuerza de gravedad en el movimiento de la esfera desde A hasta C.

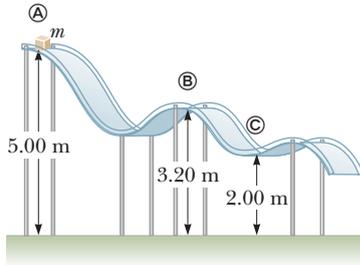


Figura P5.36

37. Tarzán se columpia de una liana de 30.0 m de largo inclinada al inicio en un ángulo de 37.0° con la vertical. ¿Cuál es su velocidad en la parte inferior de la oscilación a) si inicia desde el reposo? b) ¿Si se impulsa con una velocidad de 4.00 m/s?

38. S Dos bloques están conectados por una cadena ligera que pasa por encima de una polea sin fricción como en la figura P5.38. El sistema se libera desde el reposo mientras m_2 está en el suelo y m_1 está a una distancia h por encima del suelo. a) Suponiendo que $m_1 > m_2$, encuentre una expresión para la velocidad de m_1 sólo al llegar al suelo. b) Tomando $m_1 = 6.5$ kg, $m_2 = 4.2$ kg y $h = 3.2$ m, evaluar su respuesta a los incisos a) y c) encuentre la velocidad de cada bloque cuando m_1 ha caído una distancia de 1.6 m.

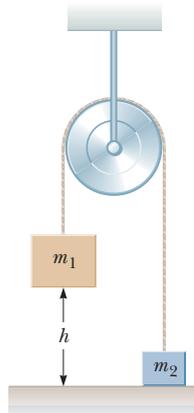


Figura P5.38

39. M El mecanismo de lanzamiento de un arma de juguete consiste en un resorte de constante desconocida como se muestra en la figura P5.39a. Si el resorte se comprime una distancia de 0.120 m, y el arma se dispara de manera vertical como se muestra, el arma puede lanzar un proyectil de 20.0 g desde el reposo hasta una altura máxima de 20.0 m por arriba del punto de partida del proyectil. Omitiendo todas las fuerzas resistivas, a) describa las transformaciones de energía mecánica que se presentan desde el momento en que se dispara el arma hasta que el proyectil alcanza su altura

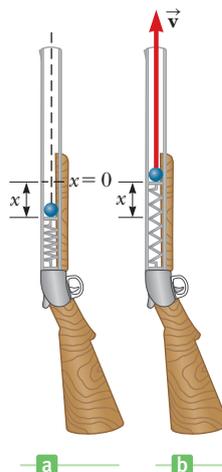


Figura P5.39

máxima, b) determine la constante del resorte y determine la rapidez cuando éste se mueve a través del punto de equilibrio del resorte (donde $x = 0$), como se muestra en la figura P5.39b.

40. PG a) Se jala un bloque de masa m a lo largo de una superficie horizontal por una distancia x mediante una fuerza constante \vec{F} en un ángulo θ con respecto a la horizontal. El coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la mesa es μ_k . ¿La fuerza ejercida por fricción es igual a $\mu_k mg$? Si no es así, ¿cuál es la fuerza ejercida por fricción? b) ¿Cuánto trabajo se realiza mediante la fuerza de fricción y por \vec{F} ? (No olvide los signos.) c) Identifique todas las fuerzas que no hacen trabajo sobre el bloque. d) Asigne $m = 2.00$ kg, $x = 4.00$ m, $\theta = 37.0^\circ$, $F = 15.0$ N y $\mu_k = 0.400$ y encuentre las respuestas de los incisos a) y b).
41. C/C a) Una pequeña se desliza hacia abajo sobre un tobogán con agua en un parque de diversiones desde una altura inicial h . Se puede considerar el tobogán sin fricción debido a que en él circula agua hacia abajo. ¿Se puede aplicar la ecuación de conservación de energía mecánica en la pequeña? b) La masa de la pequeña es un factor para determinar la rapidez en la parte inferior del tobogán? c) La pequeña se deja caer de manera directa, en lugar de seguir la curva de la rampa del tobogán. ¿En cuál caso viajará más rápido hasta el nivel del piso? d) Si se presenta fricción, ¿cómo se modificaría la ecuación de conservación de energía? e) Determine la rapidez máxima de la pequeña cuando el tobogán es sin fricción si la altura inicial del tobogán es 12.0 m.

42. C/C Un avión de 1.50×10^4 kg de masa se mueve a 60.0 m/s. A continuación el piloto incrementa el empuje del motor hasta 7.50×10^4 N. La fuerza resistiva ejercida por el aire sobre el avión tiene una magnitud de 4.00×10^4 N. a) ¿El trabajo realizado por el motor en el avión es igual al cambio en la energía cinética del mismo después de que recorre cierta distancia a través del aire? ¿Se conserva la energía mecánica? Explique. b) Determine la rapidez del avión después de que ha recorrido 5.00×10^2 m. Suponga que el avión está en vuelo nivelado durante todo el movimiento.

43. El sistema mostrado en la figura P5.43 se utiliza para levantar un objeto de masa $m = 76.0$ kg. Una fuerza descendente constante de magnitud F es aplicada al extremo suelto de la cuerda de tal manera que el objeto que cuelga se mueve hacia arriba a velocidad constante. Despreciando las masas de la cuerda y poleas, encuentre a) el valor de F , b) las tensiones T_1 , T_2 , y T_3 , y c) el trabajo realizado por la fuerza aplicada en la elevación del objeto a una distancia de 1.80 m.

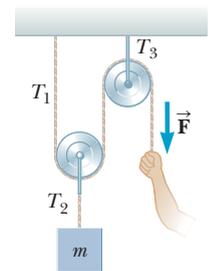


Figura P5.43

44. Una pequeña de 25.0 kg en un columpio de 2.00 m de largo se libera desde el reposo cuando las cuerdas del columpio forman un ángulo de 30.0° con la vertical. a) Despreciando la fricción, determine la rapidez de la pequeña en la posición más baja. b) Si la rapidez verda-

dera de la pequeña en la posición más baja es 2.00 m/s, ¿cuál es la energía mecánica que se pierde debido a la fricción?

45. Un automóvil de 2.1×10^3 kg inicia desde el reposo en la parte superior de una calzada de 5.0 m de largo que está inclinada a 20° con la horizontal. Si una fuerza de fricción promedio de 4.0×10^3 N dificulta el movimiento, determine la rapidez del automóvil en la parte inferior de la calzada.
46. **PG S** Una niña de masa m inicia desde el reposo y se desliza sin fricción desde una altura h a lo largo de un tobogán con agua (figura P5.46). Se lanza desde una altura $h/5$ en la piscina. a) ¿Se conserva la energía mecánica? ¿Por qué? b) Proporcione la energía potencial gravitacional asociada con la pequeña y su energía cinética en términos de mgh en las posiciones que siguen: la parte superior del tobogán, el punto de lanzamiento y el punto donde ella acuatiza en la piscina. c) Determine su rapidez inicial v_0 en el punto de lanzamiento en términos de g y h . d) Establezca la altura máxima en el aire $y_{\text{máx}}$ en términos de h , g y la rapidez horizontal en esa altura, $v_{0,x}$. e) Utilice la componente x de la respuesta al inciso c) para eliminar v_0 a partir de la respuesta al inciso d), conocida la altura $y_{\text{máx}}$ en términos de g , h y el ángulo de lanzamiento θ . f) ¿Su respuesta sería la misma si el tobogán con agua fuera con fricción? Explique.

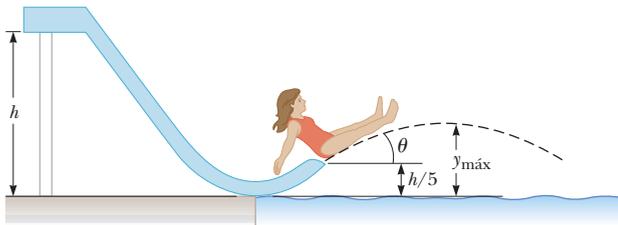


Figura P5.46

47. Un esquiador parte del reposo en la parte superior de una colina que está inclinada 10.5° con respecto a la horizontal. El flanco de la colina es de 200 m de largo, y el coeficiente de fricción entre la nieve y el patín es 0.07500. En la parte inferior de la colina, la nieve está a nivel, y el coeficiente de fricción no cambia. ¿Hasta dónde se desliza el esquiador a lo largo de la parte horizontal de la nieve antes de llegar al reposo?
48. En una función de circo, un mono está atado a un trineo y a los dos se les proporciona una rapidez inicial de 4.0 m/s hacia arriba de una pista inclinada 20° . La masa combinada del mono y el trineo es de 20 kg, y el coeficiente de fricción cinética entre el trineo y el plano inclinado es 0.20. ¿Qué distancia recorren hacia arriba del plano el mono y el trineo?
49. Un paracaidista de 80.0 kg salta desde un globo a una altitud de 1000 m y abre el paracaídas a una altitud de 200.0 m. a) Considerando que la fuerza de retraso total en el paracaidista es constante de 50.0 N con el paracaídas cerrado y de 3600 N constante con el paracaídas abierto, ¿cuál es la rapidez del paracaidista cuando aterri-

za en el suelo? b) ¿Piensa usted que el paracaidista se lastimará? Explique. c) ¿Desde qué altura abre el paracaídas de tal manera que su rapidez final cuando toca el suelo es de 5.00 m/s? d) ¿Qué tan realista es el supuesto de que la fuerza de retraso sea constante? Explique.

5.6 Potencia

50. Un cable impulsado por un motor levanta por una pendiente a un esquiador de 70 kg de masa. a) ¿Cuánto trabajo se necesita para jalarlo 60 m hacia arriba por una pendiente de 30° (sin fricción) con una rapidez constante de 2.0 m/s? b) ¿Qué potencia debe tener un motor para realizar esta tarea?
51. Un piano de 3.50 kN es levantado por tres trabajadores con rapidez constante hasta un departamento a 25.0 m sobre el nivel de la calle utilizando un sistema de polea sostenido en el techo del edificio. Cada trabajador es capaz de entregar 165 W de potencia, y la eficiencia de las poleas es de 75.0% (de tal modo que 25.0% de la energía mecánica se pierde debido a la fricción en la polea). Despreciando la masa de la polea, determine el tiempo requerido para levantar el piano desde la calle hasta el departamento.
52. **BIO** Mientras una persona corre, disipa casi 0.60 J de energía mecánica por cada paso por kilogramo de masa en el cuerpo. Si una persona de 60 kg desarrolla una potencia de 70 W durante una carrera, ¿qué tan rápido está corriendo la persona? (Considere un paso de carrera de 1.5 m de longitud.)
53. El motor eléctrico de un tren a escala lo acelera desde el reposo hasta 0.620 m/s en 21.0 ms. La masa total del tren es 875 g. Determine la potencia promedio entregada al tren durante su aceleración.
54. Cuando un automóvil se traslada con rapidez constante en una autopista, la mayor parte de la potencia desarrollada por el motor se utiliza para compensar debido a pérdidas de energía mecánica causadas por las fuerzas de fricción ejercidas sobre el automóvil por el aire y el camino. Si la potencia desarrollada por un motor es 175 hp, evalúe la fuerza de fricción total que actúa en el automóvil cuando se está moviendo con una rapidez de 29 m/s. Un caballo de fuerza es igual 746 W.
55. Un automóvil clásico acelera desde 0 hasta una rapidez v en 10 s. Un reciente y poderoso deportivo de la misma masa acelera desde 0 hasta $2v$ en el mismo periodo de tiempo. Suponiendo que la energía que viene del motor sólo aparece como energía cinética del automóvil, compare la potencia de los dos automóviles.
56. Cierta nube a una altitud de 1.75 km contiene 3.20×10^7 kg de vapor de agua. ¿Qué tiempo le tomaría a una bomba de 2.70 kW elevar la misma cantidad de agua desde la superficie de la Tierra hasta la posición de la nube?
57. Un automóvil de 1.50×10^3 kg inicia desde el reposo y acelera de manera uniforme hasta 18.0 m/s en 12.0 s. Suponga que la resistencia del aire permanece constante en 400 N durante este tiempo. Determine a) la potencia promedio desarrollada por el motor y b) la potencia de salida instantánea del motor en $t = 12.0$ s, precisamente antes que el automóvil detenga su aceleración.

58. Un elevador de 650 kg inicia desde el reposo y se mueve hacia arriba por 3.00 s con aceleración constante hasta que alcanza su rapidez de crucero, 1.75 m/s. a) ¿Cuál es la potencia promedio del motor del elevador durante este periodo? b) ¿Cómo se compara esta cantidad de potencia con la desarrollada durante un viaje ascendente con rapidez constante?

5.7 Trabajo realizado por una fuerza variable

59. **M** La fuerza que actúa en una partícula varía como en la figura P5.59. Determine el trabajo que realiza la fuerza cuando la partícula se traslada a) desde $x = 0$ hasta $x = 8.00$ m, b) desde $x = 8.00$ m hasta $x = 10.0$ m y c) desde $x = 0$ hasta $x = 10.0$ m.

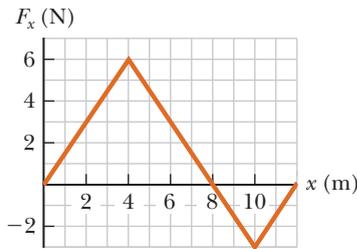


Figura P5.59

60. Un objeto de 3.00 kg de masa se somete a una fuerza F_x que varía con la posición como en la figura P5.60. Determine el trabajo que se realiza mediante la fuerza sobre el objeto cuando éste se traslada a) desde $x = 0$ hasta $x = 5.00$ m, b) desde $x = 5.00$ m hasta $x = 10.0$ m y c) desde $x = 10.0$ m hasta $x = 15.0$ m. d) Si el objeto tiene una rapidez de 0.500 m/s en $x = 0$, determine su rapidez en $x = 5.00$ m y su rapidez en $x = 15.0$ m.

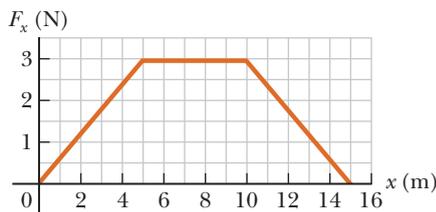


Figura P5.60

61. La fuerza que actúa sobre un objeto se conoce mediante $F_x = (8x - 16)$ N, donde x está en metros. a) Trace una gráfica de esta fuerza en función de x desde $x = 0$ hasta $x = 3.00$ m. b) A partir de su gráfica, encuentre el trabajo neto que se lleva a cabo mediante la fuerza cuando el objeto se traslada desde $x = 0$ hasta $x = 3.00$ m.

Problemas adicionales

62. Un jugador lanza una pelota de béisbol de 0.150 kg a una velocidad de 40.0 m/s y un ángulo inicial de 30.0° . ¿Cuál es la energía cinética de la pelota en el punto más alto de su movimiento?
63. Una persona levanta 700 N mediante *chin-ups*, únicamente con los brazos. Durante los primeros 25.0 cm del levantamiento, cada brazo ejerce una fuerza hacia arriba de 355 N en el torso. Si el movimiento hacia arriba inicia desde el reposo, ¿cuál es la velocidad de la persona en ese punto?

64. **S** Un chico inicia en el reposo y se desliza hacia abajo en una resbaladilla sin fricción como en la figura P5.64. La parte inferior de la resbaladilla está a una altura h sobre el nivel del suelo. Después el chico deja la resbaladilla horizontalmente, llegando al suelo a una distancia d como se muestra. Aplicando métodos de energía, determine la altura inicial H del chico en términos de h y d .

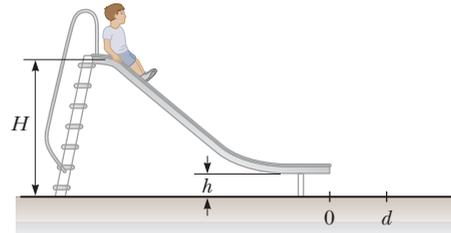


Figura P5.64

65. El vagón de una montaña rusa de 1.50×10^3 kg inicialmente está en la parte superior de una elevación en el punto A. A continuación se mueve 35.0 m en un ángulo de 50.0° por debajo de la horizontal hasta un punto inferior B. a) Encuentre la energía potencial del sistema cuando el vagón está en los puntos A y B y el cambio de energía potencial cuando el vagón se traslada desde el punto A hasta el punto B, suponiendo $y = 0$ en el punto B. b) Reproduzca el inciso a), esta vez eligiendo $y = 0$ en el punto C, que es otro punto 15.0 m hacia abajo de la misma pendiente desde el punto B.

66. Una bola de masa $m = 1.80$ kg se libera desde el reposo a una altura $h = 65.0$ cm por encima de un resorte ligero vertical de fuerza constante k como en la figura P5.66a. La bola golpea la parte superior del resorte y lo comprime una distancia $d = 9.00$ cm como en la figura P5.66b. Despreciando todas las pérdidas de energía durante la colisión, encuentre

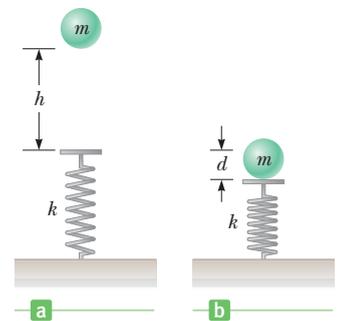


Figura P5.66

- a) la velocidad de la bola en el momento que toca el resorte y b) la constante de fuerza del resorte.
67. Un arquero jala la cuerda de su arco 0.400 m ejerciendo una fuerza que se incrementa de manera uniforme desde cero hasta 230 N. a) ¿Cuál es la constante del resorte equivalente del arco? b) ¿Cuánto trabajo hace el arquero al jalar el arco?
68. Un bloque de 12.0 kg de masa se desliza hacia abajo sobre un plano inclinado 35.0° sin fricción y es detenido por un rígido resorte con $k = 3.00 \times 10^4$ N/m. El bloque se desliza 3.00 m desde el punto en que se libera hasta el punto donde llega al reposo contra el resorte. Cuando el bloque llega al reposo, ¿cuánto se comprime el resorte?
69. **BIO** a) Un hombre de 75 kg camina por fuera de una ventana y cae (desde el reposo) 1.0 m hacia una acera. ¿Cuál es su rapidez justo antes de que sus pies golpeen el pavimento? b) Si el hombre cae con sus rodillas y tobillos

trabados, el único amortiguador para su caída es el que le dan los cojines de sus pies de aproximadamente 0.50 cm. Calcule la fuerza promedio ejercida en él por el piso en esta situación. Esta fuerza promedio es suficiente para causarle daño a los cartílagos en las articulaciones o romperle los huesos

70. Un arma de juguete utiliza un resorte para proyectar horizontalmente una esfera de goma suave de 5.3 g. La constante de resorte es 8.0 N/m, el cañón del arma es de 15 cm de longitud y existe una fuerza de fricción constante de 0.032 N entre el cañón y el proyectil. ¿Si se comprime el resorte 5.0 cm, ¿con qué rapidez sale el proyectil del cañón para este lanzamiento?

71. Dos objetos están conectados mediante un resorte ligero que pasa sobre una polea ligera sin fricción, como en la figura P5.71. El objeto de 5.00 kg se libera desde el reposo en un punto 4.00 m arriba del piso. a) Determine la rapidez de cada objeto cuando se cruzan entre sí. b) Determine la rapidez de cada objeto en el momento en que el objeto de 5.00 kg incide en el piso. c) Después que el objeto de 5.00 kg golpea el piso, ¿qué tan alto viaja el objeto de 3.00 kg?

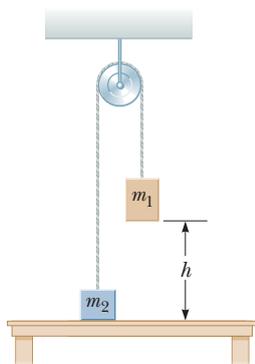


Figura P5.71

72. **BIO** En una biopsia con aguja, se extrae una tira estrecha de tejido de un paciente. Mientras es empujada con la mano para asegurar un corte limpio, la aguja puede ser disparada dentro del cuerpo del paciente mediante un resorte. Suponga que la masa de la aguja es 5.60 g, el resorte ligero tiene una constante de fuerza de 375 N/m y está en principio comprimido 8.10 cm para proyectar la aguja horizontalmente sin fricción. En este caso la punta de la aguja se traslada por 2.40 cm de piel y tejido suave, que ejerce una fuerza resistiva en ella de 7.60 N. A continuación, la aguja corta 3.50 cm dentro de un órgano, que ejerce una fuerza hacia atrás de 9.20 N en ella. Determine a) la rapidez máxima de la aguja y b) la rapidez con la cual una brida en el extremo posterior de la aguja corre hasta un tope, para ajustar el límite de penetración a 5.90 cm.

73. Una partícula de 2.00×10^2 g se libera desde el reposo en el punto A en el interior de un tazón hemisférico de radio $R = 30.0$ cm (figura P5.73). Calcule a) su energía potencial gravitacional en A relativa a B, b) su energía cinética en B, c) su rapidez en B, d) su energía potencial en C relativa a B y e) su energía cinética en C.

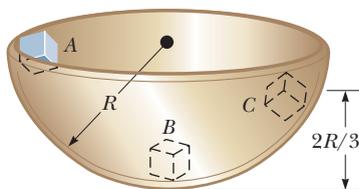


Figura P5.73

74. **CIC** La partícula descrita en el problema 73 (figura P5.73) se libera desde el punto A en el reposo. Su rapidez en B es 1.50 m/s. a) ¿Cuál es su energía cinética en B? b) ¿Cuánta energía mecánica se pierde como un resultado de la fricción cuando la partícula va desde A hasta B? c) ¿Es posible determinar de una manera simple μ a partir de estos resultados? Explique.

75. Un resorte ligero con constante elástica de 1.20×10^3 N/m cuelga desde un soporte elevado. De su extremo inferior cuelga un segundo resorte ligero que tiene una constante elástica de 1.80×10^3 N/m. Un objeto de 1.50 kg cuelga en reposo desde el extremo inferior del segundo resorte. a) Determine la distancia de extensión total del par de resortes. b) Encuentre la constante elástica efectiva del par de resortes como un sistema. Estos resortes se describen como estando *en serie*. *Sugerencia:* Considere por separado las fuerzas en cada resorte.

76. **S** *Versión simbólica del problema 75.* Un resorte ligero con constante elástica k_1 cuelga de un soporte elevado, de su extremo inferior cuelga un segundo resorte ligero, que tiene una constante elástica k_2 . Del extremo inferior del segundo resorte cuelga un objeto de masa m en reposo. a) Encuentre la distancia total de la extensión x del par de resortes en términos de los dos desplazamientos x_1 y x_2 . b) Determine la constante elástica efectiva del par de resortes como un sistema. Estos resortes se describen como *en serie*.

77. **BIO** En términos de ahorro de energía, montar en bicicleta o caminar son los medios mucho más eficientes de transporte que el viajar en automóvil. Por ejemplo, cuando se pasea a 10.0 mi/h, un ciclista usa energía del alimento en una proporción de casi 400 kcal/h sobre la que utilizaría si estuviera solamente sentado. (En fisiología del ejercicio, la potencia usualmente se mide en kcal/h, en lugar de watts. En este caso, 1 kcal = 1 Caloría nutricionista = 4186 J.) Caminando a 3.00 mi/h necesita casi 220 kcal/h. Es interesante comparar estos valores con los consumos de energía que se requieren para viajar en automóvil. La gasolina produce casi 1.30×10^8 J/galón. Encuentre el ahorro en combustible en millas por cada galón equivalente para una persona a) caminando y b) en bicicleta.

78. **BIO** La energía formalmente se mide en Calorías así como en joules. En nutrición una Caloría es 1 kcal que se define en el capítulo 11 como 1 kcal = 4186 J. Metabolizar un gramo de grasa puede liberar 9.00 kcal. Un estudiante decide intentar perder peso mediante el ejercicio. Planea correr subiendo y bajando las escaleras de un estadio de fútbol tan rápido como pueda y tantas veces como sea necesario. ¿Por sí mismo es esto una manera práctica de perder peso? Para evaluar el programa suponga que sube un tramo de 80 escalones, cada uno de 0.150 m de alto, en 65.0 s. Por simplicidad, ignore la energía que utiliza al bajar (que es muy pequeña). Considere que una eficiencia representativa para los músculos de un humano es de 20.0%. Esto significa que cuando su cuerpo convierte 100 J a causa de la metabolización de grasa, 20 J se utilizan al realizar trabajo mecánico (en

este caso, subiendo escaleras). El resto en energía interna. Suponga que la masa del estudiante es de 50.0 kg. a) ¿Cuántas veces debe subir el tramo de escaleras para perder 1 libra de grasa? b) ¿Cuál es la potencia de salida promedio, en watts y en caballos de fuerza, cuando está subiendo las escaleras?

79. Una esquiadora inicia desde el reposo 50.0 m arriba del nivel del suelo sobre una pista sin fricción y vuela sobre la pista en un ángulo de 45.0° por encima de la horizontal y con una altura de 10.0 m sobre el nivel del suelo. Omite la resistencia del aire. a) ¿Cuál es su velocidad cuando deja la pista? b) ¿Cuál es la altitud máxima que alcanza después de abandonar la pista? c) ¿Dónde aterriza en relación al extremo de la pista?

80. Se empuja un bloque de 5.0 kg y 3.0 m hacia arriba de una pared vertical con rapidez constante mediante una fuerza constante de magnitud F aplicada en un ángulo de $\theta = 30^\circ$ con la horizontal, como se muestra en la figura P5.80. Si el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la pared es 0.30, determine el trabajo que se hace mediante a) \vec{F} , b) la fuerza de gravedad y c) la fuerza normal entre el bloque y la pared. d) ¿Por cuánto se incrementa la energía potencial gravitacional durante el movimiento del bloque?

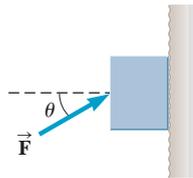


Figura P5.80

81. El pogo saltarán de un pequeño (figura P5.81) almacena energía en un resorte ($k = 2.50 \times 10^4 \text{ N/m}$). En la posición **A** ($x_1 = -0.100 \text{ m}$), la compresión del resorte es un máximo y momentáneamente el pequeño está en reposo. En la posición **B** ($x = 0$), el resorte está relajado y el pequeño se mueve hacia arriba. En la posición **C**, momentáneamente una vez más el pequeño está en reposo en la parte superior del salto. Suponiendo que la masa combinada del pequeño y el pogo saltarán es 25.0 kg, a) calcule la energía total del sistema si ambas energías potencial son cero en $x = 0$, b) determine x_2 , c) calcule la rapidez del pequeño en $x = 0$, d) calcule el valor de x para el cual la energía cinética del sistema es un máximo y e) obtenga la rapidez máxima ascendente del pequeño.

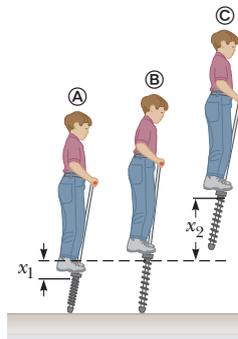


Figura P5.81

82. BIO Un colibrí es capaz de flotar debido a que como las alas se mueven hacia abajo, ejercen una fuerza descendente en el aire. La tercera ley de Newton dice que el aire ejerce una fuerza igual y opuesta (ascendente) en las alas. El promedio de esta fuerza debe ser igual al peso del ave cuando flota. Si las alas se mueven por una distancia de 3.5 cm con cada movimiento y aletea 80 veces por segundo, determine el trabajo realizado por las alas en el aire durante un minuto si la masa del colibrí es de 3.0 gramos.

83. En el peligroso “deporte” del salto *bungee*, un osado estudiante salta desde un globo de aire caliente con una cuerda especialmente diseñada atada a su cintura. La longitud de la cuerda sin estirar es 25.0 m, el estudiante pesa 700 N, y el globo está a 36.0 m encima de la superficie de un río. Calcule la constante de fuerza necesaria de la cuerda si el estudiante se detiene con seguridad a 4.00 m sobre el río.

84. C|C Las masas de la jabalina, disco y bala son 0.80 kg, 2.0 y 7.2 kg, respectivamente, y los registros de lanzamiento en los eventos de pista correspondientes son aproximadamente 98, 74 y 23 m, respectivamente. Ignorando la resistencia del aire, a) calcule las energías cinéticas iniciales mínimas que producirían estos lanzamientos y b) evalúe la fuerza promedio ejercida sobre cada objeto durante el lanzamiento, suponiendo que la fuerza actúa en una distancia de 2.0 m. c) ¿Sus resultados sugieren que la resistencia del aire es un factor importante?

85. Una camioneta viaja colina arriba con velocidad constante por una autopista con 7.0° de pendiente. Un paquete de 50 kg se sitúa en el piso posterior de la camioneta y no se desliza, debido a la fuerza de fricción estática. Durante un intervalo en que la camioneta viaja 340 m, ¿cuál es el trabajo neto que se realiza en el paquete? ¿Cuál es el trabajo neto que se ejerce sobre el paquete mediante la fuerza de gravedad, la fuerza normal y la fuerza de fricción?

86. Un acróbata quiere saltar con bungee desde un globo con aire caliente 65.0 m arriba de un carnaval situado a mitad del camino. Utilizará una pieza de cuerda elástica no uniforme unida a un arnés alrededor de su cuerpo para detener su caída en un punto 10.0 m sobre el suelo. Represente el cuerpo de este individuo como una partícula y la cuerda que tiene masa despreciable y una fuerza de tensión descrita por la ley de fuerza de Hooke. En una prueba preliminar, colgado en reposo desde una longitud de cuerda de 5.00 m, el saltador encuentra que el peso de su cuerpo la estira en 1.50 m se deja caer desde el reposo en el punto donde el extremo superior de una sección extensa de la cuerda está unida a un globo inmóvil. a) ¿Qué longitud de cuerda utiliza? b) ¿Qué aceleración máxima experimentará?

87. M Un vagón cargado de mineral tiene una masa de 950 kg y pasa sobre rieles con fricción despreciable. Inicia desde el reposo y es jalado hacia arriba por el pozo de una mina mediante un cable unido a un montacargas. El pozo está inclinado a 30.0° por arriba de la horizontal. El vagón acelera de manera uniforme hasta una rapidez de 2.20 m/s en 12.0 s y después continúa con rapidez constante. a) ¿Qué potencia debe proporcionar el motor del montacargas cuando el vagón se está moviendo con rapidez constante. b) ¿Qué potencia máxima debe proporcionar el motor? c) ¿Qué energía total transfiere el motor por trabajo durante el tiempo que el vagón se mueve al extremo del riel, que tiene longitud de 1250 m?

88. S Un objeto de masa m está colgado desde la parte superior del carrito mediante una cuerda de longitud L , como en la figura P5.88a (página 166). El carrito y el objeto inicialmente se están moviendo a la derecha con una rapidez

constante v_0 . El carrito llega al reposo después de chocar y unirse a un amortiguador, como en la figura P5.88b, y el objeto colgado oscila del principio a fin de un ángulo θ . a) Muestre que la rapidez inicial es $v_0 = \sqrt{2gL(1 - \cos \theta)}$. b) Si $L = 1.20$ m y $\theta = 35.0^\circ$, determine la rapidez inicial del carrito. (*Sugerencia:* La fuerza ejercida mediante la cuerda en el objeto no realiza trabajo en el mismo.)

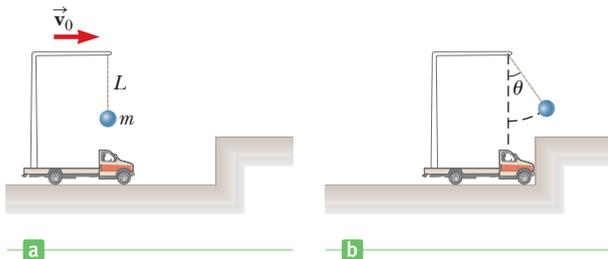


Figura P5.88

89. Tres objetos con masas $m_1 = 5.0$ kg, $m_2 = 10$ kg y $m_3 = 15$ kg, respectivamente, están unidos mediante una cuerda sobre poleas sin fricción como se indica en la figura P5.89. La superficie horizontal ejerce una fuerza de fricción de 30 N en m_2 . Si se libera el sistema desde el reposo, utilice conceptos de energía para encontrar la rapidez de m_3 después de que se movió hacia abajo 4.0 m.

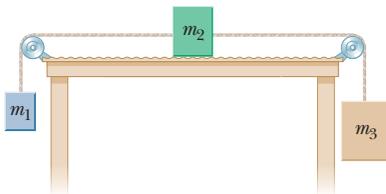


Figura P5.89

90. Un resorte ligero con una fuerza constante 3.85 N/m se comprime por 8.00 cm, está entre un bloque de 0.250 kg a la izquierda y un bloque de 0.500 kg a la derecha, tan-

to en reposo sobre una superficie horizontal. El resorte ejerce una fuerza en cada bloque, que tiende a separarlos. Los bloques son soltados al mismo tiempo desde el reposo. Encontrar la aceleración con la que cada bloque comienza a moverse, dado que el coeficiente de fricción cinética entre cada bloque y la superficie es a) 0, b) 0.100, y c) 0.462.

91. **BIO** Montada en bicicleta para ejercicio aeróbico, una mujer desea que su ritmo cardíaco esté entre 136 y 166 latidos por minuto. Considere que su ritmo cardíaco es directamente proporcional a su potencia de salida mecánica. Omite todas las fuerzas en el sistema mujer más bicicleta, excepto por la fricción estática para impulsar las ruedas de la bicicleta y una fuerza de resistencia del aire proporcional al cuadrado de la rapidez de la ciclista. Cuando su rapidez es 22.0 km/h, su ritmo cardíaco es 90.0 latidos por minuto. ¿En qué límites está su rapidez de tal manera que su ritmo cardíaco estará en el intervalo que quiere?
92. Dos bloques, A y B (con una masa de 50 y 100 kg, respectivamente), están conectados por una cadena, como se muestra en figura P5.92. La polea es sin fricción y de masa insignificante. El coeficiente de fricción cinética entre el bloque A y el plano inclinado es $\mu_k = 0.25$. Determine el cambio en la energía cinética del bloque A conforme se mueve hacia arriba, desde \textcircled{C} hasta \textcircled{D} , una distancia de 20 metros por el plano inclinado (y el bloque B cae hacia abajo una distancia de 20 m) si el sistema parte del reposo.

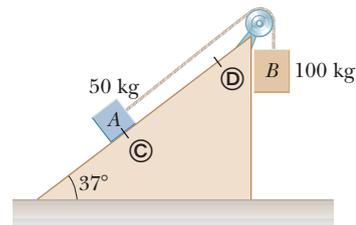


Figura P5.92



El concepto de momento o cantidad de movimiento permite el análisis de colisiones entre automóviles incluso sin conocimiento detallado de las fuerzas involucradas. Este análisis puede determinar la velocidad relativa de los vehículos antes de la colisión y ayuda además a los ingenieros en el diseño de vehículos más seguros.

Cantidad de movimiento y colisiones

6

¿Qué sucede cuando dos automóviles colisionan? ¿Cómo afecta el impacto al movimiento de cada automóvil y qué principios físicos básicos establecen la probabilidad de una lesión seria? ¿Cómo funcionan los cohetes y cuáles son los mecanismos que se pueden utilizar para cubrir las limitaciones impuestas por la rapidez de los gases de escape? ¿Por qué tenemos que apoyarnos al disparar proyectiles pequeños con velocidades altas? Por último, ¿cómo se puede utilizar la física para mejorar nuestro juego de golf?

Para comenzar a contestar a tales preguntas, introducimos el concepto de *cantidad de movimiento*. Intuitivamente, alguien o algo que tenga gran cantidad de movimiento va a ser difícil de detener. En política el término es metafórico. Físicamente, cuanto más cantidad de movimiento tiene un objeto, mayor fuerza tiene que ser aplicada para detenerlo en un tiempo determinado. Este concepto conduce a uno de los principios en física de gran alcance: la *conservación de la cantidad de movimiento*. Utilizando esta ley se pueden resolver problemas de colisiones complejas sin conocer mucho acerca de la fuerza promedio entregada en un impacto. Con la conservación de la cantidad de movimiento tendremos una mejor comprensión de opciones cuando se diseña un automóvil o un cohete lunar, o cuando le ponemos dirección a una pelota de golf en el punto de saque.

- 6.1 Cantidad de movimiento e impulso
- 6.2 Conservación de la cantidad de movimiento
- 6.3 Colisiones
- 6.4 Colisiones tangenciales
- 6.5 Propulsión de cohete

6.1 Cantidad de movimiento e impulso

En física, cantidad de movimiento tiene una definición inequívoca. Un brontosaurio moviéndose lentamente tiene bastante cantidad de movimiento, contrariamente al caso del plomo caliente disparado desde el cañón de un arma. Debido a eso esperaríamos que la cantidad de movimiento dependiera de la masa y velocidad del objeto.

La cantidad de movimiento lineal \vec{p} de un objeto de masa m moviéndose con velocidad \vec{v} es el producto de su masa y velocidad:

$$\vec{p} \equiv m\vec{v} \quad [6.1]$$

Unidad SI: kilogramo-metro por segundo ($\text{kg} \cdot \text{m/s}$)

◀ Cantidad de movimiento lineal

Al duplicar la masa o la velocidad de un objeto se duplica su cantidad de movimiento; duplicar ambas cantidades cuadruplica su cantidad de movimiento. La cantidad de movimiento es una cantidad vectorial con la misma dirección y velocidad del objeto. Sus componentes se proporcionan en dos dimensiones mediante

$$p_x = mv_x \quad p_y = mv_y$$

donde p_x es la cantidad de movimiento del objeto en la dirección x y p_y es la cantidad de movimiento del objeto en la dirección y .

La magnitud de la cantidad de movimiento p de un objeto de masa m puede relacionarse a su energía cinética EC :

$$EC = \frac{p^2}{2m} \quad [6.2]$$

Es fácil comprobar esta correspondencia utilizando las definiciones de energía cinética y cantidad de movimiento (véase el problema 6) y es válida para objetos que viajan con magnitudes de velocidad mucho menores que la rapidez de la luz. La ecuación 6.2 es útil en la comprensión de la interacción entre los dos conceptos, como se ilustra en el examen rápido 6.1.

Examen rápido

6.1 Dos masas m_1 y m_2 , con $m_1 < m_2$, tienen igual energía cinética. ¿Cómo se comparan las magnitudes de sus cantidades de movimiento? a) No se proporciona información suficiente. b) $p_1 < p_2$ c) $p_1 = p_2$ d) $p_1 > p_2$.

El cambio en la cantidad de movimiento de un objeto necesita de la aplicación de una fuerza. Es decir, en realidad, como originalmente estableció Newton en su segunda ley de movimiento. Iniciando desde la versión más común de la segunda ley, tenemos

$$\vec{F}_{\text{neta}} = m\vec{a} = m \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\Delta(m\vec{v})}{\Delta t}$$

donde la masa m y las fuerzas se consideran constantes. La cantidad en el paréntesis es precisamente la cantidad de movimiento, por eso tenemos el siguiente resultado:

El cambio en la cantidad de movimiento de un objeto $\Delta\vec{p}$ dividido entre el tiempo transcurrido Δt es igual a la fuerza neta constante \vec{F}_{neta} que actúa en el objeto:

$$\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \frac{\text{cambio en la cantidad de movimiento}}{\text{intervalo de tiempo}} = \vec{F}_{\text{neta}} \quad [6.3]$$

Segunda ley de Newton y cantidad de movimiento ▶

Esta ecuación también es válida cuando las fuerzas no son constantes, siempre que el límite se tome conforme Δt se hace infinitesimalmente pequeño. La ecuación 6.3 señala que si la fuerza neta de un objeto es cero, la cantidad de movimiento del objeto no cambia. En otras palabras, la cantidad de movimiento lineal del objeto se conserva cuando $\vec{F}_{\text{neta}} = 0$. Además, la ecuación 6.3 nos dice que para cambiar la cantidad de movimiento de un objeto se necesita la aplicación continua de una fuerza en un tiempo Δt , lo que nos conduce a la definición de *impulso*:

Si una fuerza constante actúa \vec{F} en un objeto, el **impulso \vec{I}** que se entrega al objeto en un lapso Δt está dado por

$$\vec{I} \equiv \vec{F} \Delta t \quad [6.4]$$

Unidad SI: kilogramo-metro por cada segundo (kg · m/s)

Impulso es una cantidad vectorial con la misma dirección que la fuerza constante que actúa sobre el objeto. Cuando actúa una sola fuerza constante \vec{F} sobre un objeto, la ecuación 6.3 puede ser rescrita como

$$\vec{I} = \vec{F} \Delta t = \Delta\vec{p} = m\vec{v}_f - m\vec{v}_i \quad [6.5]$$

Teorema impulso-cantidad de movimiento ▶

éste es un caso especial del **teorema impulso-cantidad de movimiento**. La ecuación 6.5 muestra que **el impulso de la fuerza que actúa en un objeto es igual al cambio en la canti-**

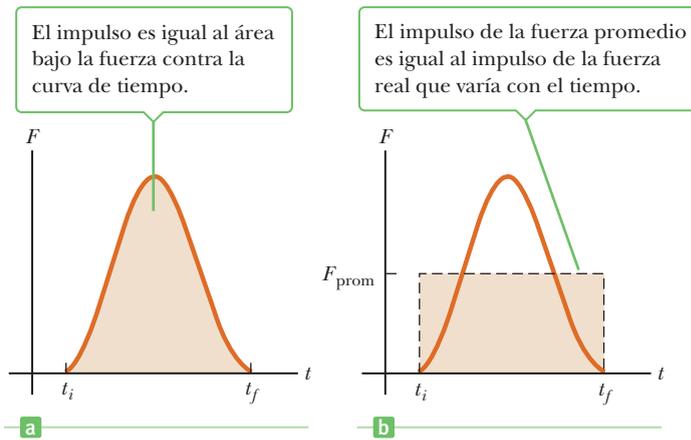


Figura 6.1 a) Una fuerza neta que actúa sobre una partícula puede variar en el tiempo. b) El valor de la fuerza constante de F_{prom} (línea horizontal punteada) es elegido de modo que el área del rectángulo $F_{\text{prom}} \Delta t$ es el mismo que el área bajo la curva en a).

dad de movimiento del objeto. Esta ecuación es verdadera incluso si la fuerza no es constante, siempre que se considere el intervalo de tiempo Δt arbitrariamente pequeño. (La demostración del caso general necesita conceptos del cálculo.)

En situaciones de la vida real, la fuerza en un objeto rara vez es constante. Por ejemplo, cuando un bate golpea una pelota, la fuerza aumenta en forma abrupta, alcanza algún valor máximo y después disminuye con rapidez. La figura 6.1a) muestra una gráfica de fuerza en términos del tiempo para tal acontecimiento. Al comienzo la fuerza es pequeña conforme el bate se pone en contacto con la pelota, se eleva a un valor máximo cuando están firmemente en contacto y a continuación decae conforme la pelota deja el bate. Con la finalidad de analizar esta interacción algo compleja, es útil definir una **fuerza promedio** \vec{F}_{prom} indicada como la línea discontinua en la figura 6.1b). Esta fuerza promedio es la fuerza constante que entrega el mismo impulso al objeto en el tiempo Δt conforme la fuerza verdadera varía en el tiempo. En tal caso podemos escribir el teorema impulso-cantidad de movimiento como

$$\vec{F}_{\text{prom}} \Delta t = \Delta \vec{p} \quad [6.6]$$

La magnitud del impulso entregado por una fuerza durante el tiempo Δt es igual al área bajo la curva en términos del tiempo como en la figura 6.1a) o bien, equivalentemente, a $F_{\text{prom}} \Delta t$ como se muestra en la figura 6.1b). En la figura 6.2 se ilustra la breve colisión entre una bala y una manzana.



Figura 6.2 Una manzana está siendo perforada por una bala calibre 30 viajando con una rapidez supersónica de 900 m/s. Esta colisión fue fotografiada con un estroboscopio de micro destello utilizando un tiempo de exposición de $0.33 \mu\text{s}$. Brevemente después de que se tomó la fotografía, la manzana se desintegró por completo. Observe que los puntos de entrada y salida de la bala son visiblemente explosivos.

■ **FÍSICA APLICADA 6.1** **Boxeo y lesión cerebral** BIO

En combates de boxeo del siglo XIX, se utilizaron los puños desnudos. En el boxeo moderno, los peleadores usan guantes acojinados. ¿Cómo protegen los guantes del boxeador al cerebro de una lesión? Además, ¿por qué con frecuencia el boxeador “se bambolea con el puñetazo”?

EXPLICACIÓN El cerebro está sumergido dentro de un fluido amortiguador dentro del cráneo. Si la cabeza es golpeada repentinamente por un puño desnudo, el cráneo se acelera con rapidez. El cerebro iguala esta aceleración sólo debido a la gran fuerza impulsiva ejercida por el cráneo sobre el cerebro. Esta gran fuerza repentina (F_{prom} grande y Δt pequeño) puede ocasionar graves lesiones en el cerebro. Los guantes acojinados extienden el tiempo Δt durante el

cual es aplicada la fuerza a la cabeza. Para un impulso determinado $F_{\text{prom}} \Delta t$, un resultado del guante es un intervalo de tiempo más prolongado que con un puño desnudo, disminuyendo la fuerza promedio. Debido a que disminuye la fuerza promedio, decrece la aceleración del cráneo, lo que reduce (pero no elimina) la posibilidad de lesión cerebral. Se puede argumentar lo mismo para “el bamboleo con el puñetazo”: si la cabeza se mantiene fija mientras está siendo golpeada, el intervalo de tiempo durante el cual es aplicada la fuerza es relativamente breve, y la fuerza promedio es grande. Si a la cabeza se le permite moverse en la misma dirección que el puñetazo, el intervalo de tiempo es alargado, y disminuye la fuerza promedio. ■

■ **EJEMPLO 6.1** **Golpeando primero**

OBJETIVO Aplicar el teorema impulso-cantidad de movimiento para evaluar la fuerza promedio ejercida durante un impacto.

PROBLEMA Una pelota de golf con $5.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$ de masa es golpeada con un bastón como en la figura 6.3 (página 170). La fuerza en la pelota varía desde cero cuando se hace el contacto hasta algún valor máximo (cuando es máxima la deformación

(continúa)

de la pelota) y después regresa a cero cuando la pelota deja el bastón, como en la gráfica de fuerza como función del tiempo en la figura 6.1. Suponga que la pelota deja la cara del bastón con una velocidad de +44 m/s. **a)** Encuentre la magnitud del impulso debido a la colisión. **b)** Evalúe la duración de la colisión y la fuerza promedio que actúa en la pelota.

ESTRATEGIA En el inciso a), aplique el hecho de que el impulso es igual al cambio de cantidad de movimiento. La masa y las magnitudes de velocidad inicial y final se conocen, por eso este cambio puede calcularse. En el inciso b) la fuerza promedio es precisamente el cambio de la cantidad de movimiento calculado en el inciso a) dividido entre una estimación de la duración de la colisión. Piense en la distancia que la pelota recorre por la cara del bastón (casi 2 cm, aproximadamente el radio de la pelota). Divida esta distancia entre la velocidad promedio (la mitad de la velocidad final) para obtener un valor aproximado del tiempo de contacto.



Figura 6.3 (Ejemplo 6.1) Durante el impacto, la cabeza del bastón por un momento aplana la cara de la pelota de golf.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el impulso entregado a la pelota.

El problema esencialmente es en una dimensión. Observe que $v_i = 0$ y calcule el cambio en la cantidad de movimiento, que es igual al impulso:

$$I = \Delta p = p_f - p_i = (5.0 \times 10^{-2} \text{ kg})(44 \text{ m/s}) - 0 = +2.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

b) Evalúe la duración de la colisión y la fuerza promedio que actúa en la pelota.

Realice el cálculo aproximado del intervalo de tiempo de la colisión, Δt , utilizando el desplazamiento aproximado (radio de la pelota) y su rapidez promedio (la mitad de rapidez máxima):

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_{\text{prom}}} = \frac{2.0 \times 10^{-2} \text{ m}}{22 \text{ m/s}} = 9.1 \times 10^{-4} \text{ s}$$

Estime la fuerza promedio a partir de la ecuación 6.6:

$$F_{\text{prom}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{9.1 \times 10^{-4} \text{ s}} = +2.4 \times 10^3 \text{ N}$$

COMENTARIOS Este cálculo aproximado muestra simplemente qué tan grandes pueden ser las fuerzas de contacto. Un buen golfista logra transferir una cantidad de movimiento máxima trasladando el peso desde el pie trasero hacia el pie delantero, transmitiendo la cantidad de movimiento del cuerpo a través del eje y la cabeza del bastón. Esta sincronización, que involucra un movimiento corto de las caderas, es más efectiva que un disparo poderoso exclusivamente por los brazos y hombros. Siguiendo de principio a fin con la oscilación, asegura que el movimiento no se retrase en el instante crucial de impacto.

PREGUNTA 6.1 ¿Qué rapidez promedio del bastón duplicaría la fuerza promedio?

EJERCICIO 6.1 Una pelota de 0.150 kg, lanzada con una rapidez de 40.0 m/s, es golpeada directamente de regreso al lanzador con una rapidez de 50.0 m/s. **a)** ¿Cuál es el impulso entregado por el bate a la pelota? **b)** Halle la magnitud de la fuerza promedio ejercida por el bate sobre la pelota si ambos están en contacto por 2.00×10^{-3} s.

RESPUESTA a) 13.5 kg · m/s b) 6.75 kN

EJEMPLO 6.2

¿Qué tan buenos son los amortiguadores?

OBJETIVO Hallar un impulso y evalúe una fuerza en la colisión de un objeto en movimiento con un objeto inmóvil.

PROBLEMA En una prueba de choque, un automóvil de 1.50×10^3 kg de masa colisiona con un muro y rebota como en la figura 6.4a. Las velocidades inicial y final del automóvil son $v_i = -15.0$ m/s y $v_f = 2.60$ m/s, respectivamente. Si la colisión dura 0.150 s, halle **a)** el impulso entregado al automóvil debido a la colisión y **b)** el tamaño y dirección de la fuerza promedio ejercida sobre el automóvil.

ESTRATEGIA Este problema es parecido al ejemplo anterior, excepto que las dos cantidades de movimiento inicial y final son diferentes de cero. Encuentre las cantidades de movimiento y sustituya en el teorema impulso-cantidad de movimiento, ecuación 6.6, resolviendo para F_{prom} .

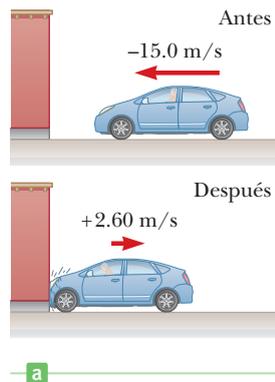


Figura 6.4 (Ejemplo 6.2) **a)** Esta cantidad de movimiento del automóvil cambia como resultado de su colisión con el muro. **b)** En una prueba de choque (una colisión inelástica), gran parte de la energía cinética inicial del automóvil se transforma en la energía tomada para dañar el vehículo.

SOLUCIÓN

a) Determine el impulso entregado al automóvil.

Calcule las cantidades de movimiento inicial y final del automóvil:

$$p_i = mv_i = (1.50 \times 10^3 \text{ kg})(-15.0 \text{ m/s}) \\ = -2.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$p_f = mv_f = (1.50 \times 10^3 \text{ kg})(+2.60 \text{ m/s}) \\ = +0.390 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

El impulso es sólo la diferencia entre las cantidades de movimiento inicial y final:

$$I = p_f - p_i \\ = +0.390 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} - (-2.25 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) \\ I = 2.64 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

b) Encuentre la fuerza promedio ejercida sobre el automóvil.

Aplique la ecuación 6.6: el teorema impulso-cantidad de movimiento:

$$F_{\text{prom}} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2.64 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{0.150 \text{ s}} = +1.76 \times 10^5 \text{ N}$$

COMENTARIOS Cuando el automóvil no rebota en la pared, la fuerza promedio ejercida sobre el automóvil es más pequeña que el valor calculado. Con una cantidad de movimiento final igual a cero, el automóvil se somete a un cambio más pequeño en la cantidad de movimiento.

PREGUNTA 6.2 Cuando una persona está involucrada en un accidente automovilístico, ¿por qué es más probable una lesión mayor en una colisión de frente en comparación con el golpe por atrás? Responda utilizando los conceptos de velocidad relativa, cantidad de movimiento y fuerza promedio.

EJERCICIO 6.2 Suponga que el automóvil no rebota en la pared, pero el intervalo de tiempo de la colisión permanece en 0.150 s. En este caso, la velocidad final del automóvil es cero. Encuentre la fuerza promedio ejercida sobre el automóvil.

RESPUESTA $+1.50 \times 10^5 \text{ N}$

Lesiones en colisiones automovilísticas

Las principales lesiones que se presentan en una persona que se golpea en el interior de un automóvil en un choque son daño al cerebro, fractura de huesos y trauma a la piel, vasos sanguíneos y órganos internos. En este caso, comparamos los umbrales conocidos en forma algo imprecisa a causa de una lesión con fuerzas representativas y aceleraciones experimentadas en un choque de automóvil.

Una fuerza de casi 90 kN (20 000 lb) que comprime la tibia puede ocasionar la fractura. Aunque la fuerza de rompimiento varía con el hueso considerado, es posible tomar este valor como el umbral de fuerza para la fractura. Es bien conocido que la aceleración rápida de la cabeza, incluso sin fractura de cráneo, puede ser fatal. Cálculos aproximados demuestran que aceleraciones de cargas de 150g experimentadas por casi 4 ms o 50g por 60 ms son fatales en 50% de las veces. Con frecuencia tales lesiones por aceleraciones rápidas resultan en daño neural a la médula espinal donde los nervios entran a la base del cerebro. El umbral de daño a la piel, vasos sanguíneos y órganos internos es posible evaluarlo a partir de la información de impacto de todo el cuerpo, donde la fuerza se distribuye de manera uniforme en toda el área frontal de la superficie de 0.7 a 0.9 m². Esta información muestra que si la colisión dura por lo menos aproximadamente 70 ms, una persona sobrevivirá si la presión de impacto en el cuerpo completo (fuerza por cada unidad de área) es menos de $1.9 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (28 lb/pulg²). En 50% de los casos resultan muertos cuando la presión de impacto en todo el cuerpo alcanza $3.4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ (50 lb/pulg²).

Con los datos anteriores, se pueden evaluar las fuerzas y aceleraciones en un choque de autos representativo y ver cómo los cinturones de seguridad, bolsas de aire e interiores acojinados pueden reducir la posibilidad de muerte o lesiones graves en una colisión. Considere una colisión representativa que involucra un pasajero de 75 kg sin utilizar el cinturón de seguridad, viajando a 27 m/s (60 mi/h) que llega al reposo en aproximadamente 0.010 s después de golpear un tablero sin acojinar. Aplicando $F_{\text{prom}} \Delta t = mv_f - mv_i$, encontramos que

$$F_{\text{prom}} = \frac{mv_f - mv_i}{\Delta t} = \frac{0 - (75 \text{ kg})(27 \text{ m/s})}{0.010 \text{ s}} = -2.0 \times 10^5 \text{ N}$$

BIO APLICACIÓN

Lesión a los pasajeros en colisiones de automóvil

y

$$a = \left| \frac{\Delta v}{\Delta t} \right| = \frac{27 \text{ m/s}}{0.010 \text{ s}} = 2700 \text{ m/s}^2 = \frac{2700 \text{ m/s}^2}{9.8 \text{ m/s}^2} g = 280g$$

Si suponemos que el pasajero choca contra el tablero y el parabrisas de tal modo que la cabeza y el pecho, con un área de superficie combinada de 0.5 m^2 , experimentan la fuerza, encontramos una presión de cuerpo completo de

$$\frac{F_{\text{prom}}}{A} = \frac{2.0 \times 10^5 \text{ N}}{0.5 \text{ m}^2} \cong 4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

Observamos que la fuerza, la aceleración y la presión de cuerpo completo todas *exceden* el umbral de muerte o fractura de huesos y que una colisión sin protección a 60 mi/h es sin duda casi fatal.

¿Qué se puede hacer para reducir o eliminar la posibilidad de muerte en un choque automovilístico? El factor más importante es el tiempo de colisión o el tiempo que le toma a la persona llegar al reposo. Si este tiempo puede ser incrementado de 10 a 100 veces el valor de 0.01 s para una colisión fuerte, la oportunidad de sobrevivir en un choque automovilístico es mucho mayor a causa del incremento en Δt que hace a la fuerza de contacto de 10 a 100 veces menor. Los cinturones de seguridad sujetan a una persona de tal modo que llega al reposo en casi la misma cantidad de tiempo que le toma al auto detenerse, significativamente casi 0.15 s . Esto incrementa el tiempo de colisión efectivo en un orden de magnitud. La figura 6.5 exhibe la fuerza medida en un automóvil en términos del tiempo para un choque automovilístico.

Las bolsas de aire también incrementan el tiempo de colisión, absorben energía del cuerpo conforme la fuerza disminuye rápidamente y se dispersa por el cuerpo en un área de casi 0.5 m^2 ; esto previene heridas de penetración y fracturas. Las bolsas de aire deben desplegarse muy rápido (en menos de 10 ms) con la finalidad de detener un humano viajando a 27 m/s antes que llegue al reposo contra la columna de dirección a 0.3 m de distancia. Para lograr este despliegue rápido, los acelerómetros envían una señal de descarga a un banco de capacitores (dispositivos que almacenan carga eléctrica), que después encienden un explosivo; en ese momento la bolsa de aire se llena rápidamente con gas. La carga eléctrica para ignición se almacena en capacitores para asegurarse que la bolsa de aire continúa funcionando en caso de daño a la batería o el sistema eléctrico del automóvil en una colisión grave.

La reducción importante en fuerzas potencialmente fatales, aceleraciones y presiones a niveles tolerables mediante el uso simultáneo de cinturones de seguridad y bolsas de aire se resume como sigue. Si una persona de 75 kg viajando a 27 m/s es detenido mediante un cinturón de seguridad en 0.15 s , experimenta una fuerza promedio de 9.8 kN , una aceleración promedio de $18g$ y una presión de cuerpo completo de $2.8 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ para un área de contacto de 0.5 m^2 . Estos valores son aproximadamente de un orden de magnitud menor que los valores previamente evaluados para una persona sin protección y lo suficiente por debajo de los umbrales para lesiones peligrosas para la vida.

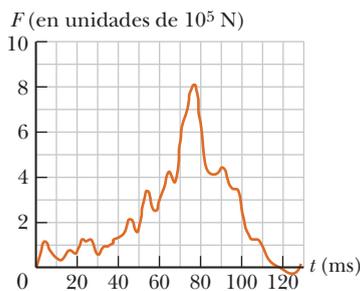


Figura 6.5 Fuerza en un automóvil en términos del tiempo para una colisión representativa.

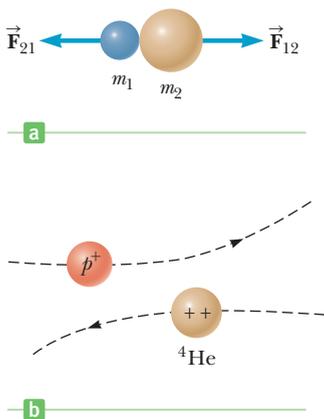


Figura activa 6.6 a) Una colisión entre dos objetos que resulta a causa del contacto directo. b) Una colisión entre dos objetos con carga (en este caso, un protón y un núcleo de helio).

6.2 Conservación de la cantidad de movimiento

Cuando se presenta una colisión en un sistema aislado, la cantidad de movimiento total del sistema no cambia con el paso del tiempo. En lugar de eso, permanece constante tanto en magnitud como en dirección. Las cantidades de movimiento de objetos individuales en el sistema pueden cambiar, pero la suma vectorial de *todas* las cantidades de movimiento no cambiará. Por lo tanto, se dice que la cantidad de movimiento total se debe *conservar*. En esta sección, veremos cómo las leyes de movimiento conducen a esta importante ley de conservación.

Es posible que una colisión sea el resultado del contacto físico entre dos objetos, como se ilustra en la figura activa 6.6a. Éste es un suceso macroscópico común, como cuando se golpean entre sí un par de bolas de billar o una pelota de béisbol y un bate. Por el contrario, a causa del contacto a escala submicroscópica es difícil definir exactamente, así que se debe generalizar la noción de *colisión* a esa escala. Las fuerzas entre dos objetos surgen de la interacción electrostática de los electrones en los átomos superficiales de los objetos.

Como se analizará en el capítulo 15, las cargas eléctricas son positivas o negativas. Cargas con el mismo signo se repelen entre sí, mientras que cargas con signos opuestos se atraen entre sí. Para comprender la diferencia entre colisiones macroscópicas y microscópicas, considere la colisión entre dos cargas positivas, como se muestra en la figura activa 6.6b). Dado que las dos partículas en la figura tienen cargas positivas, se repelen entre sí. Durante tal colisión microscópica, las partículas no necesitan tocarse en el sentido normal con la finalidad de interactuar y transferir cantidad de movimiento.

La figura activa 6.7 muestra un sistema aislado de dos partículas antes y después de que colisionan. Por “aislado” entendemos que no existen fuerzas externas, como la fuerza gravitacional o de fricción, que actúen sobre el sistema. Antes de la colisión, las velocidades de las dos partículas son \vec{v}_{1i} y \vec{v}_{2i} ; después de la colisión, las velocidades son \vec{v}_{1f} y \vec{v}_{2f} . El teorema impulso-cantidad de movimiento aplicado a m_1 será

$$\vec{F}_{21} \Delta t = m_1 \vec{v}_{1f} - m_1 \vec{v}_{1i}$$

De la misma forma, para m_2 tenemos

$$\vec{F}_{12} \Delta t = m_2 \vec{v}_{2f} - m_2 \vec{v}_{2i}$$

donde \vec{F}_{21} es la fuerza promedio ejercida por m_2 sobre m_1 durante la colisión, y \vec{F}_{12} es la fuerza promedio ejercida por m_1 sobre m_2 durante la colisión, como en la figura 6.6a).

Se utilizan los valores promedio para \vec{F}_{21} y \vec{F}_{12} incluso si se piensa que es posible que las fuerzas verdaderas varíen de una manera complicada con el tiempo, como el caso en la figura 6.8. La tercera ley de Newton establece que todas las veces estas dos fuerzas son iguales en magnitud y opuestas en dirección: $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$. Además, las dos fuerzas actúan en el mismo lapso. Como resultado, tenemos

$$\vec{F}_{21} \Delta t = -\vec{F}_{12} \Delta t$$

o bien

$$m_1 \vec{v}_{1f} - m_1 \vec{v}_{1i} = -(m_2 \vec{v}_{2f} - m_2 \vec{v}_{2i})$$

después de sustituir las expresiones obtenidas para \vec{F}_{21} y \vec{F}_{12} . Esta ecuación puede ser reordenada para dar el siguiente resultado importante:

$$m_1 \vec{v}_{1i} + m_2 \vec{v}_{2i} = m_1 \vec{v}_{1f} + m_2 \vec{v}_{2f} \quad [6.7]$$

Este resultado es un caso especial de la ley de **conservación de la cantidad de movimiento** y es verdadera para sistemas aislados que contienen cualquier número de objetos interactuando.

Cuando no hay una fuerza externa neta que actúe sobre un sistema, el impulso total del sistema se mantiene constante en el tiempo.

Una característica importante de aplicar esta ley de conservación es la definición de sistema aislado. El salto ascendente de una animadora desde el reposo podría parecer que viola la conservación de cantidad de movimiento, debido a que originalmente su cantidad de movimiento es cero y repentinamente está dejando la superficie del piso con velocidad \vec{v} . El defecto en este razonamiento se encuentra en el hecho de que la animadora no está en un sistema aislado. En el salto, ejerce una fuerza hacia abajo sobre la Tierra,



Detrás del sistema de propulsión de un calamar está el principio de conservación de la cantidad de movimiento. Se impulsa mediante la expulsión de agua a una alta velocidad.

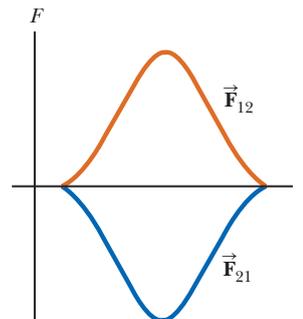
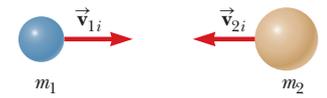


Figura 6.8 Fuerza como una función del tiempo para las dos partículas que colisionan en las figuras 6.6a y 6.7. Observe que $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$.

Antes de la colisión, estas partículas tienen velocidades iguales pero opuestas.



a

Después de la colisión, ambas velocidades cambian, pero la cantidad total de movimiento del sistema permanece igual.



b

Figura activa 6.7 Colisión directa entre dos objetos antes y después. La cantidad de movimiento de cada objeto cambia como resultado de la colisión, pero la cantidad de movimiento total del sistema permanece constante. Observe que la magnitud del cambio en la velocidad de la partícula más ligera es mayor que la de la partícula más pesada, lo cual es cierto en general.

◀ Conservación de la cantidad de movimiento

BIO APLICACIÓN

Conservación de la cantidad de movimiento y propulsión de un calamar

Tip 6.1 ¡Se aplica la conservación de la cantidad de movimiento a un sistema!

La cantidad de movimiento de un sistema aislado se conserva, no necesariamente la cantidad de movimiento de una partícula dentro de ese sistema, ya que es posible que otras partículas estén interactuando con él. *Sólo* aplique la conservación de cantidad de movimiento a un sistema aislado.

cambiando su cantidad de movimiento. De cualquier modo, este cambio en la cantidad de movimiento de la Tierra no es sensible debido a la enorme masa de la Tierra comparada con la de la animadora. Cuando se define que el sistema es *la animadora y la Tierra*, se conserva la cantidad de movimiento.

Acción y reacción, junto con el intercambio de cantidad de movimiento entre dos objetos, es responsable del fenómeno conocido como *retroceso*. Cualquiera sabe que al lanzar una pelota mientras se encuentra de pie, sin apoyar sus pies contra la Tierra, es una buena manera para caer hacia atrás. Esta reacción es un ejemplo de retroceso; también sucede cuando dispara un arma o tira una flecha. La conservación de cantidad de movimiento proporciona una manera directa de calcular tales efectos, como el ejemplo que se muestra a continuación.

■ EJEMPLO 6.3 El arquero

OBJETIVO Calcular la velocidad de retroceso aplicando conservación de cantidad de movimiento.

PROBLEMA Un arquero está de pie y en reposo sobre hielo sin fricción. La masa combinada del arquero y el arco es 60.0 kg. (Véase la figura 6.9.) a) Si el arquero dispara una flecha de 0.0300 kg horizontalmente a 50.0 m/s en la dirección positiva del eje x , ¿con qué velocidad se mueve el arquero a través del hielo después que dispara la flecha? b) A continuación, dispara una flecha idéntica a la misma velocidad con respecto al suelo, pero en un ángulo de 30.0° sobre la horizontal. Encuentre su nueva velocidad. c) Estime la fuerza normal que actúa sobre el arquero cuando la segunda flecha es acelerada por la cuerda del arco. Suponga una longitud de tiro de 0.800 m.

ESTRATEGIA Para resolver el inciso a), coloque la ecuación de la conservación de movimiento en la dirección horizontal y resuelva para la velocidad final del arquero. El sistema del arquero (incluyendo el arco) y la flecha no es aislado, ya que las fuerzas de gravitación y normal actúan en él. De cualquier modo, estas fuerzas son perpendiculares al movimiento del sistema y, por lo tanto, no hacen trabajo sobre él, por ende, puede aplicarse la conservación de movimiento. En el inciso b), la conservación de la cantidad de movimiento se puede aplicar de nuevo, dejando de lado el efecto diminuto de la gravedad sobre la flecha durante su lanzamiento. Esta vez no es una velocidad inicial cero. El inciso c) requiere el uso del teorema de impulso-cantidad de movimiento y estimar el tiempo, que puede llevarse a cabo con la balística simple.



Figura 6.9 (Ejemplo 6.3) Un arquero dispara una flecha horizontalmente hacia la derecha. Debido a que está de pie sobre hielo sin fricción, se deslizará hacia la izquierda a través del hielo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad del arquero sobre el hielo.

Escriba la ecuación de la conservación de cantidad de movimiento para la dirección x :

$$p_{ix} = p_{fx}$$

Sean m_1 y v_{1f} la masa del arquero y su velocidad después de disparar la flecha, respectivamente. Sean m_2 y v_{2f} la masa y la velocidad de la flecha. Ambas velocidades son en la dirección x . Sustituya $p_i = 0$ y las expresiones para la cantidad de movimiento final:

$$0 = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

Sustituya $m_1 = 59.97$ kg, $m_2 = 0.0300$ kg y $v_{2f} = 50.0$ m/s y resuelva para v_{1f} :

$$v_{1f} = -\frac{m_2}{m_1} v_{2f} = -\left(\frac{0.0300 \text{ kg}}{59.97 \text{ kg}}\right)(50.0 \text{ m/s})$$

$$v_{1f} = -0.0250 \text{ m/s}$$

b) Calcule la velocidad del arquero después de disparar la segunda flecha en un ángulo de 30.0° sobre la horizontal.

Escriba la componente x de la ecuación de cantidad de movimiento de nuevo con m_1 como la masa del arquero después de disparar la primer flecha del inciso a) y m_2 la masa de la segunda flecha al lado:

$$m_1 v_{1i} = (m_1 - m_2) v_{1f} + m_2 v_{2f} \cos \theta$$

Resuelva para v_{1f} , la velocidad final del arquero, y sustituya:

$$v_{1f} = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} v_{1i} - \frac{m_2}{(m_1 - m_2)} v_{2f} \cos \theta$$

$$= \left(\frac{59.97 \text{ kg}}{59.94 \text{ kg}}\right)(-0.0250 \text{ m/s}) - \left(\frac{0.0300 \text{ kg}}{59.94 \text{ kg}}\right)(50.0 \text{ m/s}) \cos(30.0^\circ)$$

$$v_{1f} = -0.0467 \text{ m/s}$$

c) Calcule la fuerza normal promedio que actúa sobre el arquero así como en la flecha cuando es acelerada por la cuerda del arco.

Utilice la cinemática en una dimensión para calcular la aceleración de la flecha:

Resuelva para la aceleración y sustituya los valores haciendo $v = v_{2f}$, la velocidad final de la flecha:

Encuentre el tiempo en el que se acelera la flecha usando $v = at + v_0$:

Escriba la componente y del teorema impulso-cantidad de movimiento:

$$v^2 - v_0^2 = 2a\Delta x$$

$$a = \frac{v_{2f}^2 - v_0^2}{2\Delta x} = \frac{(50.0 \text{ m/s})^2 - 0}{2(0.800 \text{ m})} = 1.56 \times 10^3 \text{ m/s}^2$$

$$t = \frac{v_{2f} - v_0}{a} = \frac{50.0 \text{ m/s} - 0}{1.56 \times 10^3 \text{ m/s}^2} = 0.0320 \text{ s}$$

$$F_{y,\text{prom}} \Delta t = \Delta p_y$$

$$F_{y,\text{prom}} = \frac{\Delta p_y}{\Delta t} = \frac{m_2 v_{2f} \sin \theta}{\Delta t}$$

$$F_{y,\text{prom}} = \frac{(0.0300 \text{ kg})(50.0 \text{ m/s}) \sin(30.0^\circ)}{0.0320 \text{ s}} = 23.4 \text{ N}$$

La fuerza normal promedio está dada por el peso del arquero más la fuerza de reacción R de la flecha sobre el arquero:

$$\sum F_y = n - mg - R = 0$$

$$n = mg + R = (59.94 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) + (23.4 \text{ N}) = 6.11 \times 10^2 \text{ N}$$

COMENTARIOS El signo negativo en v_{1f} indica que el arquero se mueve en la dirección opuesta al movimiento de la flecha, de acuerdo con la tercera ley de Newton. Debido a que el arquero es más pesado que la flecha, su aceleración y, por lo tanto, su velocidad son mucho más pequeñas que la aceleración y velocidad de la flecha. Un punto de vista técnico: la segunda flecha se disparó a la misma velocidad con respecto al suelo, pero debido a que el arquero se estaba moviendo hacia atrás en el tiempo, viajó un poco más rápido que la primera flecha en relación con él. Las velocidades siempre se deben dar en relación con un marco de referencia.

Tenga en cuenta que la conservación de la cantidad de movimiento fue eficaz al conducirnos a una solución en los incisos a) y b). La respuesta final para la fuerza normal es sólo un promedio, porque es poco probable que la fuerza ejercida sobre la flecha sea constante. Si el hielo realmente es sin fricción, el arquero tendría dificultad para pararse. En general, el coeficiente de fricción estática del hielo es más que suficiente para evitar el deslizamiento en respuesta a tales retrocesos pequeños.

PREGUNTA 6.3 ¿Disparar una flecha más pesada necesariamente incrementaría la velocidad de retroceso? Explique, utilizando el resultado del examen rápido 6.1.

EJERCICIO 6.3 Un hombre de 70.0 kg y una mujer de 55.0 kg sosteniendo un bolso de 2.50 kg están frente a frente sobre patines de hielo. a) Si la mujer empuja al hombre hacia atrás de tal modo que su velocidad final es 1.50 m/s, ¿con qué fuerza promedio ella lo empuja a él, suponiendo que están en contacto por 0.500 s? b) ¿Con qué velocidad retrocede ella? c) Si ahora ella lanza su bolso de 2.50 kg sobre él en un ángulo de 20.0° con la horizontal y a 4.20 m/s con respecto al suelo, ¿cuál es su velocidad final?

RESPUESTAS a) $2.10 \times 10^2 \text{ N}$ b) 1.83 m/s c) 2.09 m/s

Examen rápido

6.2 Un chico que está de pie en el extremo de una balsa flotante que permanece inmóvil relativa a la orilla camina hacia el extremo opuesto de la balsa, alejándose de la orilla. Como una consecuencia, la balsa a) permanece inmóvil, b) se mueve alejándose de la orilla, o bien c) se mueve hacia la orilla. (*Sugerencia:* Aplique la conservación de cantidad de movimiento.)

6.3 Colisiones

Hemos visto que para cualquier tipo de colisión, la cantidad de movimiento total del sistema momentos antes de la colisión es igual a la cantidad de movimiento precisamente después de la colisión, siempre que sea posible considerar que el sistema es aislado. La energía cinética total, por una parte, generalmente no se conserva en una colisión ya que algo de la energía cinética se convierte en energía interna, energía sonora y el trabajo necesario

Tip 6.2 Cantidad de movimiento y energía cinética en colisiones

La cantidad de movimiento de un sistema aislado se conserva en todas las colisiones. Sin embargo, la energía cinética de un sistema aislado se conserva sólo cuando la colisión es elástica.

Tip 6.3 Colisiones inelásticas contra perfectamente inelásticas

Si las partículas que colisionan se unen, la colisión es perfectamente inelástica. Si rebotan (y no se conserva la energía cinética), la colisión es inelástica.

BIO APLICACIÓN

Prueba de glaucoma

para deformar de manera permanente los objetos involucrados, como los automóviles en un choque. **Una colisión inelástica se define como una colisión en la que la cantidad de movimiento se conserva, pero la energía cinética no.** La colisión de una pelota de goma con una superficie dura es inelástica, debido a que algo de la energía cinética se pierde cuando la pelota se deforma durante el contacto con la superficie. **Cuando dos objetos colisionan y quedan unidos, la colisión se conoce como perfectamente inelástica.** Por ejemplo, si dos pedazos de masilla colisionan, quedan pegados y se mueven con alguna velocidad común después de la colisión. Si un meteorito choca contra la Tierra, se hunde en ésta y la colisión se considera perfectamente inelástica. Sólo en circunstancias muy especiales toda la energía cinética inicial se pierde en una colisión perfectamente inelástica.

Una colisión elástica se define como una en la que se conservan la energía cinética y la cantidad de movimiento. Las colisiones de bolas de billar y de moléculas de aire con las paredes de un recipiente a temperaturas normales son altamente elásticas. Las colisiones macroscópicas por ejemplo entre bolas de billar son sólo aproximadamente elásticas, a causa de que se presenta cierta pérdida de energía cinética, por ejemplo, en el sonido que se produce cuando dos bolas se golpean. No obstante, las colisiones elásticas se presentan entre partículas atómicas y subatómicas. Las colisiones perfectamente elásticas e inelásticas son casos *límite*, la mayoría de las colisiones se encuentran dentro de la escala entre ellas.

Como una aplicación práctica, se utiliza una colisión inelástica para detectar glaucoma, una enfermedad en la que la presión se acumula dentro del ojo y conduce a la ceguera al dañar las células de la retina. En esta aplicación, profesionales de la medicina utilizan un dispositivo que se le conoce como *tonómetro* para medir la presión dentro del ojo. Este dispositivo libera un soplo de aire contra la superficie externa del ojo y mide la rapidez del aire después de la reflexión desde el ojo. A presión normal, el ojo es ligeramente esponjoso, y el pulso es reflejado con rapidez baja. Cuando la presión dentro del ojo se incrementa, la superficie externa se hace más rígida, y la rapidez del pulso de reflexión se incrementa. De esta manera, la rapidez del soplo reflejado puede medir la presión interna del ojo.

Los tipos de colisiones se pueden resumir como sigue:

- En una colisión elástica, se conservan la cantidad de movimiento y la energía cinética.
- En una colisión inelástica, se conserva la cantidad de movimiento, pero la energía cinética no.
- En una colisión *perfectamente* inelástica, se conserva la cantidad de movimiento, la energía cinética no, y los dos objetos quedan unidos después de la colisión, de tal modo que sus velocidades al final son la misma.

En el resto de esta sección, se tratarán colisiones perfectamente inelásticas y colisiones elásticas en una dimensión.

Examen rápido

6.3 Un automóvil y un camión grande que viajan con la misma rapidez, colisionan de frente y quedan unidos. ¿Cuál vehículo se somete al mayor cambio en la magnitud de su cantidad de movimiento? a) el automóvil, b) el camión, c) el cambio en la magnitud de cantidad de movimiento es la misma para ambos, d) imposible de determinar sin más información.

Colisiones perfectamente inelásticas

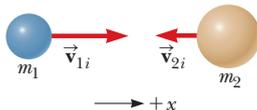
Tome en cuenta dos objetos que tienen masas m_1 y m_2 moviéndose con componentes de velocidad inicial desconocida v_{1i} y v_{2i} a lo largo de una línea recta, como en la figura activa 6.10. Si los dos objetos colisionan de frente, se unen y se mueven con una componente de velocidad común v_f después de la colisión, entonces la colisión es perfectamente inelástica. Debido a que la cantidad de movimiento total del sistema aislado de dos objetos antes de la colisión es igual a la cantidad de movimiento total del sistema objeto combinado después de la colisión, se puede resolver para la velocidad final utilizando sólo la conservación de la cantidad de movimiento:

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_f \quad [6.8]$$

$$v_f = \frac{m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i}}{m_1 + m_2} \quad [6.9]$$

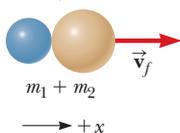
Colisión elástica ►
Colisión inelástica ►

Antes de una colisión perfectamente inelástica los objetos se mueven independientemente.



a

Después de una colisión perfectamente inelástica los objetos permanecen en contacto. La cantidad de movimiento del sistema se conserva, **no** así la energía del sistema.



b

Figura activa 6.10

a) Antes y b) después de una colisión frontal perfectamente inelástica entre dos objetos.

Es importante observar que v_{1i} , v_{2i} y v_f representan los componentes en x de los vectores de velocidad; también es necesario tener cuidado al incorporar sus valores conocidos, particularmente con los signos. Por ejemplo, en la figura activa 6.10, v_{1i} tendría un valor positivo (m_1 moviéndose hacia la derecha), mientras que v_{2i} tendría un valor negativo (m_2 moviéndose hacia la izquierda). Una vez que estos valores son ingresados, la ecuación 6.9 se puede utilizar para encontrar la velocidad final correcta, como se muestra en los ejemplos 6.4 y 6.5.

■ EJEMPLO 6.4 Una camioneta contra un compacto

OBJETIVO Aplicar conservación de la cantidad de movimiento a una colisión inelástica en una dimensión.

PROBLEMA Una camioneta con masa de 1.80×10^3 kg viaja con rumbo al este a $+15.0$ m/s, mientras que un automóvil compacto con masa de 9.00×10^2 kg viaja con rumbo al oeste a -15.0 m/s. (Véase la figura 6.11.) Los automóviles colisionan de frente y se enganchan. a) Calcule la velocidad de los autos enganchados después de la colisión. b) Encuentre el cambio en la velocidad de cada automóvil. c) Determine el cambio en la energía cinética del sistema constituido por los dos automóviles.

ESTRATEGIA La cantidad de movimiento total de los autos antes de la colisión, p_i , es igual a la cantidad de movimiento total después de la colisión, p_f , si se omite la fricción y se supone que los dos autos forman un sistema aislado. (Esto se conoce como “aproximación de impulso.”) Resuelva la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para la velocidad final de los autos enganchados. Una vez que las velocidades están disponibles, las otras partes pueden resolverse por sustitución.

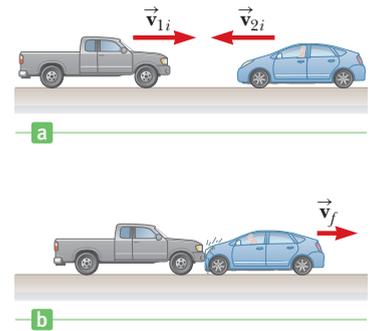


Figura 6.11 (Ejemplo 6.4)

SOLUCIÓN

a) Calcule la velocidad final después de la colisión.

Asigne a m_1 y v_{1i} como la masa y la velocidad inicial de la camioneta, mientras que m_2 y v_{2i} corresponden al compacto.

Aplique conservación de cantidad de movimiento:

Sustituya los valores y resuelva para la velocidad final, v_f :

$$p_i = p_f$$

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_f$$

$$(1.80 \times 10^3 \text{ kg})(15.0 \text{ m/s}) + (9.00 \times 10^2 \text{ kg})(-15.0 \text{ m/s})$$

$$= (1.80 \times 10^3 \text{ kg} + 9.00 \times 10^2 \text{ kg}) v_f$$

$$v_f = +5.00 \text{ m/s}$$

b) Calcule el cambio de velocidad para cada automóvil.

Cambio de velocidad de la camioneta:

$$\Delta v_1 = v_f - v_{1i} = 5.00 \text{ m/s} - 15.0 \text{ m/s} = -10.0 \text{ m/s}$$

Cambio de velocidad del auto compacto:

$$\Delta v_2 = v_f - v_{2i} = 5.00 \text{ m/s} - (-15.0 \text{ m/s}) = 20.0 \text{ m/s}$$

c) Determine el cambio de energía cinética del sistema.

Encuentre la energía cinética inicial del sistema:

$$EC_i = \frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2i}^2 = \frac{1}{2} (1.80 \times 10^3 \text{ kg})(15.0 \text{ m/s})^2$$

$$+ \frac{1}{2} (9.00 \times 10^2 \text{ kg})(-15.0 \text{ m/s})^2$$

$$= 3.04 \times 10^5 \text{ J}$$

Halle la energía cinética final del sistema y el cambio de energía cinética, ΔEC .

$$EC_f = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_f^2$$

$$= \frac{1}{2} (1.80 \times 10^3 \text{ kg} + 9.00 \times 10^2 \text{ kg})(5.00 \text{ m/s})^2$$

$$= 3.38 \times 10^4 \text{ J}$$

$$\Delta EC = EC_f - EC_i = -2.70 \times 10^5 \text{ J}$$

COMENTARIOS Durante la colisión, el sistema pierde casi 90% de su energía cinética. El cambio de velocidad de la camioneta fue de sólo 10.0 m/s, comparado con el doble del auto compacto. Este ejemplo subraya tal vez la característica más importante de la seguridad de cualquier auto: su masa. La lesión es ocasionada por un cambio en la velocidad, y el vehículo más pesado se somete a un cambio de velocidad más pequeño en un accidente típico.

PREGUNTA 6.4 Si la masa de ambos vehículos fuera duplicada, ¿cómo se afectaría la velocidad final? ¿El cambio en la energía cinética?

(continúa)

EJERCICIO 6.4 Suponga que los mismos vehículos están viajando hacia el este; el auto compacto está delante de la camioneta. El conductor del compacto aplica repentinamente los frenos, reduciendo la velocidad del vehículo a 6.00 m/s. Si la camioneta viaja a 18.0 m/s y choca contra el auto compacto, halle a) la velocidad del sistema a la derecha después de la colisión, suponiendo que los dos vehículos se

enganchan, b) el cambio de velocidad para los dos vehículos y c) el cambio de energía cinética del sistema, desde el instante antes del impacto (cuando el auto compacto viaja a 6.00 m/s) hasta el instante justo después de la colisión.

RESPUESTAS a) 14.0 m/s b) camioneta: $\Delta v_1 = -4.0$ m/s auto compacto: $\Delta v_2 = 8.0$ m/s c) -4.32×10^4 J

EJEMPLO 6.5 El péndulo balístico

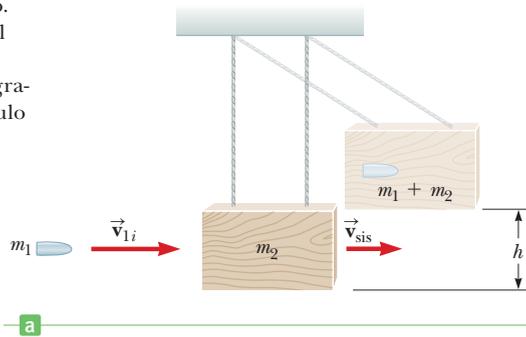
OBJETIVO Combinar los conceptos de conservación de energía y la conservación de cantidad de movimiento en colisiones inelásticas.

PROBLEMA El péndulo balístico (figura 6.12a) es un dispositivo utilizado para medir la velocidad de un proyectil, por ejemplo una bala. Ésta es disparada dentro de un bloque grande de madera que está colgado de ciertos alambres ligeros. La bala es detenida por el bloque, y el sistema completo oscila hasta una altura h . Es posible obtener la velocidad inicial de la bala midiendo h y las dos masas. Como un ejemplo de la técnica, considere que la masa de la bala, m_1 es 5.00 g, la masa del péndulo, m_2 , es 1.000 kg y h es 5.00 cm.

a) Encuentre la velocidad del sistema después de que la bala penetra el bloque. b) Calcule la velocidad inicial de la bala.

ESTRATEGIA Use la conservación de energía para encontrar la velocidad inicial del sistema bloque-bala, etiquetado como v_{sis} . El inciso b) requiere la ecuación de conservación de momento, que puede resolverse con la velocidad inicial del proyectil v_{1i} .

FIGURA 6.12 (Ejemplo 6.5) a) Diagrama de un péndulo balístico. Observe que \vec{v}_{sis} es la velocidad del sistema sólo después de la colisión perfectamente inelástica. b) Fotografía de varios destellos de un péndulo balístico de laboratorio.



SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad del sistema después de que la bala entra en el bloque.

Aplique la conservación de energía al sistema bloque-bala después de la colisión:

Sustituya las expresiones para las energías potencial y cinética. Observe que tanto la energía potencial en la parte inferior como la energía potencial en la parte superior son cero:

Resuelva para la velocidad final del sistema bloque-bala, v_{sis} :

$$(EC + EP)_{\text{después de la colisión}} = (EC + EP)_{\text{superior}}$$

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_{\text{sis}}^2 + 0 = 0 + (m_1 + m_2) gh$$

$$v_{\text{sis}}^2 = 2gh$$

$$v_{\text{sis}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(5.00 \times 10^{-2} \text{ m})}$$

$$v_{\text{sis}} = 0.990 \text{ m/s}$$

b) Calcule la velocidad inicial de la bala.

Escriba la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento y sustituya expresiones:

$$p_i = p_f$$

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = (m_1 + m_2) v_{\text{sis}}$$

$$v_{1i} = \frac{(m_1 + m_2) v_{\text{sis}}}{m_1}$$

$$v_{1i} = \frac{(1.005 \text{ kg})(0.990 \text{ m/s})}{5.00 \times 10^{-3} \text{ kg}} = 199 \text{ m/s}$$

Resuelva para la velocidad inicial de la bala y sustituya valores:

COMENTARIOS Ya que el impacto es inelástico, sería incorrecto igualar la energía cinética inicial de la bala que entra con la energía potencial gravitacional final asociada con la combinación bala-bloque. ¡La energía no se conserva!

PREGUNTA 6.5 Mencione tres formas de energía mecánica que pueden ser disipadas desde el sistema en este experimento.

EJERCICIO 6.5 Una bala con 5.00 g de masa se dispara horizontalmente dentro de un bloque de 2.000 kg unido a un resorte horizontal. Éste tiene una constante de 6.00×10^2 N/m y alcanza una compresión máxima de 6.00 cm. a) Determine la velocidad inicial del sistema bala-bloque. b) Calcule la velocidad de la bala.

RESPUESTA a) 1.04 m/s b) 417 m/s

Examen rápido

6.4 Un objeto de masa m se traslada hacia la derecha con una velocidad v . Colisiona de frente con un objeto de masa $3m$ moviéndose con velocidad $v/3$ en la dirección opuesta. Si los dos objetos se unen, ¿cuál es la velocidad del objeto combinado, de masa $4m$, después de la colisión?

a) 0 b) $v/2$ c) v y d) $2v$

6.5 Una esquiadora utiliza patines de muy baja fricción. Un amigo le lanza un disco volador, en línea recta a lo largo de la cual ella se está deslizando. Describa cada uno de los hechos que siguen como una colisión elástica, una inelástica o una perfectamente inelástica entre la patinadora y el disco volador. a) Atrapa el disco y lo sostiene. b) Intenta atrapar el disco, pero le rebota de sus manos y cae al piso frente a ella. c) Atrapa el disco e inmediatamente lo lanza de regreso con la misma rapidez (relativa al piso) hacia su amigo.

6.6 En una colisión perfectamente inelástica en una dimensión entre dos objetos, ¿qué condición única es necesaria de tal modo que toda la energía cinética original se pierda después de la colisión? a) Los objetos deben tener cantidades de movimiento con la misma magnitud pero direcciones opuestas. b) Los objetos deben tener la misma masa. c) Los objetos deben tener la misma velocidad. d) Los objetos deben tener la misma rapidez, con vectores de velocidad en direcciones opuestas.

Colisiones elásticas

Ahora considere dos objetos que se someten a una **colisión elástica de frente** (figura activa 6.13). En esta situación, **tanto la cantidad de movimiento y la energía cinética del sistema de dos objetos se conservan**. Estas condiciones se pueden escribir como

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} \quad [6.10]$$

y

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2i}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2 \quad [6.11]$$

donde v es positiva si un objeto se mueve a la derecha, y negativo si se mueve a la izquierda.

En un problema representativo que incluye colisiones elásticas, existen dos cantidades desconocidas, y se pueden resolver de manera simultánea las ecuaciones 6.10 y 6.11 para calcularlas. Estas dos ecuaciones son lineal y cuadrática, respectivamente. Otro planteamiento simplifica la ecuación cuadrática y otro la ecuación lineal, que facilita la solución. Cancelando el factor $\frac{1}{2}$ en la ecuación 6.11, la reescribimos como

$$m_1(v_{1i}^2 - v_{1f}^2) = m_2(v_{2f}^2 - v_{2i}^2)$$

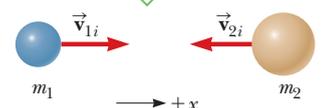
En este caso se han movido los términos que contienen a m_1 a un lado de la ecuación y aquellos que contienen a m_2 , al otro lado. A continuación, se factorizan ambos lados de la ecuación:

$$m_1(v_{1i} - v_{1f})(v_{1i} + v_{1f}) = m_2(v_{2f} - v_{2i})(v_{2f} + v_{2i}) \quad [6.12]$$

Ahora se separan los términos que contienen m_1 y m_2 en la ecuación para la conservación de la cantidad de movimiento (ecuación 6.10), así tenemos

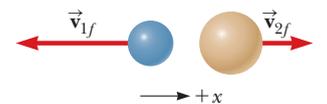
$$m_1(v_{1i} - v_{1f}) = m_2(v_{2f} - v_{2i}) \quad [6.13]$$

Antes de la colisión elástica los objetos se mueven independientemente.



a

Después de la colisión la velocidad de los objetos cambia, pero la energía y la cantidad de movimiento se conservan.



b

Figura activa 6.13 a) Antes y b) después de una colisión elástica de frente entre dos esferas duras. A diferencia de una colisión inelástica, tanto el impulso total como la energía total se conservan.

Para obtener el resultado final, dividimos la ecuación 6.12 entre la ecuación 6.13, lo que nos da como resultado

$$v_{1i} + v_{1f} = v_{2f} + v_{2i}$$

Reacomodando los valores inicial y final en ambos lados de la ecuación, tenemos

$$v_{1i} - v_{2i} = -(v_{1f} - v_{2f}) \quad [6.14]$$

Esta ecuación, en combinación con la ecuación 6.10, será utilizada para resolver problemas relacionados con colisiones elásticas de frente. De acuerdo con la ecuación 6.14, la velocidad relativa de los dos objetos antes de la colisión, $v_{1i} - v_{2i}$, es igual al negativo de la velocidad relativa de los dos objetos después de la colisión, $-(v_{1f} - v_{2f})$. Para interpretar mejor la ecuación, piense que está montado junto a uno de los objetos. Conforme observa la velocidad del otro objeto desde su posición, medirá la velocidad relativa. En su perspectiva de la colisión, el otro objeto se le acerca y rebota, dejando la colisión con la misma velocidad, pero en la dirección opuesta. Esto es precisamente lo que establece la ecuación 6.14.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Colisiones en una dimensión

Se recomienda el procedimiento siguiente para resolver problemas que incluyen colisiones entre dos objetos en una dimensión:

1. **Coordenadas.** Seleccione un eje coordenado que se encuentre a lo largo de la dirección del movimiento.
2. **Diagrama.** Bosqueje el problema, represente los dos objetos como bloques y etiquete los vectores de velocidad y las masas.
3. **Conservación de la cantidad de movimiento.** Escriba una expresión general para la cantidad de movimiento *total* del sistema de dos objetos *antes y después* de la colisión e iguale las dos, como en la ecuación 6.10. En la siguiente línea, complete los valores desconocidos.
4. **Conservación de la energía.** Si la colisión es elástica, escriba una expresión general para la energía total antes y después de la colisión e iguale las dos ecuaciones, como en la ecuación 6.11 o (preferentemente) en la ecuación 6.14. Complete con los valores conocidos. (**Salte esta etapa si la colisión no es perfectamente elástica.**)
5. **Resuelva** las ecuaciones de manera simultánea. Las ecuaciones 6.10 y 6.14 forman un sistema de dos ecuaciones lineales y dos incógnitas. Si se le olvida la ecuación 6.14, en su lugar utilice la ecuación 6.11.

Las etapas 1 y 2 de la estrategia para la solución de problemas por lo general se llevan a cabo en el proceso de esquematizar y etiquetar un diagrama del problema. Sin duda éste es el caso en el siguiente ejemplo, que hace uso de la figura activa 6.13 (página 179). Se precisan otras etapas conforme son aplicadas.

■ EJEMPLO 6.6 A jugar pool

OBJETIVO Resolver una colisión elástica en una dimensión.

PROBLEMA Dos bolas de billar de masa idéntica se mueven una hacia la otra como en la figura activa 6.13, con el eje x positivo a la derecha. Suponga que la colisión entre ellas es perfectamente elástica. Si las velocidades de las bolas al inicio son $+30.0$ cm/s y -20.0 cm/s, ¿cuál es la velocidad de cada bola después de la colisión? Suponga que la fricción y la rotación no son importantes.

ESTRATEGIA La solución de este problema es cuestión de resolver dos ecuaciones: la de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de energía, para dos incógnitas, las velocidades de las dos bolas al final. En lugar de utilizar la ecuación 6.11 para la conservación de energía, utilice la ecuación 6.14, que es lineal, y por esto es más fácil de manejar.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. Ya que $m_1 = m_2$, se pueden eliminar las masas, después sustituya $v_{1i} = +30.0$ cm/s y $v_{2i} = -20.0$ cm/s (etapa 3).

$$\begin{aligned} m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} &= m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} \\ 30.0 \text{ cm/s} + (-20.0 \text{ cm/s}) &= v_{1f} + v_{2f} \\ \text{(1)} \quad 10.0 \text{ cm/s} &= v_{1f} + v_{2f} \end{aligned}$$

A continuación, aplique la conservación de energía en la forma de la ecuación 6.14 (etapa 4):

Ahora resuelva las ecuaciones (1) y (3) simultáneamente sustituya la respuesta para v_{2f} en la ecuación (1) (etapa 5):

Sustituya la respuesta para v_{2f} en la ecuación (1).

$$(2) \quad v_{1i} - v_{2i} = -(v_{1f} - v_{2f})$$

$$30.0 \text{ cm/s} - (-20.0 \text{ cm/s}) = v_{2f} - v_{1f}$$

$$(3) \quad 50.0 \text{ cm/s} = v_{2f} - v_{1f}$$

$$10.0 \text{ cm/s} + 50.0 \text{ cm/s} = (v_{1f} + v_{2f}) + (v_{2f} - v_{1f})$$

$$60.0 \text{ cm/s} = 2v_{2f} \rightarrow v_{2f} = 30.0 \text{ m/s}$$

$$10.0 \text{ cm/s} = v_{1f} + 30.0 \text{ m/s} \rightarrow v_{1f} = -20.0 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Observe que las bolas intercambian velocidades casi como si hubieran pasado una a través de la otra. Esto siempre es el caso cuando dos objetos de igual masa se someten a una colisión elástica.

PREGUNTA 6.6 En este ejemplo, ¿es posible ajustar las velocidades iniciales de las bolas de tal modo que las dos estén en reposo después de la colisión? Explique.

EJERCICIO 6.6 Calcule la velocidad final de las dos bolas si aquella con velocidad inicial $v_{2i} = -20.0 \text{ cm/s}$ tiene una masa igual a un medio que de la bola con velocidad inicial $v_{1i} = +30.0 \text{ cm/s}$.

RESPUESTA $v_{1f} = -3.33 \text{ cm/s}$; $v_{2f} = +46.7 \text{ cm/s}$

EJEMPLO 6.7 Dos bloques y un resorte

OBJETIVO Resolver una colisión elástica que incluye energía potencial elástica.

PROBLEMA Un bloque de masa $m_1 = 1.60 \text{ kg}$, inicialmente moviéndose a la derecha con una velocidad de $+4.00 \text{ m/s}$ sobre una pista horizontal sin fricción, colisiona con un resorte sin masa unido a un segundo bloque de masa $m_2 = 2.10 \text{ kg}$ moviéndose a la izquierda con una velocidad de -2.50 m/s , como se muestra en la figura 6.14a. El resorte tiene una constante elástica de $6.00 \times 10^2 \text{ N/m}$. **a)** Determine la velocidad del bloque 2 en el instante cuando el bloque 1 se mueve a la derecha con una velocidad de $+3.00 \text{ m/s}$, como en la figura 6.14b. **b)** Encuentre la máxima compresión del resorte.

ESTRATEGIA Identifique el sistema como los dos bloques y el resorte. A continuación, escriba las ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento y resuelva para la velocidad final del bloque 2, v_{2f} . Después utilice conservación de energía para encontrar la compresión del resorte.

SOLUCIÓN

a) Calcule la velocidad v_{2f} cuando el bloque 1 tiene velocidad $+3.00 \text{ m/s}$.

Escriba la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento para el sistema y resuelva para v_{2f} :

$$(1) \quad m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f}$$

$$v_{2f} = \frac{m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} - m_1 v_{1f}}{m_2}$$

$$= \frac{(1.60 \text{ kg})(4.00 \text{ m/s}) + (2.10 \text{ kg})(-2.50 \text{ m/s}) - (1.60 \text{ kg})(3.00 \text{ m/s})}{2.10 \text{ kg}}$$

$$v_{2f} = -1.74 \text{ m/s}$$

b) Determine la compresión del resorte.

Utilice la conservación de la energía para el sistema, observando que la energía potencial se almacena en el resorte cuando se comprime una distancia x :

$$E_i = E_f$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2i}^2 + 0 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2 + \frac{1}{2} kx^2$$

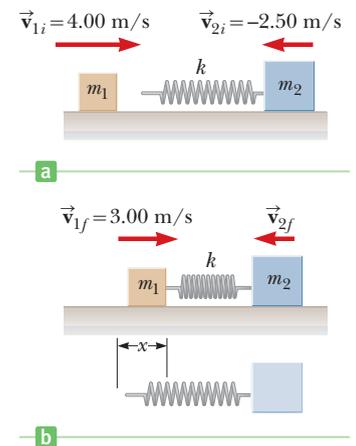


Figura 6.14 (Ejemplo 6.7)

(continúa)

Sustituya los valores conocidos y el resultado del inciso a) dentro de la expresión anterior, resolviendo para x :

$$x = 0.173 \text{ m}$$

COMENTARIOS La componente de la velocidad inicial del bloque 2 es -2.50 m/s debido a que el bloque se mueve a la izquierda. El valor negativo para v_{2f} significa que el bloque 2 aún se está moviendo a la izquierda en el instante bajo consideración.

PREGUNTA 6.7 ¿Es posible que los dos bloques lleguen al reposo mientras el resorte se está comprimiendo? Explique. *Sugerencia:* Observe la cantidad de movimiento en la ecuación (1).

EJERCICIO 6.7 Calcule a) la velocidad del bloque 1 y b) la compresión del resorte en el instante en que el bloque 2 está en reposo.

RESPUESTA a) 0.719 m/s hacia la derecha b) 0.251 m

6.4 Colisiones tangenciales

En la sección 6.2 se mostró que se conserva la cantidad de movimiento lineal total de un sistema cuando el sistema es aislado (es decir, cuando no actúan fuerzas externas sobre él). En general para una colisión de dos objetos en el espacio de tres dimensiones, el principio de conservación de la cantidad de movimiento implica que se conserva la cantidad de movimiento total del sistema en cada dirección. De cualquier modo, se llevan a cabo un subconjunto de colisiones importantes en un plano. El juego de billar es un ejemplo conocido que incluye varias colisiones de objetos moviéndose en una superficie en dos dimensiones. Limitamos nuestra atención a una simple colisión en dos dimensiones entre dos objetos que toma lugar en un plano descartamos cualquier rotación posible. Para tal colisión, obtenemos dos ecuaciones por componente para la conservación de la cantidad de movimiento:

$$m_1 v_{1ix} + m_2 v_{2ix} = m_1 v_{1fx} + m_2 v_{2fx}$$

$$m_1 v_{1iy} + m_2 v_{2iy} = m_1 v_{1fy} + m_2 v_{2fy}$$

Debemos utilizar tres subíndices en esta ecuación general, para representar, respectivamente: 1) el objeto en la pregunta y 2) los valores inicial y final de las componentes de la velocidad.

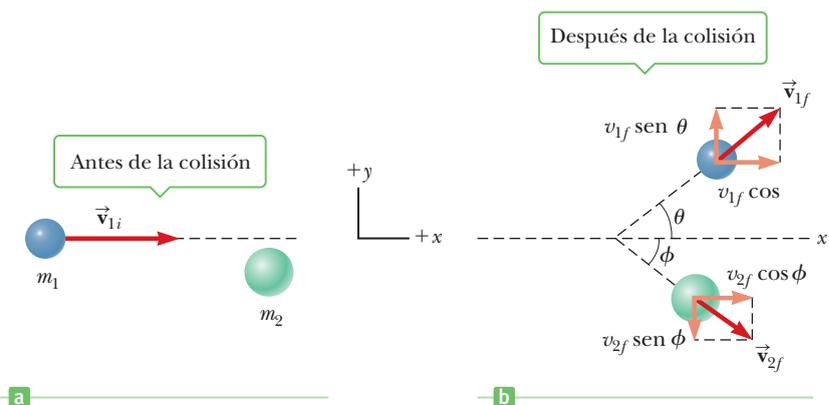
Ahora, considere un problema en dos dimensiones en el que un objeto de masa m_1 colisiona con un objeto de masa m_2 que está inicialmente en reposo, como en la figura activa 6.15. Después de la colisión, el objeto 1 se mueve en un ángulo θ con respecto a la horizontal, y el objeto 2 se mueve en un ángulo ϕ con respecto a la horizontal. Esto se conoce como una colisión *tangencial*. Al aplicar la ley de conservación de la cantidad de movimiento en la forma de componente y observando que la componente y inicial de cantidad de movimiento es cero, tenemos

$$\text{componente } x: \quad m_1 v_{1i} + 0 = m_1 v_{1f} \cos \theta + m_2 v_{2f} \cos \phi \quad [6.15]$$

$$\text{componente } y: \quad 0 + 0 = m_1 v_{1f} \sin \theta + m_2 v_{2f} \sin \phi \quad [6.16]$$

Figura activa 6.15

a) Antes y b) después de una colisión indirecta entre dos bolas.



Si la colisión es elástica, podemos escribir una tercera ecuación, para la conservación de la energía, en la forma

$$\frac{1}{2}m_1v_{1i}^2 = \frac{1}{2}m_1v_{1f}^2 + \frac{1}{2}m_2v_{2f}^2 \quad [6.17]$$

Si conocemos la velocidad inicial v_{1i} y las masas, quedan cuatro incógnitas (v_{1f} , v_{2f} , θ y ϕ). Debido a que sólo tenemos tres ecuaciones, una de las cuatro cantidades restantes debe conocerse con la finalidad de determinar el movimiento después de la colisión de acuerdo sólo con el principio de conservación.

Si la colisión es inelástica, la energía cinética del sistema *no* se conserva, y la ecuación 6.17 *no* se aplica.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Colisiones en dos dimensiones

Para resolver colisiones en dos dimensiones, siga este procedimiento:

1. **Ejes coordenados.** Utilice las dos coordenadas x y y . Es conveniente hacer que coincida el eje x o el eje y con la dirección de una de las velocidades iniciales.
2. **Diagrama.** Bosqueje el problema, etiquetando los vectores de velocidad y las masas.
3. **Conservación de la cantidad de movimiento.** Escriba una ecuación por separado de conservación de la cantidad de movimiento para cada una de las direcciones x y y . En cada caso, la cantidad de movimiento inicial total en una dirección conocida es igual a la cantidad de movimiento final total en esa dirección.
4. **Conservación de energía.** Si la colisión es elástica, se escribe una expresión para la energía total antes y después de la colisión y se igualan las dos expresiones, como en la ecuación 6.11. Complete con los valores conocidos. (**Salte esta etapa si la colisión *no* es perfectamente elástica.**) La ecuación de energía no se puede simplificar como en el caso de una dimensión, así que es posible utilizar una ecuación cuadrática, por ejemplo la ecuación 6.11 o 6.17 cuando la colisión es elástica.
5. **Resuelva** las ecuaciones simultáneamente. Existen dos ecuaciones para colisiones inelásticas y tres para colisiones elásticas.

■ EJEMPLO 6.8 Colisión en un cruce

OBJETIVO Explicar una colisión inelástica en dos dimensiones.

PROBLEMA Un automóvil con 1.50×10^3 kg de masa viajando al este con una rapidez de 25.0 m/s colisiona en un cruce con una camioneta (*van*) de 2.50×10^3 kg que viaja al norte con una velocidad de 20.0 m/s, como se muestra en la figura 6.16. Determine la magnitud y dirección de la velocidad de los restos después de la colisión, suponiendo que los vehículos se someten a una colisión perfectamente inelástica (es decir, se unen) y suponiendo que se puede despreciar la fricción entre los vehículos y el camino.

ESTRATEGIA Utilice la conservación de la cantidad de movimiento en dos dimensiones. (La energía cinética no se conserva.) Elija coordenadas como en la figura 6.16. Antes de la colisión, el único objeto que tiene la cantidad de movimiento en la dirección x es el automóvil, mientras que la camioneta lleva toda la cantidad de movimiento en la dirección y . Después de la colisión totalmente inelástica, los dos vehículos se mueven juntos con la misma velocidad común v_f y ángulo θ . Resuelva para estas dos incógnitas utilizando las dos componentes de la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento.

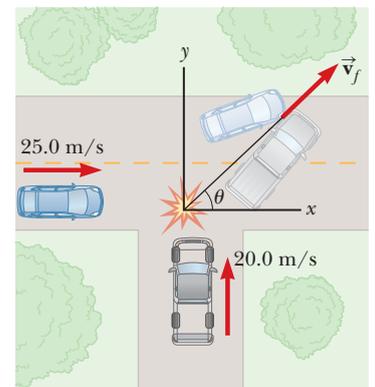


Figura 6.16 (Ejemplo 6.8) Una vista aérea de una colisión perfectamente inelástica entre un automóvil y una camioneta (*van*).

SOLUCIÓN

Calcule las componentes en x de las cantidades de movimiento total inicial y final:

$$\begin{aligned}\sum p_{xi} &= m_{\text{auto}}v_{\text{auto}} = (1.50 \times 10^3 \text{ kg})(25.0 \text{ m/s}) \\ &= 3.75 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \\ \sum p_{xf} &= (m_{\text{auto}} + m_{\text{van}})v_f \cos \theta = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_f \cos \theta\end{aligned}$$

Igualé la cantidad de movimiento en x inicial con la cantidad de movimiento en x final:

$$(1) \quad 3.75 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_f \cos \theta$$

Encuentre las componentes en y de las cantidades de movimiento total inicial y final:

$$\begin{aligned}\sum p_{iy} &= m_{\text{van}}v_{\text{van}} = (2.50 \times 10^3 \text{ kg})(20.0 \text{ m/s}) \\ &= 5.00 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \\ \sum p_{fy} &= (m_{\text{auto}} + m_{\text{van}})v_f \sin \theta = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_f \sin \theta\end{aligned}$$

Igualé la cantidad de movimiento en y inicial con la cantidad de movimiento en y final:

$$(2) \quad 5.00 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_f \sin \theta$$

Divida la ecuación (2) entre la ecuación (1) y resuelva para θ :

$$\begin{aligned}\tan \theta &= \frac{5.00 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{3.75 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}} = 1.33 \\ \theta &= 53.1^\circ\end{aligned}$$

Sustituya de regreso este ángulo en la ecuación (2) para encontrar v_f :

$$v_f = \frac{5.00 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{(4.00 \times 10^3 \text{ kg}) \sin 53.1^\circ} = 15.6 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Esto también es posible encontrando primero las componentes x y y de la velocidad resultante v_f y v_{fy} . La magnitud y dirección de la velocidad resultante puede calcularse entonces con el teorema de Pitágoras, $v_f = \sqrt{v_{fx}^2 + v_{fy}^2}$ y la función tangente inversa $\theta = \tan^{-1}(v_{fy}/v_{fx})$. Anteponiendo este otro planteamiento, es un asunto simple de sustituir $v_{fx} = v_f \cos \theta$ en las ecuaciones (1) y (2).

PREGUNTA 6.8 Si el automóvil y la camioneta tienen masa y velocidad idénticas, ¿cuál habría sido el ángulo resultante?

EJERCICIO 6.8 Un objeto de 3.00 kg moviéndose inicialmente en la dirección x positiva con una velocidad de +5.00 m/s colisiona y se une a un objeto de 2.00 kg que se mueve en un principio en la dirección y negativa con una velocidad de -3.00 m/s. Calcule las componentes de velocidad final del objeto compuesto.

RESPUESTA $v_{fx} = 3.00 \text{ m/s}$; $v_{fy} = -1.20 \text{ m/s}$

6.5 Propulsión de cohete

Cuando se mueven vehículos comunes, por ejemplo automóviles y locomotoras, la fuerza impulsora del movimiento es la fricción. En el caso del automóvil, esta fuerza impulsora se ejerce por el camino en el automóvil, una reacción a la fuerza ejercida por las llantas contra el camino. De igual manera, una locomotora “empuja” contra las vías; por esto, la fuerza impulsora es la fuerza de reacción ejercida por las vías en la locomotora. De cualquier modo, el movimiento de un cohete en el espacio no tiene un camino o vía para empujar. ¿Cómo puede moverse hacia adelante?

En realidad, también las fuerzas de reacción impulsan un cohete. (Revise la tercera ley de Newton, que se explica en el capítulo 4.) Para aclarar este punto, represente el cohete con una cámara esférica que contiene un gas combustible, como en la figura 6.17a. Cuando se presenta una explosión en la cámara, el gas caliente se expande y presiona contra toda la superficie interna de la cámara, como se indica mediante las flechas. Dado que la suma de las fuerzas que se ejercen en el cohete es cero, éste no se mueve. Ahora piense en un orificio hecho en la parte inferior de la cámara, como se muestra en la figura 6.17b. Cuando se presenta la explosión, el gas presiona contra la cámara en todas direcciones, pero no puede presionar contra algo en el orificio, donde este simplemente escapa al espacio. Sumando ahora las fuerzas en la cámara esférica, resulta una fuerza neta hacia arriba. Precisamente como en el caso de los automóviles y locomotoras, ésta es una fuerza de reacción. Las llantas de un automóvil presionan contra el piso y la fuerza de reacción del piso en el automóvil lo empuja hacia arriba. La pared de la cámara de combustión ejerce

una fuerza en el gas que se expande contra él. Por lo tanto, la fuerza de reacción del gas en las paredes empuja al cohete hacia arriba.

En un infame artículo en el *The New York Times*, el pionero de los cohetes, Robert Goddard, fue puesto en ridículo por pensar que los cohetes funcionarían en el espacio, donde, de acuerdo con el *Times*, no había nada contra qué empujar. El *Times* se retractó, demasiado tarde, durante la primera misión de alunizaje del *Apolo* en 1969. Los gases calientes no están empujando contra algo externo, sino contra el cohete mismo e irónicamente, los cohetes verdaderamente funcionan *mejor* en un vacío. En una atmósfera, los gases tienen que hacer trabajo contra la presión del aire externo al escapar de la cámara de combustión, disminuyendo la velocidad de descarga y reduciendo la fuerza de reacción.

A nivel microscópico, este proceso es complicado, pero puede ser simplificado mediante la aplicación de conservación de la cantidad de movimiento al cohete y su combustible expulsado. En principio, la solución es parecida a la del ejemplo 6.3, con el arquero representando el cohete, y la flecha, los gases de descarga.

Suponga que en algún tiempo t , la cantidad de movimiento del cohete más el combustible es $(M + \Delta m)v$, donde Δm es una cantidad de combustible a punto de ser quemada (figura 6.18a). Este combustible está viajando con una velocidad v relativa a, digamos, la Tierra, muy parecido al resto del cohete. Durante un periodo breve Δt , el cohete expulsa combustible de masa Δm , y la velocidad del cohete se incrementa hasta $v + \Delta v$ (figura 6.18b). Si se expulsa el combustible con velocidad de descarga v_e *relativa al cohete*, la velocidad del combustible relativa a la Tierra es $v - v_e$. Al igualar la cantidad de movimiento total final del sistema con la cantidad de movimiento total final, tenemos

$$(M + \Delta m)v = M(v + \Delta v) + \Delta m(v - v_e)$$

Simplificando esta expresión, resulta

$$M\Delta v = v_e \Delta m$$

El incremento Δm en la masa de la descarga corresponde a una disminución igual en masa del cohete, de tal modo que $\Delta m = -\Delta M$. Utilizando este hecho, tenemos

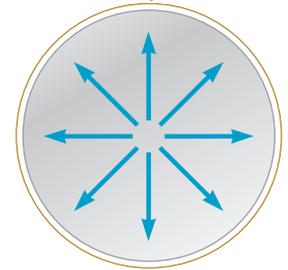
$$M\Delta v = -v_e \Delta M \tag{6.18}$$

Este resultado, junto con los métodos de cálculo, se puede utilizar para obtener la siguiente ecuación:

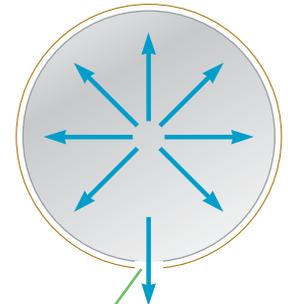
$$v_f - v_i = v_e \ln \left(\frac{M_i}{M_f} \right) \tag{6.19}$$

donde M_i es la masa inicial del cohete más el combustible, y M_f es la masa final del cohete más el combustible que le queda. Ésta es la expresión básica de la propulsión de cohete; menciona que el incremento de velocidad es proporcional a la velocidad de descarga v_e y al logaritmo natural de M_i/M_f . Ya que la relación máxima de M_i a M_f para un cohete de una sola etapa es de aproximadamente 10:1, el incremento en la velocidad puede alcanzar $v_e \ln 10 = 2.3v_e$ o ¡aproximadamente dos veces la velocidad de descarga! Por lo tanto, para mejores resultados la velocidad de descarga debe ser tan alta como sea posible. Actualmente, las magnitudes de velocidad de descarga de cohetes representativos son de varios kilómetros por segundo.

Una cámara de reacción de cohetes sin boquilla tiene fuerzas de reacción que empujan por igual en todas direcciones, así que no hay resultados de movimiento.



a



Una abertura en la parte inferior de la cámara elimina la fuerza de reacción descendente, lo que resulta en una fuerza de reacción hacia arriba neta.

b

Figura 6.17 a) Una cámara de reacción de un cohete sin una tobera tiene fuerzas de reacción que empujan por igual en todas las direcciones, de tal modo que no resulta movimiento alguno. b) Una abertura en el fondo de la cámara transfiere la fuerza de reacción hacia abajo, lo que da como resultado una fuerza de reacción hacia arriba neta.

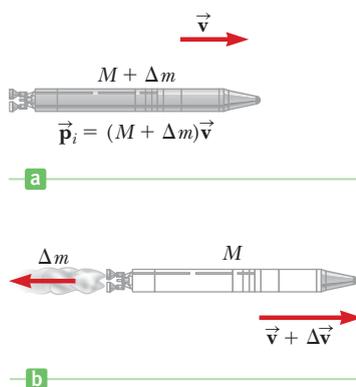


Figura 6.18 Propulsión de un cohete. a) La masa inicial del cohete y el combustible es $M + \Delta m$ en un tiempo t , y la velocidad del cohete es v . b) En un tiempo $t + \Delta t$, la masa del cohete ha sido reducida a M , y una cantidad de combustible Δm ha sido expulsado. La velocidad del cohete se incrementa en una cantidad Δv .

El **empuje** en los cohetes se define como la fuerza ejercida en el cohete mediante los gases de descarga que se expulsan. Se puede obtener una expresión para el empuje instantáneo al dividir la ecuación 6.18 entre Δt :

$$\text{Empuje de cohete} \blacktriangleright \quad \text{Empuje instantáneo} = Ma = M \frac{\Delta v}{\Delta t} = \left| v_e \frac{\Delta M}{\Delta t} \right| \quad [6.20]$$

Se utilizan los símbolos del valor absoluto para mayor claridad: en la ecuación 6.18, $-\Delta M$ es una cantidad positiva (como lo es v_e , una velocidad). En este caso vemos que el empuje se incrementa conforme aumenta la velocidad de descarga y a medida que la relación de cambio de la masa $\Delta M/\Delta t$ (relación de combustión) aumenta.

■ FÍSICA APLICADA 6.2 Cohetes de varias etapas

La velocidad de descarga máxima actual de $v_e = 4500$ m/s se puede realizar con motores de cohetes carburados con hidrógeno y oxígeno líquidos. Pero esto significa que la velocidad máxima que se logra para un determinado cohete con una relación de 10 es $v_e \ln 10 = 10000$ m/s. Sin embargo, para alcanzar la Luna se requiere un cambio de velocidad de casi 11 000 m/s. Además de eso, este cambio debe presentarse mientras funciona contra la gravedad y la fricción atmosférica. ¿Cómo puede ser controlado sin desarrollar mejores motores?

EXPLICACIÓN La respuesta es el cohete de varias etapas. Dejando caer las etapas, la nave es más ligera, de modo que el combustible quemado después en la misión no tenga que acelerar la masa que no sirve más a ningún propósito. La correa en el aumentador de presión, que utiliza la lanzadera espacial y muchos otros cohetes, por ejemplo el *Titan 4* o el ruso *Proton*, es un concepto similar. Se desechan los aumentadores de presión después de que se agota su combustible, así el cohete no carga más su peso. ■

■ EJEMPLO 6.9 Órbita de una etapa simple

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones de velocidad y empuje de un cohete.

PROBLEMA Un cohete tiene una masa total de 1.00×10^5 kg, una masa quemada de 1.00×10^4 kg que incluye motores, coraza y carga útil. El cohete es lanzado desde la Tierra y consume todo su combustible en 4.00 minutos, quemando el combustible con un ritmo estable con una velocidad de descarga de $v_e = 4.50 \times 10^3$ m/s. **a)** Si se desprecia la fricción del aire y la gravedad, ¿cuál es la velocidad del cohete cuando ha quemado todo su combustible? **b)** ¿Qué empuje desarrollan los motores en el despegue? **c)** ¿Cuál es la aceleración inicial del cohete si no se desprecia la gravedad? **d)** Evalúe la velocidad cuando ha quemado todo su combustible si no se desprecia la gravedad.

ESTRATEGIA Aunque parezca complicado, este problema es principalmente un asunto de sustituir valores en las ecuaciones adecuadas. El inciso a) necesita la sustitución de valores en la ecuación 6.19 para la velocidad. Para el inciso b) divida el cambio en la masa de cohete entre el tiempo total, obteniendo $\Delta M/\Delta t$, luego sustituya en la ecuación 6.20 para encontrar el empuje. c) Utilizando la segunda ley de Newton, la fuerza de gravedad y el resultado del inciso b), puede calcular la aceleración inicial. Para el inciso d) la aceleración de la gravedad es aproximadamente constante en los pocos kilómetros involucrados, de tal modo que la velocidad encontrada en el inciso b) será reducida aproximadamente a $\Delta v_g = -gt$. Agregue esta pérdida al resultado del inciso a).

SOLUCIÓN

a) Calcule la velocidad cuando el combustible se ha quemado por completo.

Sustituya $v_i = 0$, $v_e = 4.50 \times 10^3$ m/s, $M_i = 1.00 \times 10^5$ kg y $M_f = 1.00 \times 10^4$ kg en la ecuación 6.19:

$$\begin{aligned} v_f &= v_i + v_e \ln \left(\frac{M_i}{M_f} \right) \\ &= 0 + (4.5 \times 10^3 \text{ m/s}) \ln \left(\frac{1.00 \times 10^5 \text{ kg}}{1.00 \times 10^4 \text{ kg}} \right) \\ v_f &= 1.04 \times 10^4 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Evalúe el empuje de despegue.

Determine el cambio de la masa del cohete:

$$\begin{aligned} \Delta M &= M_f - M_i = 1.00 \times 10^4 \text{ kg} - 1.00 \times 10^5 \text{ kg} \\ &= -9.00 \times 10^4 \text{ kg} \end{aligned}$$

Halle la proporción con la cual cambia la masa del cohete al dividir el cambio de masa entre el tiempo (donde el intervalo de tiempo es igual a 4.00 minutos = 2.40×10^2 s):

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \frac{-9.00 \times 10^4 \text{ kg}}{2.40 \times 10^2 \text{ s}} = -3.75 \times 10^2 \text{ kg/s}$$

Sustituya esta cantidad en la ecuación 6.20, obteniendo el empuje:

$$\begin{aligned} \text{Empuje} &= \left| v_e \frac{\Delta M}{\Delta t} \right| = (4.50 \times 10^3 \text{ m/s})(3.75 \times 10^2 \text{ kg/s}) \\ &= 1.69 \times 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

c) Halle la aceleración inicial.

Escriba la segunda ley de Newton, donde T se establece para el empuje (*thrust*, en inglés) y resuelva para la aceleración a :

$$\begin{aligned} Ma &= \sum F = T - Mg \\ a &= \frac{T}{M} - g = \frac{1.69 \times 10^6 \text{ N}}{1.00 \times 10^5 \text{ kg}} - 9.80 \text{ m/s}^2 \\ &= 7.10 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

d) Evalúe la velocidad cuando se quema todo el combustible sin que se despreja la gravedad.

Determine la pérdida aproximada de velocidad debido a la gravedad:

$$\begin{aligned} \Delta v_g &= -g\Delta t = -(9.80 \text{ m/s}^2)(2.40 \times 10^2 \text{ s}) \\ &= -2.35 \times 10^3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Agregue esta pérdida al resultado del inciso b):

$$\begin{aligned} v_f &= 1.04 \times 10^4 \text{ m/s} - 2.35 \times 10^3 \text{ m/s} \\ &= 8.05 \times 10^3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Incluso tomando en cuenta la gravedad, la velocidad es suficiente para lograr la órbita. Es posible que se requiera algún empuje adicional para vencer el arrastre del aire.

PREGUNTA 6.9 ¿Qué fuerza normal inicial sería ejercida sobre un astronauta de masa m en un cohete que viaja verticalmente hacia arriba con una aceleración a ? Responda simbólicamente en términos de las cantidades positivas m , g y a .

EJERCICIO 6.9 Una nave espacial con una masa de $5.00 \times 10^4 \text{ kg}$ está viajando a $6.00 \times 10^3 \text{ m/s}$ relativa a una estación espacial. ¿Qué masa tendrá la nave después de separar sus motores con la finalidad de lograr una velocidad relativa de $8.00 \times 10^3 \text{ m/s}$, viajando en la misma dirección? Suponga una velocidad de descarga de $4.50 \times 10^3 \text{ m/s}$.

RESPUESTA $3.21 \times 10^4 \text{ kg}$

RESUMEN

6.1 Cantidad de movimiento e impulso

La **cantidad de movimiento** \vec{p} de un objeto de masa m moviéndose con velocidad \vec{v} se define como

$$\vec{p} \equiv m\vec{v} \quad [6.1]$$

La cantidad de movimiento lleva unidades de $\text{kg} \cdot \text{m/s}$. El **impulso** \vec{I} de una fuerza constante \vec{F} que se aplica a un objeto es igual al producto de la fuerza y el tiempo durante el cual la fuerza actúa:

$$\vec{I} \equiv \vec{F} \Delta t \quad [6.4]$$

Estos dos conceptos están unidos en el **teorema impulso-cantidad de movimiento**, que establece que el impulso de una fuerza constante entregada a un objeto es igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto:

$$\vec{I} = \vec{F} \Delta t = \Delta \vec{p} \equiv m\vec{v}_f - m\vec{v}_i \quad [6.5]$$

La solución de problemas con este teorema a menudo involucra estimaciones de magnitudes de velocidad o tiempos de contacto (o ambos), que conducen a una fuerza promedio.

6.2 Conservación de la cantidad de movimiento

Cuando ninguna fuerza externa neta actúa en un sistema aislado, la cantidad de movimiento total del sistema es constante. A este principio se le conoce como **conservación de la cantidad de movimiento**. En particular, si el sistema aislado consiste en dos objetos que se someten a una colisión, la cantidad de movimiento total del sistema es la misma antes y después de la colisión. Para este caso la conservación de la cantidad de movimiento puede ser rescrita como

$$m_1\vec{v}_{1i} + m_2\vec{v}_{2i} = m_1\vec{v}_{1f} + m_2\vec{v}_{2f} \quad [6.7]$$



En un sistema aislado de dos objetos sometidos a una colisión, la conservación de la cantidad de movimiento total del sistema permanece constante.

Los problemas típicos de colisión y retroceso requieren la búsqueda de velocidades desconocidas en una o en dos dimensiones. Cada componente vectorial proporciona una ecuación, y las ecuaciones resultantes se resuelven simultáneamente.

6.3 Colisiones

En una **colisión inelástica**, se conserva la cantidad de movimiento del sistema, pero la energía cinética no. En una **colisión perfectamente inelástica**, los objetos que colisionan se unen. En una **colisión elástica**, se conservan las dos: la cantidad de movimiento y la energía cinética del sistema.

Una **colisión elástica** entre dos objetos en una dimensión se puede resolver al utilizar las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de conservación de energía:

$$m_1 v_{1i} + m_2 v_{2i} = m_1 v_{1f} + m_2 v_{2f} \quad [6.10]$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_{1i}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2i}^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{1f}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{2f}^2 \quad [6.11]$$

La siguiente ecuación, deducida de las ecuaciones 6.10 y 6.11, se aplica habitualmente por ser más conveniente que la ecuación original de conservación de energía:

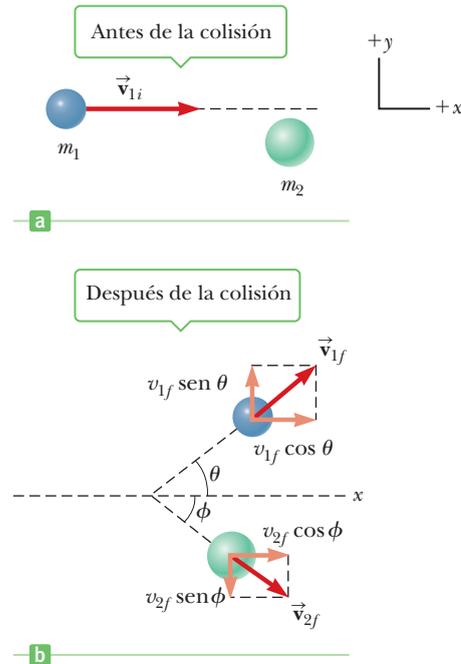
$$v_{1i} - v_{2i} = - (v_{1f} - v_{2f}) \quad [6.14]$$

Estas ecuaciones pueden resolverse simultáneamente para las velocidades desconocidas. La energía no se conserva en **colisiones inelásticas**, así que es posible resolver tales problemas sólo con la ecuación 6.10.

6.4 Colisiones tangenciales

En colisiones tangenciales, la conservación de la cantidad de movimiento puede ser aplicada a lo largo de dos direcciones perpendiculares: un eje x y un eje y . Los problemas pueden ser resueltos utilizando los componentes x y y de la ecuación 6.7. Por lo general las colisiones elásticas requerirán también la ecuación 6.11. (La ecuación 6.14 no se aplica en dos dimensio-

nes.) Generalmente, uno de los dos objetos se toma para que viaje a lo largo del eje x , sometiéndose a una desviación en un ángulo θ después de la colisión. Las velocidades finales y ángulos se pueden encontrar con trigonometría elemental.



En una colisión en dos dimensiones, la cantidad de movimiento del sistema se conserva, mientras que la energía del sistema es conservada sólo si la colisión es elástica.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un jugador de fútbol corre detrás de un balón de 0.450 kg viajando a 3.20 m/s y lo patea en la misma dirección cuando está en movimiento, incrementando su rapidez a 12.8 m/s. ¿Qué magnitud del impulso entregó el jugador al balón? a) 2.45 kg · m/s b) 4.32 kg · m/s c) 5.61 kg · m/s d) 7.08 kg · m/s e) 9.79 kg · m/s
- Un pequeño tazón chino tiene energía cinética E y se desliza a lo largo de una cubierta sin fricción cuando un empleado, con la sincronización perfecta, coloca una bola de arroz dentro del tazón mientras pasa frente a él. Si el tazón y la bola de arroz tienen la misma masa, ¿cuál es la energía cinética del sistema? a) $2E$ b) E c) $E/2$ d) $E/4$ e) $E/8$
- Un automóvil de masa m viajando con rapidez v choca con la parte posterior de un camión de masa $2m$ que está en reposo en un cruce. Si la colisión es perfectamente inelástica, ¿cuál es la rapidez del combinado automóvil y camión después de la colisión? a) v b) $v/2$ c) $v/3$ d) $2v$ e) Ninguno de éstos
- Una pelota de tenis de 57.0 g está viajando directo a un jugador a 21.0 m/s. El jugador volea la pelota directo de regreso a 25.0 m/s. Si la pelota permanece en contacto con la raqueta por 0.060 s, ¿qué fuerza promedio actúa sobre la pelota? a) 22.6 kg · m/s² b) 32.5 kg · m/s² c) 43.7 kg · m/s² d) 72.1 kg · m/s² e) 102 kg · m/s²
- En un juego de billar, una bola roja viaja en la dirección x positiva con velocidad v y la bola marcada se desplaza en la dirección x negativa con velocidad $3v$ cuando las dos bolas colisionan de frente. ¿Qué enunciado es verdadero que relaciona sus velocidades subsecuentes a la colisión? Desprecie cualquier efecto de giro. a) bola roja: $-v$; bola marcada: $3v$ b) bola roja: v ; bola marcada: $2v$ c) bola roja: $-3v$; bola marcada: v d) bola roja: v ; bola marcada: $3v$ e) Las velocidades no pueden ser determinadas sin conocer la masa de cada bola.
- Un carrito de 5 kg se mueve hacia la derecha con una velocidad de +6 m/s, colisiona con una pared de concreto y rebota con una velocidad de -2 m/s. ¿El cambio en la cantidad de movimiento es a) 0, b) 40 kg · m/s c) -40 kg · m/s d) -30 kg · m/s o bien e) -10 kg · m/s?
- Un objeto de 2 kg que se mueve a la derecha con una velocidad de 4 m/s hace una colisión elástica con un objeto de 1 kg que está inicialmente en reposo. La velocidad del objeto de 1 kg después del choque es a) mayor que

- 4 m/s, b) menos de 4 m/s, c) igual a 4 m/s, d) a cero o e) imposible responder con la información proporcionada.
- Un objeto de 3 kg que se mueve a la derecha sobre una superficie horizontal sin fricción con una velocidad de 2 m/s choca de frente y se pega con un objeto de 2 kg que está inicialmente en movimiento a la izquierda con una velocidad de 4 m/s. Después de la colisión, ¿qué afirmación es cierta? a) la energía cinética del sistema es de 20 J, b) el impulso del sistema es de 14 kg · m/s, c) la energía cinética del sistema es superior a 5 J, pero menos de 20 J, d) la cantidad de movimiento del sistema es de $-2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, e) la cantidad de movimiento del sistema es menor que antes de la colisión.
 - Si dos partículas tienen energías cinéticas iguales, ¿sus cantidades de movimiento son iguales? a) sí, siempre b) no, jamás c) sí, siempre que sus masas sean iguales d) sí, si sus masas y direcciones de movimiento son las mismas e) no, a menos que se estén moviendo perpendiculares entre sí.
 - Si dos partículas tienen cantidades de movimiento iguales, ¿sus energías cinéticas son iguales? a) sí, siempre b) no, jamás c) no, excepto cuando sus masas sean iguales d) no, salvo cuando sus velocidades son las mismas e) sí, mientras se muevan a lo largo de líneas paralelas.
 - La energía cinética de un cohete se incrementa en un factor de ocho después de encender sus motores, mientras que su masa total se reduce a la mitad a través de la combustión del combustible. ¿Por qué factor cambia la magnitud de su cantidad de movimiento? *Sugerencia:* Utilice $EC = p^2/2m$. a) 2 b) 8 c) 4 d) 16 e) 1
 - Un cohete con masa total de $3.00 \times 10^5 \text{ kg}$ deja una plataforma de lanzamiento en Cabo Kennedy, moviéndose verticalmente con una aceleración de 36.0 m/s^2 . Si la velocidad de los gases de descarga es $4.50 \times 10^3 \text{ m/s}$, ¿con qué velocidad inicial el cohete está quemando el combustible? a) $3.05 \times 10^3 \text{ kg/s}$ b) $2.40 \times 10^3 \text{ kg/s}$ c) $7.50 \times 10^2 \text{ kg/s}$ d) $1.50 \times 10^3 \text{ kg/s}$ e) Ninguno de éstos
 - Dos partículas de masa diferente parten del reposo. La misma fuerza neta actúa sobre ellas, tal que se mueven a distancias iguales. ¿Cómo compararía su energía cinética final? a) La partícula de mayor masa tiene más energía cinética. b) La partícula de masa más pequeña tiene más energía cinética. c) Las partículas tienen la misma energía cinética. d) Cualquiera de las partículas podrían tener más energía cinética.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un bateador golpea de manera suave una pelota lanzada, bloqueando la bola sin abanicar. a) ¿Puede la pelota entregar más energía cinética al bate y al bateador de la que lleva inicialmente? b) ¿Puede la pelota entregar más cantidad de movimiento al bate y al bateador de la que lleva inicialmente? Explique cada una de sus respuestas.
- Si dos objetos colisionan y uno está inicialmente en reposo, ¿es posible que los dos queden en reposo después de la colisión? ¿Es posible para alguno quedar en reposo después de la colisión? Explique.
- En colisiones perfectamente inelásticas entre dos objetos existen sucesos en los cuales toda la energía cinética original se convierte a otras formas diferentes de la cinética. Proporcione un ejemplo de tal acontecimiento.
- Los estadounidenses jamás olvidarán el ataque terrorista del 11 de septiembre del 2001. Un locutor expresó que la fuerza de la explosión en las Torres Gemelas del World Trade Center fue lo suficientemente intensa como para romper los ventanales y partes de la estructura de acero en fragmentos más pequeños. Con todo, la cobertura de la televisión mostró millares de hojas de papel flotando hacia abajo, muchas aún intactas. Explique cómo podría ser eso.
- Una bola de arcilla de masa m se lanza con una rapidez v contra una pared de ladrillo. La arcilla se pega a la pared y se detiene. ¿En este ejemplo se viola el principio de conservación de la cantidad de movimiento?
- Un patinador está de pie inmóvil en una pista de hielo sin fricción. Su amiga le lanza un disco volador directo hacia él. ¿En cuál de las situaciones que siguen se transfiere la mayor cantidad de movimiento al patinador? a) El patinador atrapa el disco y lo sostiene. b) El patinador atrapa el disco momentáneamente, pero después lo deja caer verticalmente hacia abajo. c) El patinador atrapa el disco, lo sostiene momentáneamente y lo lanza de regreso hacia su amiga.
- Un ejemplo más común de conservación de la cantidad de movimiento que el de una nave espacial se presenta en una máquina lavaplatos doméstica. En este dispositivo, agua a alta presión es forzada hacia afuera de los orificios pequeños en los brazos atomizadores. Utilice la conservación de la cantidad de movimiento para explicar por qué los brazos giran, dirigiendo el agua a todos los platos.
- a) Si dos automóviles colisionan, por lo general no se enganchan. ¿Significa que la colisión es elástica? b) Explique por qué una colisión de frente probablemente es más peligrosa que otros tipos de colisiones.
- Su maestro de educación física le lanza una pelota de tenis con una cierta velocidad y la atrapa. Ahora, le dan a elegir lo siguiente: el maestro puede lanzarle una pelota grande (que es mucho más pesada que la pelota de tenis) con la misma velocidad, la misma cantidad de movimiento, o la misma energía cinética que la pelota de tenis. ¿Qué opción elegiría con el propósito de atraparla y por qué?

10. Una gran cama es sostenida de manera vertical por dos estudiantes. Un tercer estudiante, quien por casualidad es el lanzador estrella del equipo de béisbol, lanza un huevo duro en la cubierta. Explique por qué el huevo no se rompe cuando golpea la cubierta, independiente de su rapidez inicial. (Si lo intenta, asegúrese de que el lanzador golpee cerca del centro de la capa y no permita que el huevo caiga en el piso después de ser atrapado.)
11. Un buen tirador dispara un rifle estando de pie con la culata del arma contra su hombro. Si la cantidad de movimiento hacia delante de una bala es la misma que la cantidad de movimiento hacia atrás en el arma, ¿por qué no es tan peligroso ser golpeado por el arma que por la bala?



Figura PC6.12

12. Cuando se presenta una colisión, se infla una bolsa de aire que protege a un pasajero (el maniquí en la figura PC6.12) de lesiones graves. ¿Por qué la bolsa de aire atenúa el estallido? Explique la física involucrada en esta espectacular fotografía.
13. En golf, con frecuencia se les aconseja a los jugadores principiantes que estén seguros de “acompañar del principio a fin” con su balanceo. ¿Por qué esto hace que la pelota recorra una distancia más larga? Si un tiro se hace cerca del pasto, se requiere muy poco acompañamiento. ¿Por qué?
14. Una caja abierta se desliza a través de la superficie de un lago congelado, sin fricción. ¿Qué le sucede a la rapidez de la caja como el chorro de una regadera a causa de una lluvia? Explique.
15. Comparada con una fuerza neta que es menor que una fuerza neta ejercida sobre un objeto, ¿produce siempre ésta un mayor cambio en la cantidad de movimiento del objeto? Explique.
16. Para una fuerza neta mayor que otra, ¿produce siempre un mayor cambio en la energía cinética que la fuerza neta menor? Explique.

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

6.1 Cantidad de movimiento e impulso

1. Calcule la magnitud de la cantidad de movimiento lineal para los casos que siguen: a) un protón con masa 1.67×10^{-27} kg, moviéndose con una rapidez de 5.00×10^6 m/s; b) una bala de 15.0 g se mueve con una rapidez de 300 m/s; c) un competidor de velocidad de 75.0 kg con una rapidez de 10.0 m/s; d) la Tierra (masa = 5.98×10^{24} kg) se mueve con una rapidez orbital igual a 2.98×10^4 m/s.
2. Una foto estroboscópica muestra un bastón golpeando una pelota de golf, como se muestra en la figura 6.3. La pelota está inicialmente en reposo y se muestra que el bastón está en contacto por casi 0.002 0 s. Si la pelota de golf tiene una masa de 55 g y abandona la cabeza del bastón con una velocidad de 2.0×10^2 pies/s, halle la fuerza promedio ejercida por el bastón en la pelota.
3. Un jugador afirma que puede lanzar una pelota de béisbol de 0.145 kg con tanta cantidad de movimiento como la de una bala de 3.00 g moviéndose con una rapidez de 1.50×10^3 m/s. a) ¿Cuál debe ser la rapidez de la pelota de béisbol si es válida la afirmación del jugador? b) ¿Cuál tiene mayor energía cinética, la pelota o la bala?
4. **S** Una pelota de masa m se lanza directo hacia arriba en el aire con una rapidez inicial de v_0 . a) Halle una expresión para la altura máxima alcanzada por la pelota en términos de v_0 y g . b) Aplicando la ley de la conservación de energía y el resultado del inciso a), encuentre la magnitud de la cantidad de movimiento de la pelota a la mitad de su altura máxima en términos de m y v_0 .
5. **C/C** Gotas de lluvia caen perpendiculares al techo de un automóvil estacionado durante una tormenta. Las gotas golpean el techo con una velocidad de 12 m/s, y la masa de la lluvia por segundo golpeando el techo es de 0.035 kg/s. a) Suponiendo que las gotas llegan al reposo después de golpear el techo, encuentre la fuerza promedio ejercida por la lluvia en el techo. b) En el caso de granizo con la misma masa de las gotas de lluvia que caen sobre el techo a la misma rapidez y con la misma velocidad, ¿cómo es la fuerza promedio sobre el techo en comparación con la que se encontró en el inciso a)?
6. **S** Demuestre que la energía cinética de una partícula de masa m se relaciona con la magnitud de la cantidad de movimiento p de esa partícula mediante $EC = p^2/2m$. Nota:

Esta expresión se invalida para partículas que viajan con magnitudes de velocidad cercanas a la velocidad de la luz.

7. Un objeto tiene una energía cinética de 275 J y una cantidad de movimiento de 25.0 kg · m/s de magnitud. a) Halle la rapidez y b) la masa del objeto.

8. Una curva aproximada de fuerza vs. tiempo para una pelota golpeada por un bate se muestra en la figura P6.8. A partir de esta curva, establezca a) el impulso entregado a la pelota y b) la fuerza promedio ejercida en la pelota.

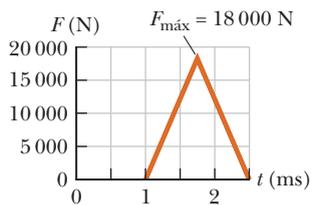


Figura P6.8

9. Un balón de voleibol de 0.280 kg se aproxima horizontalmente a un jugador con una rapidez de 15.0 m/s. El jugador golpea con el puño al balón ocasionando que el balón se mueva en la dirección opuesta con una rapidez de 22.0 m/s. a) ¿Qué impulso entrega el jugador al balón? b) Si el puño del jugador está en contacto con el balón por 0.0600 s, encuentre la magnitud de la fuerza promedio ejercida en el puño del jugador.

10. **C/C** Un hombre afirma que puede sostener con seguridad un pequeño de 12.0 kg en una colisión de frente con una rapidez relativa de 120 mi/h que dura 0.10 s siempre que tenga puesto su cinturón de seguridad. a) Encuentre la magnitud de la fuerza promedio necesaria para sostener al pequeño. b) En términos del resultado del inciso a), ¿es válida la afirmación del hombre? c) ¿Qué dice la respuesta a este problema acerca de las leyes que requieren el uso de dispositivos de seguridad adecuados, por ejemplo cinturones de seguridad y asientos especiales para niños?

11. Una pelota de 0.150 kg de masa se deja caer a partir del reposo desde una altura de 1.25 m. Si rebota desde el piso para alcanzar una altura de 0.960 m. ¿Qué impulso le proporcionó el piso a la pelota?

12. Un jugador de tenis recibe un tiro con la pelota (0.0600 kg) viajando horizontalmente a 50.0 m/s y lo regresa con la pelota viajando horizontalmente a 40.0 m/s en la dirección opuesta. a) ¿Cuál es el impulso entregado a la pelota por la raqueta? b) ¿Cuál es el trabajo que hace la raqueta en la pelota?

13. Un automóvil se detiene en un semáforo. Cuando la luz se pone en verde, el automóvil acelera, aumentando su rapidez desde 0 hasta 5.20 m/s en 0.832 s. a) ¿Cuáles son las magnitudes del impulso lineal y b) la fuerza promedio total experimentada por un pasajero de 70.0 kg en el automóvil durante el tiempo en que el automóvil acelera?

14. Un jugador de baloncesto 65.0 kg salta verticalmente y deja el suelo con una velocidad de 1.80 m/s hacia arriba. a) ¿Qué impulso hace el experimentado jugador? b) ¿Qué fuerza ejerce el piso sobre el jugador antes de saltar? c) ¿Cuál es la fuerza total promedio ejercida por el suelo sobre el jugador si el jugador está en contacto con el suelo durante 0.450 s durante el salto?

15. La fuerza que se muestra en el diagrama fuerza vs. tiempo en la figura P6.15 actúa en un objeto de 1.5 kg. Halle a) el impulso de la fuerza, b) la velocidad final del objeto si inicialmente está en reposo y c) la velocidad final del objeto si al inicio está moviéndose a lo largo del eje x con una velocidad de -2.0 m/s.

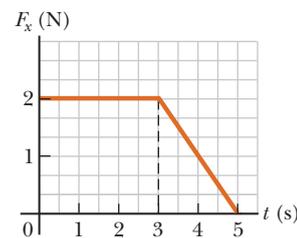


Figura P6.15

16. Una fuerza de magnitud F_x que actúa en la dirección x en una partícula de 2.00 kg varía con el tiempo como se muestra en la figura P6.16. Halle a) el impulso de la fuerza, b) la velocidad final de la partícula si inicialmente está en reposo y c) la velocidad final de la partícula si al inicio está moviéndose a lo largo del eje x con una velocidad de -2.00 m/s.

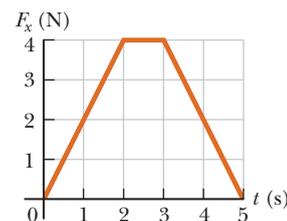


Figura P6.16

17. Las fuerzas que se muestran en el diagrama fuerza vs. tiempo en la figura P6.17 actúan en una partícula de 1.5 kg. Halle a) el impulso para el intervalo desde $t = 0$ hasta $t = 3.0$ s y b) el impulso para el intervalo desde $t = 0$ hasta $t = 5.0$ s. c) Si las fuerzas actúan en una partícula de 1.5 kg que inicialmente está en reposo, encuentre las magnitudes de velocidad de la partícula en d) $t = 3.0$ s y en $t = 5.0$ s.

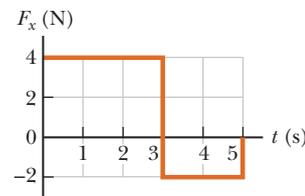


Figura P6.17

18. Una bola de acero de 3.00 kg golpea una gruesa pared a 10.0 m/s en un ángulo de 60.0° con el plano de la pared. La bola rebota de la pared con la misma velocidad y ángulo (figura P6.18). Si la bola está en contacto con la pared por 0.200 s, ¿cuál es la fuerza promedio ejercida por la pared sobre la bola?

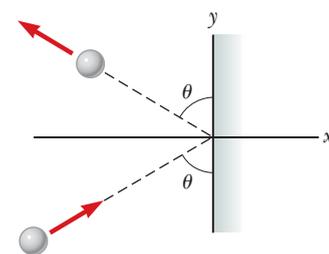


Figura P6.18

19. **M** El frente de 1.20 m de un automóvil de 1400 kg está diseñado como una "zona de pliegue" que se colapsa para absorber el choque de la colisión. Si un automóvil que viaja a 25.0 m/s se detiene uniformemente en 1.20 m, a) ¿cuánto tiempo transcurre después de la colisión, b) ¿cuál es la magnitud de la fuerza promedio en el automóvil? y c) ¿cuál es la aceleración del automóvil? Exprese la aceleración como un múltiplo de la aceleración de la gravedad.
20. **C/C** Un *pitcher* lanza una pelota de 0.14 kg de tal modo que cruza la placa del bateador horizontalmente con una rapidez de 42 m/s justo antes de que entre en contacto

con el bate. El bateador golpea la pelota directamente al *pitcher* con una velocidad de 48 m/s. Supongamos que la bola se mueve en la misma línea dejando el bate, ya que siguió antes de contactar con él. a) ¿Cuál es el impulso entregado por el bate a la pelota? b) Si la pelota está en contacto con el bate por 0.0050 s, ¿cuál es la magnitud de la fuerza promedio ejercida por el bate sobre la pelota? c) ¿Cómo es su respuesta al inciso b) en comparación con el peso de la pelota?

6.2 Conservación de la cantidad de movimiento

21. Fotografías estroboscópicas de alta velocidad muestran que el frente de un palo de golf de 200 g está viajando a 55 m/s justo antes de que golpee una pelota de golf de 46 g en reposo sobre el soporte para pelota. Después de la colisión, el frente del bastón viaja (en la misma dirección) a 40 m/s. Encuentre la rapidez de la pelota de golf justo después del impacto.

22. Un rifle con un peso de 30 N dispara una bala de 5.0 g con una rapidez de 300 m/s. a) Halle la rapidez de retroceso del rifle. b) Si un hombre de 700 N sostiene firmemente el rifle contra su hombro, encuentre la rapidez de retroceso del hombre y el rifle.

23. Una chica de 45.0 kg está de pie sobre un tablón de 150 kg que está originalmente en reposo, libre de deslizarse sobre un lago congelado que es una superficie plana, sin fricción. La chica empieza a caminar a lo largo del tablón con una velocidad constante de 1.50 m/s a la derecha relativa al tablón. a) ¿Cuál es su velocidad relativa a la superficie de hielo? b) ¿Cuál es la velocidad del tablón relativa a la superficie de hielo?

24. **S** Ésta es una versión simbólica del problema 23. Una niña de masa m_n está de pie sobre una tabla de masa m_{ta} . Ambos están inicialmente en reposo sobre un lago congelado, que constituye una superficie sin fricción y plana. La niña empieza a caminar por la plancha a una velocidad constante v_{NiTa} a la derecha en relación a la tabla. (El subíndice *TaH* denota a la niña en relación con tablón.) a) ¿Cuál es la velocidad v_{TaH} de la tabla respecto a la superficie del hielo? b) ¿Cuál es la velocidad v_{NH} de la niña relativa de la superficie del hielo?

25. **CIC** Una astronauta en su traje espacial tiene una masa total de 87.0 kg, que incluye el traje y tanque de oxígeno. La línea de su correa se separa de la nave espacial mientras está moviéndose por el espacio. Inicialmente en reposo con respecto a la nave espacial lanza su tanque de oxígeno de 12.0 kg alejándose de ella con una rapidez de 8.00 m/s para impulsarse de regreso hacia ella (figura

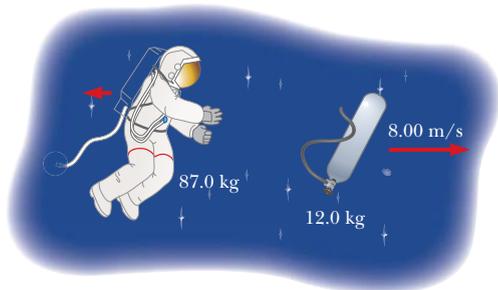


Figura P6.25

P6.25). a) Determine a qué distancia máxima puede estar de la nave e incluso regresar en 2.00 minutos (tiempo en que la cantidad de aire dentro de su casco sigue siendo respirable). b) Explique en términos de las leyes de movimiento de Newton por qué esta estrategia funciona.

26. Un pescador de 75 kg en un barco de 125 kg arroja un paquete de masa $m = 15$ kg en sentido horizontal hacia la derecha con una velocidad $v_i = 4.5$ m/s como en la figura P6.26. Despreciando la resistencia del agua, y suponiendo que el barco está en reposo antes de que el paquete sea lanzado, halle la velocidad de la embarcación después de que el paquete es arrojado.

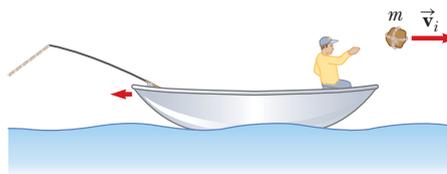


Figura P6.26

27. Una persona de 65.0 kg lanza una bola de nieve de 0.0450 kg hacia adelante con una rapidez con respecto a la tierra de 30.0 m/s. Una segunda persona de 60.0 kg atrapa la bola de nieve: Las dos personas están sobre patines; la primera inicialmente se está moviendo hacia adelante con una rapidez de 2.50 m/s, y la segunda al inicio está en reposo. ¿Cuáles son las velocidades de las dos personas después de intercambiar la bola de nieve? Desprecie la fricción entre los patines y el hielo.

28. **CIC S** Una patinadora novata de masa M (cuando está completamente vestida) se encuentra atrapada en medio de una pista de hielo y no puede regresar a la parte donde no hay hielo. Cada movimiento que hace la lleva a resbalar en el hielo y permanecer en el mismo lugar. Se decide tratar de volver a la seguridad mediante la eliminación de los guantes de masa m y tirarlos en la dirección opuesta al lado de la seguridad. a) Ella tira los guantes tan duro como puede, y dejan su mano con una velocidad \vec{v}_{guantes} . Explique si se mueve o no. Si se mueve, calcule su velocidad $\vec{v}_{\text{patinadora}}$ con respecto a la Tierra después de que ella arroja los guantes. b) Analice su movimiento desde el punto de vista de las fuerzas que actúan sobre ella.

6.3 Colisiones

6.4 Colisiones tangenciales

29. **PG** Un hombre de masa $m_1 = 70.0$ kg está patinando con $v_1 = 8.00$ m/s detrás de su esposa de masa $m_2 = 50.0$ kg, quien está patinando a $v_2 = 4.00$ m/s. En lugar de rebasarla, sin darse cuenta colisiona con ella. Se sujeta de la cintura de su esposa y mantienen el equilibrio. a) Bosqueje el problema con diagramas antes y después, representando los esquiadores como bloques. b) ¿La colisión se describe mejor como elástica, inelástica o perfectamente inelástica? ¿Por qué? c) Escriba la ecuación general para la conservación de la cantidad de movimiento en términos de m_1 , v_1 , m_2 , v_2 y velocidad final v_f . d) Resuelva la ecuación de cantidad de movimiento para v_f . e) Sustituya valores, obteniendo el valor numérico para v_f su rapidez después de la colisión.

30. Un arquero dispara una flecha hacia un objetivo de 300 g que se desliza en su dirección con una rapidez de 2.50 m/s sobre una superficie uniforme y resbaladiza. La flecha de 22.5 g se dispara con una rapidez de 35.0 m/s y pasa a través del objetivo, que se detiene por el impacto. ¿Cuál es la rapidez de la flecha después de pasar a través del objetivo?

31. Carla corre con una rapidez de 4.00 m/s y se sube en un trineo, inicialmente en reposo en la parte superior de una colina cubierta de nieve y sin fricción. Después que ella ha descendido una distancia vertical de 5.00 m, su hermano, quien está inicialmente en reposo, la espera de regreso y continúan juntos hacia abajo por la colina. ¿Cuál es su rapidez en la parte inferior de la colina si la caída vertical total es de 15.0 m? La masa de Carla es de 50.0 kg, el trineo tiene una masa de 5.00 kg y su hermano tiene una masa de 30.0 kg.

32. **BIO** Un patinador sobre hielo de 75.0 kg que se mueve a 10.0 m/s choca contra un patinador inmóvil de igual masa. Después de la colisión, los dos esquiadores se mueven como una unidad a 5.00 m/s. Considere que la fuerza promedio que un esquiador puede experimentar sin romperse un hueso es de 4500 N. Si el tiempo de impacto es de 0.100 s, ¿se rompe un hueso?

33. Un vagón de ferrocarril de 2.00×10^4 kg de masa se mueve a 3.00 m/s choca y se une con dos vagones acoplados, cada uno de la misma masa que el vagón solo y se mueven en la misma dirección a 1.20 m/s. a) ¿Cuál es la rapidez de los tres vagones unidos después de la colisión? b) ¿Cuánta energía cinética se pierde en la colisión?

34. **S** Ésta es una versión simbólica del problema 33. Un vagón de ferrocarril de masa M se mueve con una rapidez v_1 choca y se une con dos vagones acoplados, cada uno de la misma masa M y se mueven en la misma dirección con una rapidez v_2 . a) ¿Cuál es la rapidez v_f de los tres vagones unidos después de la colisión en términos de v_1 y v_2 ? b) ¿Cuánta energía cinética se pierde en la colisión? Responda en términos de M , v_1 y v_2 .

35. **S** Examine el péndulo balístico explicado en el ejemplo 6.5 e ilustrado en la figura 6.12. a) Establezca la relación de la cantidad de movimiento justo después de la colisión a la cantidad de movimiento inmediatamente antes de la colisión. b) Demuestre que la relación de la energía cinética inmediatamente después de la colisión a la energía cinética justo antes de la colisión es $m_1 / (m_1 + m_2)$.

36. **S** Un automóvil de masa m se que mueve a una velocidad v_1 choca y se atora con la parte trasera de un camión de masa $2m$ que se mueve inicialmente en la misma dirección que el vehículo, a una velocidad v_2 más baja. a) ¿Cuál es la velocidad v_f de los dos vehículos justo después del choque? b) ¿Cuál es el cambio en la energía cinética del sistema de auto-camión en la colisión?

37. En una función en Broadway, un actor de 80.0 kg oscila de un cable de 3.75 m de largo que está en posición horizontal cuando inicia. En la parte inferior de su arco, levanta a su compañera de 55.0 kg en una colisión inelástica. ¿Cuál es la altura máxima que alcanzan después de su oscilación hacia arriba?

38. Dos discos de igual masa de un juego de mesa, uno de color naranja y el otro verde, se involucran en una colisión indirecta perfectamente elástica. El disco verde inicialmente en reposo es golpeado por el disco naranja moviéndose al inicio hacia la derecha a 5.00 m/s como en la figura P6.38a. Después de la colisión, el disco naranja se mueve en una dirección que forma un ángulo de 37.0° con el eje horizontal. Mientras el disco verde hace un ángulo de 53.0° con este eje como en la figura P6.38b. Calcule la velocidad de cada disco después de la colisión.

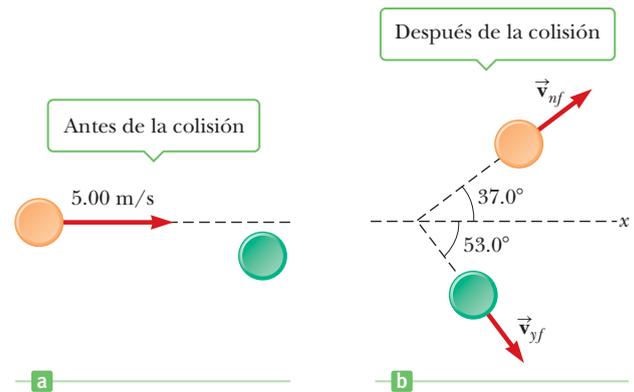


Figura P6.38

39. Se dispara una bala de 0.030 kg verticalmente a 200 m/s en una pelota de béisbol de 0.15 kg al inicio en reposo. ¿Después de la colisión, qué tan alto se elevan la bala y pelota combinadas, suponiendo que la bala se incrusta en la pelota?

40. **M** Se dispara una bala de masa $m = 8.00$ g dentro de un bloque de masa $M = 250$ g que está inicialmente en reposo en el borde de una mesa de altura $h = 1.00$ m (figura P6.40). La bala permanece en el bloque y después del impacto el bloque aterriza a $d = 2.00$ m de la parte inferior de la mesa. Calcule la rapidez inicial de la bala.

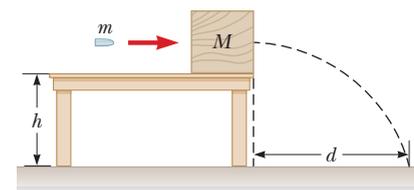


Figura P6.40

41. Se dispara una bala de 12.0 g en forma horizontal en un bloque de madera de 100 g que inicialmente está en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción y conectado a un resorte que tiene una constante elástica de 150 N/m. La bala se incrusta en el bloque. Si el sistema bala-bloque comprime el resorte en un máximo de 80.0 cm, ¿cuál fue la rapidez de la bala en el impacto con el bloque?

42. Un automóvil de 1200 kg viajando inicialmente con una velocidad de 25.0 m/s en una dirección del este choca con el extremo posterior de una camioneta de 9000 kg moviéndose en la misma dirección a 20.0 m/s (figura P6.42, página 194). La velocidad del automóvil justo des-

pués de la colisión es de 18.0 m/s hacia el este. a) ¿Cuál es la velocidad de la camioneta inmediatamente después de la colisión? b) ¿Cuánta energía mecánica se pierde en la colisión? Explique esta pérdida de energía.

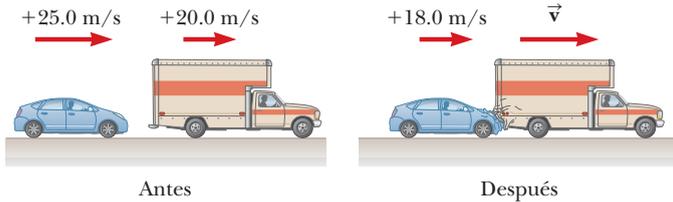


Figura P6.42

43. **CIC S** Un chico de masa m_c y su novia de masa m_n , ambos usando patines de hielo, reposan uno frente al otro, mientras están de pie sobre una pista de hielo sin fricción. El chico empuja a la muchacha, enviándola hacia el este con la velocidad v_n . Suponga que $m_c > m_n$. a) Describa el movimiento posterior del muchacho. b) Encuentre expresiones para la energía cinética final de la chica y la energía cinética final del chico y demuestre que la novia tiene una mayor energía cinética que el muchacho. c) Ambos tenían energía cinética cero antes de que el chico empujara a la novia, pero terminaron con energía cinética después del evento. ¿Cómo explica la aparición de la energía mecánica?
44. **PG CIC** Una sonda espacial inicialmente en reposo experimenta un mal funcionamiento mecánico interno y se rompe en tres partes. Una parte de masa $m_1 = 48.0 \text{ kg}$ viaja en la dirección x positiva a 12.0 m/s , y una segunda pieza de masa $m_2 = 62.0 \text{ kg}$ viaja en el plano xy en un ángulo de 105° a 15.0 m/s . La tercera parte tiene masa $m_3 = 112 \text{ kg}$. a) Bosqueje un diagrama de la situación, indicando las diferentes masas y sus velocidades. b) Escriba la expresión general para la conservación de cantidad de movimiento en las direcciones x y y en términos de m_1 , m_2 , m_3 , v_1 , v_2 y v_3 y los senos y cosenos de los ángulos, considere a θ como el ángulo desconocido. c) Calcule la componente x final de las cantidades de movimiento de m_1 y m_2 . d) Calcule la componente y final de las cantidades de movimiento de m_1 y m_2 . e) Sustituya las componentes de cantidad de movimiento conocidas en las ecuaciones de cantidad de movimiento general para las direcciones x y y , junto con la masa conocida m_3 . f) Resuelva las dos ecuaciones de cantidad de movimiento para $v_3 \cos \theta$ y $v_3 \sin \theta$, respectivamente, y utilice la identidad $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$ para obtener v_3 . g) Divida la ecuación para $v_3 \sin \theta$ entre $v_3 \cos \theta$ para obtener $\tan \theta$, después obtenga el ángulo tomando el inverso de la tangente en ambos lados. h) En general, ¿las tres piezas tendrían necesariamente que moverse en el mismo plano? ¿Por qué?
45. Un objeto de 25.0 g que se mueve a la derecha a 20.0 cm/s alcanza y colisiona elásticamente con un objeto de 10.0 g moviéndose en la misma dirección a 15.0 cm/s . Hallar la velocidad de cada objeto después de la colisión.
46. Una bola de billar que rueda a través de una mesa a 1.50 m/s hace una colisión elástica de frente con una bola idéntica. Hallar la rapidez de cada bola después de la colisión

sión a) cuando la segunda bola está inicialmente en reposo, b) cuando la segunda bola se está moviendo hacia la primera con una rapidez de 1.00 m/s y c) cuando la segunda bola se está alejando de la primera con una rapidez de 1.00 m/s .

47. **CIC M** Un corredor de poder de 90.0 kg que se dirige hacia el este con una rapidez de 5.00 m/s es detenido por un oponente de 95.0 kg corriendo al norte con una rapidez de 3.00 m/s . a) ¿Por qué la detención constituye una colisión perfectamente inelástica? b) Calcule la velocidad de los jugadores inmediatamente después de la detención y c) calcule la energía mecánica que se pierde como un resultado de la colisión. ¿A dónde se fue la energía perdida?
48. Gemelas idénticas, cada una con masa de 55.0 kg están sobre patines de hielo y en reposo sobre un lago congelado; es posible que se considere sin fricción. La gemela A lleva un morral de 12.0 kg . Lo lanza horizontalmente a 3.00 m/s hacia la gemela B. Despreciando efectos de gravedad, ¿cuáles son las magnitudes de velocidad consecutivas de la gemela A y la gemela B?
49. Un automóvil de 2000 kg que se mueve al este a 10.0 m/s colisiona con un automóvil de 3000 kg moviéndose hacia el norte. Los autos se enganchan y se mueven como una unidad después de la colisión, en un ángulo de 40.0° hacia el noreste y una rapidez de 5.22 m/s . Halle la rapidez del auto de 3000 kg antes de la colisión.
50. Dos automóviles de masas iguales se aproximan a un cruce. Un vehículo está viajando con velocidad de 13.0 m/s hacia el este, y el otro está viajando al norte con velocidad v_{2i} . Ninguno de los dos conductores ve al otro. Los vehículos colisionan en el cruce y se enganchan, dejando marcas de deslizamiento paralelas en un ángulo de 55.0° hacia el noreste. El límite de velocidad para ambos caminos es de 35 mi/h , y el conductor que se dirige hacia el norte afirma que estaba dentro del límite cuando se presentó la colisión. ¿Está diciendo la verdad?
51. Una bola de billar moviéndose a 5.00 m/s golpea una bola inmóvil de la misma masa. Después de la colisión, la primera bola se mueve a 4.33 m/s en un ángulo de 30° con respecto a la línea de movimiento original. a) Calcule la magnitud de la velocidad y dirección de la segunda bola después de la colisión. b) ¿La colisión fue elástica o inelástica?

Problemas adicionales

52. **BIO** En la investigación en cardiología y fisiología del ejercicio, con frecuencia es importante conocer la masa de sangre bombeada por el corazón de una persona, en una pulsación. Esta información se puede obtener por medio de un *ballistocardiógrafo*. El instrumento funciona como sigue. El sujeto se encuentra sobre una plataforma horizontal flotando sobre una película de aire. La fricción en la plataforma es despreciable. Inicialmente, la cantidad de movimiento del sistema es cero. Cuando palpita el corazón, expelle una masa m de sangre dentro de la aorta con rapidez v , y el cuerpo y la plataforma se mueven en la dirección opuesta con rapidez V . La rapidez de la sangre se puede determinar de manera independiente (por ejemplo, al observar el desplazamiento Doppler de un ultrasonido). Suponga que la rapidez de la sangre es 50.0 cm/s en una prueba representativa. La masa

del sujeto más la plataforma es 54.0 kg. La plataforma se mueve 6.00×10^{-5} m en 0.160 s después de un latido. Calcule la masa de sangre que sale del corazón. Considere que la masa de sangre es despreciable si se le compara con la masa total de la persona. Este ejemplo simplificado explica el principio del ballistocardiógrafo, pero en la práctica se utiliza un modelo más complejo de función cardiaca.

53. **CIC** La mayoría sabe intuitivamente que en una colisión de frente entre un camión de volteo y un auto compacto, se está mejor en el camión que en el auto. ¿Por qué es esto? La mayoría de la gente piensa que la fuerza de colisión ejercida en el auto es mucho más grande que la ejercida en el camión. Para sustentar esta opinión, señalan que el auto está aplastado, mientras que el camión sólo está abollado. Esta idea de fuerzas diferentes, naturalmente, es falsa. La tercera ley de Newton dice que ambos objetos están sometidos por fuerzas de la misma magnitud. El camión sufre menos daño debido a que está fabricado de metal más fuerte. ¿Pero que hay acerca de los dos conductores? ¿Experimentan las mismas fuerzas? Para responder esta pregunta, suponga que cada vehículo se está moviendo inicialmente a 8.00 m/s y que se someten a una colisión de frente perfectamente inelástica. Cada conductor tiene una masa de 80.0 kg. Incluyendo las masas de los conductores, la masa total de los vehículos son 800 kg para el auto y 4000 kg para el camión. Si el tiempo de colisión es 0.120 s, ¿qué fuerza ejerce el cinturón de seguridad en cada conductor?

54. Considere una pista sin fricción como se muestra en la figura P6.54. Un bloque de masa $m_1 = 5.00$ kg se libera desde **A**. Realiza una colisión de frente elástica en **B** contra un bloque de masa $m_2 = 10.0$ kg que inicialmente está en reposo. Calcule la altura máxima a la que se eleva m_1 después de la colisión.

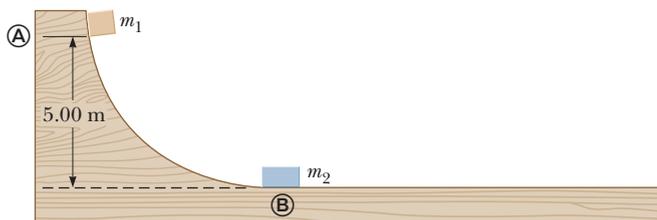


Figura P6.54

55. **M** Una partícula de 2.0 g que se mueve a 8.0 m/s realiza una colisión de frente perfectamente elástica con un objeto de 1.0 g en reposo. a) Determine la rapidez de cada partícula después de la colisión. b) Calcule la rapidez de cada partícula después de la colisión si la partícula inmóvil tiene una masa de 10 g. c) Determine la energía cinética final de la partícula incidente de 2.0 g en la situación descrita en los incisos a) y b). ¿En qué caso la partícula incidente pierde más energía cinética?

56. **S** Una bala de masa m y rapidez v pasa totalmente a través de una plomada de masa M de un péndulo como se muestra en la figura P6.56. La bala emerge

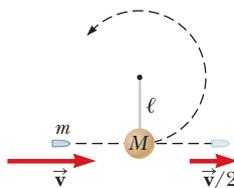


Figura P6.56

con una rapidez de $v/2$. La plomada del péndulo está sostenida por una varilla de longitud l y masa despreciable. ¿Cuál es el valor mínimo de v tal que la plomada escasamente oscilará a través de un círculo vertical completo?

57. Dos objetos de masas $m_1 = 0.56$ kg y $m_2 = 0.88$ kg se colocan sobre una superficie horizontal sin fricción y un resorte comprimido de constante $k = 280$ N/m se coloca entre ellos como en la figura P6.57a. Desprecie la masa del resorte. El resorte no está conectado a ninguno de los objetos y se comprime una distancia de 9.8 cm. Si los objetos se liberan del reposo, halle la velocidad final de cada objeto, como se muestra en la figura P6.57b).

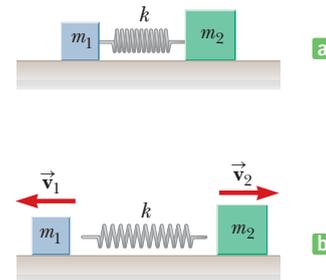


Figura P6.57

58. Una bola azul de 0.400 kg se desliza en un alambre curvo sin fricción, iniciando desde el reposo en el punto **A** en la figura P6.58, donde $h = 1.50$ m. En el punto **B** la bola colisiona elásticamente con una bola verde de 0.600 kg en reposo. Calcule la altura máxima que la bola azul se eleva cuando se mueve hacia arriba del alambre.

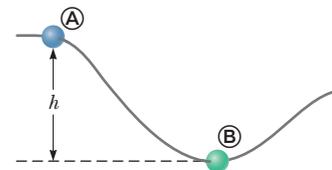


Figura P6.58

59. Un hombre de 730 N se encuentra en medio de un lago congelado de radio 5.0 m. Él es incapaz de llegar a la otra parte debido a la falta de fricción entre los zapatos y el hielo. Para superar esta dificultad, él lanza su libro de física de 1.2 kg en sentido horizontal hacia la orilla norte a una velocidad de 5.0 m/s. ¿Cuánto tiempo le toma para llegar a la orilla sur?

60. Un núcleo inestable de 1.7×10^{-26} kg de masa, inicialmente en reposo en el origen de un sistema de coordenadas, se desintegra en tres partículas. Una partícula tiene una masa de $m_1 = 5.0 \times 10^{-27}$ kg y se mueve en la dirección y positiva con rapidez $v_1 = 6.0 \times 10^6$ m/s. Otra partícula de masa $m_2 = 8.4 \times 10^{-27}$ kg se mueve en la dirección x positiva con rapidez $v_2 = 4.0 \times 10^6$ m/s. Determine la magnitud y dirección de la velocidad de la tercera partícula.

61. **S** Dos bloques de masas m_1 y m_2 se aproximan entre sí sobre una mesa horizontal, con la misma rapidez constante, v_0 , que mide un observador en el laboratorio. Los bloques se someten a una colisión perfectamente elástica y se observa que m_1 se detiene, pero m_2 se traslada opuesto a su movimiento original con alguna rapidez constante, v . a) Establezca la relación de las dos masas, m_1/m_2 . b) ¿Cuál es la relación de sus magnitudes de velocidad v/v_0 ?

62. Dos bloques de masas $m_1 = 2.00$ kg y $m_2 = 4.00$ kg cada uno se liberan desde el reposo a una altura de $h = 5.00$ m sobre una pista sin fricción, como se muestra en la figura

P6.62 y se someten a una colisión elástica de frente. a) Calcule la velocidad de cada bloque justo antes de la colisión. b) Determine la velocidad de cada bloque inmediatamente después de la colisión. c) Establezca las alturas máximas a las que m_1 y m_2 se elevan después de la colisión.



Figura P6.62

63. Un bloque de masa $m_1 = 0.500$ kg se libera desde el reposo en la parte superior de una pista sin fricción a una distancia $h_1 = 2.50$ m por encima de una mesa. Después colisiona elásticamente con un objeto de masa $m_2 = 1.00$ kg inicialmente en reposo sobre la mesa, como se muestra en la figura P6.63. a) Calcule las velocidades de los dos objetos justo después de la colisión. b) Después de la colisión, ¿qué tan alto por arriba de la pista el objeto de 0.500 kg viaja de regreso? c) ¿Qué tan lejos desde la parte inferior de la mesa aterriza el objeto de 1.00 kg, dado que la altura de la mesa es $h_2 = 2.00$ m? d) Finalmente, ¿qué tan lejos desde la parte inferior de la mesa aterriza el objeto de 0.500 kg?

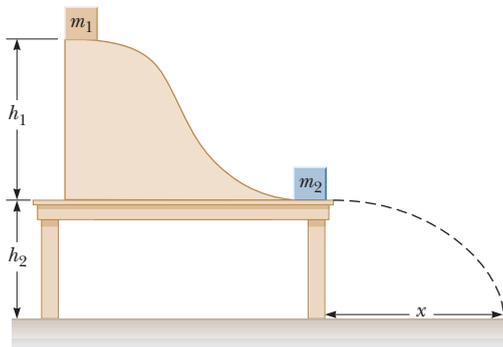


Figura P6.63

64. **S** Dos objetos de masas m y $3m$ se están acercando entre sí moviéndose a lo largo del eje x con la misma rapidez inicial v_0 . El objeto con masa m está viajando hacia la izquierda y el objeto con masa $3m$ viaja hacia la derecha. Se someten a una colisión elástica indirecta tal que m se está moviendo hacia abajo después de la colisión en ángulo recto a partir de su dirección inicial. a) Calcule las velocidades finales de los dos objetos. b) ¿Cuál es el ángulo θ en que el objeto con masa $3m$ se dispersa?

65. Un bloque pequeño de masa $m_1 = 0.500$ kg se libera desde el reposo en la parte superior de una cuña curva con una masa $m_2 = 3.00$ kg, que se coloca sobre una superficie horizontal sin fricción como en la figura P6.65a. Cuando

do el bloque deja la cuña, se mide su velocidad que es 4.00 m/s hacia la derecha, como en la figura P6.65b. a) ¿Cuál es la velocidad de la cuña después de que el bloque alcanza la superficie horizontal? b) ¿Cuál es la altura h de la cuña?

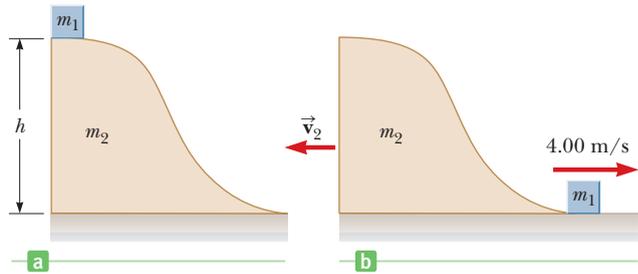


Figura P6.65

66. Una bola marcada que viaja a 4.00 m/s hace una colisión elástica, indirecta con una bola objetivo de igual masa que inicialmente está en reposo. La bola marcada se desvía de tal modo que forma un ángulo de 30.0° con su dirección original de viaje. Halle a) el ángulo entre los vectores de velocidad de las dos bolas después de la colisión y b) la rapidez de cada bola después de la colisión.

67. **CIC** Un cañón está unido rigidamente a un transporte, que puede moverse a lo largo de una vía horizontal, pero conectado a un poste por un resorte largo, al principio sin estirar y con una constante de fuerza, $k = 2.00 \times 10^4$ N/m, como en la figura P6.67. El cañón dispara un proyectil de 200 kg con una velocidad de 125 m/s dirigido a 45.0° sobre la horizontal. a) Si la masa del cañón y el transporte es 5000 kg, encuentre la rapidez de retroceso del cañón. b) Determine la extensión máxima del resorte. c) Calcule la fuerza máxima que el resorte ejerce en el transporte. d) Considere el sistema constituido del cañón, el transporte y el proyectil. ¿Durante el disparo la cantidad de movimiento se conserva? ¿Por qué?

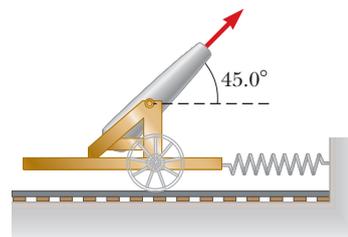


Figura P6.67

68. La "plataforma de fuerza" es una herramienta que se utiliza para analizar el desempeño de los atletas al medir la fuerza vertical como una función del tiempo que el atleta ejerce sobre el piso al realizar diferentes actividades. Una gráfica simplificada de fuerza vs. tiempo para un atleta que realiza un salto de altura vertical se muestra en la figura P6.68. El atleta inicia el salto en $t = 0.0$ s. ¿Qué tan alto salta el atleta?

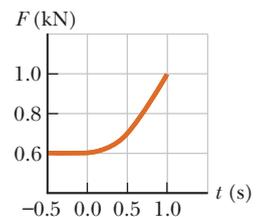


Figura P6.68

69. Un neutrón en un reactor realiza una colisión elástica de frente con un átomo de carbono que inicialmente está en reposo. (La masa del núcleo de carbono es casi 12 veces la del neutrón.) a) ¿Qué fracción de la energía cinética del neutrón se transfiere al núcleo de carbono? b) Si la energía cinética inicial del neutrón es $1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$, encuentre su energía cinética final y la energía cinética del núcleo de carbono después de la colisión.
70. **CIC S** Dos bloques colisionan sobre una superficie sin fricción. Después de la colisión, los bloques se traban. El bloque A tiene una masa M e inicialmente se está moviendo hacia la derecha con rapidez v . El bloque B tiene una masa $2M$ e inicialmente está en reposo. El sistema C está constituido por los dos bloques. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para cada bloque en un instante *durante* la colisión. b) Clasifique las magnitudes de las fuerzas horizontales en su diagrama. Explique su razonamiento. c) Calcule el cambio en la cantidad de movimiento del bloque A, el bloque B y el sistema C. d) ¿En esta colisión se conserva la energía cinética? Explique su respuesta. (Este problema es cortesía de Edward F. Redish. Para más problemas, visite <http://www.physics.umd.edu/perg/>.)
71. **CIC** a) Un automóvil que viaja hacia el este golpea un auto que viaja al norte en un cruce y los dos se mueven juntos como una unidad. Un propietario en la esquina sureste del cruce reclama que su cerca fue derribada en la colisión. ¿La compañía de seguros le debe otorgar indemnización por los daños? Defienda su respuesta. b) Asigne al automóvil que se mueve hacia el este una masa de 1300 kg y una rapidez de 30.0 km/h y al auto que se está moviendo hacia el norte una masa de 1100 kg y una rapidez de 20.0 km/h. Encuentre la velocidad después de la colisión. ¿Los resultados son consistentes con su respuesta al inciso a)?
72. Un jugador de fútbol de 60 kg salta verticalmente hacia arriba y cabecea el balón de 0.45 kg que está descendiendo verticalmente con una rapidez de 25 m/s. Si el jugador se movió hacia arriba con una rapidez de 4.0 m/s justo antes del impacto, ¿cuál será la rapidez del balón justo después de la colisión si el balón rebota verticalmente hacia arriba y la colisión es elástica? Si el balón está en contacto con la cabeza del jugador por 20 ms, ¿cuál es la aceleración promedio del balón? (Observe que la fuerza de gravedad puede despreciarse durante el breve tiempo de colisión.)

73. **M** Una pelota de tenis de 57.0 g se mantiene justo arriba de un balón de 590 g de masa. Con sus centros verticalmente alineados, las dos pelotas son liberadas desde el reposo al mismo tiempo, para caer a lo largo de una distancia de 1.20 m, como se muestra en la figura P6.73. a) Calcule la magnitud de la velocidad hacia abajo con la que el balón alcanza el piso. b) Piense que una colisión elástica con el piso invierte de manera instantánea la velocidad del balón, mientras que la pelota de tenis todavía se está moviendo hacia abajo. A continuación, las dos pelotas se unen en una colisión elástica. ¿A qué altura rebota la pelota de tenis?



Figura P6.73

74. Un deslizador de 20.0 kg con un conductor de 70.0 kg resbalan hacia abajo por un canal sin fricción dirigido a 30.0° por abajo de la horizontal a 8.00 m/s cuando una mujer de 55.0 kg cae desde la rama de un árbol en línea recta hacia abajo detrás del conductor. Si ella cae a lo largo de un desplazamiento vertical de 2.00 m, ¿cuál es la velocidad subsecuente del deslizador inmediatamente después del impacto?

75. **S** *Midiendo la rapidez de una bala.* Una bala de masa m se dispara horizontalmente en un bloque de madera de masa M que se encuentra sobre la mesa. La bala permanece en el bloque después de la colisión. El coeficiente de fricción entre el bloque y la mesa es μ , y el bloque se desliza una distancia d antes de detenerse. Halle la rapidez inicial v_0 de la bala en términos de M , m , μ , g y d .

76. Un calamar volador (de la familia de los *Ommastrephidae*) es capaz de “saltar” la superficie del océano tomando agua dentro de la cavidad de su cuerpo y después expulsarla verticalmente hacia abajo. Un calamar de 0.85 kg es capaz de expulsar 0.30 kg de agua con una rapidez de 20 m/s. a) ¿Cuál será la rapidez del calamar justo después de expulsar el agua? b) ¿Qué tan alto en el aire se elevará el calamar?

77. Un disco de 0.30 kg, inicialmente en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción, es golpeado por un disco de 0.20 kg que se está moviendo al inicio a lo largo del eje x con una velocidad de 2.0 m/s. Después de la colisión, el disco de 0.20 kg tiene una rapidez de 1.0 m/s con un ángulo $\theta = 53^\circ$ hacia el eje x positivo. a) Determine la velocidad del disco de 0.30 kg después de la colisión. b) Halle la fracción de energía cinética que se pierde en la colisión.

78. **CIC S** Un bloque de madera de masa M descansa sobre una mesa con un agujero grande como en la figura P6.78. Una bala de masa m con una velocidad inicial v_i se dispara hacia arriba a la parte inferior del bloque y se mantiene en el bloque después de la colisión. El bloque y la bala alcanzan altura máxima de h . a) Describa cómo encontrar la velocidad inicial de la bala con las ideas que ha aprendido en este capítulo. b) Encuentre una expresión para la velocidad inicial del proyectil.

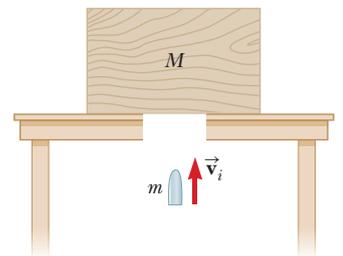


Figura P6.78 (Problemas 78 y 79)

79. **CIC** Un bloque de madera de 1.25 kg descansa sobre una mesa con un agujero grande como en la figura P6.78. Una bala de 5.00 g con una velocidad inicial v_i se dispara hacia arriba a la parte inferior del bloque y se mantiene en el bloque después de la colisión. El bloque y la bala alcanzan una altura máxima de 22.0 cm. a) Describa cómo encontrar la velocidad inicial de la bala con las ideas que ha aprendido en este capítulo. b) Calcule la velocidad inicial de la bala a partir de la información proporcionada.

La Estación Espacial Internacional en caída libre alrededor de la Tierra a miles de metros por segundo, que se mantiene en órbita por la fuerza centrípeta proporcionada por la gravedad.



7

Movimiento rotatorio y la ley de gravedad

- 7.1 Velocidad angular y aceleración angular
- 7.2 Movimiento rotatorio con aceleración angular constante
- 7.3 Relaciones entre cantidades angulares y lineales
- 7.4 Aceleración centrípeta
- 7.5 Gravitación newtoniana
- 7.6 Leyes de Kepler

El movimiento rotatorio es una parte importante de nuestra vida diaria. La rotación de la Tierra crea el ciclo del día y la noche, la rotación de las ruedas posibilitan el movimiento de los vehículos, y la tecnología moderna depende del movimiento circular en una gran variedad de contextos, desde los minúsculos engranajes de un reloj suizo hasta la operación de tornos y de otras maquinarias. Los conceptos de *velocidad angular*, *aceleración angular* y *aceleración centrípeta* son centrales para entender una gran cantidad de fenómenos, desde el movimiento de un móvil alrededor de una pista hasta el de un cúmulo de galaxias orbitando un centro común.

El movimiento rotatorio, combinado con la ley de Newton de gravitación universal y sus leyes de movimiento, pueden explicar ciertos hechos relacionados con los viajes espaciales y el movimiento de satélites, como dónde colocar un satélite de manera que mantenga una posición fija con respecto a la Tierra. La generalización de la energía potencial gravitacional y la conservación de la energía ofrece una fácil explicación para tales hechos, como la velocidad a la que se alcanza el escape planetario. Finalmente, se presentan las tres leyes de Kepler del movimiento planetario, a partir del enfoque newtoniano de la gravedad.

7.1 Velocidad angular y aceleración angular

En el estudio del movimiento rectilíneo, los conceptos importantes son el *desplazamiento* Δx , la *velocidad* v y la *aceleración* a . Cada uno de estos conceptos tiene su analogía en el movimiento rotatorio: *desplazamiento angular* $\Delta\theta$, *velocidad angular* ω y *aceleración angular* α .

El *radián*, una unidad de medida angular, es esencial para entender estos conceptos. Recuerde que la distancia s alrededor de un círculo está dada por $s = 2\pi r$, donde r es el radio del círculo. Dividiendo ambos lados de esta ecuación entre r resulta en $s/r = 2\pi$, lo cual no tiene dimensiones porque s y r tienen dimensiones de longitud, pero el valor 2π corresponde al desplazamiento alrededor de un círculo. La mitad de un círculo daría π , la

cuarta parte, $\pi/2$. Los números 2π , π y $\pi/2$ corresponden a ángulos de 360° , 180° y 90° , respectivamente, así que se puede introducir una nueva medida angular, el **radián**, con $180^\circ = \pi$ como una relación entre grados y radianes.

El ángulo θ subtendido por una longitud de arco s a lo largo de una circunferencia de radio r , medido en radianes en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj a partir del eje positivo de x , es

$$\theta = \frac{s}{r} \quad [7.1]$$

El ángulo θ en la ecuación 7.1 es realmente un desplazamiento angular a partir del eje x positivo, y s corresponde al desplazamiento a lo largo del arco circular, otra vez, medido desde el eje x positivo. La figura 7.1 ilustra el tamaño de un radián, aproximadamente 57° . Convertir grados a radianes requiere multiplicar los grados por la razón $(\pi \text{ rad}/180^\circ)$. Por ejemplo, $45^\circ (\pi \text{ rad}/180^\circ) = (\pi/4) \text{ rad}$.

En física, generalmente las cantidades angulares deben expresarse en radianes. Asegúrese de que su calculadora esté en el modo de radianes, para evitar errores que normalmente ocurren al realizar operaciones con medidas angulares.

Con el concepto de radián como medida, ahora podemos estudiar conceptos angulares en física. En la figura 7.2a se muestra un disco compacto rotando. Este disco es un ejemplo de un “cuerpo rígido”, en el que cada parte de éste está en posición fija, en relación con todas las otras partes del cuerpo. Cuando un cuerpo rígido rota un ángulo dado, todas las partes del cuerpo rotan el mismo ángulo al mismo tiempo. Para el disco compacto, el eje de rotación está en el centro del disco, O . Un punto P sobre el disco está a una distancia r del origen y se mueve alrededor de O en una circunferencia de radio r . Elijamos una recta de referencia *fija*, como se muestra en la figura 7.2a y supongamos que en el tiempo $t = 0$ el punto P está sobre la recta de referencia. Después de transcurrir un intervalo Δt , P ha avanzado a una nueva posición (figura 7.2b). En este intervalo, la recta OP ha descrito el ángulo θ con respecto a la recta de referencia. Al ángulo θ , medido en radianes, se le conoce como **posicion angular** y es análoga a la variable x usada en el movimiento rectilíneo. Asimismo, P ha descrito una longitud de arco s medida a lo largo de la circunferencia del círculo.

En la figura 7.3, al moverse un punto en el disco que rota de \textcircled{A} a \textcircled{B} en el tiempo Δt , empieza en un ángulo θ_i y termina en un ángulo θ_f . La diferencia $\theta_f - \theta_i$ es llamada **desplazamiento angular**.

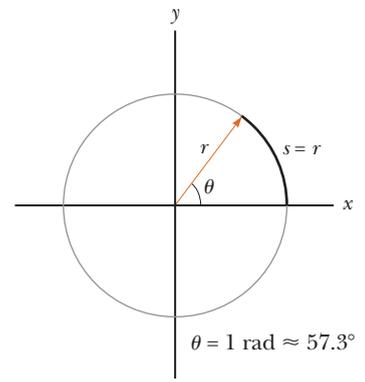


Figura 7.1 Para un círculo de radio r , un radián es el ángulo subtendido por una longitud de arco igual a r .

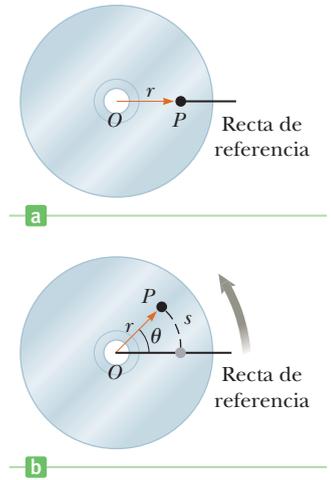


Figura 7.2 a) El punto P sobre un disco compacto rotando en $t = 0$. b) Cuando el disco rota, P se mueve a través de un arco de longitud s .

El desplazamiento angular de un objeto, $\Delta\theta$, es la diferencia de los ángulos final e inicial:

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i \quad [7.2]$$

Unidades SI: radianes (rad)

Por ejemplo, si un punto sobre un disco está a $\theta_i = 4 \text{ rad}$ y rota a una posición angular $\theta_f = 7 \text{ rad}$, el desplazamiento angular es $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i = 7 \text{ rad} - 4 \text{ rad} = 3 \text{ rad}$. Note que usamos variables angulares para describir la rotación del disco porque **cada punto en el disco experimenta la misma desviación angular en cualquier tiempo dado**.

Usando la definición de la ecuación 7.2, la ecuación 7.1 puede escribirse más generalmente como $\Delta\theta = \Delta s/r$, donde Δs es un desplazamiento a lo largo del arco circular subtendido por el desplazamiento angular. Contando con la definición de desplazamiento angular, se dispone de manera natural de la definición de velocidad angular:

La velocidad angular promedio ω_{prom} de un cuerpo rígido en rotación, durante el tiempo Δt , es el desplazamiento angular $\Delta\theta$ dividido entre Δt :

$$\omega_{\text{prom}} \equiv \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad [7.3]$$

Unidades SI: radianes por segundo (rad/s)

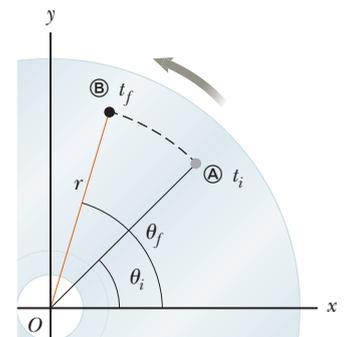


Figura 7.3 Conforme un punto sobre el disco compacto se mueve de \textcircled{A} a \textcircled{B} , el disco rota a través del ángulo $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$.

Tip 7.1 Recuerde el radián

La ecuación 7.1 utiliza ángulos medidos en *radianes*. Los ángulos expresados en términos de grados primero se deben convertir a radianes. Además, asegúrese de comprobar si su calculadora se encuentra en el modo de grados o radianes en la solución de problemas relacionados con la rotación.

Para intervalos cada vez más cortos, la velocidad angular promedio se aproxima a la velocidad angular instantánea, justamente como en el caso lineal.

La **velocidad angular instantánea** ω de un cuerpo rígido en rotación es el límite de la velocidad promedio $\Delta\theta/\Delta t$ conforme el intervalo Δt se aproxima a cero:

$$\omega \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad [7.4]$$

Unidades SI: radianes por segundo (rad/s)

Consideramos ω como positiva cuando θ sea creciente (movimiento en sentido contrario al giro de las manecillas del reloj) y negativa cuando θ sea decreciente (en el sentido del giro de las manecillas del reloj). Cuando la velocidad angular es constante, la velocidad angular instantánea es igual a la velocidad angular promedio.

EJEMPLO 7.1 Helicópteros

OBJETIVO Convertir una velocidad angular dada en revoluciones por minuto a radianes por segundo.

PROBLEMA El rotor de un helicóptero gira a una velocidad angular de 3.20×10^2 revoluciones por minuto (en este texto se utiliza a veces la abreviación rpm, aunque en la mayoría de los casos se usará rev/min). **a)** Exprese esta velocidad angular en radianes por segundo. **b)** Si el rotor tiene un radio de 2.00 m, ¿qué longitud de arco recorre el extremo del aspa en 3.00×10^2 s?

ESTRATEGIA Durante una revolución, el rotor gira un ángulo de 2π radianes. Utilice esta relación como factor de conversión.

SOLUCIÓN

a) Exprese la velocidad angular en radianes por segundo.

Aplicando los factores de conversión $1 \text{ rev} = 2\pi \text{ rad}$
y $60.0 \text{ s} = 1 \text{ min}$:

$$\begin{aligned} \omega &= 3.20 \times 10^2 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \\ &= 3.20 \times 10^2 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1.00 \text{ min}}{60.0 \text{ s}} \right) \\ &= 33.5 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

b) Multiplique la velocidad angular por el tiempo para obtener el desplazamiento angular:

$$\Delta\theta = \omega t = (33.5 \text{ rad/s})(3.00 \times 10^2 \text{ s}) = 1.01 \times 10^4 \text{ rad}$$

Multiplique el desplazamiento angular por el radio para obtener la longitud del arco:

$$\Delta s = r\Delta\theta = (2.00 \text{ m})(1.01 \times 10^4 \text{ rad}) = 2.02 \times 10^4 \text{ m}$$

COMENTARIOS En general, es mejor expresar la velocidad angular en radianes por segundo, por lo que conviene utilizar estas unidades a fin de minimizar los errores.

PREGUNTA 7.1 ¿Es posible expresar la velocidad angular en grados por segundo? Si es así, ¿cuál es el factor de conversión de radianes por segundo?

EJERCICIO 7.1 Una rueda hidráulica gira a 1500 revoluciones por hora. Exprese esta razón de rotación en unidades de radianes por segundo.

RESPUESTA 2.6 rad/s

Examen rápido

7.1 Un cuerpo rígido está girando en sentido contrario al de las manecillas del reloj, alrededor de un eje fijo. Cada uno de los siguientes pares de cantidades representa una posición angular inicial y final de un cuerpo rígido. ¿Cuál de los pares puede ocurrir *sólo* si el cuerpo rígido gira más de 180° ? a) 3 rad, 6 rad; b) -1 rad, 1 rad; c) 1 rad, 5 rad.

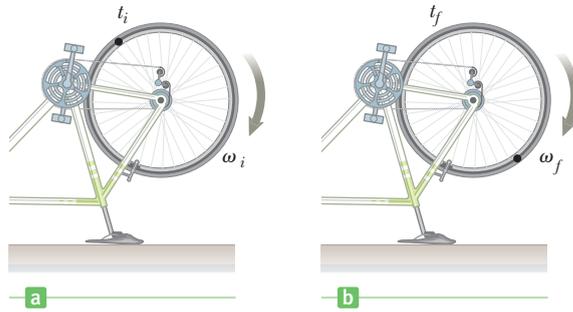


Figura 7.4 Al acelerar, una rueda de bicicleta gira con a) una velocidad angular ω_i en un tiempo t_i y b) una velocidad angular ω_f en el tiempo t_f .

Examen rápido

7.2 Suponga que el cambio en la posición angular para cada par de valores del examen rápido 7.1 ocurre en 1 s. ¿Qué opción representa la velocidad angular promedio más baja?

La figura 7.4 muestra una bicicleta con las ruedas hacia arriba a la que se ha de reparar la rueda trasera. Los pedales de la bicicleta se hacen girar para que, en un tiempo t_i , la rueda tenga una velocidad angular ω_i (figura 7.4a) y en un tiempo t_f después alcance una velocidad angular ω_f (figura 7.4b). Dado que un cambio de velocidad conlleva el concepto de aceleración, un cambio de velocidad angular conduce al concepto de aceleración angular.

La aceleración angular promedio α_{prom} de un objeto, durante un intervalo de tiempo Δt , es el cambio de su velocidad angular $\Delta\omega$ dividido entre Δt :

$$\alpha_{\text{prom}} \equiv \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad [7.5]$$

Unidades SI: radianes por segundo al cuadrado (rad/s^2)

Al igual que en la velocidad angular, la aceleración angular positiva está en dirección contraria al sentido en el que giran las manecillas del reloj, y es negativa si lo hace en el sentido en el que giran las manecillas. Si la velocidad angular cambia de 15 rad/s a 9.0 rad/s en 3.0 s, la aceleración angular promedio durante este intervalo de tiempo es

$$\alpha_{\text{prom}} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{9.0 \text{ rad/s} - 15 \text{ rad/s}}{3.0 \text{ s}} = -2.0 \text{ rad/s}^2$$

El signo negativo indica que la aceleración angular ocurre en el sentido que giran las manecillas del reloj (pero la velocidad angular, aunque más lenta, sigue teniendo la dirección en el sentido contrario al giro de las manecillas del reloj). También hay una versión de la aceleración angular instantánea:

La aceleración angular instantánea α es el límite de la aceleración angular promedio $\Delta\omega/\Delta t$ conforme el intervalo Δt se aproxima a cero:

$$\alpha \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad [7.6]$$

Unidades SI: radianes por segundo al cuadrado (rad/s^2)

Cuando un cuerpo rígido gira alrededor de un eje fijo, como lo hace la rueda de la bicicleta, cada parte del objeto tiene la misma velocidad angular y aceleración angular. Este hecho es lo que hace que estas variables sean tan útiles en la descripción de un movimiento rotatorio. En contraste, la velocidad tangencial (lineal) y la aceleración lineal del objeto toman diferentes valores dependiendo de la distancia del punto en consideración al eje de rotación.

◀ Aceleración angular promedio

◀ Aceleración angular instantánea

7.2 Movimiento rotatorio con aceleración angular constante

Hay un paralelismo entre las ecuaciones para movimientos rotatorios y para los lineales. Por ejemplo, compare la ecuación definida para la velocidad angular promedio

$$\omega_{\text{prom}} \equiv \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

con la ecuación para la rapidez lineal promedio

$$v_{\text{prom}} \equiv \frac{x_f - x_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

En estas ecuaciones, ω toma el lugar de v y θ , el lugar de x , así que las ecuaciones difieren sólo en el nombre de las variables. Del mismo modo, cada cantidad lineal encuentra su correspondiente “gemelo” en el movimiento rotatorio.

El procedimiento utilizado en la sección 2.5 al desarrollar las ecuaciones de la cinemática para el movimiento lineal con aceleración constante puede ser usado para obtener un conjunto similar de ecuaciones para el movimiento rotatorio con aceleración angular constante. Las ecuaciones resultantes de la cinemática rotatoria, dada la comparación con las ecuaciones para el movimiento lineal, son las siguientes:

Movimiento lineal con a constante (variables: x y v)	Movimiento rotatorio alrededor de un eje fijo con α constante (variables: θ y ω)
$v = v_i + at$	$\omega = \omega_i + \alpha t$ [7.7]
$\Delta x = v_i t + \frac{1}{2}at^2$	$\Delta\theta = \omega_i t + \frac{1}{2}\alpha t^2$ [7.8]
$v^2 = v_i^2 + 2a\Delta x$	$\omega^2 = \omega_i^2 + 2\alpha\Delta\theta$ [7.9]

Observe que cada término en una ecuación lineal dada tiene un término correspondiente en la ecuación rotatoria análoga.

Examen rápido

7.3 Considere otra vez los pares de posiciones angulares del cuerpo rígido del examen rápido 7.1. Si el objeto parte del reposo de la posición angular inicial moviéndose en sentido contrario a las manecillas del reloj con aceleración angular constante, y llega a la posición angular final con la misma velocidad angular en los tres casos, ¿en cuál de estos pares se da la aceleración angular máxima?

EJEMPLO 7.2 Rueda en rotación

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones de la cinemática rotatoria.

PROBLEMA Una rueda gira con una aceleración angular constante de 3.50 rad/s^2 . Si la velocidad angular de la rueda es 2.00 rad/s en $t = 0$, **a)** ¿cuál es el ángulo en que gira la rueda entre $t = 0$ y $t = 2.00 \text{ s}$? Escriba su respuesta en radianes y en revoluciones. **b)** ¿Cuál es la velocidad angular de la rueda en $t = 2.00 \text{ s}$? **c)** ¿Qué desplazamiento angular (en revoluciones) resulta cuando la velocidad angular del inciso b) se duplica?

ESTRATEGIA La aceleración angular es constante, así que la solución requiere la sustitución de los valores dados, en las ecuaciones 7.7 a 7.9.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el desplazamiento angular después de 2.00 s , tanto en radianes como en revoluciones.

Use la ecuación 7.8, con $\omega_i = 2.00 \text{ rad/s}$, $\alpha = 3.5 \text{ rad/s}^2$ y $t = 2.00 \text{ s}$:

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \omega_i t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \\ &= (2.00 \text{ rad/s})(2.00 \text{ s}) + \frac{1}{2}(3.50 \text{ rad/s}^2)(2.00 \text{ s})^2 \\ &= 11.0 \text{ rad} \end{aligned}$$

Convierta radianes a revoluciones.

$$\Delta\theta = (11.0 \text{ rad})(1.00 \text{ rev}/2\pi \text{ rad}) = 1.75 \text{ rev}$$

b) ¿Cuál es la rapidez angular de la rueda en $t = 2.00$ s?

Sustituya los mismos valores en la ecuación 7.7:

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_i + \alpha t = 2.00 \text{ rad/s} + (3.50 \text{ rad/s}^2)(2.00 \text{ s}) \\ &= 9.00 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

c) ¿Qué desplazamiento angular (en revoluciones) resulta durante el tiempo en que la velocidad angular hallada en el inciso b) se duplica?

Aplique la ecuación independiente del tiempo de rotación de cinemática:

$$\omega_f^2 - \omega_i^2 = 2\alpha\Delta\theta$$

Sustituya valores, observe que $\omega_f = 2\omega_i$:

$$(2 \times 9.00 \text{ rad/s})^2 - (9.00 \text{ rad/s})^2 = 2(3.50 \text{ rad/s}^2)\Delta\theta$$

Resuelva para el desplazamiento angular y convierta a revoluciones:

$$\Delta\theta = (34.7 \text{ rad})\left(\frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}}\right) = 5.52 \text{ rev}$$

COMENTARIOS El resultado del inciso b) también pudo obtenerse de la ecuación 7.9 y los resultados de a).

PREGUNTA 7.2 Suponga que el radio de la rueda es el doble, ¿afecta esto sus respuestas? Si es así, ¿de qué modo?

EJERCICIO 7.2 a) Encuentre el ángulo de rotación de la rueda entre $t = 2.00$ s y $t = 3.00$ s. b) Encuentre la rapidez angular cuando $t = 3.00$ s. c) ¿Cuál es la rapidez angular dos revoluciones después de $t = 3$ s?

RESPUESTAS a) 10.8 rad b) 12.5 rad/s c) 15.6 rad/s

7.3 Relaciones entre cantidades angulares y lineales

Las variables angulares están muy relacionadas con aquellas lineales. Considere el objeto de forma arbitraria de la figura activa 7.5, que gira alrededor del eje z por el punto O . Suponga que el objeto recorre un ángulo $\Delta\theta$ y, por lo tanto, el punto P se mueve por la longitud de arco Δs en el intervalo Δt . De la ecuación que define la medida para un radián se sabe que:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta s}{r}$$

Dividiendo ambos lados de esta ecuación entre Δt , el tiempo durante el cual la rotación ocurre, se tiene que:

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{1}{r} \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Cuando Δt es muy pequeño, el ángulo $\Delta\theta$ que describe el objeto al girar también es muy pequeño, por lo que la razón $\Delta\theta/\Delta t$ es muy cercana a la rapidez angular instantánea ω . Del mismo modo, la razón $\Delta s/\Delta t$ se aproxima a la rapidez lineal instantánea v para valores muy pequeños de Δt . Por lo tanto, cuando Δt es arbitrariamente pequeño, la ecuación anterior es equivalente a:

$$\omega = \frac{v}{r}$$

En la figura activa 7.5, el punto P viaja una distancia Δs a lo largo de un arco circular durante el intervalo de tiempo Δt con una rapidez lineal v . La dirección de P en cada punto está dada por el vector velocidad \vec{v} , y es *tangente a la trayectoria circular*. La magnitud de \vec{v} es la rapidez lineal $v = v_t$, y se conoce como la **rapidez tangencial** de una partícula que se mueve sobre una trayectoria circular. Esto se escribe como:

$$v_t = r\omega$$

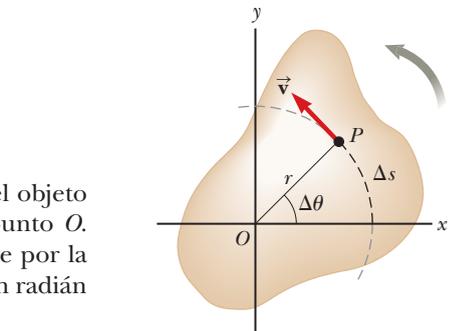


Figura activa 7.5

Rotación de un objeto alrededor de un eje que pasa por O (eje z), y que es perpendicular al plano de la figura. Note que un punto P sobre el objeto describe una circunferencia de radio r , centrada en O .

La velocidad tangencial de un punto sobre un objeto en rotación es igual a la distancia del punto al eje de rotación multiplicada por la velocidad angular. La ecuación 7.10 muestra que la velocidad lineal de un punto sobre un objeto que rota crece cuando el punto se mueve hacia fuera, desde el centro de rotación hacia el borde, como intuitivamente podría esperarse. Sin embargo, **cada punto sobre el objeto en rotación tiene la misma velocidad angular.**

La ecuación 7.10, obtenida utilizando la ecuación que define la medida de un radián, es válida sólo cuando ω es medida en radianes por unidades de tiempo. Otras unidades de velocidad angular, como los grados por segundo y revoluciones por segundo, podrían no dar respuestas correctas.

Para encontrar una segunda ecuación que relacione cantidades lineales con angulares, recurra otra vez a la figura activa 7.5 y suponga que el objeto en rotación cambia su velocidad angular en $\Delta\omega$ en tiempo Δt . Al final de este intervalo, la velocidad de un punto sobre el objeto, como P , ha cambiado una cantidad Δv_t . De la ecuación 7.10 se tiene:

$$\Delta v_t = r\Delta\omega$$

Dividiendo por Δt da:

$$\frac{\Delta v_t}{\Delta t} = r \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

Cuando el intervalo Δt se toma arbitrariamente pequeño, $\Delta\omega/\Delta t$ se aproxima a la aceleración angular instantánea. En el lado izquierdo de la ecuación, observe que la razón $\Delta v_t/\Delta t$ tiende a la aceleración lineal instantánea, también llamada aceleración tangencial en este punto, y que está dada por:

Aceleración tangencial ►

$$a_t = r\alpha$$

[7.11]

Así, la aceleración tangencial de un punto sobre un objeto en rotación es igual a la distancia de ese punto al eje de rotación multiplicada por la aceleración angular. Otra vez, deben usarse unidades en radianes para la aceleración angular en esta ecuación.

Hay una ecuación más que relaciona cantidades lineales con angulares, pero se verá en la siguiente sección.

■ Examen rápido

7.4 Andrea y José están paseando en un carrusel. Andrea monta un caballo en el borde externo de la plataforma circular, dos veces más lejos del centro de la plataforma circular que el caballo más interno que monta José. Cuando el carrusel está girando con una velocidad angular constante, la velocidad angular de Andrea es a) dos veces la de José b) la misma que la de él c) la mitad de la de él d) imposible de determinar.

7.5 Cuando el carrusel del examen rápido 7.4 está girando a una velocidad angular constante, la velocidad tangencial de Andrea es a) dos veces la de José b) la misma que la de él c) la mitad de la de él d) imposible de determinar.

■ FÍSICA APLICADA 7.1

Sitio de lanzamiento ESA

¿Por qué el sitio de lanzamientos de la Agencia Espacial Europea (ESA) no está en Europa sino en Sudamérica?

EXPLICACIÓN Para colocar un satélite en órbita se necesita una gran velocidad tangencial, la cual se logra con un sistema de propulsión que aportan los cohetes. Debido a su rotación, la superficie terrestre se mueve hacia el este con una velocidad tangencial cercana a 1700 m/s en el Ecuador.

Esta velocidad tangencial es constantemente reducida cuando se está cerca del norte porque la distancia al eje de la rotación está disminuyendo, por lo que sería cero en el Polo Norte. Lanzar cohetes hacia el este desde el Ecuador, permite aprovechar la rotación terrestre, ya que ésta proporciona una velocidad tangencial inicial de 1700 m/s, mientras que lanzarlos desde Europa provee aproximadamente la mitad de esta velocidad (dependiendo de la latitud exacta). ■

■ EJEMPLO 7.3 Discos compactos

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones de la cinemática rotatoria en coherencia con la velocidad y aceleración tangenciales.

PROBLEMA Un disco compacto gira desde el reposo hasta una velocidad angular de 31.4 rad/s en un tiempo de 0.892 s. **a)** ¿Cuál es la aceleración angular del disco suponiendo que ésta sea uniforme? **b)** ¿Qué ángulo ha recorrido el disco en su giro mientras alcanza su máxima velocidad? **c)** Si el radio del disco es 4.45 cm, encuentre la velocidad tangencial de un microbio que se mueve sobre el borde del disco cuando $t = 0.892$ s. **d)** ¿Cuál es la magnitud de la aceleración tangencial del microbio en el tiempo dado?

ESTRATEGIA Se pueden resolver los incisos a) y b) aplicando las ecuaciones de la cinemática para la velocidad y desplazamiento angulares (ecuaciones 7.7 y 7.8). Multiplicando el radio por la aceleración angular se obtiene la aceleración tangencial en el borde, mientras que multiplicando el radio por la velocidad angular da la velocidad tangencial en ese punto.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la aceleración angular del disco.

Aplique la ecuación para la velocidad angular $\omega = \omega_i + \alpha t$, tomando $\omega_i = 0$ en $t = 0$:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{31.4 \text{ rad/s}}{0.892 \text{ s}} = 35.2 \text{ rad/s}^2$$

b) ¿Cuál es el desplazamiento angular del disco?

Use la ecuación 7.8 para el desplazamiento angular, con $t = 0.892$ s y $\omega_i = 0$:

$$\Delta\theta = \omega_i t + \frac{1}{2}\alpha t^2 = \frac{1}{2}(35.2 \text{ rad/s}^2)(0.892 \text{ s})^2 = 14.0 \text{ rad}$$

c) Encuentre la velocidad tangencial final de un microbio en $r = 4.45$ cm.

Sustituya en la ecuación 7.10:

$$v_t = r\omega = (0.0445 \text{ m})(31.4 \text{ rad/s}) = 1.40 \text{ m/s}$$

d) Encuentre la aceleración tangencial del microbio en $r = 4.45$ cm.

Sustituya en la ecuación 7.11:

$$a_t = r\alpha = (0.0445 \text{ m})(35.2 \text{ rad/s}^2) = 1.57 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS Debido a que $2\pi \text{ rad} = 1 \text{ rev}$, el desplazamiento angular en el inciso b) corresponde a 2.23 rev. En general, dividiendo el número de radianes entre 6 , se obtiene una buena aproximación del número de revoluciones, porque $2\pi \sim 6$.

PREGUNTA 7.3 Si la aceleración angular fuera el doble en el mismo tiempo, ¿por qué factor debería cambiar el desplazamiento angular? ¿Por qué esta respuesta es cierta en este caso, pero no en lo general?

EJERCICIO 7.3 a) Cuáles son la velocidad y el desplazamiento angulares del disco 0.300 s después de empezar a girar? b) Encuentre la velocidad tangencial en el borde, en ese tiempo.

RESPUESTAS a) 10.6 rad/s; 1.58 rad b) 0.472 m/s

Antes de que el MP3 se convirtiera en el medio de elección de la música grabada, los discos compactos y los fonógrafos eran populares. Hay semejanzas y diferencias entre el movimiento rotatorio de los discos de fonógrafo y los actuales discos compactos. Por ejemplo, un disco fonográfico gira con una velocidad angular constante, y las velocidades más utilizadas eran las $33\frac{1}{3}$ rev/min para álbumes de larga duración o LP, 45 rev/min para “sencillos” y 78 rev/min usadas en las primeras grabaciones de hace muchos años. En el borde exterior del disco, el movimiento de la aguja ocurría sobre el material de vinilo con una velocidad tangencial mayor que en las cercanías del centro. Así, la información auditiva se comprimía en una pista de longitud más pequeña cerca del centro del disco que en las proximidades del borde.

Los discos compactos están diseñados de manera que se muevan frente a un lector láser a una velocidad tangencial constante. Debido a que el lector se mueve radialmente siguiendo las pistas de información, se requiere que la velocidad angular del disco compacto

APLICACIÓN

Discos fonográficos y compactos

varíe coordinadamente con la posición radial del láser. Dado que la velocidad tangencial es fija, la densidad de información (por longitud de pista) en cualquier parte del disco es la misma. El ejemplo 7.4 muestra los cálculos numéricos para ambos tipos de discos.

■ EJEMPLO 7.4 Longitud de pista de un disco compacto

OBJETIVO Relacionar variables angulares con lineales.

PROBLEMA En un reproductor de discos compactos, a medida que la cabeza lectora se mueve desde el centro del disco, la velocidad angular de éste cambia de manera que la velocidad lineal en la posición de la cabeza siempre es un valor constante de aproximadamente 1.3 m/s. **a)** Encuentre la velocidad angular cuando la cabeza lectora está a $r = 2.0$ cm y luego a $r = 5.6$ cm. **b)** Una tornamesa anticuada gira con una velocidad angular constante, de manera que la velocidad lineal del surco del disco que se mueve bajo el detector (aguja) cambia. Encuentre la velocidad lineal de un disco de 45.0 rpm en los puntos a 2.0 y 5.6 cm del centro. **c)** En ambos, CD y disco fonográfico, la información es registrada

en una pista espiral continua. Calcule la longitud total de la pista para un CD diseñado para reproducir durante 1.0 h.

ESTRATEGIA Este problema sólo requiere sustituir números en las ecuaciones apropiadas. En el inciso a) se necesita relacionar las velocidades angular y lineal utilizando la ecuación 7.10, $v_t = r\omega$, despejando ω y sustituyendo los valores dados. En el inciso b) convierta rev/min a rad/s y sustituya en la ecuación 7.10 para obtener la velocidad lineal. En el inciso c) hay que multiplicar la velocidad lineal por el tiempo dado, para obtener la distancia total.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad angular del disco cuando la cabeza lectora está a $r = 2.0$ cm y $r = 5.6$ cm.

Despeje $v_t = r\omega$ de la ecuación ω y calcule la velocidad angular para $r = 2.0$ cm:

$$\omega = \frac{v_t}{r} = \frac{1.3 \text{ m/s}}{2.0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 65 \text{ rad/s}$$

Del mismo modo, encuentre la velocidad angular para $r = 5.6$ cm:

$$\omega = \frac{v_t}{r} = \frac{1.3 \text{ m/s}}{5.6 \times 10^{-2} \text{ m}} = 23 \text{ rad/s}$$

b) Encuentre la velocidad lineal en m/s de un disco de 45.0 rpm en los puntos a 2.0 cm y 5.6 cm del centro.

Convierta rev/min a rad/s:

$$45.0 \frac{\text{rev}}{\text{min}} = 45.0 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{\text{rev}} \right) \left(\frac{1.00 \text{ min}}{60.0 \text{ s}} \right) = 4.71 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Calcule la velocidad lineal para $r = 2.0$ cm:

$$v_t = r\omega = (2.0 \times 10^{-2} \text{ m})(4.71 \text{ rad/s}) = 0.094 \text{ m/s}$$

Encuentre la velocidad lineal para $r = 5.6$ cm:

$$v_t = r\omega = (5.6 \times 10^{-2} \text{ m})(4.71 \text{ rad/s}) = 0.26 \text{ m/s}$$

c) Halle la longitud total de la pista para un CD diseñado para reproducir durante 1.0 h.

Multiplique la velocidad lineal de la cabeza lectora por el tiempo en segundos:

$$d = v_t t = (1.3 \text{ m/s})(3600 \text{ s}) = 4700 \text{ m}$$

COMENTARIOS Observe que para el tocadiscos en el inciso b), aun cuando la velocidad angular es constante en todos los puntos a lo largo de una recta radial, la velocidad tangencial aumenta constantemente con el incremento de r . El cálculo para el CD del inciso c) es fácil sólo porque la velocidad lineal (tangencial) es constante. Sería mucho más difícil para un fonógrafo en el que la velocidad tangencial dependa de la distancia al centro.

PREGUNTA 7.4 ¿Cuál es la aceleración angular de un tocadiscos mientras está reproduciendo una canción? ¿Puede un reproductor de CD tener la misma aceleración angular que un fonógrafo? Explique.

EJERCICIO 7.4 Calcule la velocidad lineal de un tocadiscos a $33\frac{1}{3}$ rpm a) a $r = 2.00$ cm y b) a $r = 5.60$ cm.

RESPUESTAS a) 0.0698 m/s b) 0.195 m/s

7.4 Aceleración centrípeta

La figura 7.6a muestra un automóvil desplazándose con una *velocidad lineal constante* v , en una trayectoria circular. **Aun cuando el automóvil se mueve con una velocidad constante, experimenta una aceleración.** Para entender esto, considere la ecuación que define a la aceleración promedio:

$$\vec{a}_{\text{prom}} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad [7.12]$$

El numerador representa la diferencia entre los vectores velocidad \vec{v}_f y \vec{v}_i . Estos vectores pueden tener la misma *magnitud*, correspondiente a la misma velocidad, pero si tienen diferentes direcciones, su diferencia no puede ser cero. La dirección de la velocidad del automóvil cambia continuamente debido a que se mueve por una trayectoria circular, como se ve en la figura 7.6b. Para un movimiento circular con velocidad constante, el vector aceleración siempre apunta hacia el centro del círculo y se le conoce como **aceleración centrípeta** (que busca el centro). La magnitud de esta aceleración está dada por:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \quad [7.13]$$

Para obtener la ecuación 7.13, considere la figura 7.7a. Un objeto se encuentra primero en el punto \textcircled{A} con una velocidad \vec{v}_i en el tiempo t_i y, después en el punto \textcircled{B} , con una velocidad \vec{v}_f en un tiempo después t_f . Suponemos que \vec{v}_i y \vec{v}_f difieren sólo en dirección, y sus magnitudes son las mismas ($v_i = v_f = v$). Para calcular la aceleración, empezamos con la ecuación 7.12,

$$\vec{a}_{\text{prom}} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad [7.14]$$

donde $\Delta\vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i$ es el cambio de velocidad. Cuando Δt es muy pequeño, Δs y $\Delta\theta$ también lo son. En la figura 7.7b \vec{v}_f es casi paralelo a \vec{v}_i , y el vector $\Delta\vec{v}$ es casi perpendicular a ellos, apuntando hacia el centro del círculo. En el caso límite cuando Δt sea sumamente pequeño, $\Delta\vec{v}$ apuntará exactamente hacia el centro del círculo, y la aceleración promedio \vec{a}_{prom} se convertirá en la aceleración instantánea \vec{a} . De la ecuación 7.14, \vec{a} y $\Delta\vec{v}$ apuntan en la misma dirección (en este límite), así que la aceleración instantánea apuntará hacia el centro del círculo.

El triángulo en la figura 7.7a, con lados Δs y r , es semejante al formado por los vectores de la figura 7.7b, así que las razones entre sus lados son iguales:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r} \quad [7.15]$$

o

$$\Delta v = \frac{v}{r} \Delta s \quad [7.16]$$

Sustituyendo el resultado de la ecuación 7.15 en $a_{\text{prom}} = \Delta v / \Delta t$ se obtiene:

$$a_{\text{prom}} = \frac{v}{r} \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Pero Δs es la distancia recorrida a lo largo del arco de circunferencia en el tiempo Δt y, en el caso límite, cuando Δt es muy pequeño, $\Delta s / \Delta t$ se aproxima al valor instantáneo de la velocidad tangencial, v . Al mismo tiempo, la aceleración promedio a_{prom} se aproxima a a_c , la aceleración instantánea centrípeta, así que la ecuación 7.16 se reduce a la ecuación 7.13:

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

Debido a que la velocidad tangencial está relacionada con la velocidad angular por medio de la relación $v_t = r\omega$ (ecuación 7.10), una forma alternativa de la ecuación 7.13 es:

$$a_c = \frac{r^2\omega^2}{r} = r\omega^2 \quad [7.17]$$

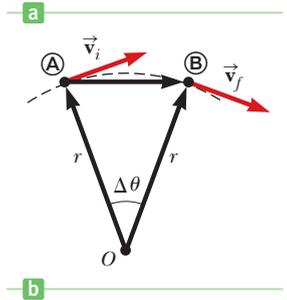
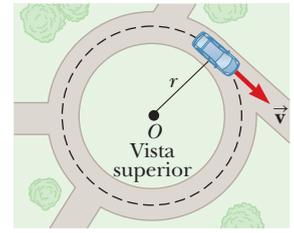


Figura 7.6 a) Movimiento circular de un automóvil con rapidez constante. b) Cuando el automóvil se desplaza a lo largo de la trayectoria circular de \textcircled{A} a \textcircled{B} , la dirección de su vector velocidad cambia sometiendo a una aceleración centrípeta.

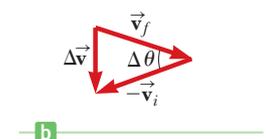
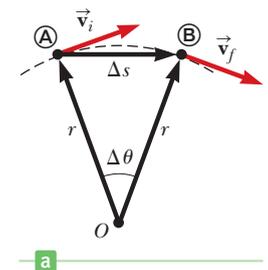


Figura 7.7 a) Conforme la partícula se mueve de \textcircled{A} a \textcircled{B} , la dirección de su vector velocidad cambia de \vec{v}_i a \vec{v}_f . b) Construcción para determinar la dirección del cambio de velocidad $\Delta\vec{v}$, dirigida hacia el centro del círculo.

Dimensionalmente, $[r] = L$ y $[\omega] = 1/T$, así que las unidades de la aceleración centrípeta son L/T^2 , como debe esperarse. Esto es un resultado geométrico de relacionar la aceleración centrípeta con la velocidad angular, pero físicamente una aceleración puede ocurrir solamente si una fuerza está presente. Por ejemplo, si un automóvil viaja en trayectoria circular plana, la fuerza de fricción estática entre las llantas y el suelo provee la fuerza centrípeta necesaria para mantener al automóvil en su trayectoria.

Observe que a_c en las ecuaciones 7.13 y 7.17 representa sólo la *magnitud* de la aceleración centrípeta. La aceleración misma está siempre dirigida hacia el centro de rotación.

Las derivaciones precedentes se refieren al movimiento circular con velocidad constante. Cuando un objeto se mueve en una circunferencia acelerando o desacelerando, se presenta una componente de la aceleración tangencial, $a_t = r\alpha$. Debido a que las componentes de la aceleración, tangencial y centrípeta, son perpendiculares entre sí, es posible hallar la magnitud de la **aceleración total** con el uso del teorema de Pitágoras:

Aceleración total ▶

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_c^2} \quad [7.18]$$

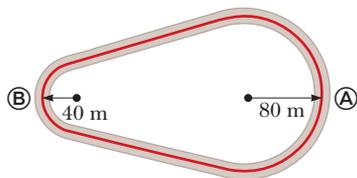


Figura 7.8 (Examen rápido 7.6)

■ Examen rápido

7.6 Una pista de carreras se construye de manera tal que dos arcos de radios de 80 m en A y 40 m en B están unidos por dos tramos rectos como se muestra en la figura 7.8. En una carrera de prueba, un piloto conduce con una rapidez constante de 50 m/s para completar una vuelta.

- La razón de la aceleración tangencial en A a B es
a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{1}{4}$ c) 2 d) 4 e) La aceleración tangencial es cero en ambos puntos.
- La razón de la aceleración centrípeta en A a B es
a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{1}{4}$ c) 2 d) 4 e) La aceleración centrípeta es cero en ambos puntos.
- La velocidad angular es mayor en
a) A b) B c) Es la misma en A y B.

7.7 Un objeto se mueve con una velocidad constante v , en una trayectoria circular. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones concernientes al objeto es cierta? a) Su velocidad es constante, pero su aceleración está cambiando. b) Su aceleración es constante, pero su velocidad está cambiando. c) Su velocidad y aceleración están cambiando. d) Su velocidad y aceleración permanecen constantes.

■ EJEMPLO 7.5 En la pista de carreras

OBJETIVO Aplicar los conceptos de aceleración centrípeta y velocidad tangencial.

PROBLEMA Un auto de carreras acelera uniformemente de una velocidad de 40.0 m/s a otra de 60.0 m/s en 5.00 s mientras se mueve en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor de una pista circular de radio 4.00×10^2 m. Cuando el auto alcanza una velocidad de 50.0 m/s, encuentre **a)** la magnitud de la aceleración centrípeta del auto, **b)** la velocidad angular, **c)** la magnitud de la aceleración tangencial y **d)** la magnitud de la aceleración total.

ESTRATEGIA Sustituya los valores en las definiciones de aceleración centrípeta (ecuación 7.13), velocidad tangencial (ecuación 7.10) y la aceleración total (ecuación 7.18). Dividiendo el cambio de velocidad lineal por el tiempo se obtiene la aceleración tangencial.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la magnitud de la aceleración centrípeta cuando $v = 50.0$ m/s.

Sustituya en la ecuación 7.13:

$$a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{(50.0 \text{ m/s})^2}{4.00 \times 10^2 \text{ m}} = 6.25 \text{ m/s}^2$$

b) Para encontrar la rapidez angular.

Despeje ω de la ecuación 7.10 y sustituya:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{50.0 \text{ m/s}}{4.00 \times 10^2 \text{ m}} = 0.125 \text{ rad/s}$$

c) Para encontrar la magnitud de la aceleración tangencial.

Divida el cambio de la velocidad lineal entre el tiempo:

$$a_t = \frac{v_f - v_i}{\Delta t} = \frac{60.0 \text{ m/s} - 40.0 \text{ m/s}}{5.00 \text{ s}} = 4.00 \text{ m/s}^2$$

d) Encuentre la magnitud de la aceleración total.

Sustituya en la ecuación 7.18:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_c^2} = \sqrt{(4.00 \text{ m/s}^2)^2 + (6.25 \text{ m/s}^2)^2}$$

$$a = 7.42 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS También es posible encontrar la aceleración centrípeta sustituyendo el valor obtenido de ω en la ecuación 7.17.

PREGUNTA 7.5 Si la fuerza causante de la aceleración centrípeta se desvaneciera de repente, ¿podría el auto a) resbalar a lo largo de un radio, b) continuar a lo largo de una recta tangente al movimiento circular, o bien c) continuar con un ángulo intermedio entre la tangente y el radio?

EJERCICIO 7.5 Suponga que el auto de carreras frena uniformemente de 60.0 m/s a 30.0 m/s en 4.50 s para evitar un accidente, mientras continúa moviéndose sobre una trayectoria circular de radio 4.00×10^2 m. Encuentre a) la aceleración centrípeta del auto, b) su velocidad angular, c) su aceleración tangencial y d) su aceleración total cuando la velocidad es de 40.0 m/s.

RESPUESTAS a) 4.00 m/s² b) 0.100 rad/s c) -6.67 m/s² d) 7.78 m/s²

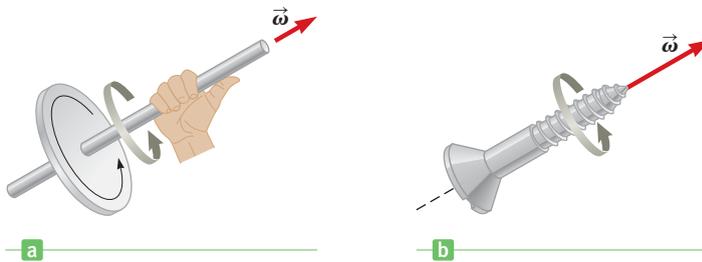


Figura 7.9 a) Regla de la mano derecha para determinar la dirección del vector velocidad angular $\vec{\omega}$. b) La dirección de $\vec{\omega}$ está en la dirección en la que avanza un tornillo derecho.

Las cantidades angulares son vectores

Cuando analizamos el movimiento lineal en el capítulo 2, enfatizamos que el desplazamiento, la velocidad y la aceleración son cantidades vectoriales. En la descripción del movimiento rotatorio, el desplazamiento angular, la velocidad angular y la aceleración angular son también cantidades vectoriales.

La dirección del vector velocidad angular $\vec{\omega}$ puede determinarse por la **regla de la mano derecha**, como se ve en la figura 7.9a. Para esto, sujete el eje de rotación con su mano derecha de manera que sus dedos se cierren en la dirección de la rotación. El pulgar extendido indica la dirección de $\vec{\omega}$. La figura 7.9b muestra que $\vec{\omega}$ también está en la dirección en la que avanza un tornillo derecho.

Es posible aplicar esta regla a un disco giratorio visto a lo largo del eje de rotación, figura 7.10. Cuando el disco rota en el sentido de las manecillas del reloj (7.10a), la regla de la mano derecha muestra la dirección de $\vec{\omega}$ entrando perpendicularmente hacia arriba. Cuando el disco rota en el sentido contrario a las manecillas del reloj (figura 7.10b), la dirección de $\vec{\omega}$ está hacia abajo.

Finalmente, las direcciones de la aceleración angular $\vec{\alpha}$ y la velocidad angular $\vec{\omega}$ son las mismas si la rapidez angular ω (la magnitud de $\vec{\omega}$) está creciendo con el tiempo y son opuestas si la rapidez angular está decreciendo con el tiempo.

Fuerzas causantes de la aceleración centrípeta

Un objeto puede tener una aceleración centrípeta *sólo* si alguna fuerza externa actúa sobre él. Para una bola girando en círculo debido a que está atada al extremo de una cuerda, la fuerza es la tensión de ésta. En el caso de un automóvil que se mueve a lo largo de una pista circular plana, la fuerza es la fricción entre el auto y la pista. Un satélite en órbita circular alrededor de la Tierra tiene una aceleración centrípeta debida a la fuerza gravitacional entre el satélite y la Tierra.



Figura 7.10 La dirección de la velocidad angular del vector $\vec{\omega}$ depende de la dirección de rotación.

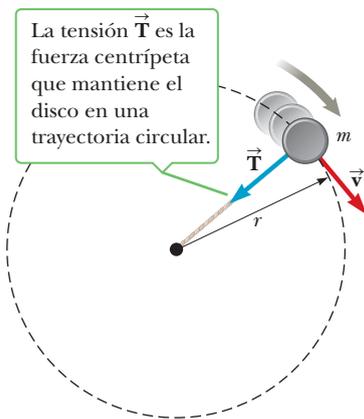


Figura 7.11 Un disco atado a una cuerda de longitud r , girando con velocidad constante sobre un plano horizontal.

Tip 7.2 La fuerza centrípeta es un tipo de fuerza, no una fuerza en sí misma

La "fuerza centrípeta" es una clasificación que involucra fuerzas actuando hacia un punto central, como la tensión de una cuerda debido a una pelota atada en su extremo o de la gravedad sobre un satélite. Una fuerza centrípeta debe ser *suministrada* por alguna fuerza física real.

Algunos autores utilizan el término "fuerza centrípeta", lo cual da la errónea impresión de que se trata de una nueva fuerza natural. Éste no es el caso: el adjetivo "centrípeta" en "fuerza centrípeta" significa simplemente que la fuerza en cuestión actúa hacia el centro. La fuerza gravitacional y la fuerza de tensión en la cuerda de un yo-yo girando en circunferencia son ejemplos de fuerzas centrípetas, como es la fuerza gravitacional sobre un satélite que circunda la Tierra.

Considere un disco de masa m , atado a una cuerda de longitud r y que se hace girar con velocidad constante en una trayectoria circular horizontal, como se ve en la figura 7.11. Su peso está apoyado en una tabla sin fricción. ¿Por qué el disco se mueve en una trayectoria circular? Por su inercia, es decir, la tendencia del disco a moverse en línea recta; sin embargo, la cuerda previene un movimiento a lo largo de una línea recta ejerciendo una fuerza radial sobre el disco —fuerza de tensión— que hace que siga una trayectoria circular. La tensión \vec{T} está dirigida a lo largo de la cuerda hacia *el centro del círculo*, como se ve en la figura.

En general, aplicando la segunda ley de Newton a lo largo de la dirección radial, se obtiene la ecuación que relaciona la fuerza centrípeta neta F_c —la suma de las componentes radiales de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto— con la aceleración centrípeta. La *magnitud* de la fuerza centrípeta neta es igual a la masa multiplicada por la magnitud de la aceleración centrípeta:

$$F_c = ma_c = m \frac{v^2}{r} \quad [7.19]$$

Una fuerza neta causa una aceleración centrípeta que actúa hacia el centro de la trayectoria circular y provoca cambios en la dirección del vector velocidad. Si esta fuerza desaparece, el objeto abandonaría su trayectoria circular y se movería a lo largo de una trayectoria recta tangente a la circunferencia en el punto donde la fuerza desapareció.

■ FÍSICA APLICADA 7.2 Gravedad artificial

Los astronautas pasan largos periodos en el espacio experimentando una gran cantidad de efectos negativos debidos a la pérdida de peso, como debilidad muscular y pérdida de calcio en los huesos. Estos efectos dificultan el regreso al usual entorno terrestre. ¿Cómo podría generarse gravedad artificial en el espacio para superar tales complicaciones?

SOLUCIÓN Un cilindro rotando en la estación espacial crea un entorno de gravedad artificial. La fuerza normal de las paredes rígidas provee la fuerza centrípeta que mantiene a los astronautas moviéndose en trayectoria circular (figura 7.12). Para un astronauta, la fuerza normal no puede distinguirse fácilmente de una fuerza gravitacional mientras el radio de la estación sea grande comparado con la estatura del astronauta (de otro modo, hay efectos desagradables en el oído interno). Este mismo principio es usado en ciertos parques de atracciones, en los que los pasajeros son presionados contra las paredes de cilindros en rotación con inclinaciones en varias direcciones. El visionario físico Gerard O'Neill propuso crear una colonia espacial gigante de kilómetros de radio que rote lentamente creando, en su interior gravedad

terrestre artificial para los habitantes. Estos mundos artificiales podrían permitir el transporte seguro en un viaje de varios miles de años a otro sistema estelar. ■

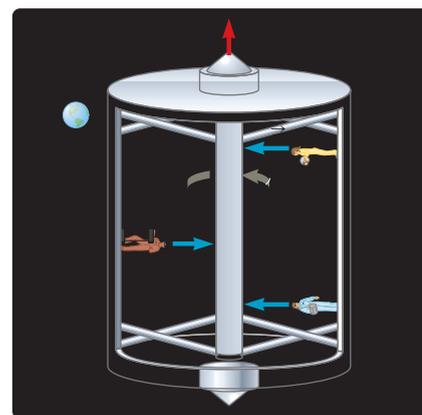


Figura 7.12 La gravedad artificial dentro de un cilindro giratorio es proporcionada por la fuerza normal.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Fuerzas causantes de la aceleración centrípeta

Recorra a los siguientes pasos cuando trabaje con aceleraciones centrípetas y las fuerzas que las producen:

1. **Dibuje un diagrama de cuerpo libre** del objeto en consideración y resalte todas las fuerzas que actúan sobre él.
2. **Elija un sistema de coordenadas** de manera que tenga un eje perpendicular a la trayectoria circular (dirección radial) y un eje tangente a la trayectoria circular (dirección angular o tangencial). Frecuentemente, es necesaria también la dirección normal perpendicular al plano de movimiento.
3. **Encuentre la fuerza neta F_c hacia el centro** de la trayectoria circular, $F_c = \Sigma F_r$, donde ΣF_r es la suma de las componentes radiales de las fuerzas. Esta fuerza radial neta causa la aceleración centrípeta.
4. **Use la segunda ley de Newton para las direcciones radial, tangencial y normal**, cuando se requiera, escribiendo $\Sigma F_r = ma_c$, $\Sigma F_t = ma_t$ y $\Sigma F_n = ma_n$. Recuerde que la magnitud de la aceleración centrípeta para el movimiento circular uniforme puede escribirse $a_c = v_t^2/r$.
5. **Resuelva** para las cantidades desconocidas.

■ EJEMPLO 7.6 Cinturón de seguridad

OBJETIVO Calcular la fuerza de fricción que hace que un objeto tenga una aceleración centrípeta.

PROBLEMA Un automóvil corre con una velocidad constante de 30.0 mi/h (13.4 m/s) dando una vuelta a nivel circular de radio 50.0 m, como se muestra a ojo de pájaro en la figura 7.13a. ¿Cuál es el coeficiente de fricción estática mínimo, μ_s , entre las llantas y la carretera para que el auto dé la vuelta sin patinar?

ESTRATEGIA En el diagrama de cuerpo libre del automóvil (figura 7.13b) la dirección normal es vertical, y la dirección tangencial está hacia dentro de la página (paso 2). Use la segunda ley de Newton. La fuerza neta que actúa sobre el automóvil en la dirección radial es la fuerza de fricción estática hacia el centro de la trayectoria circular que hace que el automóvil tenga una aceleración centrípeta. Calcule la máxima fuerza de fricción estática que requiere la fuerza normal obtenida de la componente normal de la segunda ley.

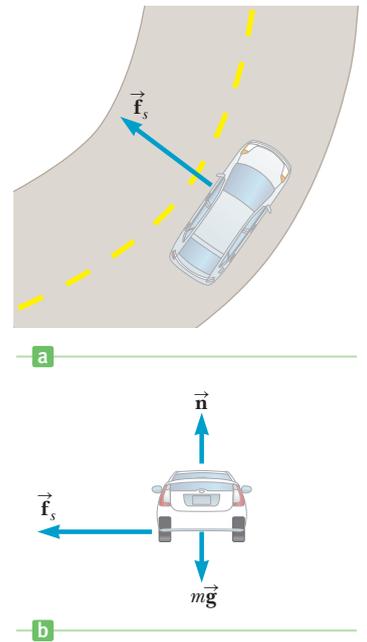


Figura 7.13 (Ejemplo 7.6) a) La fuerza centrípeta es proporcionada por la fuerza de fricción estática, que se dirige radialmente hacia el centro de la trayectoria circular. b) La gravedad, la fuerza normal y la fuerza de fricción estática actúan en el automóvil.

SOLUCIÓN

(Pasos 3, 4) Escriba las componentes de la segunda ley de Newton. La componente radial involucra sólo la máxima fuerza de fricción estática, $f_{s, \text{máx}}$:

En la componente vertical de la segunda ley, la fuerza de gravedad y la fuerza normal están en equilibrio:

(Paso 5) Sustituya la expresión para n en la primera ecuación y resuelva para μ_s :

$$m \frac{v^2}{r} = f_{s, \text{máx}} = \mu_s n$$

$$n - mg = 0 \quad \rightarrow \quad n = mg$$

$$m \frac{v^2}{r} = \mu_s mg$$

$$\mu_s = \frac{v^2}{rg} = \frac{(13.4 \text{ m/s})^2}{(50.0 \text{ m})(9.80 \text{ m/s}^2)} = 0.366$$

COMENTARIOS El valor de μ_s para el caucho sobre el concreto seco es muy cercano a 1, así que el automóvil puede tomar la curva con facilidad. Si la carretera estuviera mojada o con hielo, el valor de μ_s podría ser 0.2 o menor. Bajo estas condiciones, la fuerza radial proporcionada por la fricción estática no sería suficiente para mantener al automóvil en su trayectoria circular, por lo que patinaría abandonando la carretera.

(continúa)

PREGUNTA 7.6 Si el coeficiente de fricción estática se incrementara, ¿la velocidad máxima segura se reduciría, aumentaría o seguiría siendo la misma?

EJERCICIO 7.6 ¿A qué velocidad máxima puede un automóvil dar una vuelta sobre un camino mojado con coeficiente de fricción estática de 0.230, sin perder el control y patinar? El radio de la vuelta es de 25.0 m.

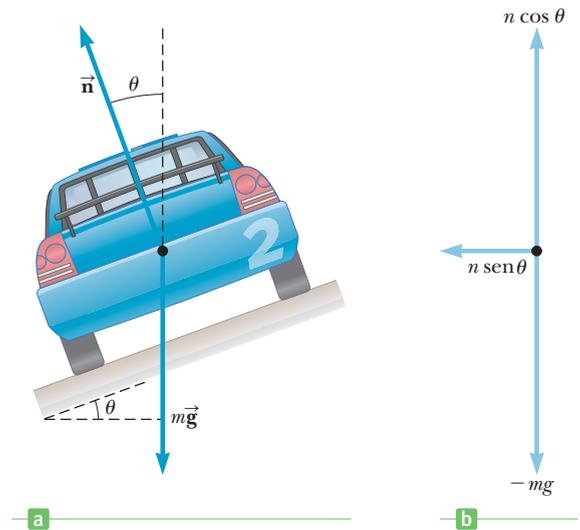
RESPUESTA 7.51 m/s

EJEMPLO 7.7 Circuito internacional de Daytona

OBJETIVO Resolver un problema de fuerza centrípeta en dos dimensiones.

PROBLEMA El circuito internacional de Daytona Beach, Florida, es famoso por sus carreras, especialmente la Daytona 500, llevada a cabo cada primavera. En su trazo hay curvas con peralte de 31.0° y con un radio máximo de 316 m. Si un automóvil toma la curva demasiado lento, tiende a deslizarse hacia abajo por la pendiente que hay en la vuelta debida al peralte, mientras que si la toma demasiado rápido puede salir tangencialmente de la pista, por la inclinación en la curva. **a)** Encuentre la aceleración centrípeta necesaria para que el automóvil no deslice hacia abajo en las curvas ni tienda a abandonar la pista hacia fuera (omita la fricción). **b)** Calcule la velocidad del automóvil de carreras.

Figura 7.14 (Ejemplo 7.7) Cuando el automóvil toma una curva con inclinación en un ángulo θ , la fuerza centrípeta que lo mantiene en una trayectoria circular es suministrada por la componente radial de la fuerza normal. La fricción también contribuye, a pesar de que se desprecia en este ejemplo. El automóvil se está moviendo hacia adelante, en la página. **a)** Diagrama de fuerzas para el coche. **b)** Las componentes de las fuerzas.



ESTRATEGIA Hay dos fuerzas que actúan sobre el automóvil de carreras: la fuerza de gravedad y la fuerza normal \vec{n} (véase la figura 7.14). Utilice la segunda ley de Newton en las direcciones radial y hacia arriba para encontrar la aceleración centrípeta a_c . Despeje v de $a_c = v^2/r$ para hallar la velocidad del automóvil.

SOLUCIÓN

a) Halle la aceleración centrípeta.

Escriba la segunda ley de Newton para el automóvil:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} = \vec{n} + m\vec{g}$$

Utilice la componente y de la segunda ley de Newton para despejar la fuerza normal n :

$$n \cos \theta - mg = 0$$

$$n = \frac{mg}{\cos \theta}$$

Obtenga una expresión para la componente horizontal de \vec{n} , correspondiente a la fuerza centrípeta F_c en este ejemplo:

$$F_c = n \sin \theta = \frac{mg \sin \theta}{\cos \theta} = mg \tan \theta$$

Sustituya esta expresión de F_c en la componente radial de la segunda ley de Newton y divida entre m para obtener la aceleración centrípeta:

$$ma_c = F_c$$

$$a_c = \frac{F_c}{m} = \frac{mg \tan \theta}{m} = g \tan \theta$$

$$a_c = (9.80 \text{ m/s}^2)(\tan 31.0^\circ) = 5.89 \text{ m/s}^2$$

b) Encuentre la velocidad del automóvil.

Aplique la ecuación 7.13:

$$\frac{v^2}{r} = a_c$$

$$v = \sqrt{ra_c} = \sqrt{(316 \text{ m})(5.89 \text{ m/s}^2)} = 43.1 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Tanto el peralte como la fricción ayudan a mantener al automóvil sobre la pista.

APLICACIÓN
Camino peraltado

PREGUNTA 7.7 ¿Cuáles son las tres cantidades físicas que determinan una mínima velocidad segura en una carretera peraltada?

EJERCICIO 7.7 Una carretera tiene una curva peraltada con un radio de 245 m. ¿Qué ángulo de peralte debe tener si la fuerza normal permite un recorrido seguro alrededor de la curva a 58.0 m/s?

RESPUESTA 54.5°

■ EJEMPLO 7.8 Recorrido de pistas

OBJETIVO Combinar la fuerza centrípeta con la conservación de la energía.

PROBLEMA La figura 7.15a muestra un tren de carros moviéndose en un rizo circular de radio R , de una montaña rusa. **a)** ¿Qué velocidad debe tener el tren de modo que llegue a la parte superior del rizo sin ninguna ayuda de la pista? **b)** ¿Qué velocidad debe tener en la parte inferior del rizo? **c)** ¿Cuál es la fuerza normal a la que está sometido un pasajero que se encuentra en la parte baja del rizo si el radio de éste es $r = 10.0$ m?

ESTRATEGIA Este problema requiere la segunda ley de Newton y de la aceleración centrípeta, para encontrar una expresión para la velocidad del carro que está justo en la parte superior del rizo y, enseguida, la ley de la conservación de la energía para encontrar su velocidad en la parte baja. Si el carro está justo en la parte superior, ahí la fuerza \vec{n} debe ser cero, por lo que la única fuerza ejercida sobre el carro en ese punto es la de gravedad, $m\vec{g}$. En la parte baja del rizo, la fuerza normal actúa hacia el centro y la fuerza de gravedad hacia abajo alejándose del centro. La diferencia de estas dos fuerzas es la fuerza centrípeta. La fuerza normal puede, entonces, calcularse con la segunda ley de Newton.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad en la parte superior del rizo.

Escriba la segunda ley de Newton para el carro:

En la parte superior, $n = 0$. La fuerza de gravedad actúa hacia el centro y provee la aceleración centrípeta $a_c = v^2/R$:

Ahora despeje v_{arriba} :

$$(1) \quad m\vec{a}_c = \vec{n} + m\vec{g}$$

$$m \frac{v_{\text{arriba}}^2}{R} = mg$$

$$v_{\text{arriba}} = \sqrt{gR}$$

b) Enseguida, encuentre la velocidad en la parte baja del rizo.

Para esto, aplique la ley de la conservación de energía mecánica para obtener la energía mecánica total en la parte superior del rizo:

Encuentre ahora, la energía mecánica total en la parte inferior del rizo:

Puesto que la energía se conserva, las dos energías pueden igualarse y despejar v_{abajo} :

$$E_{\text{arriba}} = \frac{1}{2}mv_{\text{arriba}}^2 + mgh = \frac{1}{2}mgR + mg(2R) = 2.5mgR$$

$$E_{\text{abajo}} = \frac{1}{2}mv_{\text{abajo}}^2$$

$$\frac{1}{2}mv_{\text{abajo}}^2 = 2.5mgR$$

$$v_{\text{abajo}} = \sqrt{5gR}$$

c) Halle la fuerza normal sobre un pasajero en la parte inferior (peso que percibe el pasajero).

Utilice la ecuación (1). La fuerza centrípeta neta es $n - mg$:

$$m \frac{v_{\text{abajo}}^2}{R} = n - mg$$

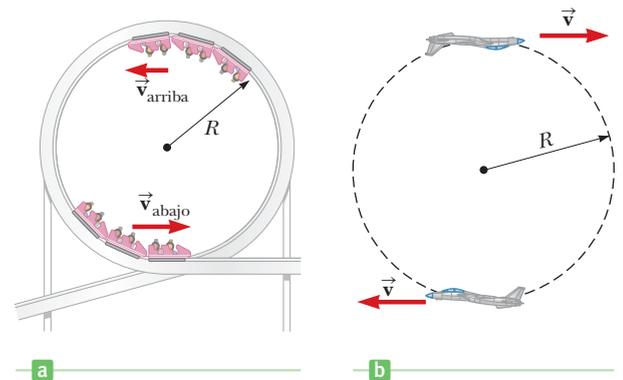


Figura 7.15 a) (Ejemplo 7.8) Tren de carros desplazándose alrededor de un rizo circular de una montaña rusa. b) (Ejercicio 7.8) Jet ejecutando un rizo vertical.

(continúa)

Por último, despeje n :

$$n = mg + m \frac{v_{\text{abajo}}^2}{R} = mg + m \frac{5gR}{R} = 6mg$$

COMENTARIOS La respuesta final para n muestra que el pasajero experimenta una fuerza seis veces más que su peso normal en la parte baja del rizo. Los astronautas experimentan una fuerza similar durante los lanzamientos al espacio.

PREGUNTA 7.8 Suponga que, posteriormente, el carro pasa una subida con el mismo radio de curvatura y la misma velocidad que en el inciso a). ¿Cuál es la fuerza normal en este caso?

EJERCICIO 7.8 Un jet que viaja con una velocidad de 1.20×10^2 m/s ejecuta un rizo vertical de radio 5.00×10^2 m (figura 7.15b). Encuentre la magnitud de la fuerza del asiento sobre un piloto de 70.0 kg en a) la parte superior del rizo y b) la parte inferior del rizo.

RESPUESTA a) 1.33×10^3 N b) 2.70×10^3 N

Tip 7.3 Fuerza centrífuga

Una supuesta fuerza centrífuga es, a menudo, sólo la posible ausencia de una fuerza centrípeta adecuada, presentándose por fenómenos que se miden en un marco de referencia no inercial (acelerado), como un carrusel.

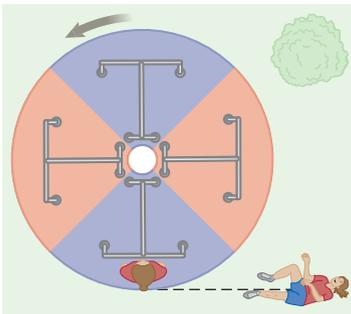


Figura 7.16 Un estudiante divirtiéndose en un carrusel pierde el control y cae a lo largo de una línea tangente al borde exterior.

Fuerzas ficticias

Cualquier persona que ha paseado en un carrusel cuando era niño (o cualquier juego giratorio en un parque de diversiones) ha experimentado la sensación de una fuerza que lo hace “huir del centro”. Al intentar ir hacia el centro del carrusel sosteniéndose en el pasamano, se siente como si se caminara por una colina escarpada.

En realidad, ésta es una fuerza *ficticia* a la que se llama fuerza centrífuga. Realmente, el niño que está girando en un carrusel está ejerciendo una fuerza centrípeta sobre su cuerpo con sus manos y brazos. Además, una pequeña fuerza centrípeta es ejercida por la fricción estática entre sus pies y la plataforma. Si el paseante pierde el control, se deslizaría alejándose radialmente, para después salir en línea recta tangente en el punto donde se soltó del pasamano. El paseante aterrizaría en un punto lejos del centro, pero no “huyendo del centro” a lo largo de una línea radial. En lugar de eso, viajaría perpendicularmente a una línea radial, barriendo un desplazamiento angular mientras aumenta su desplazamiento radial (véase la figura 7.16).

7.5 Gravitación newtoniana

Antes de 1686, ya se contaba con una gran cantidad de información relacionada con los movimientos de la Luna y los planetas, pero no había un claro entendimiento de las fuerzas que hacen que estos cuerpos celestes se muevan como lo hacen. En ese año, Isaac Newton dio la clave que abrió los secretos de los cielos. Basándose en su primera ley, Newton sabía que una fuerza neta tenía que estar actuando sobre la Luna porque, de no ser así, ésta se movería en una trayectoria recta, en lugar de la órbita casi circular que describe alrededor de la Tierra. Newton razonó que esta fuerza debía surgir como resultado de una atracción entre la Luna y la Tierra, atracción a la que llamamos fuerza de gravedad, y que es del mismo tipo de fuerza que atrae objetos, como manzanas, cercanos a la superficie de la Tierra.

En 1687 Newton publicó su trabajo sobre la ley de gravitación universal:

Si dos partículas de masa m_1 y m_2 están separadas una distancia r , una fuerza gravitacional actúa a lo largo de la recta que los une, con una magnitud dada por:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [7.20]$$

donde $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ es una constante de proporcionalidad llamada **constante de gravitación universal**. La fuerza gravitacional es siempre de atracción.

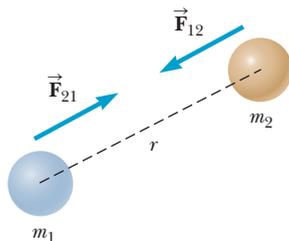


Figura activa 7.17

La fuerza gravitacional entre dos partículas es de atracción y actúa a lo largo de una línea recta que une las partículas. Observe que, de acuerdo con la tercera ley de Newton, $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

Esta ley de la fuerza es un ejemplo de una **ley de los cuadrados inversos**, en el que la fuerza varía en proporción inversa al cuadrado de la distancia que separa a las masas. Por la tercera ley de Newton se sabe que la fuerza ejercida por m_1 sobre m_2 , denotada por \vec{F}_{12} en la figura activa 7.17, es igual en magnitud a la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por m_2 sobre m_1 , pero en sentido opuesto, formando un par acción-reacción.

Otro importante hecho es que la fuerza gravitacional ejercida por una esfera uniforme sobre una partícula ubicada afuera de la esfera es la misma como si toda la masa de la esfera estuviera concentrada en su centro. A este hecho se le conoce como ley de Gauss, después de que el matemático y astrónomo alemán Karl Friedrich Gauss la verificó también para los campos eléctricos que encontraremos en el capítulo 15. La ley de Gauss es un resultado matemático verdadero porque la fuerza decae de acuerdo con el cuadrado inverso de la separación entre las partículas.

Cerca de la superficie de la Tierra, la expresión $F = mg$ es válida. Sin embargo, como se ve en la tabla 7.1, la aceleración en caída libre g varía considerablemente con la altitud sobre la Tierra.

Examen rápido

7.8 Si una pelota cae al suelo, ¿cuáles afirmaciones son falsas? a) La fuerza que la pelota ejerce sobre la Tierra es igual en magnitud a la fuerza que la Tierra ejerce sobre la pelota. b) La pelota experimenta la misma aceleración que la Tierra. c) La Tierra ejerce una fuerza mucho mayor sobre la pelota que ésta sobre la Tierra, así que la pelota cae mientras la Tierra permanece estacionaria.

7.9 Un planeta tiene dos lunas con idéntica masa. La luna 1 está en una órbita circular de radio r . La luna 2 está en una órbita circular de radio $2r$. La magnitud de la fuerza gravitacional ejercida por el planeta sobre la luna 2 es a) cuatro veces más grande b) dos veces más grande c) la misma d) la mitad e) la cuarta parte de la fuerza gravitacional ejercida por el planeta sobre la luna 1.

Medición de la constante gravitacional

La constante gravitacional G en la ecuación 7.20 fue medida en un importante experimento por Henry Cavendish en 1798. Su aparato consistió en dos esferas, cada una de masa m , fijadas a los extremos de una barra horizontal ligera suspendida por un delgado alambre metálico, como se muestra en la figura 7.18. Otras dos esferas grandes, cada una de masa M , están colocadas cerca de las esferas pequeñas. La fuerza de atracción entre las esferas pequeñas y las grandes provoca que la barra gire en un plano horizontal y que el alambre se tuerza. El ángulo de giro se midió con un rayo de luz reflejado por un espejo unido a la estructura de suspensión vertical. (Este punto móvil de luz es una técnica eficaz para amplificar el movimiento.) El experimento fue repetido cuidadosamente con diferentes masas y diversas separaciones. Además de dar un valor de G , los resultados demostraron que la fuerza es de atracción, proporcional al producto mM , e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r . Actualmente hay formas modernas de llevar a cabo experimentos tendientes a determinar valores más precisos de G .

Tabla 7.1 Aceleración g en caída libre a varias altitudes

Altitud (km) ^a	g (m/s ²)
1 000	7.33
2 000	5.68
3 000	4.53
4 000	3.70
5 000	3.08
6 000	2.60
7 000	2.23
8 000	1.93
9 000	1.69
10 000	1.49
50 000	0.13

^a Todas las lecturas son distancias a partir de la superficie de la Tierra.

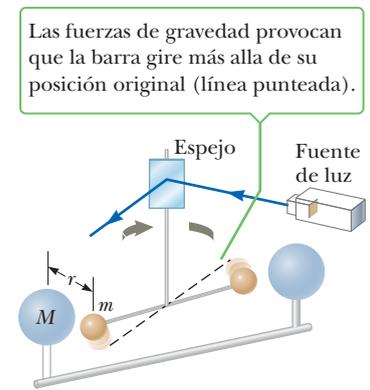


Figura 7.18 Diagrama esquemático del aparato de Cavendish para medir G . La atracción de las esferas más pequeñas de masa m , por las más grandes de masa M , provocan el giro de la barra describiendo un pequeño ángulo. Con la ayuda de un rayo de luz reflejado por un espejo sobre el aparato giratorio, se mide el ángulo de rotación.

EJEMPLO 7.9 ¿Alguien juega billar?

OBJETIVO Utilizar vectores para encontrar la fuerza gravitacional neta sobre un objeto.

PROBLEMA a) Tres bolas de billar de 0.300 kg se colocan sobre una mesa en las esquinas de un triángulo rectángulo, como se muestra en una vista desde arriba en la figura 7.19. Encuentre la fuerza gravitacional neta sobre la bola tiradora (denotada por m_1) resultante de las fuerzas ejercidas por las otras dos bolas. b) Encuentre las componentes de la fuerza gravitacional de m_2 sobre m_3 .

ESTRATEGIA a) Para encontrar la fuerza gravitacional neta sobre la bola tiradora de masa m_1 , calcule primero la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por m_2 sobre m_1 . Esta fuerza es la componente y de la fuerza neta actuando sobre m_1 . Después encontrar la fuerza \vec{F}_{31} ejercida por m_3 sobre m_1 , la cual es la componente x de la fuerza neta actuando sobre m_1 . Con estas dos componentes, es posible encontrar la magnitud y dirección de la fuerza neta sobre la bola tiradora. b) En este caso, se debe utilizar la trigonometría para encontrar las componentes de la fuerza \vec{F}_{23} .

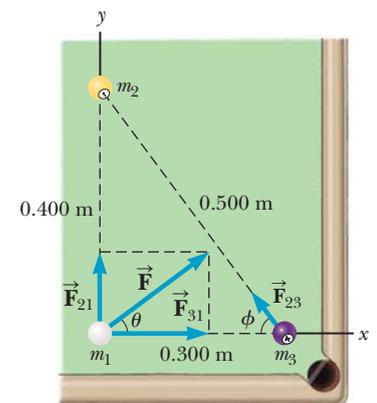


Figura 7.19 (Ejemplo 7.9)

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fuerza gravitacional neta sobre la bola tiradora.

Encuentre la magnitud de la fuerza \vec{F}_{21} ejercida por m_2 sobre m_1 usando la ley de gravitación, ecuación 7.20:

$$F_{21} = G \frac{m_2 m_1}{r_{21}^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(0.300 \text{ kg})(0.300 \text{ kg})}{(0.400 \text{ m})^2}$$

$$F_{21} = 3.75 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Halle la magnitud de la fuerza \vec{F}_{31} ejercida por m_3 sobre m_1 , otra vez, utilizando la ley de gravitación de Newton:

$$F_{31} = G \frac{m_3 m_1}{r_{31}^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(0.300 \text{ kg})(0.300 \text{ kg})}{(0.300 \text{ m})^2}$$

$$F_{31} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}$$

La fuerza neta tiene componentes $F_x = F_{31}$ y $F_y = F_{21}$. Calcule la magnitud de esta fuerza neta:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(6.67)^2 + (3.75)^2} \times 10^{-11} \text{ N}$$

$$= 7.65 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Utilice la tangente inversa para obtener la dirección θ de \vec{F} : $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{3.75 \times 10^{-11} \text{ N}}{6.67 \times 10^{-11} \text{ N}}\right) = 29.3^\circ$

b) Encuentre la componente de la fuerza de m_2 sobre m_3 . Primero, calcule la magnitud de \vec{F}_{23} :

$$F_{23} = G \frac{m_2 m_1}{r_{23}^2}$$

$$= (6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{m}^3 \text{s}^{-2}) \frac{(0.300 \text{ kg})(0.300 \text{ kg})}{(0.500 \text{ m})^2}$$

$$= 2.40 \times 10^{-11} \text{ N}$$

Para obtener las componentes x y y de F_{23} , necesita $\cos \varphi$ y $\sin \varphi$. Utilice los lados del triángulo mayor en la figura 7.19:

$$\cos \varphi = \frac{\text{ady}}{\text{hip}} = \frac{0.300 \text{ m}}{0.500 \text{ m}} = 0.600$$

$$\sin \varphi = \frac{\text{op}}{\text{hip}} = \frac{0.400 \text{ m}}{0.500 \text{ m}} = 0.800$$

Calcule las componentes de \vec{F}_{23} . Debe aparecer un signo de menos en la componente x , porque está en la dirección negativa.

$$F_{23x} = -F_{23} \cos \varphi = -(2.40 \times 10^{-11} \text{ N})(0.600)$$

$$= -1.44 \times 10^{-11} \text{ N}$$

$$F_{23y} = F_{23} \sin \varphi = (2.40 \times 10^{-11} \text{ N})(0.800) = 1.92 \times 10^{-11} \text{ N}$$

COMENTARIOS Observe cómo es que hay pequeñas fuerzas de gravedad interactuando entre todos los objetos cotidianos. No obstante, tales fuerzas se pueden medir directamente con balanzas de torsión.

PREGUNTA 7.9 ¿Es la fuerza de gravedad un factor significativo en el juego de billar? Explique.

EJERCICIO 7.9 Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza ejercida por m_1 y m_3 sobre m_2 .

RESPUESTAS $5.85 \times 10^{-11} \text{ N}$, -75.8°

■ EJEMPLO 7.10 Ceres

OBJETIVO Relacionar la ley de gravitación universal con mg y muestre cómo g cambia con la posición.

PROBLEMA Un astronauta que está parado sobre la superficie de Ceres, el gran asteroide, deja caer una roca desde una altura de 10 m, y le toma 8.06 s para llegar al suelo. a) Calcule la aceleración de la gravedad sobre Ceres. b) Encuentre la masa de Ceres si el radio de éste es $R_C = 5.10 \times 10^2 \text{ km}$. c) Halle la aceleración gravitacional a 50.0 km de la superficie de Ceres.

ESTRATEGIA En el inciso a) revise la cinemática en una dimensión. En el inciso b) el peso de un objeto, $w = mg$, es la misma en magnitud que la fuerza dada por la ley de gravitación universal. Tome como la incógnita a la masa de Ceres y obténgala para que c) se pueda resolver sustituyendo en la ecuación 7.20 de la ley de gravitación universal.

SOLUCIÓN

a) Calcule la aceleración de la gravedad, g_C , sobre Ceres.

Aplique la ecuación de la cinemática para el desplazamiento en la caída de la roca:

Sustituya $\Delta x = -10.0$ m, $v_0 = 0$, $a = -g_C$ y $t = 8.06$ s, y obtenga la aceleración gravitacional sobre Ceres, g_C :

$$(1) \Delta x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$$

$$-10.0 \text{ m} = -\frac{1}{2}g_C(8.06 \text{ s})^2 \rightarrow g_C = 0.308 \text{ m/s}^2$$

b) Encuentre la masa de Ceres.

Igualando el peso de la roca sobre Ceres con la fuerza gravitacional que actúa sobre la roca:

$$mg_C = G \frac{M_C m}{R_C^2}$$

$$M_C = \frac{g_C R_C^2}{G} = 1.20 \times 10^{21} \text{ kg}$$

Obtenga la masa de Ceres, M_C :

c) Calcule la aceleración de la gravedad a una altura de 50.0 km sobre la superficie de Ceres.

Igualando el peso a esa altura con la fuerza gravitacional:

Cancele m y después sustituya $r = 5.60 \times 10^5$ m y la masa de Ceres:

$$mg'_C = G \frac{mM_C}{r^2}$$

$$g'_C = G \frac{M_C}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}) \frac{1.20 \times 10^{21} \text{ kg}}{(5.60 \times 10^5 \text{ m})^2} = 0.255 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS Estudiar la caída (órbita) de un objeto es el método estándar para obtener la masa de un cuerpo planetario.

PREGUNTA 7.10 Dé dos razones por las cuales la ecuación (1) no puede usarse para todo asteroide como en el inciso a).

EJERCICIO 7.10 A un objeto le toma 2.40 s para caer 5.00 m sobre un cierto planeta. a) Encuentre la aceleración debida a la gravedad sobre el planeta. b) Encuentre la masa del planeta si su radio es de 5250 km.

RESPUESTAS a) 1.74 m/s^2 b) $7.19 \times 10^{23} \text{ kg}$

Revisión de la energía potencial gravitacional

En el capítulo 5 se introdujo el concepto de energía potencial gravitacional y se encontró que la energía potencial asociada con el objeto se puede calcular con la ecuación $EP = mgh$, donde h es la altura del objeto sobre o debajo de algún nivel de referencia. Esta ecuación, sin embargo, es válida sólo cuando el objeto está cerca de la superficie de la Tierra. Para objetos a grandes alturas, como los satélites, debe recurrirse a alguna alternativa porque g varía con la distancia a la superficie, como se muestra en la tabla 7.1.

La energía potencial gravitacional asociada con un objeto de masa m a una distancia r del centro de la Tierra es:

$$EP = -G \frac{M_T m}{r} \quad [7.21]$$

donde M_T y R_T son la masa y el radio de la Tierra, respectivamente, con $r > R_T$.

Unidades SI: Joules (J)

Como antes, la energía potencial gravitacional es una propiedad de un sistema, en este caso el objeto de masa m y la Tierra. La ecuación 7.21, ilustrada en la figura 7.20, es válida para el caso especial en el que el nivel cero para la energía potencial está a una distancia infinita del centro de la Tierra. Recuerde que la energía potencial gravitacional asociada con un objeto, no es más que el trabajo negativo realizado por la fuerza de gravedad para mover al objeto. Si un objeto cae bajo la acción de la fuerza de gravedad desde una

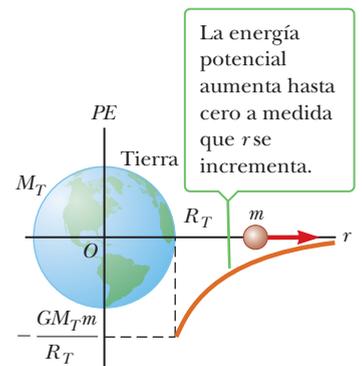


Figura 7.20 Conforme una masa m se mueve radialmente hacia fuera de la Tierra, la energía potencial del sistema masa-Tierra, que es $EP = -G (Mgm/R_T)$ en la superficie terrestre, aumenta a un límite de cero a medida que la masa m se aleja de la Tierra, como se muestra en el gráfico.

gran distancia (prácticamente infinita), el cambio en la energía potencial gravitacional es negativo, lo cual corresponde a la cantidad positiva de trabajo gravitacional realizado sobre el sistema. Este trabajo positivo es igual al cambio (también positivo) de energía cinética, como se muestra en el siguiente ejemplo.

■ EJEMPLO 7.11 Un asteroide cercano a la Tierra

OBJETIVO Utilizar la energía potencial gravitacional para calcular el trabajo realizado por la gravedad sobre la caída de un objeto.

PROBLEMA Un asteroide con masa $m = 1.00 \times 10^9$ kg viene desde la profundidad del espacio, prácticamente del infinito, y hacia la Tierra. **a)** Encuentre el cambio de energía potencial cuando alcanza un punto a 4.00×10^8 m de la Tierra (justo atrás del radio orbital de la Luna). Además, encuentre el trabajo realizado por la fuerza de gravedad. **b)** Calcule la velocidad del asteroide en ese punto, suponiendo que inicialmente partió del reposo cuando estaba arbitrariamente lejos. **c)** ¿Cuánto trabajo tendría que hacer algún otro agente sobre el asteroide para que éste viajara a sólo la mitad de la velocidad que tenía en b) en el mismo punto?

ESTRATEGIA Para el inciso a) se requiere una simple sustitución en la definición de la energía potencial gravitacional. Para hallar el trabajo realizado por la fuerza de gravedad, recuerde que el trabajo realizado sobre un objeto por una fuerza conservativa es justamente el cambio negativo de energía potencial. El inciso b) se puede resolver con la ley de conservación de la energía, y el inciso c) es una aplicación del teorema del trabajo-energía.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el cambio en energía potencial y el trabajo realizado por la fuerza de gravedad.

Aplique la ecuación 7.21:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= EP_f - EP_i = -\frac{GM_T m}{r_f} - \left(-\frac{GM_T m}{r_i}\right) \\ &= GM_T m \left(-\frac{1}{r_f} + \frac{1}{r_i}\right)\end{aligned}$$

Sustituya las cantidades conocidas. La posición inicial del asteroide está prácticamente en el infinito, así que $1/r_i$ es cero:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= (6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3/\text{s}^2)(5.98 \times 10^{24} \text{ kg}) \\ &\quad \times (1.00 \times 10^9 \text{ kg}) \left(-\frac{1}{4.00 \times 10^8 \text{ m}} + 0\right) \\ \Delta EP &= -9.97 \times 10^{14} \text{ J}\end{aligned}$$

Calcule el trabajo realizado por la fuerza de gravedad:

$$W_{\text{grav}} = -\Delta EP = 9.97 \times 10^{14} \text{ J}$$

b) Halle la velocidad del asteroide cuando alcance $r_f = 4.00 \times 10^8$ m.

Usando la conservación de la energía:

$$\begin{aligned}\Delta EC + \Delta EP &= 0 \\ \left(\frac{1}{2}mv^2 - 0\right) - 9.97 \times 10^{14} \text{ J} &= 0 \\ v &= 1.41 \times 10^3 \text{ m/s}\end{aligned}$$

c) Encuentre el trabajo necesario para reducir la velocidad a 7.05×10^2 m/s (la mitad del valor encontrado) en este punto.

Aplique el teorema del trabajo-energía:

$$W = \Delta EC + \Delta EP$$

El cambio de energía potencial restante es el mismo que en a), pero sustituida sólo la mitad de la velocidad en el término de energía cinética:

$$\begin{aligned}W &= \left(\frac{1}{2}mv^2 - 0\right) - 9.97 \times 10^{14} \text{ J} \\ W &= \frac{1}{2}(1.00 \times 10^9 \text{ kg})(7.05 \times 10^2 \text{ m/s})^2 - 9.97 \times 10^{14} \text{ J} \\ &= -7.48 \times 10^{14} \text{ J}\end{aligned}$$

COMENTARIOS La cantidad de trabajo calculado en el inciso c) es negativa porque un agente externo debe ejercer una fuerza contra la dirección de movimiento del asteroide. A un impulso de un megavatio de salida le tomaría cerca de 24 años

para retrasar al asteroide a la mitad de su velocidad. Un asteroide que amenace la Tierra no necesita ser retrasado demasiado; un pequeño cambio en su velocidad bastaría para que evadiera la Tierra. Sin embargo, el instante del impulso aplicado es importante. En el momento en que usted pueda mirarle por encima del hombro y ver la Tierra, es ya demasiado tarde, a pesar de los escenarios que estos panoramas juegan en Hollywood. Los rescates de última hora no funcionan.

PREGUNTA 7.11 Cuando el asteroide se acerca a la Tierra, ¿la energía potencial gravitacional asociada con el sistema asteroide-Tierra, ¿a) se incrementa, b) decrece, c) permanece la misma?

EJERCICIO 7.11 Suponga que el asteroide empieza su recorrido partiendo del reposo a una gran distancia (prácticamente el infinito), hacia la Tierra. ¿Cuánto trabajo debería hacerse sobre el asteroide para retardar su velocidad a 425 m/s, cercano al tiempo para estar a una distancia de 2.00×10^8 m de la Tierra?

RESPUESTA -1.90×10^{15} J

■ FÍSICA APLICADA 7.3

¿Por qué el Sol es caliente?

EXPLICACIÓN El Sol se formó cuando partículas de una gran nube de gas se unieron, debido a la atracción gravitacional, para convertirse en un masivo objeto astronómico. Antes de que esto ocurriera, las partículas en la nube estaban ampliamente dispersas representando una gran cantidad de energía potencial gravitacional. Cuando las partículas se acercaron unas a otras, su energía cinética se incrementó, y la energía potencial gravitacional del sistema disminuyó, como lo predice la ley de conservación de la energía. Con lentos colapsos adicionales la nube se hizo más

densa, y el promedio de energía cinética aumentó. Esta energía cinética es la energía interna de la nube y es proporcional a la temperatura. Si las partículas están suficientemente cercanas, la temperatura puede elevarse a un punto donde ocurre una fusión nuclear convirtiendo a la nube de gas en una estrella. Por otro lado, si la temperatura aumenta, pero no lo suficiente para provocar una fusión nuclear, entonces el objeto se convierte en una enana café (estrella fallida) o en un planeta. ■

Revisando la ecuación 7.21, podemos maravillarnos al ver lo que pasa con mgh , la expresión para la energía potencial gravitacional introducida en el capítulo 5. Esta expresión es aún válida para cuando h es muy pequeña comparada con el radio de la Tierra. Para ver esto, escribamos el cambio en energía potencial cuando un objeto es elevado desde el suelo hasta una altura h , usando la forma general para la energía potencial gravitacional (véase la figura 7.21):

$$\begin{aligned} EP_2 - EP_1 &= -G \frac{M_T m}{(R_T + h)} - \left(-G \frac{M_T m}{R_T} \right) \\ &= -GM_T m \left[\frac{1}{(R_T + h)} - \frac{1}{R_T} \right] \end{aligned}$$

Después de encontrar un común denominador y aplicar algo de álgebra, obtenemos:

$$EP_2 - EP_1 = \frac{GM_T m h}{R_T (R_T + h)}$$

Cuando la altura h es muy pequeña comparada con R_T , h puede ser desplazada del segundo factor del denominador, reduciéndose a:

$$\frac{1}{R_T (R_T + h)} \cong \frac{1}{R_T^2}$$

Sustituyendo en la expresión previa, se tiene:

$$EP_2 - EP_1 \cong \frac{GM_T}{R_T^2} m h$$

Ahora, recordemos del capítulo 4 que la aceleración en caída libre en la superficie terrestre está dada por $g = GM_T/R_T^2$, por lo que:

$$EP_2 - EP_1 \cong mgh$$

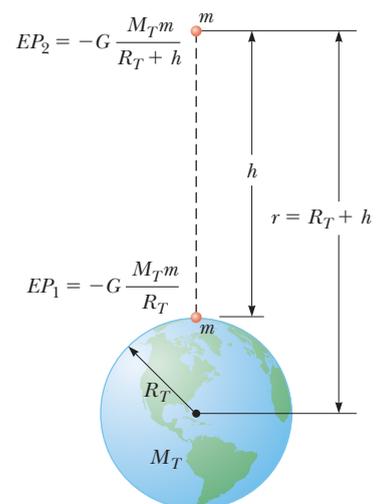


Figura 7.21 Relación de la forma general de la energía potencial gravitacional con mgh .

Tabla 7.2 Velocidad de escape para los planetas y la Luna

Planeta	v_{esc} (km/s)
Mercurio	4.3
Venus	10.3
Tierra	11.2
Luna	2.3
Marte	5.0
Júpiter	60.0
Saturno	36.0
Urano	22.0
Neptuno	24.0
Plutón ^a	1.1

^a En agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional adoptó una definición de planeta que separó a Plutón de los otros ocho planetas. Actualmente a Plutón se le denomina “planeta enano” (como al asteroide Ceres).

Velocidad de escape

Si un objeto es lanzado hacia arriba desde la superficie terrestre con una velocidad suficientemente grande, podría internarse en el espacio exterior y no regresar. A esta rapidez se le conoce como **velocidad de escape** (también suele llamársele *velocidad de escape*, pero es más apropiado usar el término *rapidez*).

La velocidad de escape de la Tierra puede encontrarse aplicando la ley de conservación de la energía. Suponga que un objeto de masa m es lanzado verticalmente hacia arriba desde la superficie terrestre con una velocidad inicial v_i . La energía mecánica inicial (energía cinética más energía potencial) del sistema objeto-Tierra está dada por

$$EC_i + EP_i = \frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{GM_T m}{R_T}$$

Despreciamos la resistencia del aire y suponemos que la velocidad inicial es apenas suficiente para permitir que el objeto llegue al infinito con una velocidad igual a cero. Este valor de v_i es la velocidad de escape v_{esc} . Cuando el objeto está a una distancia infinita de la Tierra, su energía cinética es cero porque $v_f = 0$, y la energía potencial gravitacional es también cero porque $1/r$ tiende a cero cuando r tiende al infinito. De aquí, la energía mecánica total es cero, por lo que, de la ley de la conservación de la energía, se obtiene

$$\frac{1}{2}mv_{\text{esc}}^2 - \frac{GM_T m}{R_T} = 0$$

por lo que

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_T}{R_T}} \quad [7.22]$$

La velocidad de escape para la Tierra es aproximadamente de 11.2 km/s o bien cerca de 25 000 mi/h (véase el ejemplo 7.12). Observe que la expresión para v_{esc} no depende de la masa del objeto lanzado desde la Tierra, así que una nave espacial tiene la misma velocidad de escape que una molécula. En la tabla 7.2 se enlista la correspondiente velocidad de escape para cada planeta y para la Luna. La velocidad de escape y la temperatura determinan en gran parte si un planeta posee o no una atmósfera y, si es así, cuáles son sus constituyentes. Planetas con baja velocidad de escape, como Mercurio, generalmente no tienen atmósfera porque el promedio de velocidad de sus moléculas de gas es muy cercana a la rapidez de escape. Venus tiene una muy densa atmósfera, pero es casi enteramente dióxido de carbono, un gas muy pesado. La atmósfera de la Tierra tiene muy poco hidrógeno y helio, pero retiene moléculas de gases mucho más pesados como el nitrógeno y el oxígeno.

■ EJEMPLO 7.12 De la Tierra a la Luna

OBJETIVO Aplicar la ley de la conservación de la energía conjuntamente con la forma general de la ley de gravitación universal de Newton.

PROBLEMA En la clásica novela de Julio Verne *De la Tierra a la Luna*, un gigantesco cañón enclavado en la Tierra, en Florida, dispara una nave rumbo a la Luna. **a)** Si la nave abandona el cañón a la velocidad de escape, ¿a qué velocidad se mueve cuando se encuentra a 1.50×10^5 km del centro de la Tierra? Desprecie cualquier efecto de fricción. **b)** Aproximadamente, ¿qué aceleración constante se necesita para impulsar a la nave a la velocidad de escape, por medio de la boca de un cañón de 1.00 km de longitud?

ESTRATEGIA Para el inciso a) utilice la conservación de la energía y resuelva para la velocidad final v_f . En b) hay una aplicación de la ecuación cinemática independiente del tiempo, con la que hay que obtener a .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad a $r = 1.50 \times 10^5$ km.

Aplique la conservación de la energía:

$$\frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{GM_T m}{R_T} = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{GM_T m}{r_f}$$

Multiplique por $2/m$, reacomode y resuelva para v_f^2 . Después sustituya los valores conocidos y tome la raíz cuadrada:

$$\begin{aligned} v_f^2 &= v_i^2 + \frac{2GM_T}{r_f} - \frac{2GM_T}{R_T} = v_i^2 + 2GM_T \left(\frac{1}{r_f} - \frac{1}{R_T} \right) \\ v_f^2 &= (1.12 \times 10^4 \text{ m/s})^2 + 2(6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}) \\ &\quad \times (5.98 \times 10^{24} \text{ kg}) \left(\frac{1}{1.50 \times 10^8 \text{ m}} - \frac{1}{6.38 \times 10^6 \text{ m}} \right) \\ v_f &= 2.39 \times 10^3 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Encuentre la aceleración a través de la boca del cañón, suponiéndola constante.

Utilice la ecuación de la cinemática que no depende del tiempo:

$$\begin{aligned} v^2 - v_0^2 &= 2a\Delta x \\ (1.12 \times 10^4 \text{ m/s})^2 - 0 &= 2a(1.00 \times 10^3 \text{ m}) \\ a &= 6.27 \times 10^4 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

COMENTARIOS Este resultado corresponde a una aceleración de más de 6000 veces la aceleración en caída libre sobre la Tierra. Esta enorme aceleración está muy lejos de ser tolerada por el cuerpo humano.

PREGUNTA 7.12 Suponga que la nave se conduce describiendo una órbita elíptica alrededor de la Tierra, con un punto cercano (perigeo) y otro lejano (apogeo). ¿En qué punto la energía cinética es máxima y por qué?

EJERCICIO 7.12 Usando la tabla de datos 7.3 (véase la página 223), encuentre a) la velocidad de escape desde la superficie de Marte y b) la velocidad de un vehículo espacial cuando está a 1.25×10^7 m del centro de Marte si abandona la superficie a la velocidad de escape.

RESPUESTA a) 5.04×10^3 m/s b) 2.62×10^3 m/s

7.6 Leyes de Kepler

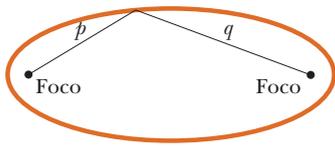
El movimiento de los planetas, estrellas y otros cuerpos celestes ha sido observado durante miles de años. En los primeros años de la Historia, los científicos consideraban a la Tierra como el centro del Universo. Este **modelo geocéntrico** fue desarrollado por el astrónomo griego Claudio Tolomeo en el siglo II a.C. y fue ampliamente aceptado durante los siguientes 1400 años. En 1543 el astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) demostró que la Tierra y los demás planetas giraban en órbitas circulares alrededor del Sol (**modelo heliocéntrico**).

El astrónomo danés Tycho Brahe (1546-1601) hizo precisas mediciones astronómicas en un periodo de 20 años, proporcionando datos que fundamentarían el actualmente aceptado modelo del sistema solar. Las cuidadosas observaciones realizadas por Brahe de los planetas y 777 estrellas fueron llevadas a cabo con sólo un gran sextante y una brújula; el telescopio aún no se había inventado.

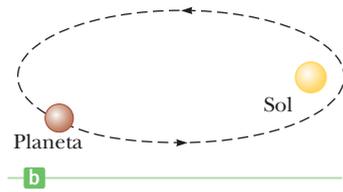
El astrónomo alemán Johannes Kepler, quien fue asistente de Brahe, se hizo de la información astronómica de su maestro y pasó cerca de 16 años tratando de construir un modelo matemático que describiera el movimiento de los planetas. Después de muchos y elaborados cálculos, encontró que los precisos datos de Brahe relacionados con el movimiento de Marte alrededor del Sol proporcionaban la respuesta. Los análisis de Kepler demostraron, en primer lugar, que el concepto de órbitas circulares alrededor del Sol tenía que abandonarse. Además, descubrió que la órbita de Marte podría describirse con precisión mediante una elipse con el Sol en uno de los focos, para después generalizar este análisis al movimiento de todos los planetas. El análisis completo se resume en tres enunciados conocidos como **leyes de Kepler**:

1. Todos los planetas se mueven en órbitas elípticas con el Sol en uno de los focos.
2. Una recta trazada desde el Sol a cualquiera de los planetas barre áreas iguales en iguales intervalos de tiempo.
3. El cuadrado del periodo orbital de cualquier planeta es proporcional al cubo de la distancia promedio del planeta al Sol.

◀ Leyes de Kepler



a



b

Figura activa 7.22 a) La suma $p + q$ es la misma para cualquier punto sobre la elipse. b) En el sistema solar, el Sol es uno de los focos de la órbita elíptica de cada planeta; el otro foco está vacío.

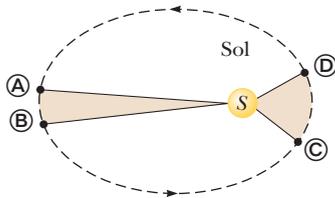


Figura activa 7.23 Las dos áreas barridas por el planeta en su órbita elíptica alrededor del Sol son iguales si el intervalo de tiempo entre los puntos A y B es igual al intervalo de tiempo entre los puntos C y D.

Más tarde, Newton demostró que estas leyes son consecuencia de la fuerza gravitacional que existe entre dos objetos cualesquiera. La ley de Newton de gravitación universal, junto con sus leyes de movimiento, provee las bases para una completa descripción matemática del movimiento de los planetas y satélites.

Primera ley de Kepler

La primera ley surge como una consecuencia obvia de la naturaleza del cuadrado inverso de la ley de gravitación universal de Newton. Cualquier objeto ligado a otro por una fuerza que varía de acuerdo con $1/r^2$ se moverá en una órbita elíptica. Como se muestra en la figura activa 7.22a, una elipse es una curva trazada de modo que las sumas de las distancias desde cualquier punto sobre la curva a dos puntos internos llamados *puntos focales*, o *focos*, es siempre la misma. Para la configuración Sol-planeta (figura activa 7.22b) el Sol es uno de los focos y el otro foco está vacío. Debido a que la órbita es una elipse, la distancia del Sol al planeta cambia continuamente.

Segunda ley de Kepler

La segunda ley establece que una recta trazada desde el Sol a cualquier planeta, barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales. Considere un planeta en una órbita elíptica alrededor del Sol, como en la figura activa 7.23. En un periodo dado Δt , el planeta se mueve del punto A al punto B. El planeta se mueve más lentamente sobre este lado de la órbita porque se encuentra más lejos del Sol. Sobre el lado opuesto de la órbita, el planeta se mueve del punto C al punto D en el mismo tiempo, Δt , moviéndose más rápido porque está más cerca del Sol. La segunda ley de Kepler dice que cualquier par de regiones formadas como en la figura 7.23 siempre tendrán la misma área. Como se verá en el capítulo 8, la segunda ley de Kepler está relacionada con el principio físico conocido como conservación del momento angular.

Tercera ley de Kepler

La deducción de la tercera ley de Kepler es suficientemente sencilla para considerarla aquí, llevándola al caso particular de una órbita circular. Considere un planeta de masa M_p moviéndose alrededor del Sol, cuya masa es M_S , en una órbita circular. Debido a que la órbita es circular, el planeta se mueve con una velocidad constante v . La segunda ley de Newton, la ley de gravitación y la aceleración centrípeta dan, entonces, la siguiente ecuación:

$$M_p a_c = \frac{M_p v^2}{r} = \frac{GM_S M_p}{r^2}$$

La velocidad v del planeta en su órbita es igual a la circunferencia de la órbita dividida entre el tiempo requerido para una revolución, T , llamada el **periodo** del planeta, por lo que $v = 2\pi r/T$. Sustituyendo las anteriores expresiones resulta

$$\frac{GM_S}{r^2} = \frac{(2\pi r/T)^2}{r}$$

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_S} \right) r^3 = K_S r^3$$

[7.23]

Tercera ley de Kepler ▶

donde K_S es una constante dada por

$$K_S = \frac{4\pi^2}{GM_S} = 2.97 \times 10^{-19} \text{ s}^2/\text{m}^3$$

La ecuación 7.23 es la tercera ley de Kepler para una órbita circular. Las órbitas de la mayoría de los planetas son muy cercanas a la forma circular. Sin embargo, usualmente los cometas y asteroides tienen órbitas elípticas. Para estas órbitas, el radio r debe ser remplazado por a , el semieje mayor, la distancia más grande a través de la órbita elíptica. (Ésta es también la distancia promedio del cometa o asteroide al Sol.) Un cálculo más detallado muestra que K_S realmente depende de la suma de las masas del Sol y del planeta. Sin embargo, la masa de los planetas es despreciable comparada con la del Sol, por lo que puede

Tabla 7.3 Datos planetarios útiles

Cuerpo	Masa (kg)	Radio promedio (m)	Periodo (s)	Distancia media desde el Sol (m)	$\frac{T^2}{r^3} 10^{-19} \left(\frac{\text{s}^2}{\text{m}^3} \right)$
Mercurio	3.18×10^{23}	2.43×10^6	7.60×10^6	5.79×10^{10}	2.97
Venus	4.88×10^{24}	6.06×10^6	1.94×10^7	1.08×10^{11}	2.99
Tierra	5.98×10^{24}	6.38×10^6	3.156×10^7	1.496×10^{11}	2.97
Marte	6.42×10^{23}	3.37×10^6	5.94×10^7	2.28×10^{11}	2.98
Júpiter	1.90×10^{27}	6.99×10^7	3.74×10^8	7.78×10^{11}	2.97
Saturno	5.68×10^{26}	5.85×10^7	9.35×10^8	1.43×10^{12}	2.99
Urano	8.68×10^{25}	2.33×10^7	2.64×10^9	2.87×10^{12}	2.95
Neptuno	1.03×10^{26}	2.21×10^7	5.22×10^9	4.50×10^{12}	2.99
Plutón ^a	1.27×10^{23}	1.14×10^6	7.82×10^9	5.91×10^{12}	2.96
Luna	7.36×10^{22}	1.74×10^6	—	—	—
Sol	1.991×10^{30}	6.96×10^8	—	—	—

^a En agosto de 2006 la Unión Astronómica Internacional adoptó una definición de planeta que separó a Plutón de los otros ocho planetas. Actualmente a Plutón se le denomina “planeta enano” (como al asteroide Ceres).

descartarse, lo cual significa que la ecuación 7.23 es válida para cualquier planeta del sistema solar. Si consideramos la órbita de un satélite como la Luna alrededor de la Tierra, entonces la constante tiene un valor diferente, con la masa del Sol remplazada por la masa de la Tierra. En este caso, K_T es igual a $4\pi^2/GM_T$.

La masa del Sol puede determinarse con la tercera ley de Kepler porque la constante K_S de la ecuación 7.23 incluye la masa del Sol, y las otras variables y constantes pueden ser fácilmente medibles. El valor de esta constante se determina sustituyendo los valores del periodo de un planeta y su radio orbital, para después resolver para K_S . La masa del Sol es entonces:

$$M_S = \frac{4\pi^2}{GK_S}$$

Este mismo proceso puede ser utilizado para calcular la masa de la Tierra (considerando el periodo y el radio orbital de la Luna) y la masa de otros planetas del sistema solar que posean satélites.

La última columna en la tabla 7.3 confirma que T^2/r^3 es muy cercano a una constante. Cuando el tiempo es medido en años terrestres y el semieje mayor está en unidades astronómicas (1 UA = distancia de la Tierra al Sol), la ley de Kepler toma la siguiente forma simple:

$$T^2 = a^3$$

La ecuación puede verificarse fácilmente: la Tierra tiene un semieje mayor de una unidad astronómica (por definición) y le toma un año en circular al Sol. Esta ecuación, por supuesto, es válida sólo para el Sol y sus planetas, asteroides y cometas.

■ Examen rápido

7.10 Suponga que un asteroide tiene un semieje mayor de 4 UA. ¿Cuánto le toma al asteroide rodear completamente al Sol? a) 2 años b) 4 años c) 6 años d) 8 años

■ EJEMPLO 7.13 Órbitas geosíncronas y satélites de comunicación

OBJETIVO Aplicar la tercera ley de Kepler a un satélite de la Tierra.

PROBLEMA Desde un punto de vista de las telecomunicaciones, es ventajoso que los satélites mantengan la misma posición en relación con un punto de referencia en la Tierra. Esto puede ocurrir sólo si el periodo orbital del satélite es el mismo que

(continúa)

el periodo de rotación de la Tierra, 24 h. **a)** ¿A qué distancia del centro de la Tierra puede encontrarse esta órbita geosíncrona? **b)** ¿Cuál es la velocidad orbital del satélite?

ESTRATEGIA Este problema puede resolverse con el mismo método utilizado para obtener el caso especial de la tercera ley de Kepler, con el remplazo de la masa del Sol con la de la Tierra. No hay necesidad de repetir el análisis; sólo sustituir la masa del Sol con la de la Tierra en la tercera ley de Kepler, reemplazando el periodo T (en segundos) y despejando r . Para el inciso b) encuentre la circunferencia de la órbita circular y divida entre el tiempo transcurrido.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia r a la órbita geosíncrona.

Aplique la tercera ley de Kepler:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_T} \right) r^3$$

Sustituya el periodo en segundos, $T = 86\,400$ s, la constante gravitacional $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3/\text{s}^2$ y la masa de la Tierra $M_T = 5.98 \times 10^{24}$ kg para despejar r :

$$r = 4.23 \times 10^7 \text{ m}$$

b) Calcule la velocidad orbital:

Divida la distancia recorrida durante una órbita entre el periodo:

$$v = \frac{d}{T} = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi(4.23 \times 10^7 \text{ m})}{8.64 \times 10^4 \text{ s}} = 3.08 \times 10^3 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Estos dos resultados son independientes de la masa del satélite. Observe que la masa de la Tierra podría encontrarse sustituyendo la distancia de la Luna y el periodo en esta forma de la tercera ley de Kepler.

PREGUNTA 7.13 Si el satélite fuera puesto en una órbita tres veces más lejos, ¿cuánto tardaría en orbitar una vez a la Tierra? Responda en días, redondeando a un dígito.

EJERCICIO 7.13 Marte rota sobre su eje una vez cada 1.02 días (casi el mismo tiempo que la Tierra). **a)** Encuentre la distancia desde Marte a la cual un satélite permanecería en un punto sobre la superficie marciana. **b)** Encuentre la rapidez del satélite.

RESPUESTA **a)** 2.03×10^7 m **b)** 1.45×10^3 m/s

RESUMEN

7.1 Velocidad angular y aceleración angular

La **velocidad angular promedio** ω_{prom} de un objeto rígido está definido como la razón del desplazamiento angular $\Delta\theta$ al tiempo Δt , o bien

$$\omega_{\text{prom}} \equiv \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad [7.3]$$

donde ω_{prom} está en radianes por segundo (rad/s).

La **aceleración angular promedio** α_{prom} de un cuerpo en rotación se define como la razón del cambio de la velocidad angular $\Delta\omega$ al tiempo Δt , o bien

$$\alpha_{\text{prom}} \equiv \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad [7.5]$$

donde α_{prom} está en radianes por segundo por segundo (rad/s²).

7.2 Movimiento rotatorio con aceleración angular constante

Si un objeto se somete a un movimiento rotatorio alrededor de un eje fijo bajo una aceleración angular constante α , su movimiento puede describirse con el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\omega = \omega_i + \alpha t \quad [7.7]$$

$$\Delta\theta = \omega_i t + \frac{1}{2}\alpha t^2 \quad [7.8]$$

$$\omega^2 = \omega_i^2 + 2\alpha\Delta\theta \quad [7.9]$$

Los problemas se resuelven como los de la cinemática en una dimensión.

7.3 Relaciones entre cantidades angulares y lineales

Cuando un objeto rota alrededor de un eje fijo, la velocidad angular y la aceleración angular están relacionadas con la velocidad tangencial y la aceleración tangencial a través de las siguientes relaciones:

$$v_t = r\omega \quad [7.10]$$

y

$$a_t = r\alpha \quad [7.11]$$

7.4 Aceleración centrípeta

Cualquier objeto que se mueve en una trayectoria circular tiene una aceleración dirigida hacia el centro, llamada **aceleración centrípeta**, cuya magnitud está dada por:

$$a_c = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 \quad [7.13]$$

Cualquier objeto moviéndose en una trayectoria circular debe tener una fuerza neta ejercida sobre él, que está dirigida hacia el centro. Algunos ejemplos de fuerzas que provocan aceleraciones centrípetas son la fuerza de gravedad (como en el movimiento de un satélite) y la fuerza de tensión en una cuerda.

7.5 Gravitación newtoniana

La **ley de newton de gravitación universal** establece que toda partícula en el Universo atrae a todas las otras partículas con

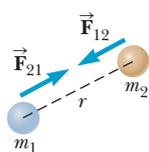
una fuerza que es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r entre ellas:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [7.20]$$

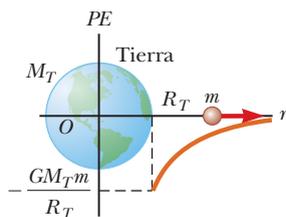
donde $G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ es la **constante de gravitación universal**. Una expresión general para la energía potencial gravitacional es

$$EP = -G \frac{M_T m}{r} \quad [7.21]$$

Esta expresión se reduce a $EP = mgh$ cerca de la superficie terrestre y para otros mundos a través del remplazo de la masa M_T . Problemas como la determinación de la velocidad de escape de la Tierra pueden resolverse usando la ecuación 7.21 en la ecuación de la conservación de la energía.



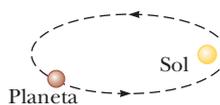
La fuerza gravitacional es de atracción y actúa a lo largo de la recta que une a las partículas.



La energía potencial gravitacional se incrementa hasta cero conforme r aumenta.

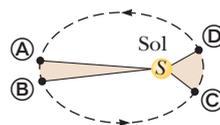
7.6 Leyes de Kepler

Kepler obtuvo las tres siguientes leyes del movimiento planetario:



Primera ley de Kepler

- Una recta trazada desde el Sol a cualquier planeta barre áreas iguales en intervalos de tiempos iguales.



Segunda ley de Kepler

- El cuadrado del periodo orbital de un planeta es proporcional al cubo del promedio de distancia del planeta al Sol:

$$T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM_S} \right) r^3 \quad [7.23]$$

Tercera ley de Kepler

La tercera ley puede ser aplicada a cualquier cuerpo y su sistema de satélites, reemplazando la masa del Sol con la masa del cuerpo. En particular, puede ser usada para determinar la masa del cuerpo central una vez que la distancia promedio a un satélite y su periodo se conocen.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Encuentre la velocidad angular de la Tierra alrededor del Sol en radianes por segundo. a) $2.22 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$ b) $1.16 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ c) $3.17 \times 10^{-8} \text{ rad/s}$ d) $4.52 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$ e) $1.99 \times 10^{-7} \text{ rad/s}$
- Un objeto de 0.400 kg atado al extremo de una cuerda de 0.500 m de longitud se hace girar en una trayectoria circular en un plano vertical. Si se mantiene a una velocidad angular constante de 8.00 rad/s, ¿cuál es la tensión en la cuerda cuando el objeto está en la parte superior de la trayectoria circular? a) 8.88 N b) 10.5 N c) 12.8 N d) 19.6 N e) Ninguno de éstos
- Un ciclista se desplaza en una bicicleta con ruedas de radio 0.500 m, a través de un campo. Un pedazo de plástico en el borde delantero de la rueda hace un sonido cada vez que pasa a través de la horquilla. Si el ciclista cuenta 320 clicks entre su departamento y la cafetería, ¿qué tanto se ha desplazado? a) 0.50 km b) 0.80 km c) 1.0 km d) 1.5 km e) 1.8 km
- Una rueda de pulir aumenta de velocidad angular de 4.00 rad/s a 12.00 rad/s en 4.00 s. ¿Qué ángulo barre durante ese tiempo si la aceleración angular es constante? a) 8.00 rad b) 12.0 rad c) 16 rad d) 32.0 rad e) 64.0 rad
- La fuerza gravitacional ejercida en un astronauta sobre la superficie terrestre es 650 N hacia abajo. Cuando se encuentra en la Estación Espacial Internacional, la fuer-

za gravitacional sobre él es a) mayor, b) exactamente la misma, c) menor, d) cercana, pero no exactamente igual a cero, e) exactamente cero.

- Considere un objeto sobre un disco en rotación a una distancia r del centro, sostenido en el lugar sobre el disco por la fricción estática. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones relacionadas con el objeto *no* es correcta? a) Si la velocidad angular es constante, el objeto debe tener una velocidad angular constante. b) Si la velocidad angular es constante, el objeto no está acelerado. c) El objeto tiene una aceleración tangencial sólo si el disco tiene una aceleración angular. d) Si el disco tiene una aceleración angular, el objeto tiene tanto aceleración centrípeta como aceleración tangencial. e) El objeto siempre tiene una aceleración centrípeta, excepto cuando la rapidez angular es cero.
- Un carrusel gira con velocidad angular constante. Cuando un paseante se mueve desde el borde del carrusel hacia el centro, ¿qué pasa con la magnitud de la fuerza centrípeta total que debe ejercerse sobre él? a) Aumenta. b) No es cero. c) Disminuye. d) Siempre es cero. e) Aumenta o disminuye dependiendo de la dirección de rotación.
- Un objeto está localizado sobre un planeta esférico de masa M y radio R . La velocidad de escape del planeta *no* depende de a) M b) la densidad del planeta c) R d) la

- aceleración debida a la gravedad sobre el planeta, e) la masa del objeto.
- Un satélite se mueve en una órbita circular con una velocidad constante alrededor de la Tierra. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) Ninguna fuerza actúa sobre el satélite. b) El satélite se mueve con una velocidad constante y, por consiguiente, no se acelera. c) El satélite tiene una aceleración dirigida hacia fuera de la Tierra. d) El satélite tiene una aceleración dirigida hacia la Tierra. e) El trabajo es realizado sobre el satélite por la fuerza de gravedad.
 - Un sistema consiste en cuatro partículas. ¿Cuántos términos aparecen en la expresión para la energía potencial gravitacional total del sistema? a) 4 b) 6 c) 10 d) 12 e) Ninguno de éstos
 - ¿Cuál es la aceleración gravitacional cerca de la superficie de un planeta que tiene dos veces la masa y dos veces el radio de la Tierra? Responda en términos de múltiplos de la aceleración gravitacional g , cerca de la superficie de la Tierra. a) $0.25g$ b) $0.5g$ c) g d) $2g$ e) $4g$
 - ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones relacionadas con un objeto que orbita la Tierra son ciertas? a) Si la órbita es circular, la fuerza de gravedad es perpendicular a la velocidad del objeto. b) Si la órbita es elíptica, la fuerza de gravedad es perpendicular al vector velocidad sólo en los puntos más cercanos y más lejanos. c) Si la órbita no es circular, la velocidad es mayor cuando el objeto está más alejada de la Tierra. d) La fuerza de gravedad sobre el objeto siempre tiene componentes paralelas y perpendiculares a la velocidad del objeto. e) Todas estas afirmaciones son ciertas.
 - El cometa Halley tiene un periodo de aproximadamente 76 años y se mueve en una órbita elíptica en la cual su distancia del Sol en la aproximación más cercana es una pequeña fracción de su distancia máxima. Estime la máxima distancia del cometa al Sol en unidades astronómicas UA (la distancia del Sol a la Tierra). a) 3 UA b) 6 UA c) 10 UA d) 18 UA e) 36 UA

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En una carrera como la de Indianápolis 500, un piloto corre en círculos por la pista, en sentido contrario al movimiento de las manecillas del reloj, y siente que su cabeza es jalada hacia su hombro. Para aliviar sus músculos del cuello por tener que mantener la cabeza erguida, el piloto sujeta una correa a una pared del auto y la otra a su casco. La longitud de la correa se ajusta para mantener vertical su cabeza. a) ¿Hacia cuál hombro tiende a inclinarse su cabeza? b) ¿Qué fuerza o fuerzas producen la aceleración centrípeta cuando no hay correa? c) ¿Qué fuerza o fuerzas lo hacen cuando hay correa?
- Si alguien le dijera que los astronautas no tienen peso en órbita terrestre, ya que están más allá de la fuerza de gravedad, ¿aceptaría la declaración? Explique.
- Si las llantas de un automóvil son remplazadas por otras de mayor diámetro, ¿cambiará la lectura del velocímetro? Explique.
- En la noche, usted está más lejos del Sol que durante el día. Lo que es más, por la noche la fuerza ejercida por el Sol sobre usted es hacia abajo como si intentara sumergirlo en la Tierra, y hacia arriba con dirección al cielo durante el día. Si tuviéramos una báscula de baño suficientemente sensible, ¿parecería que pesamos más en la noche que durante el día?
- Un péndulo está formado por un pequeño objeto llamado borla que cuelga de un cable de luz de longitud fija, con el extremo superior de la cuerda fija, como se representa en la figura PC7.5. La borla se mueve sin fricción, balanceándose igualmente alto en ambos lados.

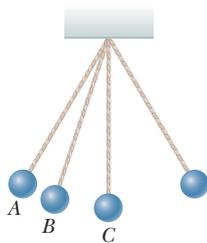


Figura PC7.5

- Se mueve desde su punto inicial A a través de un punto B y alcanza su velocidad máxima en el punto C. a) ¿En qué momento la borla tiene aceleración radial cero y la aceleración tangencial cero? ¿Cuál es la dirección de su aceleración total en este momento? b) ¿En qué momento la borla tiene aceleración tangencial cero y aceleración radial cero? ¿Cuál es la dirección de su aceleración total en este momento? c) ¿En qué momento la borla tiene tanto la aceleración tangencial como la radial en cero? ¿Cuál es la dirección de su aceleración total en ese momento?
- Debido a la rotación de la Tierra alrededor de su eje, una persona pesa ligeramente menos en el Ecuador que en los polos. Explique.
 - Se ha sugerido colocar en el espacio, como colonias, cilindros giratorios de unas 10 millas de largo y 5 millas de diámetro. El propósito de su rotación es simular gravedad para los habitantes. Explique el concepto que hay detrás de esta propuesta.
 - Describa la trayectoria de un objeto móvil en el caso de que su aceleración sea de magnitud constante en todo momento y a) perpendicular a su velocidad, b) paralela a su velocidad.
 - Usted puede dar vueltas a una cubeta con agua en una trayectoria circular sin que haya derrames. ¿Por qué continúa el agua en la cubeta aun cuando ésta se encuentre boca abajo sobre su cabeza?
 - Utilice la segunda ley de Kepler para convencerse de que la Tierra se mueve más rápido en su órbita durante el invierno del hemisferio norte, cuando está más cerca del Sol, que durante el verano, cuando está más lejos del Sol.
 - ¿Es posible que un automóvil se desplace en una trayectoria circular de manera que tenga aceleración tangencial, pero no aceleración centrípeta?

12. Un niño está practicando para una carrera de BMX. Su velocidad se mantiene constante a medida que avanza en sentido contrario a las manecillas del reloj alrededor de una pista de nivel con dos secciones casi rectas y dos seccio-

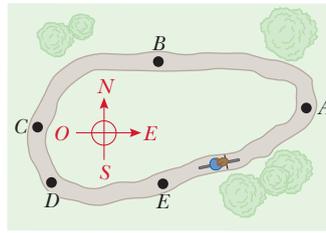


Figura PC7.12

nes de semicirculares, como se muestra en la vista aérea de la figura PC7.12. a) ¿Cuáles son las direcciones de su velocidad en los puntos A, B y C? Para cada punto elija una: norte, sur, este, oeste, o no existen? b) ¿Cuáles son las direcciones de su aceleración en los puntos A, B y C?

13. Un objeto se ejecuta un movimiento circular con velocidad constante cada vez que una fuerza neta de magnitud constante actúa perpendicular a la velocidad. ¿Qué pasa con la velocidad si la fuerza no es perpendicular a la velocidad?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

7.1 Velocidad angular y aceleración angular

- CIC** a) Encuentre la velocidad angular de la rotación de la Tierra alrededor de su eje. b) ¿Cuál es el efecto de esta rotación sobre la forma de la Tierra?
- Una llanta tiene radio de 4.1 m. ¿Qué distancia (longitud de la trayectoria) recorre un punto sobre su superficie si la rueda gira ángulos de a) 30° , b) 30 rad y c) 30 rev, respectivamente?
- Las llantas de un automóvil compacto nuevo tienen un diámetro de 2.0 pies y están garantizadas por 60000 millas. a) Determine el ángulo (en radianes) que gira una de estas llantas durante el periodo de garantía. b) ¿Cuántas revoluciones de la llanta son equivalentes a su respuesta en el inciso a)?
- CIC** Un torno de alfarero se mueve uniformemente desde el reposo hasta una velocidad angular de 1.00 rev/s en 30.0 s. a) Encuentre la aceleración angular en radianes por segundo en cada segundo. b) Al duplicar la aceleración angular durante el periodo dado, ¿se duplicaría la velocidad angular final?

7.2 Movimiento rotatorio con aceleración angular constante

7.3 Relaciones entre cantidades angulares y lineales

- El taladro de un dentista enciende desde el reposo. Después de 3.20 s de aceleración angular constante, gira a razón de 2.51×10^4 rev/min. a) Encuentre la aceleración angular del taladro. b) Determine el ángulo (en radianes) que recorre el taladro durante ese periodo.
- Una centrifugadora de un laboratorio médico gira con una rapidez angular de 3600 rev/min. Cuando se apaga gira a 50.0 revoluciones antes de detenerse por completo. Encuentre la aceleración angular constante (en rad/s^2) de la centrifugadora.

- CIC** Una parte de una máquina rota a una velocidad angular de 0.06 rad/s; después, su velocidad es incrementada a 2.2 rad/s con una aceleración angular de 0.70 rad/s^2 . a) Encuentre el ángulo recorrido por la parte mecánica antes de alcanzar su velocidad final. b) En general, si las velocidades angulares inicial y final se duplican con la misma aceleración angular, ¿qué factor cambia el desplazamiento angular? ¿Por qué? *Sugerencia:* Vea la forma de la ecuación 7.9.

- CIC** Una bicicleta se coloca arriba a fin de que su propietario pueda reparar una llanta. Un amigo hace girar la otra rueda y observa que las gotas del agua salen volando tangencialmente. Él mide las alturas alcanzadas por las gotas que se mueven en forma vertical. Una gota que

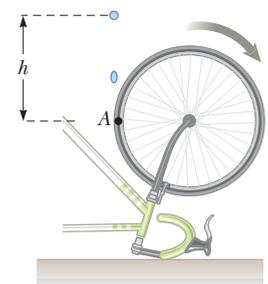


Figura P7.8 (Problemas 8 y 69.)

- Una gota que sale verticalmente del neumático en una subida al dar la vuelta alcanza 54.0 cm sobre el punto de tangencia. El radio de la rueda es 0.381 m. a) ¿Por qué la primera gota sube más arriba que la segunda? b) Despreciando la fricción con el aire y utilizando sólo las alturas observadas y el radio de la rueda, encuentre la aceleración angular de la rueda (suponiendo que es constante).
- Los diámetros del rotor principal y del rotor de cola de un helicóptero de un solo motor miden 7.60 y 1.02 m, respectivamente. Las velocidades rotacionales respectivas son de 450 rev/min y 4138 rev/min. Calcule las velocidades de las puntas de ambos rotores. Compare esta velocidad con la del sonido, 343 m/s.
- La tina de una lavadora entra en un ciclo de secado por rotación; es decir, arranca desde el reposo y alcanza una

velocidad angular de 5.0 rev/s en 8.0 s. En ese punto, la persona que hace el lavado abre la tapa de la máquina y un interruptor de seguridad la apaga. La tina reduce su velocidad hasta detenerse en 12 s. ¿Cuántas revoluciones da la tina durante este intervalo de 20 s? Suponga que la aceleración angular es constante mientras arranca y se detiene por completo.

11. Un automóvil que viaja inicialmente a 29.0 m/s experimenta una aceleración negativa constante de magnitud 1.75 m/s^2 después de aplicar los frenos. a) ¿Cuántas revoluciones hace cada llanta antes de que el automóvil se detenga, suponiendo que el automóvil no se patina y que los neumáticos tienen radios de 0.330 m? b) ¿Cuál es la velocidad angular de las ruedas cuando el automóvil ha recorrido la mitad de la distancia total?
12. Un disco de diámetro de 45.0 cm rota con una aceleración angular constante de 2.50 rad/s^2 . Empieza desde el reposo en $t = 0$, y una línea recta dibujada desde el centro del disco a un punto P sobre el borde forma un ángulo de 57.3° con el eje x positivo en ese tiempo. En $t = 2.30 \text{ s}$, encuentre a) la velocidad angular del disco, b) la velocidad lineal y la aceleración tangencial de P y c) la posición de P (en grados con respecto al eje x positivo).
13. **M** Una rueda girando requiere 3.00 s para rotar 37.0 revoluciones. Su velocidad angular al final del intervalo de tiempo de 3.00 s es de 98.0 rad/s . ¿Cuál es la aceleración angular (en rad/s^2) constante de la rueda?
14. Un motor eléctrico que mueve una rueda esmeril de un taller a razón de $1.00 \times 10^2 \text{ rev/min}$ se desconecta. Suponga que la rueda tiene una aceleración angular negativa constante de magnitud 2.00 rad/s^2 . a) ¿Cuánto tarda en detenerse la rueda esmeril? b) ¿Cuántos radianes ha girado la rueda durante el intervalo encontrado en a)?

7.4 Aceleración centrípeta

15. Un automóvil inicialmente viajando hacia el este gira hacia el norte, desplazándose en una trayectoria circular a una velocidad uniforme, como se muestra en la figura P7.15. La longitud del arco ABC es de 235 m, y el automóvil completa la vuelta en 36.0 s. a) Determine la velocidad del automóvil. b) ¿Cuál es la magnitud y la dirección de la aceleración cuando el automóvil está en el punto B ?
16. Se ha sugerido que se pueden colocar cilindros rotatorios en el espacio, con cerca de 10 millas de largo y 5.0 millas de diámetro para ser usados como colonias. ¿Cuál es la velocidad angular que deben tener estos cilindros para que la aceleración centrípeta en su superficie sea igual a la aceleración en caída libre en la Tierra?
17. a) ¿Cuál es la aceleración tangencial de un insecto posado en el borde de un disco de 10.0 pulg de diámetro, si el

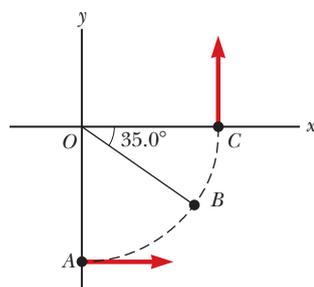


Figura P7.15

disco se mueve desde el reposo con una velocidad angular de 78.0 rev/min en 3.00 s? b) Cuando el disco alcanza su velocidad final, ¿cuál es la velocidad tangencial del insecto? Un segundo después que el insecto arranca desde el reposo, ¿cuáles son sus aceleraciones, c) tangencial, d) centrípeta y e) total?

18. Un arqueólogo aventurero ($m = 85.0 \text{ kg}$) trata de cruzar un río por el balanceo de una liana. Ésta es de 10.0 m de largo, y la velocidad de la oscilación en la parte inferior es de 8.00 m/s. El arqueólogo no sabe que la liana tiene una resistencia a la rotura de 1000 N. ¿Podrá atravesar el río, sin caer en él?
19. **C/C** Uno de los extremos de una cuerda fija está conectado a un pequeño objeto de 0.500 kg al otro extremo, donde oscila en una sección de circunferencia vertical de radio 2.00 m, como se muestra en la figura P7.19. Cuando $\theta = 20.0^\circ$, la velocidad del objeto es de 8.00 m/s. En este instante, encuentre a) la tensión en la cuerda, b) los componentes tangencial y radial de la aceleración y c) la aceleración total. d) ¿Su respuesta cambia si el objeto se está moviendo hacia abajo, hacia su punto más bajo, en lugar de pivotar hacia arriba? e) Explique su respuesta al inciso d).
20. **C/C** Una moneda se coloca a 15.0 cm del centro de un tocadiscos. El coeficiente de fricción estática entre la moneda y el plato del tocadiscos es 0.350. El tocadiscos empieza desde el reposo en $t = 0$ y rota con una aceleración angular constante de 0.730 rad/s^2 . a) Una vez que el tocadiscos empieza a rotar, ¿qué fuerza causa la aceleración centrípeta cuando la moneda está estacionaria en relación con el tocadiscos? b) ¿Después de qué tiempo empezará a resbalar la moneda por el tocadiscos?

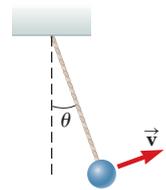


Figura P7.19

21. Una patinadora sobre hielo, de 55.0 kg de peso, se mueve a 4.00 m/s cuando se sujeta a un extremo suelto de una cuerda, cuyo extremo opuesto está atado a un poste. Ella se mueve en un círculo de 0.800 m de radio alrededor del poste. a) Determine la fuerza ejercida por la cuerda horizontal sobre sus brazos. b) Compare esta fuerza con su peso.
22. **M** Un niño de 40.0 kg se mece en un columpio sostenido por dos cadenas, cada una de 3.00 m de largo. La tensión en cada cadena en el punto más bajo es de 350 N. Calcule: a) la velocidad del niño en el punto más bajo y b) la fuerza ejercida por el asiento en el niño en el punto más bajo. (Omita la masa del asiento.)
23. Un camión ligero puede rodear una curva plana de 150 m de radio a una velocidad máxima de 32.0 m/s. ¿Con qué velocidad máxima puede rodear una curva de 75.0 de radio?
24. **BIO** Una muestra de sangre se coloca en una centrifugadora de 15.0 cm de radio. La masa de una célula roja en la sangre es $3.0 \times 10^{-16} \text{ kg}$ y la magnitud de la fuerza que actúa sobre ella para que se sedimente en el plasma es $4.0 \times 10^{-11} \text{ N}$. ¿A cuántas revoluciones por segundo debe ser operada la centrifugadora?

25. Un niño de 50.0 kg está de pie en el borde de un carrusel de 2.00 m de radio que gira con una velocidad angular de 3.00 rad/s. a) ¿Cuál es la aceleración centrípeta del niño? b) ¿Cuál es la fuerza mínima entre sus pies y el piso del carrusel necesaria para que se mantenga en la trayectoria circular? c) ¿Qué coeficiente mínimo de fricción estática se requiere? ¿Encuentra usted su respuesta razonable? Es decir, ¿es probable que el niño permanezca en el carrusel?
26. **PG** Un lugar habitable para largos viajes espaciales consiste en dos cabinas conectadas por un cable a un eje central, como se muestra en la figura P7.26. Las cabinas están girando en conjunto alrededor del eje, las cuales están conectadas al resto de la nave espacial para generar gravedad artificial. a) ¿Qué fuerzas están actuando sobre un astronauta en una de las cabinas? b) Escriba la segunda ley de Newton para un astronauta cayendo sobre el “suelo” de una de las cabinas, relacionando la masa m del astronauta, su velocidad v , su distancia radial desde el tubo r y la fuerza normal n . c) ¿A qué tendría que ser igual n si un astronauta de 60.0 kg debe experimentar la mitad de su peso normal en la Tierra? d) Calcule la velocidad tangencial necesaria de la cabina a partir de la segunda ley de Newton. e) Halle la velocidad angular a partir de la velocidad tangencial. f) Encuentre el periodo de rotación a partir de la velocidad angular. g) Si el astronauta está parado ¿su cabeza se mueve más rápido, más lento o a la misma velocidad que sus pies? ¿Por qué? Calcule la velocidad tangencial en la parte superior de su cabeza si su estatura es de 1.80 m.

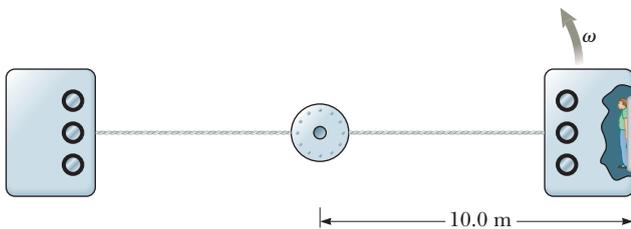


Figura P7.26

27. Un disco de masa $m_1 = 0.25$ kg se ata a una cuerda y se hace girar en un círculo de radio $R = 1.0$ m sobre una mesa horizontal sin fricción. El otro extremo de la cuerda pasa por un agujero ubicado en el centro de la mesa, y una masa $m_2 = 1.0$ kg se ata a él (figura P7.27). La masa suspendida permanece en equilibrio mientras gira el disco sobre la mesa. a) ¿Cuál es la tensión sobre la cuerda? b) ¿Cuál es la fuerza horizontal que actúa sobre el disco? c) ¿Cuál es la velocidad del disco?
28. **S** Un disco de masa m_1 es atada a una cuerda y se hace girar en un círculo de radio R sobre una mesa horizontal sin fricción. El otro extremo de la cuerda pasa a través de

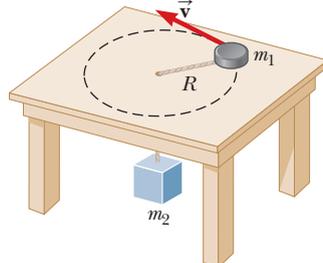


Figura P7.27 (Problemas 27 y 28.)

un pequeño agujero en el centro de la mesa, y un objeto de masa m_2 es atado a él (figura P7.27). El objeto suspendido permanece en equilibrio mientras el disco sobre la mesa está girando. a) Encuentre una expresión simbólica para la tensión en la cuerda en términos de m_2 y g . b) Escriba la segunda ley de Newton para el disco, usando las variables m_1 , v , R y T . c) Elimine la tensión T de la expresión encontrada en las partes a) y b) y encuentre una expresión para la velocidad del disco en términos de m_1 , m_2 , g y R . d) Verifique sus respuestas sustituyendo los valores del problema 27 y compare los resultados con las respuestas para este problema.

29. **C/C** Una mujer deja su cartera en el asiento trasero de su vehículo. Mientras conduce al trabajo, el automóvil franquea una curva sin peralte en el camino que se puede mirar como el arco de circunferencia de radio de 62.0 m. Mientras está en la curva, el velocímetro del automóvil marca 15.0 m/s en el instante en que la cartera comienza a resbalar a lo largo del asiento trasero hacia el costado del auto. a) ¿Qué fuerza causa la aceleración centrípeta de la cartera cuando está quieta en relación con el automóvil? ¿Bajo qué condiciones la cartera empieza a moverse en relación con el automóvil? b) ¿Cuál es el coeficiente de fricción estática entre la cartera y la superficie del asiento?
30. **C/C** Un cubo de agua es rotado en trayectoria circular vertical de radio 1.00 m. a) ¿Cuáles son las dos fuerzas externas que actúan sobre el agua en el cubo? b) ¿Cuál de las dos fuerzas es la principal causante de que el agua se mueva en círculo? c) ¿Cuál es la velocidad mínima del cubo en la parte superior de la trayectoria circular para que no haya derrame de agua? d) Si la velocidad hallada para el cubo en c) desapareciera de repente en la parte superior de la trayectoria, describa el movimiento que tendría el agua. ¿Diferiría del movimiento de un proyectil?
31. **M** Una niña de 40.0 kg pasea en una “rueda de la fortuna” que da cuatro vueltas por minuto y que tiene un diámetro de 18.0 m. a) ¿Cuál es la aceleración centrípeta de la niña? b) ¿Qué fuerza (magnitud y dirección) ejerce el asiento sobre la niña en el punto más bajo de la vuelta? c) ¿Qué fuerza ejerce el asiento sobre la niña en el punto más alto de la vuelta? d) ¿Qué fuerza ejerce el asiento sobre la niña cuando ella está a la mitad entre las partes superior e inferior?
32. Un carro de una montaña rusa tiene una masa de 500 kg cuando está completamente cargado con pasajeros (figura

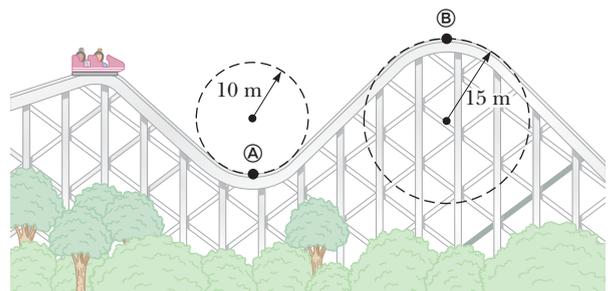


Figura P7.32

P7.32). a) Si el carro tiene una velocidad de 20.0 m/s en \textcircled{A} , ¿cuál es la magnitud de la fuerza que ejerce la vía sobre el carro en ese punto? b) ¿Cuál es la máxima velocidad que el carro puede tener en \textcircled{B} para que la gravedad lo mantenga sobre la vía?

7.5 Gravitación newtoniana

33. La distancia promedio de separación entre la Tierra y la Luna es de 384000 km. Utilice los datos de la tabla 7.3 para encontrar la fuerza gravitacional neta ejercida por la Tierra y la Luna sobre una nave espacial de masa 3.00×10^4 kg ubicada a la mitad del camino entre ellas.

34. Un satélite tiene una masa de 100 kg y está localizado a 2.00×10^6 m de la superficie de la Tierra. a) ¿Cuál es la energía potencial asociada con el satélite en ese lugar? b) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional sobre el satélite?

35. Se construye un sistema de coordenadas (en metros) sobre la superficie de una mesa de billar y se colocan tres objetos sobre la mesa como sigue: un objeto de 2.0 kg en el origen, un objeto de 3.0 kg en (0, 2.0) y un objeto de 4.0 kg en (4.0, 0). Encuentre la fuerza gravitacional resultante ejercida por los otros dos objetos sobre el que está en el origen.

36. Después de que el Sol agote su combustible nuclear, su último destino puede ser el colapso hacia un estado de *enana blanca*. En ese estado, tendría aproximadamente la misma masa que la que ahora tiene, pero su radio sería casi igual al de la Tierra. Calcule a) la densidad promedio de la enana blanca, b) la aceleración en caída libre sobre su superficie y c) la energía potencial gravitacional asociada con un objeto de 1.00 kg en la superficie de la enana blanca.

37. Objetos con masas de 200 y 500 kg están separados a una distancia de 0.400 m. a) Encuentre la fuerza gravitacional neta ejercida por ellos sobre un objeto de 50.0 kg colocado a medio camino entre ellos. b) ¿En qué posición (que no sea infinitamente remota) se puede colocar un objeto de 50.0 kg para que experimente una fuerza neta cero?

38. Utilice los datos de la tabla 7.3 para hallar el punto entre la Tierra y el Sol en el que un objeto se puede colocar de modo que la fuerza gravitacional neta, ejercida por la Tierra y el Sol sobre este objeto, sea cero.

39. Un proyectil se dispara verticalmente hacia arriba desde la superficie de la Tierra en el Polo Sur con una velocidad inicial igual a un tercio la velocidad de escape. a) Haciendo caso omiso de la resistencia del aire, determine a qué distancia del centro de la Tierra está el proyectil antes de detenerse por un momento. b) ¿Cuál es la altura del proyectil en este instante?

40. Dos objetos se atraen uno al otro con una fuerza gravitacional de magnitud 1.00×10^{-8} N cuando están separados 20.0 cm. Si el total de la masa de los objetos es 5.00 kg, ¿cuál es la masa de cada uno?

7.6 Leyes de Kepler

41. **M** Un satélite está en una órbita circular alrededor de la Tierra a una altura de 2.80×10^6 m. Calcule: a) el pe-

riodo de la órbita, b) la velocidad del satélite y c) la aceleración del satélite. *Sugerencia:* Modifique la ecuación 7.23 para adecuarla a los objetos que orbitan la Tierra, en lugar del Sol.

42. Un satélite artificial rodea la Tierra en una órbita circular, la cual completa en 110 minutos. a) Determine la altura del satélite. b) ¿Cuál es el valor de g en la ubicación de este satélite?

43. El satélite de Marte Foebus tiene un radio orbital de 9.4×10^6 m y un periodo orbital de 2.8×10^4 s. Suponiendo que la órbita es circular, determine la masa de Marte.

44. Un satélite de 600 kg está en una órbita circular alrededor de la Tierra, a una altura igual al radio promedio de ésta. Encuentre a) la velocidad orbital del satélite, b) el periodo de su revolución y c) la fuerza gravitacional que actúa sobre él.

45. Dos satélites describen órbitas circulares alrededor de la Tierra. Un satélite A está a una altura igual al radio de la Tierra, mientras que el satélite B está a una altura igual a dos veces el radio de la Tierra. ¿Cuál es la razón de sus periodos, T_B/T_A ?

Problemas adicionales

46. Un satélite síncrono, que siempre mantiene su posición en relación con el ecuador de un planeta, es puesto en órbita circular alrededor de Júpiter para estudiar su famosa mancha roja. Júpiter rota una vez cada 9.84 h. Utilice los datos de la tabla 7.3 para encontrar la altura del satélite.

47. a) Una de las lunas de Júpiter, llamada Io, tiene un periodo orbital de 1.77 días y un radio orbital de 4.22×10^8 m. Suponiendo que la órbita es circular, determine la masa de Júpiter. b) La mayor de las lunas de Júpiter, Ganímedes, tiene un radio orbital de 1.07×10^9 m y un periodo de 7.16 días. Con estos datos, calcule la masa de Júpiter. c) ¿Son consistentes sus resultados de los incisos a) y b)? Explique.

48. Las estrellas de neutrones son objetos extremadamente densos formados por remanentes de explosiones de supernovas. Muchas de ellas rotan muy rápido. Suponga que la masa de una cierta estrella de neutrones de forma esférica es dos veces la masa del Sol y su radio es de 10.0 km. Determine la mayor velocidad angular posible que la estrella de neutrones debe tener para que la materia de su superficie sobre el ecuador se sostenga apenas por la fuerza gravitacional.

49. **BIO** Un método de lanzamiento en el *softball* se llama el “serpenteo”, en el cual el brazo del lanzador rota aproximadamente 360° en un plano vertical antes de que la bola de 198 gramos se lance en el punto más bajo del movimiento circular. Un experimentado lanzador puede tirar una bola con una velocidad de 98.0 mi/h. Suponga que la aceleración angular es uniforme durante el movimiento de lanzamiento y tome la distancia entre la bola y el hombro como de 74.2 cm. a) Determine la velocidad angular del brazo en rev/s en el instante de soltarla. b) Encuentre el valor de la aceleración angular en rev/s^2 y las aceleraciones radial y tangencial de la bola justo en

el momento de soltarla. c) Determine la fuerza ejercida sobre la bola por la mano del lanzador (componentes radiales y tangenciales) justo antes de soltarla.

50. Un disco compacto de audio digital lleva datos con cada BIT ocupando 0.6 mm, a lo largo de una pista espiral continua desde la circunferencia interior del disco hacia el borde exterior. Un aparato reproductor de CD hace girar el disco para llevar la pista en sentido contrario a las manecillas del reloj, sobre una lente a una velocidad constante de 1.30 m/s. Encuentre la velocidad angular necesaria a) al comienzo de la grabación, donde la espiral tiene un radio de 2.30 cm y b) al final de la grabación, donde la espiral tiene un radio de 5.80 cm. c) Una grabación de larga duración es de 74 min 33 s. Encuentre la aceleración angular media del disco. d) Si se supone que la aceleración es constante, determine el desplazamiento angular total del disco cuando reproduce el sonido. e) Encuentre la longitud total de la pista.
51. Un atleta hace girar una pelota de 5.00 kg horizontalmente en el extremo de una cuerda. La pelota se mueve en una circunferencia de 0.800 m de radio a una velocidad angular de 0.500 rev/s. ¿Cuáles son a) la velocidad tangencial de la pelota y b) su aceleración centrípeta? c) Si la tensión máxima que la cuerda puede resistir antes de romperse es de 100 N, ¿cuál es la velocidad tangencial máxima que puede tener la pelota?
52. Un automóvil toma una curva peraltada donde el radio de curvatura del camino es R , el ángulo de peralte es θ y el coeficiente de fricción estática es μ . a) Determine el intervalo de velocidades que el automóvil puede tener sin patinar en ambas direcciones del camino. b) ¿Cuál es el intervalo de velocidades posible si $R = 100$ m, $\theta = 10^\circ$ y $\mu = 0.10$ (condiciones de camino resbaloso)?
53. El satélite solar *Maximun Mission* fue puesto en órbita circular a 150 millas sobre la Tierra. Determine a) la velocidad orbital del satélite y b) el tiempo necesario para completar una revolución.
54. El disco de un péndulo de 0.400 kg pasa por la parte más baja de su trayectoria a una velocidad de 3.00 m/s. a) ¿Cuál es la tensión en el cable del péndulo en ese punto si el péndulo mide 80.0 cm de largo? b) Cuando el péndulo llega a su punto más alto, ¿qué ángulo forma el cable con la vertical? c) ¿Cuál es la tensión del cable del péndulo cuando éste llega a su punto más alto?
55. **CIC** Un auto se desplaza a una velocidad v para cruzar un puente construido en forma de arco circular de radio r . a) Encuentre una expresión para la fuerza normal que actúa sobre el auto cuando está en la parte alta del arco. b) ¿A qué velocidad mínima la fuerza normal será cero (donde parece que los ocupantes del auto no tienen peso) si $r = 30.0$ m?
56. **S** Demuestre que la velocidad de escape de la superficie de un planeta de densidad uniforme, es directamente proporcional al radio del planeta.
57. **CIC** Debido a la rotación de la Tierra alrededor de su eje, un punto sobre el Ecuador experimenta una aceleración centrípeta de 0.0340 m/s², mientras que un pun-

to en los polos no experimenta aceleración centrípeta. a) Demuestre que en el Ecuador la fuerza gravitacional sobre un objeto (el verdadero peso) debe ser mayor que el peso aparente del objeto. b) ¿Cuáles son los pesos aparentes de una persona de 75.0 kg en el Ecuador y en los polos? (Suponga que la Tierra es una esfera uniforme y tome $g = 9.800$ m/s².)

58. Un pequeño bloque de masa $m = 0.50$ kg se dispara con una velocidad inicial de $v_0 = 4.0$ m/s a lo largo de una sección de vía horizontal sin fricción, como se muestra en la figura P7.58. El bloque se mueve a lo largo de una vía vertical semicircular sin fricción, de radio $R = 1.5$ m. a) Determine la fuerza ejercida por la vía sobre el bloque en los puntos A y B. b) La parte inferior de la vía consta de una sección ($L = 0.40$ m) con fricción. Determine el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y esa parte inferior de la vía si el bloque apenas llega al punto C en el primer viaje. (Sugerencia: Si el bloque apenas llega al punto C, la fuerza de contacto ejercida por la vía sobre el bloque en ese punto debe ser cero.)

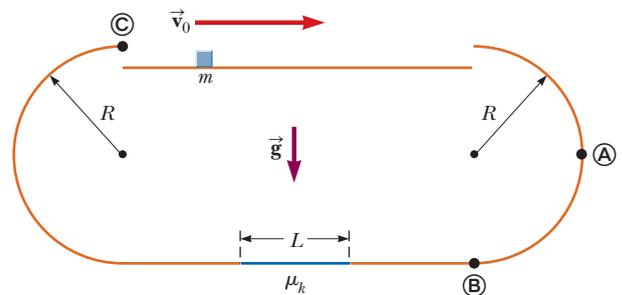


Figura P7.58

59. En la obra de Robert Heinlein, *La Luna es una áspera patrona*, los colonizadores de nuestro satélite natural amenazan con lanzar rocas hacia la Tierra si no se les da la independencia (o por lo menos una representación). Suponiendo que un cañón pudiera lanzar una piedra de masa m al doble de la velocidad de escape lunar, calcule la velocidad de la roca cuando entre en la atmósfera terrestre.
60. **CIC** El carro de una montaña rusa se mueve en una trayectoria circular en un plano vertical. a) Identifique las fuerzas sobre un pasajero en la parte alta de un rizo que causan todas las fuerzas. b) Identifique las fuerzas sobre el pasajero en la parte inferior del rizo que producen aceleración centrípeta; muéstre las en un dibujo. c) Con base en las respuestas en a) y b), ¿en qué punto, alto o del fondo, debe el asiento ejercer la máxima fuerza sobre el pasajero? d) Suponga que la velocidad del carro de la montaña rusa es de 4.00 m/s en lo alto del rizo, cuyo radio es de 8.00 m. Encuentre la fuerza ejercida por el asiento sobre un pasajero de 70.0 kg en la parte superior del rizo. Después, suponga que la velocidad permanece igual en la parte baja del rizo y encuentre la fuerza ejercida por el asiento sobre el pasajero en ese punto. ¿Son congruentes sus respuestas con su elección de respuestas en a) y b)?
61. En un secador de ropa casero, una tina cilíndrica que contiene la ropa mojada se gira constantemente alrededor de un eje horizontal, como se muestra en la figura

P7.61. Conforme la ropa se seca de manera uniforme, se le hace caer. La velocidad de rotación de la tina de paredes lisas se elige de manera que un pequeño pedazo de tela pierde el contacto con la tina cuando la tela se encuentra en un ángulo de $\theta = 68.0^\circ$ sobre la horizontal. Si el radio de la tina es $r = 0.330$ m, ¿qué velocidad de giro se necesita en revoluciones por segundo?

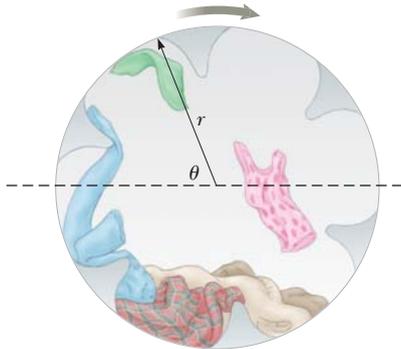


Figura P7.61

62. **M** Un modelo de avión de masa 0.750 kg vuela a una velocidad de 35.0 m/s en una circunferencia horizontal en el extremo de un cable de control de 60.0 m, como se muestra en la figura P7.62a. Las fuerzas ejercidas sobre el avión se muestran en la figura P7.62b, la tensión en el cable de control, $\theta = 20.0^\circ$ hacia el interior de la vertical. Calcule la tensión en el cable, suponiendo que forma un ángulo constante de $\theta = 20.0^\circ$ con la horizontal.

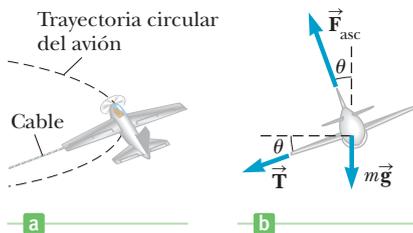


Figura P7.62

63. **S** Un esquiador arranca desde el reposo en lo alto de una colina hemisférica (figura P7.63). Olvidando la fricción, demuestre que el esquiador saldrá de la colina y volará una distancia de $h = R/3$ hacia debajo de la cima de la colina. *Sugerencia:* en este punto, la fuerza normal se reduce a cero.)

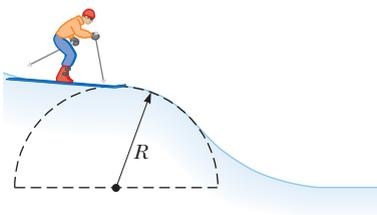


Figura P7.63

64. Un contenedor de metal fundido es importante en muchos procesos industriales. Un *contenedor centrífugo* se utiliza para la fabricación de pipas, cojinetes y muchas

otras estructuras. Un contenedor cilíndrico rota rápida y constantemente sobre un eje horizontal, como se ve en la figura P7.64. El metal fundido se vierte en el cilindro que rota y después se enfría formando el producto final. Girar el cilindro a una alta tasa de rotación expulsa fuertemente al exterior el metal de solidificación. Cualquier burbuja es desplazada hacia el eje de modo que los vacíos indeseados no estén presentes en el contenedor.

Suponga que se debe echar una manga de cobre de radio interno 2.10 cm y de radio externo 2.20 cm. Para eliminar burbujas y dar una alta integridad estructural, la aceleración centrípeta se debe aplicar a cada pedacito de metal de 100g. ¿Qué tasa de rotación se requiere? Indique la respuesta en revoluciones por minuto.

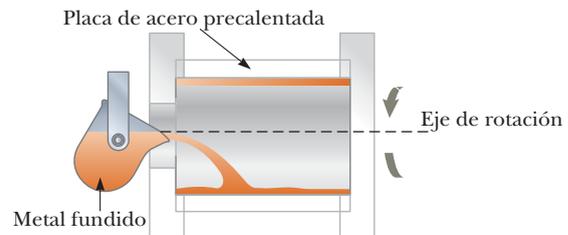


Figura P7.64

65. Suponga que un coche de 1800 kg pasa sobre un tope en un camino siguiendo un arco de circunferencia de radio 20.4 m, como se muestra en la figura P7.65. a) ¿Qué fuerza ejerce el camino sobre el coche cuando éste pasa por el punto más alto del tope si viaja a 8.94 m/s? b) ¿Cuál es la velocidad máxima que el coche puede tener sin perder contacto con el camino cuando pasa por el punto más alto?

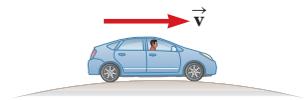


Figura P7.65

66. Un “doble” de cine, de masa igual a 70 kg, oscila desde el extremo de una cuerda de 4.0 m de largo en un arco de circunferencia vertical. Si se supone que el “doble” arranca desde el reposo cuando la cuerda está horizontal, determine las tensiones necesarias en la cuerda para hacerle seguir su trayectoria circular a) al comienzo de su movimiento, b) a una altura de 1.5 m sobre la parte baja del arco circular y c) en la parte baja del arco.
67. **CIC** Una mínima energía orbital externa de un planeta consiste en poner una nave espacial en una trayectoria elíptica con el planeta haciendo corresponder el punto de partida con el perihelio de la elipse, o del punto más cercano al Sol, y la llegada al planeta con el afelio de la elipse, o del punto más lejano del Sol. a) Utilice la tercera ley de Kepler para calcular cuánto tiempo tomaría para ir de la Tierra a Marte en tal órbita. b) ¿Se puede emprender esta órbita en cualquier momento? Explique.
68. **CIC** El piloto de un avión ejecuta maniobras describiendo rizos a una velocidad constante, en círculos verticales como se ve en la figura 7.15b. La velocidad del avión es 2.00×10^2 m/s, y el radio del círculo es 3.20×10^3 m. a) ¿Cuál es el peso aparente del piloto en el punto más bajo de la trayectoria circular si su peso real es 712 N? b) ¿Cuál es el peso aparente en la parte alta? c) Describa cómo el

piloto podría experimentar pérdida de peso si el radio y la velocidad variaran. *Nota:* Su peso aparente es igual a la magnitud de la fuerza ejercida por el asiento sobre su cuerpo. ¿Bajo qué condiciones eso ocurre? d) ¿Cuál es la velocidad que tiene el avión en la parte superior de la trayectoria si en ese punto el piloto experimenta pérdida de peso?

69. **S** Una pieza de barro está inicialmente en el punto *A* sobre el borde de una rueda de bicicleta de radio *R*, rotando en sentido contrario a las manecillas del reloj, alrededor de un eje horizontal a una velocidad angular constante ω (figura P7.8). El barro es desplazado del punto *A* cuando el diámetro formado con *A* es horizontal. El barro es lanzado verticalmente hacia arriba y regresa al punto *A*. a) Encuentre una expresión simbólica en términos de *R*, ω y *g* para el tiempo total que el barro permanece en el aire y regresa al punto *A*. b) Si la rueda hace una revolución completa en el tiempo que le toma al barro regresar al punto *A*, encuentre una expresión para la velocidad angular ω de la rueda, en términos de π , *g* y *R*.

70. **CIC** Una bola de 0.275 kg está girando en una trayectoria circular vertical sobre una cuerda de 0.850 m de longitud como se ve en la figura P7.70. a) ¿Cuáles son las fuerzas que actúan sobre la bola en cualquier punto a lo largo de esta trayectoria? b) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la bola cuando ésta se encuentra en la parte baja de la trayectoria y en la parte alta. c) Si la velocidad es 5.20 m/s en la parte alta de la trayectoria, ¿cuál es la tensión sobre la cuerda ahí? d) Si la cuerda se rompe cuando su tensión excede 22.5 N, ¿cuál es la velocidad máxima que la bola puede tener en la parte baja de la trayectoria antes de que la cuerda se rompa?

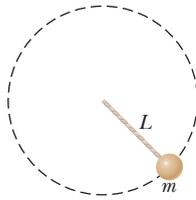


Figura p7.70

71. Un objeto de 4.00 kg está atado a una vara vertical por dos cuerdas como se muestra en la figura P7.71. El objeto rota en una circunferencia horizontal a una velocidad constante de 6.00 m/s. Encuentre la tensión en a) la cuerda superior y b) la cuerda inferior.

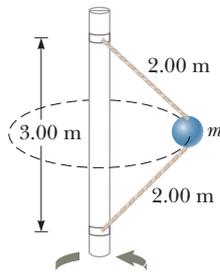


Figura P7.71

72. **BIO** La máxima fuerza que levanta a un murciélago es proporcional al cuadrado de su velocidad de vuelo *v*. Para el murciélago cano (*Lasiurus cinereus*), la magnitud de su fuerza de ascenso está dada por:

$$F_A \leq (0.018 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2)v^2$$

El murciélago puede volar en una circunferencia horizontal batiendo sus alas en un ángulo θ , como se muestra en la figura P7.72. En esta situación, la magnitud de la componente vertical de la fuerza de ascenso debe ser igual a la del peso del murciélago. La componente horizontal de la fuerza provee la aceleración centrípeta. a) ¿Cuál es la velocidad mínima que el murciélago puede tener si su masa es 0.031 kg? b) Si la velocidad máxima del murciélago es

10 m/s, ¿cuál es el máximo ángulo de abatimiento que permite al murciélago permanecer en un plano horizontal? c) ¿Cuál es el radio de circunferencia de su vuelo cuando el murciélago vuela a su velocidad máxima? d) ¿Puede el murciélago dar vuelta con un radio más pequeño volando más lentamente?

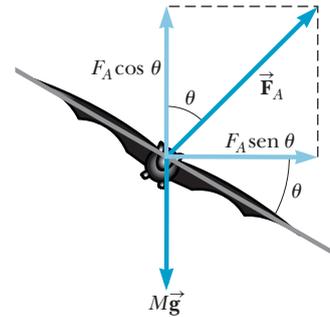


Figura P7.72

73. a) Un carrusel de equipaje en un aeropuerto que tiene la forma de una sección de un gran cono permanece girando alrededor de un eje vertical. Su superficie metálica se inclina hacia afuera en un ángulo de 20.0° con la horizontal. Una pieza de equipaje de 30.0 kg se pone en el carrusel a 7.46 m del eje de rotación. La maleta da una vuelta en 38.0 s. Calcule la fuerza de fricción estática entre la maleta y el carrusel. b) El motor impulsor se ajusta de manera que dé vuelta al carrusel a la más alta razón constante de rotación, y una pieza de equipaje se coloca en una posición a 7.94 m del eje de rotación. La maleta está en el borde de deslizamiento cuando circunda una vez cada 34 s. Calcule el coeficiente de fricción estática entre la maleta y el carrusel.

74. Una bola de 0.50 kg se ata al extremo de una ligera cuerda de 1.5 m y se hace girar en un plano horizontal, formando un ángulo de 30° con la vertical (véase la figura P7.74). a) Determine la velocidad de la bola. b) Si, de otro modo, la bola es revolucio-nada con una velocidad de 4.0 m/s, ¿qué ángulo forma la cuerda con la vertical? c) Si la cuerda puede estirarse a una tensión máxima de 9.8 N, ¿cuál es la velocidad máxima a la que la bola puede moverse?

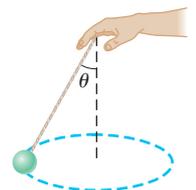


Figura P7.74

75. Un juego mecánico muy popular de un parque de diversiones es un cilindro giratorio de 3.00 m de radio, que se pone en rotación a una velocidad angular de 5.00 rad/s, como se ve en la figura P7.75. En algún momento, el piso cae y deja a las personas suspendidas contra la pared en una posición vertical. ¿Cuál es el mínimo coeficiente de fricción entre la ropa de una persona y la pared necesario para evitar que la persona resbale? (*Sugerencia:*

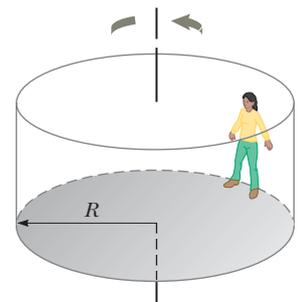


Figura P7.75

Recuerde que la magnitud de la máxima fuerza de fricción estática es igual a $\mu_s n$, donde n es la fuerza normal, en este caso la fuerza que ocasiona la aceleración centrípeta.)

76. Un resorte sin masa de constante $k = 78.4 \text{ N/m}$ está fijo en el lado izquierdo de una vía a nivel. Un bloque de masa $m = 0.50 \text{ kg}$ se presiona contra el resorte y lo comprime una distancia d , como se ve en la figura P7.76. El bloque (inicialmente en reposo) se suelta y se mueve hacia un aro circular de radio $R = 1.5 \text{ m}$. Toda la vía y el aro carecen de fricción, excepto por la sección de vía entre los puntos A y B . Dado que el coeficiente de fricción cinética entre el bloque y la vía a lo largo de AB es $\mu_k = 0.30$, y que la longitud de AB es 2.5 m , determine la compresión mínima d del resorte que haga posible que el bloque ape-

nas llegue al punto C . (*Sugerencia:* La fuerza ejercida por la vía sobre el bloque será cero si el bloque apenas da la vuelta al aro.)

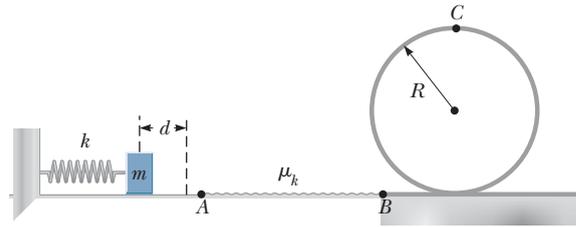


Figura P7.76



El viento ejerce una fuerza sobre las hélices de esta turbina de viento, produciendo un torque que hace que la turbina gire. Este proceso convierte la energía cinética del viento en energía cinética de rotación, que se transforma por la inducción electromagnética en energía eléctrica.

Equilibrio y dinámica rotatorios

8

En el estudio del movimiento lineal, los objetos fueron tratados como partículas sin estructura. No importa *dónde* se aplica una fuerza, sino *si* se aplica o no.

La realidad es que el punto donde se aplica una fuerza sí importa. En fútbol americano, por ejemplo, si el corredor que lleva el balón es golpeado cerca de su diafragma, es posible que continúe corriendo varias yardas antes de caer. Sin embargo, si es golpeado debajo de la línea de la cintura, su centro de masa rotará hacia el suelo y puede caer inmediatamente. El tenis proporciona otro buen ejemplo: si una pelota de tenis se impulsa con una gran fuerza horizontal que actúa a través de su centro de masa, puede viajar una gran distancia antes de caer al suelo, lejos de los límites de la cancha. Por otro lado, la misma fuerza aplicada hacia arriba dando a la bola un efecto de giro puede hacer que ésta caiga en la zona del oponente.

Los conceptos de equilibrio rotatorio y dinámica rotatoria son también muy importantes en otras disciplinas. Por ejemplo, los estudiantes de arquitectura requieren el entendimiento de las fuerzas que actúan en la construcción de edificios, y los estudiantes de biología, de la comprensión de cómo trabajan las fuerzas entre los huesos, músculos y articulaciones. Estas fuerzas crean torques que nos dicen cómo se afecta el equilibrio de los objetos y su rotación.

Veremos que un objeto permanece en un estado de movimiento rotatorio uniforme bajo la acción de un torque neto. Este principio es equivalente a la primera ley de Newton. Además, la aceleración angular de un objeto es proporcional al torque neto que actúa sobre él, cosa análoga a la segunda ley de Newton. Un torque neto actuando sobre un objeto provoca un cambio de su energía rotatoria.

Finalmente, un torque aplicado a un objeto en un tiempo dado puede cambiar su momento angular. En la ausencia de torques externos, se conserva el momento angular, lo que es una propiedad que explica algunas de las misteriosas y formidables propiedades de los pulsares —remanentes de explosiones de supernovas que rotan con una rapidez ecuatorial muy próxima a la de la luz.

- 8.1** Torque
- 8.2** Torque y las dos condiciones de equilibrio
- 8.3** Centro de gravedad
- 8.4** Ejemplos de objetos en equilibrio
- 8.5** Relación entre el torque y la aceleración angular
- 8.6** Energía cinética rotatoria
- 8.7** Momento angular

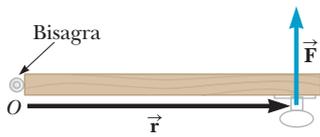


Figura 8.1 Vista superior de una puerta con bisagra en el punto O , con una fuerza aplicada en dirección perpendicular a la puerta.

8.1 Torque

Las fuerzas causan aceleraciones; los *torques* provocan aceleraciones angulares. Sin embargo, hay una definitiva relación entre ambos conceptos.

La figura 8.1 muestra una puerta, vista desde arriba, con una bisagra en el punto O . Desde esta perspectiva, la puerta gira libremente alrededor de un eje perpendicular a la página y que pasa por el punto O . Si se aplica una fuerza \vec{F} , hay tres factores que determinan la efectividad de la fuerza en la apertura de la puerta: la *magnitud* de la fuerza, la *posición* de la fuerza y el *ángulo* en el que es aplicada.

Por simplicidad, restringiremos nuestra discusión a posiciones y fuerzas en el plano. Cuando la fuerza \vec{F} es perpendicular al borde exterior de la puerta, figura 8.1, la puerta gira en sentido contrario a las manecillas del reloj con aceleración angular constante. La misma fuerza perpendicular aplicada en un punto cercano a la bisagra aporta una aceleración angular más pequeña. En general, una gran distancia radial r , entre la fuerza aplicada y el eje de rotación resulta en una gran aceleración angular. Del mismo modo, la aplicación de una gran fuerza provoca una gran aceleración angular. Estas consideraciones motivan la definición de **torque** para los casos especiales de fuerzas perpendiculares al vector de posición:

Definición básica de torque ▶

Sea \vec{F} una fuerza que actúa sobre un objeto y \vec{r} un vector de posición de un punto elegido O al punto de aplicación de la fuerza, con \vec{F} perpendicular a \vec{r} . La magnitud del torque $\vec{\tau}$ ejercido por la fuerza \vec{F} está dada por

$$\tau = rF \tag{8.1}$$

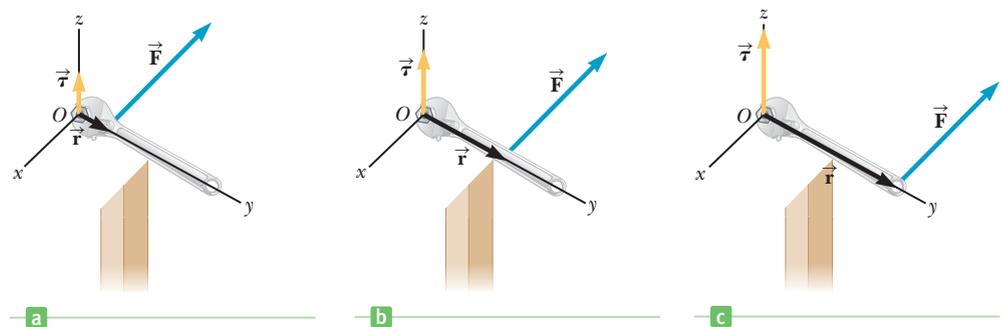
donde r es la longitud del vector de posición y F es la magnitud de la fuerza.

Unidades SI: Newton-metro (N · m)

Los vectores \vec{r} y \vec{F} están en el plano. La figura activa 8.2 muestra cómo el punto de aplicación de la fuerza afecta la magnitud del torque. Como se analiza en detalle conjuntamente con la figura 8.6, el torque $\vec{\tau}$ es entonces perpendicular a este plano. El punto O es usualmente elegido de manera que coincida con el eje alrededor del cual el objeto está rotando, como la bisagra de la puerta o del tubo alrededor del que gira un carrusel (aunque son posibles otras elecciones). En resumen, consideraremos sólo fuerzas que actúan en el plano perpendicular del eje de rotación. Este criterio excluye, por ejemplo, una fuerza con componente ascendente en el sentido de un pasamanos radial de un carrusel, que no puede afectar la rotación de éste.

Bajo estas condiciones, un objeto puede rotar alrededor de un eje elegido en una de las dos direcciones. Por convención, el sentido contrario del giro de las manecillas del reloj se toma como dirección positiva, y negativa en el sentido del giro de las manecillas del reloj. Cuando una fuerza aplicada causa un efecto de rotación en el sentido de las manecillas del reloj, el torque sobre el objeto es negativo. Cuando una fuerza aplicada provoca que un objeto gire en sentido contrario a las manecillas del reloj, el torque sobre el objeto es positivo. Cuando la fuerza causa que el objeto gire en sentido horario, el torque sobre el objeto es negativo. Cuando dos o más torques actúan sobre un objeto en reposo, se suman

Figura activa 8.2 Conforme la fuerza se aplica más hacia afuera de la llave, la magnitud del torque aumenta.



los torques. Si el torque neto no es cero, el objeto empieza a rotar a una razón cada vez mayor. Si el torque neto es cero, la razón de rotación del objeto no tiene cambio. Estas consideraciones conducen a las rotaciones hacia una analogía con la primera ley: **la razón de rotación de un objeto no cambia, a menos que sobre el objeto actúe un torque neto.**

■ EJEMPLO 8.1 Batalla en una puerta giratoria

OBJETIVO Aplicar la definición básica de torque.

PROBLEMA Dos personas de negocios se confrontan al estar intentado usar una puerta giratoria, como se ve en la figura 8.3. La mujer a la izquierda ejerce una fuerza de 625 N perpendicular a la puerta y a 1.20 m del tubo central, mientras el hombre a la derecha ejerce una fuerza de 8.50×10^2 N perpendicular a la puerta y a 0.800 m del tubo central. Encuentre el torque neto sobre la puerta giratoria.

ESTRATEGIA Calcule los torques individuales sobre la puerta usando la definición de torque, ecuación 8.1, y después súmelas para encontrar el torque neto sobre la puerta. La mujer ejerce un torque negativo y el hombre un torque positivo. Las posiciones de aplicación difieren.

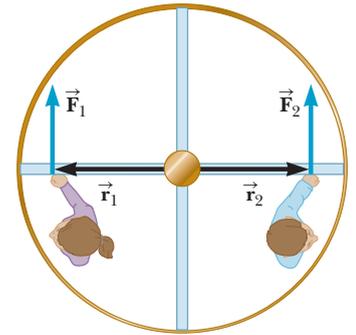


Figura 8.3 (Ejemplo 8.1)

SOLUCIÓN

Calcule el torque ejercido por la mujer. Se debe poner un signo negativo porque la posición de \vec{F}_1 causa una rotación en sentido de las manecillas del reloj:

$$\tau_1 = -r_1 F_1 = -(1.20 \text{ m})(625 \text{ N}) = -7.50 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Calcule el torque ejercido por el hombre, el cual es positivo porque la posición de \vec{F}_2 causa una rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj:

$$\tau_2 = r_2 F_2 = (0.800 \text{ m})(8.50 \times 10^2 \text{ N}) = 6.80 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Sume los torques para encontrar el torque neto sobre la puerta:

$$\tau_{\text{neto}} = \tau_1 + \tau_2 = -7.0 \times 10^1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS Aquí, el resultado negativo significa que el torque neto producirá una rotación en el sentido de las manecillas del reloj.

PREGUNTA 8.1 ¿Qué pasa si la mujer de repente se acerca a 0.400 m del tubo?

EJERCICIO 8.1 Un hombre de negocios entra a la misma puerta giratoria por la derecha, empujando con 576 N de fuerza dirigida perpendicularmente a la puerta y a 0.700 m del tubo que sirve como eje de rotación, mientras un muchacho ejerce una fuerza de 365 N perpendicular a la puerta, a 1.25 m a la izquierda del tubo. Encuentre a) el torque ejercido por cada una de las personas y b) el torque neto sobre la puerta.

RESPUESTAS a) $\tau_{\text{muchacho}} = -456 \text{ N} \cdot \text{m}$, $\tau_{\text{hombre}} = 403 \text{ N} \cdot \text{m}$ b) $\tau_{\text{neto}} = -53 \text{ N} \cdot \text{m}$

La fuerza aplicada no es siempre perpendicular al vector de posición \vec{r} . Suponga que la fuerza \vec{F} es ejercida sobre una puerta lejos del eje, como se ve en la figura 8.4a, digamos, por alguien que agarra la perilla de la puerta y que jala a la derecha. Ejerciendo la fuerza en esta dirección, es imposible abrir la puerta. Sin embargo, si la fuerza aplicada actúa formando un ángulo con la puerta, como en la figura 8.4b, la componente de la fuerza perpendicular a la puerta causará la rotación. Esta figura muestra que la componente de la fuerza perpendicular a la puerta es $F \sin \theta$, donde θ es el ángulo entre el vector de posición \vec{r} y la fuerza \vec{F} . Cuando la fuerza es dirigida a lo largo del eje, $\theta = 0^\circ$, $\sin(0^\circ) = 0$ y $F \sin(0^\circ) = 0$. Cuando la fuerza es dirigida hacia el eje, $\theta = 180^\circ$ y $F \sin(180^\circ) = 0$. El máximo valor absoluto de $F \sin \theta$ es atribuido sólo cuando \vec{F} es perpendicular a \vec{r} —esto es, cuando $\theta = 90^\circ$ o $\theta = 270^\circ$. Estas consideraciones motivan a una definición más general de torque:

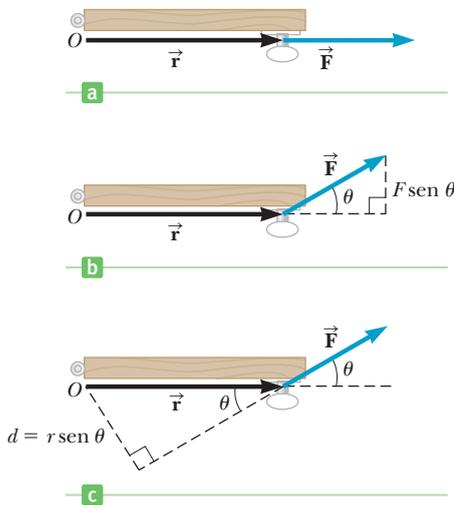


Figura 8.4 a) Una fuerza \vec{F} que actúa en un ángulo $\theta = 0^\circ$ ejerce un torque cero alrededor del pivote O . b) La parte de la fuerza perpendicular a la puerta, $F \text{ sen } \theta$, ejerce un torque $rF \text{ sen } \theta$ alrededor de O . c) Una interpretación alterna del torque es en términos de un *brazo de palanca* $d = r \text{ sen } \theta$.

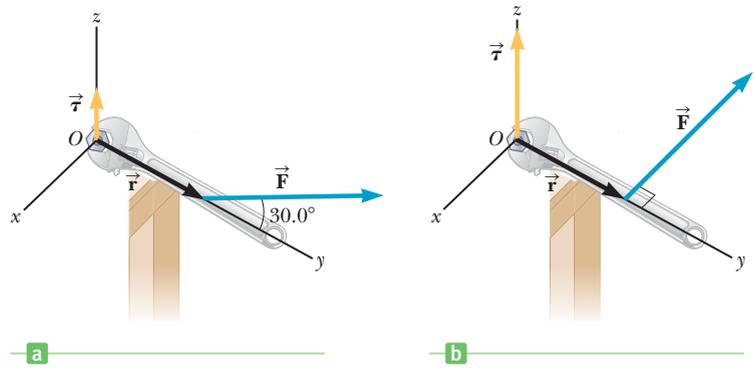


Figura 8.5 Así como el ángulo entre el vector de posición y el vector fuerza aumentan en los incisos a) y b), el torque ejercido por la llave aumenta.

Definición general de torque ▶

Sea \vec{F} una fuerza que actúa sobre un objeto y \vec{r} un vector de posición desde un punto elegido O al punto de aplicación de la fuerza. La magnitud del torque $\vec{\tau}$ ejercido por la fuerza \vec{F} es

$$\tau = rF \text{ sen } \theta \quad [8.2]$$

donde r es la longitud del vector de posición, F la magnitud de la fuerza y θ el ángulo entre \vec{r} y \vec{F} .

Unidades SI: Newton-metro (N · m)

Otra vez, los vectores \vec{r} y \vec{F} están en el plano y, para nuestros propósitos, elegimos el punto O correspondiendo a un eje de rotación perpendicular al plano. La figura 8.5 ilustra cómo la magnitud del torque ejercido por una llave aumenta de la misma manera que el ángulo entre el vector de posición y el vector fuerza se incrementa hasta 90° , donde el torque es máximo.

Un segundo modo de entender el factor $\text{sen } \theta$ es asociándolo con la magnitud r del vector de posición \vec{r} . A la cantidad $d = r \text{ sen } \theta$ se le llama **brazo de palanca**, el cual es la distancia perpendicular desde el eje de rotación a la línea dibujada a lo largo de la dirección de la fuerza. Esta interpretación alterna se ilustra en la figura 8.4c.

Es importante recordar que **el valor de τ depende del eje de rotación elegido**. Los torques se pueden calcular alrededor de cualquier eje, sin importar si hay algún eje de rotación físico real presente. Sin embargo, una vez que se elija el punto, debe ser permanentemente utilizado a través de un problema dado.

El torque es un vector perpendicular al plano determinado por los vectores de posición y de fuerza, como se ilustra en la figura 8.6. La dirección puede ser determinada por la *regla de la mano derecha*:

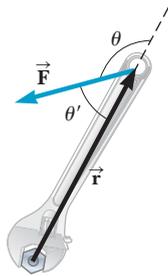


Figura 8.6 La regla de la mano derecha: los dedos de su mano derecha apuntan a lo largo de \vec{r} y se cierran en dirección a \vec{F} . Su pulgar entonces señala en la dirección del torque (fuera de la página, en este caso). Tenga en cuenta que ya sea θ o θ' puede utilizarse en la definición de torque.

1. Apunte sus dedos de la mano derecha en dirección de \vec{r} .
2. Cierre su mano girando los dedos en dirección de \vec{F} .
3. Su pulgar apunta aproximadamente en dirección del torque, en este caso, fuera de la página.

Note las dos opciones de ángulo en la figura 8.6. El ángulo θ es el ángulo real de entre las direcciones de los dos vectores. El ángulo θ' está, literalmente, “entre” los dos vectores.

¿Qué ángulo es el correcto? Puesto que $\sin \theta = \sin (180^\circ - \theta) = \sin (180^\circ) \cos \theta - \sin \theta \cos (180^\circ) = 0 - \sin \theta \cdot (-1) = \sin \theta$, cualquier ángulo es el correcto. Los problemas utilizados en este libro se limitan a objetos que rotan alrededor de un eje perpendicular al plano que contiene a \vec{r} y \vec{F} , así que si estos vectores están en el plano de la página, el torque señalará siempre hacia adentro o hacia afuera de la página, paralelamente al eje de rotación. Si su pulgar derecho apunta en la dirección del torque, su mano se cierra naturalmente en la dirección de la rotación que el torque produciría sobre un objeto en reposo.

■ EJEMPLO 8.2 La puerta giratoria

OBJETIVO Aplicar la definición general de torque.

PROBLEMA a) Un hombre aplica una fuerza de $F = 3.00 \times 10^2 \text{ N}$ en un ángulo de 60.0° a la puerta de la figura 8.7a, a 2.00 m de la bisagra. Encuentre el torque sobre la puerta, eligiendo la posición de la bisagra como el eje de rotación. b) Suponga que una cuña está colocada a 1.50 m de la bisagra en el otro lado de la puerta. ¿Qué fuerza mínima debe ejercer la cuña de modo que la fuerza aplicada en el inciso a) no abra la puerta?

ESTRATEGIA El inciso a) puede ser resuelto sustituyendo en la ecuación general de torsión. En el inciso b) la bisagra, la cuña y todas las fuerzas aplicadas ejercen torques sobre la puerta. La puerta no se abre, así que la suma de los torques debe ser cero, una condición que puede ser usada para encontrar la fuerza de la cuña.

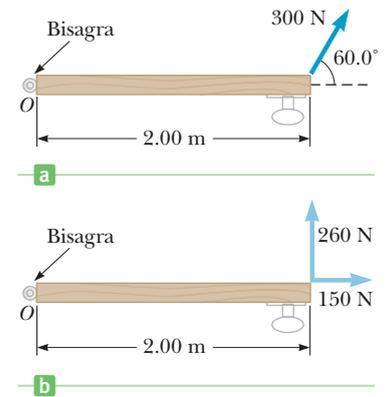


Figura 8.7 (Ejemplo 8.2a) a) Vista superior de una puerta que está siendo empujada por una fuerza de 300 N . b) Componentes de la fuerza de 300 N .

SOLUCIÓN

a) Calcule el torque debido a la fuerza ejercida a 60.0° .

Sustituyendo en la ecuación general del torque:

$$\begin{aligned}\tau_F &= rF \sin \theta = (2.00 \text{ m})(3.00 \times 10^2 \text{ N}) \sin 60.0^\circ \\ &= (2.00 \text{ m})(2.60 \times 10^2 \text{ N}) = 5.20 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

b) Calcule la fuerza ejercida por la cuña sobre el otro lado de la puerta.

La suma del conjunto de todos los torques es igual a cero.

$$\tau_{\text{bisagra}} + \tau_{\text{cuña}} + \tau_F = 0$$

La fuerza de la bisagra no aporta torque porque actúa en el eje ($r = 0$). La fuerza de la cuña actúa con un ángulo de -90.0° opuesta a la componente de 260 N ascendente.

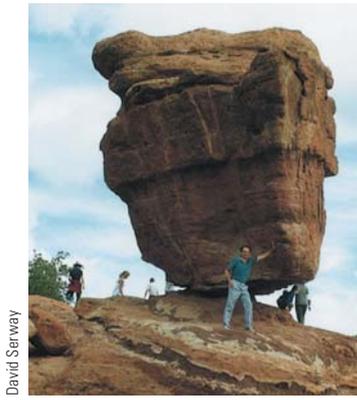
$$\begin{aligned}0 + F_{\text{cuña}}(1.50 \text{ m}) \sin (-90.0^\circ) + 5.20 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{m} &= 0 \\ F_{\text{cuña}} &= 347 \text{ N}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe que el ángulo desde el vector de posición a la fuerza ejercida por la cuña es de -90° . Esto es porque, empezando en el vector de posición, es necesario ir a 90° en dirección de la manecillas del reloj (dirección angular negativa) para obtener el vector fuerza. Midiendo el ángulo en este modo, automáticamente se aporta el signo correcto para el término del torque y es consistente con la regla de la mano derecha. En forma alterna, la magnitud del torque puede calcularse y elegir el signo correcto basándose en la intuición física. La figura 8.7b ilustra el hecho de que la componente de la fuerza perpendicular al brazo de palanca causa el torque.

PREGUNTA 8.2 ¿Qué hay que hacer para que la cuña sea más eficaz para mantener la puerta cerrada, colocarla más cerca de la bisagra o del picaporte?

EJERCICIO 8.2 Un hombre ata un extremo de una fuerte cuerda de 8.00 m de largo al tope de su auto a 0.500 m del suelo y el otro extremo a un tronco vertical de un árbol de altura igual a 3.00 m . Con esto se crea una tensión de $8.00 \times 10^2 \text{ N}$ en la cuerda. Calcule la magnitud del torque sobre el árbol debido a la tensión en la cuerda, con la base de que el árbol actúa como punto de referencia.

RESPUESTA $2.28 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$



Esta enorme roca que permanece equilibrada en el Jardín de los Dioses en Colorado Springs, Colorado, es un ejemplo de equilibrio mecánico.

8.2 Torque y las dos condiciones de equilibrio

Un objeto en equilibrio mecánico debe satisfacer las dos siguientes condiciones:

1. La fuerza externa neta debe ser cero: $\sum \vec{F} = 0$
2. El torque externo neto debe ser cero: $\sum \vec{\tau} = 0$

La primera condición es una consecuencia del equilibrio de traslación: la suma de todas las fuerzas que actúan sobre un objeto debe ser cero, por lo que el objeto no tiene aceleración de traslación $\vec{a} = 0$. La segunda condición es una afirmación del equilibrio rotatorio: la suma de todos los torques sobre el objeto debe ser cero, por lo que el objeto no tiene aceleración angular $\vec{\alpha} = 0$. Para que un objeto esté en equilibrio, debe moverse a través del espacio con una rapidez lineal y rapidez angular constantes.

Debido a que podemos elegir cualquier ubicación para calcular los torques, generalmente es mejor seleccionar un eje que haga por lo menos un torque igual a cero, a fin de simplificar la ecuación de torque neto.

■ EJEMPLO 8.3 Acto de balanceo

OBJETIVO Aplicar las condiciones de equilibrio e ilustre el uso de diferentes ejes para el cálculo del torque neto sobre un objeto.

PROBLEMA Una mujer de masa $m = 55.0$ kg está sentada sobre el lado izquierdo de un balancín —un tablón de longitud $L = 4.00$ m pivotado a la mitad, como se muestra en la figura 8.8. **a)** Primero calcule los torques sobre el balancín en relación con un eje que pasa por el punto pivote. ¿Dónde debería un hombre de masa $M = 75.0$ kg sentarse para que el sistema (balancín más hombre y mujer) esté balanceado? **b)** Encuentre la fuerza normal ejercida por el pivote si el tablón tiene una masa de $m_{\text{ta}} = 12.0$ kg. **c)** Repita el inciso b), pero esta vez calcule los torques en relación con un eje colocado en el extremo izquierdo del tablón.

ESTRATEGIA En el inciso a) aplique la segunda condición de equilibrio $\sum \tau = 0$, calculando los torques alrededor del punto pivote. La masa del tablón del balancín se distribuye uniformemente a cada lado del punto pivote, así que el torque ejercido por la gravedad sobre el tablón, τ_{gravedad} , puede ser calculado como si la masa de todo el tablón se concentrara en el punto pivote. Entonces τ_{gravedad} es cero, al igual que el torque ejercido por el pivote, porque sus brazos de palanca son cero. En el inciso b) debe aplicarse la primera condición de equilibrio, $\sum \vec{F} = 0$. En el inciso c) repita el inciso a) mostrando que la elección de un eje diferente conduce a la misma respuesta.

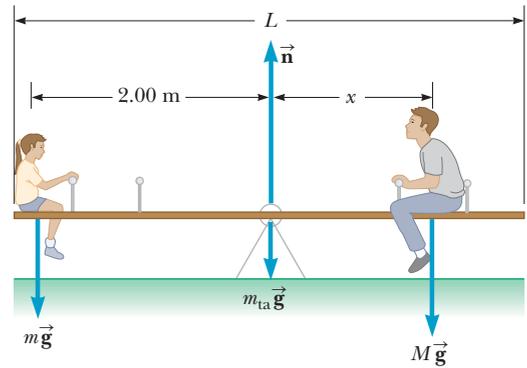


Figura 8.8 (Ejemplo 8.3) El sistema consta de dos personas y un balancín. Debido a que la suma de las fuerzas y la suma de los momentos que actúan sobre el sistema son cero, se dice que el sistema está en equilibrio.

SOLUCIÓN

a) ¿Dónde debería sentarse el hombre para que se equilibre el balancín?

Aplique la segunda condición de equilibrio para el tablón haciendo la suma de los torques igual a cero:

$$\tau_{\text{pivote}} + \tau_{\text{gravedad}} + \tau_{\text{hombre}} + \tau_{\text{mujer}} = 0$$

Los primeros dos torques son cero. Sea x la distancia entre el hombre y el pivote. La mujer está a una distancia $L/2$ del pivote.

$$0 + 0 - Mg_x + mg(L/2) = 0$$

Despeje x de esta ecuación y evalúela:

$$x = \frac{m(L/2)}{M} = \frac{(55.0 \text{ kg})(2.00 \text{ m})}{75.0 \text{ kg}} = 1.47 \text{ m}$$

b) Encuentre la fuerza normal n ejercida por el pivote del balancín.

Aplique la primera condición de equilibrio al tablón, resolviendo la ecuación resultante para obtener la fuerza normal desconocida, n :

$$\begin{aligned} -Mg - mg - m_{\text{ta}}g + n &= 0 \\ n &= (M + m + m_{\text{pl}})g \\ &= (75.0 \text{ kg} + 55.0 \text{ kg} + 12.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ n &= 1.39 \times 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$

c) Repita el inciso a) eligiendo un nuevo eje en el extremo izquierdo del tablón.

Calcule los torques usando este eje y su suma igual a cero. Ahora, de las fuerzas del pivote y de la gravedad sobre el tablón resultan torques diferentes de cero.

Sustituya todas las cantidades conocidas:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{hombre}} + \tau_{\text{mujer}} + \tau_{\text{tablón}} + \tau_{\text{pivote}} &= 0 \\ -Mg(L/2 + x) + mg(0) - m_{\text{ta}}g(L/2) + n(L/2) &= 0 \\ -(75.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m} + x) + 0 \\ &\quad - (12.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m}) + n(2.00 \text{ m}) = 0 \\ -(1.47 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}) - (735 \text{ N})x - (235 \text{ N} \cdot \text{m}) \\ &\quad + (2.00 \text{ m})n = 0 \end{aligned}$$

Despeje x sustituyendo la fuerza normal encontrada en el inciso b):

$$x = 1.46 \text{ m}$$

COMENTARIOS Las respuestas para x en los incisos a) y c) coinciden, excepto por pequeñas discrepancias de redondeo. Esto ilustra cómo, eligiendo un eje distinto, se llega a la misma solución.

PREGUNTA 8.3 ¿Qué sucede si la mujer invierte su posición?

EJERCICIO 8.3 Suponga que un niño de 30.0 kg se sienta a 1.50 m a la izquierda del centro del mismo balancín. Un segundo niño se sienta en el extremo opuesto y el sistema se equilibra. a) Encuentre la masa del segundo niño. b) Encuentre la fuerza normal que actúa sobre el punto pivote.

RESPUESTAS a) 22.5 kg b) 632 N

8.3 Centro de gravedad

En el ejemplo del balancín de la sección anterior, conjeturábamos que el torque, debido a la fuerza de la gravedad en el tablón, era igual a que si el peso de todo el tablón estuviera concentrado en su centro. Esto es una consideración general: para calcular el torque en un cuerpo rígido debido a la fuerza de la gravedad, el peso entero del cuerpo se puede pensar como si estuviera concentrado en un solo punto. El problema entonces se reduce a localizar ese punto. Si el cuerpo es homogéneo (su masa se distribuye de manera uniforme) y simétrico, es generalmente posible conjeturar la localización de ese punto, como en el ejemplo 8.3. De otro modo, es necesario calcular la localización del punto, como se explica en esta sección.

Considere un objeto de forma arbitraria en el plano xy , como el de la figura 8.9. El objeto se divide en una gran cantidad de partículas muy pequeñas de peso m_1g, m_2g, m_3g, \dots con coordenadas $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots$. Si el objeto rota libremente alrededor del origen, cada partícula contribuye con un torque sobre el origen que es igual a su peso multiplicado por su brazo de palanca. Por ejemplo, el torque debido al peso m_1g es m_1gx_1 , y así sucesivamente.

Deseamos localizar el punto de aplicación de una sola fuerza de magnitud $w = F_g = Mg$ (el peso total del objeto), donde el efecto de rotación del objeto es el mismo que el de las partículas individuales. Este punto se llama el **centro de gravedad** del objeto. Igualando el torque ejercido por w en el centro de gravedad con la suma de los torques que actúan sobre cada una de las partículas individuales, se obtiene:

$$(m_1g + m_2g + m_3g + \dots)x_{\text{cg}} = m_1gx_1 + m_2gx_2 + m_3gx_3 + \dots$$

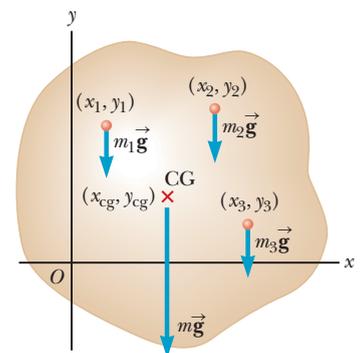


Figura 8.9 El torque gravitacional neto en un objeto es cero si se calcula alrededor del centro de gravedad. El objeto estará balanceado si está apoyado en ese punto (o en cualquier punto a lo largo de una línea vertical sobre o debajo de ese punto).

Tip 8.1 Especifique sus ejes

Elija el eje de rotación y úselo exclusivamente para un problema dado. El eje no necesita corresponder a un eje físico o a un punto pivote. Cualquier punto conveniente servirá.

Suponemos que g es igual en todas partes del objeto (lo cual es cierto para todos los objetos que encontraremos). Entonces en la ecuación siguiente g se cancela, quedando

$$x_{cg} = \frac{m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \quad [8.3a]$$

donde x_{cg} es la componente x del centro de gravedad. Del mismo modo, las coordenadas y y z del centro de gravedad están dadas por

$$y_{cg} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} \quad [8.3b]$$

y

$$z_{cg} = \frac{\sum m_i z_i}{\sum m_i} \quad [8.3c]$$

Estas tres ecuaciones son idénticas a las ecuaciones para un concepto similar llamado **centro de masa**. El centro de masa y el centro de gravedad de un objeto son exactamente iguales cuando g no varía en forma significativa sobre el objeto.

A menudo es posible conjeturar la localización del centro de gravedad. **El centro de gravedad de un cuerpo homogéneo y simétrico debe estar en el eje de simetría.** Por ejemplo, el centro de gravedad de una barra homogénea está situado a mitad del camino entre los extremos de la barra, y el centro de gravedad de una esfera homogénea o de un cubo homogéneo que está en el centro geométrico de los objetos. El centro de gravedad de un objeto de forma irregular, tal como una llave, puede ser determinado experimentalmente suspendiendo la llave a partir de dos diversos puntos arbitrarios (figura 8.10). La llave primero se cuelga del punto A y se dibuja una línea vertical AB (que se puede establecer colgándola en forma vertical) cuando la llave está en equilibrio. Después, la llave se cuelga de otro punto C y se dibuja una segunda línea vertical CD . El centro de gravedad coincide con la intersección de estas dos rectas. De hecho, si la llave se cuelga libremente de cualquier punto, el centro de gravedad está siempre justo debajo del punto de apoyo; la línea vertical a través de ese punto debe pasar por el centro de gravedad.

Varios ejemplos en la sección 8.4 implican objetos homogéneos y simétricos donde los centros de gravedad coinciden con sus centros geométricos. Un objeto rígido en un campo gravitacional uniforme puede equilibrarse con una sola fuerza igual en magnitud al peso del objeto mientras la fuerza se dirija hacia arriba a través del centro de gravedad del objeto.

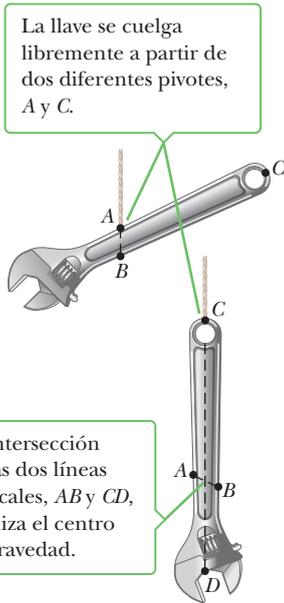


Figura 8.10 Una técnica experimental para determinar el centro de gravedad de una llave.

EJEMPLO 8.4 ¿Dónde está el centro de gravedad?

OBJETIVO Encontrar el centro de gravedad de un sistema de partículas.

PROBLEMA a) Tres objetos están localizadas en un sistema de coordenadas, como se muestra en la figura 8.11a. Encontrar el centro de gravedad. b) ¿Cómo cambia la respuesta si el objeto a la izquierda se desplaza hacia arriba 1.00 m y el objeto a la derecha se desplaza hacia abajo 0.500 m (figura 8.11b)? Considere los objetos como partículas puntuales.

ESTRATEGIA Las coordenadas y y z del centro de gravedad en el inciso a) son cero porque todas las partículas están sobre el eje x . Podemos encontrar las coordenadas en x del centro de gravedad, utilizando la ecuación 8.3a. El inciso b) requiere la ecuación 8.3b.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el centro de gravedad del sistema en la figura 8.11a.

Aplique la ecuación 8.3a al sistema de tres partículas:

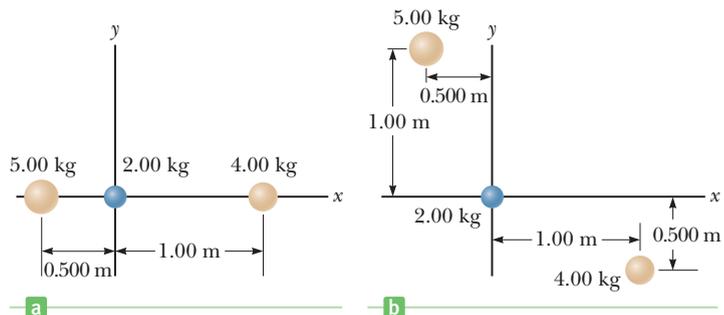


Figura 8.11 (Ejemplo 8.4) Localización del centro de gravedad de un sistema de tres partículas.

$$1) \quad x_{cg} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

Calcule el numerador de la ecuación 1):

$$\begin{aligned}\sum m_i x_i &= m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 \\ &= (5.00 \text{ kg})(-0.500 \text{ m}) + (2.00 \text{ kg})(0 \text{ m}) + (4.00 \text{ kg})(1.00 \text{ m}) \\ &= 1.50 \text{ kg} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Sustituya el denominador, $\sum m_i = 11.0 \text{ kg}$, y el numerador en la ecuación (1).

$$x_{cg} = \frac{1.50 \text{ kg} \cdot \text{m}}{11.0 \text{ kg}} = 0.136 \text{ m}$$

b) ¿Cómo cambia la respuesta si las posiciones de los objetos varía como en la figura 8.11b?

Debido a que las coordenadas en x no han cambiado, la coordenada x del centro de gravedad no varía:

$$x_{cg} = 0.136 \text{ m}$$

Escriba la ecuación 8.3b.

$$y_{cg} = \frac{\sum m_i y_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

Sustituyendo valores:

$$y_{cg} = \frac{(5.00 \text{ kg})(1.00 \text{ m}) + (2.00 \text{ kg})(0 \text{ m}) + (4.00 \text{ kg})(-0.500 \text{ m})}{5.00 \text{ kg} + 2.00 \text{ kg} + 4.00 \text{ kg}}$$

$$y_{cg} = 0.273 \text{ m}$$

COMENTARIOS Tenga en cuenta que trasladar objetos en la dirección y no cambia la coordenada x del centro de gravedad. Los tres componentes del centro de gravedad son independientes de las otras dos coordenadas.

PREGUNTA 8.4 Si se agrega una masa de 1.00 kg a las masas a la izquierda y a la derecha en la figura 8.11a, ¿el centro de masa a) se mueve a la izquierda, b) se mueve a la derecha o c) permanece en la misma posición?

EJERCICIO 8.4 Si una cuarta partícula de masa 2.00 kg es colocada en (0, 0.25 m) en la figura 8.11a, encuentre las coordenadas x y y del centro de gravedad para este sistema de cuatro partículas.

RESPUESTA $x_{cg} = 0.115 \text{ m}$; $y_{cg} = 0.038 \text{ m}$

EJEMPLO 8.5

Localización del centro de gravedad de su compañero BIO

OBJETIVO Utilizar el torque para localizar el centro de gravedad.

PROBLEMA En este ejemplo se muestra cómo localizar el centro de gravedad de una persona. Suponga que su compañero tiene una estatura L de 173 cm (5 pies, 8 pulgadas) y un peso w de 715 N (160 libras). Usted puede determinar la posición del centro de gravedad de su compañero, pidiéndole que se acueste y se estire hacia los extremos de una tabla uniforme apoyada en un extremo en una báscula, según las indicaciones de la figura 8.12. Si el peso de la tabla w_t es 49 N y la lectura F en la báscula es $3.50 \times 10^2 \text{ N}$, encuentre la distancia del centro de gravedad de su compañero a partir del extremo izquierdo de la tabla.

ESTRATEGIA Para encontrar la posición x_{cg} del centro de gravedad, calcule los torques usando un eje que pase por O . No hay torque debido a la fuerza normal \vec{n} ya que su brazo de momento es cero alrededor de un eje que cruza O . Iguale la suma de los torques a cero y despeje a x_{cg} .

SOLUCIÓN

Aplique la segunda condición de equilibrio:

$$\sum \tau_i = \tau_n + \tau_w + \tau_{w_t} + \tau_F = 0$$

Sustituya las expresiones para los torques:

$$0 - wx_{cg} - w_t(L/2) + FL = 0$$

Resuelva para x_{cg} y sustituya los valores conocidos:

$$\begin{aligned}x_{cg} &= \frac{FL - w_t(L/2)}{w} \\ &= \frac{(350 \text{ N})(173 \text{ cm}) - (49 \text{ N})(86.5 \text{ cm})}{715 \text{ N}} = 79 \text{ cm}\end{aligned}$$

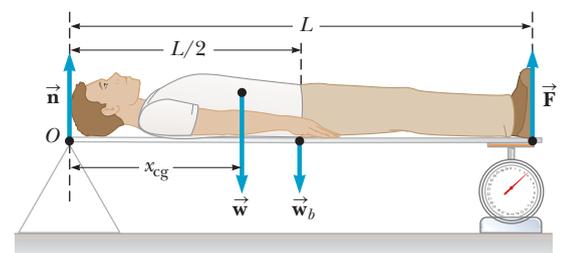


Figura 8.12 (Ejemplo 8.5) Determinación del centro de gravedad de su compañero.

(continúa)

COMENTARIOS La información dada es suficiente sólo para determinar la coordenada x del centro de gravedad. Las otras dos coordenadas pueden estimarse basándose en la simetría del cuerpo.

PREGUNTA 8.5 ¿Qué sucedería si un apoyo se pone exactamente en $x = 79$ cm seguido por el retiro de los apoyos en la cabeza y los pies del sujeto?

EJERCICIO 8.5 Suponga que un cocodrilo de 416 kg y de una longitud 3.5 m está estirado sobre una tabla de la misma longitud que pesa 65 N. Si se apoya la tabla en los extremos como en la figura 8.12 y en la báscula se lee 1880 N, encuentre la componente en x del centro de gravedad del cocodrilo.

RESPUESTA 1.59 m

Tip 8.2 Movimiento rotatorio bajo torque cero

Si un torque neto cero se ejerce sobre un objeto, continuará rotando a velocidad angular constante, no necesariamente cero. Sin embargo, el torque cero implica que la aceleración angular es cero.

8.4 Ejemplos de objetos en equilibrio

Recuerde del capítulo 4 que cuando un objeto se trata como punto geométrico, el equilibrio requiere solamente que la fuerza neta en el objeto sea cero. En este capítulo hemos demostrado que para objetos no puntuales se debe satisfacer una segunda condición para el equilibrio: el torque neto en el objeto debe ser cero. Para resolver problemas que impliquen objetos en equilibrio, se recomienda el siguiente procedimiento.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Objetos en equilibrio

1. **Haga un diagrama del sistema** incluyendo las coordenadas y elija un eje de rotación conveniente para calcular el torque neto en el objeto.
2. **Dibuje un diagrama de cuerpo libre** del objeto de interés mostrando todas las fuerzas externas que actúan en él. Para los sistemas con más de un objeto, dibuje un diagrama *separado* para cada objeto. (La mayoría de los problemas tendrán un solo objeto de interés.)
3. **Aplice $\Sigma \tau_i = 0$, la segunda condición de equilibrio.** Esta condición tiene una sola ecuación para cada objeto de interés. Si el eje de rotación se ha elegido cuidadosamente, la ecuación tiene solamente una incógnita y se puede a menudo resolver inmediatamente.
4. **Aplice la primera condición del equilibrio $\Sigma F_x = 0$ y $\Sigma F_y = 0$.** Esto tiene dos ecuaciones más para el objeto de interés.
5. **Resuelva el sistema de ecuaciones.** Para cada objeto, las dos condiciones de equilibrio tienen tres ecuaciones, generalmente con tres incógnitas. Resuélvalas por sustitución.

EJEMPLO 8.6 Un peso sobre el antebrazo **BIO**

OBJETIVO Aplicar las condiciones de equilibrio al cuerpo humano.

PROBLEMA Una bola de boliche de 50.0 N (11 lb) se sostiene en la mano de una persona con el antebrazo en posición horizontal, como en la figura 8.13a. El músculo del bíceps se une a 0.030 0 m del empalme y la bola está a 0.350 m de éste. Encuentre la fuerza ascendente \vec{F} ejercida por el bíceps sobre el antebrazo (el cúbito) y la fuerza hacia abajo \vec{R} ejercida por el húmero sobre el antebrazo, actuando en el empalme. Desprecie el peso del antebrazo y la leve desviación de la vertical del bíceps.

ESTRATEGIA Las fuerzas que actúan sobre el antebrazo son equivalentes a las que actuarían sobre una barra de longitud 0.350 m, como se muestra en la figura 8.13b. Elija las coordenadas x y y de manera usual como se muestra y el eje en O en el extremo izquierdo (esto completa los pasos 1 y 2). Utilice las condiciones de equilibrio para establecer ecuaciones que involucren a las incógnitas, y resuélvalas.

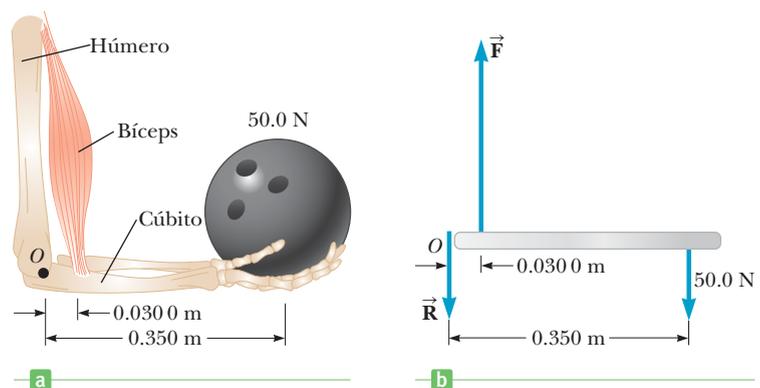


Figura 8.13 (Ejemplo 8.6) a) Un peso sostenido con el antebrazo en posición horizontal. b) Modelo mecánico del sistema.

SOLUCIÓN

Aplique la segunda condición de equilibrio (paso 3) y resuelva para la fuerza ascendente F :

$$\begin{aligned} \sum \tau_i &= \tau_R + \tau_F + \tau_{BB} = 0 \\ R(0) + F(0.030 \text{ m}) - (50.0 \text{ N})(0.350 \text{ m}) &= 0 \\ F &= 583 \text{ N (131 lb)} \end{aligned}$$

Aplique la primera ecuación de equilibrio (paso 4) y resuelva (paso 5) para la fuerza descendente R :

$$\begin{aligned} \sum F_y &= F - R - 50.0 \text{ N} = 0 \\ R &= F - 50.0 \text{ N} = 583 \text{ N} - 50 \text{ N} = 533 \text{ N (120 lb)} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La magnitud de la fuerza suministrada por el bíceps debe ser cerca de 10 veces mayor que la bola que está soportando.

PREGUNTA 8.6 Suponga que los bíceps fueron reatados quirúrgicamente 3 cm hacia la mano de la persona. Si la misma bola de boliche fuera sostenida otra vez en la mano de la personas ¿cómo se afectaría la fuerza requerida del bíceps? Explique.

EJERCICIO 8.6 Suponga que usted desea limitar la fuerza que actúa en el empalme a un valor máximo de $8.00 \times 10^2 \text{ N}$. a) Bajo estas circunstancias, ¿qué peso máximo intentaría usted levantar? b) ¿Qué fuerza aplican sus bíceps mientras levantan este peso?

RESPUESTAS a) 75.0 N b) 875 N

EJEMPLO 8.7 No suba la escalera

OBJETIVO Aplicar las dos condiciones de equilibrio.

PROBLEMA Una escalera uniforme de 10.0 m de largo y que pesa 50.0 N descansa contra una pared vertical lisa como se ve en la figura 8.14a. Si la escalera está a punto de deslizarse cuando forma un ángulo de 50.0° con el suelo, encuentre el coeficiente de fricción estática entre la escalera y el suelo.

ESTRATEGIA La figura 8.14b muestra el diagrama de cuerpo libre para la escalera. La primera condición de equilibrio $\sum \vec{F}_i = 0$ aporta dos ecuaciones con tres incógnitas; las magnitudes de la fuerza de fricción estática f y la fuerza normal n actúan sobre la base de la escalera, y la magnitud de la fuerza de la pared, P , actúa en la parte superior de la escalera. La segunda condición de equilibrio, $\sum \tau_i = 0$, aporta una tercera ecuación (para P), así que es posible hallar las tres cantidades. La definición de fricción estática permite, entonces, el cálculo del coeficiente de fricción estática.

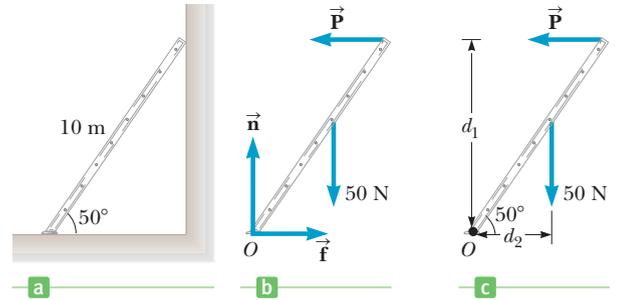


Figura 8.14 (Ejemplo interactivo 8.7) a) Una escalera apoyada en una pared sin fricción. b) Diagrama de cuerpo libre de la escalera. c) Brazos de palanca para las fuerzas de gravedad y \vec{P} .

SOLUCIÓN

Aplique la primera condición de equilibrio a la escalera:

$$\begin{aligned} (1) \quad \sum F_x &= f - P = 0 \rightarrow f = P \\ (2) \quad \sum F_y &= n - 50.0 \text{ N} = 0 \rightarrow n = 50.0 \text{ N} \end{aligned}$$

Aplique la segunda condición de equilibrio calculando los torques en la base de la escalera estando parada, con τ_{grav} para el torque debido al peso de 50.0 N de ésta.

$$\sum \tau_i = \tau_f + \tau_n + \tau_{\text{grav}} + \tau_P = 0$$

Los torques debidos a la fricción y a la fuerza normal son cero en O porque sus brazos de palanca son cero. (Los brazos de palanca pueden verse en la figura 8.14c.)

$$0 + 0 - (50.0 \text{ N})(5.00 \text{ m}) \sin 40.0^\circ + P(10.0 \text{ m}) \sin 50.0^\circ = 0$$

$$P = 21.0 \text{ N}$$

(continúa)

De la ecuación (1) tenemos que $f = P = 21.0 \text{ N}$. La escalera está al borde del deslizamiento, así que escribimos una expresión para la máxima fuerza de fricción estática y resolvemos para μ_s :

$$21.0 \text{ N} = f = f_{s,\text{max}} = \mu_s n = \mu_s (50.0 \text{ N})$$

$$\mu_s = \frac{21.0 \text{ N}}{50.0 \text{ N}} = 0.420$$

COMENTARIOS Observe que los torques fueron calculados en relación con un eje en la base de la escalera, así que solamente \vec{P} y la fuerza de la gravedad contribuyen con torques distintos de cero. Esta elección del eje reduce la complejidad de la ecuación del torque, dando a menudo como resultado una ecuación con sólo una incógnita.

PREGUNTA 8.7 Si un mono de 50.0 N cuelga del peldaño medio, el coeficiente de fricción estática sería ¿a) el doble, b) la mitad o c) no cambia?

EJERCICIO 8.7 Si el coeficiente de fricción estática es 0.360 y la misma escalera forma un ángulo de 60.0° con respecto a la horizontal, ¿hasta dónde, a lo largo de la escalera, puede un pintor de 70.0 kg subir antes de que la escalera comience a deslizarse?

RESPUESTA 6.33 m

EJEMPLO 8.8 Caminar sobre una viga horizontal

OBJETIVO Resolver un problema de equilibrio con torques no perpendiculares.

PROBLEMA Una viga horizontal uniforme de 5.00 m de largo y un peso de $3.00 \times 10^2 \text{ N}$ se fija a la pared mediante una conexión de pivote que le permite girar. Su extremo es sostenido por un cable que forma un ángulo de 53.0° con la horizontal (figura 8.15a). Si una persona que pesa $6.00 \times 10^2 \text{ N}$ está a 1.50 m de la pared, encuentre la magnitud de la tensión \vec{T} en el cable y la fuerza \vec{R} ejercida por la pared sobre la viga.

ESTRATEGIA Vea la figura 8.15a–c (pasos 1 y 2). La segunda condición de equilibrio, $\sum \tau_i = 0$, con torques calculados alrededor del pivote, puede ser resuelto por la tensión T en el cable. La primera condición de equilibrio, $\sum \vec{F}_i = 0$, da dos ecuaciones y dos incógnitas para las dos componentes de la fuerza ejercida por la pared, R_x y R_y .

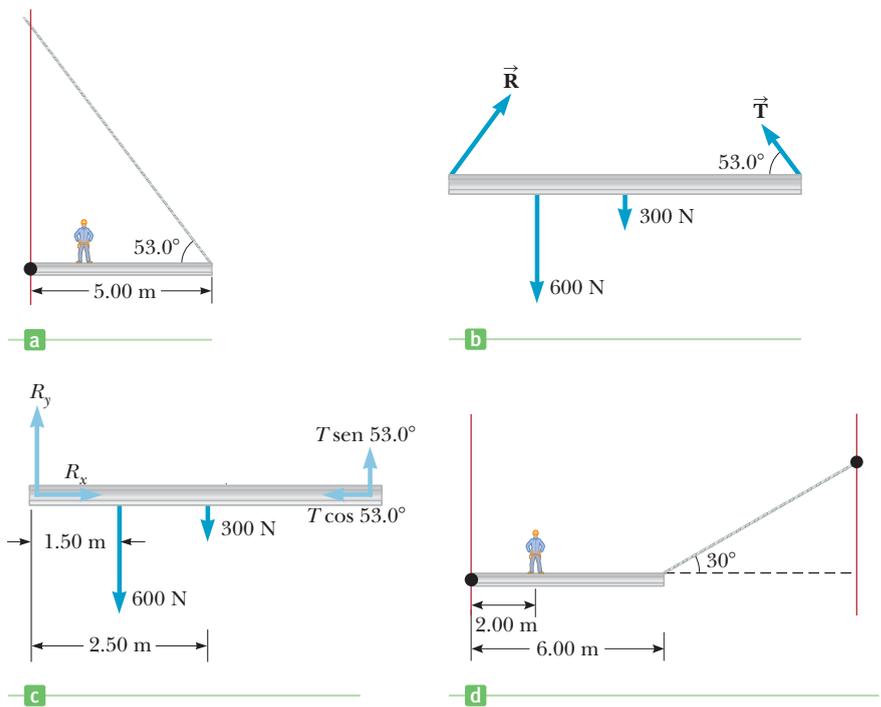


Figura 8.15 (Ejemplo 8.8) a) Viga uniforme sujeta a una pared y sostenida por cable. b) Diagrama de la fuerza de la viga. c) Forma del componente del diagrama de fuerzas. d) (Ejercicio 8.8)

SOLUCIÓN

De la figura 8.15, las fuerzas que causan torques son la pared fuerza \vec{R} , las fuerzas de gravedad de la viga y el hombre, w_V y w_H , y la fuerza de tensión \vec{T} . Aplique la condición de equilibrio rotatorio (paso 3):

$$\sum \tau_i = \tau_R + \tau_V + \tau_H + \tau_T = 0$$

Calcule los torques alrededor del pivote en O , por lo que $\tau_R = 0$ (momento de brazo cero). El torque debido al peso de la viga actúa en el centro de gravedad de aquella.

$$\sum \tau_i = 0 - w_V(L/2) - w_H(1.50 \text{ m}) + TL \text{ sen } (53^\circ) = 0$$

Sustituya $L = 5.00$ m y los pesos, y resuelva para T :

$$-(3.00 \times 10^2 \text{ N})(2.50 \text{ m}) - (6.00 \times 10^2 \text{ N})(1.50 \text{ m}) + (T \text{ sen } 53.0^\circ)(5.00 \text{ m}) = 0$$

$$T = 413 \text{ N}$$

Ahora aplique la primera condición de equilibrio para la viga (paso 4):

$$1) \sum F_x = R_x - T \cos 53.0^\circ = 0$$

$$2) \sum F_y = R_y - w_V - w_H + T \text{ sen } 53.0^\circ = 0$$

Sustituyendo el valor de T encontrado en el paso anterior y los pesos, obtenga los componentes de \vec{R} (paso 5):

$$R_x = 249 \text{ N} \quad R_y = 5.70 \times 10^2 \text{ N}$$

COMENTARIOS Aunque seleccionáramos otros ejes para la ecuación del torque, la solución sería la misma. Por ejemplo, si el eje pasa por el centro de gravedad de la viga, la ecuación de par involucraría T y R_y . Junto con las ecuaciones (1) y (2), sin embargo, las incógnitas todavía se podrían encontrar, un buen ejercicio. En el ejemplos 8.6 y el ejemplo 8.8, observe que los pasos de la estrategia para la solución de problemas puede llevarse a cabo en el orden recomendado.

PREGUNTA 8.8 ¿Qué sucede con la tensión en el cable si el hombre en la figura 8.15a se aleja de la pared?

EJERCICIO 8.8 Una persona con una masa 55.0 kg se encuentra 2.00 m de distancia de la pared en una viga uniforme de 6.00 m, como se muestra en la figura 8.15d. La masa de la viga es de 40.0 kg. Encuentre las componentes de la fuerza del pivote y la tensión en el cable.

RESPUESTAS $T = 751 \text{ N}$, $R_x = -6.50 \times 10^2 \text{ N}$, $R_y = 556 \text{ N}$

8.5 Relación entre el torque y la aceleración angular

Cuando un objeto rígido está sujeto a un torque neto, experimenta una aceleración angular directamente proporcional al torque neto. Este resultado, que es análogo a la segunda ley de Newton, se obtiene como sigue.

El sistema de la figura 8.16 consiste en un objeto de masa m unido a una barra muy ligera de longitud r . La barra gira alrededor del punto O , y su movimiento de rotación se confina a una tabla *horizontal* sin fricción. Suponga que una fuerza F_t actúa perpendicularmente a la barra y, por lo tanto, es tangente a la trayectoria circular del objeto. Debido a que no hay fuerza opuesta a la fuerza tangencial, el objeto experimenta una aceleración tangencial a_t de acuerdo con la segunda ley del Newton:

$$F_t = ma_t$$

Multiplicando ambos lados de esta ecuación por r :

$$F_t r = mra_t$$

Sustituyendo la ecuación $a_t = r\alpha$ que relaciona las aceleraciones angular y tangencial en la anterior ecuación, se obtiene:

$$F_t r = mr^2\alpha \tag{8.4}$$

El lado izquierdo de la ecuación 8.4 es el torque que actúa sobre el objeto en relación con su eje de rotación, así que se puede describir como:

$$\tau = mr^2\alpha \tag{8.5}$$

La ecuación 8.5 demuestra que el torque sobre el objeto es proporcional a la aceleración angular de éste, donde la constante de proporcionalidad mr^2 se reconoce como el **momento de inercia** del objeto de masa m . (Debido a que la barra es muy ligera, su momento de inercia puede despreciarse.)

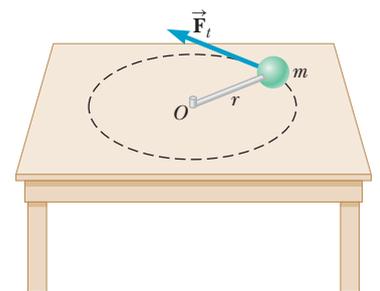
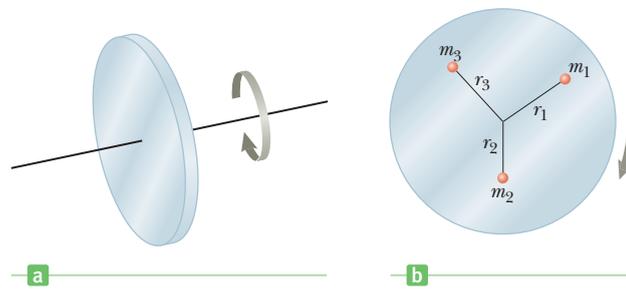


Figura 8.16 Un objeto de masa m unido a una barra ligera de longitud r se mueve en una trayectoria circular en una superficie horizontal sin fricción mientras una fuerza tangencial \vec{F} actúa sobre él.

Figura 8.17 a) Un disco sólido que rota alrededor de su eje. b) El disco consiste en muchas partículas, todas con la misma aceleración angular.



Examen rápido

8.1 Usando un destornillador, usted intenta quitar un tornillo de un mueble, pero no puede conseguir darle vuelta. Para aumentar las posibilidades de éxito, usted debe utilizar un destornillador a) más largo, b) más corto, c) con una manija más angosta o d) con una manija más ancha.

Torque sobre un objeto en rotación

Considere un disco sólido que rota sobre su eje como se ve en la figura 8.17a. El disco consiste en muchas partículas a varias distancias del eje de la rotación. (Véase la figura 8.17b.) El torque en cada una de estas partículas está dado por la ecuación 8.5. El torque *neto* sobre el disco está dado por la suma de los torques individuales en todas las partículas:

$$\sum \tau = (\sum mr^2)\alpha \tag{8.6}$$

Debido a que el disco es rígido, todas sus partículas tienen la *misma* aceleración angular, así que α no está involucrada en la suma. Si las masas y las distancias de las partículas se etiquetan con subíndices como en la figura 8.17b, entonces

$$\sum mr^2 = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + m_3r_3^2 + \dots$$

Esta cantidad es el momento de inercia, I , de todo el cuerpo:

Momento de inercia ►

$$I \equiv \sum mr^2 \tag{8.7}$$

El momento de inercia tiene unidades SI de $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. Utilizando este resultado en la ecuación 8.6, vemos que el torque neto sobre un cuerpo rígido en rotación alrededor de un eje fijo está dado por:

Análogo rotatorio a la ►
segunda ley de Newton

$$\sum \tau = I\alpha \tag{8.8}$$

La ecuación 8.8 indica que **la aceleración angular de un objeto rígido extendido es proporcional al torque neto que actúa sobre él**. Esta ecuación es el análogo rotatorio de la segunda ley de Newton del movimiento, con el torque sustituyendo a la fuerza, el momento de inercia que sustituye a la masa y la aceleración angular, a la aceleración lineal. Aunque el momento de inercia de un objeto se relaciona con su masa, hay una importante diferencia entre ellos. La masa m depende solamente de la cantidad de materia en un objeto, mientras que el momento de la inercia, I , depende de la cantidad de materia y de su distribución (con el término r^2 en $I = \sum mr^2$) en el objeto rígido.

Examen rápido

8.2 Un torque neto constante es aplicado a un objeto. ¿Cuál de las siguientes cantidades no es constante? a) la aceleración angular, b) la velocidad angular, c) el momento de inercia o d) el centro de gravedad.

8.3 Los dos cuerpos rígidos que se muestran en la figura 8.18 tienen la misma masa, radio y rapidez angular. Si se aplica un mismo torque de frenado a cada uno, ¿cuál se detiene primero? a) A b) B c) se necesita más información.

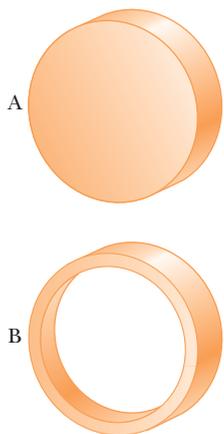


Figura 8.18 (Examen rápido 8.3)

APLICACIÓN

Engranajes de una bicicleta

El sistema de engranes de una bicicleta proporciona un ejemplo fácilmente visible de la relación del torque con la aceleración angular. Considere primero un sistema de engranes de cinco velocidades en el que la cadena impulsora se puede ajustar alrededor de cualquiera de los cinco engranes unidos a la rueda trasera (figura 8.19). Los engranes, con

diversos radios, son concéntricos con la rueda. Cuando el ciclista comienza a pedalear partiendo del reposo, la cadena está unida al engrane más grande. Debido a que tiene el radio más grande, este engrane proporciona el torque más grande al rodillo impulsor. Inicialmente se requiere un gran torque, porque la bicicleta parte del reposo. A medida que la bicicleta se desplaza más rápidamente, la velocidad tangencial de la cadena aumenta llegando a ser demasiado rápida para el ciclista, lo que le dificulta controlar los pedales. La cadena entonces se mueve a un engrane con un radio más pequeño, así que la cadena tiene una velocidad tangencial más pequeña que el ciclista puede mantener más fácilmente. Este engrane no proporciona tanto torque como el primero, así que el ciclista necesita acelerar a una rapidez algo más alta. Este proceso continúa mientras la bicicleta se mueva más y más rápido y el ciclista cambie de posición cada uno de los cinco engranes. El quinto engrane provee el torque más bajo, pero ahora la función principal de ese torque es contrarrestar el torque friccional debido al rodamiento de los neumáticos, que tiende a reducir la rapidez de la bicicleta. El pequeño radio del quinto engrane permite que el ciclista continúe con el movimiento de la cadena empujando los pedales.

Una bicicleta de 15 velocidades tiene la misma estructura de engranaje en el rodillo impulsor, pero tiene tres engranes en el piñón conectado con los pedales. Combinando diversas posiciones de la cadena en los engranes de la parte posterior con los engranes del piñón, se tienen disponibles 15 diversos torques.

Más sobre el momento de inercia

Como hemos visto, un pequeño objeto (o una partícula) tiene un momento de inercia igual a mr^2 en relación con un cierto eje. El momento de inercia de un objeto *compuesto* sobre un cierto eje es justo la suma de los momentos de inercia de los componentes del objeto. Por ejemplo, suponga los giros sucesivos de un bastón de mando como en la figura 8.20. Suponga que el bastón se puede modelar como una barra muy ligera de longitud 2ℓ , con un objeto pesado en cada extremo. (La barra de un bastón de mando verdadero tiene una masa significativa en sus extremos.) Debido a que despreciamos la masa de la barra, el momento de inercia del bastón de mando sobre un eje a través de su centro y perpendicular a su longitud está dado por la ecuación 8.7:

$$I = \sum mr^2$$

Debido a que este sistema consiste en dos objetos con igual masa, equidistantes del eje de rotación, $r = \ell$ para cada objeto, la suma es

$$I = \sum mr^2 = m\ell^2 + m\ell^2 = 2m\ell^2$$

Si la masa de la varilla no se desprecia, tendríamos que incluir su momento de inercia para encontrar el momento de inercia total del bastón.

Precisamos anteriormente que I es la contraparte rotatoria de m . Sin embargo, hay algunas distinciones importantes entre los dos. Por ejemplo, la masa es una característica intrínseca del objeto y que no cambia, mientras que **el momento de inercia de un sistema depende de cómo la masa se distribuye y de la ubicación del eje de rotación**. El ejemplo 8.9 ilustra este punto.



Figura 8.19 Rodillo impulsor y engranajes de una bicicleta.

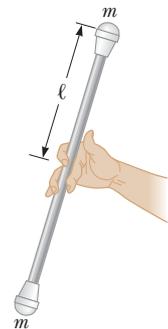


Figura 8.20 Un bastón de mando de longitud 2ℓ y de masa $2m$. (La masa de la barra se desprecia.) El momento de inercia alrededor del eje a través del centro del bastón y perpendicular a su longitud es $2m\ell^2$.

EJEMPLO 8.9 Giros de un bastón de mando

OBJETIVO Calcular un momento de inercia.

PROBLEMA En un afán de ser la estrella en un desfile, un capitán gira un bastón de mando inusual compuesto de cuatro esferas sujetas a los extremos de barras muy ligeras (figura 8.21). Cada barra tiene 1.0 m de largo. **a)** Encuentre el momento de inercia del bastón de mando sobre un eje perpendicular a la página y que pasa a través del punto donde las barras se cruzan. **b)** El capitán intenta hacer girar su extraño bastón de mando sobre el eje OO' , como se muestra en la figura 8.22 en la página 250. Calcule el momento de inercia del bastón de mando sobre este eje.

ESTRATEGIA En la figura 8.21, las cuatro bolas contribuyen al momento de inercia, mientras que en la figura 8.22, con el nuevo

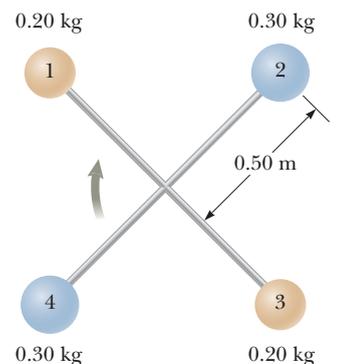


Figura 8.21 (Ejemplo 8.9a) Cuatro objetos conectados a varillas ligeras rotando en el plano de la página.

(continúa)

eje, solamente dos bolas, una a la izquierda y otra a la derecha, contribuyen. Técnicamente, las bolas de abajo y arriba hacen una pequeña contribución porque realmente no son partículas. Sin embargo, su momento de inercia se puede despreciar porque el radio de las esferas es mucho más pequeño que el radio formado por las barras.

SOLUCIÓN

a) Calcule el momento de inercia del bastón de mando cuando está orientado como se muestra en la figura 8.21.

Aplique la ecuación 8.7, despreciando la masa de las varillas conectadas:

$$\begin{aligned}
 I &= \sum mr^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2 \\
 &= (0.20 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 + (0.30 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 \\
 &\quad + (0.20 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 + (0.30 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 \\
 I &= \mathbf{0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}
 \end{aligned}$$

b) Calcule el momento de inercia del bastón de mando cuando está orientado como se muestra en la figura 8.22.

Aplicando la ecuación 8.7, otra vez, despreciando el radio de las esferas de 0.20 kg.

$$\begin{aligned}
 I &= \sum mr^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2 \\
 &= (0.20 \text{ kg})(0)^2 + (0.30 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 + (0.20 \text{ kg})(0)^2 \\
 &\quad + (0.30 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 \\
 I &= \mathbf{0.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}
 \end{aligned}$$

COMENTARIOS El momento de inercia es más pequeño en el inciso b) porque en esta configuración las esferas de 0.20 kg están esencialmente colocadas sobre el eje de rotación.

PREGUNTA 8.9 Si una de las barras se alarga, ¿cuál causaría un cambio más grande en el momento de inercia? La varilla que conecta a las barras una y tres o la varilla que conecta las bolas dos y cuatro.

EJERCICIO 8.9 Otro extraño bastón de mando es creado tomando cuatro bolas idénticas, cada una con masa 0.300 kg y fijándolas como antes, salvo que una de las barras tiene una longitud de 1.00 m, y la otra tiene una longitud de 1.50 m. Calcule el momento de inercia de este bastón de mando: a) cuando está orientado como en la figura 8.19; b) cuando está orientado como en la figura 8.22, con la vertical más corta de la barra y c) cuando está orientado como en la figura 8.22, pero con una barra vertical más larga.

RESPUESTAS a) 0.488 kg · m² b) 0.338 kg · m² c) 0.150 kg · m²

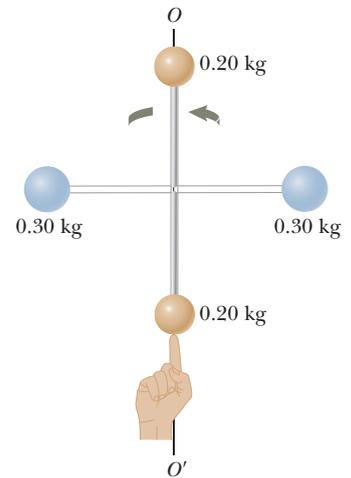


Figura 8.22 (Ejemplo 8.9b) Un bastón doble rotando alrededor del eje OO'.

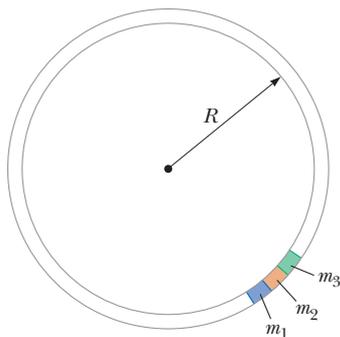


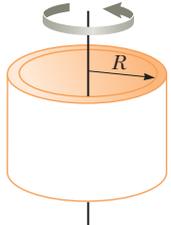
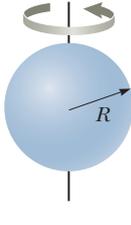
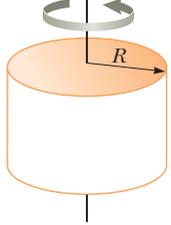
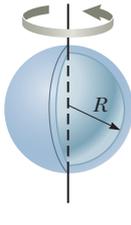
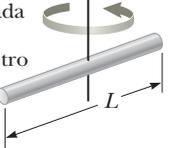
Figura 8.23 Un aro uniforme se puede dividir en una gran cantidad de segmentos pequeños equidistantes del centro.

Cálculo de momentos de inercia para objetos extendidos

El método usado para calcular momentos de inercia en el ejemplo 8.9 es simple cuando solamente algunos objetos pequeños rotan sobre un eje. Cuando el objeto es extendido, tal como una esfera, un cilindro o un cono, se requieren a menudo técnicas del cálculo, a menos que una cierta simetría esté presente. Uno de los objetos extendidos que favorecen una solución simple es un aro que rota sobre un eje perpendicular a su plano y que pasa a través de su centro, como se indica en la figura 8.23. (La rueda de la bicicleta, por ejemplo, cabría aproximadamente en esta categoría.)

Para evaluar el momento de inercia del aro, podemos todavía utilizar la ecuación $I = \sum mr^2$ e imaginarse que la masa del aro M está dividida en n pequeños segmentos de masas $m_1, m_2, m_3, \dots, m_n$, como se ve en la figura 8.23, con $M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$. Este enfoque es justo una extensión del problema del bastón de mando descrito en los ejemplos precedentes, salvo que ahora tenemos una gran cantidad de masas pequeñas en rotación, en vez de solamente cuatro.

Tabla 8.1 Momentos de inercia para varios objetos rígidos de composición uniforme

Aro o cáscara cilíndrica delgada $I = MR^2$		Esfera sólida $I = \frac{2}{5} MR^2$	
Cilindro sólido o disco $I = \frac{1}{2} MR^2$		Cáscara esférica delgada $I = \frac{2}{3} MR^2$	
Varilla larga y delgada con eje de rotación que pasa por el centro $I = \frac{1}{12} ML^2$		Varilla larga y delgada con eje de rotación que pasa por un extremo $I = \frac{1}{3} ML^2$	

Podemos expresar I como la suma:

$$I = \sum mr^2 = m_1r_1^2 + m_2r_2^2 + m_3r_3^2 + \dots + m_nr_n^2$$

Todos los segmentos alrededor del aro están a la *misma distancia* R del eje de rotación, así que podemos usar subíndices en las distancias y factorizar R^2 para obtener

$$I = (m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n)R^2 = MR^2 \quad [8.9]$$

Esta expresión se puede utilizar para el momento de inercia de cualquier objeto de forma anular, que rota sobre un eje a través de su centro y perpendicular a su plano. Observe que el resultado es estrictamente válido solamente si el grueso del anillo es pequeño en relación con su radio interno.

El aro que seleccionamos como ejemplo es único en el sentido que podemos encontrar una expresión para su momento de inercia usando sólo álgebra simple. Desafortunadamente, para objetos más extendidos el cálculo es mucho más difícil porque no todos los elementos de masa están situados a la misma distancia del eje, así que se requieren los métodos del cálculo integral. Los momentos de inercia para algunas otras formas comunes se dan sin demostración en la tabla 8.1. Usted puede utilizar esta tabla cuando necesite determinar el momento de inercia de un cuerpo que tiene las formas mencionadas.

Si los elementos de masa de un objeto están distribuidos paralelamente al eje de rotación, el momento de inercia del objeto no cambia. Por lo tanto, la expresión $I = MR^2$ puede utilizarse igualmente bien para encontrar el momento axial de inercia de un aro bordeado o de una gran tubería de alcantarillado. Asimismo, una puerta que gira sobre sus bisagras se describe por la misma expresión de momento de inercia, como la que está en la tabla para una larga y fina barra que rota alrededor de un eje en su extremo.

Tip 8.3 No hay un solo momento de inercia

El momento de inercia es análogo a la masa, pero hay diferencias. La masa es una propiedad inherente al objeto. El momento de inercia de un objeto depende de la forma del objeto, de su masa y de la elección del eje de rotación.

EJEMPLO 8.10 Calentando el brazo

OBJETIVO Encontrar un momento de inercia y aplicar la analogía rotatoria con la segunda ley de Newton.

PROBLEMA Un jugador de béisbol calienta su brazo antes de lanzar en un juego una pelota de 0.150 kg, usando solamente la rotación de su antebrazo para acelerarla (figura 8.24). El antebrazo tiene una masa de 1.50 kg y una longitud de 0.350 m. La bola parte del reposo y se lanza con una rapidez de 30.0 m/s en 0.300 s. **a)** Encuentre la aceleración angular constante del brazo y de la pelota. **b)** Calcule el momento de inercia del sistema que consiste en el antebrazo y la bola. **c)** Encuentre el torque ejercido en el sistema que resulta en la aceleración angular encontrada en el inciso a).

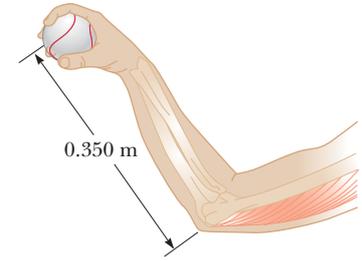


Figura 8.24 (Ejemplo 8.10) Una bola lanzada por un lanzador. El antebrazo se utiliza para acelerar la bola.

ESTRATEGIA La aceleración angular puede encontrarse con las ecuaciones de la cinemática rotatoria, mientras que el momento de inercia del sistema puede obtener sumando los momentos separados de inercia de la pelota y del antebrazo. Multiplicando estos dos resultados, se obtiene el torque.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la aceleración angular de la pelota.

La aceleración angular es constante, así que utilice la ecuación de la velocidad angular con $\omega_i = 0$:

$$\omega = \omega_i + \alpha t \rightarrow \alpha = \frac{\omega}{t}$$

La pelota acelera a lo largo de un arco circular con radio igual a la longitud del antebrazo. Despeje ω de $v = r\omega$ y sustituya:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{v}{rt} = \frac{30.0 \text{ m/s}}{(0.350 \text{ m})(0.300 \text{ s})} = 286 \text{ rad/s}^2$$

b) Encuentre el momento de inercia del sistema antebrazo-pelota.

Encuentre el momento de inercia de la pelota en relación con un eje que pasa por el codo, perpendicularmente al brazo:

$$I_{\text{pelota}} = mr^2 = (0.150 \text{ kg})(0.350 \text{ m})^2 = 1.84 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Obtenga el momento de inercia del antebrazo, modelado como una varilla, alrededor de un eje que pasa por un extremo, consultando con la tabla 8.1:

$$I_{\text{antebrazo}} = \frac{1}{3} ML^2 = \frac{1}{3}(1.50 \text{ kg})(0.350 \text{ m})^2 = 6.13 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Suma los momentos individuales de inercia del sistema (pelota-antebrazo)

$$I_{\text{sistema}} = I_{\text{pelota}} + I_{\text{antebrazo}} = 7.97 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

c) Encuentre el torque ejercido sobre el sistema.

Aplicando la ecuación 8.8 y usando los resultados de los incisos a) y b):

$$\tau = I_{\text{sistema}}\alpha = (7.97 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(286 \text{ rad/s}^2) = 22.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS Observe que tener un antebrazo largo puede aumentar notablemente el torque y, por lo tanto, la aceleración de la bola. Ésta es una razón por la que es ventajoso que un lanzador sea alto ya que el *swing* es proporcionalmente más largo. Una ventaja similar hay en el tenis, donde jugadores más altos pueden entregar generalmente servicios más rápidos.

PREGUNTA 8.10 ¿Por qué los lanzadores dan deliberadamente un paso adelante al efectuar un lanzamiento? ¿Por qué la sincronización es tan importante?

EJERCICIO 8.10 Una catapulta con un brazo radial de 4.00 m de largo recorre un cuarto de círculo para acelerar una bola de masa 20.0 kg. La bola abandona el aparato a 45.0 m/s. Si la masa del brazo es 25.0 kg y la aceleración es constante, halle a) la aceleración angular, b) el momento de inercia del brazo y de la bola y c) el torque neto ejercido sobre la bola y el brazo.

Sugerencia: Utilice la ecuación de la cinemática rotatoria independiente del tiempo para encontrar la aceleración angular, en vez de la ecuación de la velocidad angular.

RESPUESTAS a) 40.3 rad/s² b) 453 kg · m² c) 1.83 × 10⁴ N · m

■ EJEMPLO 8.11 El descenso de un cubo

OBJETIVO Combinar la segunda ley de Newton con su análoga rotatoria.

PROBLEMA Un carrete sólido cilíndrico sin fricción, de masa $M = 3.00$ kg y radio $R = 0.400$ m, se utiliza para sacar agua de un pozo (figura 8.25a). Un cubo de masa $m = 2.00$ kg se ata a una cuerda que se enrolla alrededor del cilindro. **a)** Encuentre la tensión T en la cuerda y la aceleración a del balde. **b)** Si el balde parte del reposo desde la boca del pozo y cae durante 3.00 s antes de golpear el agua, ¿qué distancia recorre en la caída?

ESTRATEGIA Este problema involucra tres ecuaciones y tres incógnitas. Las tres ecuaciones son la segunda ley de Newton aplicada al balde, $ma = \Sigma F_i$; la versión rotatoria de la segunda ley aplicada al cilindro, $I\alpha = \Sigma \tau_i$, y la relación entre las aceleraciones lineal y angular, $a = r\alpha$, que conecta las dinámicas del balde y del cilindro. Las tres incógnitas son la aceleración a del balde, la aceleración angular α del cilindro y la tensión T en la cuerda. Acomode los términos de las tres ecuaciones y resuélvalas para las tres incógnitas utilizando técnicas de sustitución. El inciso b) es una revisión de cinemática.

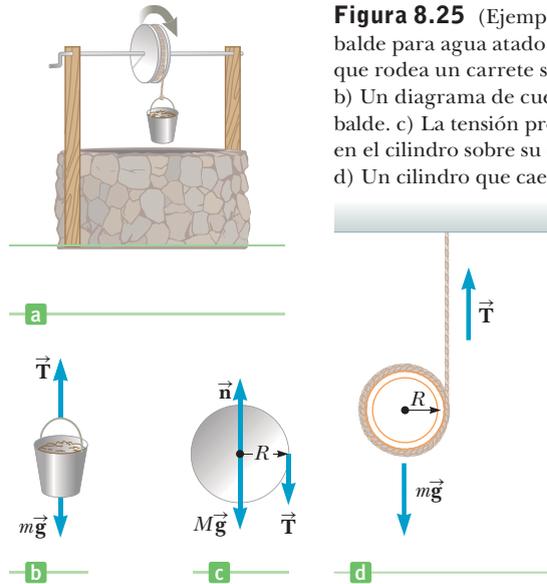


Figura 8.25 (Ejemplo 8.11) a) Un balde para agua atado a una cuerda que rodea un carrete sin fricción. b) Un diagrama de cuerpo libre para el balde. c) La tensión produce un torque en el cilindro sobre su eje de rotación. d) Un cilindro que cae (ejercicio 8.11).

SOLUCIÓN

a) Encuentre la tensión en la cuerda y la aceleración del balde.

Aplice la segunda ley de Newton al balde de la figura 8.25b. Hay dos fuerzas: la tensión \vec{T} que actúa hacia arriba y la de gravedad $m\vec{g}$ que actúa hacia abajo.

Aplice $\tau = I\alpha$ al cilindro de la figura 8.25c:

Observe que la aceleración angular está en sentido de las manecillas del reloj, por lo que es negativa. Las fuerzas normal y de gravedad tienen brazo de palanca cero, por lo que no contribuyen al torque.

Despeje T y sustituya $\alpha = a/R$ (observe que tanto a como α son negativos):

Sustituya la expresión para T en la ecuación 3) en la ecuación 1) y despeje la aceleración:

Sustituya los valores de m , M y g para obtener a ; después sustituya a en la ecuación 3) para obtener T :

b) Encuentre la distancia de caída del balde en 3.00 s.

Aplicando la ecuación cinemática del desplazamiento con aceleración constante, con $t = 3.00$ s y $v_0 = 0$:

$$1) \quad ma = -mg + T$$

$$\Sigma \tau = I\alpha = \frac{1}{2}MR^2\alpha \quad (\text{cilindro sólido})$$

$$2) \quad -TR = \frac{1}{2}MR^2\alpha$$

$$3) \quad T = -\frac{1}{2}MR\alpha = -\frac{1}{2}Ma$$

$$ma = -mg - \frac{1}{2}Ma \quad \rightarrow \quad a = -\frac{mg}{m + \frac{1}{2}M}$$

$$a = -5.60 \text{ m/s}^2 \quad T = 8.40 \text{ N}$$

$$\Delta y = v_0 t + \frac{1}{2}at^2 = -\frac{1}{2}(5.60 \text{ m/s}^2)(3.00 \text{ s})^2 = -25.2 \text{ m}$$

COMENTARIOS El manejo apropiado de los signos es muy importante en estos problemas. Todos los signos deben ser elegidos desde el principio y comprobarlos matemática y físicamente. En este problema, por ejemplo, la aceleración angular α y la aceleración a son negativas, así que hay que aplicarlas en $\alpha = a/R$. Si la cuerda hubiera sido atada de manera que causara una rotación del cilindro en sentido contrario a las manecillas del reloj, el torque habría sido positivo y la relación habría sido $\alpha = -a/R$, con el doble negativo se haría positivo el lado derecho, justo como en el lado izquierdo.

PREGUNTA 8.11 ¿Cómo cambiarían la aceleración y la tensión si la mayor parte de la masa del carrito estuviera en su borde?

EJERCICIO 8.11 Un cilindro hueco de masa 0.100 kg y radio 4.00 cm tiene una cuerda enrollada varias veces alrededor de él, como en la figura 8.25d. Si la cuerda es atada a un soporte rígido y al cilindro, permitiendo la caída a partir del reposo, halle a) la aceleración del cilindro y b) la rapidez del cilindro cuando se ha desenrollado un metro de cuerda.

RESPUESTAS a) -4.90 m/s^2 b) 3.13 m/s

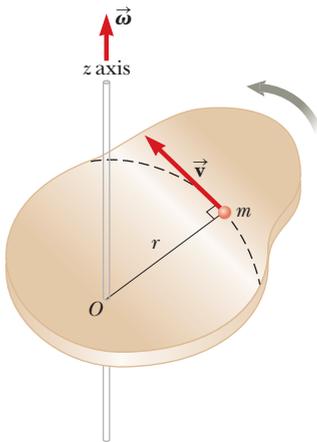


Figura 8.26 Placa rígida girando alrededor del eje z , con una rapidez tangencial v . La energía cinética de una partícula de masa m es $\frac{1}{2}mv^2$. La energía cinética total de la placa es $\frac{1}{2}I\omega^2$.

Conservación de la energía mecánica ▶

Teorema del trabajo y la energía incluyendo la energía rotatoria ▶

8.6 Energía cinética rotatoria

En el capítulo 5 definimos la energía cinética de una partícula que se movía a través del espacio con una rapidez v dada por la cantidad $\frac{1}{2}mv^2$. Análogamente, **un objeto que rota con una rapidez sobre un cierto eje angular ω tiene una energía cinética rotatoria dada por $\frac{1}{2}I\omega^2$** . Para probar esto, considere un objeto en forma de una placa rígida delgada que rota alrededor de un cierto eje perpendicular a su plano, como en la figura 8.26. La placa consiste en muchas partículas pequeñas, cada una de masa m . Todas estas partículas rotan en trayectorias circulares alrededor del eje. Si r es la distancia de una de las partículas al eje de rotación, la rapidez de esa partícula es $v = r\omega$. Debido a que la energía cinética *total* de rotación de la placa es la suma de todas las energías cinéticas asociadas a sus partículas, tenemos

$$EC_r = \sum \left(\frac{1}{2}m\omega^2 \right) = \sum \left(\frac{1}{2}mr^2\omega^2 \right) = \frac{1}{2} \left(\sum mr^2 \right) \omega^2$$

En el último paso, el término ω^2 se factoriza porque es el mismo para cada partícula. Ahora, la cantidad entre paréntesis a la derecha es el momento de inercia de la placa en el límite, cuando las partículas llegan a ser muy pequeñas, así que

$$EC_r = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad [8.10]$$

donde $I = \sum mr^2$ es el momento de inercia de la placa.

Un sistema como una bola de boliche rodando hacia abajo de una rampa está descrito por tres tipos de energía: **la energía potencial gravitacional EP_g , la energía cinética de translación EC_t y la energía cinética rotatoria EC_r** . Todas estas formas de energía, más las energías potenciales de cualquier otra fuerza conservativa, deben incluirse en nuestra ecuación para la conservación de la energía mecánica de un sistema aislado:

$$(EC_t + EC_r + EP)_i = (EC_t + EC_r + EP)_f \quad [8.11]$$

donde i y f se refieren a los valores inicial y final, respectivamente, y EP incluye las energías potenciales de todas las fuerzas conservativas en un problema dado. Esta relación es cierta *sólo* si omitimos las fuerzas disipativas, como la fricción. En este caso, es necesario recurrir a una generalización del teorema del trabajo y la energía:

$$W_{nc} = \Delta EC_t + \Delta EC_r + \Delta EP \quad [8.12]$$

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Métodos de energía y rotación

1. **Elija dos puntos de interés**, uno donde se dispone de toda la información necesaria y el otro donde se desea obtener información.
2. **Identifique** las fuerzas conservativas y las no conservativas que actúan en el sistema que está siendo analizado.
3. **Escriba el teorema del trabajo y la energía**, ecuación 8.12, o la ecuación general 8.11 si todas las fuerzas son conservativas.
4. **Sustituya expresiones generales** para los términos en la ecuación.
5. **Utilice $v = r\omega$** para eliminar ω o v de la ecuación.
6. **Resuelva** para la incógnita.

EJEMPLO 8.12 Bola rodando hacia abajo de una pendiente

OBJETIVO Combinar las energías gravitacional, de traslación y rotatoria.

PROBLEMA Una bola de masa M y radio R parte del reposo a una altura de 2.00 m y rueda abajo por una pendiente de 30.0° , como se muestra en la figura 8.27. ¿Cuál es la rapidez lineal de la bola cuando abandona el plano inclinado? Suponga que la bola rueda sin deslizarse.

ESTRATEGIA Los dos puntos de interés son las partes superior e inferior del plano inclinado, con la parte baja actuando como el punto donde la energía potencial gravitacional es cero. Mientras la bola rueda hacia abajo de la rampa, la energía potencial gravitacional se convierte en energía cinética de traslación y rotatoria sin disipación, así que la ley de conservación de la energía mecánica puede aplicarse con el uso de la ecuación 8.11.

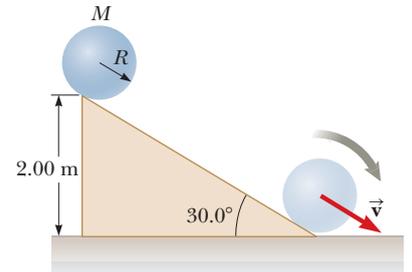


Figura 8.27 (Ejemplo 8.12) Una bola parte del reposo desde la parte superior de un plano inclinado y rueda hacia abajo sin deslizarse.

SOLUCIÓN

Aplique la conservación de la energía con $EP = EP_g$ la energía potencial asociada con la gravedad:

Sustituya las expresiones apropiadas, notando que $(EC_t)_i = (EC_r)_i = 0$ y $(EP_g)_f = 0$ (para obtener el momento de inercia de la bola de la tabla 8.1):

La bola rueda sin deslizarse, así que $R\omega = v$, por lo que puede aplicarse la “condición de no deslizamiento”:

Despeje v observando que M se cancela:

$$(EC_t + EC_r + EP_g)_i = (EC_t + EC_r + EP_g)_f$$

$$0 + 0 + Mgh = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{5}MR^2\right)\omega^2 + 0$$

$$Mgh = \frac{1}{2}Mv^2 + \frac{1}{5}Mv^2 = \frac{7}{10}Mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{10gh}{7}} = \sqrt{\frac{10(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m})}{7}} = 5.29 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Observe la velocidad de traslación es menor que la de un bloque que se desliza por una pendiente sin fricción, $v = \sqrt{2gh}$. Eso es debido a que la energía potencial original debe aumentar la energía cinética de rotación.

PREGUNTA 8.12 Ordene de lo más rápido a lo más lento: a) una bola sólida rueda hacia abajo por una rampa sin deslizarse, b) un cilindro rueda hacia abajo sin deslizarse por la misma rampa, c) un bloque que resbala hacia abajo por una rampa sin fricción con la misma altura y pendiente.

EJERCICIO 8.12 Repita este ejemplo para un cilindro sólido con la misma masa y radio que la bola y suéltelo desde la misma altura. En una carrera entre dos objetos sobre el plano inclinado, ¿cuál gana?

RESPUESTA $v = \sqrt{4gh/3} = 5.11 \text{ m/s}$; la bola ganará.

Examen rápido

- 8.4** Dos esferas, una hueca y una sólida, están rotando con la misma rapidez angular alrededor de un eje a través de sus centros. Ambas esferas tienen la misma masa y radio. ¿Qué esfera tiene la mayor energía cinética rotatoria? a) La esfera hueca. b) La esfera sólida. c) Tienen la misma energía cinética.

EJEMPLO 8.13 Bloques y polea

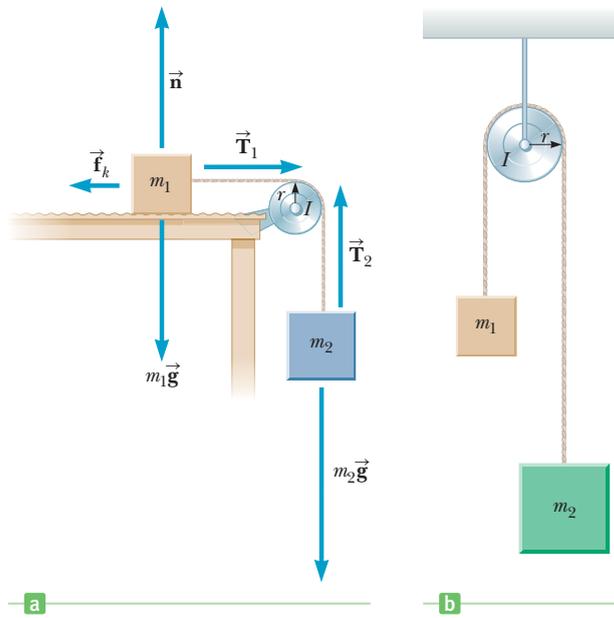
OBJETIVO Resolver un sistema que requiere los conceptos de rotación y del teorema del trabajo y la energía.

PROBLEMA Dos bloques con masas $m_1 = 5.00 \text{ kg}$ y $m_2 = 7.00 \text{ kg}$ están atadas con una cuerda como se muestra en la figura 8.28a (página 256), sobre una polea de masa $M = 2.00 \text{ kg}$. La polea, que gira en un eje sin fricción, es un cilindro hueco con radio 0.0500 m sobre el cual la cuerda se mueve sin deslizarse. La superficie horizontal tiene un coeficiente de fricción cinética igual a 0.350. Encuentre la rapidez del sistema cuando el bloque de masa m_2 tiene una caída de 2.00 m.

ESTRATEGIA Este problema puede resolverse con la extensión del teorema del trabajo y la energía, ecuación 8.12. Si el bloque de masa m_2 cae desde una altura h a una 0, entonces el bloque de masa m_1 se mueve la misma distancia, $\Delta x = h$. Aplique el teorema del trabajo y la energía, despeje v y sustituya. La fricción cinética es la única fuerza no conservativa.

(continúa)

Figura 8.28 a) (Ejemplo 8.13) En ambos casos \vec{T}_1 y \vec{T}_2 ejercen torque sobre la polea. b) (Ejercicio 8.13)



SOLUCIÓN

Aplique el teorema del trabajo y la energía, con $EP = EP_g$ la energía potencial asociada con la gravedad:

Sustituya el trabajo de la fricción para el cambio de energía cinética W_{nc} para los dos bloques, el cambio de energía cinética rotatoria para la polea y el cambio de energía potencial para el segundo bloque:

Sustituya $\Delta x = h$ y escriba I como $(I/r^2)r^2$:

Para un aro, $I = Mr^2$, así que $(I/r^2) = M$. Sustituya esta cantidad y $v = r\omega$:

Despeje v :

Sustituya $m_1 = 5.00$ kg, $m_2 = 7.00$ kg, $M = 2.00$ kg, $g = 9.80$ m/s², $h = 2.00$ m y $m_k = 0.350$:

$$W_{nc} = \Delta EC_t + \Delta EC_r + \Delta EP_g$$

$$-\mu_k n \Delta x = -\mu_k(m_1g) \Delta x = \left(\frac{1}{2}m_1v^2 - 0\right) + \left(\frac{1}{2}m_2v^2 - 0\right) + \left(\frac{1}{2}I\omega^2 - 0\right) + (0 - m_2gh)$$

$$-\mu_k(m_1g)h = \frac{1}{2}m_1v^2 + \frac{1}{2}m_2v^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{I}{r^2}\right)r^2\omega^2 - m_2gh$$

$$-\mu_k(m_1g)h = \frac{1}{2}m_1v^2 + \frac{1}{2}m_2v^2 + \frac{1}{2}Mv^2 - m_2gh$$

$$\begin{aligned} m_2gh - \mu_k(m_1g)h &= \frac{1}{2}m_1v^2 + \frac{1}{2}m_2v^2 + \frac{1}{2}Mv^2 \\ &= \frac{1}{2}(m_1 + m_2 + M)v^2 \\ v &= \sqrt{\frac{2gh(m_2 - \mu_k m_1)}{m_1 + m_2 + M}} \end{aligned}$$

$$v = 3.83 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS En la expresión para la rapidez v , la masa m_1 del primer bloque y la masa M de la polea aparecen en el denominador, reduciendo la rapidez, como debe ser. En el numerador, m_2 es positivo, mientras que el término de la fricción es negativo. Ambas aserciones son razonables porque la fuerza de la gravedad sobre m_2 aumenta la rapidez del sistema, mientras que la fuerza de fricción en m_1 la retarda. Este problema puede también resolverse con la segunda ley de Newton junto con $\tau = I\alpha$; un buen ejercicio.

PREGUNTA 8.13 ¿Cómo afectaría el incremento del radio de la polea la respuesta final? Suponga que los ángulos de los cables no cambian y la masa es la misma que antes.

EJERCICIO 8.13 Dos bloques con masas $m_1 = 2.00$ kg y $m_2 = 9.00$ kg están atados sobre una polea con masa $M = 3.00$ kg, colgándolos como en una máquina de Atwood (figura 8.28b). La polea es un cilindro sólido con radio 0.0500 m, y hay una cierta fricción en el eje. El sistema es liberado partiendo del reposo, y la cuerda se mueve sin deslizarse sobre la polea. Si la masa más grande está viajando a una rapidez de 2.50 m/s cuando ha caído 1.00 m, ¿cuánta energía mecánica se ha perdido debido a la fricción en el árbol de la polea?

RESPUESTA 29.5 J.

8.7 Momento angular

En la figura 8.29, un objeto de masa m rota en una trayectoria circular de radio r , debido a una fuerza neta \vec{F}_{net} . El torque neto resultante sobre el objeto aumenta su rapidez angular de un valor ω_0 a un valor ω en un intervalo de tiempo Δt . Por lo tanto, podemos escribir

$$\sum \tau = I\alpha = I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = I \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \right) = \frac{I\omega - I\omega_0}{\Delta t}$$

Si definimos el producto

$$L \equiv I\omega$$

[8.13]

como el **momento angular** del objeto, entonces podemos escribir

$$\sum \tau = \frac{\text{cambio del momento angular}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{\Delta L}{\Delta t}$$

[8.14]

La ecuación 8.14 es el rotatorio análogo a la segunda ley de Newton, la cual puede ser escrita en la forma $F = \Delta p / \Delta t$ y establece que **el torque neto que actúa sobre un objeto es igual a la razón de cambio del momento angular del objeto en un intervalo**. Recordemos que esta ecuación es paralela al teorema del impulso-cantidad de movimiento.

Cuando el torque neto externo ($\sum \tau$) que actúa sobre un sistema es cero, de la ecuación 8.14 se obtiene que $\Delta L / \Delta t = 0$, que señala que la razón de cambio, al transcurrir el tiempo del momento angular del sistema es cero. Entonces se tiene el siguiente importante resultado:

Sean L_i y L_f los momentos angulares de un sistema en dos diferentes tiempos y suponga que no hay torque externo neto, por lo que $\sum \tau = 0$. Entonces

$$L_i = L_f$$

[8.15]

y el momento angular se *conserva*.

La ecuación 8.15 agrega una tercera ley de la conservación a nuestra lista: **la conservación del momento angular**. Podemos ahora establecer que **la energía mecánica, el momento lineal y el momento angular de un sistema aislado permanecen constantes**.

Si el momento de inercia de un sistema aislado en rotación cambia, la rapidez angular del sistema también cambiará. La conservación del momento angular requiere entonces que:

$$I_i \omega_i = I_f \omega_f \quad \text{si} \quad \sum \tau = 0$$

[8.16]

Observe que la conservación del momento angular se aplica a objetos macroscópicos, como planetas y personas, así como a átomos y moléculas. Hay muchos ejemplos de conservación del momento angular; uno de los más espectaculares son los giros que ejecuta una patinadora artística al final de su acto. En la figura 8.30a (página 258), la patinadora pone los brazos y las piernas cerca de su cuerpo, reduciendo la distancia al eje de rotación y, por lo tanto, también reduciendo su momento de inercia. En la conservación del momento angular, una reducción de su momento de inercia debe aumentar su velocidad angular. Saliendo de la vuelta en la figura 8.30b, ella necesita reducir su velocidad angular, así que extiende sus brazos y las piernas otra vez, aumentando su momento de inercia, y de ese modo retardar su rotación.

De modo semejante, cuando una clavadora desea hacer varios saltos mortales, jala sus manos y pies hacia el tronco de su cuerpo para rotar a una mayor rapidez angular. En este caso, la fuerza externa debido a la gravedad actúa a través de su centro de gravedad y, por lo tanto, no ejerce ningún torque sobre su eje de rotación, así que el momento angular sobre su centro de gravedad se conserva. Por ejemplo, cuando una clavadora desea doblar su rapidez angular, debe reducir su momento de inercia a la mitad de su valor inicial.

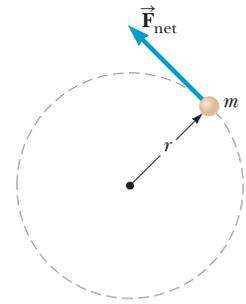


Figura 8.29 Un objeto de masa m rotando en una trayectoria circular, bajo la acción de un torque constante.

◀ Conservación del momento angular

APLICACIÓN

Patinadora artística

APLICACIÓN

Salto mortal en el aire



Acción Plus/Stone/Getty Images

Enrollando su cuerpo, una clavadista disminuye su momento de inercia, aumentando su rapidez angular.

APLICACIÓN

Rotación de una estrella de neutrones

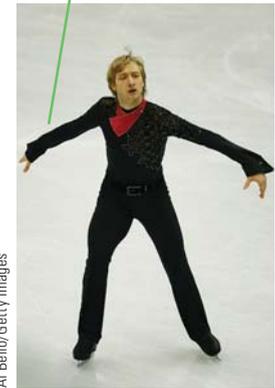
Figura 8.30 Eugeni Plushensko varía su momento de inercia para cambiar su rapidez angular.

Juntando los brazos y las piernas, reduce su momento de inercia y aumenta su rapidez angular (índice de giro).

Al aterrizar extendiendo los brazos y las piernas aumenta su momento de inercia para frenar el giro.



Clive Rose/Getty Images



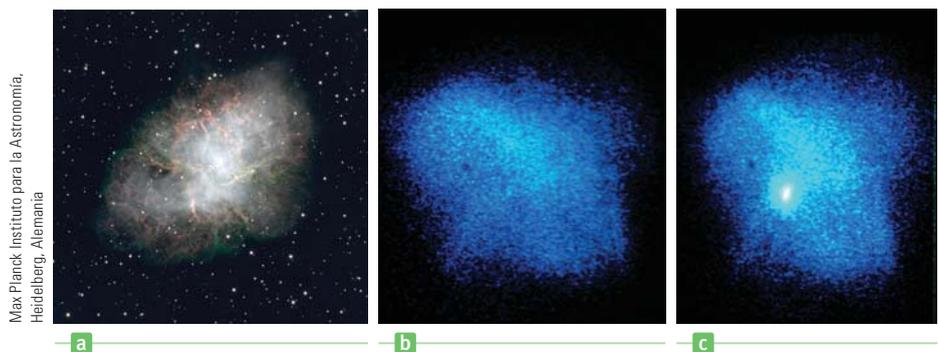
Al Bello/Getty Images

Un interesante ejemplo astrofísico de la conservación del momento angular ocurre cuando una estrella masiva, al final de su curso de vida, utiliza todo su combustible y colapsa bajo la influencia de la fuerza de gravedad, causando un arranque gigantesco de energía llamado supernova. El ejemplo mejor estudiado de un remanente de la explosión de una supernova es la Nebulosa del Cangrejo, una masa caótica de gas expandido (figura 8.31). En una supernova parte de la masa de la estrella se expulsa al espacio, donde con el tiempo se condensa en nuevas estrellas y planetas. La mayor parte de lo que deja detrás usualmente se colapsa en una **estrella de neutrones**, una esfera de materia extremadamente densa con un diámetro de cerca de 10 kilómetros, reducida en gran medida del diámetro de 10^6 km de la estrella original que contiene una gran fracción de la masa de la estrella original. En una estrella de neutrones, las presiones llegan a ser tan grandes que los electrones atómicos se combinan con los protones, resultando neutrones. Conformando el momento de inercia del sistema disminuye durante el colapso, la rapidez rotatoria de la estrella aumenta. Más de 700 estrellas de neutrones de rápida rotación se han identificado desde su primer descubrimiento en 1967, con registros de periodos de rotación desde milisegundos a varios segundos. La estrella de neutrones es un sistema asombroso, un objeto con una masa mayor que el Sol, que cabe perfectamente dentro del espacio de un pequeño condado y rotando tan rápidamente que la rapidez tangencial de la superficie se acerca a una fracción importante de la velocidad de la luz.

Examen rápido

8.5 Un disco horizontal con momento de inercia I_1 gira con una rapidez angular ω_1 alrededor de un eje vertical sin fricción. Un segundo disco horizontal que tiene un momento de inercia I_2 cae sobre el primer disco, al principio sin rotar, pero compartiendo el mismo eje del primer disco. Debido a que sus superficies son ásperas los dos discos alcanzan con el tiempo la misma rapidez angular ω . La razón ω/ω_1 es igual a a) I_1/I_2 b) I_2/I_1 c) $I_1/(I_1 + I_2)$ d) $I_2/(I_1 + I_2)$

Figura 8.31 a) La Nebulosa del Cangrejo en la constelación de Tauro. Esta nebulosa es un remanente de una supernova vista desde la Tierra en el año 1054. Se encuentra a unos 6300 años luz de distancia y mide aproximadamente 6 años luz de diámetro, todavía en expansión. Un pulsar profundamente inmerso en la nebulosa destella 30 veces cada segundo. b) Pulsar apagado. c) Pulsar encendido.



Max Planck Instituto para la Astronomía, Heidelberg, Alemania

© Smithsonian Institute/Photo Researchers, Inc.

8.6 Si el calentamiento global continúa, es probable que algo del hielo de los casquetes de hielo polar de la Tierra se derrita y el agua se distribuya cerca del Ecuador. Si ocurre esto, ¿la longitud del aumento del día (una revolución) a) aumentará, b) disminuirá o c) seguirá siendo igual?

■ EJEMPLO 8.14 La silla giratoria

OBJETIVO Aplicar la conservación del momento angular a un sistema simple.

PROBLEMA Un estudiante se sienta en un taburete giratorio mientras levanta un par de pesas. (Véase la figura 8.32.) El taburete rota libremente alrededor de un eje vertical con fricción despreciable. El momento de inercia del estudiante, las pesas y el taburete es $2.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. El estudiante está en rotación con los brazos extendidos, dando una vuelta completa cada 1.26 s. **a)** ¿Cuál es la rapidez angular inicial del sistema? **b)** Mientras él rota jala las pesas hacia su pecho de modo que el nuevo momento de inercia del sistema (estudiante, pesas y taburete) se convierta en $1.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. ¿Cuál es la nueva rapidez angular del sistema? **c)** Encuentre el trabajo realizado por el estudiante en el sistema mientras jala las pesas. (No hay caso de la energía perdida en el trabajo de sus músculos.)

ESTRATEGIA a) La rapidez angular puede obtenerse de la frecuencia, que es lo contrario del periodo. b) No hay torques externos actuando sobre el sistema, así que la nueva rapidez angular puede encontrarse con el principio de la conservación del momento angular. c) El trabajo realizado sobre el sistema durante este proceso es el mismo que el cambio de energía cinética rotatoria del sistema.

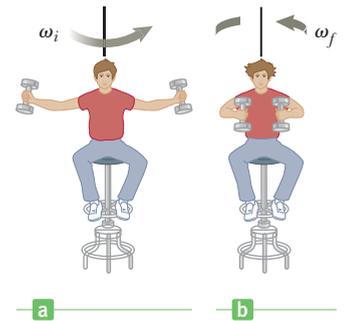


Figura 8.32 (Ejemplo 8.14) a) Un estudiante gira con una rapidez angular inicial mientras sostiene dos pesas. b) La rapidez angular aumenta cuando el estudiante mueve las pesas hacia adentro.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la rapidez angular inicial del sistema.

Invierta el periodo para obtener la frecuencia y multiplique por 2π :

$$\omega_i = 2\pi f = 2\pi/T = 4.99 \text{ rad/s}$$

b) Después de jalar las pesas hacia adentro, ¿cuál es la nueva rapidez angular del sistema?

Igualé los momentos angulares inicial y final del sistema:

$$1) \quad L_i = L_f \rightarrow I_i \omega_i = I_f \omega_f$$

Sustituya y despeje la rapidez angular final ω_f :

$$2) \quad (2.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(4.99 \text{ rad/s}) = (1.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)\omega_f$$

$$\omega_f = 6.24 \text{ rad/s}$$

c) Encuentre el trabajo que hace el estudiante sobre el sistema.

Aplicando el teorema del trabajo y la energía:

$$W_{\text{estudiante}} = \Delta K_r = \frac{1}{2} I_f \omega_f^2 - \frac{1}{2} I_i \omega_i^2$$

$$= \frac{1}{2} (1.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) (6.24 \text{ rad/s})^2 - \frac{1}{2} (2.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2) (4.99 \text{ rad/s})^2$$

$$W_{\text{estudiante}} = 7.03 \text{ J}$$

COMENTARIOS Aunque el momento angular del sistema se conserva, no es así con la energía mecánica porque el estudiante no hace trabajo sobre el sistema.

PREGUNTA 8.14 Si el estudiante suelta las pesas, su rapidez angular ¿crece?, ¿decrece?, ¿es la misma?

EJERCICIO 8.14 Una estrella con un radio inicial de $1.0 \times 10^8 \text{ m}$ y periodo de 30.0 días se colapsa de repente a un radio de $1.0 \times 10^4 \text{ m}$. a) Encuentre el periodo de rotación después del colapso. b) Encuentre el trabajo realizado por la gravedad durante el colapso, si la masa de la estrella es $2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$. c) ¿Cuál es la rapidez de una persona indestructible que está parada en el ecuador de la estrella colapsada? (Desprecie cualquier efecto relativista o térmico y suponga que la estrella es esférica antes y después del colapso.)

RESPUESTAS a) $2.6 \times 10^{-2} \text{ s}$ b) $2.3 \times 10^{42} \text{ J}$ c) $2.4 \times 10^6 \text{ m/s}$

EJEMPLO 8.15 El carrusel

OBJETIVO Aplicar la conservación del momento angular mientras se combinan dos momentos de inercia.

PROBLEMA Un carrusel modelado como un disco de masa $M = 1.00 \times 10^2$ kg y radio $R = 2.00$ m está rotando en un plano horizontal sobre un eje vertical sin fricción (figura 8.33). **a)** Después, una estudiante con masa $m = 60.0$ kg salta al borde del carrusel, por lo que la rapidez angular del sistema disminuye a 2.00 rad/s. Si la estudiante camina lentamente del borde hacia el centro, encuentre la rapidez angular del sistema cuando alcanza un punto a 0.500 m del centro. **b)** Encuentre el cambio en la energía cinética rotatoria del sistema causado por su movimiento hacia $r = 0.500$ m. **c)** Encuentre el trabajo realizado sobre la estudiante cuando ella camina a $r = 0.500$ m.

ESTRATEGIA Este problema puede resolverse con la conservación del momento angular igualando el momento angular inicial del sistema cuando la estudiante está parada en el borde, con el momento angular cuando la estudiante ha alcanzado $r = 0.500$ m. La clave es encontrar los diferentes momentos de inercia.

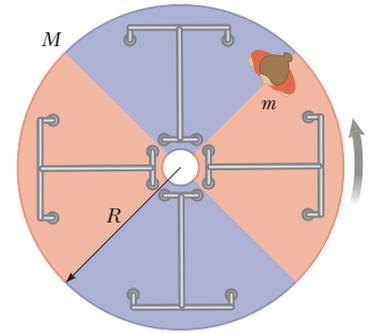


Figura 8.33 (Ejemplo 8.15) Cuando la estudiante camina hacia el centro de la plataforma en rotación, el momento de inercia I del sistema (estudiante-plataforma) disminuye. Debido a que el momento angular se conserva y $L = I\omega$, la rapidez angular del sistema debe aumentar.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la rapidez angular cuando la estudiante alcanza un punto a 0.500 m del centro.

Calcule el momento de inercia del disco, I_D :

$$I_D = \frac{1}{2}MR^2 = \frac{1}{2}(1.00 \times 10^2 \text{ kg})(2.00 \text{ m})^2 \\ = 2.00 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Halle el momento de inercia inicial de la estudiante. Este es el mismo que el momento de inercia de una masa a una distancia R del eje:

$$I_{iE} = mR^2 = (60.0 \text{ kg})(2.00 \text{ m})^2 = 2.40 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Sume los dos momentos de inercia y multiplique por la rapidez angular inicial para encontrar L_i , el momento angular inicial del sistema:

$$L_i = (I_D + I_{iE})\omega_i \\ = (2.00 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 2.40 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.00 \text{ rad/s}) \\ = 8.80 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

Calcule el momento de inercia final de la estudiante, I_{fE} , cuando está a 0.500 m del centro:

$$I_{fE} = mr_f^2 = (60.0 \text{ kg})(0.50 \text{ m})^2 = 15.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

El momento de inercia de la plataforma no cambia, así que súmela al momento de inercia final de la estudiante y multiplique por la rapidez angular final desconocida para encontrar L_f :

$$L_f = (I_D + I_{fE})\omega_f = (2.00 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 15.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)\omega_f \\ = (2.15 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)\omega_f$$

Igualé los momentos angulares inicial y final, y despeje la rapidez angular final del sistema:

$$L_i = L_f \\ (8.80 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}) = (2.15 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)\omega_f \\ \omega_f = 4.09 \text{ rad/s}$$

b) Encuentre el cambio de energía cinética rotatoria del sistema.

Determine la energía cinética inicial del sistema:

$$EC_i = \frac{1}{2}I_i\omega_i^2 = \frac{1}{2}(4.40 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.00 \text{ rad/s})^2 \\ = 8.80 \times 10^2 \text{ J}$$

Encuentre la energía cinética final del sistema:

$$EC_f = \frac{1}{2}I_f\omega_f^2 = \frac{1}{2}(215 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(4.09 \text{ rad/s})^2 = 1.80 \times 10^3 \text{ J}$$

Calcule el cambio de energía cinética del sistema:

$$EC_f - EC_i = 920 \text{ J}$$

c) Encuentre el trabajo hecho sobre la estudiante.

La estudiante experimenta un cambio en energía cinética igual al trabajo realizado sobre ella. Aplique el teorema del trabajo y la energía:

$$\begin{aligned}
 W &= \Delta EC_{\text{estudiante}} = \frac{1}{2}I_{fE}\omega_f^2 - \frac{1}{2}I_{iE}\omega_i^2 \\
 &= \frac{1}{2}(15.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(4.09 \text{ rad/s})^2 \\
 &\quad - \frac{1}{2}(2.40 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2)(2.00 \text{ rad/s})^2 \\
 W &= -355 \text{ J}
 \end{aligned}$$

COMENTARIOS El momento angular permanece sin cambios por las fuerzas internas; sin embargo, la energía cinética aumenta porque la estudiante debe realizar trabajo positivo para caminar hacia el centro de la plataforma.

PREGUNTA 8.15 ¿Se viola la conservación de energía en este ejemplo? Explique por qué hay un cambio neto positivo en la energía mecánica. ¿Cuál es el origen de esta energía?

EJERCICIO 8.15 a) Encuentre la rapidez angular del carrusel antes de que la estudiante salte sobre él, suponiendo que la estudiante no transfiere momento o energía cuando salta al carrusel. b) ¿Cuánto cambia la energía cinética del sistema cuando la estudiante salta? Observe que la energía se pierde en este proceso, como debe esperarse, puesto que es esencialmente una colisión perfectamente inelástica.

RESPUESTAS a) 4.4 rad/s b) $EC_f - EC_i = -1.06 \times 10^3 \text{ J}$

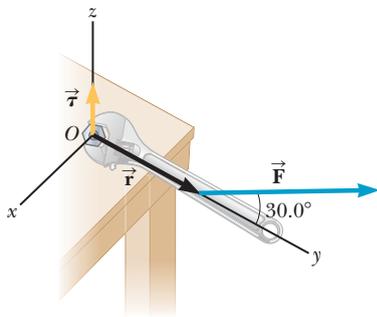
■ RESUMEN

8.1 Torque

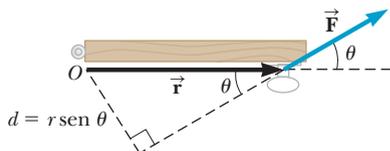
Sea \vec{F} una fuerza que actúa sobre un objeto, y sea \vec{r} un vector de posición desde un punto elegido O al punto de aplicación de la fuerza. Entonces la magnitud del torque $\vec{\tau}$ de la fuerza \vec{F} está dado por

$$\tau = rF \sin \theta \quad [8.2]$$

donde r es la longitud del vector de posición, F la magnitud de la fuerza y θ el ángulo entre \vec{F} y \vec{r} .



El torque en O depende de la distancia hasta el punto de aplicación de la fuerza \vec{F} y la magnitud y dirección de la fuerza.



Una interpretación alternativa de torque se refiere al concepto de un brazo de palanca $d = r \sin \theta$ que es perpendicular a la fuerza.

La cantidad $d = r \sin \theta$ se llama *brazo de palanca* de la fuerza.

8.2 Torque y las dos condiciones de equilibrio

Un objeto en equilibrio mecánico debe satisfacer las siguientes dos condiciones:

1. La fuerza externa neta debe ser cero: $\sum \vec{F} = 0$.
2. El torque externo neto debe ser cero: $\sum \vec{\tau} = 0$.

Estas dos condiciones, usadas para resolver problemas, involucran la rotación en un plano, resultando tres ecuaciones y tres incógnitas, dos de la primera condición (correspondientes a las componentes x y y de la fuerza) y otra de la segunda condición (torques). Estas tres ecuaciones deben resolverse simultáneamente.

8.5 Relación entre el torque y la aceleración angular

El **momento de inercia** de un grupo de partículas es

$$I \equiv \sum mr^2 \quad [8.7]$$

Si un objeto rígido libre para rotar alrededor de un eje fijo, tiene un torque externo neto $\sum \tau$ actuando sobre él, entonces el objeto experimenta una aceleración angular a , donde

$$\sum \tau = I\alpha \quad [8.8]$$

Esta ecuación es la equivalente rotatoria de la segunda ley de movimiento.

Los problemas son resueltos usando la ecuación 8.8 junto con la segunda ley de Newton y resolviendo simultáneamente estas ecuaciones. La relación $a = r\alpha$ es a menudo la clave para relacionar las ecuaciones de traslación con las ecuaciones rotatorias.

8.6 Energía cinética rotatoria

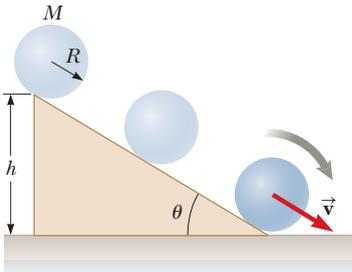
Si un objeto rígido rota alrededor de un eje fijo con rapidez angular ω , su **energía cinética rotatoria** es

$$EC_r = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad [8.10]$$

donde I es el momento de inercia del objeto alrededor del eje de rotación.

Un sistema que involucra una rotación se describe con tres tipos de energía: la potencial EP , la energía cinética de traslación EC_t y la energía cinética rotatoria EC_r . Todas estas formas de energía deben incluirse en la ecuación de la conservación de la energía mecánica para un sistema aislado:

$$(EC_t + EC_r + EP)_i = (EC_t + EC_r + EP)_f \quad [8.11]$$



Una pelota que rueda por una pendiente convierte la energía potencial en traslación y en energía cinética en rotación.

donde i y f se refieren a los valores inicial y final, respectivamente. Cuando hay fuerzas no conservativas, es necesario usar una generalización del teorema del trabajo y la energía:

$$W_{nc} = \Delta EC_t + \Delta EC_r + \Delta EP \quad [8.12]$$

8.7 Momento angular

El **momento angular** de un objeto en rotación está dado por

$$L = I\omega \quad [8.13]$$

El momento angular está relacionado con el torque en la siguiente ecuación:

$$\sum \tau = \frac{\text{cambio del momento angular}}{\text{intervalo}} = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad [8.14]$$

Si el torque externo neto que actúa sobre un sistema es cero, el momento angular total del sistema es constante

$$L_i = L_f \quad [8.15]$$

y se dice que se conserva. Para resolver problemas usualmente se involucran sustituciones en la expresión

$$I_i\omega_i = I_f\omega_f \quad [8.16]$$

y se resuelve para la incógnita.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿Cuál es la magnitud de la aceleración angular de un disco de 25.0 kg de radio 0.800 m cuando se le aplica un torque de 40.0 N · m? a) 2.50 rad/s² b) 5.00 rad/s² c) 7.50 rad/s² d) 10.0 rad/s² e) 12.5 rad/s²
- Un tablón horizontal de 4.00 m de largo y de masa de 20.0 kg descansa sobre dos pivotes, el primero en el extremo izquierdo y el segundo a 1.00 m del extremo derecho. Encuentre la magnitud de la fuerza ejercida en el tablón por el segundo pivote. a) 32.0 N b) 45.2 N c) 112 N d) 131 N e) 98.2 N
- Se utiliza una llave de 0.500 m de largo con una fuerza de 80.0 N para aflojar una tuerca. Debido al estrecho espacio, la fuerza se debe ejercer hacia arriba en un ángulo de 60.0° con respecto a una línea que va desde el perno hasta el extremo de la llave. ¿Cuánto torque se aplica a la tuerca? a) 34.6 N · m b) 4.56 N · m c) 11.8 N · m d) 14.2 N · m e) 20.0 N · m
- Como se muestra en la figura POM8.4, un cable se enrolla en un carrete cilíndrico fijo, sin fricción

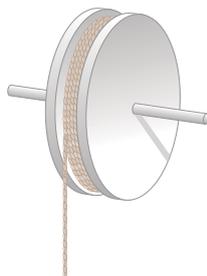


Figura POM8.4

- y con eje horizontal. ¿Cuándo el carrito tiene una mayor magnitud de la aceleración angular? a) Cuando el cable se tira hacia abajo con una fuerza constante de 50 N. b) Cuando un objeto de peso 50 N se cuelga de la cuerda y es puesto en libertad. c) Las aceleraciones angulares en a) y b) son iguales. d) Es imposible de determinar.
- Dos fuerzas están actuando sobre un objeto. ¿Cuáles de las siguientes declaraciones son correctas? a) El objeto está en equilibrio si las fuerzas son iguales en magnitud y dirección opuesta. b) El objeto está en equilibrio si el torque neto sobre el objeto es cero. c) El objeto está en equilibrio si las fuerzas actúan en el mismo punto del objeto. d) El objeto está en equilibrio si la fuerza neta y el torque neto sobre el objeto son ambos cero. e) El objeto no puede estar en equilibrio porque más de una fuerza actúa sobre él.
- Un bloque resbala por una rampa sin fricción mientras una esfera hueca y una bola sólida ruedan sin deslizarse hacia abajo de una segunda rampa con la misma altura y pendiente. Ordene los tiempos de llegada de los objetos a la parte baja de la rampa, del más corto al más largo: a) esfera, bola, bloque, b) bola, bloque, esfera, c) bola, esfera, bloque, d) bloque, esfera, bola, e) bloque, bola, esfera

7. Un torque constante neto distinto de cero se ejerce sobre un objeto. ¿Cuáles de las siguientes cantidades *no pueden* ser constantes para este objeto? Más de una respuesta puede ser correcta: a) aceleración angular, b) velocidad angular c) momento de inercia d) centro de masa, e) momento angular
8. Un disco rota en relación con un eje fijo que es perpendicular al disco y que pasa por su centro. En cualquier instante, ¿cada punto del disco tiene la misma a) aceleración centrípeta, b) velocidad angular, c) aceleración tangencial, d) velocidad lineal o e) aceleración total?
9. Un disco sólido y un aro se sueltan simultáneamente a partir del reposo desde la parte superior de una rampa y ruedan hacia abajo sin deslizarse. ¿Qué objeto alcanza primero la parte inferior de la rampa? a) El que tiene la masa más grande. b) El que tiene el radio más grande. c) El aro. d) El disco. e) El aro y el disco llegan al mismo tiempo.
10. Un cilindro sólido de masa M y de radio R rueda hacia abajo de una pendiente sin deslizarse. Su momento de inercia sobre un eje a través de su centro de masa es $MR^2/2$. En cualquier instante de su movimiento, su energía cinética rotatoria sobre su centro de la masa tiene una fracción de su energía cinética total de a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{1}{4}$ c) $\frac{1}{3}$ d) $\frac{2}{5}$ e) ninguno de éstos
11. Un ratón está inicialmente en descanso sobre un disco giratorio horizontal en reposo montado en un eje vertical sin fricción. Cuando el ratón comienza a caminar en el sentido de las manecillas del reloj alrededor del perímetro, ¿cuál de las declaraciones siguientes *debe* ser cierta en relación con el disco giratorio? a) Gira en sentido a las manecillas del reloj. b) Gira en sentido contrario a las manecillas del reloj con la misma velocidad angular que el ratón. c) Permanece inmóvil. d) Gira en sentido contrario a las manecillas del reloj porque conserva el momento angular. e) Gira en sentido contrario a las manecillas del reloj porque la energía mecánica se conserva.
12. Considere dos esferas uniformes, sólidas, una esfera grande, masiva y una esfera más pequeña, más ligera. Se sueltan simultáneamente a partir del reposo desde la parte superior de una colina y ruedan hacia abajo sin deslizarse. ¿Cuál de ellas alcanza primero la parte de abajo de la colina? a) La esfera grande, b) la esfera pequeña, c) la esfera con la densidad más grande, d) las esferas llegan al mismo tiempo, e) la respuesta depende de los valores de las masas y de los radios de las esferas.
13. Los coches en una carrera no tienen motor; simplemente van cuesta abajo. ¿Cuál de los siguientes criterios de diseño es el mejor desde un punto de vista competitivo? Las ruedas de coche deben a) tener grandes momentos de inercia, b) ser enormes, c) tener ruedas en aro más bien que discos sólidos, d) tener ruedas grandes más bien que ruedas pequeñas o e) tener momentos de inercia pequeños.
14. Dos caballos pequeños (o ponis) de igual masa están inicialmente en puntos diametralmente opuestos en el borde de una plataforma rotatoria horizontal de gran tamaño que gira libremente sobre un eje vertical, sin fricción a través de su centro. Los ponis al mismo tiempo comienzan a caminar uno hacia el otro a través de la plataforma giratoria. **i)** Cuando los ponies caminan, ¿qué ocurre con la velocidad angular de la plataforma? a) aumenta. b) disminuye. c) se mantiene constante. Considere el sistema de ponies-plataforma giratoria en este proceso, y responda si o no a las siguientes preguntas. **ii)** ¿La energía mecánica del sistema se conserva? **iii)** ¿El impulso del sistema se conserva? **iv)** ¿El momento angular del sistema se conserva?

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. ¿Por qué no puede usted poner sus talones firmemente contra una pared y después doblarse sin caer?
2. Explique por qué cambiar el eje de rotación de un objeto cambia su momento de inercia.
3. Si usted ve un objeto en rotación, ¿hay necesariamente un torque neto que actúa sobre él?
4. a) ¿Es posible calcular el torque que actúa sobre un objeto rígido sin especificar un origen? b) ¿Es el torque independiente de la ubicación del origen?
5. ¿Por qué una larga vara ayuda a un equilibrista a mantener el equilibrio?
6. En la película *Parque jurásico*, hay una escena en la que algunos miembros del grupo de visitantes quedan atrapados en la cocina, con los dinosaurios afuera. El paleontólogo está presionando contra el centro de la puerta, intentando mantener a los dinosaurios en el otro lado. La botánica se lanza contra la puerta en el borde cerca de la bisagra. Un punto importante en la película es que ella no puede alcanzar un arma en el piso porque está intentando mantener la puerta cerrada. Si el paleontólogo está presionando en el centro de la puerta y la botánica está presionando en el borde cerca de 8 cm de la bisagra, estime hasta dónde el paleontólogo tendría que recolocarse para tener un mayor efecto de mantener la puerta cerrada que el que están obteniendo al empujar desde sus posiciones originales. (La pregunta 6 es cortesía de Edward F. Redish. Para más preguntas de este tipo, véase www.physics.umd.edu/perg/.)
7. En algunas carreras de motocicletas, los conductores manejan sobre pequeñas colinas donde las motocicletas llegan a volar por un corto tiempo. Si el conductor de la motocicleta acelera mientras abandona la colina y entra al aire, la nariz de la motocicleta tiende a levantarse. ¿Por qué sucede esto?
8. Si usted lanza un libro de texto al aire, rotándolo cada vez en relación con tres ejes perpendiculares a él, verá que no girará suavemente alrededor de uno de esos ejes (inténtelo, pero coloque una fuerte liga alrededor del

libro antes de lanzarlo de modo que permanezca cerrado). La rotación del libro es estable en relación con esos ejes que tienen los momentos de inercia más grandes y más pequeños, pero inestable en relación con el eje del momento intermedio. Intente esto para encontrar el eje que tiene este momento de inercia intermedio.

9. Las estrellas se originan de grandes cuerpos de gas que giran lentamente. Debido a la gravedad, estos gases se contraen con lentitud. ¿Qué sucede con la rapidez angular de una estrella mientras ésta se contrae? Explique.
10. Si un competidor de salto de altura coloca correctamente su cuerpo al pasar la barra, el centro de gravedad del atleta puede pasar realmente debajo de la barra. (Véase la figura PC8.10.) Explique cómo es posible esto.



Mark Dadds/Well/Getty Images

Figura PC8.10

11. En una grabadora de cinta, el mecanismo hace pasar la cinta por cabezas de lectura/grabación con una rapidez constante. Considere el carrete del que se tira la cinta: a medida que sale, el radio del rollo de la cinta restante disminuye. ¿Cómo cambia el torque en el carrete con tiempo? ¿Cómo cambia la rapidez angular del carrete con tiempo? ¿Si el mecanismo de la cinta se activa repen-

tinamente, la cinta es jalada por una fuerza muy grande ¿es más probable que la cinta se rompa cuando el carrete está casi lleno o está casi vacío?

12. a) Dé un ejemplo en el cual la fuerza neta que actúa sobre un objeto sea cero, con torque neto distinto de cero. b) Dé un ejemplo en el cual el torque neto que actúa sobre un objeto sea cero, con la fuerza neta distinta de cero.
13. Una escalera se apoya inclinada contra una pared. ¿Usted se sentiría más seguro al subir por la escalera si le dijeran que el piso no tiene fricción, pero la pared es áspera, o que la pared no tiene fricción, pero que el piso es áspero? Justifique su respuesta.
14. Un gato aterriza generalmente en sus patas sin importar la posición de la cual se deje caer. Una película en cámara lenta de un gato cayendo muestra que la mitad superior de su cuerpo se tuerce en una dirección mientras que la mitad inferior tuerce en la dirección opuesta. (Véase la figura PC8.14.) ¿Por qué ocurre este tipo de rotación?



Biosphoto/Labat-J.M. & Roquette F./Peter Arnold, Inc.

Figura PC8.14

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

8.1 Torque

1. La caña de pescar en la figura P8.1 forma un ángulo de 20.0° con la horizontal. ¿Cuál es la magnitud del torque ejercido por el pescado sobre un eje perpendicular a la página y que pasa por la mano del pescador si el pez tira de la línea de pesca con una fuerza $\vec{F} = 100 \text{ N}$ en un án-

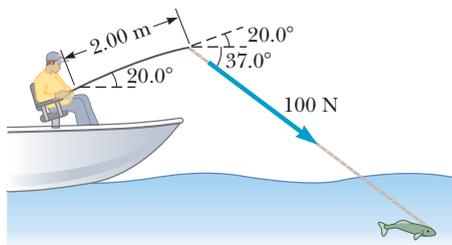


Figura P8.1

gulo 37.0° por debajo de la horizontal? La fuerza es aplicada en un punto de 2.00 m de las manos del pescador.

2. **M** Encuentre el torque neto en la rueda de la figura P8.2 sobre el eje O perpendicular a la página, teniendo $a = 10.0 \text{ cm}$ y $b = 25.0 \text{ cm}$.

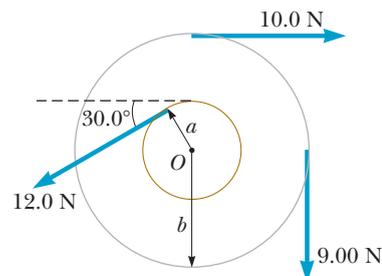


Figura P8.2

3. Calcule el torque neto (magnitud y dirección) en la viga en la figura P8.3 en relación con a) un eje en O perpendicular a la página y b) un eje en C perpendicular a la página.

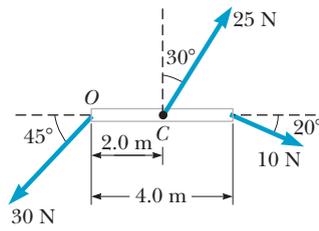


Figura P8.3

4. **BIO** Una banda de acero ejerce una fuerza horizontal de 80.0 N sobre un diente en el punto B de la figura P8.4. ¿Cuál es el torque en la raíz del diente en relación con el punto A ?

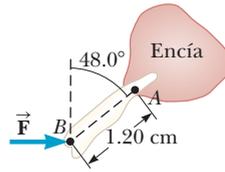


Figura P8.4

5. **CIC** Un péndulo simple se compone de un pequeño objeto de masa 3.0 kg cuelga en el extremo de una cuerda ligera de 2.0 m de largo que se conecta a un punto de giro. a) Calcule la magnitud del torque (debido a la fuerza de gravedad) de este punto de giro cuando la cuerda forma un ángulo de 5.0° con la vertical. b) ¿El torque aumenta o disminuye a medida que el ángulo aumenta? Explique.

6. **S** Escriba las ecuaciones de equilibrio necesarias del objeto mostrado en la figura P8.6. Tome el origen de la ecuación de torque con respecto a un eje perpendicular a la página a través del punto O .

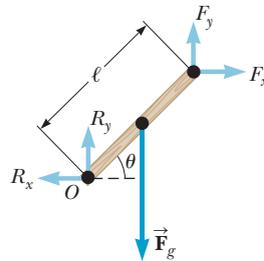


Figura P8.6

8.2 Torque y las dos condiciones de equilibrio

8.3 El centro de gravedad

8.4 Ejemplos de objetos en equilibrio

7. **BIO** El brazo en la figura P8.7 pesa 41.5 N. La fuerza de la gravedad sobre el brazo actúa a través del punto A . Determine las magnitudes de la fuerza de tensión \vec{F}_t en el músculo deltoideo y de la fuerza \vec{F}_s , ejercida por el hombro sobre el húmero (hueso superior del brazo) para sostener el brazo en la posición mostrada.

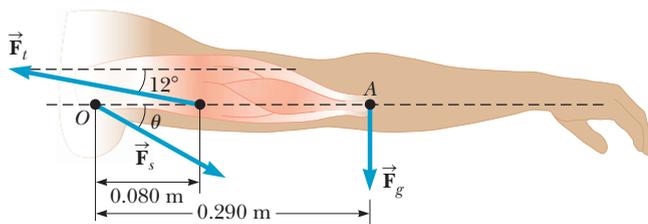


Figura P8.7

8. Una viga uniforme de 35.0 kg y de longitud $\ell = 5.00$ m está sostenida por una cuerda vertical situada a $d = 1.20$ m de su extremo izquierdo como se muestra en la figura P8.8. El extremo derecho de la viga se apoya en una columna vertical. Calcule: a) la tensión en la cuerda y b) la fuerza que ejerce la columna en el extremo derecho de la viga.

9. **BIO** Un cocinero sostiene con la mano un envase de leche 2.00 kg, con el brazo extendido (figura P8.9). ¿Qué fuerza \vec{F}_B debe ejercer el bíceps? (Haga caso omiso del peso del antebrazo.)

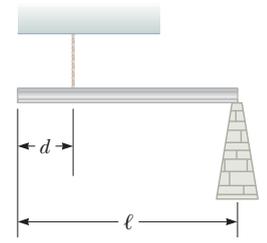


Figura P8.8

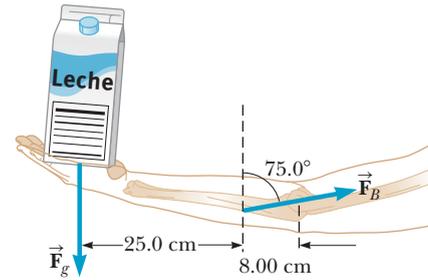


Figura P8.9

10. Una báscula se equilibra cuando el fulcro de la pesa deslizante está en la marca de 49.7 cm. Cuando se une una masa de 50.0 g en la marca de 10.0 cm, el fulcro se debe mover a la marca de 39.2 cm para balancearla. ¿Cuál es la masa de la pesa deslizante?

11. Encuentre las coordenadas x y y del centro de gravedad de una hoja uniforme de madera, de 4.00 pies por 8.00 pies, cuando se ha recortado como se muestra en la figura P8.11. *Sugerencia:* La masa de cualquier segmento de la hoja de madera es proporcional a la superficie de ese segmento.

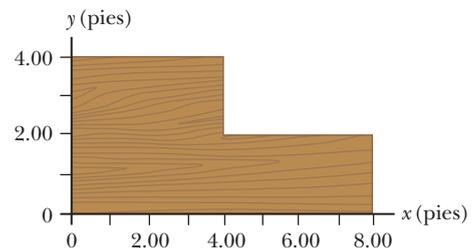


Figura P8.11

12. **PG** Una viga de $L = 6.00$ m de longitud y masa $M = 90.0$ kg descansa sobre dos pivotes. El pivote bajo el extremo izquierdo ejerce una fuerza normal n_1 sobre la viga, y el segundo pivote está a una distancia $\ell = 4.00$ m del extremo izquierdo y ejerce una fuerza normal n_2 . Una mujer de masa $m = 55.0$ kg comienza a caminar desde el extremo izquierdo de la viga hacia la derecha como se ve en la figura P8.12. La meta es encontrar la posición de la mujer cuando la viga comienza a inclinarse. a) Bosqueje un diagrama de cuerpo libre, etiquetando las fuerzas normales y la gravitacional que actúan en la viga y que ponen a la mujer x metros a la derecha del primer pivote, tomado como origen. b) ¿Dónde está la mujer cuando la fuerza normal n_1 es la más grande? c) ¿Cuál es n_1 cuando la viga está cerca de inclinarse? d) Utilice la ecuación de

equilibrio de fuerzas para encontrar el valor del n_2 cuando la viga está a punto de inclinarse. e) Con el resultado del inciso c) y de la ecuación de equilibrio de torque, con los torques calculados alrededor del segundo punto pivote, encuentre la posición de la mujer cuando la viga está a punto de inclinarse. f) Compruebe la respuesta del inciso e) calculando los torques alrededor del primer punto pivote. A excepción de posibles diferencias de redondeo, ¿las respuestas son iguales?

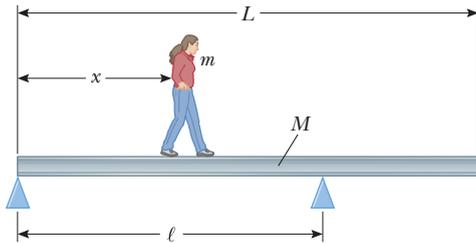


Figura P8.12 (Problemas 12 y 14)

13. Considere la siguiente distribución de masa, donde las coordenadas x y y se dan en metros: 5.0 kg en (0.0, 0.0) m, 3.0 kg en (0.0, 4.0) m y 4.0 kg en (3.0, 0.0) m. ¿Dónde debería ponerse un cuarto objeto de 8.0 kg de modo que el centro de gravedad del arreglo con el cuarto objeto esté en (0.0, 0.0) m?
14. **S** Una viga de longitud L y masa M está en reposo sobre dos pivotes. El primer pivote está en el extremo izquierdo, tomado como el origen, y el segundo pivote está a una distancia l del extremo izquierdo. Una mujer de masa m empieza a caminar del extremo izquierdo al derecho, como se ve en la figura P8.12. Cuando la viga está a punto de inclinarse, encuentre la expresión simbólica para a) la fuerza normal ejercida por el segundo pivote en términos de M , m y g , y b) la posición de la mujer en términos de M , m , L y l . c) Encuentre el valor mínimo de l que permite que la mujer alcance el extremo de la viga sin que ésta se incline.

15. **BIO** Muchos de los ejercicios que se hacen en una barra horizontal pueden ser modelados representando al gimnasta por cuatro segmentos que consisten en los brazos, el torso (incluyendo cabeza), muslos y las piernas bajas, según las indicaciones de la figura P8.15a. Los parámetros de inercia para un gimnasta particular se muestran en la tabla siguiente:

Segmento	Masa (kg)	Longitud (m)	r_{cg} (m)	I ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
Brazos	6.87	0.548	0.239	0.205
Torso	33.57	0.601	0.337	1.610
Muslos	14.07	0.374	0.151	0.173
Piernas	7.54	—	0.227	0.164

Observe que en la figura P8.15a r_{cg} es la distancia al centro de gravedad medido desde el empalme más cercano a la barra y las masas para los brazos, los muslos y las piernas incluyen ambas cosas. I es el momento de inercia de cada segmento en relación con su centro de gravedad. Determine la distancia de la barra al centro de gravedad del gimnasta para las dos posiciones mostradas en las figuras P8.15b y P8.15c.

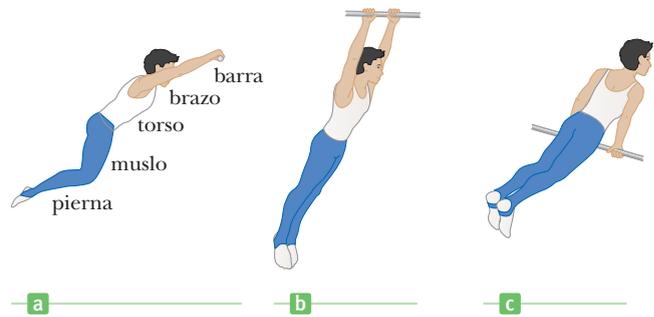


Figura P8.15

16. **BIO** Con los datos dados en el problema 15 y el sistema de coordenadas que se muestra en la figura P8.16b, calcule la posición del centro de gravedad del gimnasta de la figura P8.16a. Ponga especial atención a la definición de r_{cg} en la tabla.

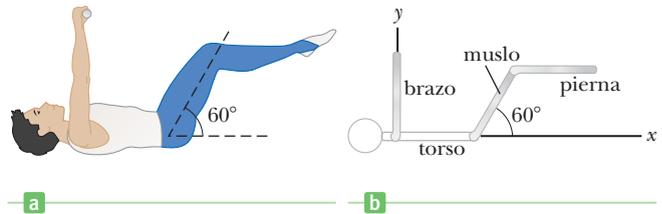


Figura P8.16

17. **BIO** Una persona que se dobla hacia adelante para levantar una carga “con la espalda” (figura P8.17a) más bien que “con sus rodillas” puede dañarse por las grandes fuerzas ejercidas sobre los músculos y las vértebras. La espina dorsal gira principalmente en la quinta vértebra lumbar, con la fuerza de soporte principal proporcionada por el músculo espinal que se ubica en la espalda. Para ver la magnitud de las fuerzas implicadas y para entender por qué los problemas en la espalda son comunes entre los seres humanos, considere el modelo mostrado en la figura P8.17b de una persona que se dobla hacia adelante para levantar un objeto de 200 N. La espina dorsal y el cuerpo superior se representan como una barra horizontal uniforme de peso 350 N, que gira en la base de la espina dorsal. El músculo espinal erector unido en un punto a dos tercios encima de la espina dorsal, mantiene la posición de espalda. El ángulo entre la espina dorsal y este músculo es 12.0° . Encuentre la tensión en el músculo de la espalda y la fuerza de compresión en la espina dorsal.

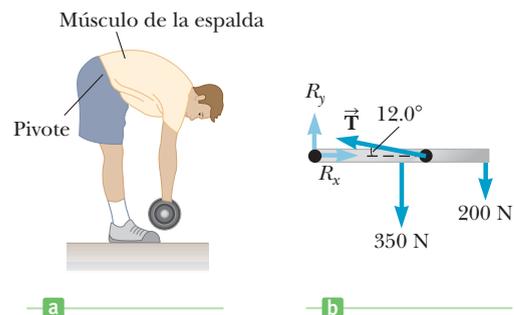


Figura P8.17

18. **BIO** Cuando una persona está parada de puntillas (una posición vigorosa), la posición del pie está como se ve en la figura P8.18a. La fuerza gravitacional total en el cuerpo, \vec{F}_g , es soportada por la fuerza \vec{n} ejercida por el piso sobre los dedos del pie. Un modelo mecánico de la situación se muestra en la figura P8.18b, donde \vec{T} es la fuerza ejercida por el tendón de Aquiles sobre el pie y \vec{R} es la fuerza ejercida por la tibia sobre el pie. Encuentre los valores de T , R y θ cuando $F_g = 700$ N.

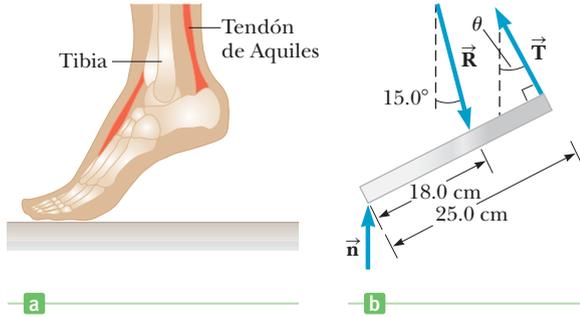


Figura P8.18

19. **M** Un anuncio rectangular uniforme de 500 N y 4.00 m de ancho por 3.00 m de altura se suspende de una barra horizontal uniforme de 6.00 m de largo y de 100 N según lo indicado en la figura P8.19. El extremo izquierdo de la barra está apoyado por una bisagra y el extremo derecho está soportado por un cable formando un ángulo de 30.0° con la vertical. a) Encuentre la tensión T en el cable. b) Encuentre las componentes horizontal y vertical de la fuerza ejercida en el extremo izquierdo de la barra por la bisagra.
20. Un lavador de ventanas está parado en un andamio apoyado por una cuerda vertical en cada extremo. El andamio pesa 200 N y tiene 3.00 m de largo. ¿Cuál es la tensión en cada cuerda cuando el trabajador de 700 N está parado a 1.00 m de un extremo?
21. Un tablón uniforme de 2.00 m de longitud y masa de 30.0 kg está soportado por tres cuerdas, según lo indicado por los vectores azules en la figura P8.21. Encuentre la tensión en cada cuerda cuando una persona de 700 N está a 0.500 m del extremo izquierdo.

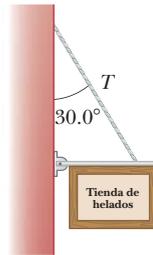


Figura P8.19

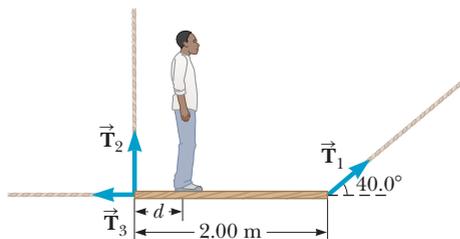


Figura P8.21

22. Un hambriento oso de 700 N camina hacia fuera de una viga en un intento por tomar unos dulces que cuelgan en

el extremo (figura P8.22). La viga es uniforme, pesa 200 N y mide 6.00 m de largo; los dulces pesan 80.0 N. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre de la viga. b) Cuando el oso está en $x = 1.00$ m, encuentre la tensión en el alambre y los componentes de la fuerza de reacción en la bisagra. c) Si el alambre puede resistir una tensión máxima de 900 N, ¿cuál es la distancia máxima que el oso puede caminar antes de que el alambre se rompa?

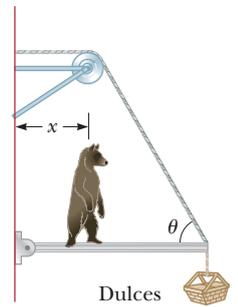


Figura P8.22

23. **S** La figura P8.23 muestra una viga uniforme de masa m que gira en su extremo inferior, con un resorte horizontal conectado entre su extremo superior y una pared vertical. La viga forma un ángulo θ con la horizontal. Encontrar expresiones para a) la distancia d que el resorte se extiende desde el equilibrio y b) los componentes de la fuerza ejercida por el eje de la viga.
24. **PG** Un puntal de longitud $L = 3.00$ m y masa $m = 16.0$ kg está sostenido por un cable formando un ángulo de $\theta = 30.0^\circ$ con respecto a la horizontal según se ve en la figura P8.24. a) Bosqueje un diagrama de cuerpo libre, indicando todas las fuerzas y su colocación en el puntal. b) ¿Por qué es la bisagra un buen lugar a utilizar para calcular los torques? c) Escriba simbólicamente la condición para el equilibrio rotatorio, calculando los torques en relación con la bisagra. d) Utilice la ecuación del torque para calcular la tensión en el cable. e) Escriba las componentes x y y de la segunda ley del Newton para el equilibrio. f) Utilice la ecuación de la fuerza para encontrar las componentes x y y de la fuerza sobre la bisagra. g) Si se supone que la posición del puntal seguirá siendo la misma, ¿sería ventajoso unir el cable más arriba en la pared? Explique la ventaja en términos de la fuerza sobre la bisagra y la tensión en el cable.

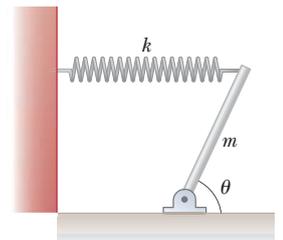


Figura P8.23

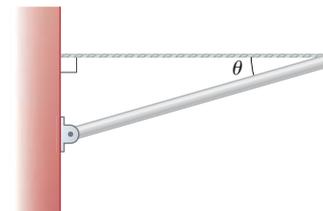


Figura P8.24

25. **S** Un refrigerador de ancho w y altura h se descansa en una áspera pendiente, como en la figura P8.25 (página 268). Encuentre una expresión para el valor máximo que puede tener θ antes de que el refrigerador vuelque. Tenga en cuenta que el punto de contacto entre el refrigerador

y la inclinación cambia a medida que aumenta θ y considere al refrigerador como una caja uniforme.

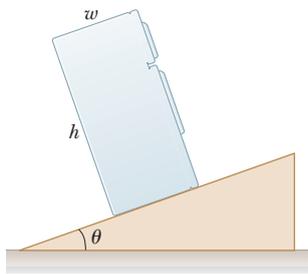


Figura P8.25

26. **C|C S** Una viga uniforme de longitud L y de masa m , mostrada en la figura P8.26, forma un ángulo θ con la horizontal. Su extremo superior está conectado a una pared por una cuerda y su extremo inferior está sobre una superficie horizontal áspera.

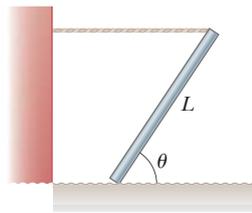


Figura P8.26

- El coeficiente de fricción estática entre la viga y la superficie es μ_s . Suponga que el ángulo es tal que la fuerza de fricción estática está en su valor máximo. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la viga. b) Con la condición del equilibrio rotatorio, encuentre una expresión para la tensión T sobre la cuerda en términos de m , g y θ . c) Con la segunda ley de Newton para el equilibrio, encuentre una segunda expresión para T en términos de μ_s , m y g . d) Usando los resultados previos, obtenga una relación que involucre solamente a μ_s y al ángulo θ . e) ¿Qué sucede si disminuye el ángulo? ¿Esta ecuación es válida para todos los valores de θ ? Explique.

27. **BIO** El músculo de masticación, llamado masetero, es uno de los más fuertes del cuerpo humano. Se une a la mandíbula inferior como se ve en la figura P8.27a. La mandíbula hace pivote alrededor de un hueco justo frente al canal auditivo. Las fuerzas que actúan sobre la mandíbula son equivalentes a las que actúan en la barra curvada de la figura P8.27b. \vec{F}_C es la fuerza ejercida por el alimento que es masticado contra la mandíbula, \vec{T} es la fuerza de la tensión del masetero y \vec{R} es la fuerza ejercida por el hueco sobre la mandíbula. Encuentre \vec{T} y \vec{R} para una persona que muerde un pedazo de filete con una fuerza de 50.0 N.

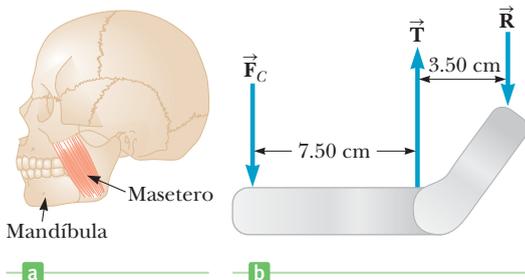


Figura P8.27

28. Una viga uniforme de 1200 N a $\phi = 65^\circ$ con la horizontal está sostenida por un cable en un ángulo $\theta = 25.0^\circ$ con la horizontal, como se ve en la figura P8.28. La viga gira sobre una bisagra en la parte inferior, y un peso $w = 2000$ N cuelga de su parte superior. Encuentre a) la tensión en el cable de soporte y b) las componentes de la fuerza de reacción ejercida sobre la viga por la bisagra.

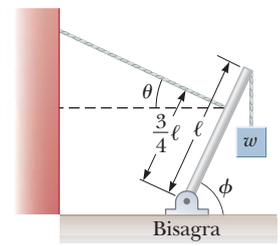


Figura P8.28

29. **BIO** El cuádriceps mayor del muslo termina en su extremo inferior en un tendón unido al extremo superior de la tibia (figura P8.29a). Las fuerzas sobre la pierna inferior cuando la pierna está extendida se modelan como en la figura P8.29b, donde \vec{T} es la tensión en el tendón, \vec{w} es la fuerza de gravedad que actúa sobre la pierna inferior y \vec{F} es el peso del pie. Encuentre \vec{T} cuando el tendón está en un ángulo de 25.0° con la tibia, suponiendo que $w = 30.0$ N, $F = 12.5$ N y la pierna está extendida en un ángulo θ de 40.0° con la vertical.

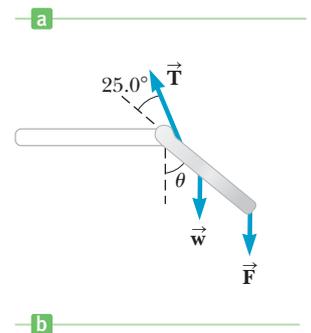
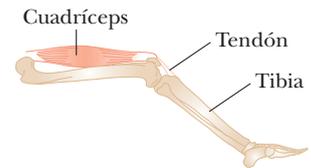


Figura P8.29

Suponga que el centro de gravedad de la pierna inferior está en su centro y que el tendón se une a ella en un punto ubicado a un quinto de la distancia de la pierna.

30. Un extremo de una varilla uniforme de 4.0 m de largo y de peso w está sostenido por un cable. El otro extremo se apoya en la pared, donde es sostenido por la fricción. (Véase la figura P8.30.) El coeficiente de fricción estática entre la pared y la varilla es $\mu_s = 0.50$. Determine la mínima distancia x desde el punto A en el que un peso adicional w (igual al peso de la varilla) se puede colgar sin hacer que la varilla resbale en el punto A.

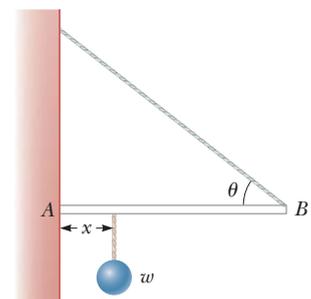


Figura P8.30

8.5 Relación entre el torque y la aceleración angular

31. Cuatro objetos están sostenidos en los vértices de un rectángulo por varillas ligeras como se ve en la figura P8.31. Encuentre el momento de inercia del sistema en relación

con a) el eje x , b) el eje y , y c) un eje que pasa por O y que es perpendicular a la página.

32. Si el sistema mostrado en la figura P8.31 se pone en rotación sobre cada uno de los ejes mencionados en el problema 31, encuentre el torque que producirá una aceleración angular de 1.50 rad/s^2 en cada caso.

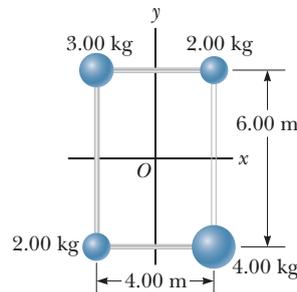


Figura P8.31 (Problemas 31 y 32)

33. Una gran rueda usada para moler en forma de cilindro sólido de radio 0.330 m rota libremente en un eje vertical sin fricción. Una fuerza tangencial constante de 250 N se aplica en el borde causando en la rueda una aceleración angular de 0.940 rad/s^2 . a) ¿Cuál es el momento de inercia de la rueda? b) ¿Cuál es la masa de la rueda? c) Si la rueda parte del reposo, ¿cuál es su velocidad angular después de 5.00 s transcurridos, suponiendo que la fuerza actúa durante ese tiempo?

34. **PG** Un yo-yo de gran tamaño se hace con dos discos sólidos idénticos cada uno de masa $M = 2.00 \text{ kg}$ y radio $R = 10.0 \text{ cm}$. Los dos discos son ensamblados por un cilindro sólido de radio $r = 4.00 \text{ cm}$ y masa $m = 1.00 \text{ kg}$ como en la figura P8.34. Tome el centro del cilindro como el eje del sistema, con los torques positivos dirigidos a la izquierda a lo largo de este eje. Todos los torques y variables angulares son calculados en relación con este eje. La cuerda ligera se enrolla alrededor del cilindro y después se deja caer el sistema a partir del reposo. a) ¿Cuál es el momento de inercia del sistema? Dé una respuesta simbólica. b) ¿Qué torque ejerce la gravedad sobre el sistema con respecto al eje dado? c) Tome como negativa la coordenada en la dirección de la caída. Según lo representado en la figura P8.34, ¿el torque ejercido por la tensión es positivo o negativo? ¿La aceleración angular es positiva o negativa? ¿Qué hay de la aceleración de translación? d) Escriba una ecuación para la aceleración angular α en términos de la aceleración de translación a y radio r . (¡Cuidado con el signo en la ecuación!) e) Escriba la segunda ley del Newton para el sistema en términos de m , M , a , T y g . f) Escriba la segunda ley del Newton para la rotación en términos de I , α , T y r . g) Elimine α de la segunda ley rotatoria con la expresión encontrada en la parte d) y encuentre una

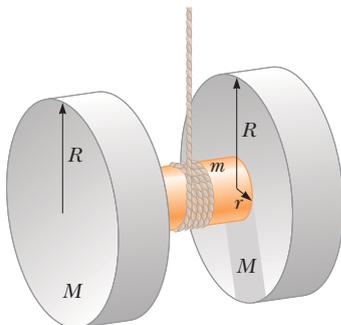


Figura P8.34

expresión simbólica para la aceleración a en términos de m , M , g , r y R . h) ¿Cuál es el valor numérico para la aceleración del sistema? i) ¿Cuál es la tensión en la cuerda? j) ¿Cuánto tiempo toma al sistema caer 1.00 m a partir del reposo?

35. **CIC** Una cuerda de masa insignificante se enrolla alrededor de un cilindro sólido de 225 kg y radio de 0.400 m . El cilindro se sujeta a varios metros del suelo con su eje orientado horizontalmente y gira sobre este eje sin fricción. a) Si un hombre de 75.0 kg toma el extremo libre de la cuerda y se deja caer bajo la fuerza de gravedad, ¿cuál es su aceleración? b) ¿Cuál es la aceleración angular del cilindro? c) Si la masa de la cuerda no fuera despreciada ¿qué le sucedería a la aceleración angular del cilindro cuando cae el hombre?

36. La rueda de un alfarero, de radio 0.50 m y un momento de la inercia de $12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, está girando libremente a 50 rev/min . El alfarero puede detener la rueda en 6.0 s presionando un trapo mojado contra el borde y ejerciendo radialmente hacia el centro una fuerza de 70 N . Encuentre el coeficiente efectivo de fricción cinética entre la rueda y el trapo mojado.

37. Un modelo de aeroplano con una masa de 0.750 kg es atado con un cable de modo que vuele en un círculo de 30.0 m de radio. El motor del aeroplano proporciona un empuje neto de 0.800 N perpendicular al cable de amarre. a) Encuentre el torque que produce el empuje neto alrededor del centro del círculo. b) Determine la aceleración angular del aeroplano cuando está en vuelo llano. c) Encuentre la aceleración lineal del aeroplano tangente a su trayectoria de vuelo.

38. Una rueda de bicicleta tiene un diámetro de 64.0 cm y una masa de 1.80 kg . Suponga que la rueda es un aro con toda la masa concentrada en el radio exterior. La bicicleta se coloca en un soporte estacionario y se aplica una fuerza resistiva de 120 N tangente al borde del neumático. a) ¿Qué fuerza debe ser aplicada por una cadena que pasa sobre una rueda dentada de 9.00 cm de diámetro para dar a la rueda una aceleración de 4.50 rad/s^2 ? b) ¿Qué fuerza se requiere si usted cambia a una rueda dentada de 5.60 cm de diámetro?

39. **M** Un carrusel de 150 kg y 1.50 m de radio en forma de disco horizontal, sólido y uniforme, se pone en movimiento cuando se enrolla una cuerda alrededor del borde del disco y se tira de la cuerda. ¿Qué fuerza constante se debe ejercer sobre la cuerda para llevar el carrusel desde el reposo a una rapidez angular de 0.500 rev/s en 2.00 s ?

40. **CIC S** Una máquina de Atwood consiste en bloques de masas $m_1 = 10.0 \text{ kg}$ y $m_2 = 20.0 \text{ kg}$ unidos por una cuerda que está sobre una polea, como se ve en la figura P8.40. La polea es un cilindro sólido con masa $M = 8.00 \text{ kg}$ y radio $r = 0.200 \text{ m}$. El bloque de masa m_2 se deja caer, y la cuerda da vuelta a la polea sin deslizarse. a) ¿Por qué debe la tensión T_2 ser mayor

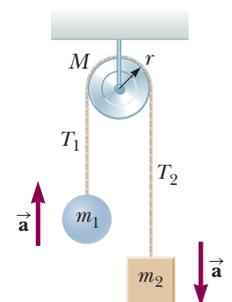


Figura P8.40

que la tensión T_1 ? b) ¿Cuál es la aceleración del sistema, suponiendo que no hay fricción en el eje de la polea? c) Encuentre las tensiones T_1 y T_2 .

41. Un avión de pasajeros aterriza con una velocidad de 50.0 m/s. Cada rueda del avión tiene un radio de 1.25 m y de un momento de inercia de $110 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. En el momento del aterrizaje, las ruedas comienzan a girar por la acción de la fricción. Cada rueda soporta un peso de $1.40 \times 10^4 \text{ N}$ y las ruedas alcanzan su rapidez angular en 0.480 s rodando sin deslizarse. ¿Cuál es el coeficiente de fricción cinética entre las ruedas y la pista? Suponga que la rapidez del avión es constante.

8.6 Energía cinética rotatoria

42. Un automóvil está diseñado para obtener su energía de un volante de inercia con un radio de 2.00 m y una masa de 500 kg. Antes de un viaje, el volante se conecta a un motor eléctrico que proporciona al volante una rapidez rotatoria de 5000 rev/min. a) Encuentre la energía cinética almacenada en el volante. b) Si éste debe proveer energía al automóvil como lo haría un motor de 10.0 caballos de fuerza, encuentre el tiempo que el automóvil podría funcionar antes de que el volante de inercia tenga que volverlo a acelerar.
43. Un carrusel horizontal de 800 N con 1.50 m de radio empieza a moverse a partir del reposo, debido a una fuerza horizontal constante de 50.0 N aplicada tangencialmente. Encuentre la energía cinética del carrusel después de 3.00 s. (Suponga que es un cilindro sólido.)
44. **CIC** Cuatro objetos, un aro, un cilindro sólido, una esfera sólida y una cáscara esférica delgada tienen una masa de 4.80 kg y un radio de 0.230 m cada uno. a) Encuentre el momento de inercia para cada objeto cuando rota sobre los ejes mostrados en la tabla 8.1. b) Suponga que cada objeto está rodado hacia abajo de una rampa. Ordene la rapidez de traslación de cada objeto de la más alta a la más baja. c) Ordene las energías cinéticas rotatorias de los objetos de mayor a menor cuando los objetos ruedan hacia abajo en la rampa.

45. Una varilla ligera de 1.00 m de longitud ℓ rota alrededor de un eje perpendicular a su longitud y que pasa a través de su centro como se ve en la figura P8.45. Dos partículas de masas 4.00 kg y 3.00 kg están conectadas en los extremos de la varilla. a) Despreciando la masa de la varilla, ¿cuál es la energía cinética del sistema cuando su rapidez angular es de 2.50 rad/s? b) Repita el problema, suponiendo que la masa de la varilla es de 2.00 kg.

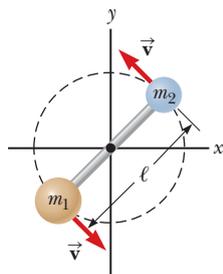


Figura P8.45
(Problemas 45 y 57).

46. Una esfera de radio 0.20 m y 240 N rueda cuesta abajo 6.0 m sin resbalar por una rampa que está inclinada a 37° con la horizontal. ¿Cuál es la velocidad angular de la esfera en la parte inferior de la pendiente si parte del reposo?

47. Un disco sólido uniforme de radio 0.250 m y masa de 55.0 kg rueda cuesta abajo por una rampa de 4.50 m

de longitud, que forma un ángulo de 15.0° con la horizontal. Si el disco parte del reposo desde la parte superior de la rampa. Encuentre a) la rapidez del centro de masa del disco cuando llega a la parte baja de la rampa y b) la rapidez angular del disco en la parte baja de la rampa.

48. **CIC S** Una esfera uniforme sólida de la masa m y del radio R rueda sin deslizarse por una pendiente de altura h . a) ¿Qué formas de energía mecánica se asocian a la esfera en cualquier punto a lo largo de la pendiente cuando su velocidad angular es ω ? Responda con palabras y simbólicamente en términos de las cantidades m , g , y , I , ω y v . b) ¿Qué fuerza actúa sobre la esfera haciéndola rodar, más que deslizarse hacia abajo, por la pendiente? c) Determine la razón de la energía cinética rotatoria de la esfera a su energía cinética total en cualquier instante.
49. El trompo de la figura P8.49 tiene un momento de inercia de $4.00 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y está inicialmente en reposo. Es libre de girar sobre un eje inmóvil AA' . Una cuerda enrollada alrededor de una clavija a lo largo del eje del trompo se tira de tal manera que se mantiene una tensión constante de 5.57 N en la cuerda. Si la cuerda no resbala al enrollarla alrededor de la clavija, ¿cuál es la rapidez angular del trompo después de que 80.0 cm de cuerda han sido jalados de la clavija? *Sugerencia:* Considere el trabajo que se realiza.

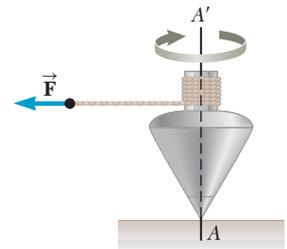


Figura P8.49

50. Un torque constante de $25.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ se aplica a una piedra esmeril cuyo momento de inercia es $0.130 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Utilizando principios de la energía y despreciando la fricción, encuentre la rapidez angular después de que la piedra esmeril ha dado 15.0 revoluciones. *Sugerencia:* El equivalente angular de $W_{\text{neto}} = F\Delta x = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2$ es $W_{\text{neto}} = \tau\Delta\theta = \frac{1}{2}I\omega_f^2 - I\omega_i^2$. Usted debe convencerse de que esta relación es correcta.
51. Un cilindro de 10.0 kg rueda sin resbalar sobre una superficie rugosa. En un instante cuando su centro de gravedad tiene una rapidez de 10.0 m/s, determine a) la energía cinética de traslación de su centro de gravedad, b) la energía cinética rotatoria alrededor de su centro de gravedad y c) su energía cinética total.

52. Utilice la conservación de la energía para determinar la rapidez angular del carrete mostrado en la figura P8.52 después de que un balde de 3.00 kg ha caído 4.00 m, a partir del reposo. La cuerda ligera unida al balde se enrolla alrededor del carrete y no se desliza mientras se desenrolla.

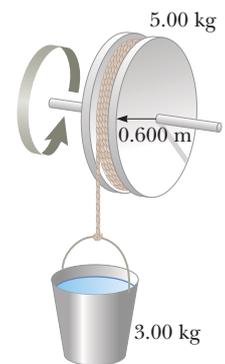


Figura P8.52

53. **CIC** Un látigo gigante en un parque de atracciones consiste en un brazo uniforme de 365 kg y 10.0 m de largo, con dos asientos de masa despreciable en el extremo inferior

del brazo (figura P8.53). a) ¿Qué tan lejos está el centro de masa del brazo del extremo superior? b) La energía potencial gravitacional del brazo es igual como si toda su masa fuera concentrada en el centro de masa. Si el brazo se levanta con un ángulo 45.0° , encuentre la energía potencial gravitacional, donde el nivel cero se toma 10.0 m debajo del eje. c) El brazo cae a partir del reposo desde la posición descrita en la parte b). Encuentre la energía potencial gravitacional del sistema cuando alcanza la orientación vertical. d) Encuentre la rapidez de los asientos en el fondo de la oscilación.

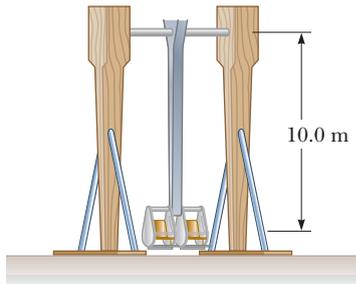


Figura P8.53

8.7 Momento angular

54. Cada uno de los objetos siguientes tiene un radio de 0.180 m y una masa de 2.40 kg, y cada uno rota sobre un eje que pasa través de su centro (como en la tabla 8.1) con una rapidez angular de 35.0 rad/s. Encuentre la magnitud del momento angular de cada objeto: a) un aro, b) un cilindro sólido, c) una esfera sólida y d) una cáscara esférica hueca.
55. a) Calcule el momento angular de la Tierra que se presenta de su movimiento de rotación sobre su eje, tratando a la Tierra como esfera sólida uniforme. b) Calcule el momento angular de la Tierra que se presenta de su movimiento orbital alrededor del Sol, tratando a la Tierra como partícula.

56. **CIC** Una bala de 0.005 00 kg viaja horizontalmente con una rapidez de 1.00×10^3 m/s encajándose a 10.0 cm de la bisagra de una puerta de 18.0 kg, como se ve en la figura P8.56. La puerta de 1.00 m de ancho está libre para girar alrededor de sus bisagras. a) Antes de que golpee la puerta, ¿tiene la bala momento angular relativo al eje de rotación de la puerta? Explique. b) ¿La energía mecánica se conserva en esta colisión? Responda sin hacer un cálculo. c) ¿A qué rapidez angular la puerta gira inmediatamente después de la colisión? (La puerta tiene el mismo momento de inercia que una barra con eje en un extremo.) d) Calcule la energía del sistema puerta-bala y determine si es menor o igual a la energía cinética de la bala antes de la colisión.

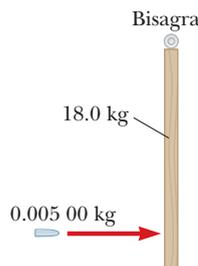


Figura P8.56 Vista aérea de una bala impactando una puerta.

57. Una barra rígida ligera de 1.00 m de longitud ℓ rota alrededor de un eje perpendicular a su longitud y que pasa a través de su centro, según las indicaciones de la figura P8.45. Dos partículas de masas 4.00 kg y 3.00 kg están conectadas con los extremos de la barra. ¿Cuál es el momento angular del sistema si la rapidez de cada partícula es 5.00 m/s? (Desprecie la masa de la barra.)
58. El cometa Halley se mueve alrededor del Sol en una órbita elíptica, con su mayor acercamiento al Sol a 0.59 unidades astronómicas y su mayor distancia a 35 unidades astronómicas (1 unidad astronómica es la distancia del Sol de la Tierra). Si la rapidez del cometa en el punto más cercano es 54 km/s, ¿cuál es su rapidez cuando está más alejado del Sol? Usted puede despreciar cualquier cambio en la masa del cometa y suponer que su momento angular alrededor del Sol se conserva.
59. **S** Una barra rígida, sin masa, tiene acopladas tres partículas con masas iguales, como se muestra en la figura P8.59. La barra puede girar libremente en un plano vertical alrededor de un eje perpendicular a ella sin fricción a través del punto P y se libera a partir del reposo en posición horizontal en el instante $t = 0$. Suponiendo que se conoce m y d , encontrar a) el momento de inercia del sistema (la barra más partículas) sobre el eje, b) el torque que actúa sobre el sistema en el instante $t = 0$, c) la aceleración angular del sistema en $t = 0$, d) la aceleración lineal de la partícula 3 a $t = 0$, e) la energía cinética máxima del sistema, f) la velocidad angular máxima alcanzada por la barra, g) el máximo momento angular del sistema y h) la velocidad máxima de traslación alcanzada por la partícula 2.

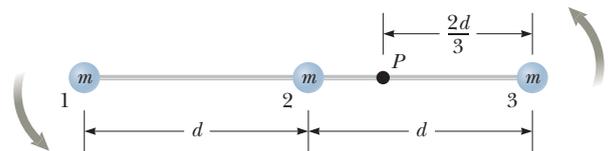


Figura P8.59

60. **M** Una mujer de 60.0 kg está parada en el borde de una plataforma horizontal que tiene un momento de inercia de $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y un radio de 2.00 m. La plataforma giratoria está inicialmente en reposo y libre para rotar alrededor de un eje vertical sin fricción que pasa por su centro. La mujer comienza a caminar alrededor del borde en el sentido de las manecillas del reloj (visto desde arriba del sistema) a una rapidez constante de 1.50 m/s en relación con la Tierra. a) ¿En qué dirección y con qué rapidez angular gira la plataforma? b) ¿Cuánto trabajo hace la mujer para ponerse en movimiento ella misma y la plataforma?
61. Un cilindro sólido horizontal de masa 10.0 kg y radio 1.00 m rota con una rapidez angular de 7.00 rad/s alrededor de un eje vertical fijo que pasa por su centro. Un pedazo de masilla de 0.250 kg que se deja caer verticalmente sobre el cilindro en un punto a 0.900 m del centro de rotación se pega al cilindro. Determine la rapidez angular final del sistema.

62. Un estudiante que se sienta en una silla giratoria sostiene dos objetos de 3.0 kg. Cuando sus brazos están extendidos horizontalmente, los objetos están a 1.0 m del eje de rotación y él rota con una rapidez angular de 0.75 rad/s. El momento de inercia del estudiante más la silla es $3.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ y se supone constante. El estudiante entonces jala los objetos horizontalmente a 0.30 m del eje de rotación. a) Encuentre la nueva rapidez angular del estudiante. b) Encuentre la energía cinética del estudiante antes y después de que los objetos sean acercados al eje de rotación.

63. El disco de la figura P8.63 tiene una masa de 0.120 kg. Su distancia original del centro de rotación es 40.0 cm y se mueve con una rapidez de 80.0 cm/s. La cuerda se jala 15.0 cm hacia abajo a través del agujero en la tabla sin fricción. Determine el trabajo hecho sobre el disco. *Sugerencia:* Considere el cambio en la energía cinética del disco.

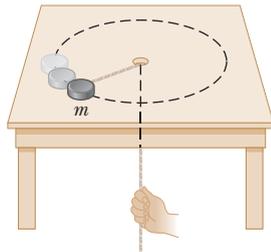


Figura P8.63

64. Una estación espacial en forma de una rueda gigante tiene un radio de 100 m y un momento de inercia de $5.00 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Una tripulación de 150 personas vive en el borde y la estación está rotando de modo que el equipo experimente una aceleración aparente de $1g$ (figura P8.64). Cuando 100 personas se trasladan al centro de la estación para una reunión, la rapidez angular cambia. ¿Qué aceleración aparente experimentan quienes se quedan en el borde? Suponga una masa promedio de 65.0 kg para los miembros de la tripulación.

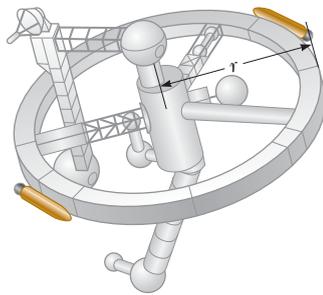


Figura P8.64

65. **C/C S** Un cilindro con momento de inercia I_1 rota con velocidad angular ω_0 alrededor de un eje vertical sin fricción. Un segundo cilindro con momento de inercia I_2 que inicialmente no gira, cae sobre el primer cilindro (figura P8.65). Dado que las superficies son ásperas, los dos cilindros alcanzan finalmente la misma rapidez angular ω . a) Calcule ω . b) Demuestre que la energía cinética se pierde en esta situación y calcule la razón entre la energía cinética final y la inicial.

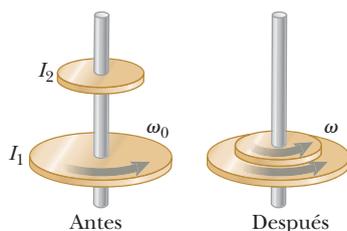


Figura P8.65

66. **M** Una partícula de masa 0.400 kg se une a la marca de 100 cm de una regla de un metro y masa de 0.100 kg. La regla gira sobre una mesa horizontal, sin fricción con una velocidad angular de 4.00 rad/s. Calcular el momento angular del sistema cuando la regla se gira alrededor de un eje (a) perpendicular a la mesa a través de la marca de 50.0 cm y b) perpendicular a la mesa a través de la marca de 0 cm.

Problemas adicionales

67. **PG** Una hélice típica de una turbina para generar electricidad a partir del viento se compone de tres hojas como se muestra en la figura P8.67. Cada hoja tiene una longitud de $L = 35 \text{ m}$ y una masa $m = 420 \text{ kg}$. La hélice gira a una velocidad de 25 rev/min. a) Convertir la velocidad angular de la hélice a las unidades de rad/s. Buscar b) el momento de inercia de la hélice sobre el eje de rotación y c) la energía cinética total de la hélice.

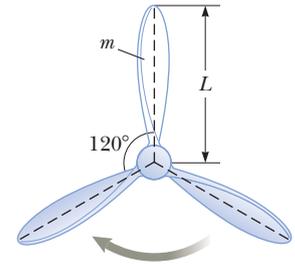


Figura P8.67

68. La figura P8.68 muestra un martillo de uña utilizándose para sacar un clavo de una tabla horizontal. Si se ejerce una fuerza de magnitud 150 N horizontalmente como se muestra, encuentre a) la fuerza ejercida por el martillo sobre el clavo y b) la fuerza ejercida por la superficie sobre el punto de contacto con la cabeza del martillo. Suponga que la fuerza que ejerce el martillo sobre el clavo es paralela a éste y perpendicular al vector de posición desde el punto de contacto.

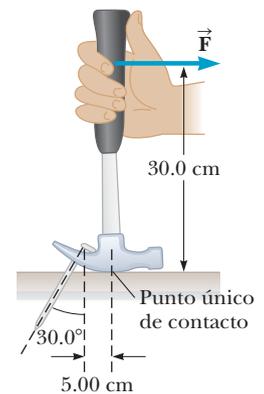


Figura P8.68

69. **C/C** Un niño de 40.0 kg está parado en un extremo de un bote de 70.0 kg y de 4.00 m de largo (figura P8.69). El bote está inicialmente a 3.00 m del embarcadero. El niño ve a una tortuga en una roca más allá del extremo lejano del bote y procede a caminar para atrapar a la tortuga. a) Despreciando la fricción entre el bote y el agua, describa el movimiento del sistema (niño-bote). b) ¿Dónde

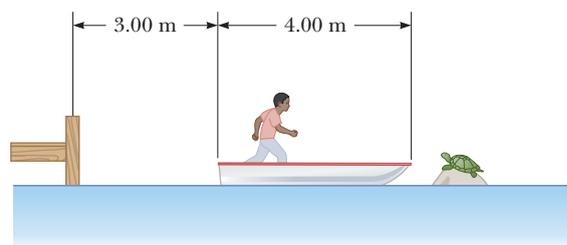


Figura P8.69

estará el niño en relación con el embarcadero cuando alcanza el extremo lejano del bote? c) ¿Atrapará la tortuga? (Suponga que él puede alcanzar 1.00 m hacia fuera del extremo del bote.)

70. Un objeto de masa $M = 12.0 \text{ kg}$ se ata a una cuerda que se enrolla alrededor de una rueda de radio $r = 10.0 \text{ cm}$ (figura P8.70). La aceleración medida del objeto hacia abajo por la pendiente sin fricción es de $a = 2.00 \text{ m/s}^2$, y el plano inclinado forma un ángulo $\theta = 37.0^\circ$ con la horizontal. Si se supone que el eje de la rueda es sin fricción, determine a) la tensión en la cuerda, b) el momento de inercia de la rueda y c) la rapidez angular de la rueda 2.00 s después de que comience a rotar, a partir del reposo.

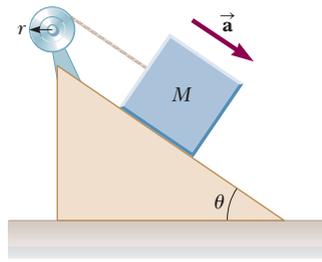


Figura P8.70

71. Una escalera uniforme de longitud L y de peso w está inclinada contra una pared vertical. El coeficiente de fricción estática entre la escalera y el piso es igual que entre la escalera y la pared. Si este coeficiente de fricción estática es $\mu_s = 0.500$, determine el ángulo más pequeño que la escalera puede formar con el piso sin deslizarse.

72. Dos astronautas (figura P8.72), cada uno de masa 75.0 kg , están conectados por una cuerda de 10.0 m con masa insignificante. Están aislados en el espacio, moviéndose en círculos alrededor del punto medio entre ellos a una rapidez de 5.00 m/s . Tratando a los astronautas como partículas, calcule a) la magnitud de la cantidad de movimiento angular y b) la energía rotatoria del sistema. Cuando tiran de la cuerda, los astronautas acortan la distancia entre ellos a 5.00 m . c) ¿Cuál es la nueva cantidad de movimiento angular del sistema? d) ¿Cuáles son sus nuevas rapideces? e) ¿Cuál es la nueva energía rotatoria del sistema? f) ¿Cuánto trabajo es hecho por los astronautas al acortar la cuerda?

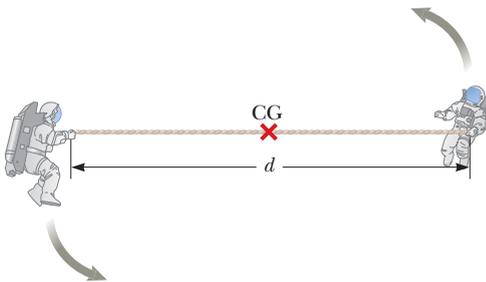


Figura P8.72 (Problemas 72 y 73)

73. **S** Esta es una versión simbólica del problema 72. Dos astronautas (figura P8.72), cada uno de masa M , están conectados por una cuerda de longitud d y masa despreciable. Están aislados en el espacio, moviéndose en círculos alrededor del punto medio entre ellos a una rapidez v . a) Calcule la magnitud de movimiento angular del siste-

ma tratando a los astronautas como partículas. b) Calcule la energía rotatoria del sistema. Al tirar de la cuerda, los astronautas acortan la distancia entre ellos a $d/2$. c) ¿Cuál es la nueva cantidad de movimiento angular del sistema? d) ¿Cuáles son sus nuevas rapideces? e) ¿Cuál es la nueva energía rotatoria del sistema? f) ¿Cuánto trabajo es hecho por los astronautas al acortar la cuerda?

74. Dos lavadores de ventanas, Roberto y José, están en un andamio de 3.00 m de largo y 345 N sostenido por dos cables unidos a sus extremos. Roberto pesa 750 N y está parado a 1.00 m del extremo izquierdo, como se muestra en la figura P8.74. A 2 m del extremo izquierdo está el equipo de lavado, cuyo peso es de 500 N . José está a 0.500 m del extremo derecho y pesa 1000 N . Dado que el andamio está en equilibrio rotatorio y de traslación, ¿cuáles son las fuerzas en cada cable?

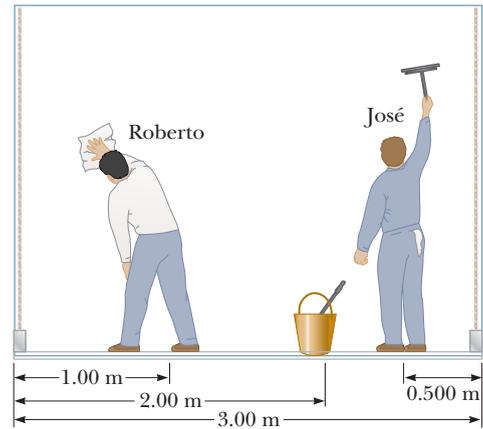


Figura P8.74

75. Una barra uniforme de longitud $\ell = 1.30 \text{ m}$ y 2.35 kg se mantiene en una posición horizontal por tres resortes verticales como se muestra en la figura P8.75. Los dos resortes de abajo se comprimen y ejercen fuerzas hacia arriba de magnitud $F_1 = 6.80 \text{ N}$ y $F_2 = 9.50 \text{ N}$, respectivamente, sobre la barra. Encuentre a) la fuerza F_3 ejercida por el muelle superior de la barra y b) la posición x del resorte superior que mantener la barra en equilibrio.

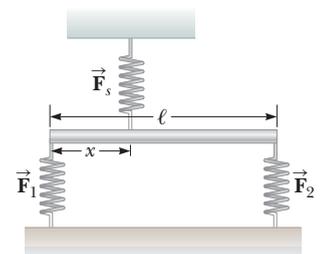


Figura P8.75

76. **CIC S** Una barra ligera de longitud $2L$ está libre de rotar en un plano vertical sobre un pivote sin fricción que pasa por su centro. Una partícula de masa m_1 está unida en un extremo de la barra, y una masa m_2 está en el extremo opuesto, donde $m_1 > m_2$. A partir del reposo, el sistema se saca de su posición vertical como se muestra en la figura P8.76a (página 274) y en un tiempo después el sistema está rotando en la posición mostrada en la figura P8.76b. Tome el punto de referencia

de la energía potencial gravitacional en el pivote. a) Encuentre una expresión para la energía mecánica total del sistema en la posición vertical. b) Encuentre una expresión para la energía mecánica total en la posición rotada mostrada en la figura P8.76b. c) Usando el hecho de que la energía mecánica del sistema se conserva, ¿cómo determinaría usted la rapidez angular ω del sistema en la posición rotada? d) Encuentre la magnitud del torque sobre el sistema en la posición vertical y en la posición rotada. ¿Es constante el torque? Explique lo que implican estos resultados con respecto al momento angular del sistema. e) Encuentre una expresión para la magnitud de la aceleración angular del sistema en la posición rotada. ¿Su resultado tiene sentido cuando la barra es horizontal? ¿Cuándo es vertical? Explique.

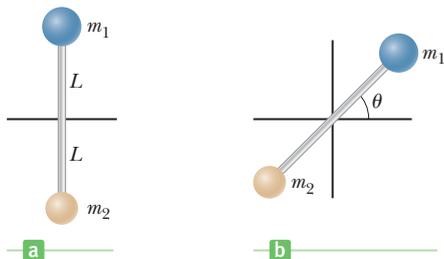


Figura P8.76

77. **C/C** Un cable de la luz pasa por una polea ligera sin fricción. Un extremo se sujeta a un racimo de plátanos de masa M y un mono de masa M se aferra al otro extremo (figura P8.77). El mono se sube la cuerda en un intento por llegar a las bananas. a) Trate el sistema como un conjunto de mono, plátanos, cuerda y polea, encuentre el torque neto del sistema alrededor del eje de la polea. b) Usando el resultado del inciso a), determine el momento angular total sobre el eje de la polea y describa el movimiento del sistema. c) ¿El mono alcanza las bananas antes de que se atoren en la polea?



Figura P8.77

78. Un motor eléctrico gira un volante de inercia por medio de una correa de transmisión que une a una polea en el motor con una polea que está rígidamente unida al

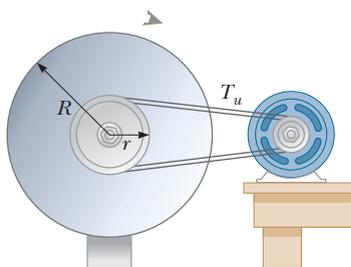


Figura P8.78

volante, como se muestra en la figura P8.78. El volante es un disco uniforme, con una masa de 80.0 kg y un radio $R = 0.625$ m. Este gira en un eje sin fricción. Su polea tiene una masa mucho más pequeña y un radio $r = 0.230$ m. La tensión T_u en la parte superior (tensa) del segmento de la banda es de 135 N y el volante tiene una aceleración angular horaria de 1.67 rad/s^2 . Determine la tensión en la parte inferior (holgura) del segmento de la banda.

79. **BIO** En fisiología del ejercicio a veces es importante determinar la localización del centro de gravedad de una persona. Esto puede hacerse con el arreglo mostrado en la figura P8.79. Un tablón ligero se apoya en dos básculas que indican $F_{g1} = 380 \text{ N}$ y $F_{g2} = 320 \text{ N}$. Las básculas están separadas a una distancia de 2.00 m. ¿A qué distancia de los pies de la mujer está su centro de gravedad?

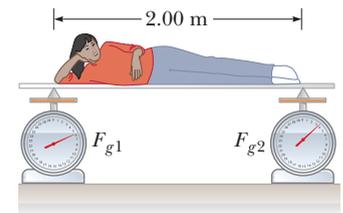


Figura P8.79

80. **S** Una varilla delgada y uniforme de longitud L y masa M puede girar libremente sobre un eje sin fricción que pasa por uno de sus extremos (figura P8.80). La varilla se libera desde el reposo en posición horizontal. a) ¿Cuál es la velocidad de su centro de gravedad cuando la barra alcanza su posición más baja? b) ¿Cuál es la velocidad tangencial del punto más bajo de la barra cuando está en posición vertical?

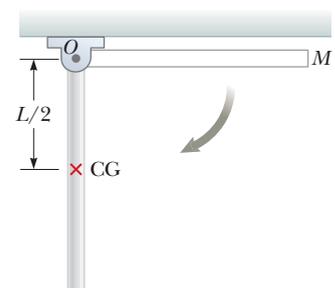


Figura P8.80

81. **S** Un cilindro sólido uniforme de masa M y radio R gira sobre un eje horizontal sin fricción (figura P8.81). Dos objetos con masas iguales m cuelgan de las cuerdas ligeras enrolladas alrededor del cilindro. Si el sistema parte del reposo, encuentre a) la tensión en cada cuerda y b) la aceleración de cada objeto después de que han descendido una distancia h .

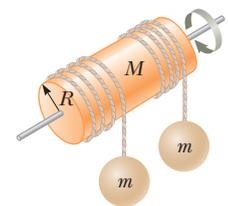


Figura P8.81

82. **C/C S** Un pintor sube una escalera que se inclina contra una pared lisa. A cierta altura, la escalera está a punto de deslizarse. a) Explique por qué la fuerza ejercida por la pared vertical sobre la escalera es horizontal. b) Si la escalera de longitud L se inclina en ángulo θ con la horizontal, ¿cuál es el brazo de palanca para esta fuerza horizontal con el eje de la rotación tomado en la base de la escalera? c) Si la escalera es uniforme, ¿cuál es el brazo de palanca para la fuerza de la gravedad que actúa sobre la escalera? d) Si la masa del pintor es 80 kg, $L = 4.0$ m, la masa de la escalera de 30 kg, $\theta = 53^\circ$ y el coeficiente de

fricción entre el suelo y la escalera es 0.45, encuentre la distancia máxima que el pintor puede subir encima de la escalera.

83. Un *lobo guerrero* o *catapulta*, es un dispositivo usado durante la edad media para lanzar rocas a los castillos y ahora usado a veces para bajar pianos. Una catapulta simple se muestra en la figura P8.83. Modélela como una barra rígida de masa insignificante de 3.00 m de largo y partículas acopladas de masas $m_1 = 0.120$ kg y $m_2 = 60.0$ kg en sus extremos. Puede girar sobre un eje horizontal sin fricción perpendicular a la barra y a 14.0 cm de la partícula de masa más grande. La barra se lanza a partir del reposo en una orientación horizontal. Encuentre la rapidez máxima que alcanza el objeto de masa más pequeña.

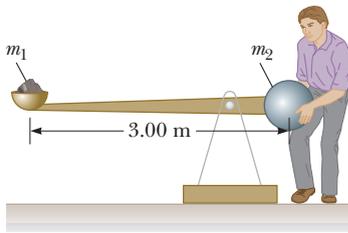


Figura P8.83

84. Una cuerda se enrolla alrededor de un cilindro uniforme de masa M y de radio R . El cilindro se suelta a partir del reposo, con la cuerda vertical y su extremo superior atado a una barra fija (figura P8.84). Demuestre que a) la tensión en la cuerda es un tercio del peso del cilindro, b) la magnitud de la aceleración del centro de gravedad es $2g/3$ y c) la rapidez del centro de gravedad es $(4gh/3)^{1/2}$ después de que el cilindro ha descendido la distancia h . Verifique su respuesta en el inciso c) con el enfoque de la energía.
85. **BIO El cristo** Cuando un gimnasta que pesa 750 N ejecuta “el cristo” como en la figura P8.85a, los músculos primarios involucrados para soportar esta posición son los dorsales y los pectorales mayores (“mascotas”). Los anillos ejercen una fuerza ascendente sobre los brazos y soportan el peso del gimnasta. La fuerza ejercida por el empalme de los hombros y sobre el brazo es \vec{F}_s , mientras que los dos músculos ejercen una fuerza total \vec{F}_m sobre el brazo. Estime la magnitud de la fuerza \vec{F}_m . Observe que un anillo soporta la mitad del peso del gimnasta, que es de 375 N según lo indicado en la figura P8.85b. Suponga que la fuerza \vec{F}_m , actúa en un ángulo de 45° debajo de la horizontal a una distancia de 4.0 cm del empalme del hombro. En su estimación, tome la distancia del empalme del hombro a la mano como de $L = 70$ cm y no haga caso del peso del brazo.

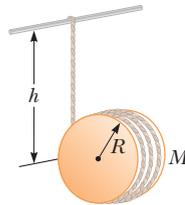
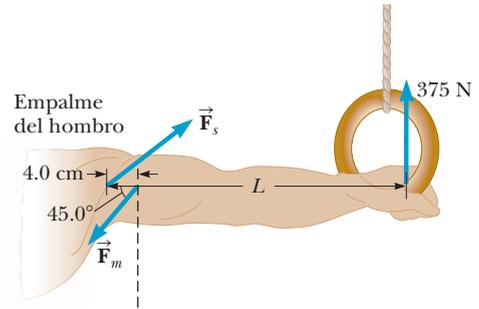


Figura P8.84



a



b

Figura P8.85

86. **BIO** En una situación de emergencia, una persona con un brazo roto ata una correa desde su mano para engancharla de su hombro como se muestra en la figura P8.86. Su antebrazo de 1.60 kg permanece en una posición horizontal y la correa forma un ángulo de $\theta = 50.0^\circ$ con la horizontal. Supongamos que el antebrazo es uniforme, tiene una longitud $\ell = 0.320$ m, suponga además, que el músculo bíceps se relaja e ignore la masa y la longitud de la mano. Calcule: a) la tensión en la correa y b) los componentes de la fuerza de reacción ejercida por el húmero en el antebrazo.

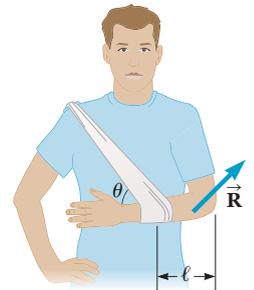


Figura P8.86

87. Una masa $m_1 = 4.00$ kg está conectada por una cuerda ligera con otra masa $m_2 = 3.00$ kg sobre una superficie lisa (figura P8.87). La polea rota sobre un eje sin fricción y tiene un momento de inercia de 0.500 kg \cdot m² y un radio de 0.300 m. Si se supone que la cuerda no se desliza en la polea, halle a) la aceleración de las dos masas y b) las tensiones T_1 y T_2 .
88. **CIC** Un mono de 10.0 kg sube una escalera uniforme con un peso $w = 1.20 \times 10^2$ N y longitud $L = 3.00$ m según las indicaciones de la figura P8.88. (página 276). La escalera se reclina contra la pared en un ángulo $\theta = 60.0^\circ$. Los extremos inferiores y superiores de la escalera descansan sobre superficies sin fricción, con el extremo inferior sujetado a la pared por una cuerda horizontal que puede soportar una tensión máxima de 80.0 N. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la escalera. b) Encuentre

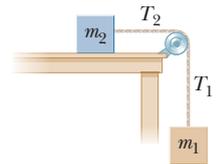


Figura P8.87

la fuerza normal ejercida por la parte baja de la escalera. c) Encuentre la tensión en la cuerda cuando el mono está a dos tercios encima de la escalera. d) Encuentre la distancia máxima d que el mono puede subir encima de la escalera antes de que la cuerda se rompa. e) Si la superficie horizontal fuera áspera y se quitara la cuerda, ¿cómo cambiaría usted su análisis del problema y qué otra información necesitaría para contestar a los incisos c) y d)?

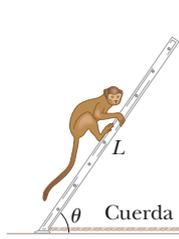


Figura P8.88

89. Una esfera de 3.2 kg está suspendida de una cuerda que pasa sobre una polea de 1.8 kg y 3.8 cm de radio. La cuerda está conectada a un resorte cuya constante de fuerza es $k = 86$ N/m, como en la figura P 8.89.

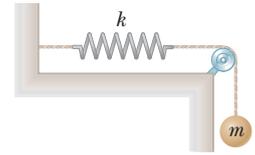


Figura P8.89

Suponga que la polea es un disco sólido. a) Si la esfera se suelta desde el reposo con el resorte sin estirar, ¿qué distancia cae la esfera antes de detenerse? b) Determine la velocidad de la esfera después de haber caído 25 cm.



Los zapatos flotantes de gran tamaño permiten que este hombre “camine” sobre el agua, utilizando la fuerza de empuje, como consecuencia de las diferencias de presión en el líquido. Los zapatos se hunden hasta que el peso del agua desplazada es igual al peso de la carga.

JENS B. TTNER/dpa/Landov

Sólidos y fluidos

9

Existen cuatro estados de la materia conocidos: sólidos, líquidos, gases y plasmas. En la mayor parte del Universo, los plasmas —sistemas de partículas cargadas que interactúan electromagnéticamente— son los más comunes. En nuestro ambiente sobre la Tierra, predominan los sólidos, líquidos y gases.

El entendimiento de las propiedades fundamentales de estos distintos estados de la materia es importante en todas las ciencias, ingeniería y medicina. Existen fuerzas que provocan tensión en los sólidos que puede torcerlos, deformarlos y romperlos, sin importar si están hechos de metal o hueso. Los fluidos bajo presión pueden realizar trabajos o pueden transportar nutrientes y soluciones esenciales como el flujo sanguíneo a través de nuestras arterias y venas. El flujo de gases puede provocar diferencias de presión que son capaces de levantar enormes cargamentos en aviones o el techo de una casa durante un huracán. Plasmas a altas temperaturas creados en reactores de fusión podrán, algún día, permitir a la Humanidad aprovechar la fuente de energía solar.

El estudio de cualquiera de estos estados de la materia es en sí, una disciplina vasta. Aquí, se introducirán las propiedades básicas de los sólidos y líquidos, incluyendo al final algunas propiedades de los gases. Adicionalmente, se realiza un breve estudio de la tensión superficial, la viscosidad, la ósmosis y la difusión.

9.1 Estados de la materia

La materia se clasifica normalmente al encontrarse en uno de tres estados: **sólido**, **líquido** o **gas**. Frecuentemente, este sistema de clasificación se extiende para incluir un cuarto estado de la materia llamado **plasma**.

Cada día, la experiencia nos enseña que un sólido tiene un volumen y forma definidos. Un ladrillo, por ejemplo, mantiene su peculiar forma y tamaño en todo momento. Un líquido tiene un volumen definido, pero no una forma definida. Cuando se llena el tanque de una cortadora de césped, la gasolina cambia su forma: de aquella del contenedor original a la forma del tanque; sin embargo, el volumen no cambia. Un gas se diferencia de

- 9.1 Estados de la materia
- 9.2 Densidad y presión
- 9.3 Deformación de sólidos
- 9.4 Variación de la presión con la profundidad
- 9.5 Mediciones de la presión
- 9.6 Fuerzas de empuje y principio de Arquímedes
- 9.7 Fluidos en movimiento
- 9.8 Otras aplicaciones de la dinámica de fluidos
- 9.9 Tensión superficial, acción capilar y flujo de fluidos viscosos
- 9.10 Fenómenos de transporte



Cristales de cuarzo natural (SiO_2), uno de los minerales más comunes de nuestro planeta. Estos cristales se emplean para hacer lentes y prismas especiales y en ciertas aplicaciones electrónicas.

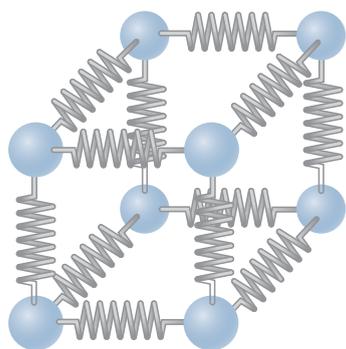


Figura 9.1 Modelo de una porción de un sólido. Los átomos (esferas) se imaginan como unidos por resortes que representan la naturaleza elástica de las fuerzas interatómicas. Un sólido consiste en billones de porciones como ésta, con resortes que los conectan a todos.

los sólidos y líquidos en que no tiene forma ni volumen definidos; no obstante, dado que el gas puede fluir, comparte muchas propiedades con los líquidos.

Toda la materia está compuesta por alguna distribución de átomos. Los átomos en un sólido, unidos por fuerzas que son principalmente eléctricas, están localizados en posiciones específicas con respecto a unos y otros y vibran sobre dichas posiciones. A bajas temperaturas, la vibración es poca y los átomos pueden considerarse esencialmente fijos. Cuando se introduce energía al material, la vibración aumenta. Un átomo que vibra puede verse como si estuviese unido a otros átomos vecinos por medio de resortes que limitan la posición a un estado de equilibrio. Un conjunto de dichos átomos y resortes imaginarios se muestra en la figura 9.1. Es posible imaginar fuerzas externas aplicadas a los resortes cuando éstos se comprimen. Cuando dichas fuerzas son eliminadas, el sólido tiende a regresar a su forma y tamaño originales. En consecuencia, se dice que el sólido tiene *elasticidad*.

Los sólidos pueden clasificarse ya sea como cristalinos o amorfos. En un **sólido cristalino**, los átomos tienen una estructura ordenada. Por ejemplo, en un cristal de cloruro de sodio (sal de mesa común), los átomos de cloro y sodio se sitúan alternadamente en las esquinas de un cubo, como se muestra en la figura 9.2a. En un **sólido amorfo**, como el vidrio, los átomos están arreglados casi de manera aleatoria, como se ve en la figura 9.2b.

Para cualquier sustancia, el estado líquido existe a temperaturas mayores que en el estado sólido. Las fuerzas intermoleculares en un líquido no son lo suficientemente grandes para mantener las moléculas en posiciones fijas, por lo que éstas deambulan en forma aleatoria a través del líquido (figura 9.2c). Tanto sólidos como líquidos comparten la propiedad de que cuando se les intenta comprimir, grandes fuerzas atómicas repulsivas actúan internamente para resistir la compresión.

En estado gaseoso, las moléculas están en constante movimiento aleatorio y ejercen sólo fuerzas débiles entre ellas. La distancia promedio entre las moléculas en un gas es bastante grande comparada con el tamaño de éstas. Ocasionalmente, las moléculas colisionan entre ellas, pero la mayor parte del tiempo se mueven casi en completa libertad sin interacción alguna. Como resultado de esto, a diferencia de los sólidos y líquidos, los gases pueden comprimirse fácilmente. Se hablará más acerca de los gases en los capítulos siguientes.

Cuando un gas es calentado a altas temperaturas, muchos de los electrones que rodean cada átomo son liberados del núcleo. El sistema resultante es una colección de partículas libres cargadas eléctricamente: electrones cargados negativamente y iones cargados positivamente. Un estado de la materia altamente ionizado que contiene cantidades iguales de cargas positivas y cargas negativas es llamado **plasma**. A diferencia de un gas neutral, las fuerzas eléctricas y magnéticas de largo alcance permiten a los constituyentes del plasma interactuar entre ellos. Los plasmas se encuentran dentro de las estrellas y en discos añadidos alrededor de hoyos negros, por ejemplo, y son mucho más comunes que los estados sólido, líquido y gaseoso, ya que existen muchas más estrellas alrededor que otra forma de materia celeste.

La materia común, sin embargo, constituye sólo cerca de 5% de toda la materia en el Universo. Observaciones en los últimos años han apuntado a la existencia de una **materia oscura**

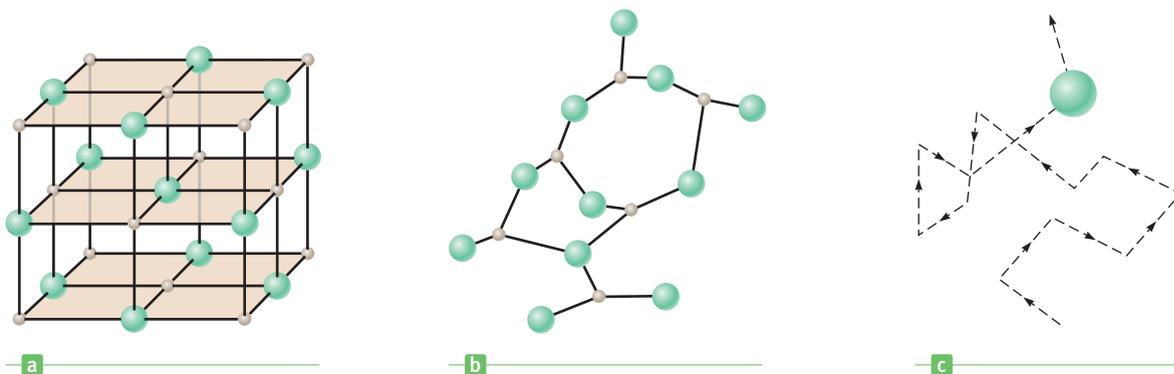


Figura 9.2 a) La estructura del NaCl , con iones de Na^+ (gris) y de Cl^- (verde) alternando en las esquinas de un cubo. b) En un sólido amorfo, los átomos se configuran aleatoriamente. c) Movimiento errático de la molécula en un líquido.

invisible, la cual afecta el movimiento de las estrellas que orbitan en el centro de las galaxias. La materia oscura podría comprender hasta 25% de la materia en el Universo, muchas veces más que la cantidad de materia común. Finalmente, la rápida aceleración del Universo en expansión podría conducir a un estado aún más misterioso de la materia llamado **energía oscura**, la cual podría constituir 70% de la materia en el Universo.

9.2 Densidad y presión

Masas iguales de aluminio y oro tienen una importante diferencia física: el aluminio ocupa un poco más de siete veces más espacio que el oro. Aunque las razones de la diferencia yacen en los niveles atómicos y nucleares, una simple medida de esta diferencia es el concepto de *densidad*.

La **densidad** ρ de una sustancia uniforme se define como su masa por unidad de volumen V :

$$\rho \equiv \frac{M}{V} \quad [9.1]$$

Unidades SI: kilogramo por metro cúbico (kg/m^3)

◀ Densidad

Para un objeto con una composición no uniforme, la ecuación 9.1 define una densidad promedio. Las unidades más comunes utilizadas para la densidad son los kilogramos por metro cúbico en el sistema SI y gramos por centímetro cúbico en el sistema cgs. La tabla 9.1 muestra la densidad de algunas sustancias. La densidad de la mayoría de líquidos y sólidos varía un poco con cambios en la temperatura y la presión; la densidad de los gases varía significativamente con dichos cambios. Bajo condiciones normales, la densidad de sólidos y líquidos es cerca de 1000 veces mayor que la densidad de los gases. Esta diferencia implica que el espaciamiento promedio entre las moléculas de un gas bajo condiciones normales es cerca de 10 veces mayor que en un sólido o un líquido.

La **gravedad específica** de una sustancia es la razón de su densidad entre la densidad del agua a 4°C, la cual es $1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$. (El tamaño del kilogramo fue definido en principio para que la densidad del agua fuera $1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ a 4°C.) Por definición, la gravedad específica es una cantidad adimensional. Por ejemplo, si la gravedad específica de una sustancia es 3.0, su densidad es $3.0(1.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3) = 3.0 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Examen rápido

9.1 Suponga que posee un metro cúbico de oro, dos metros cúbicos de plata y seis metros cúbicos de aluminio. Clasifíquelos de menor a mayor según su masa.

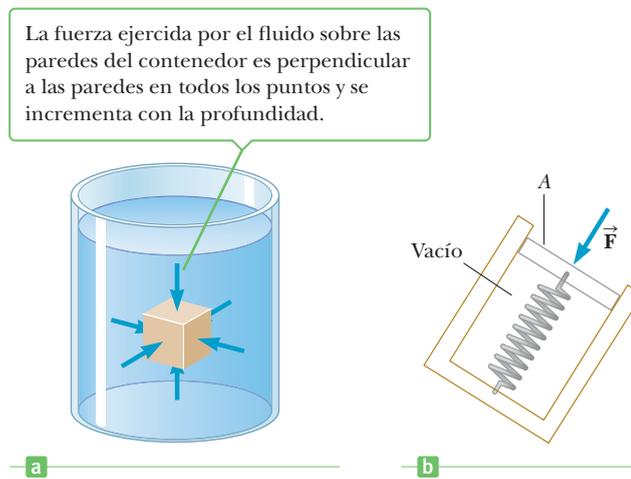
a) Oro, aluminio, plata b) Oro, plata, aluminio c) Aluminio, oro, plata d) Plata, aluminio, oro

Tabla 9.1 Densidades de algunas sustancias comunes

Sustancia	ρ (kg/m^3) ^a	Sustancia	ρ (kg/m^3) ^a
Hielo	0.917×10^3	Agua	1.00×10^3
Aluminio	2.70×10^3	Glicerina	1.26×10^3
Hierro	7.86×10^3	Alcohol etílico	0.806×10^3
Cobre	8.92×10^3	Benceno	0.879×10^3
Plata	10.5×10^3	Mercurio	13.6×10^3
Plomo	11.3×10^3	Aire	1.29
Oro	19.3×10^3	Oxígeno	1.43
Platino	21.4×10^3	Hidrógeno	8.99×10^{-2}
Uranio	18.7×10^3	Helio	8.99×10^{-1}

^a Todos los valores corresponden a temperaturas y presiones atmosféricas estándar (STP, *standard atmospheric pressure*), definidas como 0°C (273 K) y 1 atm (1.013×10^5 Pa). Para convertir a gramos por centímetro cúbico, multiplique por 10^{-3} .

Figura 9.3 a) La fuerza ejercida por un fluido sobre un objeto sumergido. b) Un dispositivo simple para medir la presión en un fluido.



Tip 9.1 Fuerza y presión

La ecuación 9.2 hace una clara distinción entre fuerza y presión. Otra distinción importante es que *la fuerza es un vector y la presión es un escalar*. No existe una dirección asociada con la presión, pero la dirección de la fuerza asociada con la presión es perpendicular a la superficie de interés.

La fuerza ejercida por el fluido sobre el objeto es siempre perpendicular a las superficies de éste, como se muestra en la figura 9.3a.

La presión en un punto específico en un fluido puede medirse por medio del dispositivo mostrado en la figura 9.3b: un cilindro vacío que encierra un pistón ligero conectado a un resorte previamente calibrado con pesos conocidos. Cuando el dispositivo se sumerge en un fluido, éste presiona hacia abajo el pistón y comprime el resorte hasta que la fuerza interna ejercida por el fluido es equilibrada por la fuerza externa ejercida por el resorte. Sea F la magnitud de la fuerza sobre el pistón y A el área en la parte superior de la superficie del pistón. Observe que la fuerza que comprime el resorte se dispersa sobre la totalidad del área, lo cual motiva la definición formal de presión:

Presión ►

Si F es la magnitud de una fuerza ejercida perpendicular a una superficie dada de área A , entonces la presión P es la fuerza dividida entre el área:

$$P \equiv \frac{F}{A} \quad [9.2]$$

Unidades SI: pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$)

La presión puede cambiar de un punto a otro, razón por la cual la presión en la ecuación 9.2 se llama promedio. Ya que la presión está definida como la fuerza por unidad de área, tiene como unidad el pascal (newtons por metro cuadrado). La unidad estándar en sistema inglés para la presión es la libra por pulgada cuadrada. La presión atmosférica al nivel del mar es de $14.7 \text{ lb}/\text{pulg}^2$, que en unidades del SI es $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$.

Como puede verse en la ecuación 9.2, el efecto de una fuerza dada depende crucialmente del área en la cual es aplicada. Un hombre de 700 N con zapatos de calle regulares puede pararse sobre un piso cubierto con vinilo sin dañar la superficie, pero sin embargo si utiliza zapatos de golf, los clavos de metal pueden dañar en gran medida el piso. Usando los clavos, la misma fuerza se concentra en un área menor, incrementando significativamente la presión en dicha área, resultando en una alta probabilidad de exceder la fuerza máxima que puede soportar el piso.

Las raquetas para nieve utilizan el mismo principio (figura 9.4). La nieve ejerce una fuerza normal hacia arriba sobre las raquetas para poder soportar el peso de la persona. De acuerdo con la tercera ley de Newton, esta fuerza hacia arriba está acompañada por una fuerza hacia abajo ejercida por las raquetas sobre la nieve. Si la persona utiliza raqueta para la nieve, la fuerza está distribuida a lo largo de toda el área de cada raqueta, por lo tanto la presión en cada punto es relativamente baja y, por ende, la persona no se hunde demasiado en la nieve.



Figura 9.4 Las raquetas para nieve evitan que la persona se hunda en nieve blanda porque la fuerza sobre ésta se extiende sobre una gran superficie, lo que reduce la presión sobre la superficie de la nieve.

■ FÍSICA APLICADA 9.1 El truco de la cama de clavos

Después de una emocionante pero exhaustiva lectura, un profesor de física se estira sobre una cama de clavos, tiende como se muestra en la figura 9.5, sin sufrir lesión alguna y sólo una incomodidad moderada. ¿Cómo es posible esto?

EXPLICACIÓN Si se trata de apoyar el peso completo sobre un solo clavo, la presión sobre el cuerpo es el peso dividido entre la pequeña área al final del clavo. La presión resultante es lo suficientemente grande para perforar la piel. Sin embargo, si el peso es distribuido entre varios cientos de clavos, como lo muestra el profesor, la presión es reducida considerablemente debido a que el área total que soporta el peso es el área total de todos los clavos en contacto con el cuerpo. (¿Por qué es más cómodo recostarse sobre una cama de clavos que sentarse en la misma cama? Extienda el razonamiento para demostrar si sería aún más incómodo estar de pie descalzo sobre una cama de clavos.) ■

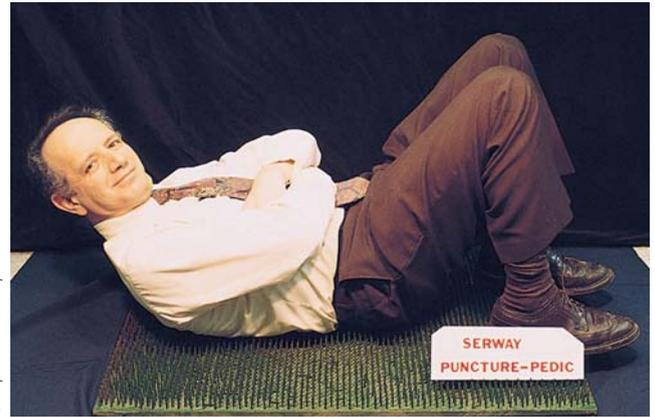


Figura 9.5 (Física aplicada 9.1) ¿Alguien tiene una almohada?

■ EJEMPLO 9.1 Presión y peso del agua

OBJETIVO Calcular la densidad y la presión por medio del peso.

PROBLEMA a) Calcule el peso de una columna cilíndrica de agua con una altura $h = 40.0$ m y radio $r = 1.00$ m. (Véase la figura 9.6.) b) Calcule la fuerza ejercida por el aire en un disco de radio de 1.00 m en la superficie del agua. c) ¿Qué presión a una profundidad de 40.0 m soporta la columna de agua?

ESTRATEGIA Para el inciso a), calcule el volumen y multiplíquelo por la densidad para obtener la masa de agua, luego multiplique la masa por g para el peso. El inciso b) requiere la sustitución en la definición de la presión. Sumando los resultados de los incisos a) y b) y dividiendo entre el área da la presión del agua en la parte inferior de la columna.

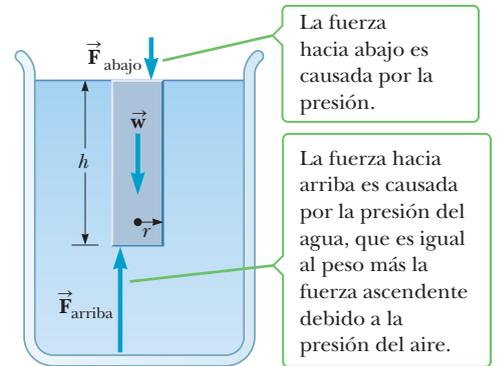


Figura 9.6 (Ejemplo 9.1)

SOLUCIÓN

a) Calcule el peso de una columna cilíndrica de agua con altura de 40.0 m y radio de 100 m.

Halle el volumen del cilindro:

$$V = \pi r^2 h = \pi (1.00 \text{ m})^2 (40.0 \text{ m}) = 126 \text{ m}^3$$

Multiplique el volumen por la densidad del agua para obtener la masa de agua en el cilindro:

$$m = \rho V = (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(126 \text{ m}^3) = 1.26 \times 10^5 \text{ kg}$$

Multiplique la masa por la aceleración de la gravedad g para obtener el peso w :

$$w = mg = (1.26 \times 10^5 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 1.23 \times 10^6 \text{ N}$$

b) Calcule la fuerza ejercida por el aire en un disco de radio 1.00 m en la superficie del lago.

Escriba la ecuación de la presión:

$$P \equiv \frac{F}{A}$$

Resuelva la ecuación de la presión de la fuerza y sustituya $A = \pi r^2$:

$$F = PA = P\pi r^2$$

Sustituya los valores:

$$F = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})\pi (1.00 \text{ m})^2 = 3.17 \times 10^5 \text{ N}$$

(continúa)

c) ¿Qué presión a una profundidad de 40.0 m soporta la columna de agua?

Escriba la segunda ley de Newton para la columna de agua:

$$-F_{\text{abajo}} - w + F_{\text{arriba}} = 0$$

Resuelva para la fuerza hacia arriba:

$$F_{\text{arriba}} = F_{\text{abajo}} + w = (3.17 \times 10^5 \text{ N}) + (1.23 \times 10^6 \text{ N}) = 1.55 \times 10^6 \text{ N}$$

Divida la fuerza entre parte de la zona para obtener la presión requerida:

$$P = \frac{F_{\text{arriba}}}{A} = \frac{1.55 \times 10^6 \text{ N}}{\pi(1.00 \text{ m})^2} = 4.93 \times 10^5 \text{ Pa}$$

COMENTARIOS Observe que la presión a una determinada profundidad se relaciona con la suma del peso del agua y la fuerza ejercida por la presión del aire en la superficie del agua. El agua a una profundidad de 40.0 m empuja hacia arriba para mantener la columna en equilibrio. Note también la importante función de la densidad en la determinación de la presión a una profundidad dada.

PREGUNTA 9.1 Una instalación gigante de almacenamiento de petróleo contiene el aceite a una profundidad de 40.0 m. ¿Cómo es la presión en la parte inferior del tanque en comparación con la presión a una profundidad de 40.0 m en el agua? Explique.

EJERCICIO 9.1 Una bañera rectangular grande se llena a una profundidad de 2.60 m con aceite de oliva, que tiene una densidad de 915 kg/m^3 . Si la bañera tiene una longitud de 5.00 m y 3.00 m de ancho, calcule a) el peso del aceite de oliva, b) la fuerza de presión del aire en la superficie del aceite y c) la presión ejercida hacia arriba por la parte inferior de la bañera.

RESPUESTAS a) $3.50 \times 10^5 \text{ N}$ b) $1.52 \times 10^6 \text{ N}$ c) $1.25 \times 10^5 \text{ Pa}$

9.3 Deformación de sólidos

Aunque los sólidos pueden considerarse como materia con un volumen y forma definidos, es posible cambiar estas características aplicando fuerzas externas. Una fuerza suficientemente grande puede romper o deformar permanentemente un objeto, pero por otro lado, cuando las fuerzas externas cesan, el objeto tiende a regresar a su forma y tamaño originales. Esto se reconoce como un *comportamiento elástico*.

Las propiedades elásticas de los sólidos se discuten en términos de tensión y deformación. La **tensión** es la fuerza por unidad de área que provoca un cambio en la forma del objeto; la **deformación** es una medida de la cantidad de cambio en la forma del objeto. Para tensiones lo suficientemente pequeñas, **la tensión es proporcional a la deformación** siendo la constante de proporcionalidad dependiente del material que se está deformando y de la naturaleza de la deformación. A esta constante de proporcionalidad se le conoce como **módulo de elasticidad**:

$$\text{tensión} = \text{módulo de elasticidad} \times \text{deformación} \quad [9.3]$$

El módulo de elasticidad es análogo a la constante del resorte; puede verse como la dureza del material: un material con un módulo de elasticidad grande es muy rígido y, por lo tanto, difícil de deformar. Existen tres relaciones que tienen la forma de la ecuación 9.3, correspondientes a la deformación de corte, de tensión y volumétrica. Todas ellas satisfacen a una ecuación similar a la de la ley de Hooke para resortes:

$$F = -k \Delta x \quad [9.4]$$

donde F es la fuerza aplicada, k es la constante del resorte y Δx es en esencia la cantidad de estiramiento o compresión del resorte.

Módulo de Young: elasticidad en longitud

Considere una barra larga de área de sección transversal A y longitud L_0 sujeta en uno de sus extremos (figura activa 9.7). Cuando una fuerza externa \vec{F} se aplica a lo largo de la barra, perpendicular a la sección transversal, fuerzas internas en la barra se oponen a la distorsión (“estiramiento”) que \vec{F} tiende a producir. Sin embargo, la barra mantiene

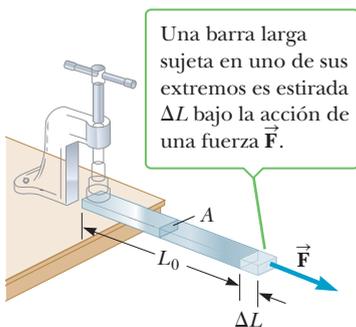


Figura activa 9.7 Una fuerza se aplica a una barra larga sujeta en un extremo.

un equilibrio en el cual: 1) su longitud es mayor que L_0 y 2) la fuerza externa se encuentra en equilibrio con las fuerzas internas. Bajo estas circunstancias, se dice que la barra está bajo un *esfuerzo o tensión*. Se define el **esfuerzo de tensión** como la razón entre la magnitud de la fuerza externa F y el área de sección transversal A . Las unidades en el SI del esfuerzo son el Newton por metro cuadrado (N/m^2), llamado **pascal (Pa)**, igual que la unidad de presión:

$$1 \text{ Pa} \equiv \text{N/m}^2$$

La **tensión de deformación** en este caso se define como la razón de cambio en la longitud ΔL a la longitud original L_0 y, por lo tanto se trata de una cantidad adimensional. Usando la ecuación 9.3, es posible obtener una expresión que relacione el esfuerzo de tensión y la tensión de deformación:

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L_0} \tag{9.5}$$

En esta ecuación, Y es la constante de proporcionalidad llamada **módulo de Young**. Observe que la ecuación 9.5 puede resolverse para F y escribirse en la siguiente forma $F = k \Delta L$, donde $k = YA/L_0$, lo cual la hace lucir justo como la ley de Hooke en la ecuación 9.4.

Un material con un módulo de Young grande es difícil de estirar o comprimir. Esta cantidad se utiliza típicamente para caracterizar el esfuerzo de una barra o un alambre bajo tensión o compresión. Debido a que la deformación es una cantidad adimensional, Y está dada en pascuales. En la tabla 9.2 se muestran valores representativos. Varios experimentos muestran que: 1) el cambio en longitud para una fuerza externa fija es proporcional a la longitud original y 2) que la fuerza necesaria para producir un esfuerzo dado es proporcional al área transversal. El valor del módulo de Young para un material dado depende de si el material se encuentra estirado o comprimido. Un fémur humano, por ejemplo, es más fuerte bajo tensión que bajo compresión.

Es posible exceder el **límite elástico** de una sustancia aplicando una tensión suficientemente grande (figura 9.8). En el límite elástico la curva deformación-tensión se desvía de la línea recta. Un material sujeto a una tensión más allá de este límite por lo regular no regresa a su longitud original cuando la fuerza externa cesa. Conforme la tensión se incrementa un poco más, éste sobrepasa la **fuerza máxima**: la tensión más grande que una sustancia puede soportar sin romperse. El **punto de ruptura** en materiales frágiles está justo después de la fuerza máxima. Para materiales dúctiles como el cobre y el oro, después de sobrepasar la fuerza máxima, el metal se adelgaza y se estira a esfuerzos menores antes de romperse.

Módulo cortante: elasticidad de forma

Otro tipo de deformación ocurre cuando un objeto está sujeto a una fuerza \vec{F} paralela a una de sus caras, mientras que la cara opuesta se mantiene fija por una segunda fuerza (figura activa 9.9a en la página 284). Si el objeto es originalmente un bloque rectangular, dicha fuerza paralela da como resultado un objeto con sección transversal en forma de paralelogramo. Este tipo de tensión es llamado **esfuerzo cortante**. Un libro empujado

Tabla 9.2 Valores representativos de módulos elásticos

Sustancia	Módulo de Young (Pa)	Módulo cortante (Pa)	Módulo volumétrico (Pa)
Aluminio	7.0×10^{10}	2.5×10^{10}	7.0×10^{10}
Hueso	1.8×10^{10}	8.0×10^{10}	—
Bronce	9.1×10^{10}	3.5×10^{10}	6.1×10^{10}
Cobre	11×10^{10}	4.2×10^{10}	14×10^{10}
Acero	20×10^{10}	8.4×10^{10}	16×10^{10}
Tungsteno	35×10^{10}	14×10^{10}	20×10^{10}
Vidrio	$6.5\text{-}7.8 \times 10^{10}$	$2.6\text{-}3.2 \times 10^{10}$	$5.0\text{-}5.5 \times 10^{10}$
Cuarzo	5.6×10^{10}	2.6×10^{10}	2.7×10^{10}
Cartílago de costilla	1.2×10^7	—	—
Caucho	0.1×10^7	—	—
Tendón	2×10^7	—	—
Agua	—	—	0.21×10^{10}
Mercurio	—	—	2.8×10^{10}

El pascal

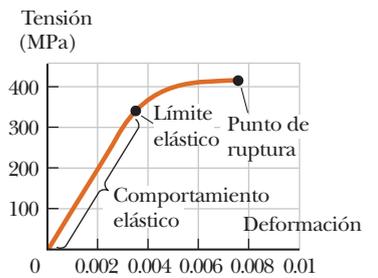


Figura 9.8 Curva deformación-tensión para un sólido elástico.

Figura activa 9.9 a) Deformación cortante en la que un bloque rectangular es deformado por una fuerza aplicada tangente a una de sus caras. b) Libro bajo un esfuerzo cortante.

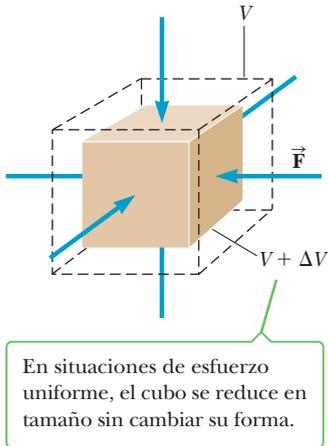
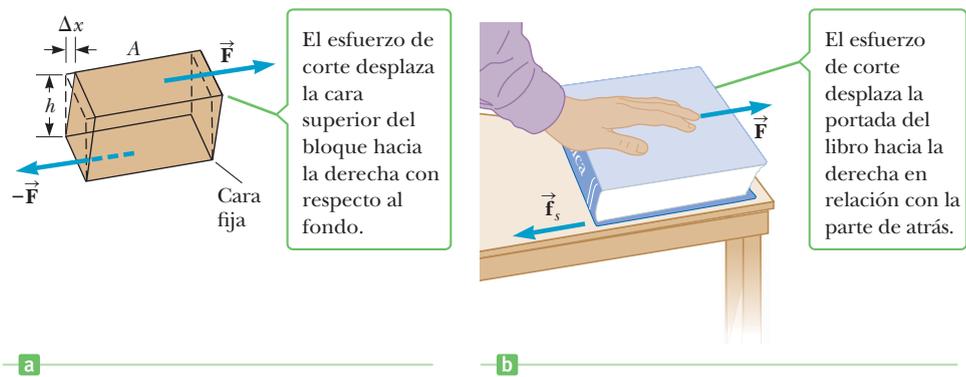


Figura activa 9.10 Cuando un sólido está bajo presión uniforme, experimenta un cambio en volumen, pero no en forma. Este cubo está comprimido por todos lados por fuerzas normales a sus seis caras. Las puntas de flecha de los vectores de fuerza en los lados del cubo que no son visibles están ocultos por el cubo.

Módulo volumétrico ►

de lado, como se muestra en la figura activa 9.9b, se encuentra bajo el efecto de un esfuerzo cortante. No existe un cambio en el volumen con este tipo de deformación. Es importante recordar que, en el esfuerzo cortante, la fuerza aplicada es *paralela* al área transversal, mientras que en el esfuerzo de tensión la fuerza es *perpendicular* al área transversal. Se define el **esfuerzo cortante** como F/A , la razón entre la magnitud de la fuerza paralela y el área A de la cara que es cortada. La deformación por esfuerzo cortante es la razón $\Delta x/h$, donde Δx es la distancia horizontal que la cara cortada es movida y h es la altura del objeto. El esfuerzo cortante y la deformación por esfuerzo cortante están relacionados mediante

$$\frac{F}{A} = S \frac{\Delta x}{h} \quad [9.6]$$

donde S es el **módulo cortante** (*shear modulus*) del material cuyas unidades son pascuales (fuerza por unidad de área). Observe nuevamente la similitud con la ley de Hooke.

Un material con un módulo cortante grande es difícil de doblar. El módulo cortante para algunos materiales representativos se muestra en la tabla 9.2.

Módulo volumétrico: volumen de elasticidad

El módulo volumétrico caracteriza la respuesta de una sustancia a una compresión uniforme. Supóngase que las fuerzas externas que actúan sobre un objeto son todas perpendiculares a la superficie sobre la cual actúan y están distribuidas uniformemente sobre la superficie del objeto (figura activa 9.10). Esto ocurre cuando un objeto es sumergido dentro de un fluido. Un objeto sujeto a este tipo de deformación sufre un cambio en el volumen pero no un cambio en la forma. La **tensión volumétrica** ΔP está definida como la razón entre la magnitud del cambio en la fuerza aplicada ΔF y la superficie de área A . A partir de la definición de presión en la sección 9.2, ΔP es también simplemente un cambio en la presión. La deformación de volumen es igual al cambio en volumen ΔV dividido entre el volumen original V . De nuevo, por medio de la ecuación 9.3, es posible relacionar la tensión volumétrica con la deformación de volumen por medio de la fórmula

$$\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} \quad [9.7]$$

Un material con un módulo volumétrico grande no se comprime fácilmente. Observe que se incluye un signo negativo en la definición de esta ecuación para garantizar que B sea siempre positivo. Un incremento en la presión (ΔP positivo) provoca un decremento en el volumen (ΔV negativo) y viceversa.

La tabla 9.2 muestra el valor de distintos módulos volumétricos para diferentes materiales. Si se consultan dichos valores en alguna otra fuente, puede encontrarse en su defecto el recíproco del módulo volumétrico llamado la **compresibilidad** del material. Observe en la tabla que tanto sólidos como líquidos tienen módulo volumétrico sin embargo; no existe el módulo de Young ni el módulo cortante para líquidos debido a que éstos simplemente fluyen cuando están sujetos a un esfuerzo de tensión o a un esfuerzo cortante.

■ EJEMPLO 9.2 Construido para durar

OBJETIVO Calcular la compresión debido al esfuerzo de tensión y a una carga máxima.

PROBLEMA En un edificio, una viga vertical de acero soporta una carga de 6.0×10^4 N. **a)** Si la longitud de la viga es de 4.0 m y su área de sección transversal es 8.0×10^{-3} m², encuentre la distancia que la viga es comprimida a lo largo de su longitud. **b)** ¿Qué carga máxima en newtons podría soportar la viga antes de fallar?

ESTRATEGIA La ecuación 9.3 se refiere al esfuerzo y la tensión de compresión y puede ser resuelta para ΔL , seguida de la sustitución de los valores conocidos. Para el inciso b), haga la tensión de compresión igual a la fuerza máxima del acero vista en la tabla 9.3. Resuelva para la magnitud de la fuerza, la cual es el peso total que la estructura puede soportar.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la cantidad de compresión de la viga.

Resuelva la ecuación 9.5 para ΔL y sustituya usando el valor del módulo de Young de la tabla 9.2:

$$\begin{aligned}\frac{F}{A} &= Y \frac{\Delta L}{L_0} \\ \Delta L &= \frac{FL_0}{YA} = \frac{(6.0 \times 10^4 \text{ N})(4.0 \text{ m})}{(2.0 \times 10^{11} \text{ Pa})(8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} \\ &= 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}\end{aligned}$$

b) Encuentre la carga máxima que puede soportar la viga.

Haga la tensión de esfuerzo de compresión igual a la fuerza máxima de la tabla 9.3 y resuelva para F :

$$\begin{aligned}\frac{F}{A} &= \frac{F}{8.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 5.0 \times 10^8 \text{ Pa} \\ F &= 4.0 \times 10^6 \text{ N}\end{aligned}$$

COMENTARIOS En el diseño de estructuras pesadas de cualquier tipo, siempre es necesario construir considerando un factor de seguridad. Nadie conduciría un automóvil sobre un puente que ha sido diseñado para soportar la fuerza mínima necesaria con el riesgo de colapsarse.

PREGUNTA 9.2 Clasifique de menor a mayor los siguientes materiales según la cantidad de incremento fraccionario de longitud debido al esfuerzo de tensión: hule, tungsteno, acero y aluminio.

EJERCICIO 9.2 Un cable usado para levantar materiales pesados como barras de acero debe ser lo suficientemente fuerte para resistir rupturas, incluso soportando cargas de 1.0×10^6 N. Por seguridad, el cable debe soportar el doble de esa carga. **a)** ¿Qué área de sección transversal debe tener el cable si está hecho de acero? **b)** ¿Cuánto se estirará un cable de 8.0 m si soporta una carga de 1.0×10^6 N?

RESPUESTAS a) 4.0×10^{-3} m² b) 1.0×10^{-2} m

Tabla 9.3 Resistencia máxima de materiales

Material	Resistencia a la tensión	Resistencia a la compresión (N/m ²)
Hierro	1.7×10^8	5.5×10^8
Acero	5.0×10^8	5.0×10^8
Aluminio	2.0×10^8	2.0×10^8
Hueso	1.2×10^8	1.5×10^8
Mármol	—	8.0×10^7
Ladrillo	1.0×10^6	3.5×10^7
Concreto	2.0×10^6	2×10^7

■ EJEMPLO 9.3 Lesiones de fútbol BIO

OBJETIVO Calcular el esfuerzo cortante.

PROBLEMA Un liniero defensivo de masa $M = 125$ kg se lanza a $v_i = 4.00$ m/s para bloquear a un mariscal de campo estacionario de masa $m = 85.0$ kg. El casco del liniero hace contacto directo con el fémur del mariscal. **a)** ¿Cuál es la rapidez v_f de los dos atletas inmediatamente después del contacto? Suponga una colisión lineal inelástica. **b)** Si la colisión dura 0.100 s,

(continúa)

estime la fuerza promedio ejercida sobre el fémur del mariscal. **c)** Si el área de sección transversal del fémur del mariscal es $5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, calcule el esfuerzo cortante ejercido sobre el hueso durante la colisión.

ESTRATEGIA La solución sigue tres pasos bien definidos. En el inciso a), utilice la conservación del momento lineal para calcular la velocidad final del sistema compuesto por el mariscal y el liniero. Seguido de esto, la rapidez calculada en el inciso a) puede usarse en el teorema de impulso-momento para obtener una estimación de la fuerza promedio ejercida sobre el fémur. El tercer paso es dividir la fuerza promedio entre el área de sección transversal del fémur y así obtener el esfuerzo cortante deseado.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál es la velocidad del sistema inmediatamente después del contacto?

Aplique la conservación del momento al sistema:

$$p_{\text{inicial}} = p_{\text{final}}$$

Sustituya las expresiones para los momentos inicial y final:

$$Mv_i = (M + m)v_f$$

Resuelva para la velocidad final v_f :

$$v_f = \frac{Mv_i}{M + m} = \frac{(125 \text{ kg})(4.00 \text{ m/s})}{125 \text{ kg} + 85.0 \text{ kg}} = 2.38 \text{ m/s}$$

b) Obtenga una estimación de la fuerza promedio ejercida en el fémur del mariscal.

Aplique el teorema impulso-momento:

$$F_{\text{prom}} \Delta t = \Delta p = Mv_f - Mv_i$$

Resuelva para la fuerza promedio ejercida sobre el fémur del mariscal:

$$F_{\text{prom}} = \frac{M(v_f - v_i)}{\Delta t} = \frac{(125 \text{ kg})(4.00 \text{ m/s} - 2.38 \text{ m/s})}{0.100 \text{ s}} = 2.03 \times 10^3 \text{ N}$$

c) Obtenga el esfuerzo cortante promedio ejercido en el fémur del mariscal.

Divida la fuerza promedio encontrada en b) entre la sección transversal del fémur:

$$\text{Esfuerzo de corte} = \frac{F}{A} = \frac{2.03 \times 10^3 \text{ N}}{5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 4.06 \times 10^6 \text{ Pa}$$

COMENTARIOS El esfuerzo cortante máximo de un fémur es aproximadamente $7 \times 10^7 \text{ Pa}$; por lo tanto no se espera que dicha colisión rompa la pierna del mariscal.

PREGUNTA 9.3 ¿Qué tipo de esfuerzo es experimentado por el liniero? ¿Qué partes de su cuerpo serían afectadas?

EJERCICIO 9.3 Calcule el diámetro de un tornillo horizontal de acero si se espera que soporte una carga máxima con masa de $2.00 \times 10^3 \text{ kg}$; sin embargo, por razones de seguridad debe ser diseñado para soportar tres veces esa carga. (La máxima fuerza cortante del acero es de aproximadamente $2.5 \times 10^8 \text{ Pa}$.)

RESPUESTA 1.73 cm

■ EJEMPLO 9.4 Lastre de plomo por la borda

OBJETIVO Aplicar los conceptos de tensión volumétrica y deformación.

PROBLEMA Buques y embarcaciones de vela a menudo llevan lastres de plomo en varias formas, como bloques, para mantener el barco en la orientación correcta y en posición vertical en el agua. Supongamos que un barco lleva una carga y la tripulación se deshace de un total de 0.500 m^3 de lastre de plomo en el agua con 2.00 km de profundidad. Calcule **a)** el cambio en la presión a esa profundidad y **b)** la variación del volumen del plomo al llegar al fondo. Tome la densidad del agua de mar igual a $1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y considere que el plomo tiene un módulo volumétrico de $4.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$.

ESTRATEGIA La diferencia de presión entre la superficie y una profundidad de 2.00 km es debido al peso de la columna de agua. Calcule el peso del agua en una columna con una sección transversal de 1.00 m^2 . Ese número en newtons será la misma magnitud que la diferencia de presión en pascuales. Sustituya el cambio de presión en el módulo de tensión y la ecuación de la tensión para obtener el cambio en el volumen del plomo.

SOLUCIÓN

a) Calcule la diferencia de presión entre la superficie y una profundidad de 2.00 km.

Use la densidad, volumen y aceleración de la gravedad g para calcular el peso del agua en una columna que tiene la sección transversal de 1.00 m^2 :

$$\begin{aligned} w &= mg = (\rho V)g \\ &= (1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2.00 \times 10^3 \text{ m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &= 2.01 \times 10^7 \text{ N} \end{aligned}$$

Divida entre el área (en este caso, 1.00 m^2) para obtener la diferencia de presión debido a la columna de agua:

$$\Delta P = \frac{F}{A} = \frac{2.01 \times 10^7 \text{ N}}{1.00 \text{ m}^2} = 2.01 \times 10^7 \text{ Pa}$$

b) Calcule el cambio en el volumen del plomo al llegar al fondo.

Escriba el módulo de esfuerzo y la ecuación de la tensión: $\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V}$

Resuelva para ΔV :

$$\Delta V = -\frac{V\Delta P}{B} = -\frac{(0.500 \text{ m}^3)(2.01 \times 10^7 \text{ Pa})}{4.2 \times 10^{10} \text{ Pa}} = -2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

COMENTARIOS El signo negativo indica una *disminución* de volumen. El siguiente ejercicio muestra que aun el agua puede comprimirse, aunq no mucho.

PREGUNTA 9.4 Clasifique de menor a mayor las siguientes sustancias según el cambio fraccional de volumen debido al incremento de presión: cobre, acero, agua y mercurio.

EJERCICIO 9.4 a) ¿En qué porcentaje un globo de agua similar se hunde a la misma profundidad? b) ¿Cuál es la proporción del nuevo radio con respecto al radio inicial?

RESPUESTAS a) 0.95% b) 0.997

Arcos y la fuerza máxima de los materiales

Como se ha visto, la fuerza máxima de un material es la fuerza máxima por unidad de área que el material puede soportar antes de romperse o fracturarse. Tal valor es de gran importancia, particularmente en la construcción de edificios, puentes y caminos. La tabla 9.3 muestra la fuerza máxima de una variedad de materiales bajo tensión y compresión. Observe que un hueso y una variedad de materiales de construcción (concreto, tabique y mármol) son más fuertes bajo compresión que bajo tensión. La mayor capacidad del tabique y la piedra para resistir la compresión es la base del arco semicircular desarrollado y ampliamente utilizado en todo por los romanos: desde arcos monumentales hasta templos de gran extensión y soportes de acueductos.

Antes del desarrollo del arco, la técnica principal para librar una brecha era la simple construcción de postes-travesaño (figura 9.11a), en la que una barra horizontal era soportada

APLICACIÓN

Estructuras de arcos en edificios



Figura 9.11 a) Una estructura de simple poste-travesaño. b) El arco semicircular desarrollado por los romanos. c) Arco gótico con arbotantes volados para proveer soporte lateral.

por dos columnas. Este tipo de construcción fue utilizada para erigir los grandes templos griegos. Las columnas de estos templos estaban poco espaciadas debido a la limitada longitud de las piedras disponibles y a la baja fuerza de tensión máxima de una barra de piedra.

El arco semicircular (figura 9.11b) desarrollado por los romanos fue un gran logro tecnológico en diseño arquitectónico. Éste, efectivamente, permitía canalizar la carga pesada de un amplio techo hacia fuerzas verticales y horizontales sobre columnas de soporte angostas. La estabilidad de este arco depende de la compresión entre sus piedras en forma de cuña. Las piedras son forzadas a presionarse unas con otras por la carga uniforme, como se muestra en la figura. Esta compresión resulta en fuerzas horizontales salientes en la base del arco donde comienza a curvarse lejos de la vertical. Estas fuerzas deben estar balanceadas por los muros de piedra mostrados a los lados del arco. Es común utilizar pesadas paredes muy altas (arbotantes) de cada lado del arco para proveer estabilidad horizontal. Si los cimientos del arco se mueven, las fuerzas de compresión entre las piedras en forma de cuña pueden decrecer y provocar que el arco se colapse. La superficie de las piedras utilizadas en los arcos construidos por los romanos era cortada para hacer uniones muy ajustadas; por lo regular no se usaba cemento. La resistencia al desprendimiento de las piedras es provista por la fuerza de compresión y la fricción entre las caras de las piedras.

Otra innovación arquitectónica importante fue el arco gótico puntiagudo o de media punta, mostrado en la figura 9.11c. Este tipo de estructura fue utilizada primero en Europa a principios del siglo XII, seguido de la construcción de las magníficas catedrales góticas en Francia en el siglo XIII. Una de las características más asombrosas de dichas catedrales es su enorme altura. Por ejemplo, la catedral en Chartres mide 118 pies, mientras la catedral en Reims tiene una altura de 137 pies. Estas magníficas estructuras evolucionaron en un periodo muy corto sin necesidad de ninguna teoría matemática de estructuras. Sin embargo, los arcos góticos requerían arbotantes volados para prevenir la dispersión del arco apoyado por las altas y angostas columnas.

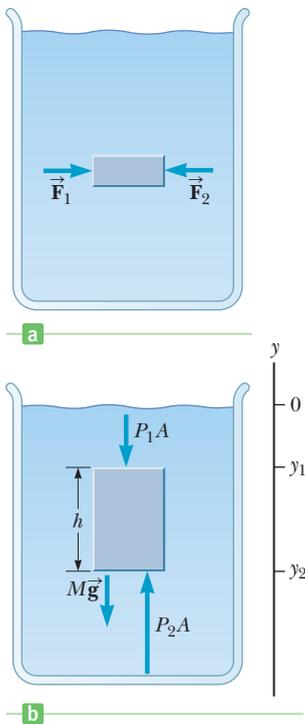


Figura 9.12 a) En un fluido estático, todos los puntos a la misma profundidad se encuentran con la misma presión, por lo que la fuerza uno \vec{F}_1 debe ser igual a la fuerza \vec{F}_2 . b) Debido a que el volumen del líquido sombreado no se está hundiendo o el aumento de la fuerza neta sobre ella debe ser igual a cero.

9.4 Variación de la presión con la profundidad

Cuando un fluido se encuentra en reposo en un contenedor, **todas las partes del fluido deben permanecer en equilibrio estático**, en reposo con respecto al observador. Aún más, **todos los puntos a la misma profundidad deben estar a la misma presión**. Si éste no fuera el caso, un fluido podría fluir de una región de mayor presión a una de menor presión. Por ejemplo, considere el bloque pequeño de fluido de la figura 9.12a. Si la presión fuera mayor en el lado izquierdo del bloque que en el derecho, \vec{F}_1 sería mayor que \vec{F}_2 ; por lo tanto, el bloque aceleraría hacia la derecha y, en consecuencia, no estaría en equilibrio.

A continuación, examine el fluido contenido dentro del volumen indicado por la región oscura en la figura 9.12b. Esta región tiene un área de sección transversal A y se extiende desde la posición y_1 a la posición y_2 debajo de la superficie del líquido. Tres fuerzas externas actúan sobre el volumen del fluido: la fuerza de gravedad, $M\vec{g}$; la fuerza hacia arriba P_2A ejercida por el líquido debajo, y una fuerza hacia abajo P_1A ejercida por el fluido de arriba. Ya que el volumen del fluido se encuentra en equilibrio, estas fuerzas deben sumar cero; por lo tanto, se tiene que

$$P_2A - P_1A - Mg = 0 \quad [9.8]$$

De la definición de densidad se tiene

$$M = \rho V = \rho A(y_1 - y_2) \quad [9.9]$$

Sustituyendo la ecuación 9.9 en la ecuación 9.8, cancelando el área A y reacomodando términos se obtiene

$$P_2 = P_1 + \rho g(y_1 - y_2) \quad [9.10]$$

Observe que $(y_1 - y_2)$ es positiva, pues $y_2 < y_1$. La fuerza P_2A es mayor que la fuerza P_1A debido al peso del agua que hay entre los dos puntos. Este es el mismo principio que experimenta una persona que está abajo en una pila de jugadores de fútbol americano o rugby.

La presión atmosférica es también causada por el apilado de un fluido, en este caso, el fluido es el gas de la atmósfera. El peso de todo el aire desde el nivel del mar hasta la frontera con el espacio exterior da como resultado una presión atmosférica de $P_0 = 1.013 \times 10^5$ Pa (equivalente a 14.7 lb/pulg²) sobre el nivel del mar. Este resultado puede utilizarse para encontrar la presión P a cualquier profundidad $h = (y_1 - y_2) = (0 - y_2)$ por debajo de la superficie del agua:

$$P = P_0 + \rho gh \tag{9.11}$$

De acuerdo con la ecuación 9.11, **la presión P a una profundidad h por debajo de la superficie de un líquido descubierto a la atmósfera es mayor que la presión atmosférica por una cantidad ρgh** . Más aún, la presión no es afectada por la forma del contenedor como se muestra en la figura 9.13.



Figura 9.13 Esta fotografía ilustra el hecho de que la presión en un líquido es la misma en todos los puntos con la misma elevación. Observe que la forma del recipiente no afecta la presión.

■ Examen rápido

9.2 La presión en el fondo de un vaso lleno con agua ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) es P . El agua se vierte y el vaso es llenado con alcohol etílico ($\rho = 806 \text{ kg/m}^3$). La presión en el fondo del vaso es ahora: a) menor que P b) igual a P c) mayor que P d) indeterminada.

■ EJEMPLO 9.5 Petróleo y agua

OBJETIVO Calcular las presiones generadas por las capas de diferentes fluidos.

PROBLEMA En un enorme tanque de petróleo, se ha vertido agua salada a una profundidad de $h_2 = 5.00$ m. Encima del agua hay una capa de petróleo de $h_1 = 8.00$ m de profundidad, como se muestra en la vista de sección transversal del tanque en la figura 9.14. El petróleo tiene una densidad 0.700 g/cm^3 . Encuentre la presión en el fondo del tanque. (Considere 1025 kg/m^3 como la densidad del agua salada.)

ESTRATEGIA Debe utilizarse la ecuación 9.11 dos veces. Primero, utilícela para calcular la presión P_1 en el fondo de la capa de aceite. Luego utilice esta presión en lugar de P_0 en la ecuación 9.11 y calcule la presión P_{fondo} en el fondo de la capa de agua.

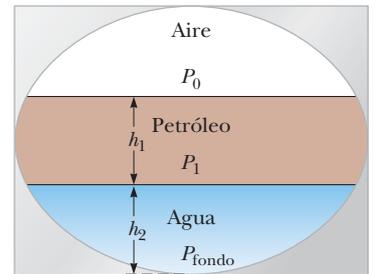


Figura 9.14 (Ejemplo 9.5)

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación 9.11 para calcular la presión en el fondo de la capa de petróleo:

$$\begin{aligned} (1) \quad P_1 &= P_0 + \rho gh_1 \\ &= 1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \\ &\quad + (7.00 \times 10^2 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(8.00 \text{ m}) \\ P_1 &= 1.56 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Ahora, adapte la ecuación 9.11 a la nueva presión inicial, y utilícela para calcular la presión en el fondo de la capa de agua salada.

$$\begin{aligned} (2) \quad P_{\text{fondo}} &= P_1 + \rho gh_2 \\ &= 1.56 \times 10^5 \text{ Pa} \\ &\quad + (1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ m}) \\ P_{\text{fondo}} &= 2.06 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El peso de la atmósfera resulta ser P_0 , en la superficie de la capa de petróleo. Por lo tanto, el peso del petróleo y el peso del agua combinados crean la presión en el fondo.

PREGUNTA 9.5 ¿Por qué la presión del aire decrece cuando se incrementa la altitud?

EJERCICIO 9.5 Calcule la presión en la tapa superior de un cofre enterrado bajo 4.00 m de lodo con densidad $1.75 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ en el fondo de un lago de 10.0 m de profundidad.

RESPUESTA 2.68×10^5 Pa

EJEMPLO 9.6 Dolor en el oído BIO

OBJETIVO Calcular la diferencia de presión a una profundidad dada y estimar la fuerza.

PROBLEMA Calcule la fuerza neta ejercida del agua sobre su tímpano cuando está nadando en el fondo de una piscina de 5.0 m de profundidad.

ESTRATEGIA Utilice la ecuación 9.11 para hallar la diferencia de presión en el tímpano a una profundidad dada. El aire dentro del oído está generalmente a presión atmosférica. Calcule la superficie del área del tímpano, luego utilice la definición de presión para obtener la fuerza neta ejercida sobre el tímpano.

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación 9.11 para calcular la diferencia entre la presión del agua a la profundidad h y la presión dentro del oído:

$$\begin{aligned}\Delta P &= P - P_0 = \rho gh \\ &= (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(5.0 \text{ m}) \\ &= 4.9 \times 10^4 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Multiplique por el área A para obtener la fuerza neta sobre el tímpano asociado con esta diferencia de presión. Considere el área del tímpano como 1 cm^2 .

$$F_{\text{neta}} = A\Delta P \approx (1 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(4.9 \times 10^4 \text{ Pa}) \approx 5 \text{ N}$$

COMENTARIOS Debido a que la fuerza de esta magnitud sobre el tímpano es incómoda, los nadadores a menudo “destapan sus oídos” tragando saliva o expanden su mandíbula mientras están bajo el agua, lo cual empuja el aire desde los pulmones hasta el oído interno. Con esta técnica se iguala la presión en ambos lados del tímpano y se alivia la molestia.

PREGUNTA 9.6 ¿Por qué los contenedores de agua y las latas con gas frecuentemente tienen un orificio más pequeño opuesto a aquel por donde se vacía el fluido?

EJERCICIO 9.6 Un aeroplano despega a nivel del mar y se eleva a una altura de 425 m. Calcule la fuerza neta sobre el tímpano de un pasajero suponiendo que la densidad del aire es aproximadamente constante a 1.3 kg/m^3 y que la presión interna en el oído no ha sido igualada.

RESPUESTA 0.54 N

Debido a que la presión en un fluido depende de la profundidad y del valor de P_0 , cualquier incremento en la presión en la superficie debe transmitirse a cada punto en el fluido. Esto fue visto por primera vez por el científico francés Blaise Pascal (1623-1662) y el efecto es conocido como **principio de Pascal**:

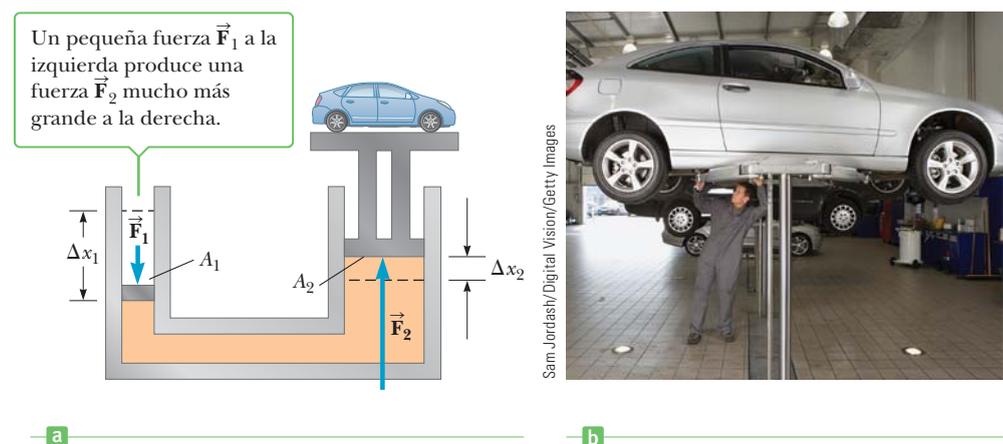
Un cambio en la presión aplicado a un fluido encerrado se transmite, sin pérdida, a todo punto del fluido y a las paredes del recipiente.

APLICACIÓN

Elevadores hidráulicos

Una aplicación importante del principio de Pascal es la prensa hidráulica (figura 9.15a). Una fuerza hacia abajo \vec{F}_1 se aplica a un pequeño pistón de área A_1 . La presión se transmite a través de un fluido a un pistón de mayor área A_2 . Conforme los pistones

Figura 9.15 a) En una prensa hidráulica, un aumento de presión en el área pequeña A_1 se transmite al área más grande A_2 . Debido a que la fuerza es igual a la presión de la zona veces, la fuerza \vec{F}_2 es mayor que \vec{F}_1 por un factor de A_2/A_1 . b) Un vehículo en reparación es soportado por un elevador hidráulico en un taller.



se mueven y los fluidos en los cilindros izquierdo y derecho cambian su altura relativa, existen pequeñas diferencias en las presiones en la entrada y salida de los pistones. Despreciando estas pequeñas diferencias, la presión del fluido en cada uno de los pistones puede considerarse la misma: $P_1 = P_2$. De la definición de presión, se tiene que $F_1/A_1 = F_2/A_2$. Por lo tanto, la magnitud de la fuerza \vec{F}_2 es mayor que la magnitud de \vec{F}_1 en un factor de A_2/A_1 . Eso explica por qué una carga pesada, como un automóvil, puede ser movida en el pistón mayor con mucha menor fuerza en el pistón menor. Los frenos hidráulicos, los elevadores de autos, los gatos hidráulicos y otras máquinas hacen uso de este principio.

EJEMPLO 9.7 Elevador de auto

OBJETIVO Aplicar el principio de Pascal en un elevador de autos y demuestre que el trabajo de entrada es el mismo que el trabajo de salida.

PROBLEMA En un elevador de autos utilizado en una estación de servicio, el aire ejerce una fuerza sobre un pequeño pistón con área transversal de radio $r_1 = 5.00$ cm. Esta presión es transmitida por un líquido incompresible a un segundo pistón de radio $r_2 = 15.0$ cm. **a)** ¿Qué fuerza debe ejercer el aire comprimido sobre el pequeño pistón para poder levantar un automóvil que pesa $13\,300$ N? Desprecie el peso de los pistones. **b)** ¿Qué presión del aire produce una fuerza de tal magnitud? **c)** Demuestre que el trabajo realizado por el pistón de entrada y el pistón de salida es el mismo.

ESTRATEGIA Utilice el principio de Pascal en el inciso a) considerando que la magnitud de la fuerza de salida, F_2 , debe ser igual al peso del auto para poder soportarlo. Utilice la definición en el inciso b). En el inciso c), utilice $W = F \Delta x$ para encontrar la razón W_1/W_2 , demostrando que debe ser igual a 1. Esto requiere combinar el principio de Pascal con el hecho de que los pistones de entrada y salida se mueven a través del mismo volumen.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fuerza necesaria en el pistón pequeño.

Sustituya los valores conocidos en el principio de Pascal, utilizando $A = \pi r^2$ para el área de cada pistón:

$$\begin{aligned} F_1 &= \left(\frac{A_1}{A_2}\right)F_2 = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} F_2 \\ &= \frac{\pi(5.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2}{\pi(15.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2} (1.33 \times 10^4 \text{ N}) \\ &= 1.48 \times 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$

b) Encuentre la presión del aire que produce F_1 .

Sustituya dentro de la definición de presión:

$$P = \frac{F_1}{A_1} = \frac{1.48 \times 10^3 \text{ N}}{\pi(5.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2} = 1.88 \times 10^5 \text{ Pa}$$

c) Demuestre que el trabajo realizado por los pistones de entrada y salida es el mismo.

Primero iguale los volúmenes y resuelva para la razón de A_2 con A_1 :

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \rightarrow A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2 \\ \frac{A_2}{A_1} &= \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \end{aligned}$$

Ahora utilice el Principio de Pascal para obtener una relación para F_1/F_2 :

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow \frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

Evalúe la razón de trabajo, sustituyendo los dos resultados anteriores:

$$\begin{aligned} \frac{W_1}{W_2} &= \frac{F_1 \Delta x_1}{F_2 \Delta x_2} = \left(\frac{F_1}{F_2}\right)\left(\frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}\right) = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)\left(\frac{A_2}{A_1}\right) = 1 \\ W_1 &= W_2 \end{aligned}$$

COMENTARIOS En este problema no se consideró el posible efecto de la diferencia en alturas de los pistones. Si la columna de fluido es mayor en el pistón pequeño, el peso del fluido ayuda a soportar el auto reduciendo entonces la fuerza aplicada necesaria. Si la columna del fluido es mayor en el pistón grande, tanto el auto como el fluido extra deben ser soportados, por lo tanto, se requiere aplicar una fuerza adicional.

(continúa)

PREGUNTA 9.7 Verdadero o Falso: Si el radio del pistón de salida aumenta el doble, la fuerza de salida se incrementa por un factor de 4.

EJERCICIO 9.7 Un elevador hidráulico tiene pistones de diámetros 8.00 y 36.0 cm, respectivamente. Si una fuerza de 825 N es ejercida en el pistón de entrada, ¿cuál es la masa máxima que puede ser levantada por el pistón de salida?

RESPUESTA 1.70×10^3 kg

■ FÍSICA APLICADA 9.2 Construcción de las pirámides

Un corolario a la afirmación de que la presión en un fluido se incrementa con la profundidad es que el agua siempre busca su propio nivel. Esto significa que si un envase se llena con agua, sin importar la forma del envase, la superficie del agua es perfectamente plana y a la misma altura en todos los puntos. Los antiguos egipcios utilizaban este hecho para hacer sus pirámides a nivel. Conciba una idea de cómo podría hacerse esto.

EXPLICACIÓN Hay muchas maneras de hacer esto; sin embargo, la figura 9.16 muestra el esquema utilizado por los egipcios. Los constructores cortaban ranuras en la base de la pirámide como en a) y las llenaban parcialmente con

agua. La altura del agua se marcaba como en b) y la roca era cincelada hasta la marca como en c). Finalmente, la grieta era llenada con piedra aplastada y grava como en d). ■

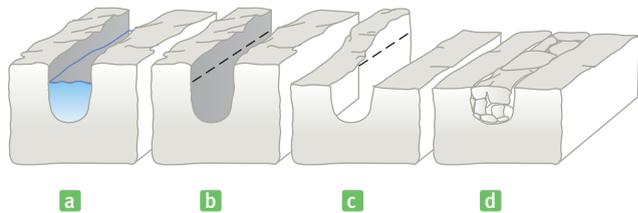


Figura 9.16 (Física aplicada 9.2)

9.5 Mediciones de la presión

Un dispositivo simple para medir la presión es el manómetro de tubo abierto (figura activa 9.17a). El extremo de un tubo en forma de U que contiene un líquido se abre a la atmósfera, mientras que el otro extremo se conecta a un sistema con presión desconocida P . La presión en el punto B es igual a $P_0 + \rho gh$, donde ρ es la densidad del fluido. La presión en B , sin embargo, es igual a la presión en A la cual es también la presión desconocida P . Se concluye entonces que $P = P_0 + \rho gh$.

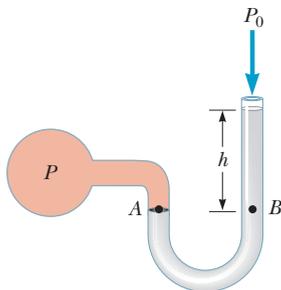
La presión P es la **presión absoluta**, mientras que $P - P_0$ es la **presión manométrica**. Si P en el sistema es mayor que la presión atmosférica, h es positivo, indicando que la columna del lado derecho en la figura 9.16a es menor que la columna del lado izquierdo.

Otro instrumento utilizado para medir la presión es el **barómetro** (figura activa 9.17b), inventado por Evangelista Torricelli (1608-1647). Un tubo largo cerrado en uno de sus extremos se llena con mercurio y luego es invertido dentro de un plato con mercurio. El extremo cerrado del tubo está casi al vacío, por lo que su presión puede considerarse como cero. Se tiene en seguida que $P_0 = \rho gh$, donde ρ es la densidad del mercurio y h es la altura de la columna de mercurio. Observe que el barómetro mide la presión de la atmósfera mientras que el manómetro mide la presión en un fluido encerrado.

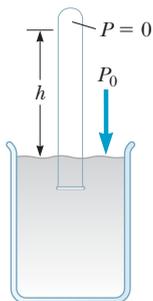
Una atmósfera de presión se define como la presión equivalente a una columna de mercurio que es exactamente igual a 0.76 m de altura a 0°C con $g = 9.806\,65\text{ m/s}^2$. A esta temperatura, el mercurio tiene una densidad de $13.595 \times 10^3\text{ kg/m}^3$; de ahí que,

$$\begin{aligned} P_0 &= \rho gh = (13.595 \times 10^3\text{ kg/m}^3)(9.806\,65\text{ m/s}^2)(0.760\,0\text{ m}) \\ &= 1.013 \times 10^5\text{ Pa} = 1\text{ atm} \end{aligned}$$

Es interesante observar que la fuerza de la atmósfera sobre nuestro cuerpo (suponiendo un área corporal de 2000 in^2) es extremadamente grande, ¡del orden de $30\,000\text{ lb}$! Si no estuvieran las cavidades y tejidos de nuestro cuerpo impregnados con fluidos que empujan hacia afuera, nuestro cuerpo se colapsaría. Los fluidos proveen fuerzas iguales y opuestas. En la atmósfera superior o en el espacio, la descompresión repentina puede causar serias lesiones e incluso la muerte. El aire almacenado en los pulmones puede dañar los sacos alveolares y los gases intestinales pueden incluso romper órganos internos.



a



b

Figura activa 9.17 Dos dispositivos para medir la presión: a) un manómetro de tubo abierto, y b) un barómetro de mercurio.

BIO APLICACIÓN

Descompresión y lesiones a los pulmones

Examen rápido

9.3 Varios barómetros comunes están contruidos usando una variedad de fluidos.

¿Para cuál fluido la columna en el barómetro es la más alta? (Véase la tabla 9.1.)

- a) mercurio b) agua c) alcohol etílico d) benceno

Medición de la presión sanguínea

Un manómetro especializado (llamado esfigmomanómetro) es frecuentemente utilizado para medir la presión sanguínea. En esta aplicación, en una bombilla de caucho se introduce aire en una banda que se envuelve apretadamente en el brazo y, simultáneamente, en un manómetro, como se ve en la figura 9.18. La presión en la banda se incrementa hasta que se detiene el flujo sanguíneo que pasa por la arteria braquial del brazo. En ese momento se abre una válvula de la bombilla y la persona que hace la medición escucha con un estetoscopio a la arteria en un punto justo bajo la banda. Cuando la presión en la banda y la arteria braquial está apenas abajo del valor máximo producido por el corazón (presión sistólica), la arteria se abre momentáneamente a cada pulsación del corazón. En este punto, la velocidad de la sangre es alta y turbulenta, y la circulación es ruidosa y puede escucharse con el estetoscopio. El manómetro está calibrado para leer la presión en milímetros de mercurio y el valor obtenido es de unos 120 mm para un corazón normal. Valores de 130 mm o mayores se consideran altos y es frecuente que se prescriban medicamentos para reducir la presión sanguínea. Cuando la presión de la banda baja aún más, todavía se escuchan sonidos intermitentes hasta que la presión llega justo abajo de la presión mínima del corazón (presión diastólica). En este punto se escuchan sonidos continuos. En un corazón normal, esta transición ocurre aproximadamente a 80 mm de mercurio; sin embargo, cuando los valores superan los 90 mm de mercurio es importante la intervención de un médico. Las lecturas de presión sanguínea de un corazón sano suelen expresarse como la razón sistólica/diastólica o 120/80.

Examen rápido

9.4 La presión sanguínea se mide normalmente con la banda del esfigmomanómetro rodeando al brazo. Suponga que la presión de la sangre se mide con la banda rodeando la pantorrilla de una persona. Podría ser la lectura de la presión sanguínea

- a) ¿la misma que en el brazo?, b) ¿mayor que en el brazo? o c) ¿menor que en el brazo?

BIO APLICACIÓN

Medición de la presión sanguínea

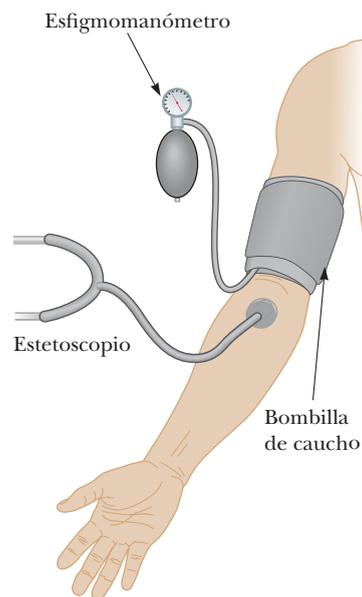


Figura 9.18 Un esfigmomanómetro puede utilizarse para medir la presión sanguínea.

FÍSICA APLICADA 9.3 Bolígrafos

En un bolígrafo, la tinta baja por un tubo a la punta donde se extiende en el papel por medio de una esfera rodante de acero inoxidable. Cerca de la parte superior del cartucho hay un pequeño orificio abierto a la atmósfera. Si se sella el orificio, se descubrirá que la pluma no funciona. Utilice su conocimiento de cómo funciona un barómetro para explicar este fenómeno.

EXPLICACIÓN Si se sella el orificio, o si no lo hubiera, la presión del aire arriba de la tinta debería decrecer cuando se utilizara un poco de ella. En consecuencia, la presión atmosférica ejercida contra la tinta en la parte baja del cartucho evitaría que el líquido fluyera. El orificio permite que la presión arriba de la tinta sea igual a la presión atmosférica. ¿Por qué a un bolígrafo parece agotársele la tinta cuando se escribe sobre una superficie vertical? ■

9.6 Fuerzas de empuje y principio de Arquímedes

Un principio fundamental que afecta los objetos sumergidos en fluidos fue descubierto por el matemático y filósofo natural griego Arquímedes. El **principio de Arquímedes** establece:

Principio de Arquímedes ▶

Cualquier objeto sumergido parcial o totalmente en un fluido recibe una fuerza de empuje ascendente de igual magnitud al peso del fluido desplazado por el objeto.

Muchos historiadores atribuyen el concepto de empuje a Arquímedes gracias a una "epifanía bañera", cuando observó una aparente pérdida de peso al mismo tiempo que el agua en la bañera ascendía. Como se verá en el ejemplo 9.8, el empuje proporciona un método para determinar densidades.

Todos hemos experimentado el principio de Arquímedes. Por ejemplo, es relativamente fácil levantar a alguien si nos encontramos en una piscina, pero levantar a la misma persona fuera del agua es más difícil. El agua provee un soporte parcial a cualquier objeto inmerso en ella. Usualmente, decimos que un objeto inmerso en un fluido recibe una fuerza ascendente llamada **fuerza de empuje** o **empuje hidrostático**.

La fuerza de empuje *no* es una nueva fuerza que aparece en los fluidos. De hecho, la causa física de la fuerza de empuje es la diferencia de presiones entre las partes superior e inferior del objeto, que muestra ser igual al peso del fluido desplazado. En la figura 9.19a, el fluido dentro de la esfera indicada, coloreada en azul oscuro, es presionada por todos lados por el fluido que lo rodea. Las flechas indican las fuerzas debidas a la presión. Ya que la presión aumenta con la profundidad, las flechas en la parte de abajo son más grandes que las de la parte superior. Sumándolas todas ellas, las componentes horizontales se anulan entre sí, pero hay una fuerza neta hacia arriba. Esta fuerza, debida a las diferencias de presión, es la fuerza de empuje \vec{B} . La esfera en el agua ni emerge ni cae así que el vector suma de la fuerza de empuje y la fuerza de gravedad sobre la esfera de fluido debe ser cero, por lo que se sigue que $B = Mg$, donde M es la masa del fluido.

Remplazando el fluido sombreando con una bola de boliche de igual volumen, como en la figura 9.19b, cambia sólo la masa sobre la que actúa la presión, así que la fuerza de empuje es la misma: $B = Mg$, donde M es la masa del fluido desplazado, no la masa de la bola de boliche. La fuerza de gravedad sobre la pesada bola es mayor que sobre el fluido equivalente, así que la bola se hundirá.

El principio de Arquímedes puede obtenerse de la ecuación 9.8, relacionando la presión y la profundidad, usando la figura 9.12b. Las fuerzas horizontales de la presión se anulan, pero en la dirección vertical P_2A actúa hacia arriba sobre la parte de abajo del bloque de fluido y P_1A y la fuerza de gravedad sobre el fluido, Mg , actúa hacia abajo, dando como resultado

$$B = P_2A - P_1A = Mg \quad [9.12a]$$

donde la fuerza de empuje se ha identificado como una diferencia en presión igual en magnitud al peso del fluido desplazado. Esta fuerza de empuje sigue siendo igual sin importar el material que ocupa el volumen en cuestión porque es debido al fluido *circundante*. Utilizando la definición de densidad, la ecuación 9.12a resulta

$$B = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{fluido}} g \quad [9.12b]$$



© Hulton Deutsch Collection/Corbis

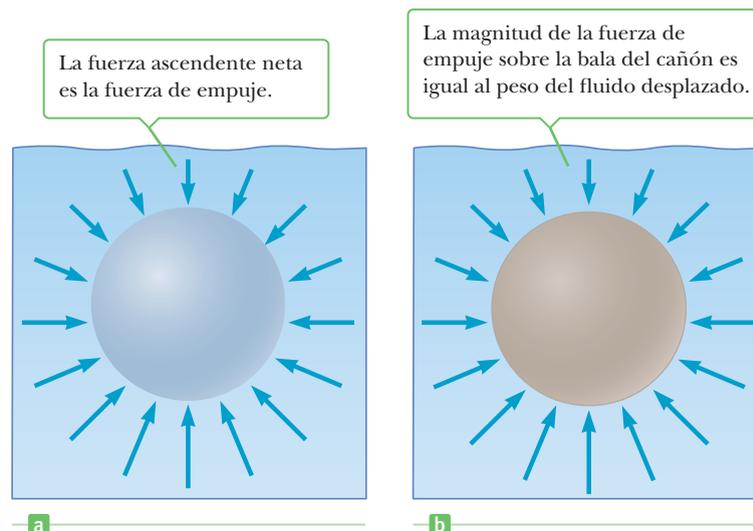
Arquímedes Matemático, físico e ingeniero (287-212 a. C.)

Arquímedes fue probablemente el científico más grande de la antigüedad. Según la leyenda, el Rey Hieron le pidió que determinara si la corona del rey era de oro puro o una aleación de oro. Arquímedes llegó a una solución cuando tomaba un baño, al darse cuenta de una pérdida parcial de peso de sí mismo al sumergirse en el agua. Estaba tan emocionado que según los informes, corrió desnudo por las calles de Siracusa gritando "¡Eureka!", que en griego significa "¡Lo encontré!"

Tip 9.2 La fuerza de empuje es ejercida por el fluido

La fuerza de empuje sobre un objeto es ejercida por el fluido y es la misma con la que se obtiene la densidad del objeto. Objetos más densos que el fluido se hunden; objetos menos densos emergen.

Figura 9.19 a) Las flechas indican las fuerzas sobre la esfera de fluido debido a la presión, mayores en la parte inferior porque la presión aumenta con la profundidad. b) La fuerza de empuje causada por el fluido circundante es la misma sobre cualquier objeto del mismo volumen, incluyendo esta bala de cañón.



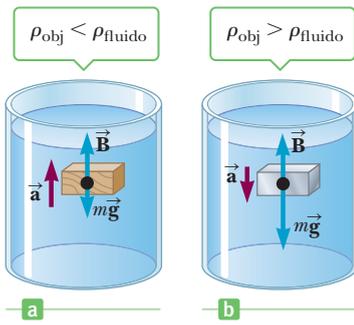


Figura activa 9.20
 a) Un objeto totalmente sumergido con menor densidad que el fluido que lo contiene experimenta una fuerza neta ascendente. b) Un objeto totalmente sumergido con densidad mayor que el fluido se hunde.

donde ρ_{fluido} es la densidad del fluido y V_{fluido} es el volumen del fluido desplazado. Este resultado se aplica igualmente a todas las formas, porque cualquier forma irregular puede ser aproximada por un gran número de cubos infinitesimales.

Es ilustrativo comparar las fuerzas en un objeto totalmente sumergido con las de un cuerpo flotante.

Caso I: un objeto totalmente sumergido. Cuando un objeto está totalmente sumergido en un fluido de densidad ρ_{fluido} , la fuerza de empuje ascendente que actúa sobre el objeto tiene una magnitud de $B = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{objeto}} g$ y donde V_{objeto} es el volumen del objeto. Si el objeto tiene densidad ρ_{objeto} , la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto tiene una magnitud igual a $w = mg = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{objeto}} g$ y la fuerza neta es $B - w = (\rho_{\text{fluido}} - \rho_{\text{objeto}}) V_{\text{objeto}} g$. De ahí que, si la densidad del objeto es menor que la densidad del fluido, la fuerza neta ejercida sobre el objeto es *positiva* (ascendente) y el objeto se acelera hacia *arriba*, como se ve en la figura activa 9.20a. Si la densidad del objeto es *mayor* que la densidad del fluido, como se ve en la figura activa 9.20b, la fuerza neta es *negativa* y el objeto se acelera hacia *abajo*.

Caso II: un objeto flotando. Ahora considere un objeto parcialmente sumergido en equilibrio estático que flota en un fluido, como en la figura activa 9.21. En este caso, la fuerza de empuje ascendente está balanceada con la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto. Si V_{fluido} es el volumen del fluido desplazado por el objeto (que corresponde al volumen de la parte del objeto bajo el nivel del fluido), entonces la magnitud de la fuerza de empuje está dada por $B = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{fluido}} g$. Debido a que el peso del objeto es $w = mg = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{objeto}} g$, y que $w = B$, se tiene $\rho_{\text{fluido}} V_{\text{fluido}} g = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{objeto}} g$, o bien

$$\frac{\rho_{\text{obj}}}{\rho_{\text{fluido}}} = \frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{obj}}} \quad [9.13]$$

La ecuación 9.13 desprecia la fuerza de empuje del aire, debido a que es muy baja la densidad del aire sólo 1.29 kg/m³ al nivel del mar.

Bajo condiciones normales, el promedio de densidad de un pez es ligeramente mayor que la densidad del agua, así que el pez debería hundirse si no tuviera un mecanismo para ajustar su densidad: la regulación interna del tamaño de la vejiga natatoria. En esta forma, los peces mantienen su flotabilidad cuando nadan a diferentes profundidades.

El cerebro humano está inmerso en un fluido (el líquido cefalorraquídeo) de densidad 1007 kg/m³, que es ligeramente menor que el promedio de densidad del cerebro, 1040 kg/m³. Consecuentemente la mayor parte del cerebro está sostenido por la fuerza de empuje del fluido circundante. En algunos procedimientos clínicos es necesario retirar una parte de este fluido para hacer un diagnóstico. Durante tales procesos, los nervios y los vasos sanguíneos del cerebro son sometidos a un gran esfuerzo, que puede causar molestias y dolores extremos. Debe tenerse extremo cuidado con estos pacientes hasta que el volumen original del fluido cerebral haya sido restablecido por el cuerpo.

Cuando el personal de un taller de servicio verifica el nivel de anticongelante de un automóvil o de las condiciones de una batería, a veces utiliza aparatos que aplican el principio de Arquímedes. La figura 9.22 (página 296) muestra un aparato común que se usa para verificar el nivel del líquido anticongelante del radiador. Las pequeñas bolas del tubo cerrado varían en densidad, de modo que todas ellas flotan cuando el tubo se llena de agua pura, pero ninguna flota en anticongelante puro, una flota en una mezcla a 5%, dos



Globos de aire caliente. Debido a que el aire caliente es menos denso que el aire frío, hay una fuerza neta ascendente sobre los globos.



La mayor parte del volumen de este iceberg está bajo el agua. ¿Puede usted determinar qué parte del volumen total está bajo el agua?

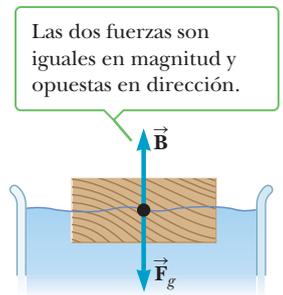


Figura activa 9.21
 Un objeto que flota sobre la superficie de un fluido está sometido a dos fuerzas: la gravitacional \vec{F}_g y la de empuje \vec{B} .

BIO APLICACIÓN
 Control de la flotación en los peces

BIO APLICACIÓN
 Líquido cefalorraquídeo

APLICACIÓN

Verificación de la carga de una batería

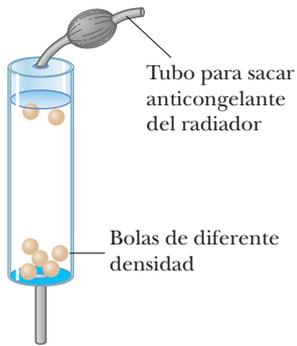
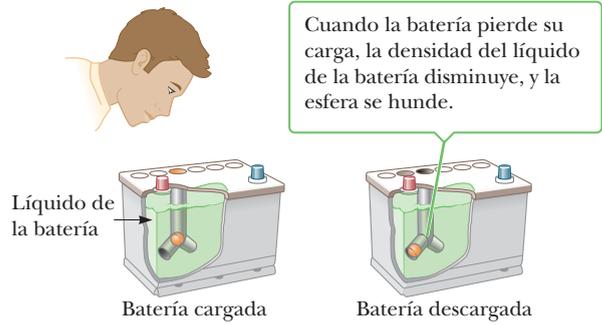


Figura 9.22 El número de bolas que flotan en este dispositivo es una medida de la densidad de la solución del anticongelante del radiador en un vehículo y, consecuentemente, una medida de la temperatura a la que ocurre el congelamiento.

Figura 9.23 La esfera en el tubo de plástico que está dentro de la batería sirve como indicador de que la batería está a) cargada o b) descargada.



en una mezcla a 10%, y así sucesivamente. El número de bolas que flotan sirve así como medida del porcentaje de anticongelante de la mezcla, que a su vez se emplea para determinar la temperatura más baja que la mezcla puede resistir sin congelarse.

De igual modo, la carga de algunas baterías de autos puede determinarse mediante un proceso llamado “punto mágico” de la batería (figura 9.23). Al ver por una mirilla hecha en la parte superior de la batería, un punto rojo indica que la batería está suficientemente cargada; un punto negro indica que ha perdido su carga. Esto sucede porque si la batería tiene carga suficiente, la densidad del líquido es lo suficientemente alta como para hacer que flote la esferilla roja. Cuando la batería pierde su carga, la densidad del líquido de la batería disminuye y la esferilla se hunde bajo la superficie del líquido, donde aparece el punto negro.

Examen rápido

- 9.5** La presión atmosférica varía diariamente. El nivel de flotación de un barco en un día de alta presión es a) alto, b) bajo o c) no es más diferente que en un día de baja presión.
- 9.6** La densidad del plomo es mayor que la del hierro y ambos metales son más densos que el agua. En un objeto de plomo sólido, ¿la fuerza boyante es a) mayor que, b) igual a o c) menor que la fuerza boyante que actúa sobre un objeto de hierro sólido de las mismas dimensiones?

EJEMPLO 9.8 Una tarjeta roja especial en las coronas

OBJETIVO Aplicar el principio de Arquímedes a objetos sumergidos.

PROBLEMA Una cazadora de gangas compra una corona “de oro” en un mercado de pulgas. Cuando llega a casa, la cuelga en una báscula y encuentra que su peso es 7.84 N (figura 9.24a). Luego la sumerge en agua, como se ve en la figura 9.24b, y ahora la báscula indica 6.86 N. ¿La corona está hecha de oro puro?

ESTRATEGIA El objetivo es encontrar la densidad de la corona y compararla con la densidad del oro. Se tiene el peso de la corona en el aire, así que podemos obtener su masa dividiendo entre la aceleración de la gravedad. Si es posible encontrar el volumen de la corona, podemos obtener la densidad deseada dividiendo la masa por este volumen.

Cuando la corona está totalmente inmersa, el agua desplazada es igual al volumen de la corona. Este mismo volumen es utilizado para calcular la fuerza de empuje. Así que nuestra estrategia es como sigue: 1) aplicar la segunda ley de Newton a la corona, tanto en el aire como en el agua para encontrar la fuerza de empuje; 2) use la fuerza de empuje para encontrar el volumen de la corona, 3) divida el peso de la corona en el aire entre la aceleración de la gravedad para obtener la masa, y luego entre el volumen para obtener la densidad de la corona.

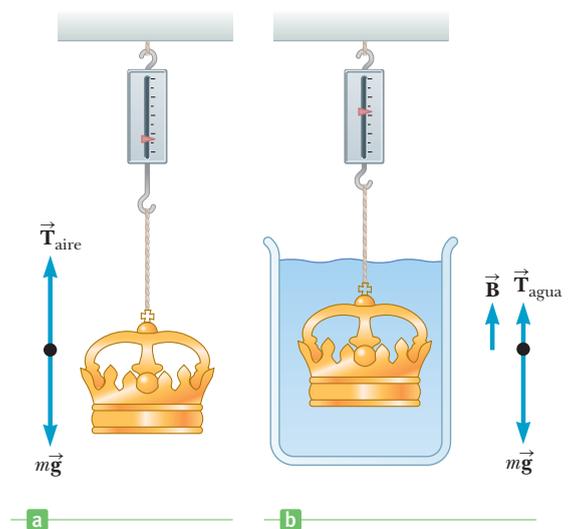


Figura 9.24 (Ejemplo 9.8) a) Cuando la corona está suspendida en el aire, la escala marca $T_{\text{aire}} = mg$, el peso real de la corona. b) Cuando la corona está inmersa en el agua, la fuerza de empuje \vec{B} reduce la lectura en la escala en la magnitud de la fuerza de empuje $T_{\text{agua}} = mg - B$.

SOLUCIÓN

Aplique la segunda ley de Newton a la corona cuando ésta es pesada en el aire. Hay dos fuerzas sobre la corona: la de gravedad $m\vec{g}$ y \vec{T}_{aire} , la fuerza ejercida por la escala sobre la corona, con magnitud igual a la lectura en la escala.

Cuando la corona está inmersa en el agua, la fuerza en la escala es \vec{T}_{agua} con igual magnitud a la lectura en la escala y hay una fuerza de empuje ascendente \vec{B} y la fuerza de gravedad.

Resuelva la ecuación (1) para mg , sustituya en la ecuación (2) y resuelva para la fuerza de empuje, la cual es igual a la diferencia de lecturas en la escala:

Encuentre el volumen del agua desplazada, utilizando el hecho de que la magnitud de la fuerza de empuje es igual al peso del agua desplazada:

La corona está totalmente sumergida, así que $V_{\text{corona}} = V_{\text{agua}}$. De la ecuación (1), la masa es el peso de la corona en el aire, T_{aire} dividida entre g :

Encuentre la densidad de la corona:

$$(1) \quad T_{\text{aire}} - mg = 0$$

$$(2) \quad T_{\text{agua}} - mg + B = 0$$

$$T_{\text{agua}} - T_{\text{aire}} + B = 0$$

$$B = T_{\text{aire}} - T_{\text{agua}} = 7.84 \text{ N} - 6.86 \text{ N} = 0.980 \text{ N}$$

$$B = \rho_{\text{agua}} g V_{\text{agua}} = 0.980 \text{ N}$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{0.980 \text{ N}}{g\rho_{\text{agua}}} = \frac{0.980 \text{ N}}{(9.80 \text{ m/s}^2)(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)} = 1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = \frac{T_{\text{aire}}}{g} = \frac{7.84 \text{ N}}{9.80 \text{ m/s}^2} = 0.800 \text{ kg}$$

$$\rho_{\text{corona}} = \frac{m}{V_{\text{corona}}} = \frac{0.800 \text{ kg}}{1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 8.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

COMENTARIOS Debido a que la densidad del oro es $19.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, la corona está hueca, hecha de alguna aleación o ambas cosas. A pesar de la complejidad matemática, es ciertamente concebible que este método se le haya ocurrido a Arquímedes. Conceptualmente, es cuestión de darse cuenta (o intuir) que pesos iguales de oro y plata-oro deben llevar a diferentes lecturas en la escala de la balanza cuando están inmersas en el agua, porque sus densidades y volúmenes son diferentes, lo que conduce a fuerzas de empuje diferentes.

PREGUNTA 9.8 Verdadero o Falso: La magnitud de la fuerza de empuje sobre un objeto completamente sumergido depende de la densidad del objeto.

EJERCICIO 9.8 El peso de una pulsera de metal es de 0.100 00 N en el aire y 0.092 00 N cuando está inmerso en el agua. Encuentre su densidad.

RESPUESTA $1.25 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$

EJEMPLO 9.9 Flotación río abajo

OBJETIVO Aplicar el principio de Arquímedes a objetos parcialmente sumergidos.

PROBLEMA Una balsa de madera tiene una densidad de $6.00 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$. Su superficie tiene un área de 5.70 m^2 y su volumen es de 0.60 m^3 . Cuando la balsa se pone en agua dulce, figura 9.25, ¿a qué profundidad h está sumergida la parte inferior de la balsa?

ESTRATEGIA Hay dos fuerzas actuando sobre la balsa: la fuerza de empuje de magnitud B , actuando hacia arriba y la fuerza de gravedad actuando hacia abajo. Ya que la balsa está en equilibrio, la suma de las fuerzas es cero. La fuerza de empuje depende del volumen sumergido $V_{\text{agua}} = Ah$. Utilice la segunda ley de Newton y despeje h , la profundidad a la que está la parte inferior de la balsa.

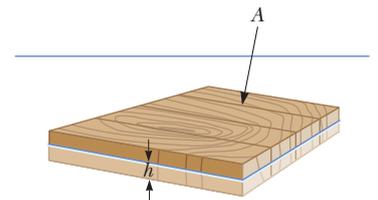


Figura 9.25 (Ejemplo 9.9) Una balsa parcialmente sumergida en agua.

SOLUCIÓN

Aplique la segunda ley de Newton a la balsa en equilibrio:

$$B = m_{\text{balsa}}g = 0 \rightarrow B = m_{\text{balsa}}g$$

(continúa)

El volumen de la balsa sumergida en el agua está dado por $V_{\text{agua}} = Ah$. La magnitud de la fuerza de empuje es igual al peso del volumen de agua desplazada:

$$B = m_{\text{agua}}g = (\rho_{\text{agua}}V_{\text{agua}})g = (\rho_{\text{agua}}Ah)g$$

Ahora describa la fuerza de gravedad sobre la balsa utilizando la densidad y el volumen de la balsa:

$$m_{\text{balsa}}g = (\rho_{\text{balsa}}V_{\text{balsa}})g$$

Sustituya estas dos expresiones en la segunda ley de Newton, $B = m_{\text{balsa}}g$ y despeje h (observe que g se cancela):

$$\begin{aligned} (\rho_{\text{agua}}Ah)g &= (\rho_{\text{balsa}}V_{\text{balsa}})g \\ h &= \frac{\rho_{\text{balsa}}V_{\text{balsa}}}{\rho_{\text{agua}}A} \\ &= \frac{(6.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(0.600 \text{ m}^3)}{(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(5.70 \text{ m}^2)} \\ &= \mathbf{0.0632 \text{ m}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Qué tanto está la balsa bajo el agua depende de la densidad de la balsa. Esto mismo es cierto para el cuerpo humano: la grasa es menos denso que los músculos y huesos, así que las personas con un elevado porcentaje de grasa corporal flotan mejor.

PREGUNTA 9.9 Si la balsa se pone en agua salada, la cual tiene una densidad mayor que el agua dulce, el valor de h a) ¿decrece?, b) ¿crece? o c) ¿no cambia?

EJERCICIO 9.9 Calcule qué tanto de un iceberg está bajo la superficie del océano, si la densidad del hielo es 917 kg/m^3 y el agua salada tiene una densidad de 1025 kg/m^3 .

RESPUESTA 89.5%

EJEMPLO 9.10 Flotación en dos fluidos

OBJETIVO Aplicar el principio de Arquímedes a un objeto que flota en un fluido que tiene dos capas con diferentes densidades.

PROBLEMA Un cubo de aluminio de $1.00 \times 10^3 \text{ kg}$ es puesto en un tanque. Se agrega agua al tanque hasta que la mitad del cubo queda sumergido. **a)** ¿Cuál es la fuerza normal sobre el cubo? (Véase la figura 9.26a.) **b)** Ahora se vierte mercurio en el tanque hasta que la fuerza normal sobre el cubo se hace cero. (Véase la figura 9.26b.) ¿Qué tan profunda es la capa de mercurio?

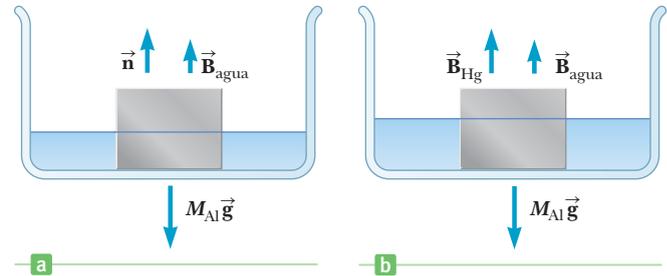


Figura 9.26 (Ejemplo 9.10)

ESTRATEGIA Ambas partes de este problema involucran la segunda ley de Newton para un cuerpo en equilibrio, junto con el concepto de fuerza de empuje. En el inciso a) las fuerzas normal, gravitacional y de empuje del agua, actúan sobre el cubo. En el inciso b) hay una fuerza de empuje adicional debida al mercurio, mientras que la fuerza normal es cero. Utilizando $V_{\text{Hg}} = Ah$ resuelva para la altura del mercurio, h .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fuerza normal sobre el cubo cuando está inmerso a la mitad.

Calcule el volumen V del cubo y la longitud d de un lado, para futuras referencias (ambas cantidades se necesitarán para lo que sigue):

$$\begin{aligned} V_{\text{Al}} &= \frac{M_{\text{Al}}}{\rho_{\text{Al}}} = \frac{1.00 \times 10^3 \text{ kg}}{2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3} = 0.370 \text{ m}^3 \\ d &= V_{\text{Al}}^{1/3} = 0.718 \text{ m} \end{aligned}$$

Escriba la segunda ley de Newton para el cubo y resuelva para la fuerza normal. La fuerza de empuje es igual al peso del agua desplazada (la mitad del volumen del cubo).

$$\begin{aligned} n - M_{\text{Al}}g + B_{\text{agua}} &= 0 \\ n &= M_{\text{Al}}g - B_{\text{agua}} = M_{\text{Al}}g - \rho_{\text{agua}}(V/2)g \\ &= (1.00 \times 10^3 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &\quad - (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(0.370 \text{ m}^3/2.00)(9.80 \text{ m/s}^2) \\ n &= 9.80 \times 10^3 \text{ N} - 1.81 \times 10^3 \text{ N} = \mathbf{7.99 \times 10^3 \text{ N}} \end{aligned}$$

b) Calcule el nivel h del mercurio agregado.

Aplique la segunda ley de Newton para el cubo:

Haga $n = 0$ y resuelva para la fuerza de empuje del mercurio:

Resuelva para h , notando que $A = d^2$:

$$n - M_{\text{Al}}g + B_{\text{agua}} + B_{\text{Hg}} = 0$$

$$B_{\text{Hg}} = (\rho_{\text{Hg}} Ah)g = M_{\text{Al}}g - B_{\text{agua}} = 7.99 \times 10^3 \text{ N}$$

$$h = \frac{M_{\text{Al}}g - B_{\text{agua}}}{\rho_{\text{Hg}}Ag} = \frac{7.99 \times 10^3 \text{ N}}{(13.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(0.718 \text{ m})^2(9.80 \text{ m/s}^2)}$$

$$h = 0.116 \text{ m}$$

COMENTARIOS Observe que la fuerza de empuje del mercurio calculada en el inciso b) es la misma que la fuerza normal en el inciso a). Este es naturalmente el caso, porque se agregó suficiente mercurio para cancelar exactamente a la fuerza normal. Podríamos haber utilizado este hecho para abreviar, simplemente escribiendo $B_{\text{Hg}} = 7.99 \times 10^3 \text{ N}$ inmediatamente, resolviendo para h y evitar el uso de la segunda ley de Newton. La mayoría de las veces, sin embargo, no tenemos esa suerte. Intente calcular la fuerza normal cuando el nivel del mercurio es 4.00 cm.

PREGUNTA 9.10 ¿Qué le pasaría al cubo de aluminio si se vertiera más mercurio en el tanque?

EJERCICIO 9.10 Un cubo de aluminio de 1.00 m por lado está inmerso un tercio en agua y dos tercios en glicerina. ¿Cuál es la fuerza normal sobre el cubo?

RESPUESTA $1.50 \times 10^4 \text{ N}$

9.7 Fluidos en movimiento

Cuando un fluido está en movimiento, su flujo puede caracterizarse en una de dos maneras. Al flujo se le llama **línea de corriente**, o **laminar**, si cada partícula que pasa por un punto en particular se mueve exactamente a lo largo de una trayectoria lisa seguida por partículas que pasaron antes por ese punto. Esta trayectoria se llama *línea de corriente* (figura 9.27). Diferentes líneas de corriente no pueden cruzarse bajo esta condición de flujo continuo y la línea de corriente en cualquier punto coincide con la dirección de la velocidad del flujo en ese punto.

En contraste, el flujo de un fluido se hace irregular, o **turbulento**, arriba de cierta velocidad o bajo cualesquiera condiciones que puedan causar cambios abruptos de velocidad. Los movimientos irregulares del fluido, llamados *corrientes turbulentas*, son característicos de un flujo con remolinos, como se muestra en la figura 9.28.

En el estudio de flujo de fluidos, el término **viscosidad** se emplea para denotar el grado de fricción interna del fluido. Esta fricción interna está asociada con la resistencia entre dos capas adyacentes del fluido, que se mueven una con respecto a otra. Un fluido como el queroseno tiene una menor viscosidad que el petróleo crudo o la melaza.

Muchas de las características del movimiento de un fluido pueden entenderse considerando el comportamiento de un **fluido ideal**, que satisface las siguientes condiciones:

1. El **fluido es no viscoso**; es decir, no hay fuerza de fricción interna entre capas adyacentes.
2. El **fluido es incompresible**, lo cual significa que su densidad es constante.
3. El **movimiento del fluido es estacionario**, lo que significa que la velocidad, densidad y presión en cada punto del fluido no cambian con el tiempo.
4. El **fluido se mueve sin turbulencia**. Esto implica que cada elemento del fluido tiene velocidad angular cero alrededor de su centro; es decir, no puede haber corrientes turbulentas presentes en el fluido en movimiento. Una pequeña rueda colocada en el fluido tendría movimiento de traslación, pero no de rotación.

Ecuación de continuidad

La figura 9.29a (página 300) representa un fluido que circula por un tubo de diámetro no uniforme. Las partículas del fluido se mueven a lo largo de líneas de corriente en un flujo estacionario. En un pequeño intervalo Δt , el fluido que entra en la parte inferior del tubo avanza una distancia $\Delta x_1 = v_1 \Delta t$, donde v_1 es la rapidez del fluido en ese lugar. Si A_1

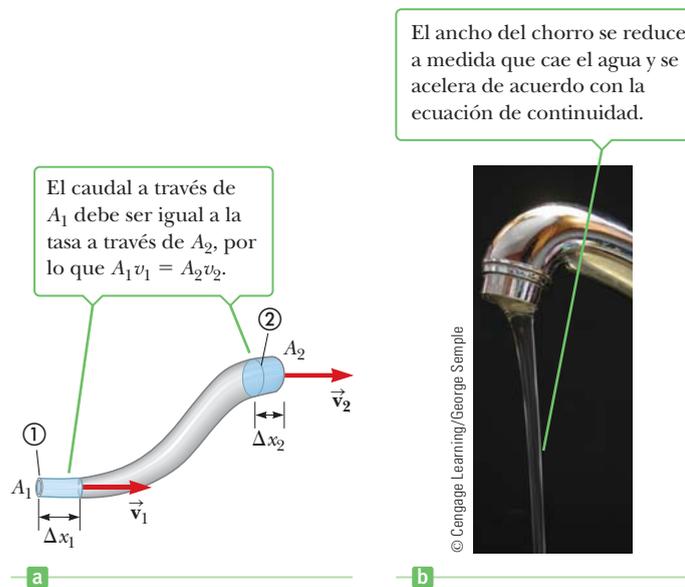


Figura 9.27 Una ilustración de las líneas de corriente alrededor de un automóvil en una prueba en un túnel de viento. Las líneas de corriente en el flujo de aire se hacen visibles con partículas de humo.



Figura 9.28 Los gases calientes se hacen visibles por las partículas de humo. El humo se mueve por primera vez en un flujo laminar en la parte inferior y luego en un flujo turbulento por encima.

Figura 9.29 a) Un fluido con movimiento laminar por un tubo con área de sección transversal variable. El volumen de un fluido que pasa por A_1 en un intervalo de tiempo Δt debe ser igual al volumen que pasa por A_2 en el mismo intervalo, por lo que $A_1 v_1 = A_2 v_2$. b) Agua que sale lentamente de un grifo.



es el área de la sección transversal en esta región, entonces la masa contenida en la región azul inferior es $\Delta M_1 = \rho_1 A_1 \Delta x_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t$, donde ρ_1 es la densidad del fluido en A_1 . Del mismo modo, el fluido que sale del extremo superior del tubo en el mismo tiempo Δt tiene una masa de $\Delta M_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$. Sin embargo, **debido a que la masa se conserva y que el flujo es estacionario**, la masa que entra a la parte inferior del tubo por A_1 en el tiempo Δt debe ser igual a la masa que sale por A_2 en el mismo intervalo. De ahí que, $\Delta M_1 = \Delta M_2$, o bien

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad [9.14]$$

Para el caso de un fluido incompresible, $\rho_1 = \rho_2$ y la ecuación 9.14 se reduce a

Ecuación de continuidad ►

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [9.15]$$

Esta expresión es la llamada **ecuación de continuidad**. De este resultado se ve que **el producto del área de la sección transversal del tubo por la velocidad del fluido en esa sección es constante**. De ahí que la velocidad es alta donde el tubo se reduce y baja donde el tubo tiene un gran diámetro. El producto Av , que tiene dimensiones de volumen por unidad de tiempo, es llamado **razón de flujo** o *gasto*. **La condición $Av = \text{constante}$ es equivalente al hecho de que el volumen de un fluido que entra por un extremo del tubo en un intervalo es igual a la cantidad de fluido que sale del tubo en el mismo intervalo, suponiendo que el fluido es incompresible y que no hay fugas**. En la figura 9.29b se ve un ejemplo de una aplicación de la ecuación de continuidad: conforme la corriente de agua fluye continuamente por el grifo, el grosor del chorro se reduce a medida que cae y se acelera.

Hay muchos ejemplos en la vida diaria que involucran la ecuación de continuidad. Reduciendo la salida del agua en una manguera de jardín, el chorro sale con una mayor rapidez y su alcance es mayor. Un razonamiento semejante explica por qué el humo que sale de una pieza de madera encendida se comporta como lo hace. Primero el humo asciende siguiendo una línea de corriente, haciéndose más delgado a medida que sube y finalmente se rompe en una figura turbulenta. El humo sube porque es menos denso que el aire y la fuerza de empuje de éste acelera a la columna de humo hacia arriba. Cuando aumenta la rapidez de la corriente de humo, se reduce el área de la sección transversal de la columna, de acuerdo con la ecuación de continuidad. Sin embargo, la corriente pronto alcanza una velocidad tan grande que no fluya el flujo laminar. En un análisis posterior del número de Reynolds, se verá la relación entre la velocidad de un flujo y la turbulencia.

Tip 9.3 Ecuaciones de continuidad

La razón de flujo o gasto de un fluido en un sistema es igual a la razón de flujo de salida del sistema. El fluido entrante ocupa un cierto volumen y puede incorporarse al sistema sólo si sale el que está en el interior para hacerle sitio.

■ EJEMPLO 9.11 Cataratas del Niágara

OBJETIVO Aplicar la ecuación de continuidad.

PROBLEMA Cada segundo, $5\,525\text{ m}^3$ de agua caen sobre un acantilado de 670 m de ancho en forma de herradura en las cataratas del Niágara. El agua tiene aproximadamente 2 m de profundidad cuando alcanza el acantilado. Estime su rapidez en ese instante.

ESTRATEGIA Esta es una estimación, así que sólo habrá una cifra significativa en la respuesta. La razón de volumen de flujo está dada y, de acuerdo con la ecuación de continuidad, es igual a una constante Av . Encuentre el área de la sección transversal, sustituya y resuelva para la velocidad.

SOLUCIÓN

Calcule el área de la sección transversal del agua cuando alcanza la orilla del acantilado:

$$A = (670\text{ m})(2\text{ m}) = 1340\text{ m}^2$$

Multiplique este resultado por la velocidad e iguale con la razón de flujo. Después, resuelva para v :

$$Av = \text{razón de volumen de flujo}$$

$$(1340\text{ m}^2)v = 5\,525\text{ m}^3/\text{s} \rightarrow v \approx 4\text{ m/s}$$

PREGUNTA 9.11 ¿Qué le sucede a la velocidad de la sangre en una arteria cuando las plaquetas comienzan a acumularse en los lados de la arteria?

EJERCICIO 9.11 El túnel para agua Thomas Garfield en Pennsylvania State University tiene una sección transversal circular que va disminuyendo su diámetro de 3.6 m a la sección de prueba cuyo diámetro es 1.2 m . Si la velocidad de flujo es 3.0 m/s en el diámetro mayor del tubo, determine la velocidad de flujo en esa sección.

RESPUESTA 27 m/s

■ EJEMPLO 9.12 Regar un jardín

OBJETIVO Relacionar la ecuación de continuidad con los conceptos de razón de flujo y la cinemática.

PROBLEMA Un jardinero utiliza una manguera de 2.50 cm de diámetro para llenar una cubeta de 30.0 litros ($1\text{ litro} = 1000\text{ cm}^3$). El jardinero nota que tarda 1.00 minuto en llenar la cubeta. A la manguera se le conecta una boquilla con una abertura de área de sección transversal igual a 0.500 cm^2 , la boquilla se sostiene de modo que el agua se proyecte horizontalmente desde un punto situado a 1.00 m por encima del suelo. ¿Hasta qué distancia horizontal puede proyectarse el agua?

ESTRATEGIA Podemos encontrar la razón de volumen de flujo de la manguera dividiendo el volumen de la cubeta entre el tiempo que toma en llenarla. Después encontrar la razón de flujo, aplicando la ecuación de continuidad para encontrar la velocidad a la que el agua sale disparada horizontalmente. El resto del problema es una aplicación de la cinemática en dos dimensiones. La respuesta obtenida es la misma que encontraríamos para el lanzamiento de una bala que tiene la misma velocidad inicial e igual altura.

SOLUCIÓN

Calcule la razón de volumen de flujo en la cubeta y conviértalo a m^3/s :

$$\begin{aligned} \text{razón de volumen de flujo} &= \\ &= \frac{30.0\text{ L}}{1.00\text{ min}} \left(\frac{1.00 \times 10^3\text{ cm}^3}{1.00\text{ L}} \right) \left(\frac{1.00\text{ m}}{100.0\text{ cm}} \right)^3 \left(\frac{1.00\text{ min}}{60.0\text{ s}} \right) \\ &= 5.00 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Resuelva la ecuación de continuidad para v_{0x} , la componente en x de la velocidad inicial con la que sale el agua de la boquilla.

$$A_1v_1 = A_2v_2 = A_2v_{0x}$$

$$v_{0x} = \frac{A_1v_1}{A_2} = \frac{5.00 \times 10^{-4}\text{ m}^3/\text{s}}{0.500 \times 10^{-4}\text{ m}^2} = 10.0\text{ m/s}$$

Calcule el tiempo de caída del chorro a 1.00 m , utilizando la cinemática. Inicialmente, el chorro es horizontal, así que v_{0y} es cero:

$$\Delta y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2$$

Haga $v_{0y} = 0$ en la anterior ecuación y resuelva para t , notando que $\Delta y = -1.00\text{ m}$:

$$t = \sqrt{\frac{-2\Delta y}{g}} = \sqrt{\frac{-2(-1.00\text{ m})}{9.80\text{ m/s}^2}} = 0.452\text{ s}$$

Encuentre la distancia horizontal recorrida por el chorro:

$$x = v_{0x}t = (10.0\text{ m/s})(0.452\text{ s}) = 4.52\text{ m}$$

(continúa)

COMENTARIOS Es interesante que el movimiento de fluidos puede tratarse con las mismas ecuaciones de la cinemática como objetos individuales.

PREGUNTA 9.12 ¿Por qué factor debería cambiarse el rango si la razón de flujo se duplicara?

EJERCICIO 9.12 La boquilla se reemplaza por otra en forma de Y que parte el flujo por la mitad. Las mangueras del jardín terminan ahora en dos boquillas conectadas al final de la Y, cada una de área de sección transversal de 0.400 cm^2 . a) ¿Qué tan rápido sale el agua de una de las boquillas? b) ¿Hasta dónde una de las boquillas arrojaría los chorros de agua si ambas funcionaran al mismo tiempo y saliera horizontalmente a 1.00 m del suelo? *Sugerencia:* Encuentre la razón de volumen de flujo en cada boquilla de 0.400 cm^2 y después siga los mismos pasos que antes.

RESPUESTAS a) 6.25 m/s b) 2.82 m

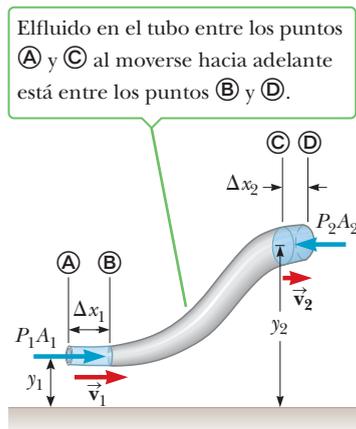


Figura 9.30 Por el teorema trabajo-energía, el trabajo realizado por las presiones opuestas P_1 y P_2 es igual a la diferencia de energía mecánica del fluido ahora entre los puntos C y D y el fluido que antes estaba entre A y B.



© Bettmann/Corbis

Daniel Bernoulli
Físico y matemático suizo (1700-1782)

En su obra más famosa, *Hydrodynamica*, Bernoulli demostró que conforme aumenta la velocidad de un fluido, su presión disminuye. En esta misma publicación, Bernoulli intentó la primera explicación del comportamiento de gases con presión y temperatura variables; éste fue el principio de la teoría cinética de los gases.

Ecuación de Bernoulli

Conforme un fluido se mueve por un tubo de sección transversal y elevación variables, cambia la presión a lo largo del tubo. En 1738 el físico suizo Daniel Bernoulli (1700-1782) obtuvo una expresión que relaciona la presión de un fluido con su velocidad y elevación. La ecuación de Bernoulli no es una ley física independiente; como se verá en esta sección, es **una consecuencia de la conservación de la energía aplicada a un fluido ideal**.

Al obtener la ecuación de Bernoulli, de nuevo suponemos que el fluido es incompresible, no viscoso y que circula en modo estacionario y no turbulento. Considere el flujo que pasa por un tubo no uniforme en el tiempo Δt , como en la figura 9.30. La fuerza en la parte inferior del tubo es $P_1 A_1$, donde P_1 es la presión en el extremo inferior. El trabajo realizado en el extremo inferior del fluido por el fluido que está detrás él es:

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 V$$

donde V es el volumen de la región inferior azul en la figura. De la misma manera, el trabajo realizado por el fluido sobre la parte superior en el tiempo Δt es

$$W_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = -P_2 V$$

El volumen es el mismo porque, por la ecuación de continuidad, el volumen de un fluido que pasa por A_1 en el tiempo Δt es igual al volumen que pasa por A_2 en el mismo intervalo. El trabajo W_2 es negativo porque la fuerza sobre el fluido en la parte superior es opuesta a su desplazamiento. El trabajo neto realizado por estas fuerzas en el tiempo Δt es:

$$W_{\text{fluido}} = P_1 V - P_2 V$$

Parte de este trabajo es para cambiar la energía cinética del fluido y parte es para cambiar la energía potencial gravitatoria del sistema fluido-Tierra. Si m es la masa del fluido que pasa por el tubo en el intervalo Δt , entonces el cambio en energía cinética del volumen de fluido es:

$$\Delta EC = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2$$

El cambio en la energía potencial gravitatoria es:

$$\Delta EP = m g y_2 - m g y_1$$

Debido a que el trabajo neto realizado por el fluido sobre el segmento de fluido que se muestra en la figura 9.30 cambia la energía cinética y la energía potencial del sistema no aislado, tenemos:

$$W_{\text{fluido}} = \Delta EC + \Delta EP$$

Los tres términos de esta ecuación son los que acabamos de evaluar. Si sustituimos expresiones para cada uno de los términos, tenemos:

$$P_1 V - P_2 V = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_2 - m g y_1$$

Si dividimos cada término entre V y recordamos que $\rho = m/V$, esta expresión se reduce a

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_2 - \rho g y_1$$

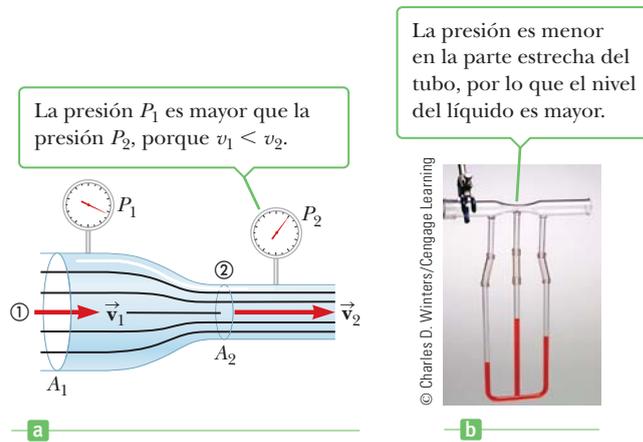


Figura 9.31 a) Este aparato puede ser usado para medir la velocidad de flujo de un fluido. b) Un tubo de Venturi, en la parte superior de la fotografía. El mayor nivel de fluido en la columna del centro muestra que la presión en la parte superior de la columna, que está en la parte estrecha del tubo de Venturi, es menor que la presión en otro sitio en la columna.

Reacomodemos los términos como sigue:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad [9.16]$$

Ésta es la **ecuación de Bernoulli**, que a menudo se expresa como

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{constante} \quad [9.17]$$

La ecuación de Bernoulli establece que la suma de la presión P , la energía cinética por unidad de volumen, $\frac{1}{2}\rho v^2$, y la energía potencial por unidad de volumen, $\rho g y$, tiene el mismo valor en todos los puntos a lo largo de una línea de corriente.

◀ Ecuación de Bernoulli

Una importante consecuencia de la ecuación de Bernoulli puede demostrarse considerando la figura 9.31, que muestra agua que circula por un tubo horizontal restringido de una región de área de sección transversal grande a una pequeña. Este aparato, llamado **tubo de Venturi**, puede usarse para medir la velocidad de flujo de un fluido. Debido a que el tubo es horizontal, $y_1 = y_2$, y la ecuación 9.16 aplicada a los puntos 1 y 2 da

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad [9.18]$$

Ya que el agua no regresa en el tubo, su velocidad v_2 en la reducción debe ser mayor que su velocidad v_1 en la región de mayor diámetro. En la ecuación 9.18, vemos que P_2 debe ser menor que P_1 porque $v_2 > v_1$. Este resultado se expresa frecuentemente con el enunciado de que **los fluidos que se mueven con mayor velocidad ejercen menos presión que los que se mueven lentamente**. Este importante hecho nos faculta para entender una gran cantidad de fenómenos cotidianos.

Tip 9.4 Principio de Bernoulli para los gases

Para gases, no es posible hacer el supuesto de que el fluido es incompresible, por lo que la ecuación 9.16 no se cumple para gases. Sin embargo, el comportamiento cualitativo es el mismo: cuando aumenta la velocidad del gas, disminuye su presión.

■ Examen rápido

9.7 Usted observa dos globos de helio que flotan juntos en los extremos de cuerdas sujetas a una mesa. Las superficies de estos globos situadas una frente a otra están separadas de 1 a 2 cm. Usted sopla en este espacio que hay entre los globos. ¿Qué les pasa a los globos? a) Se mueven uno hacia el otro b) Se alejan uno del otro c) No son afectados.

■ EJEMPLO 9.13 Tirarle al viejo tanque de agua

OBJETIVO Aplicar la ecuación de Bernoulli para encontrar la velocidad de un fluido.

PROBLEMA Un policía miope dispara con su arma preferida de seis tiros a un abigeo. Por suerte para éste, la bala no da en el blanco, pero penetra en el tanque que surte de agua al pueblo, causándole una fuga (figura 9.32 en la página 304).

a) Si la parte superior del tanque está abierta a la atmósfera, determine la velocidad con la que sale el agua por el agujero

(continúa)

cuando el nivel de agua está a 0.500 m encima de él. **b)** ¿A qué distancia llega el chorro de agua si el agujero está a 3.00 m por encima del suelo?

ESTRATEGIA a) Suponga que el tanque tiene un área transversal grande en comparación con el agujero ($A_2 \gg A_1$), así que el nivel de agua baja muy lentamente por lo que puede pensarse que $v_2 \approx 0$. Aplique la ecuación de Bernoulli a los puntos ① y ② en la figura 9.31, observando que P_1 es igual a P_0 en la parte superior del tanque. El inciso b) puede resolverse con cinemática como si el movimiento fuera horizontal.

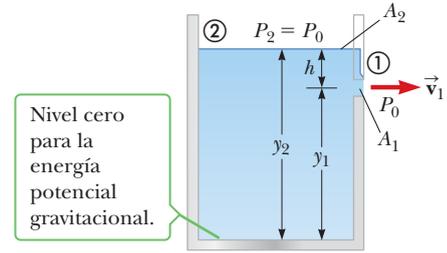


Figura 9.32 (Ejemplo 9.13) La velocidad del agua v_1 que sale por el agujero en el costado del tanque está dada por $v_1 = \sqrt{2gh}$.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad con la que el agua sale del agujero.

Sustituya $P_1 = P_2 = P_0$ y $v_2 \approx 0$ en la ecuación de Bernoulli y resuelva para v_1 :

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_0 + \rho g y_2$$

$$v_1 = \sqrt{2g(y_2 - y_1)} = \sqrt{2gh}$$

$$v_1 = \sqrt{2(9.80 \text{ m/s}^2)(0.500 \text{ m})} = 3.13 \text{ m/s}$$

b) Encuentre el punto del suelo donde cae el chorro.

Use la ecuación del desplazamiento para encontrar el tiempo de caída, notando que la dirección inicial del chorro es horizontal, así que $v_{0y} = 0$.

$$\Delta y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t$$

$$-3.00 \text{ m} = -(4.90 \text{ m/s}^2)t^2$$

$$t = 0.782 \text{ s}$$

Calcule la distancia horizontal que viaja el chorro en ese tiempo:

$$x = v_{0x}t = (3.13 \text{ m/s})(0.782 \text{ s}) = 2.45 \text{ m}$$

COMENTARIOS Como lo muestra el análisis del inciso a), la velocidad con la que sale el agua del agujero es igual a la velocidad adquirida por un objeto en caída libre desde una distancia vertical h . Este hecho es conocido como **ley de Torricelli**.

PREGUNTA 9.13 A medida que el tiempo transcurre, ¿qué le pasa a la velocidad del agua que sale por el agujero?

EJERCICIO 9.13 Suponga, en una situación similar, que el agua golpea el suelo a 4.20 m del agujero en el tanque. Si el agujero está a 2.00 m por encima del suelo, ¿cuál es el nivel del agua por encima del agujero?

RESPUESTA 2.21 m por encima del agujero

EJEMPLO 9.14 Flujo de un fluido en un tubo

OBJETIVO Resolver un problema relacionando la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad.

PROBLEMA Un gran tubo con un área de sección transversal de 1.00 m^2 desciende 5.00 m y se angosta a 0.500 m^2 , terminando en una válvula en el punto ① (figura 9.33). Si la presión en el punto ② es la presión atmosférica y la válvula se abre completamente permitiendo la libre salida del agua, encuentre la velocidad con la que ésta sale del tubo.

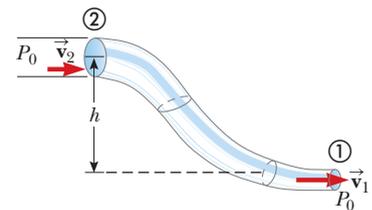


Figura 9.33 (Ejemplo 9.14)

ESTRATEGIA La ecuación de continuidad, junto con la ecuación de Bernoulli, constituyen dos ecuaciones con dos incógnitas: las velocidades v_1 y v_2 . Elimine v_2 de la ecuación de Bernoulli con la ecuación de continuidad, y resuelva para v_1 .

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación de Bernoulli:

$$(1) \quad P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Resuelva la ecuación de continuidad para v_2 :

$$A_2 v_2 = A_1 v_1$$

$$(2) \quad v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

En la ecuación (1), haga $P_1 = P_2 = P_0$ y sustituya la expresión para v_2 . Después resuelva para v_1 .

$$(3) \quad P_0 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_0 + \frac{1}{2}\rho \left(\frac{A_1}{A_2} v_1\right)^2 + \rho g y_2$$

$$v_1^2 \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2\right] = 2g(y_2 - y_1) = 2gh$$

$$v_1 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - (A_1/A_2)^2}}$$

Sustituya los valores dados:

$$v_1 = 11.4 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS Calcular las tasas reales de flujo de fluidos reales a través de tuberías es de hecho mucho más complejo de lo que aquí se presenta, debido a la viscosidad, la posibilidad de turbulencias y otros factores.

PREGUNTA 9.14 Encontrar una expresión simbólica del límite de velocidad v_1 tal como el área transversal de la zona baja de la sección A_1 se vuelve insignificante en comparación con el área transversal de la sección A_2 . ¿Cómo se le llama a este resultado?

EJERCICIO 9.14 Agua que fluye en un tubo horizontal está a una presión de 1.40×10^5 Pa en un punto donde su área de sección transversal es 1.00 m^2 . Cuando el tubo se angosta a 0.400 m^2 , la presión pasa a 1.16×10^5 Pa. Encuentre la velocidad del agua a) en la parte ancha del tubo y b) en la parte angosta del mismo.

RESPUESTAS a) 3.02 m/s b) 7.56 m/s

9.8 Otras aplicaciones de la dinámica de fluidos

En esta sección describimos algunos fenómenos comunes que pueden ser explicados, al menos en parte, por la ecuación de Bernoulli.

En general, un objeto que se mueve en un fluido experimenta una fuerza neta ascendente como resultado de cualquier efecto que haga que el fluido y el objeto cambie su dirección cuando pasa junto al objeto. Por ejemplo, una pelota de golf golpeada con un palo recibe un rápido giro hacia atrás, como se muestra en la figura 9.34. Los hoyuelos de la pelota la ayudan a “deslizar” el aire para que siga la curvatura de la superficie de la pelota. La figura muestra una capa delgada de aire que rodea en parte a la pelota y por ello el aire se desvía hacia abajo. Dado que la pelota empuja el aire hacia abajo, por la tercera ley de Newton, éste debe empujar la pelota hacia arriba y hacer que ascienda. Sin los hoyuelos, el aire no se desliza bien y la pelota no llega tan lejos. Por la misma razón, la pelusa de una pelota de tenis ayuda a que ésta deslice el aire que se mueve a su alrededor y la ayude a colocarse en lugar a mayor distancia.

Muchos aparatos funcionan en la forma que se muestra en la figura 9.35. Una corriente de aire que pasa sobre un tubo abierto reduce la presión arriba del tubo, lo que hace que el líquido suba en la corriente de aire. El líquido es entonces dispersado en una fina nube de pequeñas gotas. Es fácil reconocer que éste es el llamado atomizador que se emplea en botellas de perfume y en rociadores de pintura. El mismo principio es usado en el carburador de una moto. En este caso, la región de baja presión del carburador es producida por un aire succionado por el émbolo a través del filtro de aire. La gasolina se evapora, se mezcla con el aire y entra al cilindro del motor donde se produce la combustión.

En una persona con arteriosclerosis avanzada, el efecto Bernoulli produce un síntoma llamado **palpitación vascular**. En esta condición, la arteria está restringida como resultado de una placa presente en sus paredes interiores, como se ve en la figura 9.36. Para mantener un flujo constante, la sangre debe pasar con más rapidez que la normal por esta

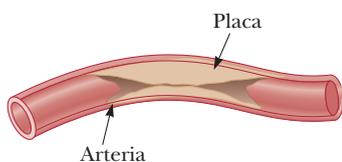


Figura 9.36 La sangre debe moverse más rápido de lo normal por una región restringida de una arteria.

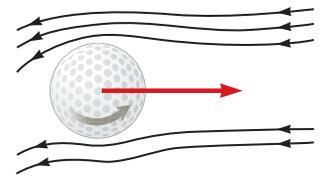


Figura 9.34 Una pelota de golf que gira experimenta una fuerza de sustentación que le permite avanzar mayor distancia de la que no avanzaría si no girara.

APLICACIÓN

“Atomizadores” en botellas de perfume y dispersores de pintura

BIO APLICACIÓN

Palpitación vascular y aneurismas

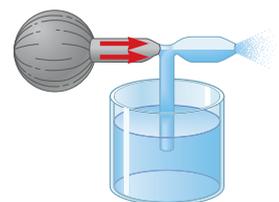


Figura 9.35 Un flujo de aire que pasa sobre un tubo sumergido en un líquido, hace que éste suba por el tubo. Este efecto es usado en botellas de perfume y en rociadores de pintura.

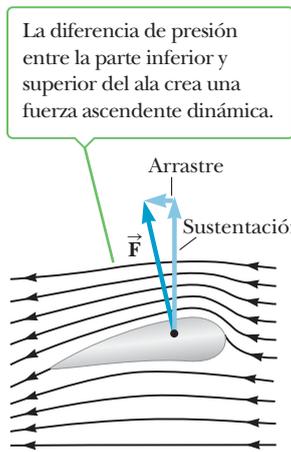


Figura 9.37 Movimiento laminar alrededor del ala de un avión. La presión arriba es menor que la presión abajo, por lo que hay una fuerza ascendente dinámica.

APLICACIÓN

Sustentación en las alas de aviones

restricción. Si la velocidad de la sangre es suficientemente alta en la región reducida, su presión es baja y la arteria puede colapsarse por la presión externa, causando una interrupción momentánea del flujo de sangre. Durante el colapso no hay efecto Bernoulli, así que el vaso se vuelve a abrir bajo la presión arterial. Conforme la sangre circula por la arteria reducida, la presión interna desciende y la arteria se cierra nuevamente. Estas variaciones del flujo sanguíneo pueden escucharse con un estetoscopio. Si la placa se desprende y termina en un vaso más pequeño que lleve sangre al corazón, la persona puede sufrir un ataque cardíaco.

Un **aneurisma** es un punto debilitado de una arteria donde las paredes de ésta se inflan. La sangre circula con más lentitud en esta región, como se desprende de la ecuación de continuidad, resultando en un aumento de presión en la cercanía del aneurisma con respecto a la presión en otras partes de la arteria. Esta condición es peligrosa porque el exceso de presión puede causar que la arteria se rompa.

La sustentación del ala de un avión también es explicable, en parte, por el efecto Bernoulli. Las alas de un avión están diseñadas para que la velocidad del aire arriba del ala sea mayor que debajo de ella. Como resultado, la presión del aire arriba del ala es menor que la presión abajo, por lo que hay una fuerza neta hacia arriba en el ala, llamada *sustentación*. (Hay también una componente horizontal llamada *de arrastre*). Otro factor que influye en la sustentación se ve en la figura 9.37, y es la ligera inclinación del ala hacia arriba. Esta hace que las moléculas de aire incidan en la parte inferior para ser desviadas hacia abajo, produciendo una fuerza de reacción ascendente por la tercera ley de Newton. Finalmente, la turbulencia también actúa: si el ala se inclina demasiado, el flujo de aire que cruza la superficie superior se hace turbulento y la diferencia de presión de un lado a otro del ala no es tan grande como la predicha por el efecto Bernoulli. En un caso extremo, esta turbulencia puede hacer que el avión pierda sustentación y caiga.

■ EJEMPLO 9.15 Levantar una superficie de sustentación

OBJETIVO Utilizar la ecuación de Bernoulli para calcular la sustentación de las alas de un avión.

PROBLEMA Un avión tiene alas con un área de 4.00 m^2 cada una, diseñadas de manera que el flujo de aire sobre la parte superior del ala sea de 245 m/s y por debajo de 222 m/s . Encuentre la masa del avión de manera que la sustentación soporte su peso, suponiendo que la fuerza debida a la diferencia de presiones a través de las alas está dirigida hacia arriba.

ESTRATEGIA Este problema puede resolverse sustituyendo valores en la ecuación de Bernoulli para encontrar la diferencia de presión entre el aire bajo el ala y sobre ella, para después aplicar la segunda ley de Newton para encontrar la masa que el avión puede sustentar.

SOLUCIÓN

Aplice la ecuación de Bernoulli para el flujo de aire bajo el ala (punto 1) y sobre el ala (punto 2). Los términos de energía potencial gravitacional son pequeños en comparación con los otros términos y pueden despreciarse.

Resuelva esta ecuación para la diferencia de presiones:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$

Sustituya las rapidezces dadas y $\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$, la densidad del aire:

$$\Delta P = \frac{1}{2}(1.29 \text{ kg/m}^3)(245^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 - 222^2 \text{ m}^2/\text{s}^2)$$

$$\Delta P = 6.93 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Aplice la segunda ley de Newton. Para soportar el peso del avión, la suma de la fuerza de sustentación y la fuerza de gravedad debe ser igual a cero. Resuelva para la masa del avión.

$$2A\Delta P - mg = 0 \rightarrow m = 5.66 \times 10^3 \text{ kg}$$

COMENTARIOS Observe que el factor 2 en la última ecuación es necesario porque el avión tiene dos alas. La densidad de la atmósfera disminuye constantemente con el aumento de altura, reduciendo la elevación. Como resultado, todo avión tiene una altura máxima de operación.

PREGUNTA 9.15 ¿Por qué la elevación máxima se ve afectada por la altitud?

EJERCICIO 9.15 Aproximadamente, ¿de qué tamaño deberían ser las alas de un avión en Marte si su motor genera las mismas diferencias de velocidad que en el ejemplo y la masa total de la nave es de 400 kg ? La densidad del aire sobre la

superficie de Marte es aproximadamente 1% al de la Tierra a nivel del mar y la aceleración de la gravedad en la superficie de Marte es cerca de 3.8 m/s^2 .

RESPUESTA Redondeando a una cifra significativa, cada ala debería tener un área de aproximadamente 10 m^2 . Ha habido intentos para el diseño de un avión robot solar para viajar a Marte, con grandes y ligeras alas.

■ FÍSICA APLICADA 9.4 Navegar contra el viento

¿Cómo puede un bote de velas lograr la aparentemente imposible tarea de navegar contra el viento?

EXPLICACIÓN Como se ve en la figura 9.38, el viento que sopla en dirección de la flecha, hace que la vela se infle y tome una forma semejante a la del ala de un avión. Por la ecuación de Bernoulli, justo como para el ala de un avión, hay una fuerza sobre la vela en la dirección mostrada. La componente de la fuerza perpendicular al bote tiende a provocar que éste se mueva de lado en el agua, pero la quilla impide este movimiento lateral. La componente de la fuerza en la dirección del viento mueve al bote casi en contra de éste. La palabra *casi* se usa porque un bote de velas puede avanzar sólo cuando la dirección del viento es de 10 a 15° con respecto a la dirección de avance. Esto significa que para que navegue directamente contra el viento, un bote

debe seguir una trayectoria en zigzag, maniobra conocida como *viraje*, de modo que el viento siempre esté a un mismo ángulo con respecto a la dirección de viaje. ■

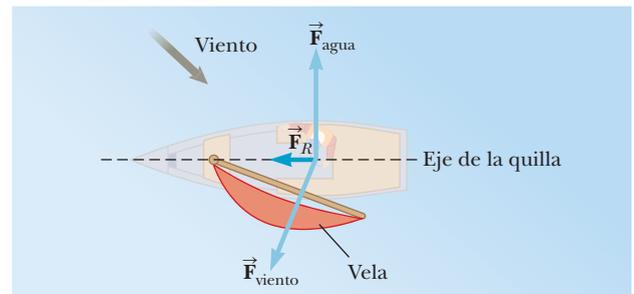


Figura 9.38 (Física aplicada 9.4)

■ FÍSICA APLICADA 9.5 Plomería doméstica

Considere la parte de un sistema de plomería doméstica que se muestra en la figura 9.39. El sifón de agua del tubo que está bajo el fregadero contiene un tapón de agua que impide que los gases del drenaje suban por el fregadero y penetren en la casa. Suponga que el lavaplatos está drenando de modo que el agua se mueve hacia la izquierda del tubo del drenaje.

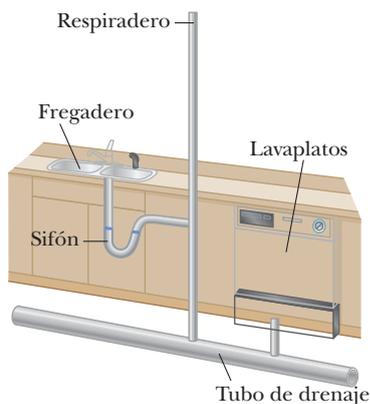


Figura 9.39 (Física aplicada 9.5)

¿Cuál es el propósito del respiradero que está abierto al aire, arriba del techo de la casa? ¿En qué dirección se mueve el aire en la abertura del respiradero, hacia arriba o hacia abajo?

EXPLICACIÓN Imaginemos que no hay respiradero, de manera que el tubo del drenaje está simplemente conectado por el sifón al tubo del drenaje. Cuando el agua del lavaplatos se mueve hacia la izquierda en el tubo del drenaje, la presión en éste se reduce por debajo de la presión atmosférica, de acuerdo con el principio de Bernoulli. La presión en el drenaje en el fregadero todavía es igual a la presión atmosférica. Entonces, esta diferencia de presión puede empujar al tapón de agua del sifón del fregadero hacia abajo del tubo del drenaje y obligarla que entre en el tubo del drenaje, eliminándolo como barrera para los gases. Con el agregado del respiradero del techo, la presión reducida del agua del lavaplatos que hace que entre aire en el tubo respiradero en el techo. Esto mantiene la presión en el respiradero y el lado derecho del tubo del drenaje del fregadero a una presión cercana a la atmosférica, de modo que el tapón de agua del sifón permanece en su lugar. ■

La velocidad de escape del motor de un cohete también puede entenderse cualitativamente con la ecuación de Bernoulli, aunque, en la práctica, hay una gran cantidad de variables que hay que tomar en cuenta. En realidad, los cohetes trabajan mejor en el vacío que en la atmósfera, contrariamente a un reciente artículo en el *New York Times* donde critican al

APLICACIÓN
Motores de cohetes

pionero de los cohetes Robert Goddard, que sostenía que no todos trabajarían sin tener un aire que empujar. La presión dentro de una cámara de combustión es P y la presión fuera del inyector es la presión atmosférica ambiental, P_{atm} . Las diferencias de altura entre la cámara de combustión y el extremo del inyector dan lugar a contribuciones insignificantes de la energía potencial gravitacional. Además, los gases dentro de la cámara fluyen a una velocidad despreciable en comparación con los gases que van a través del inyector. La velocidad del extractor puede encontrarse con la ecuación de Bernoulli,

$$v_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{2(P - P_{\text{atm}})}{\rho}}$$

Esta ecuación demuestra que la velocidad en el extractor se reduce en la atmósfera, así que los cohetes son realmente más eficaces en el vacío. También es interesante el valor de la densidad ρ en el denominador. Un líquido o un gas trabajando a una densidad menor darán una velocidad mayor al extractor, lo que explica, en parte, por qué el hidrógeno líquido, que tiene una densidad muy baja, es una buena opción.

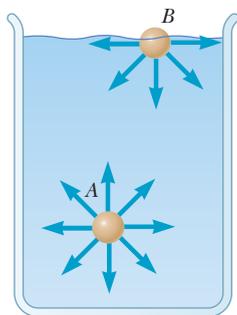


Figura 9.40 La fuerza neta sobre una molécula en A es cero porque está completamente rodeada por otras moléculas. La fuerza neta sobre una molécula en la superficie en B es hacia abajo porque no está completamente rodeada por otras moléculas.

9.9 Tensión superficial, acción capilar y flujo de fluidos viscosos

Si observamos con cuidado una gota de rocío que brilla a la luz de la mañana, veremos que es esférica. La gota adopta esta forma por una propiedad de las superficies de los líquidos llamada **tensión superficial**. Para comprender el origen de la tensión superficial considere una molécula en el punto A en un recipiente de agua, como en la figura 9.40. Aun cuando las moléculas cercanas ejercen fuerzas sobre esa molécula, la fuerza neta sobre ella es cero porque está completamente rodeada por otras moléculas y es atraída por igual en todas direcciones. La molécula en B, sin embargo, no es atraída igualmente en todas direcciones. Ya que no hay moléculas encima que ejerzan fuerza hacia arriba, la molécula en B es atraída hacia el interior del líquido. La contracción en la superficie del líquido cesa cuando la atracción hacia adentro ejercida sobre las moléculas de la superficie queda balanceada por las fuerzas de repulsión hacia fuera que surgen por colisiones con moléculas del interior del líquido. **El efecto neto de esta atracción sobre todas las moléculas de la superficie es hacer que la superficie del líquido se contraiga y, en consecuencia, forme un área del líquido tan pequeña como sea posible.** Las gotas de agua toman una forma esférica porque una esfera tiene la mínima área superficial para contener un volumen dado.

Si, con sumo cuidado, se coloca una aguja de coser sobre la superficie de un tazón de agua, se verá que la aguja flota aun cuando la densidad del acero sea unas ocho veces más que la del agua. Este fenómeno puede explicarse por la tensión superficial. Un examen minucioso de la aguja muestra que en realidad se apoya en una depresión de la superficie del líquido, como se ve en la figura 9.41. La superficie del agua actúa como una membrana elástica bajo tensión. El peso de la aguja produce la depresión, lo cual aumenta el área superficial de la película. Fuerzas moleculares actúan ahora en todos los puntos a lo largo de la depresión en un intento por restablecer la superficie a su posición original. Las componentes actúan para equilibrar la fuerza de gravedad que actúa sobre la aguja. La aguja en flotación puede hundirse agregando un poco de detergente al agua, lo que reduce la tensión superficial.

La **tensión superficial** γ en una película de líquido se define como la magnitud de la fuerza F de tensión superficial dividida entre la longitud L a lo largo de la cual actúa la fuerza:

$$\gamma \equiv \frac{F}{L} \quad [9.19]$$

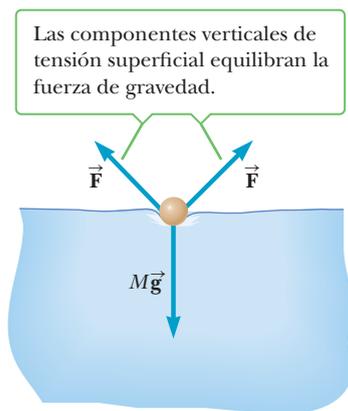


Figura 9.41 Vista frontal de una aguja apoyada sobre la superficie del agua.

Las unidades SI de la tensión superficial son newton por metro, y en la tabla 9.4 se muestran valores de algunos materiales representativos.

La tensión superficial puede pensarse como el contenido de energía del fluido en su superficie por unidad de área. Para ver que esto es razonable pueden manipularse las unidades de la tensión superficial y como sigue:

$$\frac{\text{N}}{\text{m}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

En general, **cualquier configuración de un objeto en equilibrio es aquella en la que la energía es mínima**. Consecuentemente, un fluido tomará una forma tal que el área de su superficie sea tan pequeña como sea posible. Para un volumen dado, una forma esférica tiene el área superficial más pequeña; por eso, una gota de agua toma una forma esférica.

Un aparato para medir la tensión superficial se muestra en la figura 9.42. Un alambre circular de circunferencia L es elevado de un cuerpo líquido. La película superficial se adhiere a los bordes interiores y exteriores del alambre, esto es, lo retiene y hace que el resorte se estire. Si el resorte está calibrado, podemos medir la fuerza necesaria para vencer la tensión superficial del líquido. En este caso, la tensión superficial está dada por:

$$\gamma = \frac{F}{2L}$$

Utilizamos $2L$ para la longitud porque la película superficial ejerce fuerzas en el interior y exterior del anillo.

La tensión superficial del líquido disminuye con el aumento de la temperatura porque las moléculas en movimiento de un líquido caliente no están unidas tan fuertemente como las que se encuentran en un líquido más frío. Además, ciertos ingredientes conocidos como agentes activos superficialmente reducen la tensión superficial cuando se agregan a los líquidos. Por ejemplo, el jabón o detergente reducen la tensión superficial del agua. Esta reducción en la tensión superficial permite que el agua penetre más fácilmente en las grietas y fisuras de la ropa para limpiarlas mejor que el agua simple. Un efecto similar se presenta en nuestros pulmones. El tejido superficial de los sacos de aire de los pulmones contiene un fluido con una tensión superficial de unos 0.050 N/m. Un líquido con una tensión superficial tan alta haría muy difícil que los pulmones se expandieran cuando inhalamos. Sin embargo, puesto que el área de los pulmones aumenta con cada inhalación, el cuerpo segrega en el tejido una sustancia que gradualmente reduce la tensión superficial del líquido. En su expansión máxima, la tensión superficial del líquido de los pulmones puede bajar hasta 0.005 N/m.

Tabla 9.4 Tensión superficial para varios líquidos

Líquido	$T(^{\circ}\text{C})$	Tensión superficial (N/m)
Alcohol etílico	20	0.022
Mercurio	20	0.465
Agua jabonosa	20	0.025
Agua	20	0.073
Agua	100	0.059

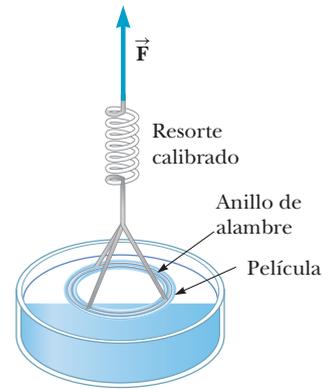


Figura 9.42 Un aparato para medir la tensión superficial de los líquidos. La fuerza sobre el anillo de alambre se mide justo antes de salir del líquido.

BIO APLICACIÓN

Tensión superficial de un saco de aire

EJEMPLO 9.16 Caminar sobre el agua BIO

OBJETIVO Aplicar la ecuación de tensión superficial.

PROBLEMA Muchos insectos pueden literalmente caminar sobre el agua, valiéndose de la tensión superficial como su soporte. Para mostrar este hecho, suponga que el insecto tiene un “pie” esférico. Cuando el insecto pisa el agua con sus seis patas, una depresión se forma en el agua alrededor de cada pie, como se ve en la figura 9.43a. La tensión superficial del agua produce fuerzas hacia arriba sobre el agua que tienden a restaurar la superficie del agua a su normal forma plana. Si el insecto tiene una masa de 2.0×10^{-5} kg y el radio de cada pie es 1.5×10^{-4} m, encuentre el ángulo θ .

ESTRATEGIA Encuentre una expresión para la magnitud de la fuerza neta F dirigida tangencialmente a la parte con la depresión en la superficie del agua y obtenga la parte que actúa verticalmente, en oposición a la fuerza de gravedad. Suponga que el radio de la depresión es el mismo que el radio del pie del insecto. Ya que el insecto tiene seis patas, una sexta parte de su peso debe ser soportado por una de sus piernas, suponiendo que el peso está uniformemente distribuido. La longitud L es justo la distancia alrededor de un círculo. Usando la segunda ley de Newton para un cuerpo en equilibrio (aceleración cero), resuelva para θ .

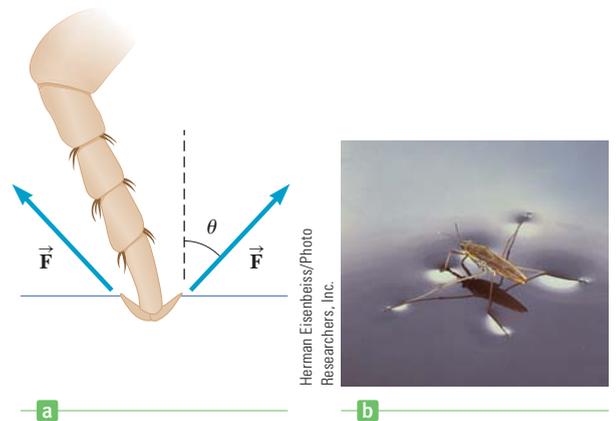


Figura 9.43 (Ejemplo 9.16) a) Una pata de un insecto apoyada sobre la superficie del agua. b) Este caminante no se hunde, porque una fuerza de tensión superficial actúa hacia arriba en cada pata, lo que equilibra la fuerza de gravedad.

(continúa)

SOLUCIÓN

Empiece con la ecuación de la tensión superficial:

$$F = \gamma L$$

Concéntrase en un pie circular, sustituyendo $L = 2\pi r$. Multiplique por $\cos \theta$ para obtener la componente vertical F_v :

$$F = \gamma(2\pi r) \cos \theta$$

Escriba la segunda ley de Newton para un pie del insecto, que soporta la sexta parte del peso del insecto:

$$\sum F = F_v - F_{\text{grav}} = 0$$

$$\gamma(2\pi r) \cos \theta - \frac{1}{6}mg = 0$$

Despeje $\cos \theta$ y sustituya:

$$(1) \quad \cos \theta = \frac{mg}{12\pi r\gamma}$$

$$= \frac{(2.0 \times 10^{-5} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{12\pi(1.5 \times 10^{-4} \text{ m})(0.073 \text{ N/m})} = 0.47$$

Tome el coseno inverso en ambos lados para hallar el ángulo θ :

$$\theta = \cos^{-1}(0.47) = 62^\circ$$

COMENTARIOS Si el peso del insecto fuera lo suficientemente grande para hacer que el lado derecho de la ecuación (1) sea mayor que 1, una solución de θ sería imposible, porque el coseno de un ángulo nunca es mayor que 1. En estas condiciones el insecto se hundiría.

PREGUNTA 9.16 Verdadero o Falso: El agua caliente da más sustentación a los insectos que el agua fría.

EJERCICIO 9.16 Una aguja de típica costura flota en el agua cuando su longitud es paralela a la superficie del agua. Estime la máxima masa posible de la aguja, suponiendo que ésta es de 2 pulg de largo. *Sugerencia:* El coseno de un ángulo nunca es mayor que 1.

RESPUESTA 0.8 g

La superficie de los líquidos

Si usted ha examinado atentamente la superficie del agua en un recipiente de vidrio, es posible que haya observado que la superficie del líquido cerca de las paredes del vidrio se curva hacia arriba si se ve desde el centro hacia el borde, como se observa en la figura 9.44a. Sin embargo, si se pone mercurio en un recipiente de vidrio, la superficie de metal se curva hacia abajo, como lo muestra la figura 9.44b. Estos efectos de superficie pueden explicarse considerando las fuerzas entre moléculas. En particular, debemos considerar las fuerzas que las moléculas del líquido ejercen una sobre otra y las fuerzas que las moléculas de la superficie de vidrio ejercen sobre las del líquido. En términos generales, las fuerzas entre

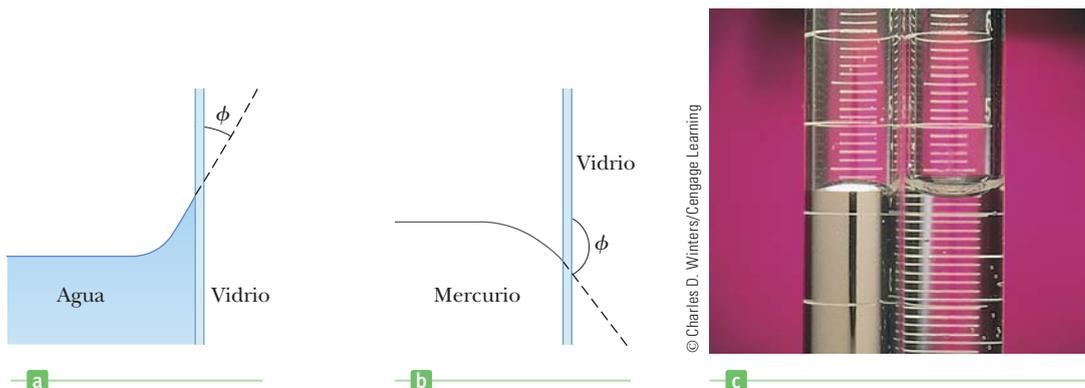


Figura 9.44 Un líquido en contacto con una superficie sólida. a) Para el agua, la fuerza de adhesión es mayor que la fuerza de cohesión. b) Para el mercurio, la fuerza de adhesión es menor que la fuerza de cohesión. c) La superficie de mercurio (*izquierda*) se curva hacia abajo en el contenedor de vidrio, mientras que en la superficie de agua (*derecha*) se curva hacia arriba, a medida que usted se mueve del centro al borde.

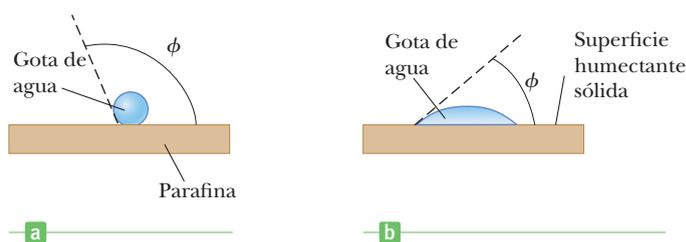


Figura 9.45 a) El ángulo de contacto entre el agua y la parafina es de unos 107° . En este caso, la fuerza de cohesión es mayor que la fuerza de adhesión. b) Cuando una sustancia química conocida como agente humectante se agrega al agua, humedece la superficie de la parafina y $\phi < 90^\circ$. En este caso, la fuerza de adhesión es mayor que la fuerza de cohesión.

moléculas semejantes, por ejemplo las fuerzas entre moléculas de agua, se llaman **fuerzas de cohesión** y las fuerzas entre moléculas diferentes se llaman **fuerzas de adhesión**.

El agua tiende a adherirse a las paredes del vidrio porque las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua y las del vidrio son *mayores* que las fuerzas de cohesión entre las moléculas del agua. En efecto, estas últimas se adhieren a la superficie del vidrio, en lugar de caer en el volumen del agua. Cuando se mantiene esta situación, se dice que el líquido “moja” la superficie del vidrio. La superficie del mercurio se curva hacia abajo, cerca de las paredes del recipiente, porque las fuerzas de cohesión entre los átomos de mercurio son mayores que las fuerzas de adhesión entre mercurio y vidrio. Un átomo de mercurio cerca de la superficie es atraído con más fuerza hacia otros átomos de mercurio que hacia la superficie del vidrio; por lo tanto, el mercurio “no moja” la superficie del vidrio.

El ángulo ϕ entre la superficie sólida y una recta trazada tangente al líquido en la superficie se llama **ángulo de contacto** (figura 9.45). El ángulo ϕ es menor que 90° , para cualquier sustancia en las que las fuerzas de adhesión sean más fuertes que las fuerzas de adhesión y mayores a 90° si predominan las fuerzas de cohesión. Por ejemplo, si una gota de agua se coloca sobre parafina, el ángulo de contacto es aproximadamente 107° (figura 9.45a). Si ciertos químicos, llamados agentes humectantes o detergentes, se agregan al agua, el ángulo de contacto resulta ser menor a 90° , como se ve en la figura 9.45b. Agregar estas sustancias al agua es útil cuando se desea asegurar que el agua haga contacto con una superficie y la penetre. Por esta razón, se agregan detergentes al agua para lavar ropa y platos.

Por otro lado, algunas veces es necesario *mantener* seca una superficie, como ocurre con la ropa impermeable, donde se requiere una situación un tanto inversa a la que se ve en la figura 9.45. La ropa se rocía con un agente impermeabilizante que cambia ϕ de menos de 90° a más de 90° . De esta manera, el agua forma gotas en la superficie y no penetra fácilmente en la ropa.

Acción capilar

En los tubos capilares el diámetro de la abertura es muy pequeño, del orden de una centésima de centímetro. De hecho, la palabra *capilar*, significa “semejante al cabello”. Si uno de estos tubos se inserta en un fluido en el que las fuerzas de adhesión dominan sobre las de cohesión, el líquido subirá por el tubo, como se ve en la figura 9.46. El ascenso del líquido por el tubo puede explicarse en términos de la forma de la superficie del líquido y de los efectos de tensión superficial en el líquido. En el punto de contacto entre líquido y sólido, la fuerza hacia arriba de la tensión superficial está dirigida como se ve en la figura. De la ecuación 9.19, la magnitud de esta fuerza es

$$F = \gamma L = \gamma(2\pi r) \quad [9.20]$$

(Aquí, utilizamos $L = 2\pi r$ porque el líquido está en contacto con la superficie del tubo en todos los puntos alrededor de la circunferencia). La componente vertical de esta fuerza debida a la tensión superficial es:

$$F_v = \gamma(2\pi r)(\cos \phi) \quad [9.20]$$

Para que el líquido en el interior del tubo capilar esté en equilibrio, esta fuerza hacia afuera debe ser igual al peso del cilindro de agua de altura h dentro del tubo capilar. El peso de esta agua es

$$w = Mg = \rho Vg = \rho g\pi r^2 h \quad [9.21]$$

APLICACIÓN

Detergentes y agentes humectantes

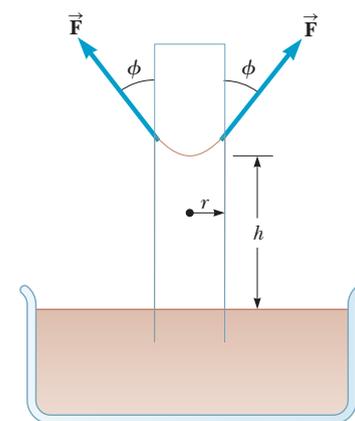


Figura 9.46 Un líquido sube por un tubo de diámetro pequeño por acción capilar, resultado de la tensión superficial y de fuerzas de adhesión.

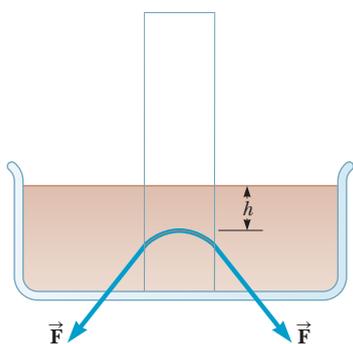


Figura 9.47 Cuando las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido son mayores que las de adhesión, el nivel del líquido en el tubo capilar está debajo de la superficie del líquido circundante.

BIO APLICACIÓN

Muestras de sangre con tubos capilares

BIO APLICACIÓN

Acción capilar en las plantas

Igualando F_v de la ecuación 9.20 con w de la ecuación 9.21 (aplicando la segunda ley de Newton para el equilibrio), tenemos

$$\gamma (2\pi r) (\cos \phi) = \rho g \pi r^2 h$$

Despejando h se obtiene la altura a la que es atraída en el tubo:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g r} \cos \phi \quad [9.22]$$

Si un tubo capilar se inserta en un líquido en el que las fuerzas de cohesión dominan sobre las fuerzas de adhesión, el nivel del líquido en el tubo capilar estará abajo del nivel de la superficie del líquido circundante, como se ve en la figura 9.47. Un análisis semejante a éste, mostraría que la distancia h de la superficie que se deprime está dada por la ecuación 9.22.

A veces, los tubos capilares son utilizados para sacar pequeñas muestras de sangre de un pinchazo con una aguja en la piel. La acción capilar también debe considerarse en la construcción de edificios de bloques de concreto, porque la filtración de agua por los poros capilares de los bloques o el mortero pueden dañar el interior del edificio. Para evitar este problema, los bloques suelen cubrirse con un agente impermeabilizante, ya sea por dentro o por fuera del edificio. La filtración de agua por una pared es un efecto indeseable de la acción capilar. Las plantas dependen de la acción capilar para transportar agua y nutrientes, y las esponjas y las toallas de papel se emplean en una forma útil para absorber líquidos derramados.

EJEMPLO 9.17 Subida del agua **BIO**

OBJETIVO Aplicar la tensión superficial a la acción capilar.

PROBLEMA Encontrar la altura a la que el agua subiría en un tubo capilar de radio igual a 5.0×10^{-5} m. Suponga que el ángulo de contacto entre el agua y el material del tubo es suficientemente pequeño como para considerarlo cero.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustituir valores en la ecuación 9.22.

SOLUCIÓN

Sustituya los valores conocidos en la ecuación 9.22:

$$\begin{aligned} h &= \frac{2\gamma \cos 0^\circ}{\rho g r} \\ &= \frac{2(0.073 \text{ N/m})}{(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(5.0 \times 10^{-5} \text{ m})} \\ &= 0.30 \text{ m} \end{aligned}$$

PREGUNTA 9.17 Basado en los resultados de estos cálculos. ¿Es la acción capilar el único mecanismo probable que transporta agua y nutrientes en las plantas? Explique.

EJERCICIO 9.17 Suponga que el alcohol etílico asciende 0.250 m en un tubo delgado. Estime el radio del tubo, suponiendo que el ángulo de contacto es aproximadamente cero.

RESPUESTA 2.2×10^{-5} m

Flujo de un fluido viscoso

Es considerablemente más fácil sacar agua de un recipiente que sacar miel, lo cual se debe a que ésta tiene una viscosidad más alta que la del agua. En un sentido general, **la viscosidad se refiere a la fricción interna en un fluido**. Es muy difícil que las capas de un fluido viscoso se deslicen una frente a la otra, como también es difícil que una superficie sólida se deslice frente a otra si entre ellas hay un fluido altamente viscoso, por ejemplo, alquitrán suave.

Cuando un fluido ideal (no viscoso) circula por un tubo, sus capas se deslizan una frente a la otra sin ninguna resistencia. Si el tubo tiene una sección transversal uniforme, cada capa tiene la misma velocidad que se ilustra en la figura 9.48a. En contraste, las capas de un fluido viscoso tienen diferentes velocidades como se muestra en la figura 9.48b. El fluido

tiene su máxima velocidad en el centro del tubo, mientras que la capa junto a la pared no se mueve debido a las fuerzas de cohesión entre las moléculas y la superficie de la pared.

La mejor manera de entender el concepto de viscosidad, es considerar una capa de líquido colocada entre dos superficies sólidas, como se ve en la figura 9.49. La superficie inferior está fija en su posición, mientras que la superior se mueve hacia la derecha con una velocidad \vec{v} bajo la acción de una fuerza externa \vec{F} . Debido a este movimiento, una parte del líquido está distorsionada con respecto a su forma original $ABCD$ en un instante, a la forma $A'EFD$ un momento después. La fuerza necesaria para mover la placa superior y deformar el líquido depende de varios factores. La fuerza es proporcional al área A en contacto con el líquido y la velocidad v de éste. Además, la fuerza es inversamente proporcional a la distancia d entre las dos placas. Estas proporcionalidades pueden expresarse como $F \propto Av/d$. Así, la fuerza necesaria para mover la placa superior a una velocidad fija v es:

$$F = \eta \frac{Av}{d} \quad [9.23]$$

donde η es el **coeficiente de viscosidad** del fluido.

Las unidades de la viscosidad en el SI son $N \cdot s/m^2$. Las unidades de la viscosidad en muchas fuentes de consulta se expresan a veces en $\text{dinas} \cdot s/cm^2$, llamadas **1 poise**, en honor del científico francés J. L. Poiseuille (1799-1869). La relación entre las unidades SI de viscosidad y el poise es

$$1 \text{ poise} = 10^{-1} N \cdot s/m^2 \quad [9.24]$$

Las pequeñas viscosidades se expresan a veces en centipoise (cp), donde $1 \text{ cp} = 10^{-2}$ poise. En la tabla 9.5 aparecen los coeficientes de viscosidad de algunas sustancias comunes.

Ley de Poiseuille

En la figura 9.50 aparece la sección de un tubo de longitud L y radio R que contiene un fluido bajo una presión P_1 en el extremo izquierdo y una presión P_2 a la derecha. Por la diferencia de presiones, el fluido circula por el tubo. El gasto (volumen por unidad de tiempo) depende de la diferencia de presión $P_1 - P_2$, las dimensiones del tubo y la viscosidad del fluido. El resultado, conocido como la **ley de Poiseuille**, es

$$\text{Gasto} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \quad [9.25]$$

donde η es el coeficiente de viscosidad del fluido. No trataremos de deducir aquí esta ecuación porque requiere métodos de cálculo diferencial e integral, aunque debe usted observar que la ecuación concuerda con el sentido común, es decir, es razonable que el gasto deba aumentar si se incrementa la diferencia de presión en el tubo o si aumenta el radio de éste. Del mismo modo, el gasto debe disminuir si aumentan la viscosidad del

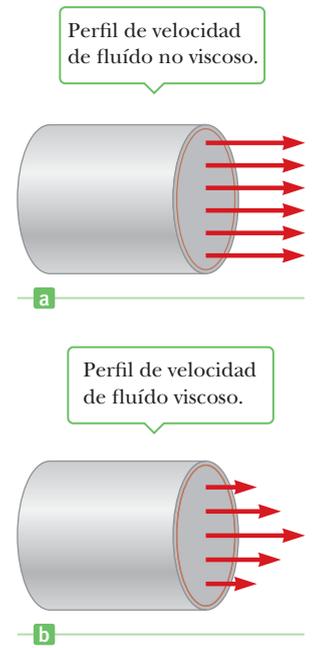


Figura 9.48 a) Todas las partículas de un fluido ideal (no viscoso) se mueven por el tubo con la misma velocidad. b) En el caso de un fluido viscoso, la velocidad de las partículas del líquido es cero en la superficie del tubo y aumenta a su valor máximo en el centro del tubo.

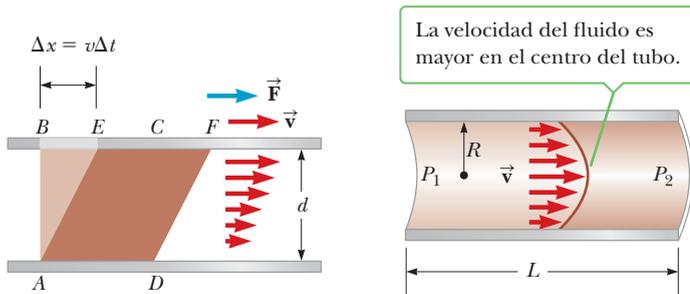


Figura 9.49 Capa de líquido entre dos superficies sólidas en las que la superficie inferior es fija y la superior se mueve hacia la derecha con una velocidad \vec{v} .

Figura 9.50 Perfil de velocidad de un fluido que circula por un tubo uniforme de sección transversal circular. El gasto está determinado por la ley de Poiseuille.

◀ Ley de Poiseuille

Tabla 9.5 Viscosidades de varios fluidos

Fluido	T (°C)	Viscosidad η ($N \cdot s/m^2$)
Agua	20	1.0×10^{-3}
Agua	100	0.3×10^{-3}
Sangre entera	37	2.7×10^{-3}
Glicerina	20	1500×10^{-3}
Aceite 10-wt para motor	30	250×10^{-3}

BIO APLICACIÓN

Ley de Poiseuille y flujo sanguíneo

fluido o la longitud del tubo crece. Así, la presencia de R y la diferencia de presión en el numerador de la ecuación 9.25 y de L y η tienen sentido.

De la ley de Poiseuille, se ve que para mantener un gasto constante, la diferencia de presión en el tubo tiene que aumentar si se incrementa la viscosidad del fluido. Este hecho es importante en la comprensión del flujo sanguíneo en el sistema circulatorio. La viscosidad de la sangre aumenta a medida que se incrementa el número de glóbulos rojos en la sangre. Cuando la sangre presenta una alta concentración de glóbulos rojos, se requiere una mayor presión de bombeo del corazón para mantenerla en circulación que cuando la concentración es menor.

Observe que el gasto varía con el radio del tubo elevado a la cuarta potencia. En consecuencia, si hay una reducción en una vena o en una arteria, el corazón tendrá que trabajar considerablemente más para producir un mayor descenso de presión, y, por lo tanto, para mantener el gasto necesario.

EJEMPLO 9.18 Una transfusión de sangre **BIO**

OBJETIVO Aplicar la ley de Poiseuille.

PROBLEMA Un paciente recibe una transfusión de sangre por medio de una aguja de radio 0.20 mm y una longitud de 2.0 cm. La densidad de la sangre es 1050 kg/m^3 . El envase que contiene la sangre está a 0.500 m sobre el brazo del paciente. ¿Cuál es el gasto que pasa por la aguja?

ESTRATEGIA Encuentre la diferencia de presión entre el nivel de la sangre y el brazo del paciente. Sustituya en la ecuación de Poiseuille, utilizando el valor de la viscosidad para la sangre entera de la tabla 9.5.

SOLUCIÓN

Calcule la diferencia de presión:

$$P_1 - P_2 = \rho gh = (1050 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(0.500 \text{ m}) \\ = 5.15 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Sustituya en la ley de Poiseuille:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\pi R^4 (P_1 - P_2)}{8\eta L} \\ = \frac{\pi (2.0 \times 10^{-4} \text{ m})^4 (5.15 \times 10^3 \text{ Pa})}{8(2.7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2)(2.0 \times 10^{-2} \text{ m})} \\ = 6.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

COMENTARIOS Compare esto con el gasto en ausencia de cualquier viscosidad. Usando la ecuación de Bernoulli, el gasto calculado es aproximadamente cinco veces más grande. Como se esperaba, una viscosidad grande reduce el gasto.

PREGUNTA 9.18 Si el radio del tubo es el doble, ¿por qué factor cambiará el gasto para un fluido viscoso?

EJERCICIO 9.18 Un tubo que transporta agua desde un tanque de 20.0 m de altura debe atravesar $3.00 \times 10^2 \text{ km}$ de desierto para llegar a un remoto pueblo. Encuentre el radio del tubo para que el gasto sea al menos de $0.050 \text{ m}^3/\text{s}$. (Utilice la viscosidad del agua a 20°C .)

RESPUESTA 0.118 m

Número de Reynolds

A velocidades suficientemente altas, el flujo de un fluido cambia de movimiento laminar a régimen turbulento, es decir, un flujo caracterizado por un movimiento altamente irregular. Experimentalmente, puede comprobarse que el principio de la turbulencia en un tubo está determinado por un factor sin dimensiones llamado **número de Reynolds**, RN , dado por

Número de Reynolds ►

$$RN = \frac{\rho v d}{\eta} \quad [9.26]$$

donde ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad promedio del fluido a lo largo de la dirección del flujo, d es el diámetro del tubo y η es la viscosidad del fluido. Si RN está abajo

de unos 2000, el flujo del fluido por un tubo es laminar; la turbulencia se presenta si RN está arriba de 3000. En la región entre 2000 y 3000, el flujo es inestable, lo cual significa que el fluido puede moverse en forma laminar, pero cualquier pequeña alteración puede hacer que su movimiento cambie a régimen turbulento.

■ EJEMPLO 9.19 Flujo sanguíneo turbulento BIO

OBJETIVO Utilizar el número de Reynolds para determinar la velocidad asociada con la turbulencia.

PROBLEMA Determine la velocidad a la que la sangre que circula en una arteria de 0.20 cm se hace turbulenta.

ESTRATEGIA La solución requiere sólo de la sustitución de valores en la ecuación 9.26 dada en el número de Reynolds y resolviéndola para la velocidad v .

SOLUCIÓN

Resuelva la ecuación 9.26 para v y sustituya la viscosidad y la densidad de la sangre del ejemplo 9.18, el diámetro d de la arteria y un número de Reynolds de 3.00×10^3 :

$$v = \frac{\eta(RN)}{\rho d} = \frac{(2.7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2)(3.00 \times 10^3)}{(1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(0.20 \times 10^{-2} \text{ m})}$$

$$v = 3.9 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS El ejercicio muestra que la rápida ingestión de una soda a través de una pajilla puede crear un estado de turbulencia.

PREGUNTA 9.19 Verdadero o Falso: Si la viscosidad de un fluido que fluye a través de un tubo es incrementada, la velocidad asociada con la turbulencia disminuye.

EJERCICIO 9.19 Determine la velocidad v a la que el agua a 20°C aspirada con una pajilla llega a ser turbulenta. La pajilla tiene un diámetro de 0.006 0 m.

RESPUESTA $v = 0.50 \text{ m/s}$

9.10 Fenómenos de transporte

Cuando un fluido fluye por un tubo, el mecanismo básico que hace posible el flujo es una diferencia de presión entre los extremos del tubo. Esta diferencia de presión es la causa del transporte de una masa de fluido de un lugar a otro. El fluido puede también moverse de un lugar a otro por un segundo mecanismo, que depende de la diferencia de *concentración* entre dos puntos del fluido, contrario a una diferencia de presión. Cuando la concentración (número de moléculas por unidad de volumen) es más alta en un lugar que en otro, se moverán moléculas del punto donde la concentración es alta a un punto donde es menor. Los dos procesos fundamentales involucrados en el transporte de un fluido resultante de las diferencias de concentración se denominan *difusión* y *ósmosis*.

Difusión

En un proceso de difusión, las moléculas se mueven de una región donde su concentración es alta hacia otra donde su concentración es menor. Para comprender por qué se presenta el fenómeno de la difusión, considere la figura 9.51, que representa un recipiente en el que se ha introducido una alta concentración de moléculas en el lado izquierdo. La línea interrumpida de la figura representa una barrera imaginaria que separa la región de alta concentración de aquella de concentración más baja. Debido a que las moléculas se mueven con altas velocidades en direcciones al azar, muchas de ellas cruzan la barrera imaginaria cuando se mueven de izquierda a derecha. Unas cuantas moléculas pasan por esta área moviéndose de derecha a izquierda simplemente porque hay muy pocas de ellas en el lado derecho del recipiente en cualquier instante. Por lo tanto, siempre habrá un movimiento *neto* de la región con muchas moléculas hacia la región con pocas moléculas. Por esta razón, la concentración en el lado izquierdo del contenedor decrece con el tiempo y aumenta la del lado derecho. Una vez alcanzado el equilibrio en la concentración, no habrá movimiento *neto* de un lado hacia el otro del área de la sección transversal. La tasa de

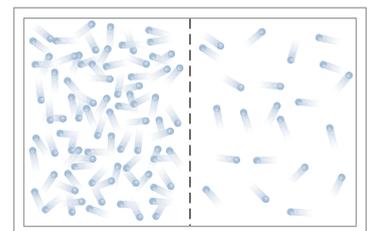


Figura 9.51 Cuando la concentración de moléculas de gas en el lado izquierdo del recipiente es mayor que la concentración del lado derecho, se producirá un movimiento neto (difusión) de moléculas de izquierda a derecha.

movimiento de moléculas que se difunden de derecha a izquierda en un intervalo de tiempo dado es igual al número que se mueve de izquierda a derecha en el mismo intervalo.

La ecuación básica de la difusión es la **ley de Fick**,

Ley de Fick ►
$$\text{Tasa de difusión} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} = \frac{\Delta M}{\Delta t} = DA \left(\frac{C_2 - C_1}{L} \right) \quad [9.27]$$

donde D es una constante de proporcionalidad. El lado izquierdo de esta ecuación se llama *tasa de difusión* y es una medida de la masa que se transporta por unidad de tiempo. La ecuación dice que la tasa de difusión es proporcional al área de la sección transversal A y al cambio de concentración por unidad de distancia, $(C_2 - C_1)/L$, lo que se conoce como *gradiente de concentración*. Las concentraciones C_1 y C_2 , se miden en kilogramos por metro cúbico. La constante de proporcionalidad D se llama **coeficiente de difusión** y tiene unidades de metros cuadrados por segundo. La tabla 9.6 muestra coeficientes de difusión para algunas sustancias.

Tamaño de las células y ósmosis

La difusión en membranas celulares es vital para llevar oxígeno a las células del cuerpo y para eliminar dióxido de carbono y otros productos de desecho de ellas. Las células requieren oxígeno para llevar a cabo diversos procesos metabólicos en los que se sintetizan o descomponen sustancias. En estos procesos, la célula consume oxígeno y produce dióxido de carbono como derivado. Un suministro fresco de oxígeno se difunde proveniente de la sangre, donde su concentración es alta y entra en la célula, donde su concentración es más baja. Por difusión, también entran y salen agua, iones y otros nutrientes.

Una célula puede funcionar correctamente sólo si puede transportar con rapidez nutrientes y desechos a través de la membrana celular. El área de la superficie de la célula debe ser lo suficientemente grande como para que el área expuesta pueda intercambiar materiales con eficacia, mientras que el volumen debe ser lo suficientemente pequeño para que los materiales puedan alcanzar o abandonar rápidamente lugares particulares. Esto requiere de una estrecha relación entre el área superficial y su volumen.

Consideremos a la célula como un cubo con lado de longitud L . El área total de la superficie es $6L^2$ y su volumen L^3 . La razón del área de la superficie total y el volumen es

$$\frac{\text{área superficial}}{\text{volumen}} = \frac{6L^2}{L^3} = \frac{6}{L}$$

Ya que L está en el denominador, una L pequeña conlleva una razón grande. Esto muestra que cuanto más pequeño es un cuerpo, puede transportar más eficientemente los nutrientes y los residuos a través de la membrana celular. El rango de tamaños de una célula va desde una millonésima de metro a varias millonésimas, así que una buena estimación de una razón representativa superficie-volumen es 10^6 .

La difusión de material a través de una membrana está parcialmente determinada por el tamaño de los poros (huecos) de la pared de la membrana. Moléculas pequeñas, como las del agua, pueden pasar fácilmente por los poros, mientras moléculas grandes, como el azúcar, pasan con algún grado de dificultad o no pasan. Una membrana que permite el paso de algunas moléculas, pero no de otras, se llama **selectivamente permeable**.

La ósmosis es la difusión de agua a través de una membrana selectivamente permeable de una alta concentración de agua a una baja concentración de agua. Como en el caso de la difusión, la ósmosis prosigue hasta que las concentraciones en los dos lados de la membrana son iguales.

Para comprender el efecto de ósmosis en células vivas, consideremos una célula particular del cuerpo que contiene una concentración de azúcar a 1%. (Es decir, 1 g de azúcar se disuelve en suficiente agua para hacer 100 ml de solución; “ml” es la abreviación de “mililitros”, así que $10^{-3} \text{ L} = 1 \text{ cm}^3$.) Suponga que esta célula se sumerge en una solución de azúcar a 5% (5 g de azúcar disuelta en suficiente agua para hacer 100 ml). Comparada con 1% de solución, hay cinco veces tantas moléculas de azúcar por volumen de unidad en la solución de azúcar a 5%, así que debe haber pocas moléculas de agua. En esta situación se difunde agua desde adentro de la célula, donde su concentración es más alta, atraviesa

Tabla 9.6 Coeficientes de difusión de varias sustancias a 20°C

Sustancia	D (m ² /s)
Oxígeno en aire	6.4×10^{-5}
Oxígeno en tejido	1×10^{-11}
Oxígeno en agua	1×10^{-9}
Sacarosa en agua	5×10^{-10}
Hemoglobina en agua	76×10^{-11}

BIO APLICACIÓN

Efecto de ósmosis en células vivas

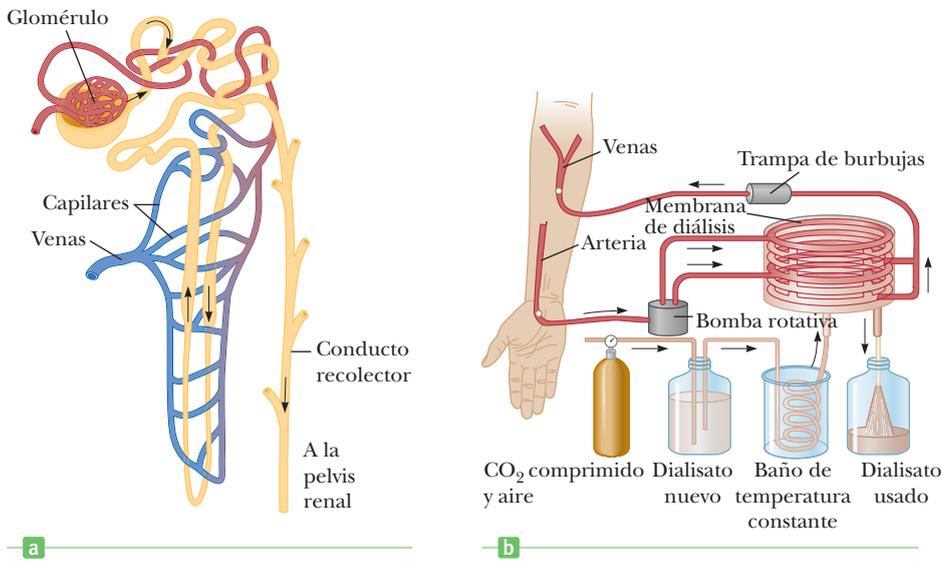


Figura 9.52 a) Diagrama de un riñón del sistema excretor humano. b) Riñón artificial.

la membrana de la pared de la célula y llega a la solución del exterior, donde la concentración de agua es más baja. Esta pérdida de agua de la célula hace que ésta se contraiga y tal vez se dañe por deshidratación. Si al cuerpo se introducen soluciones por inyecciones intravenosas, debe tenerse cuidado de que estas soluciones no alteren el equilibrio osmótico del cuerpo porque una alteración puede provocar daños a las células. Por ejemplo, si una solución salina 9% rodea a un glóbulo rojo, la célula se contrae. Por otra parte, si la solución salina es cerca de 1%, la célula revienta.

En el cuerpo, la sangre se limpia de impurezas por ósmosis cuando circula por los riñones (véase la figura 9.52a.) La sangre arterial pasa primero por un haz de capilares conocidos como *glomérulos*, donde se elimina la mayor parte de productos de desecho junto con algunas sales y minerales esenciales. De los glomérulos sale un conducto angosto que está en íntimo contacto con otros capilares en toda su longitud. Conforme pasa sangre por estos pequeños tubos, casi todos los elementos esenciales regresan a ella; no permiten que vuelvan a entrar productos de desecho, los que se eliminan en forma de orina.

Si fallan los riñones, un riñón artificial o una máquina de diálisis pueden filtrar la sangre. La figura 9.52b muestra cómo se hace. La sangre de una arteria del brazo se mezcla con heparina, que es un adelgazador de sangre y se le deja pasar por un tubo cubierto con una membrana semipermeable. Este tubo se sumerge en un baño de un líquido dialisato con la misma composición química que la sangre purificada. Los productos de desecho de la sangre entran por difusión al dialisato a través de las paredes de la membrana. La sangre filtrada regresa a una vena.

APLICACIÓN

Función renal y diálisis

Movimiento a través de un medio viscoso

Cuando un objeto cae atravesando el aire, su movimiento es obstaculizado por la fuerza de la resistencia del aire. En general, esta fuerza depende de la forma del objeto en caída y de su velocidad. Este retardo viscoso actúa sobre todos los objetos que caen, pero los detalles exactos del movimiento pueden calcularse sólo en unos cuantos casos en los que el objeto tenga una forma simple, por ejemplo una esfera. En esta sección, examinaremos el movimiento de un pequeño objeto esférico que cae lentamente sobre un medio viscoso.

En 1845 un científico llamado George Stokes descubrió que la magnitud de la fuerza resistiva sobre un objeto esférico muy pequeño de radio r que cae lentamente en un fluido de viscosidad η con una velocidad v está dada por

$$F_r = 6\pi\eta rv \quad [9.28]$$

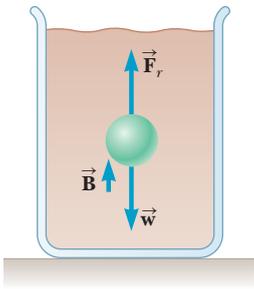


Figura 9.53 Caída de una esfera en un medio viscoso. Las fuerzas que actúan sobre la esfera son la fuerza de fricción \vec{F}_r , el empuje \vec{B} y la fuerza de gravedad \vec{w} .

Esta ecuación llamada **ley de Stokes**, tiene numerosas e importantes aplicaciones. Por ejemplo, describe la sedimentación de materia formada por partículas en muestras de sangre. Este descubrimiento fue utilizado por Robert Millikan (1886-1953) para calcular el radio de pequeñas gotas de aceite cargadas que caen cruzando el aire. A partir de ello Millikan pudo obtener la carga del electrón y debido a esto, recibió el premio Nobel en 1923 por este trabajo pionero sobre la carga elemental.

A medida que una esfera cae en un medio viscoso, actúan tres fuerzas sobre ella, figura 9.53: la fuerza de fricción \vec{F}_r , el empuje del fluido \vec{B} y la fuerza debida a la gravedad \vec{w} , cuya magnitud está dada por

$$w = \rho g V = \rho g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

donde ρ es la densidad de la esfera y $\frac{4}{3}\pi r^3$ es su volumen. De acuerdo con el principio de Arquímedes, la magnitud de la fuerza de empuje es igual al peso del fluido desalojado por la esfera,

$$B = \rho_f g V = \rho_f g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

donde ρ_f es la densidad del fluido.

En el instante en que la esfera empieza a caer, la fuerza de resistencia de fricción es cero porque la rapidez de la esfera es cero. Conforme la esfera se acelera, su rapidez y \vec{F}_r también lo hacen. Finalmente, aumenta a una velocidad llamada **terminal** v_t **la fuerza neta se hace cero**. Esto ocurre cuando la fuerza neta hacia arriba se equilibra con la fuerza hacia abajo de la gravedad. En consecuencia, la esfera alcanza su velocidad terminal cuando

$$F_r + B = w$$

o bien

$$6\pi\eta r v_t + \rho_f g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) = \rho g \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right)$$

Cuando la ecuación se resuelve para v_t , se tiene que:

$$v_t = \frac{2r^2g}{9\eta} (\rho - \rho_f) \quad [9.29]$$

Velocidad terminal ►

Sedimentación y centrifugación

Si un objeto no es esférico, aún puede utilizarse el método básico que acabamos de ver para determinar su velocidad terminal. La única diferencia es que no podemos usar la ley de Stokes para calcular la fuerza resistiva. En vez de esto, suponemos que la fuerza resistiva tiene una magnitud dada por $F_r = kv$, donde k es un coeficiente de resistencia de fricción que debe ser determinado experimentalmente. Como ya se dijo, el objeto alcanza su velocidad terminal cuando la fuerza de gravedad queda equilibrada por la fuerza neta hacia arriba, es decir:

$$w = B + F_r \quad [9.30]$$

donde $B = \rho_f g V$ es la fuerza de empuje. El volumen V del fluido desplazado está relacionado con la densidad ρ del objeto en caída por $V = m/\rho$. Por lo tanto, puede expresarse la fuerza de empuje como:

$$B = \frac{\rho_f}{\rho} mg$$

Si sustituimos esta expresión por B y $F_r = kv_t$ en la ecuación 9.30 (condición de velocidad terminal):

$$mg = \frac{\rho_f}{\rho} mg + kv_t$$

o bien

$$v_t = \frac{mg}{k} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) \quad [9.31]$$

La velocidad terminal de partículas componentes de muestras biológicas suele ser muy pequeña. Por ejemplo, la velocidad terminal de células sanguíneas que caen en plasma es alrededor de 5 cm/h en el campo gravitacional de la Tierra. Las velocidades terminales de las moléculas que conforman una célula son varios órdenes de magnitud más pequeñas debido a sus masas mucho menores. La rapidez a la que caen materiales a través de un fluido se llama **razón de sedimentación** y es de suma importancia en análisis clínicos.

La razón de sedimentación puede ser incrementada, aumentando la aceleración efectiva g que aparece en la ecuación 9.31. Un fluido que contiene varias moléculas biológicas se coloca en una centrifugadora y se hace girar a velocidades angulares muy altas (figura 9.54). Bajo estas condiciones, las partículas experimentan una aceleración radial muy grande $a_c = v^2/r = \omega^2 r$, que es mucho mayor que la aceleración en caída libre, por lo que podemos sustituir g en la ecuación 9.31 para $\omega^2 r$ y obtener:

$$v_t = \frac{m\omega^2 r}{k} \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho} \right) \quad [9.32]$$

Esta ecuación indica que la razón de sedimentación se acelera enormemente en una centrifugadora ($\omega^2 r \gg g$) y las partículas que tienen la masa más grande también tienen la velocidad terminal más alta. Por lo tanto, las partículas más grandes se sedimentan primero en el fondo de una probeta.

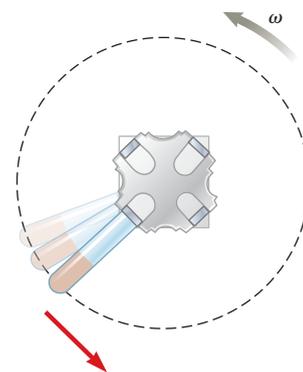


Figura 9.54 Diagrama simplificado de una centrifugadora (vista superior).

BIO APLICACIÓN

La separación de las moléculas biológicas con centrifugación

RESUMEN

9.1 Estados de la materia

La materia se clasifica normalmente por encontrarse en uno de tres estados: sólido, líquido o gaseoso. El cuarto estado de la materia es llamado plasma, el cual consiste en un sistema neutral de partículas cargadas que interactúan electromagnéticamente.

9.2 Densidad y presión

La **densidad** ρ de una sustancia de composición uniforme es su masa por unidad de volumen —kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) en el sistema internacional:

$$\rho \equiv \frac{M}{V} \quad [9.1]$$

La **presión** P en un fluido, medida en pascals (Pa), es la fuerza por unidad de área que el fluido ejerce sobre un objeto inmerso en él:

$$P \equiv \frac{F}{A} \quad [9.2]$$

9.3 Deformación en sólidos

Las propiedades elásticas de los sólidos pueden ser descritas, utilizando los conceptos de tensión y deformación. La **tensión** está relacionada a la fuerza por unidad de área que produce un cambio de forma; la **deformación** es una medida de la cantidad de este cambio. La tensión es proporcional a la deformación y la constante de proporcionalidad es el **módulo elástico**:

$$\text{Tensión} = \text{módulo de elasticidad} \times \text{deformación} \quad [9.3]$$

Los tres tipos comunes de deformación son: 1) la resistencia de un sólido a la compresión o alargamiento, caracterizado por el **módulo de Young** Y ; 2) la resistencia al desplazamiento

de las caras de un sólido que se deslizan en direcciones contrarias caracterizado por el módulo cortante S , y 3) la resistencia de un sólido o un líquido a un cambio en su volumen, caracterizado por el módulo volumétrico B .

Los tres tipos de deformación obedecen a leyes similares a la ley de Hooke de los resortes. La solución de problemas es por lo regular cuestión de identificar las variables físicas dadas y resolver para la variable desconocida.

9.4 Variación de la presión con la profundidad

La presión en un fluido incompresible varía con la profundidad h de acuerdo con la expresión

$$P = P_0 + \rho gh \quad [9.11]$$

donde P_0 es la presión atmosférica (1.013×10^5 Pa) y ρ es la densidad del fluido.

El **principio de Pascal** establece que cuando se aplica presión a un fluido encerrado, la presión se transmite sin pérdida a cada punto del fluido y a las paredes del envase contenedor.

9.6 Fuerzas de empuje y principio de Arquímedes

Cuando un objeto está parcial o totalmente sumergido en un fluido, éste ejerce una fuerza hacia arriba sobre el objeto, llamada **fuerza de empuje**. Esta fuerza es, de hecho, sólo la diferencia total en presión entre la parte superior y la parte inferior del objeto. Puede demostrarse que la magnitud de la fuerza de empuje B es igual al peso del fluido desplazado por el objeto o

$$B = \rho_{\text{fluido}} V_{\text{fluido}} g \quad [9.12b]$$

La ecuación 9.12b se conoce como **principio de Arquímedes**.

Resolver un problema de empuje usualmente involucra colocar la fuerza de empuje en la segunda ley de Newton y proceder como en el capítulo 4.

9.7 Fluidos en movimiento

Ciertos aspectos de un fluido en movimiento pueden ser entendidos suponiendo que el fluido es no viscoso e incompresible y que su movimiento se encuentra en estado estable sin turbulencias:

1. La tasa de flujo a través del tubo es una constante, lo cual es equivalente a establecer que el producto del área de sección transversal A y la velocidad v en cualquier punto es constante. En cualquier par de puntos, por lo tanto, se tiene

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [9.15]$$

Esta relación es referida como la **ecuación de continuidad**.

2. La suma de la presión, la energía cinética por unidad de volumen y la energía potencial por unidad de volumen es la misma en cualquier par de puntos a lo largo de una línea de corriente:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2 \quad [9.16]$$

La ecuación 9.16 se conoce como **ecuación de Bernoulli**. Resolver problemas con la ecuación de Bernoulli es similar a hacerlo con el teorema de trabajo-energía, en el cual se escogen dos puntos: un punto cuya cantidad es desconocida y otro punto con todas las cantidades conocidas. Se resuelve la ecuación 9.16 para la cantidad desconocida.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Un gato hidráulico tiene un pistón de entrada de área 0.050 m^2 y un pistón de salida de área 0.70 m^2 . ¿Cuánta fuerza es necesaria en el pistón de entrada para levantar un carro que pesa $1.2 \times 10^3 \text{ N}$? a) 42 N b) 68 N c) 86 N d) 110 N e) 130 N
2. Un hombre de 66.0 kg yace de espaldas sobre una cama con 1208 clavos en contacto con su cuerpo. La punta de cada clavo tiene un área de $1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2$. ¿Cuál es la presión promedio ejercida por un clavo sobre el cuerpo del hombre? a) $2.21 \times 10^5 \text{ Pa}$ b) $3.09 \times 10^5 \text{ Pa}$ c) $1.65 \times 10^6 \text{ Pa}$ d) $5.35 \times 10^5 \text{ Pa}$ e) $4.11 \times 10^4 \text{ Pa}$
3. ¿Cuál es la masa de una barra rectangular de oro sólido que tiene dimensiones de $4.50 \text{ cm} \times 11.0 \text{ cm} \times 26.0 \text{ cm}$? a) 24.8 kg b) 45.6 kg c) 11.4 kg d) 33.2 kg e) 19.5 kg
4. Una bala de plomo se coloca dentro de una alberca de mercurio. ¿Qué parte fraccional del volumen de la bala está sumergido? a) 0.455 b) 0.622 c) 0.714 d) 0.831 e) 0.930
5. ¿Cuál es la presión en el fondo del lago Ness, el cual tiene a lo más 754 pies de profundidad? (La superficie del lago está a sólo 15.8 m por encima del nivel del mar; por lo tanto, la presión ahí puede tomarse como $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$.) a) $1.52 \times 10^5 \text{ Pa}$ b) $2.74 \times 10^5 \text{ Pa}$ c) $2.35 \times 10^6 \text{ Pa}$ d) $7.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ e) $3.15 \times 10^5 \text{ Pa}$.
6. Un bloque de madera flota en el agua y un objeto de acero sólido está unido a la parte inferior del bloque por una cuerda como en la figura POM9.6. Si el bloque se mantiene flotando, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es válida? (Elija todas las respuestas correctas.) a) La fuerza de empuje sobre el objeto de acero es igual a su peso. b) La fuerza de empuje sobre el bloque es igual a su peso. c) La tensión de la cuerda es igual al peso del objeto de acero. d) La tensión de la cuerda es menor que el peso del objeto de acero. e) La fuerza de empuje

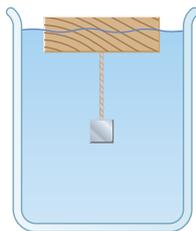


Figura POM9.6

- sobre el bloque es igual al peso del volumen de agua que desplaza.
7. Un tubo horizontal se estrecha de un radio de 0.250 m a 0.100 m . Si la rapidez del agua en el tubo es de 1.00 m/s en la parte del radio mayor del tubo. ¿Cuál es la rapidez en la parte del radio menor del tubo? a) 4.50 m/s b) 2.50 m/s c) 3.75 m/s d) 6.25 m/s e) 5.13 m/s
8. Una pelota de playa llena de aire es empujada alrededor de 1 m por debajo de la superficie de una piscina y liberada desde el reposo. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es válida, suponiendo que el tamaño de la pelota sigue siendo el mismo? (Elija todas las respuestas correctas.) a) Conforme la pelota se eleva en la piscina, la fuerza de empuje sobre ella aumenta. b) Cuando se libera la pelota, la fuerza de empuje excede la fuerza gravitatoria y acelera la pelota hacia arriba. c) La fuerza de empuje sobre la pelota disminuye a medida que ésta se acerca a la superficie de la piscina. d) La fuerza de empuje sobre la pelota es igual a su peso y se mantiene constante a medida que la pelota sube. e) La fuerza de empuje sobre la pelota mientras está sumergida es igual al peso del volumen de agua que desplaza.
9. Un bote tiene una filtración de agua y, después de que sus pasajeros son rescatados, eventualmente se hunde al fondo del lago. Cuando el bote está en el fondo, la fuerza normal sobre el bote es a) mayor que el peso del bote, b) igual al peso del bote, c) menor que el peso del bote, d) igual al peso del agua desplazada o e) igual a la fuerza de empuje sobre el bote.
10. Tres envases de diferente forma se llenan al mismo nivel con agua como se muestra en la figura POM9.10. El área de la base es la misma para los tres envases. ¿Cuál de las siguientes declaraciones es válida? a) La presión en la superficie superior del envase A es mayor porque tiene una mayor superficie. b) la presión en el fondo del envase A es mayor porque contiene más agua. c) La presión en el fondo de cada envase es la misma. d) La fuerza en el fondo de cada envase no es la misma. e) A una profundidad

determinada debajo de la superficie de cada envase, la presión sobre un lado del envase A es mayor debido a su pendiente.

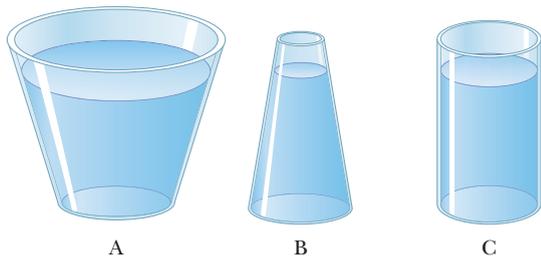


Figura POM9.10

11. Una esfera de hierro sólido y una esfera de plomo sólido del mismo tamaño están suspendidas cada una por cuerdas y se sumergen en un tanque de agua. (Tenga en cuenta que la densidad del plomo es mayor que la del hierro.) ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones son válidas? (Elija todas las respuestas correctas.) a) La fuerza de empuje sobre cada una es la misma. b) La fuerza de empuje en la esfera de plomo es mayor que la fuerza de empuje sobre la esfera de hierro, ya que el plomo tiene la mayor densidad. c) La tensión en la cuerda que sostiene la esfera de plomo es mayor que la tensión en la cuerda que sostiene

la esfera de hierro. d) La fuerza de empuje sobre la esfera de hierro es mayor que la fuerza de empuje sobre la esfera de plomo porque el plomo desplaza más agua. e) Ninguna de las afirmaciones es verdadera.

12. Una pelota de playa está hecha de plástico delgado. Se ha inflado con aire, pero el plástico no se estira. Al nadar con aletas, usted se las ingenia para llevar la pelota desde la superficie de una piscina hasta la parte inferior. Una vez que la pelota está completamente sumergida, ¿qué ocurre con la fuerza de empuje ejercida sobre la pelota de playa conforme usted la lleva más profundo? a) Aumenta. b) Se mantiene constante. c) Disminuye. d) Es imposible de determinar.
13. Una persona en un barco que flota en un estanque pequeño lanza un ancla por la borda. ¿Qué sucede con el nivel del estanque? a) Se eleva. b) Desciende. c) Sigue siendo el mismo.
14. Uno de los problemas pronosticado debido al calentamiento global es que el hielo en los casquetes polares se derrite y eleva el nivel del mar en todo el mundo. ¿Es más que una preocupación el hielo a) en el Polo Norte, donde la mayoría del hielo flota en el agua, b) en el Polo Sur, donde la mayoría del hielo se encuentra en la tierra, c) igual tanto en el Polo Norte y el Polo Sur o d) en ninguno de ellos?

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una mujer con zapatos de tacón es invitada a un hogar en el cual la cocina tiene piso cubierto de vinilo. ¿Por qué el dueño de la casa debería preocuparse?
- La densidad del aire es de 1.3 kg/m^3 al nivel del mar. De su conocimiento acerca de la presión del aire al nivel de la tierra, estime la altura de la atmósfera. Como una simplificación, suponga que la atmósfera tiene una densidad uniforme a una cierta altura después de la cual la densidad cae rápidamente a cero. (En realidad, la densidad de la atmósfera disminuye conforme se eleva.) (Esta pregunta es cortesía de Edward F. Redish. Para más preguntas de este tipo vea <http://www.physics.umd.edu/perg/>.)
- ¿Por qué a un bateador de béisbol le gusta jugar en Denver, mientras que a un lanzador de curvas no?
- La figura PC9.4 muestra vistas aéreas exactamente arriba de dos presas. Ambas presas son igual de largas (la dimensión vertical en el diagrama) e igual de profundas (hacia adentro de la página en el diagrama). La presa de

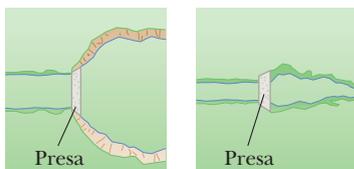
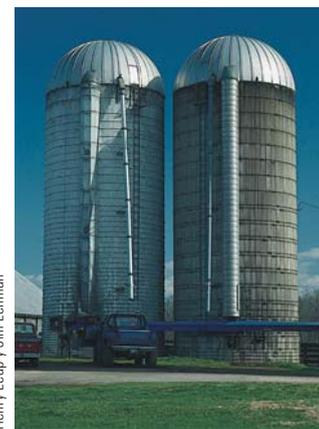


Figura PC9.4

la izquierda retiene un gran lago, mientras que la presa de la derecha contiene a un río angosto. ¿Cuál presa debe ser construida más sólidamente?

- Un silo de una granja tiene muchas bandas que envuelven a su perímetro como se muestra en la figura PC9.5. ¿Por qué el espacio entre bandas sucesivas es menor en las porciones más bajas del silo?
- Mucha gente cree que el vacío creado dentro de una aspiradora provoca que las partículas de suciedad entren. De hecho, la suciedad es empujada. Explique.



Henry Leap y Jim Lehman

Figura PC9.5

- Suponga que un barco dañado apenas flota en el océano después de que un hoyo en su casco ha sido sellado. Es jalado por un remolque hacia la orilla y dentro de un río, hacia una estación para ser reparado. Conforme el barco es jalado hacia el río, se hunde. ¿Por qué?
- BIO** Durante la inhalación, la presión en los pulmones es ligeramente menor que la presión externa y los múscu-

los que controlan la exhalación están relajados. Bajo el agua el cuerpo iguala las presiones externas e internas. Analice la condición de los músculos si una persona bajo el agua respira a través de un *snorkel*. ¿Este funcionaría en aguas profundas?

- El suministro de agua para una ciudad es a menudo proporcionado por los embalses construidos en un terreno elevado. El agua fluye desde el depósito, a través de tuberías y en su casa cuando usted abre el grifo en su lavabo. ¿Por qué el flujo de agua es más rápido en un grifo en el primer piso de un edificio que en un apartamento en un piso más alto?
- Un cubo de hielo se coloca en un vaso con agua. ¿Qué ocurre con el nivel del agua conforme el hielo se derrite?
- Coloque dos latas de refrescos, una regular y otra de dieta, en un contenedor de agua. Se dará cuenta que la bebida de dieta flota, mientras que la regular se hunde. Utilice el principio de Arquímedes para idear una explicación. *Sugerencia:* el endulzante artificial utilizado en las bebidas de dieta es menos denso que el azúcar.

- ¿Un cubo de hielo flotará más alto en agua o en una bebida con alcohol?
- Los tornados y huracanes a menudo levantan el techo de las casas. Utilice el efecto de Bernoulli para explicar por qué. ¿Por qué debería mantener las ventanas abiertas bajo estas condiciones?
- Una vez que los saltadores de esquí están en el aire (figura PC9.14), ¿por qué doblan su cuerpo hacia adelante y mantienen sus manos a los lados?



Figura PC9.14

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- denota problemas biomédicos
- denota problemas guiados
- denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- denota problema de razonamiento simbólico

9.1 Estados de la materia

9.2 Densidad y presión

- S** Suponga que dos mundos, cada uno de masa M y radio R , se fusionan en uno solo. Debido a la contracción gravitacional, el mundo combinado tiene un radio de sólo $\frac{3}{4}R$. ¿Cuál es la densidad promedio del mundo combinado en múltiplo de ρ_0 , la densidad promedio original de los dos mundos?
- La moneda de oro británica soberano es una aleación de oro y cobre con una masa total de 7.988 g y oro de 22 quilates. a) Encuentre la masa en kilogramos del oro en el soberano, utilizando el hecho de que el número de quilates = $24 \times (\text{masa del oro}) / (\text{masa total})$. b) Calcule el volumen del oro y el cobre, respectivamente, utilizado para la manufacturación de la moneda. c) Calcule la densidad de la moneda.
- CIC** Cuatro acróbatas de masas 75.0 kg, 68.0 kg, 62.0 kg y 55.0 kg forman una torre humana, cada acróbata subido en los hombros del otro. El acróbata de 75.0 kg es la parte baja de la torre. a) ¿Qué fuerza normal actúa sobre el acróbata de 75 kg? b) Si el área de cada uno de los zapatos del acróbata de 75.0 kg es de 425 cm^2 , ¿qué presión promedio (sin incluir la presión atmosférica) ejerce la columna de acróbatas sobre el piso? c) ¿La presión será la misma si otro de los acróbatas está abajo?
- M** Calcule la masa de una barra rectangular de oro sólido que tiene unas dimensiones de $4.50 \text{ cm} \times 11.0 \text{ cm} \times 26.0 \text{ cm}$.
- CIC** El núcleo de un átomo puede modelarse como varios protones y neutrones fuertemente empaquetados. Cada partícula tiene una masa de $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ y un radio del orden de 10^{-15} m . a) Utilice este modelo e información para estimar la densidad del núcleo de un átomo. b) Compare su resultado con la densidad de un material tal como el hierro. ¿Qué sugiere su resultado en relación con la estructura de la materia?
- Las cuatro llantas de un auto se inflan a una presión manométrica de $2.0 \times 10^5 \text{ Pa}$. Cada llanta tiene un área de 0.024 m^2 en contacto con el piso. Determine el peso del automóvil.
- Supongamos que un mundo distante con gravedad superficial de 7.44 m/s^2 tiene una presión atmosférica de $8.04 \times 10^4 \text{ Pa}$ en la superficie. a) ¿Qué fuerza es ejercida por la atmósfera en una región en forma de disco de 2.00 m de radio en la superficie de un océano de metano? b) ¿Cuál es el peso de una columna cilíndrica de metano de 10.0 m de profundidad con un radio de 2.00 m? c) Calcule la presión a una profundidad de 10.0 m en el océano de metano. *Nota:* La densidad del metano líquido es de 415 kg/m^3 .

9.3 Deformación en sólidos

8. Evalúe el módulo de Young del material cuya curva tensión-deformación se muestra en la figura 9.8.
9. **M** Una carga de 200 kg se cuelga de un cable de longitud 4.00 m, área de sección transversal $0.200 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y módulo de Young $8.00 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. ¿Cuál es su aumento en la longitud?
10. **C/C** Los superhéroes de historietas son capaces de hacer con sus puños agujeros en las paredes. a) Si la fuerza máxima cortante del acero se toma como $2.50 \times 10^8 \text{ Pa}$, ¿qué fuerza necesita un puñetazo para atravesar una placa de acero de 2.00 cm de grosor? Suponga que el puño del superhéroe tiene un área de sección transversal de $1.00 \times 10^2 \text{ cm}^2$ y es aproximadamente circular. b) Cualitativamente, ¿qué le pasaría al superhéroe al soltar el puñetazo?, ¿qué leyes físicas se aplican?
11. Un tablón de 2.00 cm de grosor y 15.0 cm de ancho se sujeta firmemente con abrazaderas al enrejado de un barco, de modo que el resto del tablón se extiende 2.00 m horizontalmente sobre el mar. Un hombre de 80.0 kg de masa es obligado a pararse en el extremo del tablón. Si el extremo del tablón cae 5.00 cm debido al peso del hombre, encuentre el módulo cortante de la madera.
12. **M** Supongamos que si el esfuerzo cortante en acero supera aproximadamente $4.00 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, se rompe el acero. Determine la fuerza de corte necesaria para a) cortar un perno de acero 1.00 cm de diámetro y b) abrir un agujero de 1.00 cm diámetro en una placa de acero 0.500 cm de espesor.
13. Por seguridad al escalar, un montañista utiliza una cuerda de nailon de 50 m de largo y 1.0 cm de diámetro. Cuando soporta a un montañista de 90 kg, la cuerda se estira 1.6 m. Encuentre su módulo de Young.
14. **BIO** Un alambre de acero inoxidable de ortodoncia se aplica a un diente, como se muestra en la figura P9.14. El alambre tiene una longitud sin estirar de 3.1 cm y un diámetro de 0.22 mm. Si el alambre se estira 0.10 mm, encuentre la magnitud y dirección de la fuerza sobre el diente. Desprecie el ancho del diente y suponga que el módulo de Young para el acero inoxidable es de $18 \times 10^{10} \text{ Pa}$.

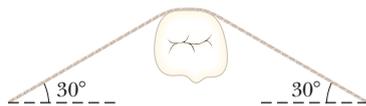


Figura P9.14

15. **BIO** El hueso tiene un módulo de Young de aproximadamente $18 \times 10^9 \text{ Pa}$. Bajo compresión, puede soportar una tensión de cerca de $160 \times 10^6 \text{ Pa}$ antes de romperse. Suponga que un fémur (el hueso del muslo) tiene 0.50 m de largo, calcule la cantidad de compresión que puede soportar este hueso antes de romperse.
16. Un mecanismo de alta velocidad para levantar objetos soporta uno de 800 kg con un cable de acero de 25.0 m de largo y 4.00 cm^2 de área de sección transversal. a) Determine el alargamiento del cable. b) ¿En qué cantidad adicional el cable incrementa su longitud si el objeto se

acelera hacia arriba a razón de 3.0 m/s^2 ? c) ¿Cuál es la mayor masa que puede acelerarse hacia arriba a 3.0 m/s^2 si la tensión en el cable no debe exceder su límite elástico, el cual es de $2.2 \times 10^8 \text{ Pa}$?

17. Un riel suspendido que atraviesa el vestíbulo de un hotel, está apoyado en numerosos puntos a lo largo de sus bordes, por un cable vertical sobre cada punto y una columna vertical por debajo. El cable de acero es de 1.27 cm de diámetro y 5.75 m de longitud, antes de cargarlo. La columna de aluminio es un cilindro hueco con un diámetro interior de 16.14 cm y uno exterior de 16.24 cm, además de una longitud de 3.25 m al descargarse. Cuando el riel ejerce una fuerza debido a una carga de 8500 N sobre uno de los puntos de soporte. ¿Qué tanto baja?
18. **BIO** El área de sección transversal total de una porción calcificada que soporta la carga de dos huesos del antebrazo (radio y cúbito) es aproximadamente 2.4 cm^2 . Durante el choque de un auto, el antebrazo es azotado contra del tablero. El brazo llega al reposo desde una velocidad inicial de 80 km/h en 5.0 ms. Si el brazo tiene una masa efectiva de 3.0 kg y un hueso puede soportar una tensión máxima de compresión de $16 \times 10^7 \text{ Pa}$, ¿es probable que el brazo soporte el choque?
19. Determine el alargamiento de la barra mostrada en la figura P9.19 si se encuentra bajo una tensión de $5.8 \times 10^3 \text{ N}$.



Figura P9.19

9.4 Variación de la presión con la profundidad

9.5 Mediciones de la presión

20. El resorte de manómetro de la figura P9.20 tiene una constante de 1250 N/m , y el pistón un radio de 1.20 cm. Conforme el manómetro se introduce al agua, ¿Qué cambio en la profundidad hace que el pistón se mueva 0.750 cm ?

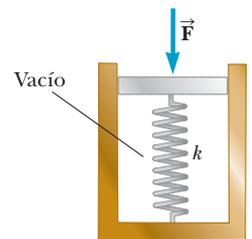


Figura P9.20

21. a) Calcule la presión absoluta en el fondo de un lago de agua dulce de 27.5 m de profundidad. Suponga que la densidad del agua es $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y el aire arriba está a una presión de 101.3 kPa. b) ¿Qué fuerza ejerce el agua sobre la ventana de un vehículo subacuático a esta profundidad si la ventana es circular con un diámetro de 35.0 cm?
22. Se vierte mercurio en un tubo en forma de U, como se muestra en la figura P9.22a en la página 324. El brazo izquierdo del tubo tiene un área de sección transversal A_1 de 10.0 cm^2 y el brazo derecho tiene un área de sección transversal A_2 de 5.00 cm^2 . Cien gramos de agua son vertidos en el brazo derecho, como se muestra en la figura P9.22b. a) Determine la longitud de la columna de agua

en el brazo derecho del tubo en U. b) Dado que la densidad del mercurio es 13.6 g/cm^3 , ¿qué distancia h alcanza el mercurio en el brazo izquierdo?

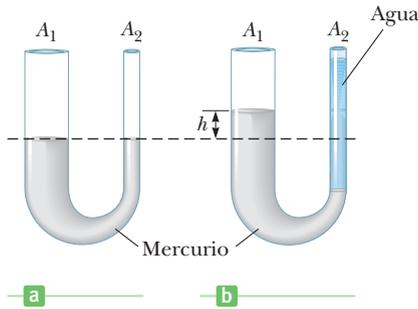


Figura P9.22

23. **BIO** Una bolsa de plástico plegable (figura P9.23) contiene una solución de glucosa. Si el promedio de presión manométrica en la vena es $1.33 \times 10^3 \text{ Pa}$, ¿cuál debe ser la altura mínima h de la bolsa para introducir glucosa en la vena? Suponga que la gravedad específica de la solución es 1.02.

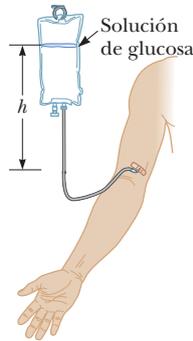


Figura P9.23

24. El punto más profundo del océano está en la Fosa de las Marianas, cerca de 11 km de profundidad. La presión en el suelo marino es enorme, alrededor de $1.13 \times 10^8 \text{ N/m}^2$.

a) Calcule el cambio en volumen de 1.00 m^3 de agua llevado de la superficie al fondo del Océano Pacífico. b) La densidad del agua en la superficie es de $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Encuentre la densidad en el fondo. c) ¿Es una buena aproximación pensar al agua como incompresible?

25. Un recipiente se llena de agua a una profundidad de 20.0 cm. En la parte superior del agua flota una capa de petróleo de 30.0 cm de grueso con peso específico 0.700. ¿Cuál es la presión absoluta en el fondo del recipiente?

26. Blaise Pascal reprodujo el barómetro de Torricelli utilizando vino tinto de Bordeaux, con una densidad de 984 kg/m^3 , como líquido de trabajo (figura P9.26).

a) ¿Cuál es la altura h de la columna de vino para la presión atmosférica normal? b) ¿Es probable que el vacío arriba de la columna sea igualmente bueno para el mercurio?

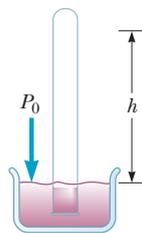


Figura P9.26

27. La figura P9.27 muestra las partes esenciales de un sistema de frenos. El área del émbolo del cilindro maestro es de 1.8 cm^2 y la del émbolo del

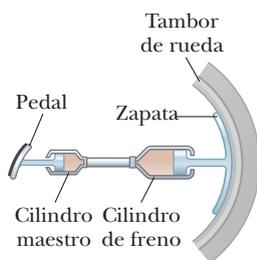


Figura P9.27

cilindro del freno es 6.4 cm^2 . El coeficiente de fricción entre la zapata y el tambor de la rueda es de 0.50. Si la rueda tiene un radio de 34 cm, determine el par torque de fricción alrededor del eje cuando se ejerce una fuerza de 44 N en el pedal del freno.

28. El émbolo ① de la figura P9.28 tiene un diámetro de 0.25 pulg; el émbolo ② tiene un diámetro de 1.5 pulg. En ausencia de fricción, determine la fuerza \vec{F} para sostener el peso de 500 lb.

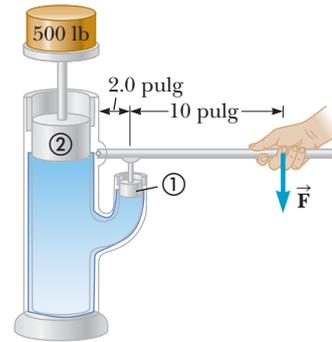


Figura P9.28

9.6 Fuerzas de empuje y principio de Arquímedes

29. Una pelota de tenis de mesa tiene un diámetro de 3.80 cm y una densidad promedio de 0.084 g/cm^3 . ¿Qué fuerza es necesaria para mantenerla completamente sumergida bajo el agua?

30. **BIO C/C** El ser humano promedio tiene una densidad de 945 kg/m^3 después de inhalar y 1020 kg/m^3 después de exhalar. a) Sin hacer ningún movimiento para nadar, ¿qué porcentaje del cuerpo humano estaría sobre la superficie en el Mar Muerto (un lago con una densidad de agua de cerca de 1230 kg/m^3) en cada uno de estos casos? b) Dado que los huesos y los músculos son más densos que la grasa, ¿qué características físicas distinguen “los plomos” (usados para hundirse en el agua) de los “flotadores” (los que facilitan la flotación)?

31. Un pequeño bote transbordador mide 4.00 m de ancho y 6.00 m de longitud. Cuando un camión cargado sube al transbordador, éste se hunde 4.00 cm en el río. ¿Cuál es el peso del camión?

32. **PG** Un sobreviviente de 62.0 kg de un crucero que naufragó, sube a un bloque de estireno para usarlo como balsa. El estireno tiene dimensiones $2.00 \text{ m} \times 2.00 \text{ m} \times 0.090 \text{ m}$. Los 0.024 m inferiores de la balsa se sumergen. a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre del sistema sobreviviente-balsa. b) Escriba la segunda ley de Newton del sistema en una dimensión, usando B para el empuje, w para el peso del superviviente y w_b para el peso de la balsa. (Haga $a = 0$.) c) Calcule el valor de la fuerza de empuje, B . (El agua de mar tiene una densidad de 1025 kg/m^3 .) d) Usando el valor de B y el peso w del superviviente, calcule el peso w_b del estireno. e) ¿Cuál es la densidad del estireno? f) ¿Cuál es el máximo empuje correspondiente a la balsa que es sumergida hasta su superficie superior? g) ¿Cuál es la masa total del superviviente que la balsa puede soportar?

33. **CIC** Un bloque de madera de volumen $5.24 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ flota en el agua, y un pequeño objeto de acero de masa m se coloca encima. Cuando $m = 0.310 \text{ kg}$, el sistema está en equilibrio, y la parte superior del bloque de madera se encuentra a nivel del agua. a) ¿Cuál es la densidad de la madera? b) ¿Qué le pasa al bloque cuando el objeto de acero es remplazado por un segundo objeto de acero con una masa menor que 0.310 kg ? ¿Qué le pasa al bloque cuando el objeto de acero es remplazado por otro objeto de acero con una masa mayor que 0.310 kg ?
34. **PG** Un gran globo de masa 226 kg es llenado con gas helio hasta alcanzar un volumen de 325 m^3 . Suponga que la densidad del aire es 1.29 kg/m^3 y la del helio 0.179 kg/m^3 . a) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para el globo. b) Calcule la fuerza de empuje que actúa sobre el globo. c) Encuentre la fuerza neta sobre el globo y determine si éste se elevará o caerá después de ser liberado. d) ¿Cuál es la máxima masa adicional que puede soportar el balón en equilibrio? e) ¿Qué le pasa al globo si la masa de la carga es *menor* que el valor calculado en el inciso d)? f) ¿Cuál es la altura límite que el globo puede alcanzar?
35. **CIC** Un globo meteorológico es llenado con hidrógeno hasta alcanzar un radio de 3.00 m . Su masa total incluyendo los instrumentos es 15.0 kg . a) Encuentre la fuerza de empuje que actúa sobre el globo, suponiendo que la densidad del aire es 1.29 kg/m^3 . b) ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre el globo y sus instrumentos después de que es liberado desde el suelo? c) ¿Por qué el radio del globo tiende a crecer a medida que se eleva?
36. **S** Un hombre de masa $m = 70.0 \text{ kg}$ y densidad $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$ es completamente sumergido en el agua (mientras sostiene la respiración). a) Escriba la segunda ley de Newton para esta situación en términos de la masa del hombre m , la densidad del agua ρ_w , su volumen V , y g . Desprecie cualquier fricción debida a la viscosidad del agua. b) Sustituya $m = \rho V$ en la segunda ley de Newton y resuelva para la aceleración a , cancelando factores comunes. c) Calcule el valor numérico de la aceleración del hombre. d) ¿Cuánto tiempo le lleva al hombre hundirse 8.00 m al fondo del lago?
37. **CIC** El 21 de octubre del 2001, Ian Ashpole de Reino Unido registró una altura récord de 3.35 km ($11\,000$ pies) impulsado por globos de juguete llenados con helio. Cada globo lleno tiene un radio de cerca de 0.50 m y una masa estimada de 0.30 kg . a) Estime el empuje total de los 600 globos. b) Estime la fuerza neta ascendente de los 600 globos. c) Ashpole se lanzó en paracaídas después de que los globos comenzaron a estallar debido a la altura y a la pérdida de empuje. ¿Por qué estallaron los globos?
38. La fuerza gravitatoria ejercida sobre un objeto sólido es de 5.00 N , medida cuando el objeto está suspendido de una balanza de resorte como en la figura P9.38a. Cuando el objeto en suspensión se sumerge en agua, en la escala se lee 3.50 N (figura P9.38b). Encuentre la densidad del objeto.
39. **M** Un cubo de madera que tiene una dimensión de 20.0 cm en cada arista y una densidad de 650 kg/m^3 , flota en el agua. a) ¿Cuál es la distancia desde la superficie horizontal superior del cubo hasta el nivel del agua? b) ¿Qué

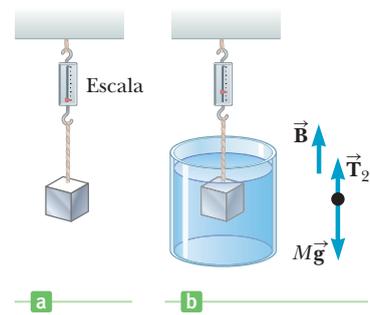


Figura P9.38

masa de plomo debe colocarse en el cubo de modo que la parte superior del cubo esté al nivel de la superficie del agua?

40. Un resorte ligero de fuerza constante $k = 160 \text{ N/m}$ se apoya verticalmente sobre el fondo de un vaso de precipitados con agua (figura P9.40a). Un bloque de 5.00 kg de madera (densidad $= 650 \text{ kg/m}^3$) está conectado al resorte cuando el sistema bloque-resorte se deja llegar a un equilibrio estático (figura P9.40b). ¿Cuál es el alargamiento ΔL del resorte?

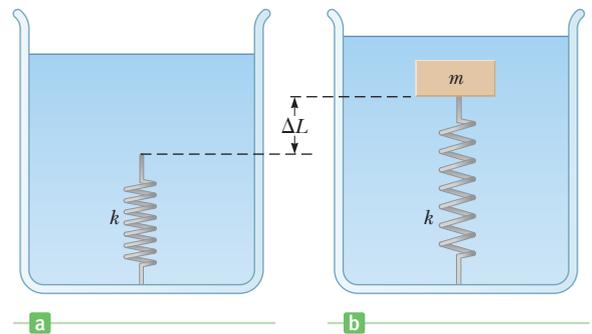


Figura P9.40

41. Una muestra de material desconocido parece pesar 300 N en el aire y 200 N cuando está inmerso en alcohol de peso específico 0.700 . ¿Cuáles son a) el volumen y b) la densidad del material?
42. Un objeto que pesa 300 N en el aire es sumergido en agua después de ser atado a una cuerda conectada a una balanza. La báscula ahora indica 265 N . Inmerso en petróleo, el objeto parece pesar 275 N . Encuentre a) la densidad del objeto y b) la densidad del petróleo.
43. Un vaso de precipitados de 1.00 kg que contiene 2.00 kg de petróleo (densidad $= 916 \text{ kg/m}^3$) se apoya sobre una báscula. Un bloque de 2.00 kg de hierro se suspende de una báscula de resorte y se sumerge por completo en el petróleo (figura P9.43). Encuentre las lecturas en ambas básculas en el momento del equilibrio.

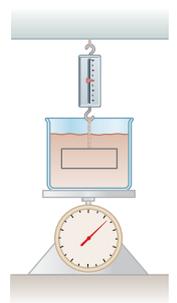


Figura P9.43

9.7 Fluidos en movimiento

9.8 Otras aplicaciones de la dinámica de fluidos

44. Agua fluyendo a través de una manguera de diámetro 2.74 cm llena una cubeta de 25.0 L en 1.50 min. a) ¿Cuál es la velocidad con la que el agua sale por la manguera? b) Ahora, se conecta una boquilla al extremo de la manguera. Si la boquilla tiene un diámetro de un tercio del diámetro de la manguera, ¿cuál es la velocidad con la que sale el agua?

45. **BIO** a) Calcule el gasto másico (en gramos por segundo) de sangre ($\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$) en una aorta con un área de sección transversal de 2.0 cm^2 si la velocidad de flujo es de 40 cm/s. b) Suponga que la aorta se ramifica para formar un gran número de vasos capilares con un área de sección transversal combinada de $3.0 \times 10^3 \text{ cm}^2$, ¿cuál es la velocidad de flujo en los vasos capilares?

46. Un líquido ($\rho = 1.65 \text{ g/cm}^3$) fluye por dos secciones horizontales de tubería unidas por sus extremos (figura P9.46). En la primera parte, el área de la sección transversal es de 10.0 cm^2 , la rapidez de flujo es de 275 cm/s y la presión es $1.20 \times 10^5 \text{ Pa}$. En la segunda parte, el área de sección transversal es de 2.50 cm^2 . Calcule a) la rapidez de flujo en la sección más pequeña y b) la presión.

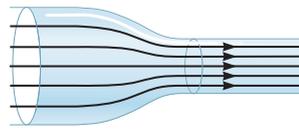


Figura P9.46

47. **BIO** Una jeringa hipodérmica contiene un medicamento con una densidad igual a la del agua (figura P9.47). El barril de la jeringa tiene un área de sección transversal de $2.50 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. En ausencia de una fuerza sobre el émbolo, la presión en todas partes es de 1.00 atm. Una fuerza \vec{F} de magnitud 2.00 N se ejerce sobre el émbolo, lo que hace que el medicamento salga por la aguja. Determine la rapidez de flujo del medicamento por la aguja. Suponga que la presión en la aguja permanece a 1.00 atm y la jeringa está horizontal.

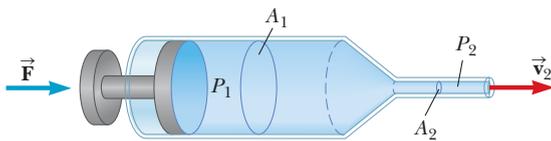


Figura P9.47

48. **BIO** Cuando una persona inhala, entra aire por el bronquio (tráquea) a 15 cm/s. La rapidez promedio del flujo del aire se duplica al pasar por una constricción del bronquio. Si se supone flujo incompresible, determine la caída de presión en la constricción.

49. **C|C** Un avión *jet* volando nivelado tiene una masa de $8.66 \times 10^4 \text{ kg}$, y las dos alas tienen un área estimada total de 90.0 m^2 . a) ¿Cuál es la diferencia de presión entre las superficies superior e inferior de las alas? b) Si la velocidad del aire bajo las alas es de 225 m/s, ¿cuál es la

velocidad del aire sobre ellas? Suponga que el aire tiene una densidad de 1.29 kg/m^3 . c) Explique por qué toda aeronave tiene un tope de altitud máxima operacional.

50. **S** Un avión tiene una masa M , y las dos alas tienen un área total A . Durante un vuelo nivelado, la presión sobre la superficie inferior del ala es P_1 . Determine la presión P_2 sobre la parte superior del ala.

51. **PG** En una pistola de agua, un émbolo controla el agua a través de un tubo largo de radio 1.00 cm dentro de un pequeño tubo de radio 1.00 mm como se ve en la figura P9.51. a) Si la pistola es disparada horizontalmente a una altura de 1.50 m, utilice balística para determinar el tiempo que le toma al agua trasladarse de la salida de la manguera al suelo. (Desprecie la resistencia del aire y suponga que la presión atmosférica es 1.00 atm.) b) Si la longitud del chorro es de 8.00 m, ¿cuál es la velocidad con la que el chorro abandona la manguera? c) Dadas las áreas de la manguera y en cilindro, utilice la ecuación de continuidad para calcular la velocidad a la que debe moverse el émbolo. d) ¿Cuál es la presión en la manguera? e) Use la ecuación de Bernoulli para encontrar la presión necesaria en el cilindro grande. ¿Pueden despreciarse los componentes gravitacionales? f) Calcule la fuerza que debe ejercerse sobre el gatillo para alcanzar la distancia deseada. (La fuerza que debe ejercerse es debida a la presión sobre la presión atmosférica y por debajo de ella).

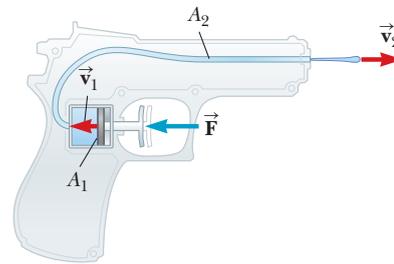


Figura P9.51

52. Se mueve agua a través de un tubo estrecho a un flujo ideal constante. En el punto más bajo que se ve en la figura 9.52, la presión es de $1.75 \times 10^5 \text{ Pa}$ y el radio del tubo es de 3.00 cm. En otro punto $y = 2.50 \text{ m}$ más arriba, la presión es de $1.20 \times 10^5 \text{ Pa}$ y el radio del tubo es 1.50 cm. Encuentre la velocidad de fluido a) en la parte más baja y b) en la sección más alta. c) Encuentre el gasto a través del tubo.

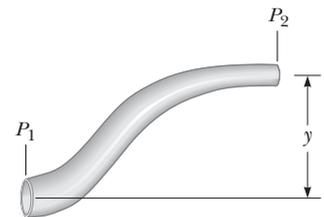


Figura P9.52

53. **M** Un chorro de agua sale horizontalmente del agujero cerca del fondo del tanque de la figura P9.53. Si el agujero tiene un diámetro de 3.50 mm, ¿cuál es la altura h del nivel del agua en el tanque?

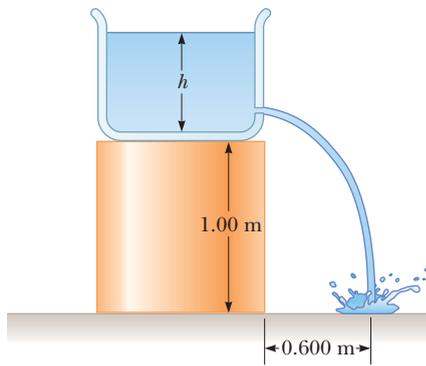


Figura P9.53

54. Un gran tanque de almacenamiento, abierto a la atmósfera en la parte superior y lleno de agua, se le hace un agujero en su costado en un punto situado a 16.0 m por abajo del nivel del agua. Si el gasto por la fuga es de $2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$, determine a) la velocidad con la que el agua sale del agujero y b) el diámetro del agujero.
55. Los diámetros interiores de las partes más grandes del tubo horizontal de la figura P9.55 son de 2.50 cm. Fluye agua hacia la derecha a razón de $1.80 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Determine el diámetro interior de la constricción.

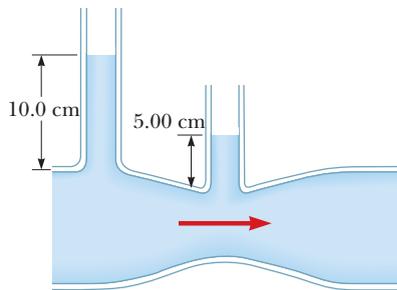


Figura P9.55

56. Se bombea agua del Río Colorado a la población del Gran Cañón, a través de un tubo de 15.0 cm de diámetro, sobre la orilla del cañón. El río está a una altura de 564 m y la población a 2096 m. a) ¿A qué presión mínima debe ser bombeada el agua para que llegue a la población? b) Si diariamente se bombean 4500 m^3 , ¿cuál es la velocidad del agua en el tubo? c) ¿Qué presión adicional es necesaria para liberar ese fluido? *Nota:* Suponga que la aceleración en caída libre y la densidad del aire son constantes en estos márgenes de elevaciones.
57. El géiser Old Faithful en Yellowstone Park hace erupción a intervalos de aproximadamente una hora y la altura de la fuente alcanza 40.0 m (figura P9.57). a) Considere el chorro ascendente como una serie de gotas separadas. Analice el movimiento en caída libre de una de ellas para determinar la velocidad a la que sale el agua del suelo. b) Trate el chorro ascendente como un fluido ideal en flujo laminar. Utilice la ecuación de Bernoulli para determinar la velocidad del agua cuando sale del nivel del suelo. c) ¿Cuál es la presión (por encima de la atmósfe-

rica) en la cámara subterránea caliente que está a 175 m debajo de la salida? Puede suponerse que la cámara es grande en comparación con la salida del géiser.



Figura P9.57

58. El tubo de Venturi mostrado en la figura P9.58 puede ser utilizado como un flujómetro. Suponga que el aparato se usa en una estación de servicio para medir la razón de flujo de gasolina ($\rho = 7.00 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$) a través de una manguera que tiene un radio de enchufe de 1.20 cm. Si la diferencia de presión es $P_1 - P_2 = 1.20 \text{ kPa}$ y el radio del tubo de enchufe es de 2.40 cm, encuentre a) la velocidad de la gasolina cuando sale de la manguera y b) el flujo en metros cúbicos por segundo.

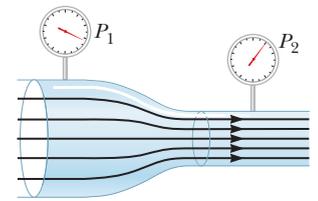


Figura P9.58

9.9 Tensión superficial, acción capilar y flujo de fluidos viscosos

59. Una lámina metálica cuadrada de 3.0 cm de lado y grosor despreciable está unida a una balanza e insertada en un contenedor con un líquido. El ángulo de contacto es cero, como se ve en la figura P9.59a y la balanza a la que está unida la lámina metálica indica 0.40 N. Una delgada capa de petróleo se extiende luego sobre la lámina y el ángulo de contacto es de 180° , como se ve en la figura P9.59b. Ahora se lee 0.39 N en la balanza. ¿Cuál es la tensión superficial del líquido?

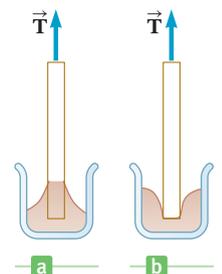


Figura P9.59

60. **BIO** Para levantar un anillo de alambre de radio 1.75 cm de la superficie de un recipiente de plasma sanguíneo, se requiere una fuerza vertical de $1.61 \times 10^{-2} \text{ N}$ mayor que el peso del anillo. Calcule la tensión superficial del plasma con esta información.

61. Cierta fluido tiene una densidad de 1080 kg/m^3 y se observa que sube a una altura de 2.1 cm en un tubo de 1.0 mm de diámetro. El ángulo de contacto entre la pared y el fluido es cero. Calcule la tensión superficial del fluido.
62. **BIO** La sangre tiene una tensión superficial de 0.058 N/m y una densidad de 1050 kg/m^3 . ¿A qué altura puede subir la sangre en un tubo capilar que tiene un radio de $2.0 \times 10^{-6} \text{ m}$ si el ángulo de contacto es cero?
63. El bloque de hielo (temperatura 0°C) mostrado en la figura P9.63 se jala sobre una superficie a nivel y lubricada por una capa de agua de 0.10 mm de grueso. Determine la magnitud de la fuerza \vec{F} necesaria para tirar del bloque con una velocidad constante de 0.50 m/s . A 0°C , la viscosidad del agua tiene un valor de $\eta = 1.79 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.

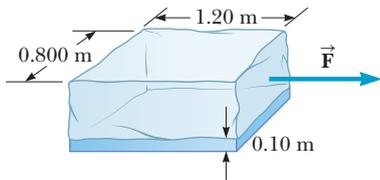


Figura P9.63

64. Una delgada capa de 1.5 mm de glicerina se ha colocado entre dos platinas de microscopio de 1.0 cm de ancho y 4.0 cm de longitud. Encuentre la fuerza requerida para tirar de una de las platinas del microscopio a una rapidez constante de 0.30 m/s con respecto a otra.
65. Un tubo horizontal recto con diámetro de 1.0 cm y una longitud de 50 m transporta petróleo cuyo coeficiente es de $0.12 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$. A la salida del tubo, el gasto es de $8.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ y la presión es 1.0 atm. Encuentre la presión manométrica a la entrada del tubo.
66. **BIO** La arteria pulmonar, que conecta el corazón con los pulmones, tiene un radio interior de 2.6 mm y 8.4 cm de longitud. Si la caída de presión entre el corazón y los pulmones es 400 Pa, ¿cuál es la velocidad promedio de la sangre en la arteria pulmonar?
67. Las partículas esféricas de una proteína de densidad 1.8 g/cm^3 se agitan en una solución de agua a 20°C . Esta solución se deja reposar durante 1.0 h. Si la profundidad del agua en el tubo es de 5.0 cm, encuentre el radio de las partículas más grandes que permanezcan en solución al terminar la hora.
68. **BIO** Una aguja hipodérmica es de 3.0 cm de longitud y 0.30 mm de diámetro. ¿Qué presión se requiere a lo largo de la aguja para que la razón de flujo sea de 1 g/s ? (Use $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ como la viscosidad del agua.)
69. **BIO** ¿Qué diámetro en una aguja se debe utilizar para inyectar un volumen de 500 cm^3 de una solución a un paciente en 30 min? Suponga que la longitud de la aguja es de 2.5 cm y la solución está elevada 1.0 m sobre el punto de inyección. Además, suponga que la viscosidad y la densidad de la solución son las del agua pura y que la presión sobre la vena es la atmosférica.

70. El agua es forzada a salir de un extintor por la presión del aire, como se ve en la figura P9.70. ¿Qué lectura de presión de aire en el tanque (arriba de la presión atmosférica) se requiere para que el agua tenga una rapidez de chorro de 30.0 m/s cuando el nivel del agua en el tanque es 0.500 m por debajo de la manguera?

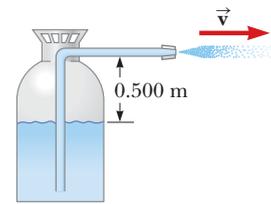


Figura P9.70

71. **BIO** La aorta en los seres humanos tiene un diámetro de unos 2.0 cm y, en ciertos momentos, la velocidad de la sangre que pasa por ella es de unos 55 cm/s . ¿El flujo sanguíneo es turbulento? La densidad de la sangre es de 1050 kg/m^3 , y su coeficiente de viscosidad es de $2.7 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.
72. Un tubo que transporta agua a 20°C tiene un diámetro de 2.5 cm. Estime la máxima velocidad de flujo si éste debe ser laminar.

9.10 Fenómenos de transporte

73. **BIO** Se permite que la sacarosa se difunda a lo largo de un tubo lleno de agua, de 10 cm de longitud. El área de sección transversal del tubo mide 6.0 cm^2 . El coeficiente de difusión es igual a $5.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, y $8.0 \times 10^{-14} \text{ kg}$ se transportan a lo largo del tubo en 15 s. ¿Cuál es la diferencia entre los niveles de concentración de sacarosa en los dos extremos del tubo?
74. **BIO** Se difunde glicerina en agua a lo largo de una columna horizontal que tiene un área de sección transversal de 2.0 cm^2 . El gradiente de concentración es de $3.0 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^4$ y se encuentra que la velocidad de difusión es de $5.7 \times 10^{-15} \text{ kg/s}$. Determine el coeficiente de difusión.
75. La fuerza viscosa sobre una gota de aceite es de $3.0 \times 10^{-13} \text{ N}$ cuando la gota cae al aire a una velocidad de $4.5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Si el radio de la gota es de $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}$, ¿cuál es la viscosidad del aire?
76. Caen pequeñas esferas de 1.00 mm en agua a 20°C con una velocidad terminal de 1.10 cm/s . Calcule la densidad de las esferas.

Problemas adicionales

77. Un bloque de hierro de volumen 0.20 m^3 se suspende de una escala de resorte y se sumerge en un frasco de agua. Después se saca el bloque de hierro y se sustituye por una de aluminio del mismo volumen. a) ¿En qué caso la fuerza de empuje es mayor: para el bloque de hierro o para el aluminio? b) ¿En cuál caso se da la mayor lectura en la escala de resorte? c) Use las densidades conocidas de estos materiales para calcular las cantidades requeridas en los incisos a) y b). ¿Son sus cálculos consistentes con sus respuestas previas en a) y b)?
78. **S** El peso real de un objeto puede medirse en el vacío, donde las fuerzas de flotabilidad están ausentes. Una medida en el aire, sin embargo, se ve afectada por las fuerzas de

empuje. Un objeto de volumen V se pesa en el aire en una balanza de brazos iguales con el uso de contrapesos de densidad de ρ . Representando la densidad del aire como ρ_{aire} y la lectura de la balanza como F'_g , demuestre que el peso real F_g es

$$F_g = F'_g + \left(V - \frac{F'_g}{\rho g} \right) \rho_{\text{aire}} g$$

79. Como una primera aproximación, los continentes pueden pensarse como bloques flotantes de granito en una roca más densa (llamada peridotita) del mismo modo que los bloques de hielo flotan en el agua. a) Demuestre que una fórmula que describe este fenómeno es

$$\rho_g t = \rho_p d$$

donde ρ_g es la densidad del granito ($2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), ρ_p es la densidad de la peridotita ($3.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), t es el grosor de los continentes y d es la profundidad a la que los continentes flotan en la peridotita. b) Si un continente se hunde 5.0 km en la capa de peridotita (esta superficie puede ser pensada como el piso oceánico), ¿cuál es el grosor del continente?

80. **BIO** Tome la densidad de la sangre como ρ y la distancia entre los pies y el corazón como h_H . Omite el flujo sanguíneo. a) Demuestre que la diferencia de presión sanguínea entre los pies (*feet*) y el corazón (*heart*) está dada por $P_F - P_H = \rho g h_H$. b) Tome la densidad de la sangre como $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y la distancia entre el corazón y los pies como 1.20 m. Encuentre la diferencia de presión sanguínea entre esos dos puntos. Este problema indica que bombear sangre desde las extremidades es muy difícil para el corazón. Las venas de las piernas tienen válvulas que se abren cuando se bombea sangre hacia el corazón y se cierran cuando la sangre se aleja de él. Del mismo modo, el bombeo producido por acciones como caminar y respirar ayuda al corazón.
81. **BIO** El diámetro interior aproximado de la aorta es de 0.50 cm; el de un vaso capilar es de $10 \mu\text{m}$. La velocidad de flujo sanguíneo promedio aproximada es de 1.0 m/s en la aorta y 1.0 cm/s en los vasos capilares. Si toda la sangre de la aorta finalmente fluye por los vasos capilares, estime el número de vasos del sistema circulatorio.

82. Superman intenta beber agua a través de una pajilla muy largo en posición vertical (figura P9.82). Con su gran fuerza, alcanza la succión máxima posible. Las paredes de la pajilla no se colapsan. a) Encuentre la altura máxima a la que puede beber el agua. b) Todavía sediento, el *hombre de acero* repite su intento en la Luna, donde no hay atmósfera. Encuentre la diferencia entre los niveles del agua dentro y fuera de la pajilla.

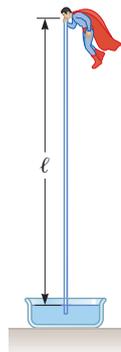


Figura P9.82

83. **BIO** El cerebro humano y la médula espinal están inmersos en el líquido cefalorraquídeo. Este líquido, normalmente

continuo entre las cavidades craneal y espinal, ejerce una presión de 100 a 200 mm de H_2O sobre la presión atmosférica. En el trabajo médico, las presiones suelen medirse en unidades de mm de H_2O debido a que los

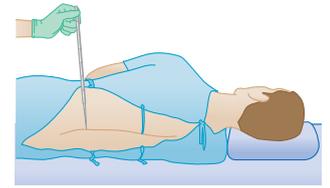


Figura P9.83

fluidos del cuerpo, incluido el líquido cefalorraquídeo, por lo general tienen casi la misma densidad que el agua. La presión del líquido cerebro espinal se puede medir por medio de una *derivación espinal*. Un tubo hueco se inserta en la columna vertebral y se observa la altura a la que sube el líquido, figura P9.83. Si el líquido sube a una altura de 160 mm, escribimos su presión manométrica como 160 mm H_2O . a) Expresar esta presión en pascales, en atmósferas y en milímetros de mercurio. b) Algunas veces es necesario determinar si una víctima de un accidente ha sufrido fractura de una vértebra que bloquea el flujo del líquido cefalorraquídeo de la columna vertebral. En otros casos, un médico puede sospechar que un tumor u otra excrescencia bloquea la columna vertebral e inhibe el flujo del líquido cefalorraquídeo. Estas condiciones pueden investigarse por medio de la *prueba de Queckenstedt*. En este procedimiento, las venas del cuello del paciente se comprimen para que la presión sanguínea suba al cerebro. El aumento de presión en los vasos sanguíneos se transmite al fluido cefalorraquídeo. ¿Cuál debe ser el efecto normal sobre la altura del fluido en la derivación espinal? c) Suponga que comprimir las venas no tiene efecto en el nivel del fluido. ¿Qué podría explicar este fenómeno?

84. **BIO S** Un *hidrómetro* es un instrumento utilizado para determinar la densidad de un líquido. En la figura P9.84 se muestra uno de estos aparatos. El bulbo de una jeringa se aprieta y se suelta para levantar una muestra del líquido de interés, en un tubo que contiene una varilla calibrada de densidad conocida (suponga que la varilla es cilíndrica). La varilla de longitud L y promedio de densidad ρ_0 flota parcialmente inmersa en un líquido de densidad ρ . Una longitud h de la varilla sobresale de la superficie del líquido. Demuestre que la densidad del líquido está dada por

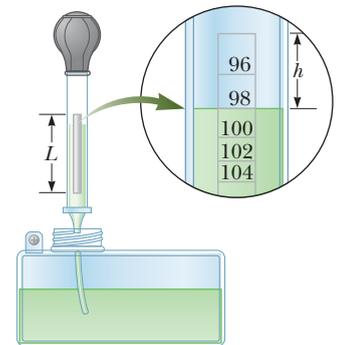


Figura P9.84

$$\rho = \frac{\rho_0 L}{L - h}$$

85. La figura P9.85 (página 330) muestra un tanque de agua con una válvula. Si está se abre, ¿cuál es la altura máxima que

alcanza el chorro de agua que sale por el lado derecho del tanque? Suponga que $h = 10.0$ m, $L = 2.00$ m y $\theta = 30.0^\circ$, y que el área de la sección transversal en A es muy grande comparada con la de B .

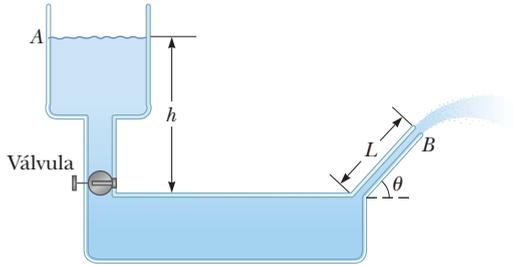


Figura P9.85

86. Un globo lleno de helio se encuentra atado a una cuerda de 2.0 m de longitud y 0.050 kg de peso. El globo es esférico con un radio de 0.40 m. Cuando se suelta, alcanza una altura h de la cuerda y luego permanece en equilibrio, como se muestra en la figura P9.86. Determine el valor de h . Cuando se desinfla, el globo tiene una masa de 0.25 kg. *Sugerencia:* Sólo la parte de cuerda arriba del piso aumenta la carga sostenida por el globo.

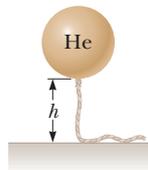


Figura P9.86

87. Un resorte ligero de constante $k = 90.0$ N/m está unido verticalmente a una tabla (figura P9.87a). Un globo de 2.00 g se llena con helio (densidad = 0.179 kg/m³) a un volumen de 5.00 m³ y se conecta a la fuente, haciendo que el resorte se estire tal y como se muestra en la figura P9.87b. Determinar la distancia L de extensión cuando el globo está en equilibrio.

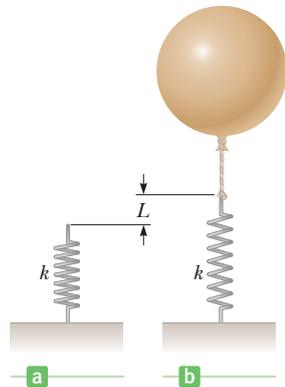


Figura P9.87

88. Un tubo en forma de U abierto en ambos extremos se llena parcialmente con agua (figura P9.88a). Luego se vierte petróleo ($\rho = 750$ kg/m³) en el brazo derecho y forma una columna de $L = 5.00$ cm de altura (figura P9.88b). a) Determine la diferencia h en las alturas de las dos superficies de los líquidos. b) El brazo derecho se sella contra cualquier movimiento de aire, mientras que se sopla aire por el lado izquierdo hasta que las dos superficies de los dos líquidos están a la misma altura (figura P9.88c). Determine la velocidad del aire que se sopla por el brazo izquierdo. Suponga que la densidad del aire es de 1.29 kg/m³.

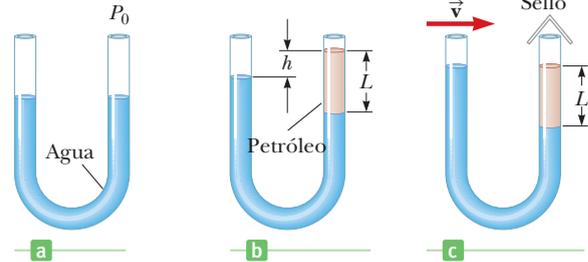


Figura P9.88

89. **S** Alrededor del año 1657 Otto von Guericke, inventor de la bomba de aire, evacuó una esfera de dos hemisferios de bronce (figura P9.89). Dos equipos de ocho caballos cada uno pudieron separar los hemisferios sólo en algunas pruebas y luego “con mayor dificultad”, con el sonido que resulta semejante a un disparo de cañón. Encuentre la fuerza F necesaria para separar los hemisferios de paredes delgadas evacuados en términos de R , el radio de los hemisferios, P la presión dentro de los hemisferios y P_0 la presión atmosférica.

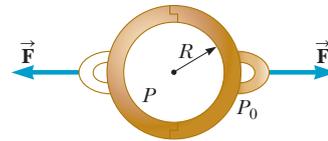


Figura P9.89

90. Una mancha de petróleo que tiene una densidad de 930 kg/m³ flota sobre el agua. Un bloque rectangular de madera de 4.00 cm de altura y con una densidad de 960 kg/m³ flota parcialmente en el petróleo y parcialmente en el agua. El petróleo cubre por completo al bloque. ¿Qué tan abajo de la superficie de contacto entre los dos líquidos está el fondo del bloque?
91. Un tanque de agua abierto a la atmósfera en la parte superior tiene dos pequeños agujeros en su costado, uno arriba del otro. Los agujeros son de 5.00 cm y 12.0 cm por encima del suelo. ¿A qué altura estará el agua del tanque si los dos chorros de agua caen en el mismo lugar del piso?



Los ductos que transportan líquidos a menudo tienen lazos para permitir la expansión y contracción debido a cambios de temperatura. Sin los lazos, las tuberías pueden doblarse y explotar.

Física térmica

10

¿Cómo puede el agua atrapada hacer volar la cima de un volcán en una gran explosión? ¿Qué causa que una acera o un camino se fracturen y se deformen espontáneamente cuando cambia la temperatura? ¿Cómo puede la energía térmica aprovecharse para hacer un trabajo, haciendo funcionar motores y turbinas que hacen casi todo posible en la vida moderna?

Contestar estas y otras preguntas relacionadas está en el dominio de la **física térmica**, el estudio de la temperatura, el calor y cómo afectan la materia. Las descripciones cuantitativas de fenómenos térmicos requieren de definiciones cuidadosas de los conceptos de temperatura, calor y de la energía interna. El calor conduce a cambios en la energía interna y, a su vez, a cambios en la temperatura que causan la expansión o la contracción de la materia. Tales cambios pueden dañar los caminos y los edificios, crear fracturas y tensiones en el metal y hacer que materiales duros y rígidos se hagan flexibles y frágiles; esto último nos puede llevar a desastres que nos desafían y que hay que enfrentar. Los cambios de energía interna también se pueden aprovechar para el transporte, la construcción y la preservación de alimentos.

Los gases se aprovechan de manera que la energía térmica produzca un trabajo. Dentro de rangos normales de temperatura, un gas que actúa como un gran conjunto de partículas que no interactúan recíprocamente, se llama un gas ideal. Tales gases se pueden estudiar en una escala macroscópica o microscópica. En la escala macroscópica, la presión, el volumen, la temperatura y el número de partículas asociadas a un gas se pueden relacionar en una sola ecuación conocida como ley de los gases ideales. En la escala microscópica, un modelo llamado la teoría cinética de los gases representa los componentes de un gas como partículas pequeñas. Este modelo nos permitirá entender cómo los procesos en escala atómica afectan características macroscópicas como la presión, la temperatura y la energía interna.

- 10.1** Temperatura y la ley cero de la termodinámica
- 10.2** Termómetros y escalas de temperatura
- 10.3** Expansión térmica de sólidos y líquidos
- 10.4** Descripción macroscópica de un gas ideal
- 10.5** Teoría cinética de los gases

10.1 Temperatura y la ley cero de la termodinámica

La temperatura se asocia comúnmente con qué tan caliente o frío se siente un objeto cuando lo tocamos. Nuestros sentidos nos proveen de información cualitativa de la temperatura, pero esta información no es confiable y a menudo es engañosa. Por ejemplo una bandeja de metal con hielo se siente más fría en la mano, que un paquete de vegetales congelados a la misma temperatura, porque los metales conducen la energía térmica más rápidamente que un paquete de cartón. Lo que necesitamos es un método más confiable y reproducible para hacer medidas cuantitativas, que lo que establecen los subjetivos “caliente” o “frío” relativos al método de los objetos asociados solamente con la temperatura. Para hacer tales mediciones, los científicos han desarrollado diferentes tipos de termómetros.

Cuando están colocados en contacto mutuo, dos objetos de diferentes temperaturas iniciales, alcanzarán eventualmente una temperatura intermedia común. Por ejemplo, si una taza de café caliente se refresca con un cubo de hielo, el hielo eleva su temperatura y se derrite mientras que la temperatura del café disminuye.

Entender el concepto de temperatura requiere comprender las ideas de *contacto térmico* y *equilibrio térmico*. Dos objetos están en **contacto térmico** si pueden intercambiar energía entre ellos. Dos objetos están en **equilibrio térmico** si están en contacto térmico y no hay intercambio neto de energía entre ellos.

Al intercambio de energía entre dos objetos debido a sus diferencias de temperatura se le llama **calor**, un concepto que detallaremos en el capítulo 11.

Usando estas ideas, podemos desarrollar una definición formal de la temperatura. Considere dos objetos A y B que no están en contacto térmico uno con el otro y un tercer objeto C que actúa como **termómetro**, un dispositivo calibrado para medir la temperatura de un objeto. Deseamos determinar si A y B estarían en equilibrio térmico si fueran colocados en contacto térmico. El termómetro (objeto C) se coloca primero en contacto térmico con A hasta que se alcanza el equilibrio térmico, como en la figura 10.1a, con lo cual la lectura del termómetro se registra. Después, el termómetro se coloca en contacto térmico con B y su lectura se registra otra vez cuando se establece el equilibrio (figura 10.1b). Si las dos lecturas son iguales, entonces A y B están en equilibrio térmico uno con el otro. Si A y B se colocan en contacto térmico uno con otro, como en la figura 10.1c, no hay transferencia neta de energía entre ellos.

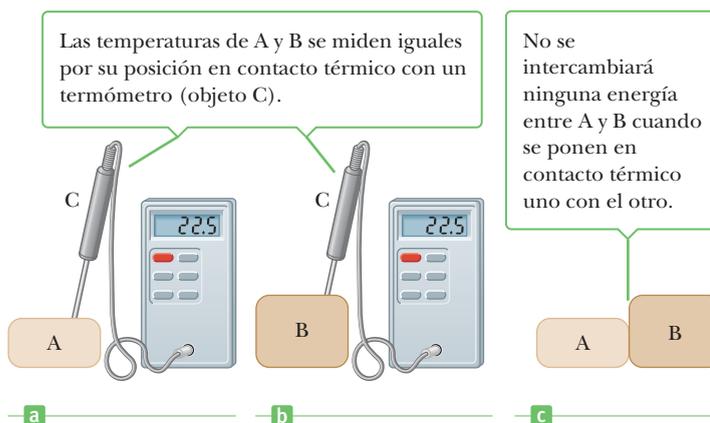
Podemos resumir estos resultados en una afirmación conocida como la **ley cero de la termodinámica** (la **ley de equilibrio**):

Ley cero de la termodinámica ►

Si los objetos A y B están por separado en equilibrio térmico con un tercer objeto C, entonces A y B están en equilibrio térmico uno con el otro.

Esta afirmación es importante porque permite definir el concepto de **temperatura**. Podemos pensar la temperatura como la propiedad que determina si un objeto está o no en

Figura 10.1 Ley cero de la termodinámica.



equilibrio térmico con otros objetos. **Dos objetos en equilibrio térmico uno con otro están a la misma temperatura.**

Examen rápido

10.1 Dos objetos con diferentes tamaños, masas y temperaturas se ponen en contacto térmico. Elija la mejor respuesta: la energía viaja a) del objeto más grande al objeto más pequeño, b) del objeto con más masa al de menos masa, c) del objeto de temperatura más alta al objeto de temperatura más baja.

10.2 Termómetros y escalas de temperatura

Los termómetros son dispositivos usados para medir la temperatura de un objeto o de un sistema. Cuando un termómetro está en contacto térmico con un sistema, se intercambia la energía hasta que el termómetro y el sistema están en equilibrio térmico uno con el otro. Para lecturas exactas, el termómetro debe ser mucho más pequeño que el sistema, de modo que la energía que el termómetro gana o pierde no altere perceptiblemente la energía contenida en el sistema. Todos los termómetros hacen uso de una cierta propiedad física que cambie con la temperatura y se pueda calibrar para hacer la temperatura medible. Algunas de las propiedades físicas usadas son: 1) el volumen de un líquido, 2) la longitud de un sólido, 3) la presión de un gas que conserve un volumen constante, 4) el volumen de un gas mantenido a presión constante, 5) la resistencia eléctrica de un conductor y 6) el color de un objeto muy caliente.

Un termómetro común de uso diario consiste en una masa líquida, generalmente mercurio o alcohol, que se expande en un tubo capilar de vidrio cuando se eleva su temperatura (figura 10.2). En este caso, la propiedad física que cambia es el volumen del líquido. Para servir como un termómetro eficaz, el cambio en volumen del líquido con el cambio de temperatura debe ser casi constante en el rango de temperaturas de interés. Cuando la sección de área transversal del tubo capilar es constante también, el cambio en el volumen del líquido varía linealmente con su longitud a lo largo del tubo. Podemos entonces definir una temperatura en términos de la longitud de la columna líquida. El termómetro se puede calibrar colocándolo en contacto térmico con un ambiente que permanece a temperatura constante. Tal ambiente es una mezcla de agua y de hielo en equilibrio térmico a presión atmosférica. Otro sistema de uso general es una mezcla de agua y vapor en equilibrio térmico a presión atmosférica.

Una vez que hayamos marcado los extremos de la columna líquida en el entorno elegido para nuestro termómetro, necesitamos definir una escala de números asociados con varias temperaturas. Un ejemplo de tal escala es la **escala Celsius de temperatura**, antes llamada escala centígrada. En la escala Celsius, la temperatura de la mezcla hielo-agua se define para cero grados Celsius, escrito 0°C y se llama **punto de fusión** o **punto de congelación del agua**. La temperatura de la mezcla agua-vapor se define como 100°C y se llama **punto de evaporación** o **punto de ebullición del agua**. Una vez que los extremos de la columna líquida en el termómetro han sido marcados, la distancia entre las marcas se divide en 100 segmentos iguales, cada uno corresponde a un cambio en temperatura de un grado Celsius.

Los termómetros calibrados de esta manera presentan problemas cuando son necesarias lecturas extremadamente exactas. Por ejemplo, un termómetro de alcohol calibrado en el hielo y los puntos de evaporación del agua pueden estar de acuerdo con un termómetro de mercurio solamente en los puntos de calibración. Debido a que el mercurio y el alcohol tienen diversas propiedades de dilatación térmica, cuando uno indica una temperatura de 50°C , por ejemplo, el otro puede indicar una temperatura ligeramente diferente. Las discrepancias entre diversos tipos de termómetros son especialmente grandes cuando las temperaturas que se miden están lejos de los puntos de calibración.

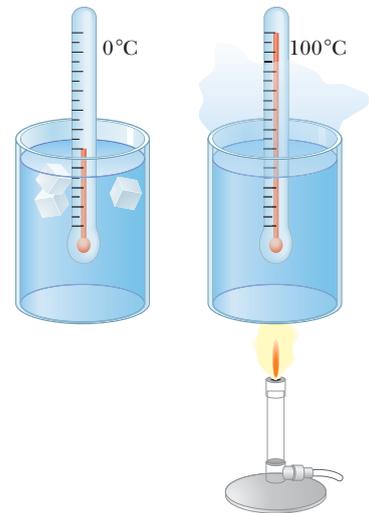


Figura 10.2 Diagrama esquemático de un termómetro de mercurio. Debido a la expansión térmica, el nivel del mercurio se eleva cuando la temperatura del mercurio cambia de 0°C (punto de congelación del agua) a 100°C (punto de ebullición del agua).

El volumen del gas del frasco se mantiene constante al subir o bajar el depósito B para mantener constante el nivel de mercurio.

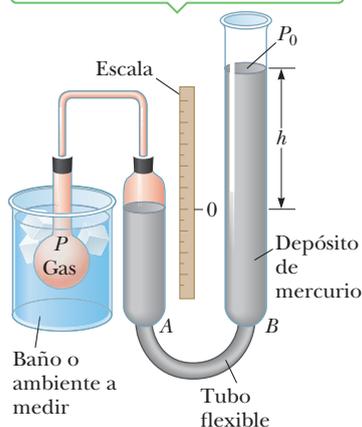


Figura 10.3 Un termómetro de gas de volumen constante mide la presión del gas contenido en el frasco inmerso en el líquido.

El termómetro de gas de volumen constante y la escala Kelvin

Podemos construir termómetros prácticos tales como el termómetro de mercurio, pero estos tipos de termómetros no definen la temperatura de una manera fundamental. Un termómetro, sin embargo, *es* más fundamental y ofrece una manera de definir la temperatura y relacionarla directamente con la energía interna: el **termómetro de gas**. En un termómetro de gas, las lecturas de la temperatura son casi independientes de la sustancia usada en el termómetro. Un tipo de termómetro de gas es la unidad de volumen constante que se ilustra en la figura 10.3. El comportamiento observado en este dispositivo es la variación de la presión según la temperatura de un volumen fijo de gas. Cuando fue inventado el termómetro de gas a volumen constante, fue calibrado usando los puntos de fusión y el de ebullición del agua como sigue (en la actualidad se procede diferente para la calibración, como se verá en breve). El frasco de gas se introducía en un baño con hielo y agua y el depósito de mercurio B se elevaba o bajaba hasta que el volumen del gas confinado estuviera en cierto valor, indicado con el punto cero en la escala. La altura h , la diferencia entre los niveles del depósito y la columna A, indicaban la presión en el frasco a 0°C . Luego, éste se introducía en agua a punto de ebullición, y el depósito B se reajustaba hasta que la altura de la columna A se llevaba otra vez a 0 en la escala, lo que aseguraba que el volumen del gas fuera el mismo que era en el baño con hielo (de ahí la designación de “volumen constante”). Una medida del nuevo valor de h dio un valor para la presión a 100°C . A continuación, estos valores de presión y temperatura se trazaban en una gráfica, como se ve en la figura 10.4. La recta que enlazaba los dos puntos sirvió como una curva de calibración para medir temperaturas desconocidas. Por lo tanto, si se desea medir la temperatura de una sustancia, se coloca el frasco de gas en contacto térmico con la sustancia y se ajusta la columna de mercurio hasta que el nivel de la columna A regrese a cero. La altura de la columna de mercurio da la presión del gas, y entonces se mide la temperatura de la sustancia a partir de la curva de calibración.

Ahora supongamos que las temperaturas se miden con varios termómetros de gas que contienen gases diferentes. Los experimentos realizados demuestran que las lecturas del termómetro son casi independientes del tipo de gas que se utilice, mientras la presión del gas sea baja y la temperatura esté bien arriba del punto en que el gas se licúa.

También es posible realizar mediciones de temperatura con el gas en el frasco a diferentes presiones iniciales a 0°C . Mientras la presión sea baja, se generan curvas de calibración rectas para cada presión inicial, como se ve en la figura 10.5.

Si las curvas de la figura 10.5 se prolongan hacia temperaturas negativas, se encuentra un resultado sorprendente. En todos los casos, cualquiera que sea el tipo de gas o el valor de la presión inicial, **la presión se extrapola a cero cuando la temperatura es de -273.15°C** . Este hecho sugiere que esta temperatura particular es de importancia universal porque no depende de la sustancia empleada en el termómetro. Además, como la presión más baja posible es $P = 0$, que sería el vacío perfecto, esta temperatura debe representar el límite más bajo para procesos físicos. Por lo tanto, se define esta temperatura como **cero absoluto**.

El cero absoluto es utilizado como base para la **escala Kelvin de temperatura**, que establece -273.15°C como su punto cero (0 K). El tamaño de un “grado” en la escala Kelvin (llamado Kelvin) es idéntico al tamaño de un grado en la escala Celsius. La relación entre estas dos escalas de temperatura es

$$T_C = T - 273.15 \quad [10.1]$$

donde T_C es la temperatura Celsius y T es la temperatura Kelvin (a veces llamada **temperatura absoluta**).

Técnicamente, la ecuación 10.1 debería tener unidades al lado derecho de la ecuación donde debería leerse $T_C = T^\circ\text{C}/\text{K} - 273.15^\circ\text{C}$. Las unidades son algo incómodas en este contexto, así que las suprimiremos generalmente en los cálculos, excepto en la respuesta final (este también puede ser el caso en la relación grados Celsius-grados Fahrenheit).

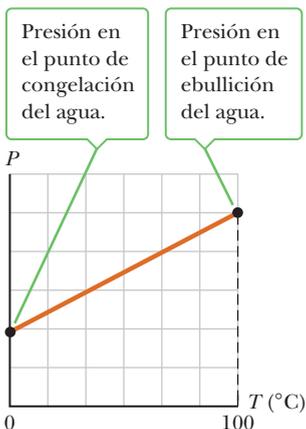


Figura 10.4 Gráfica típica de presión frente a temperatura tomada con un termómetro de gas de volumen constante.

Los primeros termómetros de gas que se construyeron utilizaban los puntos de fusión y de ebullición del agua de acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente. Sin embargo, estos puntos son difíciles de reproducir experimentalmente debido a su sensibilidad a la presión. En consecuencia, en 1954, el Comité Internacional de Pesas y Medidas, adoptó un procedimiento basado en dos nuevos puntos. El primero es el cero absoluto. El segundo es **el punto triple del agua, que es la temperatura y presión única en que coexisten en equilibrio el agua, el vapor de agua y el hielo**. Este punto es una temperatura de referencia reproducible y cómoda para la escala Kelvin. Se presenta a una temperatura de $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ y a una presión de 4.58 mm de mercurio. La temperatura en el punto triple del agua en la escala Kelvin se presenta a los 273.16 K . Por lo tanto, **la unidad SI de temperatura, el kelvin, se define como $1/273.16$ de la temperatura del punto triple del agua**. La figura 10.6 muestra las temperaturas Kelvin de diversos procesos físicos y estructuras. Ha habido aproximaciones al cero absoluto, pero nunca se ha alcanzado.

¿Qué le pasaría a una sustancia si su temperatura alcanzara 0 K ? Como se ve en la figura 10.5, la sustancia ejercería cero presión en las paredes de su recipiente (suponiendo que el gas no se licuara o se solidificara por completo antes de alcanzar el cero absoluto). En la sección 10.5, mostraremos que la temperatura de un gas es proporcional a la energía cinética de sus moléculas. Por lo tanto, de acuerdo con la física clásica, la energía cinética del gas se iría a cero, y no habría movimiento en absoluto de sus componentes individuales. Sin embargo, de acuerdo con la teoría cuántica (que se analiza en el capítulo 27), a esta baja temperatura, el gas siempre retendría alguna energía residual, llamada *energía del punto cero*.

Escalas de temperatura Celsius, Kelvin y Fahrenheit

La ecuación 10.1 demuestra que la temperatura Celsius T_C cambia de la temperatura absoluta T (Kelvin) en 273.15 . Ya que el tamaño de un grado Celsius es el mismo que el de un Kelvin, una diferencia de $5\text{ }^\circ\text{C}$ es igual a una diferencia de temperatura de 5 K . Las dos escalas difieren sólo en la elección del punto cero. Por lo tanto, el punto de congelación (273.15 K) corresponde a $0.00\text{ }^\circ\text{C}$ y el punto de ebullición (373.15 K) es equivalente a $100.00\text{ }^\circ\text{C}$.

La escala de temperatura más común en uso en Estados Unidos, la Fahrenheit, establece la temperatura del punto de fusión del agua en $32\text{ }^\circ\text{F}$ y la temperatura de ebullición del agua en $212\text{ }^\circ\text{F}$. La relación entre las escalas Celsius y Fahrenheit es:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad [10.2a]$$

Por ejemplo, una temperatura de $50.0\text{ }^\circ\text{F}$ corresponde a una temperatura de $10.0\text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura absoluta de 283 K .

La ecuación 10.2a puede usarse para dar temperaturas Celsius en términos de Fahrenheit y a la inversa:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) \quad [10.2b]$$

La ecuación 10.2a también puede usarse para encontrar la relación entre cambios de temperatura en escalas Celsius y Fahrenheit. En un problema de fin de capítulo se le pide a usted que demuestre que si la temperatura Celsius cambia en ΔT_C , la temperatura Fahrenheit cambia en la cantidad

$$\Delta T_F = \frac{9}{5}\Delta T_C \quad [10.3]$$

La figura 10.7 en la página 336 compara las escalas Celsius, Fahrenheit y Kelvin. Aunque su uso es menos frecuente, existen otras escalas, como la escala Rankine, que tiene grados Fahrenheit y un punto cero en el cero absoluto.

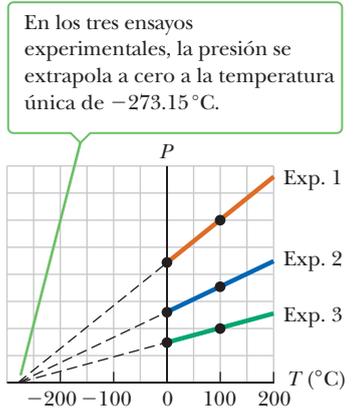


Figura 10.5 Presión frente a temperatura en gases diluidos para los ensayos experimentales en que los gases tienen diferentes presiones en un termómetro de gas a volumen constante.

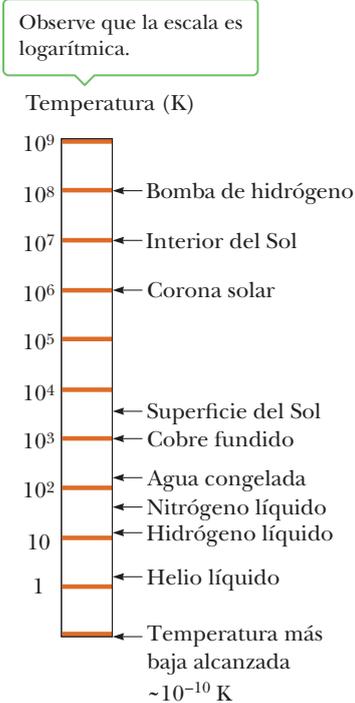
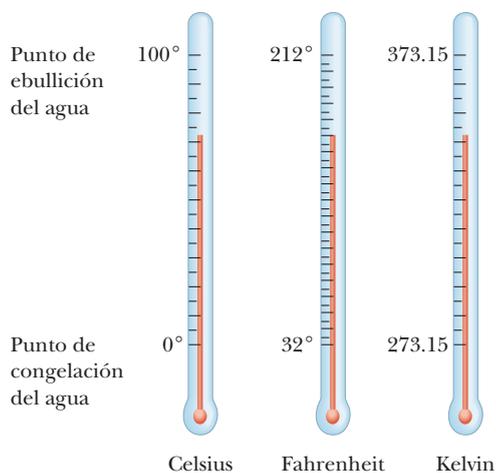


Figura 10.6 Temperaturas absolutas a las que tienen lugar diversos procesos físicos seleccionados.

Figura 10.7 Comparación de las escalas de temperatura Celsius, Fahrenheit y Kelvin.



■ EJEMPLO 10.1 Temperatura de la piel **BIO**

OBJETIVO Aplicar las fórmulas de conversión de temperaturas.

PROBLEMA El gradiente de temperatura entre la piel y el aire es regulado por el flujo sanguíneo cutáneo (piel). Si los vasos cutáneos sanguíneos son estrechos, las temperaturas de la piel y del ambiente son casi iguales. Cuando los vasos se dilatan, se atrae más sangre a la superficie. Suponga que durante la dilatación la piel modifica su temperatura de 72.0 °F a 84.0 °F. **a)** Convierta estas temperaturas a Celsius y encuentre la diferencia. **b)** Convierta las temperaturas a Kelvin y encuentre las diferencias.

ESTRATEGIA Es cuestión de aplicar las fórmulas de conversión de las ecuaciones 10.1 y 10.2. Para el inciso b) es más fácil utilizar las respuestas para Celsius, que desarrollar otro sistema de ecuaciones para la conversión.

SOLUCIÓN

a) Convierta las temperaturas de Fahrenheit a Celsius y encuentre la diferencia.

Convierta la temperatura más baja, usando la ecuación 10.2b:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32.0) = \frac{5}{9}(72.0 - 32.0) = 22.2^\circ\text{C}$$

Convierta la temperatura más alta:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32.0) = \frac{5}{9}(84.0 - 32.0) = 28.9^\circ\text{C}$$

Encuentre la diferencia de las dos temperaturas:

$$\Delta T_C = 28.9^\circ\text{C} - 22.2^\circ\text{C} = 6.7^\circ\text{C}$$

b) Convierta las temperaturas de Fahrenheit a Kelvin y encuentre las diferencias.

Convierta la temperatura más baja, utilizando las respuestas encontradas para Celsius en el inciso a):

$$T_C = T - 273.15 \rightarrow T = T_C + 273.15$$

$$T = 22.2 + 273.15 = 295.35 \text{ K}$$

Convierta la temperatura superior:

$$T = 28.9 + 273.15 = 302.05 \text{ K}$$

Encuentre la diferencia de las dos temperaturas:

$$\Delta T = 302 \text{ K} - 295 \text{ K} = 6.7 \text{ K}$$

COMENTARIOS El cambio en temperatura en Kelvin y Celsius es el mismo, como debe ser.

PREGUNTA 10.1 ¿Qué representa un cambio de temperatura más grande, ¿un grado Celsius o un grados Fahrenheit?

EJERCICIO 10.1 La temperatura del cuerpo puede elevarse de 98.6 °F a 107 °F durante un ejercicio extremo, tal como en un maratón. Tal elevación de temperatura también puede ser causada por infecciones virales, bacterianas o tumores y son peligrosas si se sostienen. **a)** Convierta las temperaturas dadas a Celsius y encuentre la diferencia. **b)** Convierta las temperaturas a Kelvin, y encuentre otra vez la diferencia.

RESPUESTAS a) 37.0 °C, 41.7 °C, 4.7 °C b) 310.2 K, 314.9 K, 4.7 K

■ EJEMPLO 10.2 Una escala de temperatura extraterrestre

OBJETIVO Comprender cómo se relacionan las diferentes escalas de temperatura.

PROBLEMA Un científico extraterrestre inventa una escala de temperatura tal que el agua se congela a -75°E y hierve a 325°E , donde E indica la escala extraterrestre. Encuentre una ecuación que relacione la temperatura en $^\circ\text{E}$ con la temperatura en $^\circ\text{C}$.

ESTRATEGIA Utilizando los datos dados, encuentre la razón del número de $^\circ\text{E}$ entre las dos temperaturas al número de $^\circ\text{C}$. Esta razón será la misma que la razón para cualquier otro proceso semejante, del punto de congelación a una temperatura desconocida, correspondientes a T_E y a T_C . Igualando las dos razones y resolviendo para T_E en términos de T_C se obtiene la relación deseada. Para mayor claridad, las reglas de cifras significativas no se aplican aquí.

SOLUCIÓN

Encuentre el cambio de temperatura en $^\circ\text{E}$ entre los puntos de congelación y ebullición del agua:

$$\Delta T_E = 325^\circ\text{E} - (-75^\circ\text{E}) = 400^\circ\text{E}$$

Encuentre el cambio de temperatura en $^\circ\text{C}$ entre los puntos de congelación y ebullición del agua:

$$\Delta T_C = 100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C} = 100^\circ\text{C}$$

Forme la razón entre estas dos cantidades:

$$\frac{\Delta T_E}{\Delta T_C} = \frac{400^\circ\text{E}}{100^\circ\text{C}} = 4 \frac{^\circ\text{E}}{^\circ\text{C}}$$

Esta razón es la misma entre cualesquier par de temperaturas, es decir, del punto de congelamiento a otro desconocido final de temperatura. Iguale las dos razones:

$$\frac{\Delta T_E}{\Delta T_C} = \frac{T_E - (-75^\circ\text{E})}{T_C - 0^\circ\text{C}} = 4 \frac{^\circ\text{E}}{^\circ\text{C}}$$

Resuelva para T_E :

$$\begin{aligned} T_E - (-75^\circ\text{E}) &= 4(^\circ\text{E}/^\circ\text{C})(T_C - 0^\circ\text{C}) \\ T_E &= 4T_C - 75 \end{aligned}$$

COMENTARIOS La relación entre cualesquier par de escalas de temperatura puede ser obtenido del mismo modo.

PREGUNTA 10.2 Verdadero o Falso: Encontrar la relación entre dos escalas de temperatura usando el punto de congelación y ebullición del agua en cada sistema, es equivalente a encontrar la ecuación de una línea recta.

EJERCICIO 10.2 Encuentre la ecuación que convierte $^\circ\text{F}$ con $^\circ\text{E}$.

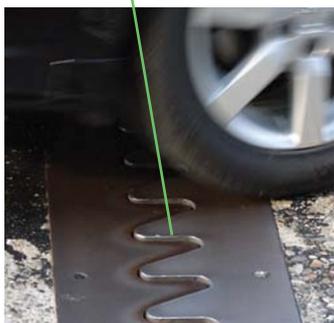
RESPUESTA $T_E = \frac{20}{9}T_F - 146$

10.3 Expansión térmica de sólidos y líquidos

En nuestro estudio del termómetro líquido utilizamos uno de los cambios más conocidos que ocurre en la mayor parte de las sustancias: cuando aumenta la temperatura, aumenta el volumen. Este fenómeno, conocido como **expansión térmica**, desempeña un importante papel en numerosas aplicaciones. Las juntas de expansión térmica, por ejemplo, deben considerarse en la construcción de edificios, carreteras de concreto y puentes, para compensar cambios de dimensiones causados por variaciones de temperatura (figura 10.8 en la página 338).

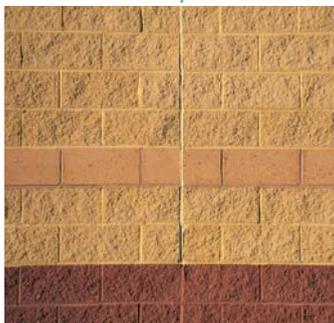
La expansión térmica total de un objeto es una consecuencia del cambio del promedio de separación entre sus átomos y moléculas constituyentes. Para comprender esta idea, considere la forma en que se comportan los átomos de una sustancia sólida. Estos átomos están situados en posiciones fijas de equilibrio; si uno de ellos se separa de su posición, una fuerza restauradora lo regresa a ella. Podemos imaginar que los átomos son partículas conectadas por resortes a sus átomos vecinos. (Véase la figura 9.1 del capítulo previo.) Si un átomo es separado de su posición de equilibrio, la distorsión de los resortes produce una fuerza de restauración.

Sin estas juntas, las superficies se torcerían debido a la expansión térmica en días muy calurosos o se agrietarían por la contracción en días muy fríos.



a

El empalme largo vertical se llena de un material suave que permite que la pared se expanda y contraiga mientras que la temperatura de los ladrillos cambia.



b

Figura 10.8 Juntas de expansión térmica utilizadas para separar secciones de pavimento en (a) puentes y (b) paredes.

APLICACIÓN

Vidrio Pyrex

Tip 10.1 Los coeficientes de expansión no son constantes

Los coeficientes de expansión pueden variar un poco con la temperatura, de modo que en realidad los coeficientes son promedios.

A temperaturas normales, los átomos vibran alrededor de sus posiciones de equilibrio con una amplitud (distancia máxima desde el centro de la vibración) de unos 10^{-11} m, con un espaciamiento entre los átomos de alrededor de 10^{-10} m. A medida que la temperatura de los sólidos aumenta, los átomos vibran con mayor amplitud y la separación media entre ellos aumenta. En consecuencia, el sólido como un todo se expande.

Si la expansión térmica de un objeto es suficientemente pequeña en comparación con las dimensiones iniciales del objeto, entonces el cambio en cualquier dimensión es, hasta una buena aproximación, proporcional a la primera potencia del cambio de temperatura. Supongamos que un objeto tiene una longitud inicial L_0 a lo largo de alguna dirección en una temperatura T_0 . Entonces la longitud aumenta en ΔL durante el cambio de temperatura ΔT . Así, para cambios muy pequeños de temperatura

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad [10.4]$$

o bien

$$L - L_0 = \alpha L_0 (T - T_0)$$

donde L es la longitud final del objeto, T es la temperatura final y la constante de proporcionalidad α se le llama **coeficiente de expansión lineal** de un material dado y tiene unidades de $(^\circ\text{C})^{-1}$.

La tabla 10.1 enlista coeficientes de expansión lineal para algunos materiales. Observe que para estos materiales α es positivo, lo que indica un aumento de longitud con un aumento de temperatura.

La expansión térmica influye en la selección de la cristalería usada en cocinas y de laboratorio. Si un líquido caliente se vierte en un envase frío hecho de vidrio ordinario, el envase puede romperse debido a la tensión térmica. La superficie interior del vidrio se calienta y se dilata, mientras que la superficie exterior está a la temperatura ambiente, y el vidrio ordinario puede no soportar la diferencia en la expansión sin romperse. El vidrio Pyrex[®] tiene un coeficiente de expansión lineal de cerca de un tercio del que tiene el vidrio ordinario, así que las tensiones térmicas son más pequeñas. Las tazas de medida utilizadas en la cocina y los vasos de precipitado del laboratorio se hacen a menudo de Pyrex, así que pueden ser utilizados con líquidos calientes.

Tabla 10.1 Coeficientes de expansión promedio de algunos materiales cerca de la temperatura ambiente

Material	Coeficiente de expansión lineal [$(^\circ\text{C})^{-1}$]	Material	Coeficiente de expansión volumétrica promedio [$(^\circ\text{C})^{-1}$]
Aluminio	24×10^{-6}	Acetona	1.5×10^{-4}
Latón y bronce	19×10^{-6}	Benceno	1.24×10^{-4}
Concreto	12×10^{-6}	Alcohol etílico	1.12×10^{-4}
Cobre	17×10^{-6}	Gasolina	9.6×10^{-4}
Vidrio (ordinario)	9×10^{-6}	Glicerina	4.85×10^{-4}
Vidrio (Pyrex [®])	3.2×10^{-6}	Mercurio	1.82×10^{-4}
Invar (aleación de Ni-Fe)	0.9×10^{-6}	Trementina	9.0×10^{-4}
Plomo	29×10^{-6}	Aire ^a a 0°C	3.67×10^{-3}
Acero	11×10^{-6}	Helio	3.665×10^{-3}

^aLos gases no tienen un valor específico para el coeficiente de expansión de volumen debido a que la cantidad de expansión depende del tipo de proceso mediante el cual se toma el gas. Los valores dados aquí suponen que el gas se somete a una expansión a presión constante.

■ EJEMPLO 10.3 Expansión de una vía de ferrocarril

OBJETIVO Aplicar el concepto de expansión lineal y su relación con la tensión.

PROBLEMA a) Una vía de acero del ferrocarril tiene una longitud de 30000 m cuando la temperatura es 0°C. ¿Cuál es su longitud en un día caliente en que la temperatura es de 40.0°C? b) Suponga que la vía está clavada en el suelo de modo que no pueda expandirse. ¿Qué tensión da lugar a la vía debido al cambio de temperatura?

ESTRATEGIA a) Aplique la ecuación de expansión lineal, usando la tabla 10.1 y la ecuación 10.4. b) Una pista que no puede expandirse por ΔL debido a las compresiones externas es equivalente a comprimir la vía por ΔL , creando una tensión en la vía. Usando la ecuación que relaciona la tensión con la de deformación, junto con la ecuación de expansión lineal, la cantidad de tensión (de compresión) se puede calcular usando la ecuación 9.5.



(Ejemplo 10.3) Expansión térmica. El calor extremo de un día de julio en Asbury Park, New Jersey, causó la deformación de estas vías.

AP/Wide World Photos

SOLUCIÓN

a) Encuentre la longitud de la vía a 40.0°C.

Sustituya las cantidades dadas en la ecuación 10.4, encontrando el cambio de longitud:

Suma el cambio a la longitud original para encontrar la longitud final:

b) Encuentre la tensión si la vía no puede expandirse.

Sustituya en la ecuación 9.5 para encontrar la tensión:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = [11 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}] (30000 \text{ m}) (40.0 \text{ °C}) = 0.013 \text{ m}$$

$$L = L_0 + \Delta L = 30.013 \text{ m}$$

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L} = (2.00 \times 10^{11} \text{ Pa}) \left(\frac{0.013 \text{ m}}{30.0 \text{ m}} \right) = 8.7 \times 10^7 \text{ Pa}$$

COMENTARIOS Los repetidos cambios de temperatura, de calor a frío, son parte importante del proceso de desgaste que gradualmente debilitan las estructuras en un cierto tiempo por la acción atmosférica.

PREGUNTA 10.3 ¿Qué le sucede a la tensión de las cuerdas en un piano cuando la temperatura disminuye?

EJERCICIO 10.3 ¿Cuál es la longitud de la misma vía de ferrocarril en un día frío de invierno en que la temperatura es 0°F?

RESPUESTA 29.994 m

■ FÍSICA APLICADA 10.1 Bandas bimetálicas y termostatos

¿Cómo pueden ser utilizados los distintos coeficientes de expansión para los metales, como indicadores de la temperatura y dispositivos de control electrónico tales como los acondicionadores de aire?

EXPLICACIÓN Cuando las temperaturas de varillas de bronce y de acero de igual longitud son elevadas la misma cantidad a partir de cierto valor inicial común, la varilla de bronce se expande más que la de acero porque el bronce tiene un coeficiente de expansión más grande que el acero.

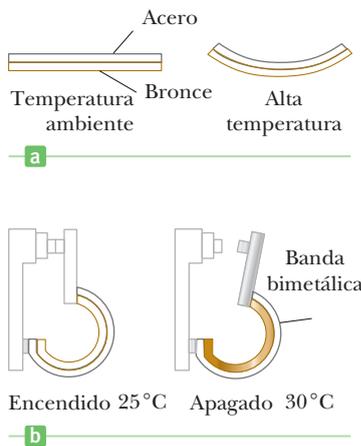
Un dispositivo simple que utiliza este principio es una **banda bimetálica**. Estas bandas se pueden encontrar en los termostatos de ciertos sistemas de calefacción caseros. La banda es hecha enlazando firmemente dos distintos metales juntos. Mientras que la temperatura de la banda aumenta, los dos metales se expanden en diferentes cantidades obligando la curvatura de la banda, como se ve en la figura 10.9 en la página 340. El cambio en forma de la banda puede desconectar o interrumpir una conexión eléctrica. ■

Es útil considerar una expansión térmica como una amplificación fotográfica. Por ejemplo, cuando aumenta la temperatura de una arandela metálica (figura activa 10.10, página 340), todas las dimensiones, incluyendo el radio del agujero, aumentan de acuerdo con la ecuación 10.4.

Una aplicación práctica de la expansión térmica es la técnica común de usar agua caliente para aflojar una tapa metálica que se ha pegado en un frasco de vidrio. Esto funciona porque la circunferencia de la tapa se dilata más que el borde del frasco de vidrio.

Figura 10.9 (Física aplicada 10.1.)

a) Una banda bimetalítica se dobla cuando cambia la temperatura porque los dos metales tienen diferentes coeficientes de expansión. b) Banda bimetalítica empleada en un termostato para abrir o cerrar un interruptor eléctrico. c) Interior de un termostato, que muestra la banda bimetalítica enrollada. ¿Por qué se supone que la banda está enrollada?



© Cengage Learning/George Sample

A medida que la arandela se calienta, todas las dimensiones aumentan, incluyendo el radio del agujero.

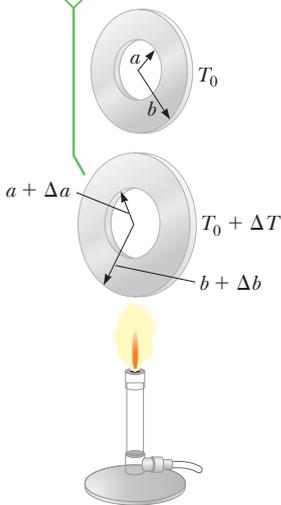


Figura activa 10.10 Expansión térmica de una arandela metálica homogénea. Cuando se calienta la arandela, aumentan todas las dimensiones (observe que en esta figura, la expansión está exagerada).

Debido a que las dimensiones lineales de un objeto cambian por la temperatura, se deduce que el área superficial y volumen también lo harán. Considere un cuadrado que tiene una longitud inicial L_0 en un lado y, por lo tanto, un área inicial $A_0 = L_0^2$. Cuando aumenta la temperatura, la longitud de cada lado aumenta a

$$L = L_0 + \alpha L_0 \Delta T$$

El área nueva es

$$A = L^2 = (L_0 + \alpha L_0 \Delta T)(L_0 + \alpha L_0 \Delta T) = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T + \alpha^2 L_0^2 (\Delta T)^2$$

El último término de esta expresión contiene la cantidad $\alpha \Delta T$ elevada a la segunda potencia. Como $\alpha \Delta T$ es mucho menor que la unidad, elevarla al cuadrado la empequeñece todavía más. Así, podemos despreciar este término para obtener una expresión más sencilla:

$$A = L_0^2 + 2\alpha L_0^2 \Delta T$$

$$A = A_0 + 2\alpha A_0 \Delta T$$

o bien

$$\Delta A = A - A_0 = \gamma A_0 \Delta T \quad [10.5]$$

donde $\gamma = 2\alpha$. La cantidad γ (letra griega gamma) se llama **coeficiente de expansión del área**.

■ EJEMPLO 10.4 Anillos y varillas

OBJETIVO Aplicar la ecuación de la expansión de área.

PROBLEMA a) Un anillo circular de cobre a 20.0°C tiene un agujero con un área de 9.980 cm^2 . ¿Cuál es la temperatura mínima que debe tener para deslizarse por una varilla de acero que tiene un área de sección transversal de 10.000 cm^2 ? b) Suponga que la varilla y el anillo son calentados simultáneamente. ¿Cuál es el cambio mínimo de temperatura de ambos que permitirá al anillo resbalar hasta el final de la varilla? (Suponga que no hay cambio significativo en los coeficientes de expansión lineal en este rango de temperatura.)

ESTRATEGIA En el inciso a), encontrar el cambio de temperatura necesario es sólo cuestión de sustituir los valores dados en la ecuación 10.5, de la expansión del área. Recuerde que $\gamma = 2\alpha$. El inciso b) es un poco más difícil porque ahora la varilla también se está expandiendo. Sin embargo, si el anillo está deslizando sobre la varilla, las áreas de sección transversal finales del anillo y la varilla deben ser iguales. Escriba esta condición en términos matemáticos, usando la ecuación 10.5 en ambos lados de la ecuación y resuelva para ΔT .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la temperatura del anillo que permitirá el deslizamiento en la varilla.

Escriba la ecuación 10.5 y sustituya los valores conocidos, dejando a ΔT como única incógnita:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \gamma A_0 \Delta T \\ 0.020\text{ cm}^2 &= [34 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}](9.980\text{ cm}^2)(\Delta T) \end{aligned}$$

Resuelva para ΔT y después sume este cambio a la temperatura inicial para obtener la temperatura final:

$$\Delta T = 59^\circ\text{C}$$

$$T = T_0 + \Delta T = 20.0^\circ\text{C} + 59^\circ\text{C} = 79^\circ\text{C}$$

b) Si tanto la varilla como el anillo son calentados, encuentre el cambio mínimo de temperatura que permitirá al anillo deslizarse en la varilla.

Igualé las áreas finales del anillo de cobre y la varilla de acero:

$$A_C + \Delta A_C = A_S + \Delta A_S$$

Sustituya para cada cambio de área, ΔA :

$$A_C + \gamma_C A_C \Delta T = A_S + \gamma_S A_S \Delta T$$

Reacomode los términos de manera que ΔT esté en un solo lado, factorice y resuelva:

$$\gamma_C A_C \Delta T - \gamma_S A_S \Delta T = A_S - A_C$$

$$(\gamma_C A_C - \gamma_S A_S) \Delta T = A_S - A_C$$

$$\Delta T = \frac{A_S - A_C}{\gamma_C A_C - \gamma_S A_S}$$

$$= \frac{10.000 \text{ cm}^2 - 9.980 \text{ cm}^2}{(34 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(9.980 \text{ cm}^2) - (22 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})(10.000 \text{ cm}^2)}$$

$$\Delta T = 170^\circ\text{C}$$

COMENTARIOS A veces, son útiles las estrategias de calentamiento y enfriamiento para separar partes de vidrio en un laboratorio de química, tales como los tapones de vidrio en las botellas de reactivos.

PREGUNTA 10.4 ¿Si en vez de calentar el anillo de cobre en el inciso a) la varilla de acero es congelada, la magnitud del cambio de temperatura requerido sería ¿más grande, más pequeño o el mismo? ¿Por qué? (No calcule.)

EJERCICIO 10.4 Un anillo de acero con un agujero que tiene área de 3.990 cm^2 es colocado en una varilla de aluminio con un área de sección transversal de 4.000 cm^2 . La varilla y el anillo están inicialmente a una temperatura de 35.0°C . ¿A qué temperatura común se puede el anillo de acero deslizar hacia un extremo de la varilla de aluminio?

RESPUESTA -61°C

Es posible demostrar que el *aumento de volumen* de un objeto que acompaña a un cambio de temperatura es:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad [10.6]$$

donde β , el **coeficiente de expansión volumétrica**, es igual a 3α . (Observe que $\gamma = 2\alpha$ y $\beta = 3\alpha$ sólo si el coeficiente de expansión lineal del objeto es igual en todas direcciones.) La demostración de la ecuación 10.6 es semejante a la demostración de la ecuación 10.5.

Como se indica en la tabla 10.1, cada sustancia tiene su característico coeficiente de expansión.

La expansión térmica del agua tiene una profunda influencia en la elevación de los niveles de los océanos. Al ritmo actual de calentamiento mundial, los científicos pronostican que aproximadamente la mitad del aumento esperado del nivel del mar será causado por expansión térmica; el resto se debe al deshielo de los casquetes polares.

APLICACIÓN

Elevación del nivel del mar

Examen rápido

10.2 Si introducimos súbitamente un termómetro de mercurio a temperatura ambiente en agua muy caliente, el nivel de mercurio a) subirá lentamente antes de alcanzar una lectura final, b) bajará lentamente antes de alcanzar una lectura final o c) no cambiará.

10.3 Si usted tuviera que hacer un termómetro muy sensible de vidrio, ¿cuál de los siguientes líquidos escogería para trabajar? a) mercurio, b) alcohol, c) gasolina, d) glicerina.

10.4 Dos esferas hechas del mismo metal tienen el mismo radio pero una es hueca y la otra sólida. Ambas se someten al mismo aumento de temperatura. ¿Cuál esfera se expande más? a) la sólida, b) la hueca, c) se expanden por igual o d) no hay suficiente información.

EJEMPLO 10.5 Calentamiento global e inundación de las costas **BIO**

OBJETIVO Aplicar la ecuación de expansión volumétrica junto con la expansión lineal.

PROBLEMA a) Estime el cambio fraccional del volumen de los océanos debido a un cambio de temperatura promedio de 1°C . b) Utilice el hecho de que la profundidad promedio del océano es 4.00×10^3 m para estimar el cambio en profundidad. Observe que $\beta_{\text{agua}} = 2.07 \times 10^{-4}(\text{C}^\circ)^{-1}$.

ESTRATEGIA En el inciso a) resuelva la expresión de expansión volumétrica, ecuación 10.6, para $\Delta V/V$. Para el inciso b) utilice la expansión lineal para estimar el aumento de profundidad. Desprecie la expansión de las masas terrestres que reducirían muy poco la subida del nivel del mar.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el cambio fraccional de volumen.

Divida la ecuación de expansión volumétrica por V_0 y sustituya:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T = (2.07 \times 10^{-4}(\text{C}^\circ)^{-1})(1^\circ\text{C}) = 2 \times 10^{-4}$$

b) Encuentre el aumento aproximado de profundidad.

Utilice la ecuación de expansión lineal. Divida el coeficiente de expansión volumétrica del agua por 3 para obtener el coeficiente de expansión lineal equivalente:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = \left(\frac{\beta}{3}\right) L_0 \Delta T$$

$$\Delta L = (6.90 \times 10^{-5}(\text{C}^\circ)^{-1})(4\,000 \text{ m})(1^\circ\text{C}) \approx 0.3 \text{ m}$$

COMENTARIOS Tres décimas de metro no parecen muy significativas, pero combinado con el derretimiento creciente de los casquillos de hielo polares, algunas áreas costeras podrían experimentar inundaciones. Un aumento de varios grados aumenta el valor de ΔL varias veces y podría reducir perceptiblemente el valor de las propiedades en la línea costera.

PREGUNTA 10.5 Si se supone que todos tienen el mismo volumen inicial, enliste las sustancias siguientes de acuerdo con la cantidad de expansión volumétrica debida a un aumento en temperatura, de menor a mayor: cristal, mercurio, aluminio, alcohol etílico.

EJERCICIO 10.5 Un cilindro de aluminio de 1.00 litro a 5.00°C se llena hasta el borde con gasolina a la misma temperatura. Si el aluminio y la gasolina se calientan a 65.0°C , ¿cuánto de la gasolina se derrama? *Sugerencia:* Asegúrese de considerar la expansión del contenedor. También, ignore la posibilidad de evaporación y suponga que los coeficientes volumétricos son aceptables a tres dígitos.

RESPUESTA El volumen derramado es 53.3 cm^3 . Si se olvida tomar en cuenta la expansión del cilindro, se llegará a la respuesta errónea de 57.6 cm^3 .

Examen rápido

10.5 ¿Por qué el derretimiento de los bloques de hielo en el océano no genera tanta preocupación como la fusión del hielo terrestre?

El comportamiento inusual del agua

Generalmente, los líquidos aumentan de volumen cuando aumenta su temperatura y tienen coeficientes de expansión volumétrica unas 10 veces más que los de los sólidos. El agua es una excepción a esta regla, en un pequeño margen de temperaturas, como se puede ver en su curva de densidad frente a temperatura en la figura 10.11. Cuando la temperatura aumenta de 0 a 4°C , el agua se contrae y, por lo tanto, su densidad aumenta. Arriba de 4°C , el agua muestra la expansión esperada con temperatura creciente, así que la densidad del agua alcanza su máximo valor de 1000 kg/m^3 a 4°C .

Este comportamiento térmico poco común del agua, se puede utilizar para explicar por qué una charca se congela lentamente de arriba hacia abajo. Cuando la temperatura atmosférica baja, por ejemplo, de 7°C a 6°C , el agua de la superficie de la charca también se enfría y en consecuencia se reduce su volumen. Esto significa que el agua de la superficie es más densa que el agua que se encuentra debajo de ella, que no se ha enfriado ni disminuido de volumen. Por lo tanto, el agua de la superficie se hunde y el agua más

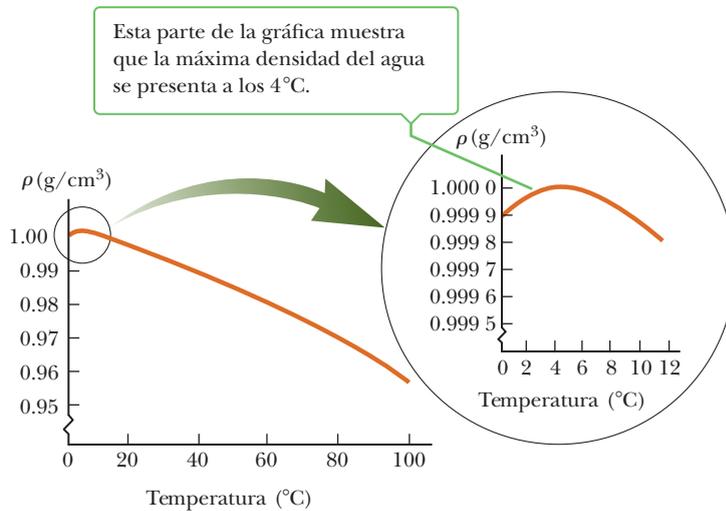


Figura 10.11 La densidad del agua como función de la temperatura.

caliente de abajo es forzada a salir a la superficie para ser enfriada, proceso que se conoce como *corriente ascendente*. Sin embargo, cuando la temperatura atmosférica está entre 4°C y 0°C el agua de la superficie se expande cuando se enfría, haciéndose menos densa que el agua que está abajo. El proceso de hundimiento se detiene y, por último, el agua de la superficie se congela. Cuando el agua se congela, permanece hielo en la superficie porque éste es menos denso que el agua. El hielo continúa acumulándose en la superficie, y el agua cerca del fondo de la charca permanece a 4°C. Además, el hielo forma una capa de aislamiento que retarda la pérdida de calor del agua subyacente, ofreciendo protección térmica a la vida marina.

Sin la flotabilidad y la expansión del agua sobre la congelada, la vida en la Tierra no hubiera sido posible. Si el hielo hubiera sido más denso que el agua, se habría hundido al fondo del océano y se acumularía en un cierto plazo. Esto habría conducido al congelamiento de los océanos, regresando a la Tierra al mundo congelado de la épica película de la *Guerra de las Galaxias* en el *Imperio Contraataca*.

Las mismas propiedades peculiares de la expansión térmica a veces ocasionan que las tuberías de agua colapsen en invierno. Cuando sale energía del agua a través de la tubería por medio de calor y esa energía se transfiere al aire frío exterior, las capas exteriores del agua de la tubería se congelan primero. La continua transferencia de energía hace que la formación de hielo se mueva cada vez más cerca del centro de las tuberías. Mientras haya todavía una abertura en el hielo, el agua se puede expandir a medida que su temperatura se aproxime a 0°C o cuando se congela en más hielo, empujándolo hacia otra parte de la tubería. Eventualmente, el agua se congela al centro en algún punto a lo largo de la tubería, con lo que se forma un tapón. Si todavía hay agua líquida entre este tapón y alguna obstrucción, por ejemplo otro tapón de hielo o un grifo, no hay más volumen para más expansión y congelamiento. Es posible que se presente una acumulación de presión debido a esa frustrada expansión y que la tubería se rompa.

BIO APLICACIÓN

La expansión del agua congelada y la vida en la Tierra

APLICACIÓN

Tuberías que colapsan en invierno

10.4 Descripción macroscópica de un gas ideal

Las propiedades de los gases son importantes en un gran número de procesos termodinámicos. Nuestro clima es un buen ejemplo de este tipo de procesos que dependen del comportamiento de los gases.

Si introducimos un gas dentro de un contenedor, el gas se expande uniformemente para llenarlo. El gas no tiene volumen o presión fijos. Su volumen es el del recipiente y su presión depende del tamaño de éste, la temperatura y la cantidad de gas. Un contenedor grande resulta en una presión baja, mientras que a altas temperaturas o a grandes cantidades de gas se observan grandes presiones. La presión P , volumen V , temperatura T y la cantidad n de gas en un contenedor, están relacionados por una *ecuación de estado*.

La ecuación de estado puede ser muy complicada, pero encontrarla experimentalmente es relativamente simple si el gas se mantiene a presiones bajas (o a densidades bajas).

Este gas de baja densidad se aproxima a lo que se conoce como **gas ideal**. La mayor parte de los gases a temperatura ambiente y presión atmosférica se comportan experimentalmente como gases ideales. **Un gas ideal es un conjunto de átomos o moléculas que se mueven al azar, no ejercen fuerzas de largo alcance entre sí y ocupan una parte insignificante del volumen del contenedor.**

Usualmente, un gas consiste en un gran número de partículas, así que es conveniente expresar la cantidad de gas de un volumen dado en términos del número de **moles**, n . Un mol es un número. El mismo número de partículas se encuentra en un mol de helio que en uno de hierro o aluminio. Este número se conoce como *número de Avogadro* y está dado por

Número de Avogadro ►

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ partículas/mol}$$

El número de Avogadro y la definición de un mol son fundamentales para la química y se relaciona ampliamente con la física. El número de moles de una sustancia está relacionado con su masa m , por la expresión

$$n = \frac{m}{\text{masa molar}} \quad [10.7]$$

donde la masa molar de la sustancia suele expresarse en gramos por mol.

Hay grandes cantidades de átomos en el mundo, así que es natural y conveniente elegir un número muy grande como el número de Avogadro para describir colecciones de átomos. Al mismo tiempo, el número de Avogadro debe ser especial en cierta manera porque de otro modo ¿por qué no solamente contamos las cosas en términos de alguna potencia de 10 muy grande, como 10^{24} ?

El número de Avogadro fue elegido de modo que la masa en gramos del número de Avogadro de un elemento sea numéricamente igual que la masa de un átomo del elemento, expresado en unidades de masa atómica (u).

Esta relación es muy conveniente. Observando la tabla periódica de los elementos en la parte final del libro, encontramos que el carbón tiene una masa atómica de 12 u, así que 12 g de carbón consisten en exactamente 6.02×10^{23} átomos de carbono. La masa atómica del oxígeno es 16 u, así que en 16 g de oxígeno hay otra vez 6.02×10^{23} átomos de oxígeno. Igual es verdad para las moléculas: la masa molecular del hidrógeno molecular, H_2 , es 2 u y hay número de Avogadro de moléculas en 2 g de hidrógeno molecular.

La definición técnica de un mol es: **un mol de cualquier sustancia es la cantidad de la sustancia que contiene tantas partículas (átomos, moléculas u otras partículas) como átomos haya en 12 g del isótopo de carbono 12.**

Tomando el carbono 12 como caso de prueba, encontremos la masa de un número de Avogadro de los átomos de carbono 12. Un átomo de carbono 12 tiene una masa atómica de 12 u o 12 unidades de masa atómica. Una unidad de masa atómica es igual a 1.66×10^{-24} g, casi como la masa de un neutrón o un protón que componen los núcleos atómicos. La masa m del número de Avogadro de los átomos de carbono 12 está dada, entonces, por

$$m = N_A(12 \text{ u}) = 6.02 \times 10^{23}(12 \text{ u}) \left(\frac{1.66 \times 10^{-24} \text{ g}}{\text{u}} \right) = 12.0 \text{ g}$$

Vemos que el número de Avogadro se elige deliberadamente como el inverso del número de gramos en una unidad de masa atómica. De esta manera, la masa atómica de un átomo expresado en unidades de masa atómica es numéricamente igual que la masa de un número de Avogadro de un tipo de átomo expresado en gramos. Debido a que hay 6.02×10^{23} partículas en un mol de cualquier elemento, la masa por átomo para un elemento dado es

$$m_{\text{átomo}} = \frac{\text{masa molar}}{N_A}$$

Por ejemplo, la masa de un átomo de helio es

$$m_{\text{He}} = \frac{4.00 \text{ g/mol}}{6.02 \times 10^{23} \text{ átomo/mol}} = 6.64 \times 10^{-24} \text{ g/átomo}$$

Ahora, supongamos que un gas ideal está confinado en un recipiente cilíndrico cuyo volumen se puede hacer variar por medio de un émbolo móvil, como se ve en la figura



Figura activa 10.12

Un gas confinado en un cilindro cuyo volumen se puede hacer variar mediante un émbolo móvil.

activa 10.12. Supongamos que el cilindro no tiene fugas, por lo que el número de moles permanece constante. Los experimentos han proporcionado las siguientes observaciones: primero, cuando el gas se mantiene a temperatura constante, su presión es inversamente proporcional a su volumen (ley de Boyle). Segundo, cuando la presión del gas se mantiene constante, su volumen es directamente proporcional a su temperatura (ley de Charles). Tercero, cuando el volumen se mantiene constante, la presión es directamente proporcional a la temperatura (ley de Gay-Lussac). Estas observaciones se pueden resumir con la siguiente ecuación de estado, conocida como **ley de los gases ideales**:

$$PV = nRT \quad [10.8]$$

En esta ecuación R es una constante de un gas específico que se obtiene experimentalmente, mientras que T es la temperatura en kelvins. En un diagrama, cada punto de P frente a V representa un estado diferente del sistema. Experimentos con varios gases demuestran que, a medida que la presión se aproxima a cero, la cantidad PV/nT se aproxima al mismo valor de R en todos los gases. Por esta razón R se conoce como **constante universal de los gases**. En unidades del SI, donde la presión se expresa en pascales y el volumen en metros cúbicos, R tiene el valor de

$$R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad [10.9]$$

Si la presión está dada en atmósferas y el volumen en litros (recuerde que $1 \text{ L} = 10^3 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$), entonces

$$R = 0.082 \text{ L} \cdot \text{atm/mol} \cdot \text{K}$$

Utilizando este valor de R y la ecuación 10.8, el volumen ocupado por 1 mol de cualquier gas ideal a presión atmosférica y a 0°C (273 K) es de 22.4 L.

Tip 10.2 Sólo Kelvin funciona

Las temperaturas utilizadas en la ley de los gases ideales siempre deben estar en kelvins.

◀ Ecuación de estado para un gas ideal

◀ Constante universal de los gases

Tip 10.3 Temperatura y presión estándares

Frecuentemente, los químicos definen la temperatura y presión estándares (STP) como 20°C y 1.0 atm. Nosotros elegimos las STP como 0°C y 1.0 atm.

■ EJEMPLO 10.6 La expansión de un gas

OBJETIVO Utilizar la ley de los gases ideales para el análisis de un sistema gaseoso.

PROBLEMA Un gas ideal a 20.0°C y a una presión de $1.50 \times 10^5 \text{ Pa}$ está en un recipiente que tiene un volumen de 1.00 L. a) Determine el número de moles de gas en el contenedor. b) El gas empuja contra el pistón, expandiéndolo a dos veces su volumen original, mientras la presión cae a la atmosférica. Encuentre la temperatura final.

ESTRATEGIA En el inciso a) resuelva la ecuación de estado de un gas ideal para un número de moles, n , y sustituya las cantidades conocidas. Asegúrese de convertir la temperatura de Celsius a Kelvin. Cuando compare los dos estados de un gas, como en el inciso b) frecuentemente conviene dividir la ecuación del gas ideal del estado final, entre la ecuación del estado inicial. Entonces, las cantidades que no cambian pueden ser canceladas simplificando el álgebra.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el número de moles del gas.

Convierta la temperatura a kelvins:

$$T = T_C + 273 = 20.0 + 273 = 293 \text{ K}$$

Resuelva la ley de los gases ideales para n y sustituya:

$$\begin{aligned} PV &= nRT \\ n &= \frac{PV}{RT} = \frac{(1.50 \times 10^5 \text{ Pa})(1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K})} \\ &= 6.16 \times 10^{-2} \text{ mol} \end{aligned}$$

b) Encuentre la temperatura después de que se expande el gas a 2.00 L.

Divida la ley de gases ideales para el estado final entre la ley de gases ideales para el estado inicial:

$$\frac{P_f V_f}{P_i V_i} = \frac{n R T_f}{n R T_i}$$

(continúa)

Cancele el número de moles n y la constante del gas R , y resuelva para T_f :

$$\frac{P_f V_f}{P_i V_i} = \frac{T_f}{T_i}$$

$$T_f = \frac{P_f V_f}{P_i V_i} T_i = \frac{(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(2.00 \text{ L})}{(1.50 \times 10^5 \text{ Pa})(1.00 \text{ L})} (293 \text{ K})$$

$$= 395 \text{ K}$$

COMENTARIOS Recuerde el truco usado en el inciso b), ya que es frecuentemente útil en problemas de gases ideales. Observe que no fue necesario convertir unidades de litros a metros cúbicos, porque las unidades se cancelaron.

PREGUNTA 10.6 Suponiendo que la temperatura es constante, ¿un globo de helio se expande, se contrae o permanece constante cuando se eleva en el aire?

EJERCICIO 10.6 Suponga que la temperatura de 4.50 L de un gas ideal cae de 375 K a 275 K. a) Si el volumen permanece constante y la presión inicial es la atmosférica, encuentre la presión final. b) Encuentre el número de moles del gas.

RESPUESTAS a) $7.41 \times 10^4 \text{ Pa}$ b) 0.146 mol

■ EJEMPLO 10.7 Mensaje en una botella

OBJETIVO Aplicar la ley de los gases ideales conjuntamente con la segunda ley de Newton.

PROBLEMA Un vagabundo encuentra una botella tapada con un corcho, que contiene un mensaje. El aire en la botella está a una atmósfera de presión y a una temperatura de 30.0°C . El corcho tiene un área de sección transversal de 2.30 cm^2 . El vagabundo pone la botella sobre el fuego, imaginando que el aumento de presión expulsará el corcho. A una temperatura de 99°C el corcho es eyectado de la botella. a) ¿Cuál era la presión en la botella, justo antes del descorche? b) ¿Qué fuerza de fricción sostiene el corcho en su lugar? Desprecie cualquier cambio de volumen de la botella.

ESTRATEGIA En el inciso a) el número de moles del aire en la botella es el mismo cuando ésta se encuentra sometida al fuego. Tome la ecuación de gases ideales para el estado final y divídalo por la ecuación de gases ideales para el estado inicial. Resuelva para la presión final. En el inciso b) hay tres fuerzas actuando sobre el corcho: la de fricción, la exterior de la atmósfera que lo empuja hacia dentro y la fuerza del aire dentro de la botella que lo empuja hacia afuera. Aplique la segunda ley de Newton. Justo antes de que el corcho se empiece a mover, las tres fuerzas están en equilibrio y la fuerza de fricción estática tiene su valor máximo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la presión final.

Divida la ley de los gases ideales en el punto final entre la ley de los gases ideales en el punto inicial:

Cancele n , R y V , que permanecen constantes y resuelva para P_f :

Sustituya los valores conocidos para obtener la presión final:

b) Encuentre la magnitud de la fuerza de fricción que actúa sobre el corcho.

Aplique la segunda ley de Newton al corcho, justo antes de que abandone la botella. P_{dentro} es la presión dentro de la botella y P_{fuera} es la presión fuera.

$$1) \frac{P_f V_f}{P_i V_i} = \frac{nRT_f}{nRT_i}$$

$$\frac{P_f}{P_i} = \frac{T_f}{T_i} \rightarrow P_f = P_i \frac{T_f}{T_i}$$

$$P_f = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) \frac{372 \text{ K}}{303 \text{ K}} = 1.24 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\sum F = 0 \rightarrow P_{\text{dentro}} A - P_{\text{fuera}} A - F_{\text{fricción}} = 0$$

$$F_{\text{fricción}} = P_{\text{dentro}} A - P_{\text{fuera}} A = (P_{\text{dentro}} - P_{\text{fuera}}) A$$

$$= (1.24 \times 10^5 \text{ Pa} - 1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(2.30 \times 10^{-4} \text{ m}^2)$$

$$F_{\text{fricción}} = 5.29 \text{ N}$$

COMENTARIOS Observe el uso, otra vez, de la ecuación de los gases ideales 1). Siempre que compare el estado de un gas en dos puntos diversos, ésta es la mejor manera de hacer las matemáticas. Otro punto: el calentamiento del gas arrojó el corcho fuera de la botella, lo que significa que el gas trabajó sobre el corcho. El trabajo realizado por la expansión de un gas, que mueven pistones y generadores, es uno de los fundamentos de la tecnología moderna y será ampliamente estudiado en el capítulo 12.

PREGUNTA 10.7 Cuando el corcho empieza a moverse, ¿qué le pasa a la presión dentro de la botella?

EJERCICIO 10.7 Un neumático contiene aire a una presión manométrica de 5.00×10^4 Pa a una temperatura de 30.0°C . Después de que la noche cae, la temperatura baja a -10.0°C . Encuentre la nueva presión manométrica en el neumático. (Recuerde que la presión manométrica es la presión absoluta menos la presión atmosférica. Suponga el volumen constante.)

RESPUESTA 3.01×10^4 Pa

■ EJEMPLO 10.8 Sumergiendo un globo

OBJETIVO Combinar la ley de los gases ideales con la ecuación del equilibrio hidrostático y de empuje.

PROBLEMA A un robusto globo con volumen 0.500 m^3 se le ata un bloque de hierro que pesa $2.50 \times 10^2 \text{ kg}$ y se le lanza a un lago de agua dulce. El globo está hecho de un material ligero de masa y elasticidad despreciables (aunque puede ser comprimido). El aire en el globo está inicialmente a la presión atmosférica. El sistema no puede hundirse y no se dispone de más pesos, así que un buzo decide arrastrarlo a una profundidad suficiente para que el globo permanezca sumergido. **a)** Encuentre el volumen del globo en el punto donde el sistema permanecerá sumergido, en equilibrio. **b)** ¿Cuál es la presión del globo en ese punto? **c)** Suponiendo que la temperatura es constante, ¿a qué profundidad mínima debe ser arrastrado el globo?

ESTRATEGIA Cuando el globo y el bloque son arrastrados más profundamente en el lago, el aire en el globo se comprime y el volumen se reduce junto con la flotabilidad. A una cierta profundidad h la fuerza de empuje total que actúa en el globo y el bloque, $B_{\text{globo}} + B_{\text{Fe}}$, será igual al peso total, $w_{\text{globo}} + w_{\text{Fe}}$, y el globo permanecerá a esa profundidad. Sustituya estas fuerzas en la segunda ley de Newton y resuelva para el volumen desconocido del globo, contestando el inciso a). Después utilice la ley de los gases ideales para encontrar la presión, y la ecuación del equilibrio hidrostático para encontrar la profundidad.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el volumen del globo en el punto de equilibrio.

Encuentre el volumen del bloque de hierro, V_{Fe} :

$$V_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{Fe}}} = \frac{2.50 \times 10^2 \text{ kg}}{7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3} = 0.0318 \text{ m}^3$$

Encuentre la masa del globo, la cual es igual a la masa del aire si se desprecia la masa del material del globo:

$$m_{\text{globo}} = \rho_{\text{aire}} V_{\text{globo}} = (1.29 \text{ kg/m}^3)(0.500 \text{ m}^3) = 0.645 \text{ kg}$$

Aplique la segunda ley de Newton al sistema cuando está en equilibrio:

$$B_{\text{Fe}} - w_{\text{Fe}} + B_{\text{globo}} - w_{\text{globo}} = 0$$

Sustituya la expresión apropiada para cada término:

$$\rho_{\text{agua}} V_{\text{Fe}} g - m_{\text{Fe}} g + \rho_{\text{agua}} V_{\text{globo}} g - m_{\text{globo}} g = 0$$

Cancele las g 's y resuelva para el volumen del globo, V_{globo} :

$$\begin{aligned} V_{\text{globo}} &= \frac{m_{\text{globo}} + m_{\text{Fe}} - \rho_{\text{agua}} V_{\text{Fe}}}{\rho_{\text{agua}}} \\ &= \frac{0.645 \text{ kg} + 2.50 \times 10^2 \text{ kg} - (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(0.0318 \text{ m}^3)}{1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

$$V_{\text{globo}} = 0.219 \text{ m}^3$$

b) ¿Cuál es la presión del globo en el punto de equilibrio?

Ahora utilice la ley de los gases ideales para encontrar la presión, suponiendo la temperatura constante, así que $T_i = T_f$.

$$\frac{P_f V_f}{P_i V_i} = \frac{nRT_f}{nRT_i} = 1$$

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{V_i}{V_f} P_i = \frac{0.500 \text{ m}^3}{0.219 \text{ m}^3} (1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) \\ &= 2.31 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

(continúa)

c) ¿A qué profundidad mínima debe ser arrastrado el globo?

Utilice la ecuación de equilibrio hidrostático para encontrar la profundidad:

$$P_f = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

$$h = \frac{P_f - P_{\text{atm}}}{\rho g} = \frac{2.31 \times 10^5 \text{ Pa} - 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}}{(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 13.3 \text{ m}$$

COMENTARIOS Otra vez, la ley de los gases ideales fue utilizada con buenos resultados. Este problema muestra cómo, aun respondiendo a una cuestión bastante simple, puede ser necesario aplicar varios conceptos físicos: la densidad, el empuje, la ley de los gases ideales y el equilibrio hidrostático.

PREGUNTA 10.8 Si un vaso se voltea y después se sumerge en agua, ¿qué le pasa al volumen de aire atrapado cuando el vaso es empujado más profundamente bajo el agua?

EJERCICIO 10.8 Un joven toma un globo de 30.0 cm^3 que contiene aire a 1.00 atm , en la superficie de un lago de agua dulce y lo lleva a una profundidad de 4.00 m . Encuentre el volumen del globo a esta profundidad. Suponga que el globo está hecho de un material muy ligero de poca elasticidad (aunque se puede comprimir) y que la temperatura del aire atrapado permanece constante.

RESPUESTA 21.6 cm^3

Como se estableció previamente, el número de moléculas contenidas en un mol de cualquier gas, es el número de Avogadro, $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ partículas/mol, así que

$$n = \frac{N}{N_A} \quad [10.10]$$

donde n es el número de moles y N es el número de moléculas en el gas. Con la ecuación 10.10, se puede describir la ley de los gases ideales en términos del número total de moléculas como

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT$$

o

Ley de los gases ideales ►

$$PV = Nk_B T \quad [10.11]$$

donde

Constante de Boltzmann ►

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \quad [10.12]$$

es la **constante de Boltzmann**. Esta reformulación de la ley de los gases ideales será utilizada en la siguiente sección para relacionar la temperatura de un gas con la energía cinética promedio de las partículas en el gas.

10.5 Teoría cinética de los gases

En la sección 10.4 se discutieron las propiedades macroscópicas de un gas ideal, utilizando cantidades como presión, volumen, número de moles y temperatura. En esta sección consideramos el modelo de un gas ideal desde el punto de vista microscópico. Demostraremos que las propiedades macroscópicas se pueden entender analizando lo que ocurre a escala atómica. Además, volvemos a examinar la ley de los gases ideales en términos del comportamiento de las moléculas individuales que forman el gas.

Utilizando el modelo de un gas ideal, se describe lo que se conoce como **teoría cinética de los gases**. Con esta teoría se puede interpretar la presión y la temperatura de un gas ideal en términos de variables microscópicas. El modelo de la teoría cinética de los gases se apoya en los siguientes supuestos:

1. **El número de moléculas en el gas es grande y la separación promedio entre ellas es grande en comparación con sus dimensiones.** Debido a que el número de moléculas es grande, es posible hacer un análisis estadístico de su comportamiento. La gran separación entre moléculas significa que éstas ocupan un volumen insignificante en el recipiente. Esto es congruente con el modelo de un gas ideal, en el que imaginamos que las moléculas son como puntos.
2. **Las moléculas obedecen las leyes de Newton del movimiento, pero en su conjunto se mueven al azar.** Por movimiento “al azar” se quiere decir que cualquier molécula se puede mover en cualquier dirección con igual probabilidad, con una amplia distribución de velocidades.
3. **Las moléculas interactúan sólo a través de fuerzas de corto alcance durante colisiones elásticas.** Esta suposición es consistente con el modelo de gas ideal, en el que las moléculas no ejercen fuerzas de largo alcance entre sí.
4. **Las moléculas chocan elásticamente con las paredes.**
5. **Todas las moléculas en el gas son idénticas.**

◀ Supuestos de la teoría cinética para un gas ideal.

Aunque a menudo se imagina a un gas ideal como un conjunto de átomos individuales, los gases moleculares muestran el comportamiento de un gas ideal a bajas presiones. En promedio, los efectos asociados con la estructura molecular no tienen efecto en los movimientos considerados. Por lo tanto, podemos aplicar los resultados del siguiente desarrollo tanto a gases moleculares como a gases monoatómicos.

Modelo molecular para la presión de un gas ideal

Como una primera aplicación de la teoría cinética de los gases, deduzcamos una expresión que permita calcular la presión de un gas ideal en un recipiente en términos de cantidades microscópicas. La presión del gas es el resultado de colisiones entre sus moléculas y las paredes del recipiente. Durante su movimiento aleatorio, las moléculas del gas chocan con las paredes del recipiente y experimentan un cambio de cantidad de movimiento como resultado de la fuerza ejercida sobre ellas por las paredes.

Ahora deduciremos una expresión para la presión de un gas ideal formado por N moléculas en un recipiente de volumen V . En esta sección, usamos m para representar la masa de una molécula. El recipiente es un cubo con lados de longitud d (figura 10.13). Considere la colisión de una molécula que se mueve con una velocidad $-v_x$ hacia la cara izquierda de la caja (figura 10.14). Después de chocar elásticamente con la pared, la molécula se mueve en la dirección positiva x con una velocidad $+v_x$. Como la cantidad de movimiento de la molécula es $-mv_x$ antes de la colisión y $+mv_x$ después, el cambio de cantidad de movimiento de la molécula es:

$$\Delta p_x = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

Si F_1 es la magnitud de la fuerza promedio ejercida por una molécula sobre la pared en el tiempo Δt , entonces la aplicación de la segunda ley de Newton a la pared da

$$F_1 = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\Delta t}$$

Para que la molécula choque dos veces con la misma pared, debe recorrer una distancia $2d$ a lo largo de la dirección x en un tiempo Δt . Por lo tanto, el intervalo entre dos colisiones con la misma pared es $\Delta t = 2d/v_x$, y la fuerza sobre la pared por una sola colisión es

$$F_1 = \frac{2mv_x}{2d/v_x} = \frac{2mv_x^2}{2d} = \frac{mv_x^2}{d}$$

La fuerza total F ejercida por todas las moléculas sobre la pared se encuentra sumando las fuerzas ejercidas por las moléculas individuales:

$$F = \frac{m}{d} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots)$$

En esta ecuación, v_{1x} es la componente x de la velocidad de la molécula 1, v_{2x} es la componente x de la velocidad de la molécula 2 y así sucesivamente. La suma termina cuando llegamos a N moléculas porque hay N moléculas en el recipiente.

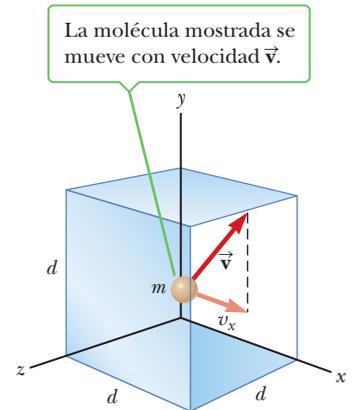


Figura 10.13 Una caja cúbica con lados de longitud d conteniendo un gas ideal.

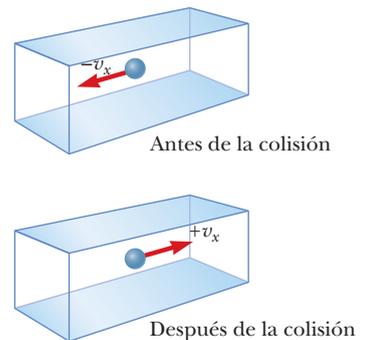


Figura 10.14 Una molécula que se mueve a lo largo del eje x choca elásticamente con las paredes del recipiente. Después de chocar con una pared, se invierte la cantidad de movimiento de la molécula, ejerciendo ésta una fuerza sobre la pared.



El vaso de vidrio contiene hielo seco (dióxido de carbono sólido). La nube blanca es vapor de dióxido de carbono, que es más denso que el aire y, por ello, cae desde la probeta. El gas es incoloro, pero se hace visible por la formación de pequeños cristales de hielo de vapor de agua.

Observe que el valor promedio del cuadrado de la velocidad en la dirección x para N moléculas es

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \cdots + v_{Nx}^2}{N}$$

donde $\overline{v_x^2}$ es el valor promedio de v_x^2 . La fuerza total sobre la pared se puede escribir como

$$F = \frac{Nm}{d} \overline{v_x^2}$$

Ahora nos enfocaremos en una sola molécula en el recipiente, que se desplaza en alguna dirección arbitraria con velocidad \vec{v} con componentes v_x , v_y y v_z . En este caso, debemos expresar la fuerza total sobre la pared en términos de la velocidad de las moléculas en lugar de una sola componente. El teorema de Pitágoras relaciona el cuadrado de la velocidad con el cuadrado de estas componentes, de acuerdo a la expresión $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$. En consecuencia, el valor promedio de v^2 de todas las moléculas en el recipiente está relacionado con los valores promedio $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$ y $\overline{v_z^2}$ según la expresión $\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$. Como el movimiento es completamente al azar, los valores promedio $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$ y $\overline{v_z^2}$ son iguales entre sí. Con base en este hecho y la ecuación anterior para $\overline{v_x^2}$, encontramos que:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}$$

Así, la fuerza total sobre la pared es entonces

$$F = \frac{N}{3} \left(\frac{mv^2}{d} \right)$$

Esta expresión nos permite calcular la presión total ejercida sobre la pared, dividiendo la fuerza por el área:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{d^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{N}{d^3} mv^2 \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \overline{mv^2}$$

Presión de un gas ideal ▶

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) \quad [10.13]$$

La ecuación 10.13 dice que **la presión es proporcional al número de moléculas por unidad de volumen y al promedio de energía cinética de traslación de una molécula, $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$** . Con este modelo simplificado de un gas ideal, hemos llegado a un importante resultado que relaciona una cantidad a gran escala, como la presión, con una cantidad atómica: el valor promedio del cuadrado de la velocidad molecular. Esta relación es un eslabón clave entre el mundo atómico y el mundo a gran escala.

La ecuación 10.13 captura algunas características familiares de la presión. Una forma de aumentar la presión dentro de un recipiente es aumentar el número de moléculas por unidad de volumen en él. Usted hace esto cuando pone aire a una llanta. La presión en la llanta también se puede aumentar mediante el incremento del promedio de energía cinética de traslación de las moléculas en el aire. Como veremos en breve, esto se puede lograr al aumentar la temperatura del gas que está dentro de la llanta. Por eso es que la presión dentro de la llanta aumenta cuando se calienta durante viajes largos. La continua flexión de las llantas cuando se mueven a lo largo de la superficie del camino transfiere energía al aire que contienen, lo que aumenta la temperatura del aire y a su vez produce un incremento de presión.

■ EJEMPLO 10.9 Haz de electrones de alta energía

OBJETIVO Calcular la presión de un haz de partículas de electrones.

PROBLEMA Un haz de electrones que se mueven en la dirección positiva x afecta un objetivo en una cámara de vacío.

a) Si 1.25×10^{14} electrones viajando a una velocidad de 3.00×10^7 m/s dan en el blanco durante cada pulso de breve duración 5.00×10^{-8} s, ¿qué fuerza promedio es ejercida sobre el objetivo durante el pulso? Supongamos que todos los electrones penetran en el objetivo y son absorbidos. **b)** ¿Qué presión promedio se ejerce sobre el haz de luz, que tiene un radio de 4.00 mm?

Nota: El punto de luz es la región del objetivo alcanzado por el haz.

ESTRATEGIA La fuerza promedio ejercida por el objetivo en un electrón es el cambio en el momentum de los electrones dividido por el tiempo necesario para que el electrón esté en reposo. Por la tercera ley, una fuerza igual y opuesta se ejerce sobre el objetivo. Durante el pulso, N colisiones tienen lugar en un tiempo Δt total, por lo que al multiplicar los efectos negativos del cambio de un solo electrón en movimiento por N y dividiendo por la duración del pulso Δt , se obtiene la fuerza promedio ejercida sobre el objetivo durante el pulso. La división de esa fuerza por el área del haz de luz da como resultado la presión promedio sobre el haz de luz.

SOLUCIÓN

a) La fuerza del objetivo es igual al cambio negativo en el momentum de cada electrón, multiplicado por el número N de electrones y dividido por la duración del pulso:

Sustituya la expresión $\Delta p = mv_f - mv_i$ y tenga en cuenta que $mv_f = 0$ por suposición:

Sustituyendo valores:

$$F = - \frac{N\Delta p}{\Delta t}$$

$$F = - \frac{N(mv_f - mv_i)}{\Delta t} = - \frac{Nm(0 - v_i)}{\Delta t}$$

$$F = - \frac{(1.25 \times 10^{14})(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0 - 3.00 \times 10^7 \text{ m/s})}{(5.00 \times 10^{-8} \text{ s})}$$

$$= 0.0683 \text{ N}$$

b) Calcule la presión del haz de luz.

Utilice la definición de presión promedio, la fuerza dividida por área:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi r^2} = \frac{0.0683 \text{ N}}{\pi (0.00400 \text{ m})^2}$$

$$= 1.36 \times 10^3 \text{ Pa}$$

COMENTARIOS Haces de electrones de alta energía pueden ser utilizados para la soldadura y el fortalecimiento de materiales de descarga. Los efectos relativistas (véase el capítulo 26) eran ignorados en este cálculo, y serían relativamente pequeños, en todo caso un décimo de la velocidad de la luz. Este ejemplo ilustra cómo numerosas colisiones atómicas o, en este caso, las partículas subatómicas pueden dar lugar a efectos físicos macroscópicos, como la fuerza y presión.

PREGUNTA 10.9 Si el mismo haz se dirige a un material que refleja todos los electrones, ¿cómo se afecta la presión final?

EJERCICIO 10.9 Un haz de protones que viajan a 2.00×10^6 m/s golpea un objetivo durante un breve pulso que dura 7.40×10^{-9} s. a) Si hay 4.00×10^9 protones en el haz y todos se reflejan elásticamente, ¿qué fuerza se ejerce sobre el objetivo? b) ¿Qué presión promedio se ejerce sobre el haz de luz, que tiene un radio de 2.00 mm?

RESPUESTAS a) 0.00361 N b) 287 Pa

Interpretación molecular de la temperatura

Hemos relacionado la presión de un gas con el promedio de energía cinética de las moléculas del gas; relacionemos ahora la temperatura con una descripción microscópica del gas. Podemos obtener un acercamiento del significado de temperatura multiplicando la ecuación 10.13 por el volumen:

$$PV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} mv^2 \right)$$

Comparando esta ecuación con la ecuación de estado para un gas ideal en la forma de la ecuación 10.11, $PV = Nk_B T$, observamos que los lados izquierdos de las dos ecuaciones son idénticos. Igualando los lados derechos, se tiene

$$T = \frac{2}{3k_B} \left(\frac{1}{2} mv^2 \right) \quad [10.14]$$

Esto significa que **la temperatura de un gas es una medida directa del promedio de energía cinética molecular del gas**. Cuando la temperatura aumenta, las moléculas se mueven con una energía cinética mayor.

Reordenando la ecuación 10.14, es posible relacionar la energía cinética traslacional con la temperatura:

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} k_B T \quad [10.15]$$

◀ La temperatura es proporcional a la energía cinética promedio

◀ Energía cinética promedio por molécula

Energía cinética total ▶
de N moléculas

Así que el promedio de la energía cinética traslacional por molécula es $\frac{3}{2}k_B T$. La energía cinética traslacional total de N moléculas de un gas, es simplemente N veces la energía promedio por molécula,

$$EC_{\text{total}} = N\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{3}{2}Nk_B T = \frac{3}{2}nRT \quad [10.16]$$

donde hemos empleado $k_B = R/N_A$ para la constante de Boltzmann y $n = N/N_A$ para el número de moles de gas. De este resultado, vemos que **el total de energía cinética traslacional de un sistema de moléculas es proporcional a la temperatura absoluta del sistema.**

Para un gas monoatómico, la energía cinética de traslación es el único tipo de energía que las moléculas pueden tener, así que la ecuación 10.16 da la **energía interna U de un gas monoatómico**:

$$U = \frac{3}{2}nRT \quad (\text{gas monoatómico}) \quad [10.17]$$

Para moléculas biatómicas y poliatómicas, existen más posibilidades de almacenamiento de energía en la vibración y rotación de la molécula.

La raíz cuadrada de $\overline{v^2}$ se llama **velocidad raíz cuadrada media (rms)** de las moléculas. De la ecuación 10.15, obtenemos, para la velocidad rms,

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad [10.18]$$

Velocidad raíz cuadrada media ▶

Tip 10.4 Kilogramos por mol, no gramos por mol

En la ecuación para las velocidades rms, las unidades de la masa molar M deben ser consistentes con las unidades de la constante del gas R . En particular, si R está en unidades SI, M debe expresarse en kilogramos por mol, no gramos por mol.

donde M es la masa molar en *kilogramos por mol* si R está dado en unidades SI. La ecuación 10.18 demuestra que, a una temperatura dada, las moléculas más ligeras se mueven con más velocidad, en promedio, que las moléculas más pesadas. Por ejemplo, si el gas en un recipiente consiste en una mezcla de hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno (H_2), con una masa molar de 2.0×10^{-3} kg/mol, tiene moléculas que se mueven cuatro veces más rápido que las del oxígeno (O_2), cuya masa molar es de 32×10^{-3} kg/mol. Si calculamos la velocidad rms del hidrógeno a temperatura ambiente (~ 300 K), encontramos

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})}{2.0 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}}} = 1.9 \times 10^3 \text{ m/s}$$

Tabla 10.2 Algunas velocidades rms

Gas	Masa molar (kg/mol)	v_{rms} a 20°C (m/s)
H_2	2.02×10^{-3}	1902
He	4.0×10^{-3}	1352
H_2O	18×10^{-3}	637
Ne	20.2×10^{-3}	602
N_2 y CO	28×10^{-3}	511
NO	30.0×10^{-3}	494
O_2	32.0×10^{-3}	478
CO_2	44.0×10^{-3}	408
SO_2	64.1×10^{-3}	338

Esta velocidad es aproximadamente igual a 17% de la velocidad de escape de la Tierra, que se calculó en el capítulo 7. Debido a que éste es un promedio de velocidad, un número grande de moléculas tiene velocidades mucho más altas y, por lo tanto, pueden escapar de la atmósfera de la Tierra. Ésta es la razón por la que hoy en día, la atmósfera de la Tierra no contiene hidrógeno, pues todo se ha ido al espacio.

La tabla 10.2 enlista las velocidades rms para varias moléculas a 20°C. Un sistema de gas a una temperatura dada exhibirá una variedad de velocidades. Esta distribución de velocidades es conocida como *distribución de velocidades de Maxwell*. Un ejemplo de esta distribución para un gas de nitrógeno a dos diferentes temperaturas, está dado en la figura activa 10.15. El eje horizontal es la velocidad y el eje vertical es el número de moléculas por unidad de velocidad. Observe que las tres velocidades son de especial interés: la velocidad más probable corresponde al máximo en la gráfica; la velocidad promedio, que se encuentra promediando todas las posibles velocidades, y las velocidades rms. Para todo gas, observe que $v_{\text{mp}} < v_{\text{prom}} < v_{\text{rms}}$. Cuando la temperatura se eleva, estas tres velocidades se mueven a la derecha.

Examen rápido

10.6 Un recipiente se llena con argón y otro con helio. Ambos recipientes están a la misma temperatura. ¿Cuáles moléculas tienen la velocidad rms más alta? a) argón, b) helio, c) tienen la misma velocidad o d) no hay suficiente información.

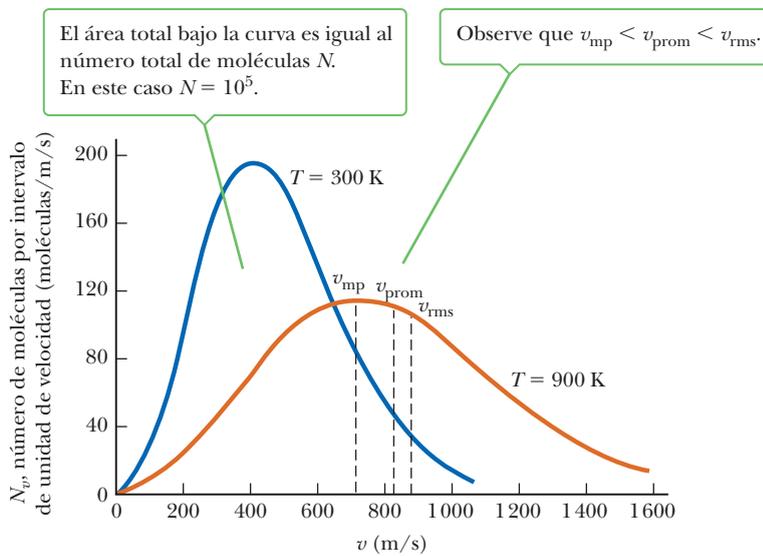


Figura activa 10.15 La distribución de velocidades de Maxwell para 10^5 moléculas de hidrógeno a 300 y 900 K.

■ **FÍSICA APLICADA 10.2** Expansión y temperatura

Imaginemos un gas en un cilindro aislado con un émbolo móvil que ha sido empujado hacia dentro, comprimiendo el gas y luego se suelta. Cuando las moléculas del gas golpean el émbolo, lo mueven hacia arriba. Desde el punto de vista de la teoría cinética, explique por qué la expansión de este gas hace que su temperatura se reduzca.

EXPLICACIÓN Desde el punto de vista de la teoría cinética, una molécula que choque con el émbolo hace que éste

rebote con alguna velocidad. De acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento, la molécula debe rebotar con menos velocidad de la que tenía antes del choque. Cuando ocurren estos choques, la velocidad promedio del conjunto de moléculas se reduce. Debido a que la temperatura está relacionada con la velocidad promedio de las moléculas, la temperatura del gas disminuye. ■

■ **EJEMPLO 10.10** Un cilindro de helio

OBJETIVO Calcular la energía interna de un sistema y la energía cinética promedio por molécula.

PROBLEMA Un cilindro contiene 2.00 mol de gas helio a 20.0°C . Suponga que el helio se comporta como un gas ideal. **a)** Encuentre la energía total interna del sistema. **b)** ¿Cuál es la energía cinética promedio por molécula? **c)** ¿Cuánta energía debería agregarse al sistema para duplicar la velocidad rms? La masa molar del helio es igual a 4.00×10^{-3} kg/mol.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustituir la información dada en las ecuaciones apropiadas: la ecuación 10.17 para el inciso a) y la ecuación 10.15 para el inciso b). En el inciso c) utilice las ecuaciones para la rapidez rms y la energía interna juntas. Debe calcularse un cambio en la energía interna.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la energía total interna del sistema.

Sustituya los valores en la ecuación 10.17 con $n = 2.00$ y $T = 293$ K:

$$U = \frac{3}{2}(2.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(293 \text{ K}) = 7.30 \times 10^3 \text{ J}$$

b) ¿Cuál es la energía cinética promedio por molécula?

Sustituya los valores dados en la ecuación 10.15:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}m\overline{v^2} &= \frac{3}{2}k_B T = \frac{3}{2}(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K}) \\ &= 6.07 \times 10^{-21} \text{ J} \end{aligned}$$

c) ¿Cuánta energía debe agregarse para duplicar la velocidad rms?

De la ecuación 10.18, duplicar la velocidad rms requiere cuadruplicar T . Calcule el cambio requerido de energía interna, la cual es la energía que debe ponerse al sistema:

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_f - U_i = \frac{3}{2}nRT_f - \frac{3}{2}nRT_i = \frac{3}{2}nR(T_f - T_i) \\ \Delta U &= \frac{3}{2}(2.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})[(4.00 \times 293 \text{ K}) - 293 \text{ K}] \\ &= 2.19 \times 10^4 \text{ J} \end{aligned}$$

(continúa)

COMENTARIOS Calcular cambios en la energía interna es importante para entender los ciclos en los motores del capítulo 12.

PREGUNTA 10.10 Verdadero o Falso: A la misma temperatura, 1 mol de gas helio tiene la misma energía interna que 1 mol de gas argón.

EJERCICIO 10.10 La temperatura de 5.00 moles de gas argón es bajado de 3.00×10^2 K a 2.40×10^2 K. a) Encuentre el cambio en la energía interna, ΔU , del gas. b) Encuentre el cambio de energía cinética promedio por átomo.

RESPUESTAS a) $\Delta U = -3.74 \times 10^3$ J b) -1.24×10^{-21} J

RESUMEN

10.1 Temperatura y la ley cero de la termodinámica

Dos sistemas están en **contacto térmico** si puede intercambiarse energía entre ellos, y en **equilibrio térmico**, si están en contacto pero no hay intercambio de energía. El intercambio de energía entre dos cuerpos debido a la diferencia en sus temperaturas es llamado **calor**.

La **ley cero de la termodinámica** establece que si dos objetos A y B se encuentran separadamente en equilibrio térmico con un tercer objeto, entonces A y B están en equilibrio térmico mutuamente. Equivalentemente, si el tercer objeto es un **termómetro**, entonces la **temperatura** que mide de A y B será la misma. Dos objetos en equilibrio térmico están a la misma temperatura.

10.2 Termómetros y escalas de temperatura

Los termómetros miden temperaturas y están basados en propiedades físicas, tales como la expansión o contracción dependientes de la temperatura de un sólido, líquido o gas. Estos cambios en volumen se relacionan con una escala lineal, siendo las más comunes las **escalas Fahrenheit, Celsius y Kelvin**. La escala de temperatura Kelvin toma su punto cero como el **cero absoluto** (0 K = -273.15 °C), el punto al cual, por extrapolación, la presión de los gases se reduce a cero.

La relación entre la temperatura en Celsius T_C y la temperatura en Kelvin (absoluta) T es

$$T_C = T - 273.15 \quad [10.1]$$

La relación entre la temperatura en Fahrenheit y la temperatura en Celsius es

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad [10.2a]$$

10.3 Expansión térmica de sólidos y líquidos

Comúnmente una sustancia se expande cuando se calienta. Si un objeto tiene una longitud inicial L_0 a cierta temperatura y sufre un cambio de temperatura ΔT , su dimensión lineal cambia por la cantidad ΔL , que es proporcional a la longitud original del objeto y al cambio de temperatura:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad [10.4]$$

El parámetro α es llamado el **coeficiente de expansión lineal**. El cambio de área de una sustancia con el cambio de temperatura está dado por

$$\Delta A = \gamma A_0 \Delta T \quad [10.5]$$

donde $\gamma = 2\alpha$ es el **coeficiente de expansión de área**. Del mismo modo, el cambio en el volumen con la temperatura de la mayoría de sustancias es proporcional al volumen inicial V_0 y al cambio de temperatura ΔT :

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad [10.6]$$

donde $\beta = 3\alpha$ es el **coeficiente de expansión de volumen**.

La expansión y contracción de un material debido a cambios en la temperatura genera tensiones y deformaciones, algunas veces suficientes para provocar fracturas.

10.4 Descripción macroscópica de un gas ideal

El número de Avogadro es $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ partículas/mol. Un mol de lo que sea, por definición, consiste en un número de Avogadro de partículas. El número está definido de tal modo que un mol de átomos de carbono 12 tenga una masa de exactamente 12 g. La masa en gramos de un mol de una sustancia pura es el mismo, numéricamente, que la masa atómica (o molecular) de la sustancia.

Un **gas ideal** obedece la ecuación

$$PV = nRT \quad [10.8]$$

donde P es la presión del gas, V es su volumen y n es el número de moles de gas, R es la constante universal para los gases (8.31 J/mol · K) y T es la temperatura absoluta en kelvins. Un gas real a presiones muy bajas se comporta aproximadamente como un gas ideal.

La solución de problemas usualmente requiere comparar dos estados diferentes del mismo sistema de gases, dividir la ecuación de gas ideal del estado final entre la ecuación de gas ideal del estado inicial, cancelar los factores que no cambian y resolver para la cantidad desconocida.

10.5 Teoría cinética de los gases

La **presión** de N moléculas de un gas ideal contenido en un volumen V está dado por

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \left(\frac{1}{2} m \overline{v^2} \right) \quad [10.13]$$

donde $\frac{1}{2} m \overline{v^2}$ es la **energía cinética promedio por molécula**.

La energía cinética promedio de las moléculas de un gas es directamente proporcional a la temperatura absoluta del gas:

$$\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} k_B T \quad [10.15]$$

La cantidad k_B es la **constante de Boltzmann** (1.38×10^{-23} J/K).

La energía interna de n moles de un gas ideal monoatómico es

$$U = \frac{3}{2}nRT \quad [10.17]$$

La **velocidad raíz cuadrada media (rms)** de las moléculas de un gas es

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad [10.18]$$

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

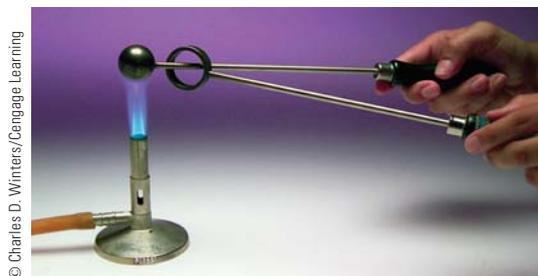
- En un día muy frío al norte de Nueva York, la temperatura es de -25°C , lo cual es equivalente a ¿qué temperatura en Fahrenheit? a) -46°F b) -77°F c) 18°F d) 298 K e) -13°F .
- Se hace un agujero en una placa de metal. Cuando el metal se calienta, ¿qué ocurre con el diámetro del agujero? a) Disminuye. b) Aumenta. c) Permanece igual. d) La respuesta depende de la temperatura inicial del metal. e) Ninguna de las anteriores.
- La Estatua de la Libertad tiene 93 m de alto en una mañana de verano cuando la temperatura es de 20°C . Si la temperatura de la estatua aumenta de 20 a 30°C , ¿en qué orden de magnitud aumenta la altura de la estatua? Elija el mejor estimado suponiendo la estatua como si fuera de cobre sólido. a) 0.1 mm b) 1 mm c) 1 cm d) 10 cm e) 1 m
- Convierta 162°F al equivalente en temperatura en Kelvin. a) 373 K b) 288 K c) 345 K d) 201 K e) 308 K
- Una manera de enfriar un gas es permitirle expandirse. Cuando cierto gas bajo presión de $5.00 \times 10^6\text{ Pa}$ a 25.0°C se le permite expandir a 3.00 veces su volumen original, su presión final es $1.07 \times 10^6\text{ Pa}$. ¿Cuál es su temperatura final? a) 177°C b) 233 K c) 212 K d) 191 K e) 115 K
- Si el volumen de un gas ideal se duplica mientras que su temperatura se cuadruplica, la presión a) permanece igual, b) disminuye en un factor de 2, c) disminuye en un factor de 4, d) aumenta en un factor de 2 o e) aumenta en un factor de 4.
- Un contenedor retiene 0.50 m^3 de oxígeno a una presión absoluta de 4.0 atm. Se abre una válvula permite que el gas empuje un pistón incrementando el volumen del gas hasta que la presión cae a 1.0 atm. Si la temperatura permanece constante, ¿qué nuevo volumen ocupa el gas? a) 1.0 m^3 b) 1.5 m^3 c) 2.0 m^3 d) 0.12 m^3 e) 2.5 m^3
- ¿Cuál es la energía interna de 26.0 g de gas neón a una temperatura de 152°C ? a) 2 440 J b) 6 830 J c) 3 140 J d) 5 870 J e) 5 020 J.
- Suponga que se vacía una bandeja de cubitos de hielo en un recipiente parcialmente lleno de agua y se cubre el recipiente. Después de media hora, el contenido del recipiente alcanza el equilibrio térmico, con más agua líquida y menos hielo que con el que empezó. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) La temperatura del agua líquida es mayor que la temperatura del hielo restante. b) La temperatura del agua en estado líquido es la misma que la del hielo. c) La temperatura del agua líquida es menor que la del hielo. d) Las temperaturas comparativas del agua líquida y el hielo dependerán de las cantidades presentes.
- ¿Cuál de las siguientes suposiciones *no* se hace en la teoría cinética de los gases? a) El número de moléculas es muy pequeño. b) Las moléculas obedecen las leyes de movimiento de Newton. c) Las colisiones entre moléculas son elásticas. d) El gas es una sustancia pura. e) La separación promedio entre moléculas es grande comparada con sus dimensiones.
- Suponga por un breve instante que las moléculas de gas que chocan con una pared se pegan a ésta en lugar de rebotar. ¿Cómo se vería afectada la presión de la pared durante ese pequeño instante? a) La presión sería cero. b) La presión se reduce a la mitad. c) La presión permanece sin cambio. d) La presión se duplicaría. e) La respuesta depende del área de la pared.
- Si la temperatura de un gas ideal se incrementa de 200 K a 600 K, ¿qué sucede con la rapidez rms de las moléculas? a) Se incrementa en un factor de 3. b) Permanece igual. c) Es un tercio de la velocidad original. d) Es $\sqrt{3}$ veces la velocidad original. e) Se incrementa en un factor de 6.
- Un globo de hule se llena con 1 L de aire a 1 atm y 300 K y después se enfría a 100 K. El caucho permanece flexible ya que se enfría. i) ¿Qué sucede con el volumen del globo? a) Se reduce a $\frac{1}{6}$ L. (b) Se reduce a $\frac{1}{3}$ L. c) Se reduce a $L/\sqrt{3}$. d) Es constante. e) Aumenta. ii) ¿Qué sucede con la presión del aire en el globo? a) Se reduce a $\frac{1}{6}$ atm. b) Se reduce a $\frac{1}{3}$ atm. c) Se reduce a $1/\sqrt{3}$ atm. d) Es constante. e) Aumenta.
- Dos cilindros A y B a la misma temperatura contienen la misma cantidad del mismo tipo de gas. El cilindro A tiene tres veces el volumen del cilindro B. ¿Qué se puede concluir acerca de las presiones que ejercen los gases? a) Nada se puede concluir acerca de las presiones. b) La presión en A es tres veces la presión en B. c) Las presiones deben ser iguales. d) La presión en A debe ser un tercio de la presión en B.

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- a) ¿Por qué un plato de vidrio ordinario usualmente se rompe cuando se coloca sobre una estufa? b) Los platos hechos de vidrio Pyrex no se rompen tan fácilmente. ¿Qué característica del Pyrex previene la ruptura?
- ¿Por qué una línea eléctrica es más propensa a romperse en invierno que en verano, incluso si está cargada con el mismo peso?
- Algunos termómetros están hechos de una columna de mercurio dentro de un tubo de vidrio. Basado en la operación de estos termómetros comunes, ¿cuál tiene un coeficiente de expansión lineal más grande, el vidrio o el mercurio? (No responda la pregunta consultando una tabla.)
- Un globo de hule se infla y al final se amarra. ¿La presión dentro del globo es mayor, menor o igual a la presión atmosférica del ambiente? Explique.
- Objetos a grandes profundidades bajo la superficie del océano están sujetos a presiones extremadamente altas, como vimos en el capítulo 9. En estos ambientes algunas bacterias se han adaptado a presiones de hasta miles de veces la presión atmosférica. ¿Cómo se vería afectada dicha bacteria si fuera cambiada rápidamente a la superficie del océano?
- Luego de cocinar comida en una olla de presión, ¿por qué es muy importante enfriar el contenedor con agua fría antes de intentar quitar la tapa?
- ¿Por qué las burbujas de vapor en un recipiente con agua hirviendo se hacen más grandes cuando se aproximan a la superficie?
- En una cinta métrica de acero a 22°C se colocan marcas para indicar longitud. Se hacen mediciones con la misma cinta un día cuando la temperatura es de 27°C . ¿Las mediciones son demasiado largas, demasiado cortas o precisas?
- Algunos campistas se detienen en alguna tienda para comprar comida, incluyendo bolsas de papas fritas. Luego conducen hacia las montañas a su sitio de campo. Cuando descargan la comida, notan que las bolsas de papas fritas están infladas como globos. ¿Por qué sucedió esto?
- ¿Por qué los planetas pequeños tienden a tener menor o ninguna atmósfera?
- Las tapas de metal en frascos de vidrio pueden aflojarse vertiendo agua caliente sobre ellas. ¿Por qué funciona esto?
- Suponga que el volumen de un gas ideal se duplica mientras la presión se reduce a la mitad. ¿La energía interna del gas se incrementa, disminuye o permanece igual? Explique.
- El radiador de un automóvil se llena hasta el borde con agua cuando el motor está frío. ¿Qué pasa con el agua cuando el motor está funcionando y el agua ha alcanzado una alta temperatura?
- Cuando el anillo de metal y la esfera de metal en la figura PC10.14 están a temperatura ambiente, la esfera apenas puede pasar por el aro. a) Después de que la esfera se calienta con una llama, no puede pasar por el aro. Explique. b) ¿Qué pasa si el anillo se calienta y la esfera de la izquierda está a temperatura ambiente? ¿La esfera pasará por el aro?



© Charles D. Winters/Cengage Learning

Figura PC10.14**PROBLEMAS**

ENHANCED

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

10.1 Temperatura y la ley cero de la termodinámica**10.2 Termómetros y escalas de temperatura**

- Para cada una de las siguientes temperaturas, encuentre la temperatura equivalente en la escala indicada:

a) -273.15°C en la escala Fahrenheit, b) 98.6°F en la escala Celsius y c) 100 K en la escala Fahrenheit.

- La presión en un termómetro de gas de volumen constante es de 0.700 atm a 100°C y 0.512 atm a 0°C . a) ¿Cuál es la temperatura cuando la presión es 0.0400 atm ? b) ¿Cuál es la presión a 450°C ?

3. El punto de ebullición del hidrógeno líquido es de 20.3 K a presión atmosférica. ¿Cuál es esta temperatura en a) la escala Celsius y b) la escala Fahrenheit?
4. El Valle de la Muerte tiene el récord de la mayor temperatura registrada en Estados Unidos. El 10 de julio de 1913 en un lugar llamado Furnace Creek Ranch, la temperatura se elevó hasta 134°F. La temperatura más baja registrada ocurrió en el Prospect Creek Camp en Alaska el 23 de enero de 1971, cuando la temperatura se desplomó hasta -79.8°F. a) Convierta estas temperaturas a escala Celsius. b) Convierta la temperatura Celsius a Kelvin.
5. Demuestre que la temperatura -40° es única en el sentido que tiene el mismo valor numérico tanto en la escala Celsius como en la escala Fahrenheit.
6. **M** En un experimento estudiantil, un termómetro de gas de volumen constante se calibra en hielo seco (-78.5°C) y en alcohol etílico hirviendo (78.0°C). Las presiones respectivas son 0.900 atm y 1.635 atm. a) ¿Qué valor de cero absoluto en grados Celsius produce la calibración? b) ¿Qué presión se encontraría en i) los puntos de congelación y ii) ebullición del agua? (*Sugerencia:* Utilice la relación lineal $P = A + BT$, donde A y B son constantes.)
7. Demuestre que si la temperatura en la escala Celsius cambia por ΔT_C , la temperatura Fahrenheit cambia por $\Delta T_F = \frac{9}{5} \Delta T_C$.
8. La diferencia en temperatura entre el interior y el exterior de un hogar en un invierno frío es de 57.0°F. Exprese esta diferencia en a) la escala Celsius y b) la escala Kelvin.
9. **C|C** La temperatura de un paciente medida por una enfermera es de 41.5°C. a) ¿Cuál es la temperatura en la escala Fahrenheit? b) ¿Cree usted que el paciente está gravemente enfermo? Explique.
10. **S** Las diferencias de temperatura en la escala Rankine son idénticas a las diferencias en la escala Fahrenheit, pero el cero absoluto está dado como 0°R . a) Encuentre una relación para convertir las temperaturas T_F de la escala Fahrenheit a las temperaturas correspondientes T_R de la escala Rankine. b) Encuentre una segunda relación para convertir temperaturas T_R de la escala Rankine a temperaturas T_K de la escala Kelvin.

10.3 Expansión térmica de sólidos y líquidos

11. El puente sobre el cañón New River en West Virginia es un arco de acero de 518 m de longitud. ¿Cuánto cambiará su longitud a temperaturas extremas de -20°C y 35°C ?
12. **C|C** El reloj del abuelo es controlado por un péndulo de latón de 1.3 m de largo que se balancea a una temperatura de 20°C . a) ¿Cuál es la longitud de la barra del péndulo cuando la temperatura cae a 0.0°C ? b) Si el periodo del péndulo está dado por $T = 2\pi\sqrt{L/g}$, donde L es su longitud, ¿el cambio en la longitud de la barra provoca que el reloj vaya más rápido o más despacio?
13. Un armazón de lentes está hecho de plástico epoxi (coeficiente de expansión lineal $= 1.30 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). A temperatura ambiente (20.0°C), el armazón tiene agujeros circulares para los lentes de 2.20 cm de radio. ¿A qué temperatura debe ser calentado el armazón si se piensa insertar lentes de 2.21 cm de radio?
14. Una bola esférica de acero tiene un diámetro de 2.540 cm a 25.00°C . a) ¿Cuál es el diámetro cuando su temperatura se eleva a 100.0°C ? b) ¿Qué cambio de temperatura se requiere para incrementar su volumen en 1.000%?
15. Un anillo de latón de 10.00 cm de diámetro a 20.0°C se calienta y se desliza por una barra de aluminio de 10.01 cm a 20.0°C . Suponiendo que los coeficientes de expansión lineal promedio son constantes, a) ¿a qué temperatura debe ser enfriada la combinación para separar los dos metales? ¿Dicha temperatura es alcanzable? b) ¿Qué pasaría si la barra de aluminio fuera de 10.02 cm de diámetro?
16. **S** Una sustancia sólida tiene una densidad ρ_0 a una temperatura T_0 . Si su temperatura se incrementa en una cantidad ΔT , demuestre que su densidad a la temperatura mayor está dada por

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta\Delta T}$$

17. **C|C** El plomo tiene una densidad de $11.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ a 0°C . a) ¿Cuál es la densidad del plomo a 90°C ? b) Con base en su respuesta en el inciso anterior, considere ahora la situación en la cual usted planea invertir en un lingote de oro. ¿Preferiría comprarlo en un día caluroso? Explique.
18. **C|C** El puente Golden Gate en San Francisco tiene una envergadura de 1.28 km de longitud, uno de los más largos del mundo. Imagine que un alambre de acero con esta longitud y una sección transversal de $4.00 \times 1.0^{-6} \text{ m}^2$ se coloca en la cubierta del puente con sus extremos unidos a las torres, en un día de verano cuando la temperatura del alambre es 35.0°C . a) Cuando llega el invierno, las torres permanecen a la misma distancia y la cubierta del puente mantiene la misma forma con sus juntas de expansión abiertas. Cuando la temperatura desciende a -10.0°C , ¿cuál es la tensión en el alambre? Tome el módulo de Young del acero de $20.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$. b) La deformación permanente ocurre si la tensión en el acero excede su límite de elasticidad de $3.00 \times 10^8 \text{ N/m}^2$. ¿A qué temperatura el cable avanzará a su límite de elasticidad? c) Explique cómo las respuestas de a) y b) podrían cambiar si el puente Golden Gate fuera el doble de largo.
19. **M** Un tanque de gasolina subterráneo puede contener 1.00×10^3 galones de gasolina a 52.0°F . Si el tanque se llena en un día cuando la temperatura exterior (y la gasolina en el tanque de un camión) es de 95.0°F , ¿cuántos galones desde el camión pueden verse dentro del tanque? Suponga que la temperatura de la gasolina se enfría rápidamente de 95.0°F a 52.0°F cuando entra al tanque.

20. **S** Demuestre que el coeficiente de expansión de volumen, β , se relaciona con el coeficiente de expansión lineal, α , por medio de la expresión $\beta = 3\alpha$.
21. Un cilindro hueco de aluminio de 20.0 cm de profundidad tiene una capacidad interna de 2.000 L a 20.0 °C. Está completamente lleno de esencia de trementina a 20.0 °C. La trementina y el cilindro de aluminio se calientan lentamente juntos hasta 80.0 °C. a) ¿Qué tanto se desborda la trementina? b) ¿Cuál es el volumen de la trementina que queda en el cilindro a 80.0 °C? c) Si la combinación con esta cantidad de trementina se enfría de nuevo a 20.0 °C, ¿qué tanto por debajo del borde del cilindro retrocede la superficie de la trementina?

22. Un constructor utiliza cinta métrica de acero para medir la longitud de una columna de soporte de aluminio. Si la longitud medida es de 18.700 m cuando la temperatura es 21.2 °C, ¿cuál es la longitud medida cuando la temperatura se eleva a 29.4 °C? (Nota No desprecie la expansión de la cinta.)

23. La banda mostrada en la figura P10.23 es de acero inoxidable (coeficiente de expansión lineal = $17.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; módulo de Young = $18 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$). Es esencialmente circular con un radio promedio inicial de 5.0 mm, una altura de 4.0 mm y un espesor de 0.50 mm. Si la banda se ajusta en un diente cuando se calienta a una temperatura de 80 °C, ¿cuál es la tensión en la banda cuando se enfría a una temperatura de 37 °C?

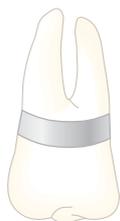


Figura P10.23

24. **CIC** El oleoducto Trans-Alaska tiene 1300 km de longitud, llegando desde Prudhoe Bay hasta el puerto de Valdez y está sujeto a intervalos de temperaturas desde $-73 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $+35 \text{ } ^\circ\text{C}$. a) ¿Cuánto se expande el oleoducto de acero debido a la diferencia en temperatura? b) ¿Cómo puede compensarse esta expansión?

25. El coeficiente de expansión de volumen promedio del tetracloruro de carbono es $5.81 \times 10^{-4} \text{ (} ^\circ\text{C)}^{-1}$. Si un contenedor de acero de 50.0 galones se llena completamente con tetracloruro de carbono cuando la temperatura es 10.0 °C, ¿cuánto se derrama cuando la temperatura aumenta a 30.0 °C?

26. **PG** La densidad de la gasolina es $7.30 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ a 0 °C. Su coeficiente de expansión de volumen promedio es de $9.60 \times 10^{-4} \text{ (} ^\circ\text{C)}^{-1}$ y considere que 1.00 gal = 0.003 80 m³. a) Calcule la masa de 10.0 galones de gas a 0 °C. b) Si 1.000 m³ de gasolina a 0 °C se calienta a 20.0 °C, calcule su nuevo volumen. c) Utilizando la respuesta del inciso b), calcule la densidad de la gasolina a 20.0 °C. d) Calcule la masa de 10.0 gal de gas a 20 °C. e) ¿Cuántos kilogramos extra de gasolina obtendría si comprara 10.0 gal de gasolina a 0 °C en vez de a 20.0 °C desde una bomba que no compensa la temperatura?



Figura P10.27

27. La figura P10.27 muestra una pieza fundida circular de acero con

una abertura. Si la pieza es calentada, a) ¿el ancho de la abertura se incrementará o reducirá? b) El ancho de la abertura es de 1.600 cm cuando la temperatura es 30.0 °C. Determine el ancho de la abertura cuando la temperatura es 190 °C.

28. Las secciones de hormigón de cierta autopista están diseñadas para tener una longitud de 25.0 m. Las secciones se vierten y se curan a 10.0 °C. ¿Qué distancia mínima debe dejar el ingeniero entre las secciones para eliminar el pandeo si el concreto alcanza una temperatura de 50.0 °C?

10.4 Descripción macroscópica de un gas ideal

29. Un mol de gas oxígeno se encuentra a una presión de 6.00 atm y a una temperatura de 27.0 °C. a) Si el gas se calienta a un volumen constante hasta que la presión se triplica, ¿cuál es la temperatura final? b) Si el gas se calienta de tal modo que tanto la presión como el volumen se duplican, ¿cuál es la temperatura final?

30. **PG** Un tanque de 20.0 L de dióxido de carbono (CO_2) se encuentra a una presión de $9.50 \times 10^5 \text{ Pa}$ y temperatura de 19.0 °C. a) Calcule la temperatura del gas en Kelvin. b) Utilice la ley de gas ideal para calcular el número de moles de gas en el tanque. c) Utilice la tabla periódica para calcular el peso molecular del dióxido de carbono expresándolo en gramos por mol. d) Obtenga el número de gramos de dióxido de carbono en el tanque. e) Ocurre un incendio elevando la temperatura ambiente a 224.0 K mientras 82.0 g de gas se fugan del tanque. Calcule la nueva temperatura y el número de moles de gas restante en el tanque. f) Usando una técnica análoga a la del ejemplo 10.6b, encuentre una expresión simbólica para la presión final despreciando el cambio de volumen del tanque. g) Calcule la presión final en el tanque como resultado del fuego y la fuga.

31. a) Un gas ideal ocupa un volumen de 1.0 cm³ a 20 °C y presión atmosférica. Determine el número de moléculas de gas en el contenedor. b) Si la presión del volumen de 1.0 cm³ se reduce a $1.0 \times 10^{-11} \text{ Pa}$ (un vacío extremadamente bueno) mientras la temperatura permanece constante, ¿cuántos moles de gas permanecen en el contenedor?

32. **M** Un neumático de automóvil se infla con aire originalmente a 10.0 °C y a presión atmosférica normal. Durante el proceso, el aire se comprime a 28.0% de su volumen original y se aumenta la temperatura a 40.0 °C. a) ¿Cuál es la presión del neumático en pascales? b) Después de que el coche se conduce a alta velocidad, la temperatura del aire del neumático se eleva a 85.0 °C y aumenta el volumen interior del neumático en 2.00%. ¿Cuál es la presión (absoluta) del neumático nuevo en pascales?

33. Se confina gas en un tanque a una presión de 11.0 atm y una temperatura de 25.0 °C. Si dos tercios del gas se retiran y la temperatura se eleva a 75.0 °C, ¿cuál es la nueva presión del tanque?

34. Un gas está contenido en un recipiente de 8.00 L a una temperatura de 20.0 °C y una presión de 9.00 atm.

- a) Determinar el número de moles de gas en el recipiente. b) ¿Cuántas moléculas hay en el recipiente?
35. Un globo meteorológico está diseñado para expandirse a un radio máximo de 20 m a su altitud de operación, donde la presión del aire es de 0.030 atm y la temperatura es de 200 K. Si el globo se llena a presión atmosférica y 300 K, ¿cuál es su radio al despegar?
36. La densidad del gas helio a $T = 0^\circ\text{C}$ es $\rho_0 = 0.179\text{ kg/m}^3$. La temperatura se eleva entonces a $T = 100^\circ\text{C}$, pero la presión permanece constante. Suponga que el helio es un gas ideal, calcule la nueva densidad ρ_f del gas.
37. Una burbuja de aire tiene un volumen de 1.50 cm^3 cuando es liberada por un submarino a 100 m bajo la superficie de un lago. ¿Cuál es el volumen de la burbuja cuando alcanza la superficie? Suponga que la temperatura y el número de moléculas de aire en la burbuja permanecen constantes durante su ascenso.
38. **CIC S** La ley del gas ideal puede ser restablecida en términos de la densidad de un gas. a) Utilice análisis dimensional para encontrar una expresión para la densidad ρ de un gas en términos del número de moles n , el volumen V y el peso molecular M en kilogramos por mol. b) Con la expresión encontrada en el inciso a), demuestre que

$$P = \frac{\rho}{M} RT$$

para un gas ideal. c) Encuentre la densidad del dióxido de carbono de la atmósfera en la superficie de Venus, donde la presión es de 90.0 atm y la temperatura es de $7.00 \times 10^2\text{ K}$. d) ¿Un armazón vacío de acero de radio 1.00 m y masa $2.00 \times 10^2\text{ kg}$ se levantaría o se caería en dicha atmósfera? ¿Por qué?

10.5 Teoría cinética de los gases

39. ¿Cuál es la energía cinética promedio de una molécula de oxígeno a una temperatura de 300 K?
40. Un contenedor cúbico sellado de 20.0 cm de lado contiene tres veces el número de Avogadro de moléculas a una temperatura de 20.0°C . Encuentre la fuerza ejercida por el gas sobre una de las paredes del contenedor.
41. Utilice el número de Avogadro para encontrar la masa de un átomo de helio.
42. Dos gases en una mezcla pasan a través de un filtro a un ritmo proporcional a la velocidad de los gases, la rms. a) Determine la relación de velocidades para los dos isótopos de cloro, ^{35}Cl y ^{37}Cl , a medida que pasan a través del aire. b) ¿Qué isótopo se mueve más rápido?
43. ¿A qué temperatura la velocidad rms de los átomos de helio es igual a a) la velocidad de escape de la Tierra, $1.12 \times 10^4\text{ m/s}$ y b) la velocidad de escape de la Luna, $2.37 \times 10^3\text{ m/s}$? (Véase el capítulo 7 para un análisis de la velocidad de escape.) *Nota:* La masa de un átomo de helio es $6.64 \times 10^{-27}\text{ kg}$.
44. **CIC** Un recipiente de 7.00 litros contiene 3.50 moles de gas ideal a una presión de $1.60 \times 10^6\text{ Pa}$. Encuentre

- a) la temperatura del gas y b) la energía cinética promedio de una molécula de gas en la vasija. c) ¿Qué información adicional necesitaría si se le pidiera encontrar la velocidad promedio de una molécula de gas?
45. Superman salta enfrente de Lois Lane para salvarla de una descarga de balas. En un intervalo de un minuto, un arma automática dispara 150 balas, cada una de masa 8.0 g, a 400 m/s. Las balas golpean su poderoso pecho, el cual tiene un área de 0.75 m^2 . Encuentre la fuerza promedio ejercida sobre el pecho de Superman si las balas rebotan después de una colisión elástica.
46. **M** En un periodo de 1.0 s, 5.0×10^{23} moléculas de nitrógeno golpean una pared de área 8.0 cm^2 . Si las moléculas se mueven a 300 m/s y golpean la pared con una colisión elástica perfecta, encuentre la presión ejercida sobre la pared. (La masa de una molécula de N_2 es de $4.68 \times 10^{-26}\text{ kg}$.)

Problemas adicionales

47. Dentro de la pared de una casa, una sección en forma de tubería de agua caliente está hecha de una pieza horizontal recta de 28.0 cm de largo (h), un codo y una pieza vertical recta de 134 cm de largo (ℓ) (figura P10.47). Un clavo y una tabla del segundo piso mantienen fijos los extremos de esta sección de tubo de cobre. Encuentre la magnitud y dirección del desplazamiento del codo del tubo cuando se hace circular el agua, que eleva la temperatura del tubo de 18.0 a 46.5°C .

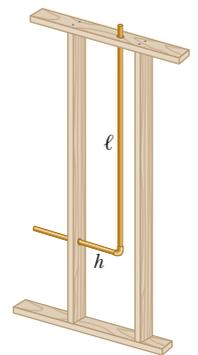


Figura P10.47

48. **M** El elemento activo de cierto láser es una varilla de vidrio común de 30.0 cm de largo y 1.50 cm de diámetro. Suponga que el coeficiente de expansión lineal del vidrio es $9.00 \times 10^{-6} (\text{C}^\circ)^{-1}$. Si la temperatura de la varilla aumenta 65.0°C , determine sus aumentos de a) longitud, b) diámetro y c) volumen.
49. Una conocida marca de soda de cola contiene 6.50 g de dióxido de carbono disuelto en 1.00 L de bebida gaseosa. Si el dióxido de carbono que se evapora es atrapado en un cilindro a 1.00 atm y 20.0°C , ¿qué volumen ocupa el gas?
50. **CIC** Considere la posibilidad de un objeto con cualquiera de las formas mostradas en la tabla 8.1. ¿Cuál es el porcentaje de aumento en el momento de inercia del objeto cuando se calienta de 0 a 100°C si está compuesto de a) de cobre o b) de aluminio? Suponga que los coeficientes de dilatación lineal promedio mostrados en la tabla 10.1 no varían entre 0 y 100°C . c) ¿Por qué las respuestas de los incisos a) y b) son las mismas para todas las formas?
51. Una viga de acero utilizada en la construcción de un rascacielos tiene una longitud de 35.000 m cuando se entrega en un día frío a una temperatura de 15.000°F . ¿Cuál es la longitud de la viga cuando se instala más tarde en un día cálido, cuando la temperatura es de 90.000°F ?

52. Un tubo de vidrio de 1.5 m de largo, cerrado en un extremo, es pesado y bajado al fondo de un lago de agua dulce. Cuando se recobra el tubo, una marca indicadora muestra que el agua subió a no más de 0.40 m del extremo cerrado. Determine la profundidad del lago. Suponga temperatura constante.

53. Las misiones espaciales de larga duración exigen recuperar el oxígeno del dióxido de carbono exhalado por la tripulación. Mediante un método de recuperación, 1.00 mol de dióxido de carbono produce 1.00 mol de oxígeno y 1.00 mol de metano como subproducto. El metano se almacena en un tanque a presión y se utiliza para controlar la altitud de la nave por medio de descargas controladas. Cada astronauta exhala 1.09 kg de dióxido de carbono por día. Si el metano generado en el reciclado de respiración de tres astronautas durante un vuelo de una semana se almacena en un tanque de 150 L originalmente vacío a -45.0°C , ¿cuál es la presión final en el tanque?

54. **CIC S** Un cilindro vertical de área de sección transversal A es embonado, sin fricción, con un pistón ajustado de masa m (figura P10.54). a) Si n moles de un gas ideal están en el cilindro a una temperatura T , utilice la segunda ley de Newton para el equilibrio para demostrar que la altura h en la cual el pistón está en equilibrio bajo su propio peso está dada por

$$h = \frac{nRT}{mg + P_0A}$$

donde P_0 es la presión atmosférica. b) La presión dentro del cilindro es ¿menor que, igual a o mayor que la presión atmosférica? c) Si el gas en el cilindro es calentado, ¿cómo se afectaría la respuesta dada para h ?

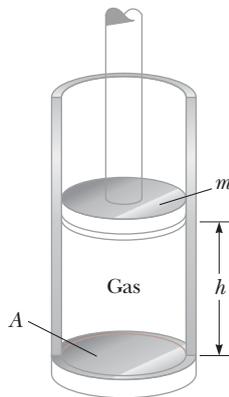


Figura P10.54

55. Un frasco hecho con Pyrex es calibrado a 20.0°C . Si se le pone acetona a 35.0°C hasta la marca de 100 mL. a) ¿Cuál es el volumen de la acetona cuando ambos, la acetona y el frasco, se enfrían a 20.0°C ? b) ¿El aumento temporal en el volumen del frasco de Pyrex diferenciaría apreciablemente la respuesta? ¿Por qué sí o por qué no?

56. **S** La presión manométrica sobre un cilindro de gas es registrada con el manómetro, que no es más que la diferencia de presiones interior y exterior, P_0 . Cuando el cilindro está lleno, la masa del gas en éste es m_i a una presión manométrica P_i . Suponiendo que la temperatura permanece constante, utilice la ley de los gases ideales y la relación entre moles y masa para demostrar que la masa del gas remanente en el cilindro cuando la presión manométrica es P_f está dada por

$$m_f = m_i \left(\frac{P_f + P_0}{P_i + P_0} \right)$$

57. **CIC S** Un líquido con coeficiente de expansión volumétrica β llena apenas un frasco esférico de volumen V_0 a una temperatura T_i (figura P10.57). El frasco está hecho de un material que tiene un coeficiente de expansión lineal α . El líquido está libre para expandirse en un tubo capilar de área de sección transversal A en el inciso superior. a) Si la temperatura aumenta en ΔT , demuestre que el líquido sube en el tubo capilar una cantidad $\Delta h = (V_0/A)(\beta - 3\alpha)\Delta T$. b) En el caso de un sistema típico, tal como un termómetro de mercurio, ¿por qué es una buena aproximación despreciar la expansión del frasco?

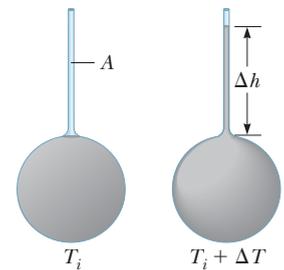


Figura P10.57

58. Antes de iniciar un largo viaje en un día caluroso, un conductor infla un neumático de su automóvil a una presión manométrica de 1.80 atm a 300 K. Al final del viaje, la presión manométrica ha aumentado a 2.20 atm. a) Si se supone que el volumen ha permanecido constante, ¿cuál es la temperatura del aire al interior del neumático? b) ¿Qué porcentaje de la masa original de aire del neumático debe sacarse para que la presión regrese a su valor original? Suponga que la temperatura permanece constante al valor calculado en a), al igual que el volumen del neumático cuando se saca aire.

59. Dos carriles de concreto de un puente de 250 m de largo se ponen extremo con extremo, de modo que no hay espacio para expansión (figura P10.59a). Si la temperatura aumenta 20.0°C , ¿cuál es la altura y a la que suben los carriles cuando se pandean? (figura P10.59b).

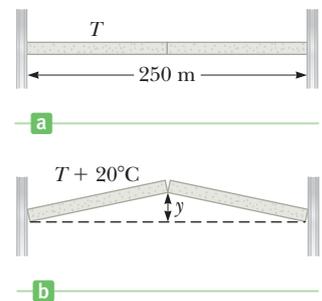


Figura P10.59

60. Un cilindro expansible tiene su parte superior conectada a un resorte con fuerza

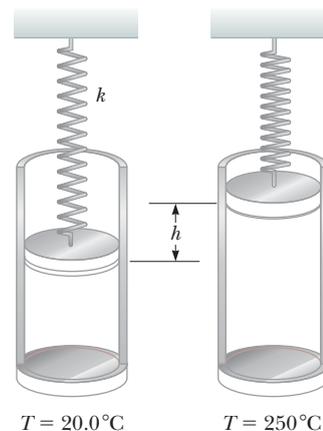


Figura P10.60

constante $2.00 \times 10^3 \text{ N/m}$ (figura P10.60). El cilindro se llena con 5.00 L de gas con un resorte relajado a una presión de 1.00 atm y una temperatura de 20.0°C . a) Si la tapa tiene un área de sección transversal de 0.0100 m^2 y masa despreciable, ¿cuánto se levantará la tapa cuando la temperatura suba a 250°C ? b) ¿Cuál es la presión del gas a 250°C ?

61. **C|C S** Se construye una barra bimetálica con dos tiras delgadas de metales diferentes. Cuando se calientan, la que tiene mayor coeficiente de expansión promedio se dilata más que la otra, lo que hace que la barra forme un arco, con el radio exterior en una circunferencia más grande (figura P10.61). a) Deduzca una expresión para calcular el ángulo de doblamiento θ como función de la longitud inicial de las tiras, su coeficiente de expansión lineal promedio, el cambio de temperatura y la separación de los centros de las tiras ($\Delta r = r_2 - r_1$). b) Demuestre que el ángulo de doblamiento se hace cero cuando ΔT se hace cero o cuando los dos coeficientes de expansión son iguales. c) ¿Qué pasa si la barra se enfría?
62. Un puente de 250 m de largo se diseña incorrectamente de modo que no puede expandirse con la temperatura. Se hace de concreto con $\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. a) Si se

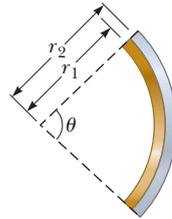


Figura P10.61

supone que el cambio máximo en temperatura en el sitio espera de 20°C , encuentre el cambio en longitud que el palmo experimentaría si estuviera libre de expandirse. b) Demuestre que la tensión sobre un objeto con módulo de Young Y cuando se eleva por ΔT con sus extremos fijados firmemente está dada por $\alpha Y \Delta T$. c) Si la tensión máxima que el puente puede soportar sin colapsarse es $2.0 \times 10^7 \text{ Pa}$, ¿el derrumbamiento podría darse por este aumento de temperatura? El módulo de Young para el concreto es $2.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$.

63. **C|C** Después de una colisión en el espacio exterior, un disco de cobre a 850°C está girando sobre su eje con una velocidad angular de 25.0 rad/s . A medida que el disco irradia luz infrarroja, su temperatura baja a 20.0°C . No hay torque externo actuando sobre el disco. a) ¿La velocidad angular cambia a medida que el disco se enfría? Explique cómo cambia o por qué no lo hace. (b) ¿Cuál es su velocidad angular a la temperatura más baja?
64. Dos envases pequeños, cada uno con un volumen de 100 cm^3 , contienen gas helio a 0°C y presión de 1.00 atm. Los dos envases son ensamblados por un pequeño tubo abierto de volumen despreciable, permitiendo que el gas fluya a partir de un envase al otro. ¿Qué presión común existirá en los dos envases si la temperatura de un envase se eleva a 100°C mientras que el otro envase se mantiene a 0°C ?

La energía transferida al agua a través de radiación, convección y conducción resulta en la evaporación, un cambio de fase en la que el agua líquida se convierte en un gas. A través de esta convección el vapor se lleva hacia arriba, donde de nuevo cambia de fase, condensándose en gotas muy pequeñas o cristales de hielo, visibles como nubes.

John Short/Desisth Pics/Jupiter Images



11

Energía en procesos térmicos

- 11.1 Calor y energía interna
- 11.2 Calor específico
- 11.3 Calorimetría
- 11.4 Calor latente y cambio de fase
- 11.5 Transferencia de energía
- 11.6 Calentamiento global y gases de efecto invernadero

Cuando dos objetos con diferentes temperaturas son puestos en contacto térmico, la temperatura del objeto más caliente disminuye, mientras que la temperatura del objeto más frío aumenta. Con el tiempo, ambos objetos alcanzan un equilibrio de temperatura en algún lugar entre sus temperaturas iniciales. Durante este proceso, se dice que la energía es transferida del objeto más caliente al más frío.

Fue hasta 1850 cuando las materias de termodinámica y mecánica fueron consideradas dos distintas ramas de la ciencia, y el principio de la conservación de la energía parecía que describía solamente ciertos tipos de sistemas mecánicos. Experimentos realizados por el físico inglés James Joule (1818-1889) y otros, demostraron que la disminución en energía mecánica (cinética más la potencial) de un sistema aislado, era igual al incremento en la energía interna del sistema. Hoy en día, la energía interna es tratada como una forma de energía que puede ser transformada en mecánica y viceversa. Una vez que este concepto fue abordado para incluir a la energía interna, la ley de la conservación de la energía emergió como una ley universal de la Naturaleza.

Este capítulo se enfoca en algunos de los procesos de transferencia de energía entre un sistema y sus entornos.

11.1 Calor y energía interna

Se debe realizar una distinción entre calor y energía interna. Estos términos no son intercambiables: calor, involucra una *transferencia* de energía interna de un lugar a otro. La siguiente definición formal hará la distinción precisa.

Energía interna U es la energía asociada con los átomos y las moléculas del sistema. La energía interna incluye a las energías cinética y potencial, asociadas con los movimientos de traslación, rotación y vibratorio que se presentan de manera aleatoria por las partículas que forman el sistema y cualquier energía potencial que generen los enlaces manteniendo a las partículas unidas.

En el capítulo 10 se demostró que la energía interna de un gas ideal monoatómico se encuentra asociada con el movimiento traslacional de sus átomos. En este caso especial, la energía interna es la energía cinética traslacional total de los átomos; entre mayor sea la temperatura del gas, mayores serán la energía cinética de los átomos y la energía interna del gas. Para gases diatómicos y poliatómicos más complejos, la energía interna incluye otras formas de energía molecular, como la energía cinética rotatoria y las energías cinética y potencial asociadas con vibraciones moleculares. La energía interna se encuentra asociada también con la energía potencial intermolecular (energía de enlace) entre moléculas en un líquido o de un sólido.

El calor fue presentado en el capítulo 5 como un método posible de transferencia de energía entre un sistema y su entorno; aquí, se da la siguiente definición formal:

Calor es la transferencia de energía entre un sistema y su entorno, debido a una diferencia de temperatura entre ellos.

El símbolo Q es utilizado para representar la cantidad de energía transferida por calor entre un sistema y su entorno. De tal manera se usará frecuentemente la frase “La energía Q transferida a un sistema...” en lugar de “la energía Q transferida por calor al sistema...”.

Si un sartén con agua es calentado en la parrilla de una estufa, es incorrecto decir que hay más calor en el agua. Calor es la *transferencia* de energía térmica, así como el trabajo es la transferencia de energía mecánica. Cuando un objeto es empujado, no existe más trabajo; más bien, existe más energía mecánica transferida *por* trabajo. De manera similar, el sartén con agua, tiene mayor energía térmica transferida por calor.

Unidades de calor

Inicialmente en el desarrollo de la termodinámica, antes de que los científicos se percataran de la conexión entre la termodinámica y la mecánica, el calor era definido en términos de los cambios de temperatura generados en un objeto, y una unidad separada de energía fue utilizada para el calor, la **caloría**. La caloría (cal) es definida como **la energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14.5 a 15.5 °C**. (La “Caloría”, con “C” mayúscula, utilizada para describir el contenido energético de los alimentos, es en realidad una kilocaloría.) De igual manera, la unidad de calor en el sistema tradicional en Estados Unidos, la **unidad térmica inglesa** (Btu), fue definida como **la energía requerida para aumentar la temperatura de 1 lb de agua de 63 a 64 °F**.

En 1948 los científicos acordaron que debido a que el calor (como el trabajo) es una medida de la transferencia de energía, su unidad SI debería ser el joule. La caloría ahora es definida exactamente como 4.186 J:

$$1 \text{ cal} \equiv 4.186 \text{ J} \quad [11.1]$$

Esta definición no hace referencia al incremento de temperatura del agua. La caloría es una unidad de energía general, incluida aquí por razones históricas, aunque será poco utilizada. La definición en la ecuación 11.1 es conocida, desde el punto de vista histórico antes discutido, como el **equivalente mecánico de calors**.

◀ Energía Interna



Con el permiso del Presidente y el consejo de la Real Sociedad.

James Prescott Joule Físico británico (1818-1889)

Joule recibió alguna educación formal en matemáticas, filosofía y química por John Dalton, pero en gran parte fue autodidacta. El periodo de investigación más activo de Joule, de 1837 a 1847, llevó al establecimiento del principio de conservación de energía y la relación con el calor y otras formas de transferencia de energía. Su estudio de la relación cuantitativa entre los efectos del calor, eléctricos, mecánicos y químicos, culminó en su publicación en 1843 de la cantidad de trabajo requerido para producir una unidad de energía interna.

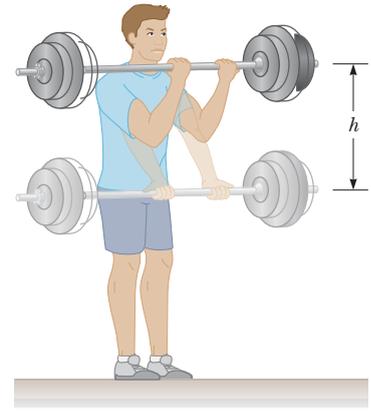
◀ Definición de caloría

◀ El equivalente mecánico de calor

EJEMPLO 11.1 Quemando las calorías del desayuno **BIO****OBJETIVO** Relacionar la energía calorífica con la energía mecánica.

PROBLEMA Un estudiante come un desayuno que consiste en dos platos de cereal con leche, conteniendo un total de 3.20×10^2 calorías de energía. Él desea hacer una cantidad de trabajo equivalente, realizando levantamientos de pesas de 25.0 kg en el gimnasio (figura 11.1). ¿Cuántas veces debe levantar las pesas para gastar esa cantidad de energía? Suponga que cada vez que el estudiante levanta las pesas, realiza un desplazamiento vertical de 0.400 m, la distancia desde sus rodillas a su cuello.

ESTRATEGIA Convierta la energía de Calorías a joules, después compare esa energía con el trabajo necesario para hacer n repeticiones del levantamiento de pesas. El trabajo realizado puede ser encontrado con el teorema de trabajo-energía y el cambio en la energía potencial de la barra. Él realiza trabajo negativo en la barra cuando ésta va hacia abajo, manteniéndolo para poder volver a subirla. El trabajo neto durante una repetición es cero, pero sus músculos gastan la misma energía tanto en subir como en bajar.

**Figura 11.1** (Ejemplo 11.1)**SOLUCIÓN**Convierta las calorías del desayuno, E , a joules:

$$E = (3.20 \times 10^2 \text{ Cal}) \left(\frac{1.00 \times 10^3 \text{ cal}}{1.00 \text{ Cal}} \right) \left(\frac{4.186 \text{ J}}{\text{cal}} \right) \\ = 1.34 \times 10^6 \text{ J}$$

Utilice el teorema de trabajo-energía para encontrar el trabajo necesario para levantar la barra a su máximo peso:

$$W = \Delta EC + \Delta EP = (0 - 0) + (mgh - 0) = mgh$$

El estudiante debe gastar la misma cantidad de energía al bajar la barra, realizando $2mgh$ por repetición. Multiplique esta cantidad por n repeticiones e igualelo a la energía del alimento E :

$$n(2mgh) = E$$

Sustituya la energía del alimento por E y resuelva para n :

$$n = \frac{E}{2mgh} = \frac{1.34 \times 10^6 \text{ J}}{2(25.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(0.400 \text{ m})} \\ = 6.84 \times 10^3 \text{ veces}$$

COMENTARIOS ¡Si el estudiante realiza una repetición cada 5 segundos, le tomaría 9.5 horas para quemar el desayuno! El cuerpo es ineficiente en realizar trabajo, sin embargo, en el ejercicio, una gran fracción de energía se pierde a través de calor. Esta transferencia de energía reduce dramáticamente el requerimiento de ejercicio por lo menos tres cuartos, un poco más de dos horas. ¡De cualquier modo, sería mejor privarse de ese segundo plato de cereal!

PREGUNTA 11.1 Desde el punto de vista de los físicos ¿la respuesta depende de qué tan rápidas se realizan las repeticiones? ¿De qué manera las repeticiones realizadas a mayor velocidad afectan el metabolismo humano?

EJERCICIO 11.1 ¿Cuántas carreras cortas a partir del reposo hasta una velocidad de 5.0 m/s, tendría que correr una mujer de 65 kg para completar la quema de 5.0×10^2 Calorías? (Suponga el 100% de eficiencia en convertir la energía proveniente de los alimentos en energía mecánica.)

RESPUESTA 2.6×10^3 carreras**BIO APLICACIÓN**

Fisiología del ejercicio

Realizar ejercicio de manera apropiada, es una parte importante para mantenerse saludable y mantener el peso adecuado. Como se observó en el ejemplo anterior, el cuerpo gasta energía cuando realiza trabajo mecánico, y esta pérdida es aumentada por la ineficiencia de convertir las reservas internas de energía del cuerpo en trabajo útil, con tres cuartos o más de calor dejado en el cuerpo. Además, el ejercicio tiende a elevar el rango metabólico del cuerpo, el cual persiste incluso después de terminado el ejercicio. El aumento del rango metabólico debido al ejercicio, más que el ejercicio mismo, es útil para la reducción de peso.

11.2 Calor específico

La definición histórica de la caloría es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de un gramo de una sustancia específica (agua) en un grado. La cantidad es 4.186 J. Aumentar la temperatura de un kilogramo de agua en 1°C requiere 4186 J de energía. La cantidad de energía requerida para elevar la temperatura en 1°C de un kilogramo de una sustancia arbitraria varía dependiendo de la sustancia. Por ejemplo, la energía requerida para elevar la temperatura en 1.0°C de un kilogramo de cobre es de 387 J. Toda sustancia requiere una cantidad única de energía por unidad de masa para cambiar la temperatura de dicha sustancia en 1.0°C.

Si una cantidad de energía Q es transferida a una sustancia de masa m , con lo que cambia su temperatura en $\Delta T = T_f - T_i$, el **calor específico** c de la sustancia se define como

$$c \equiv \frac{Q}{m\Delta T} \quad [11.2]$$

Unidades SI: joule por kilogramo-grado Celsius ($\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

La tabla 11.1 enlista los calores específicos para varias sustancias. A partir de la definición de caloría, el calor específico del agua es $4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. Los valores citados son típicos, pero varían dependiendo de la temperatura y si el estado de la materia es sólido, líquido o gaseoso.

Partiendo de la definición de calor específico, se puede expresar la energía Q necesaria para incrementar la temperatura de un sistema de masa m por ΔT como:

$$Q = mc\Delta T \quad [11.3]$$

La energía requerida para elevar la temperatura de 0.500 kg de agua en 3.00°C, por ejemplo, es $Q = (0.500 \text{ kg})(4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(3.00^\circ\text{C}) = 6.28 \times 10^3 \text{ J}$. Note que cuando la temperatura aumenta, ΔT y Q son *positivas*, correspondiendo a la energía que fluye *dentro* del sistema. Cuando la temperatura disminuye, ΔT y Q son *negativas*, correspondiendo a la energía que fluye *fuera* del sistema.

La tabla 11.1 muestra que el agua tiene el calor específico más alto comparado con otras sustancias comunes. Este alto calor específico es responsable de las temperaturas moderadas localizadas en regiones cercanas a grandes cuerpos de agua. Conforme la temperatura de un cuerpo de agua disminuye durante el invierno, el agua transfiere la energía hacia el aire, el cual transporta la energía hacia la tierra cuando los vientos predominantes se dirigen hacia ésta. En las afueras de la costa oeste de Estados Unidos, la energía liberada por el Océano Pacífico, es transportada al este, manteniendo las áreas costeras más calientes de lo que deberían ser. Los inviernos son generalmente más fríos en los estados de la costa este, debido a que los vientos predominantes tienden a llevar la energía lejos de la tierra.

El hecho de que el calor específico del agua es mayor que el calor específico de la arena es la causa del patrón del flujo de aire en la playa. Durante el día, el Sol añade de forma abrupta cantidades iguales de energía a la playa y el mar, pero el calor específico menor de la arena hace que la playa alcance mayores temperaturas que el agua. Como resultado, el aire que se encuentra sobre la tierra alcanza una mayor temperatura que el aire que se encuentra sobre el agua. El aire frío con mayor densidad empuja al aire caliente de menor densidad hacia arriba (debido al principio de Arquímedes), produciendo una brisa desde el océano hacia la tierra durante el día. Debido a que el aire caliente se enfría gradualmente conforme se eleva, éste eventualmente desciende, estableciendo el patrón de circulación mostrado en la figura 11.2.

Un efecto similar produce capas crecientes de aire llamadas *térmicas*, que permite a las águilas elevarse más alto y mantener a los planeadores en el aire por más tiempo. Una corriente térmica se crea cuando una porción de la Tierra alcanza una temperatura más alta que las regiones aledañas. Este fenómeno usualmente sucede en campos cultivados, los cuales son más calentados por el Sol a temperaturas más altas que los campos cercanos que están sombreados por la vegetación. El aire más frío y denso que se encuentra sobre los campos cubiertos por vegetación, empuja al aire en expansión hacia arriba sobre el campo arado, formando una columna térmica.

Tabla 11.1 Calores específicos de algunos materiales a presión atmosférica

Sustancia	$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$
Aluminio	900	0.215
Berilio	1820	0.436
Cadmio	230	0.055
Cobre	387	0.092 4
Alcohol etílico	2430	0.581
Germanio	322	0.077
Vidrio	837	0.200
Oro	129	0.030 8
Tejido humano	3470	0.829
Hielo	2090	0.500
Hierro	448	0.107
Plomo	128	0.030 5
Mercurio	138	0.033
Silicón	703	0.168
Plata	234	0.056
Vapor	2010	0.480
Estaño	227	0.054 2
Agua	4186	1.00

Tip 11.1 Encontrando ΔT

En la ecuación 11.3, asegúrese de recordar que ΔT es siempre la temperatura final menos la temperatura inicial: $\Delta T = T_f - T_i$.

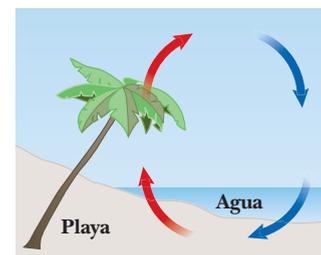


Figura 11.2 Circulación del aire en la playa. En un día caliente, el aire que está sobre la arena se calienta más rápido que el que está sobre el agua fría. El aire más caliente flota hacia arriba debido al principio de Arquímedes, resultando un movimiento del aire más frío hacia la playa.

APLICACIÓN

Brisas marinas y térmicas

Examen rápido

11.1 Suponga que tiene 1 kg de los siguientes materiales: hierro, vidrio y agua, y las tres muestras se encuentran a 10 °C. a) Categorizar las muestras de menor a mayor temperatura después de que 100 J de energía es agregada por calor a cada muestra. b) Categorizarlas de la menor a la mayor cantidad de energía transferida por calor si es transferida la energía suficiente para incrementar la temperatura en 20 °C.

EJEMPLO 11.2 Tensando un puntal

OBJETIVO Usar la ecuación de transferencia de energía en el contexto de la expansión lineal y de la tensión de compresión.

PROBLEMA Un puntal de acero cercano a la caldera de un barco mide 2.00 m de largo, tiene una masa de 1.57 kg y una sección transversal con área de $1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. Durante la operación de la caldera, el puntal absorbe una cantidad neta de energía térmica de $2.50 \times 10^5 \text{ J}$. a) Encuentre el cambio de temperatura en el puntal. b) Encuentre el aumento de longitud del puntal. c) Si el puntal es restringido para expandirse debido a que se encuentra sujeto en los extremos, encuentre la tensión de compresión experimentada en el puntal.

ESTRATEGIA Este problema puede ser resuelto sustituyendo las cantidades dadas en tres ecuaciones distintas.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el cambio de temperatura.

Resuelva la ecuación 11.3 para el cambio de temperatura y sustituya:

$$Q = m_s c_s \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{Q}{m_s c_s}$$

$$\Delta T = \frac{(2.50 \times 10^5 \text{ J})}{(1.57 \text{ kg})(448 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})} = 355^\circ\text{C}$$

b) Encuentre el cambio en la longitud si a éste se le permite expandirse.

Sustituya en la ecuación lineal de expansión:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = (11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})(2.00 \text{ m})(355^\circ\text{C}) = 7.8 \times 10^{-3} \text{ m}$$

c) Encuentre la tensión-compresión en el puntal si no se le permite expandirse.

Sustituya en la ecuación tensión-compresión:

$$\frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L} = (2.00 \times 10^{11} \text{ Pa}) \frac{7.8 \times 10^{-3} \text{ m}}{2.01 \text{ m}} = 7.8 \times 10^8 \text{ Pa}$$

COMENTARIOS Note el uso de 2.01 m en el denominador del último cálculo, es mejor que 2.00 m. Esto es porque, en efecto, el puntal fue comprimido de nuevo a la longitud original de la longitud a la cual se habría expandido (sin embargo la diferencia es insignificante). La respuesta excede la última fuerza compresiva del acero y subraya la importancia de tener en cuenta la expansión térmica. Por supuesto, es probable que el puntal se doblara, relevando algo de la tensión (creado una cierta tensión de deformación en el proceso). Finalmente, si el puntal es unido en ambos extremos por los pernos, la expansión térmica y la contracción ejercerían tensiones escarpadas en los pernos, debilitándolo posiblemente o aflojándolo en un cierto plazo.

PREGUNTA 11.2 ¿Cuáles de las combinaciones siguientes de propiedades darán lugar a la expansión más pequeña

En el inciso a), el cambio de temperatura puede ser calculado sustituyendo en la ecuación 11.3, que relaciona el cambio de temperatura con la energía transferida por calor. En el inciso b), sustituyendo el resultado del inciso a) en la ecuación de expansión lineal da el cambio en longitud. Si ese cambio en longitud falla por mal diseño, como en el inciso c), el resultado es tensión de compresión, encontrado con la ecuación tensión-compresión. *Nota:* El calor específico del acero puede ser tomado como el mismo del hierro.

de una sustancia debido a la absorción de energía térmica? a) calor específico pequeño, coeficiente de expansión grande, b) calor específico pequeño, coeficiente de expansión pequeño, c) calor específico grande, coeficiente de expansión pequeño, d) calor específico grande, coeficiente de expansión grande.

EJERCICIO 11.2 Suponga que el puntal de acero, que tiene un área de sección transversal de $5.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una longitud de 2.50 m, está atornillado entre dos mamparas rígidas en el cuarto de máquinas de un submarino. Suponga que la densidad del acero es la misma que la del hierro. a) Calcule el cambio de temperatura en el puntal si éste absorbe $3.00 \times 10^5 \text{ J}$ de energía térmica. b) Calcule la tensión de compresión en el puntal.

RESPUESTAS a) 68.2°C b) $1.50 \times 10^8 \text{ Pa}$

11.3 Calorimetría

Una técnica para medir el calor específico de un sólido o un líquido es elevar la temperatura de una sustancia a un determinado valor, colocarla dentro de un recipiente con agua fría de masa y temperatura conocida, y medir la temperatura de la combinación después de que se haya alcanzado el equilibrio. Definamos el sistema como la sustancia y el agua. Si se supone que el recipiente es un buen aislante, de manera que la energía no abandone el sistema, se puede asumir que el sistema está aislado. Los recipientes que poseen esta propiedad se denominan **calorímetros**, y el análisis que se lleva a cabo utilizando dichos recipientes se denomina **calorimetría**.

El principio de conservación de la energía para un sistema aislado, requiere que el resultado neto de toda la energía que se transfiere sea cero. Si una parte del sistema pierde energía, otra parte tiene que ganar la energía debido a que el sistema es aislado y la energía no tiene a donde más ir. Cuando un objeto caliente es colocado en el agua fría de un calorímetro, el objeto caliente se vuelve más frío mientras que el agua se vuelve más caliente. Este principio puede ser escrito

$$Q_{\text{frío}} = -Q_{\text{caliente}} \quad [11.4]$$

$Q_{\text{frío}}$ es positivo porque la energía está fluyendo en los objetos fríos, y Q_{caliente} es negativo porque la energía está abandonando el objeto caliente. El signo negativo de la derecha en la ecuación 11.4 asegura que el lado derecho es un número positivo, consistente con el lado izquierdo. La ecuación es válida únicamente cuando el sistema que describe está aislado.

Los problemas en calorimetría involucran la solución de la ecuación 11.4 para una cantidad desconocida, ya sea usualmente el calor específico o una temperatura.

■ EJEMPLO 11.3 Encontrando el calor específico

OBJETIVO Resolver un problema de calorimetría involucrando solamente dos sustancias.

PROBLEMA Un bloque de 125 g de una sustancia desconocida con una temperatura de 90.0°C es colocado en una taza de espuma de poliestireno, que contiene 0.326 kg de agua a 20.0°C . El sistema alcanza una temperatura de equilibrio de 22.4°C . ¿Cuál es el calor específico, c_x , de la sustancia desconocida si se desprecia la capacidad calorífica de la taza?

ESTRATEGIA El agua gana energía térmica $Q_{\text{frío}}$ mientras el bloque pierde energía térmica Q_{caliente} . Utilizando la ecuación 11.3, sustituya las expresiones en la ecuación 11.4 y resuelva para el calor específico, c_x .

SOLUCIÓN

Sea T la temperatura final, y T_w y T_x las temperaturas inicial del agua y del bloque, respectivamente. Aplique las ecuaciones 11.3 y 11.4:

Resuelva para c_x y sustituya los valores numéricos:

$$\begin{aligned} Q_{\text{frío}} &= -Q_{\text{caliente}} \\ m_w c_w (T - T_w) &= -m_x c_x (T - T_x) \\ c_x &= \frac{m_w c_w (T - T_w)}{m_x (T_x - T)} \\ &= \frac{(0.326 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(22.4^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C})}{(0.125 \text{ kg})(90.0^\circ\text{C} - 22.4^\circ\text{C})} \\ c_x &= 388 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \rightarrow 390 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Comparando nuestros resultados con los valores dados en la tabla 11.1, la sustancia desconocida es probablemente cobre. Tenga en cuenta que debido a que el factor $(22.4^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C}) = 2.4^\circ\text{C}$ sólo tiene dos cifras significativas, de manera similar la respuesta final debe ser redondeada a dos cifras, como se indica.

PREGUNTA 11.3 Objetos A , B y C están a diferentes temperaturas. A es la menor y C es la mayor. Los tres objetos se ponen en contacto térmico uno con el otro. Sin hacer cálculos, ¿es posible determinar si el objeto B ganará o perderá energía térmica?

(continúa)

EJERCICIO 11.3 Un bloque de oro de 225 g a 85.0 °C está inmerso en 155 g de agua a 25.0 °C. Encuentre el equilibrio de temperatura, suponiendo el sistema aislado y que la capacidad calorífica de la tasa puede ser despreciada.

RESPUESTA 27.9 °C

Tip 11.2 Celsius frente a Kelvin

En ecuaciones donde aparece T , por ejemplo en la ley de gases ideales, debe usarse la temperatura kelvin. En ecuaciones donde aparece ΔT , como las ecuaciones de calorimetría, es posible usar temperaturas Celsius o kelvin porque un cambio de temperatura es el mismo en ambas escalas. Cuando haya dudas, utilice grados Kelvin.

Mientras no haya más de dos sustancias involucradas, la ecuación 11.4 se puede utilizar para solucionar problemas elementales de calorimetría. A veces, sin embargo, puede haber tres (o más) sustancias que intercambian energía térmica, cada una a diferente temperatura. Si el problema requiere encontrar la temperatura final, puede no estar claro si la sustancia con la temperatura intermedia gana o pierde energía térmica. En tales casos, la ecuación 11.4 no se puede utilizar confiablemente.

Por ejemplo, suponga que deseamos calcular la temperatura final de un sistema que consiste inicialmente en un vaso de vidrio a 25 °C, agua caliente a 40 °C y un bloque de aluminio a 37 °C. Sabemos que, después de que se combinen los tres, el vaso de vidrio se calienta y el agua caliente se enfría, pero no sabemos con seguridad si el bloque de aluminio gana o pierde energía, porque la temperatura final se desconoce.

Afortunadamente, aun podemos resolver el problema mientras se proceda correctamente. Con una temperatura final desconocida, T_f , la expresión $Q = mc(T_f - T_i)$ será positiva si $T_f > T_i$ y negativa si $T_f < T_i$. La ecuación 11.4 puede ser escrita como

$$\sum Q_k = 0 \quad [11.5]$$

donde Q_k es el cambio de energía en el k -ésimo objeto. La ecuación 11.5 dice que la suma de todas las ganancias y pérdidas de energía térmica debe ser cero, en coherencia con la conservación de la energía para un sistema aislado. Cada término en la ecuación 11.5 tendrá el signo correcto automáticamente. Aplicando la ecuación 11.5 para el agua, aluminio y vidrio del problema, se tiene

$$Q_{\text{agua}} + Q_{\text{aluminio}} + Q_{\text{vidrio}} = 0$$

No hay necesidad de decidir por adelantado si una sustancia está ganando o perdiendo energía. Esta ecuación es similar en estilo a la ecuación de la conservación de la energía mecánica, donde las ganancias y las pérdidas de las energías cinética y potencial suman cero para un sistema aislado: $\Delta EC + \Delta EP = 0$. Como se verá, los cambios en la energía térmica pueden ser incluidos en el lado izquierdo de esta ecuación.

Cuando más de dos sustancias intercambian energía térmica, es fácil cometer errores al sustituir números, así que es buena idea construir una tabla para organizar y reunir todos los datos. Esta estrategia se ilustra en el siguiente ejemplo.

■ EJEMPLO 11.4 Calcular una temperatura en equilibrio

OBJETIVO Resolver un problema de calorimetría que involucra tres sustancias a diferentes temperaturas.

PROBLEMA Suponga que 0.400 kg de agua inicialmente a 40.0 °C están vertidos en vaso de vidrio de 0.300 kg que tiene una temperatura de 25.0 °C. Un bloque de 0.500 kg de aluminio a 37.0 °C se pone en el agua y el sistema está aislado. Calcule la temperatura final de equilibrio del sistema.

ESTRATEGIA La transferencia de energía para el agua, el aluminio y el vidrio serán designadas como Q_{agua} , Q_{aluminio} y Q_{vidrio} , respectivamente. La suma de estas transferencias debe ser igual a cero, por la conservación de la energía. Construya una tabla, reúna los tres términos de los datos dados y resuelva para la temperatura final del equilibrio, T .

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación 11.5 al sistema:

$$(1) \quad Q_{\text{agua}} + Q_{\text{aluminio}} + Q_{\text{vidrio}} = 0$$

$$(2) \quad m_{\text{agua}}c_{\text{agua}}(T - T_{\text{agua}}) + m_{\text{aluminio}}c_{\text{aluminio}}(T - T_{\text{aluminio}}) + m_{\text{vidrio}}c_{\text{vidrio}}(T - T_{\text{vidrio}}) = 0$$

Construya una tabla de datos:

Q (J)	m (kg)	c (J/kg · °C)	T_f	T_i
Q_{agua}	0.400	4 190	T	40.0 °C
Q_{aluminio}	0.500	9.00×10^2	T	37.0 °C
Q_{vidrio}	0.300	837	T	25.0 °C

Usando la tabla, sustituya en la ecuación (2):

$$\begin{aligned}
 &(1.68 \times 10^3 \text{ J/}^\circ\text{C})(T - 40.0^\circ\text{C}) \\
 &\quad + (4.50 \times 10^2 \text{ J/}^\circ\text{C})(T - 37.0^\circ\text{C}) \\
 &\quad + (2.51 \times 10^2 \text{ J/}^\circ\text{C})(T - 25.0^\circ\text{C}) = 0 \\
 &(1.68 \times 10^3 \text{ J/}^\circ\text{C} + 4.50 \times 10^2 \text{ J/}^\circ\text{C} + 2.51 \times 10^2 \text{ J/}^\circ\text{C})T \\
 &\quad = 9.01 \times 10^4 \text{ J} \\
 &T = \mathbf{37.9^\circ\text{C}}
 \end{aligned}$$

COMENTARIOS La respuesta resultó estar muy cerca de la temperatura inicial del aluminio, así que habría sido imposible conjeturar por adelantado si el aluminio perdería o ganaría energía. Note que la manera en que la tabla fue organizada, refleja el orden de factores en diversos términos. Este tipo de ayudas de organización previene errores de sustitución, que son muy comunes en estos problemas.

PREGUNTA 11.4 Suponga que la energía térmica Q escapa del sistema. ¿Cómo debe ajustarse el lado derecho de la ecuación (1)? a) No necesita cambio, b) $+ Q$, c) $-Q$.

EJERCICIO 11.4 Una barra del oro de 20.0 kg a 35.0 °C se pone en un envase de vidrio grande, en un contenedor aislado de 0.800 kg a 15.0 °C y 2.00 kg de agua a 25.0 °C. Calcule la temperatura final del equilibrio.

RESPUESTA 26.6 °C

11.4 Calor latente y cambio de fase

Una sustancia experimenta a veces un cambio de temperatura cuando se transfiere energía entre ella y su entorno. En algunas situaciones, sin embargo, la transferencia de energía no da lugar a un cambio de temperatura. Esto puede ocurrir cuando las características físicas de la sustancia cambian de una forma a otra, lo que se conoce como **cambio de fase**. Algunos cambios de fase comunes son de sólido a líquido (fusión), de líquido a gas (ebullición) y un cambio de estructura cristalina de un sólido. En todos esos cambios de fase aparece un cambio de energía interna, pero *no de temperatura*.

La energía Q necesaria para cambiar la fase de una sustancia pura es

$$Q = \pm mL \quad [11.6]$$

donde L es el llamado **calor latente** de la sustancia y depende de la naturaleza de la fase de cambio así como de la sustancia.

La unidad de calor latente es el joule por kilogramo (J/kg). La palabra *latente* significa “escondido dentro de una persona o cosa”. El signo positivo en la ecuación 11.6 se elige cuando la energía es absorbida por una sustancia, como cuando el hielo se derrite. El signo negativo se elige cuando la energía es removida de una sustancia, como cuando el vapor se condensa en agua.

El **calor latente de fusión** L_f se utiliza cuando un cambio de fase ocurre durante una fusión o un congelamiento, mientras que el **calor latente de evaporación** L_v se utiliza cuando un cambio de fase ocurre durante la ebullición o la condensación¹. Por ejemplo, el calor latente de fusión del agua a presión atmosférica es de 3.33×10^5 J/kg y el calor latente

◀ Calor latente

Tip 11.3 Los signos son críticos

Para cambio de fase debe usarse el signo explícito correcto de la ecuación 11.6; positivo si usted está agregando energía a la sustancia, y negativa si le está quitando.

¹Cuando un gas se enfría, con el tiempo vuelve a la fase líquida, o *se condensa*. La energía por unidad de masa dada durante el proceso se llama *calor de condensación* y es igual al calor de evaporación. Cuando un líquido se enfría, con el tiempo se solidifica y el *calor de solidificación* es igual al calor de fusión.

Tabla 11.2 Calores latentes de fusión y evaporación

Sustancia	Punto de fusión (°C)	Calor latente de fusión		Punto de ebullición	Calor latente de vaporización	
		(J/kg)	cal/g		(J/kg)	cal/g
Helio	-269.65	5.23×10^3	1.25	-268.93	2.09×10^4	4.99
Nitrógeno	-209.97	2.55×10^4	6.09	-195.81	2.01×10^5	48.0
Oxígeno	-218.79	1.38×10^4	3.30	-182.97	2.13×10^5	50.9
Alcohol etílico	-114	1.04×10^5	24.9	78	8.54×10^5	204
Agua	0.00	3.33×10^5	79.7	100.00	2.26×10^6	540
Azufre	119	3.81×10^4	9.10	444.60	3.26×10^5	77.9
Plomo	327.3	2.45×10^4	5.85	1 750	8.70×10^5	208
Aluminio	660	3.97×10^5	94.8	2 450	1.14×10^7	2 720
Plata	960.80	8.82×10^4	21.1	2 193	2.33×10^6	558
Oro	1063.00	6.44×10^4	15.4	2 660	1.58×10^6	377
Cobre	1083	1.34×10^5	32.0	1 187	5.06×10^6	1 210

de la evaporación para el agua es 2.26×10^6 J/kg. Los calores latentes para diferentes sustancias varían considerablemente, como puede verse en la tabla 11.2.

Otro proceso, la sublimación, es el paso del sólido a la fase gaseosa sin pasar con una fase líquida. El humo del hielo seco (dióxido del carbono congelado) ilustra este proceso, que tiene su propio calor latente asociado a él, el calor de sublimación.

Para entender mejor la física de los cambios de fase, considere agregar energía a un cubo de 1.00 g de hielo a -30.0°C en un recipiente que se mantiene a presión constante. Suponga que esta energía se utiliza para convertir el hielo en vapor (vapor de agua) a 120.0°C . La figura 11.3 es un diagrama que indica la medición experimental de temperatura cuando se agrega energía al sistema. Examinemos cada parte de la curva por separado.

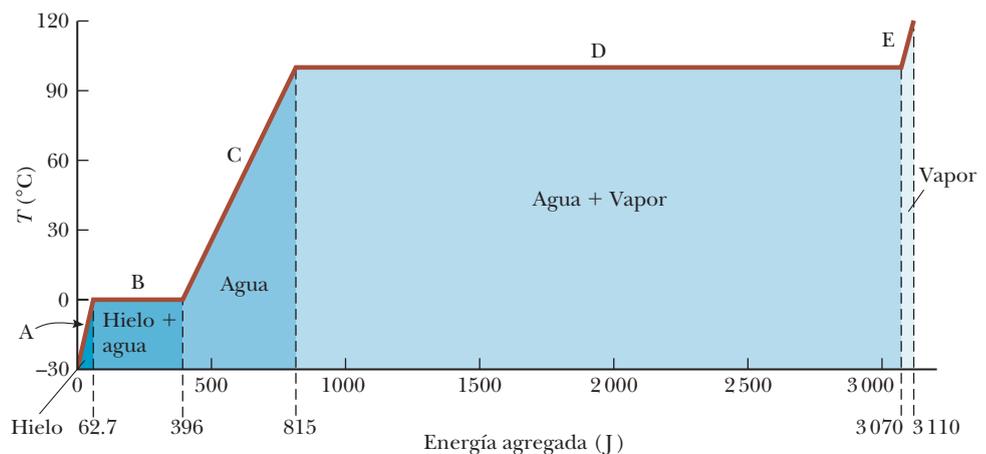
Parte A Durante esta parte de la curva, la temperatura del hielo cambia de -30.0 a 0.0°C . Como el calor específico del hielo es 2090 J/kg \cdot $^\circ\text{C}$, se puede calcular la cantidad de energía agregada, utilizando la ecuación 11.3:

$$Q = mc_{\text{hielo}} \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2090 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(30.0^\circ\text{C}) = 62.7 \text{ J}$$

Parte B Cuando el hielo alcanza 0°C , la mezcla hielo-agua permanece en esta temperatura uniforme aunque se agregue energía, hasta que todo el hielo se derrite para convertirse en agua a 0°C . Según la ecuación 11.6, la energía requerida para derretir 1.00 g del hielo a 0°C es

$$Q = mL_f = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}) = 333 \text{ J}$$

Figura 11.3 Gráfica de temperatura en relación con la energía agregada cuando 1.00 g de hielo, inicialmente a -30.0°C , se convierte en vapor a 120°C .



Parte C Entre 0 y 100 °C, ningún cambio de fase ocurre. La energía agregada al agua sólo sirve para aumentar su temperatura, como en la parte A. La cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 0 a 100 °C es

$$Q = mc_{\text{agua}} \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(4.19 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(1.00 \times 10^2 \text{ } ^\circ\text{C})$$

$$Q = 4.19 \times 10^2 \text{ J}$$

Parte D A 100 °C, ocurre otro cambio de fase cuando el agua cambia a vapor a 100 °C. Como en la parte B, la mezcla agua-vapor permanece a temperatura constante, esta vez a 100 °C, aunque se agregue energía, hasta que todo el líquido se haya convertido en vapor. La energía requerida para convertir 1.00 g del agua a vapor a 100 °C es

$$Q = mL_v = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}) = 2.26 \times 10^3 \text{ J}$$

Parte E Durante esta parte de la curva, como en las partes A y C, no ocurre cambio de fase, de modo que toda la energía agregada sirve para aumentar la temperatura del vapor. La energía que debe agregarse para elevar la temperatura del vapor a 120 °C es:

$$Q = mc_{\text{vapor}} \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2.01 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(20.0 \text{ } ^\circ\text{C}) = 40.2 \text{ J}$$

La cantidad de energía que debe agregarse para cambiar 1.00 g de hielo de -30.0°C a vapor a 120.0°C es la suma de los resultados de las cinco partes de la curva, $3.11 \times 10^3 \text{ J}$. Recíprocamente, para enfriar 1.00 g de vapor a 120.0°C , hasta el punto en que tengamos hielo a -30.0°C , debemos quitarle $3.11 \times 10^3 \text{ J}$ de energía.

Los cambios de fase se pueden describir en términos de reacomodamiento de las moléculas cuando se agrega o se quita energía a una sustancia. Considere primero el cambio de fase de líquido a gas. Las moléculas de un líquido están muy cercanas entre sí, y las fuerzas entre ellas son más fuertes que las existentes entre moléculas más separadas unas de otras, como ocurre en un gas. Por lo tanto, para separar las moléculas debe realizarse trabajo en el líquido contra esas fuerzas moleculares de atracción. El calor latente de evaporación es la cantidad de energía que debe agregarse a un kilogramo de líquido para lograr esta separación.

De la misma manera, en el punto de fusión de un sólido, imaginamos que la amplitud de vibración de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio se hace suficientemente grande para permitir que los átomos pasen las barreras de los átomos adyacentes y se muevan a sus nuevas posiciones. Estas nuevas posiciones son, en promedio, menos simétricas y, por lo tanto, tienen energía más elevada. El calor latente de fusión es igual al trabajo necesario a nivel molecular para transformar la masa de la fase sólida ordenada en la fase líquida desordenada.

La distancia promedio entre átomos es mucho mayor en la fase gaseosa que en la fase líquida o sólida. Cada átomo o molécula se mueve respecto de sus vecinos, sin la compensación de fuerzas de atracción de nuevos vecinos. Por lo tanto, se requiere más trabajo a nivel molecular para evaporar una masa dada de sustancia que para derretirla; así que, el calor latente de evaporación es mucho mayor que el calor latente de fusión. (Veáse la tabla 11.2)

■ Examen rápido

11.2 Calcule las pendientes en las partes A, C y E de la figura 11.3. Ordene las pendientes de menor a mayor y explique lo que esto significa. a) A, C, E. b) C, A, E. c) E, A, C. d) E, C, A.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Calorimetría con cambios de fase

1. **Haga una tabla con todos los datos.** Elija renglones separados para las diferentes fases y para cualquier transición entre fases. Elija columnas para cada cantidad utilizada, así como una columna final para la combinación de las cantidades. La transferencia

de energía térmica en esta última columna está dada por $Q = mc \Delta T$, mientras que los cambios de fase están dados por $Q = \pm mL_f$ para cambios entre líquido y sólido, y por $Q = \pm mL_v$ para cambios entre líquido y gas.

- Aplique la conservación de la energía.** Si el sistema está aislado, utilice $\Sigma Q_k = 0$ (ecuación 11.5). Para un sistema no aislado, el cambio de energía neto, debe reemplazarse el cero del lado derecho de la ecuación. Aquí, ΣQ_k es justamente la suma de todos los términos de la última columna de la tabla.
- Resuelva** para la cantidad desconocida.

■ EJEMPLO 11.5 Agua helada

OBJETIVO Resolver un problema que involucra transferencia de calor y cambio de fase de sólido a líquido.

PROBLEMA En una fiesta, 6.00 kg de hielo a -5.00°C se agregan a un refrigerador que contiene 30 litros de agua a 20.0°C . ¿Cuál es la temperatura del agua cuando se llega al equilibrio?

ESTRATEGIA En este problema, lo mejor es hacer una tabla. Con el agregado de energía térmica Q_{hielo} , el hielo se calienta a 0°C , después se derrite a 0°C con el agregado de energía $Q_{\text{derretido}}$. Enseguida, el hielo derretido se calentará a una cierta temperatura final T por absorción de energía $Q_{\text{hielo-agua}}$ obtenida del cambio de energía del agua líquida original, Q_{agua} . Por conservación de la energía, la suma de estas cantidades debe ser cero.

SOLUCIÓN

Calcule la masa del agua líquida:

$$\begin{aligned} m_{\text{agua}} &= \rho_{\text{agua}} V \\ &= (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(30.0 \text{ L}) \frac{1.00 \text{ m}^3}{1.00 \times 10^3 \text{ L}} \\ &= 30.0 \text{ kg} \end{aligned}$$

Escriba la ecuación de equilibrio térmico:

$$(1) \quad Q_{\text{hielo}} + Q_{\text{derretido}} + Q_{\text{hielo-agua}} + Q_{\text{agua}} = 0$$

Construya una tabla:

Q	m (kg)	c (J/kg · °C)	L (J/kg)	T_f (°C)	T_i (°C)	Expresión
Q_{hielo}	6.00	2 090		0	-5.00	$m_{\text{hielo}} c_{\text{hielo}} (T_f - T_i)$
$Q_{\text{derretido}}$	6.00		3.33×10^5	0	0	$m_{\text{hielo}} L_f$
$Q_{\text{hielo-agua}}$	6.00	4 190		T	0	$m_{\text{hielo}} c_{\text{agua}} (T_f - T_i)$
Q_{agua}	30.0	4 190		T	20.0	$m_{\text{agua}} c_{\text{agua}} (T_f - T_i)$

Sustituya todas las cantidades de la segunda a la sexta columnas en la última columna y sume, lo que será la evaluación de la ecuación (1), y resuelva para T :

$$\begin{aligned} &6.27 \times 10^4 \text{ J} + 2.00 \times 10^6 \text{ J} \\ &\quad + (2.51 \times 10^4 \text{ J/}^\circ\text{C})(T - 0^\circ\text{C}) \\ &\quad + (1.26 \times 10^5 \text{ J/}^\circ\text{C})(T - 20.0^\circ\text{C}) = 0 \\ T &= \mathbf{3.03^\circ\text{C}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Hacer la tabla es opcional. Sin embargo, los errores en la simple sustitución son frecuentes y la tabla ayuda a que los errores sean menos probables.

PREGUNTA 11.5 ¿Puede un sistema cerrado que contiene diferentes sustancias a diferentes temperaturas iniciales, alcanzar un equilibrio de temperatura que sea menor que todas las temperaturas iniciales?

EJERCICIO 11.5 ¿Qué masa de hielo a -10.0°C es necesaria para refrescar el tanque de agua de una ballena, que contiene $1.20 \times 10^3 \text{ m}^3$ de agua, de 20.0°C a una más confortable de 10.0°C ?

RESPUESTA $1.27 \times 10^5 \text{ kg}$

■ EJEMPLO 11.6 Fusión parcial

OBJETIVO Comprender cómo manejar un cambio de fase incompleto.

PROBLEMA Un bloque de 5.00 kg de hielo a 0°C se agrega a un contenedor parcialmente lleno con 10.0 kg de agua a 15.0°C . a) Encuentre la temperatura final, despreciando la capacidad calorífica del contenedor. b) Encuentre la masa del hielo derretido.

ESTRATEGIA El inciso a) es difícil porque el hielo no está completamente derretido en este ejemplo. Cuando hay cualquier duda concerniente al completo cambio de fase, son necesarios algunos cálculos previos. Primero, encuentre la energía total requerida para derretir el hielo, $Q_{\text{derretida}}$, y después encuentre Q_{agua} , la energía máxima que puede

ser liberada por el agua, por debajo de 0°C . Si la energía liberada por el agua es suficientemente alta, todo el hielo se derrite. Si no es así, hay usualmente una mezcla final de hielo y agua a 0°C , a menos que el hielo empiece de una temperatura por debajo de 0°C , en cuyo caso toda el agua líquida se congela.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el equilibrio de temperatura.

Primero, calcule la cantidad de energía necesaria para derretir completamente el hielo:

$$Q_{\text{derretida}} = m_{\text{hielo}}L_f = (5.00 \text{ kg})(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ = 1.67 \times 10^6 \text{ J}$$

Enseguida, calcule la energía máxima que puede perderse por la masa inicial del agua líquida sin congelarse:

$$Q_{\text{agua}} = m_{\text{agua}}c\Delta T \\ = (10.0 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(0^\circ\text{C} - 15.0^\circ\text{C}) \\ = -6.29 \times 10^5 \text{ J}$$

Este resultado es menor que la mitad de la energía necesaria para derretir todo el hielo, así que el estado final del sistema es una mezcla de agua y hielo al punto de congelación:

$$T = 0^\circ\text{C}$$

b) Calcule la masa de hielo derretido.

Iguale la energía total disponible al calor de fusión de m gramos de hielo, mL_f , y resuelva para m :

$$6.29 \times 10^5 \text{ J} = mL_f = m(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}) \\ m = 1.89 \text{ kg}$$

COMENTARIOS Si este problema se resuelve suponiendo (erróneamente) que todo el hielo se derrite, se obtiene una temperatura final de $T = -16.5^\circ\text{C}$. El único modo en que esto puede pasar es que el sistema no fuera aislado, contrariamente a lo que se afirma en el problema. En el ejercicio 11.6, se debe calcular la energía térmica necesaria para calcular el hielo al punto de derretimiento.

PREGUNTA 11.6 ¿Qué efecto debe tenerse para doblar la cantidad inicial de agua líquida en la cantidad de hielo derretido?

EJERCICIO 11.6 Si 8.00 kg de hielo a -5.00°C se agregan a 12 kg de agua a 20.0°C , calcule la temperatura final. ¿Cuánto hielo queda, si es que queda algo?

RESPUESTA $T = 0^\circ\text{C}$, 5.23 kg

Algunas veces los problemas involucran cambios en la energía mecánica. Durante una colisión, por ejemplo, una cierta energía cinética se puede transformar en energía interna de los objetos que chocan. Esta clase de transformación se ilustra en el ejemplo 11.7, que implica un posible impacto de un cometa en la Tierra. En este ejemplo, un gran número de grados de libertad no serán considerados para estimar la magnitud de la energía destructiva de un acontecimiento tan catastrófico. El calor específico depende de la temperatura y de la presión, por ejemplo, pero para el caso, esto será ignorado. Del mismo modo, la ley de los gases ideales no se aplicará en las temperaturas y las presiones que atañen al caso, y el resultado de la colisión podría no ser vapor sobrecalentado, sino un plasma de partículas cargadas. A pesar de todas estas simplificaciones, el ejemplo aporta buenos resultados en orden de magnitud.

■ EJEMPLO 11.7 ¡Armagedón!

OBJETIVO Vincular la energía mecánica con la energía térmica, cambio de fase y la ley de los gases ideales para hacer una estimación.

PROBLEMA Un cometa de medio kilómetro de radio compuesto de hielo a 273 K, golpea la Tierra a una velocidad de $4.00 \times 10^4 \text{ m/s}$. Por simplicidad, suponga que toda la energía cinética se convierte en energía térmica en el impacto y

que toda la energía térmica calienta al cometa. **a)** Calcule el volumen y la masa de hielo. **b)** Utilice la conservación de la energía para encontrar la temperatura final del material del cometa. Suponga, contrario al hecho, que el resultado es

(continúa)

vapor supercalentado y que el calor específico usual son válidos aunque, de hecho, ambos dependen de la presión y de la temperatura. c) Suponiendo que el vapor conserva una forma esférica y que tiene el mismo volumen inicial que el cometa, calcule la presión del vapor utilizando la ley de los gases ideales. Esta ley realmente no se aplica a un sistema a tan altas presiones y temperaturas, pero puede usarse para hacer una estimación.

ESTRATEGIA El inciso a) requiere de la fórmula para el volumen de una esfera y de la definición de densidad. En el inciso b) se debe aplicar la conservación de la energía. Hay

SOLUCIÓN

a) Encuentre el volumen y la masa del hielo.

Aplique la fórmula del volumen de una esfera:

Aplique la fórmula de la densidad para encontrar la masa del hielo:

b) Encuentre la temperatura final del material del cometa.

Utilice la conservación de la energía:

Los primeros tres términos son despreciables en comparación con la energía cinética. El término vapor, involucra la temperatura final desconocida, así que se queda con ella y con la energía cinética por lo que, cancelando la masa y resolviendo para T :

c) Estime la presión del gas, utilizando la ley de los gases ideales.

Primero, calcule el número de moles del vapor:

Resuelva para la presión, utilizando $PV = nRT$:

COMENTARIOS ¡La presión estimada es varios cientos de veces mayor que la tensión de deformación del acero! Esta región de alta presión se expandiría rápidamente, destruyendo todo dentro de un radio muy grande. Los incendios ocurrirían en regiones de tamaños continentales, y las ondas de las marejadas se expandirían por todo el mundo barriendo todas las zonas costeras. El Sol se oscurecería al menos por una década, y numerosas especies, posiblemente incluido el *Homo Sapiens*, se extinguirían. Tales eventos de extinción son raros pero, a largo plazo, representan un riesgo para la vida en la Tierra.

PREGUNTA 11.7 ¿Por qué un asteroide de níquel y hierro sería más peligroso que un asteroide del mismo tamaño hecho principalmente de hielo?

cuatro procesos involucrados: (1) el derretimiento del hielo, (2) el calentamiento del agua helada hasta el punto de ebullición, (3) la conversión de agua en ebullición a vapor y (4) el calentamiento del vapor. La energía necesaria para estos procesos se designará por $Q_{\text{derretida}}$, Q_{agua} , Q_{vapor} y Q_{steam} , respectivamente. Estas cantidades más el cambio de energía cinética ΔC suman cero porque se suponen internos al sistema. En este caso, los primeros Q 's pueden ser despreciablemente comparados con el (muy grande) término de energía cinética. Resolver para la temperatura desconocida y sustituir en la ley de los gases ideales de el inciso c).

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} (3.14)(5.00 \times 10^2 \text{ m})^3$$

$$= 5.23 \times 10^8 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V = (917 \text{ kg/m}^3)(5.23 \times 10^8 \text{ m}^3)$$

$$= 4.80 \times 10^{11} \text{ kg}$$

$$(1) \quad Q_{\text{derretida}} + Q_{\text{agua}} + Q_{\text{vapor}} + Q_{\text{steam}} + \Delta C = 0$$

$$(2) \quad mL_f + mc_{\text{agua}}\Delta T_{\text{agua}} + mL_v + mc_{\text{steam}}\Delta T_{\text{steam}} + (0 - \frac{1}{2}mv^2) = 0$$

$$mc_{\text{steam}}(T - 373 \text{ K}) - \frac{1}{2}mv^2 = 0$$

$$T = \frac{\frac{1}{2}v^2}{c_{\text{steam}}} + 373 \text{ K} = \frac{\frac{1}{2}(4.00 \times 10^4 \text{ m/s})^2}{2010 \text{ J/kg} \cdot \text{K}} + 373 \text{ K}$$

$$T = 3.98 \times 10^5 \text{ K}$$

$$n = (4.80 \times 10^{11} \text{ kg}) \left(\frac{1 \text{ mol}}{0.018 \text{ kg}} \right) = 2.67 \times 10^{13} \text{ mol}$$

$$P = \frac{nRT}{V}$$

$$= \frac{(2.67 \times 10^{13} \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(3.98 \times 10^5 \text{ K})}{5.23 \times 10^8 \text{ m}^3}$$

$$P = 1.69 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

EJERCICIO 11.7 Suponga que una bala de plomo con masa 5.00 g y una temperatura inicial de 65.0 °C golpea una pared y que se licua totalmente. ¿Qué rapidez mínima tendrá antes del impacto? (*Sugerencia:* La rapidez mínima corresponde al caso en el que toda la energía cinética resulta ser la energía interna del plomo, y la temperatura final del plomo está al punto de derretimiento. ¡No desprecie estos términos aquí!)

RESPUESTA 341 m/s

11.5 Transferencia de energía

Para algunas aplicaciones, es necesario conocer la rapidez con la que se transfiere energía entre un sistema y sus alrededores, así como los mecanismos responsables de la transferencia. Esta información es particularmente importante al impermeabilizar edificios o en usos médicos, tales como el tiempo de supervivencia humana cuando está expuesta a los elementos.

Anteriormente definimos al calor como la transferencia de energía entre un sistema y sus alrededores debido a una diferencia de temperatura entre ellos. En esta sección echamos una mirada más cercana al calor como medio de transferencia de energía y consideramos los procesos de la conducción, de la convección y de la radiación térmicas.

Conducción térmica

El proceso de transferencia de energía que está más claramente relacionado con una diferencia de temperatura se llama **conducción térmica** o simplemente **conducción**. En este proceso, a escala atómica la transferencia puede considerarse como un intercambio de energía cinética entre partículas microscópicas, moléculas, átomos y electrones, donde partículas menos energéticas ganan energía en colisiones con partículas más energéticas. Una cacerola barata, como la de la figura 11.4, puede tener una manija del metal sin aislamiento circundante. Mientras que se calienta la cacerola, la temperatura de la manija de metal aumenta y el cocinero debe sostenerla con un paño para evitar quemarse la mano.

Este fenómeno puede ser entendido si se examina lo que ocurre a las partículas microscópicas del metal. Antes de meter la cacerola en la flama, las partículas microscópicas están vibrando alrededor de sus posiciones de equilibrio. Cuando la cacerola se pone en la cercanía de la flama, las partículas cercanas a ésta empiezan a vibrar con amplitudes cada vez mayores. Luego chocan con sus vecinas y transfieren parte de su energía en las colisiones. Lentamente, los átomos y electrones del metal que están más alejados de la flama aumentan su amplitud de vibración hasta que, por último, resultan afectados los que están cerca de la mano. Esta mayor vibración representa un aumento de la temperatura del metal (y posiblemente una mano quemada).

Aunque la transferencia de energía a través de una sustancia se puede explicar parcialmente por vibraciones atómicas, la velocidad de conducción depende de las propiedades de la sustancia. Por ejemplo, es posible sostener indefinidamente una pieza de asbesto en una flama, lo que implica que el asbesto conduce muy poca energía. En general, los metales son buenos conductores térmicos porque contienen un gran número de electrones que están relativamente libres para moverse por el metal y pueden transportar energía de una región a otra. En un buen conductor, como el cobre, la conducción tiene lugar debido a la vibración de átomos y al movimiento de electrones libres. Materiales como el asbesto, corcho, papel y fibra de vidrio son malos conductores térmicos. Los gases también son malos conductores térmicos debido a la gran distancia entre sus moléculas.

La conducción ocurre sólo si hay diferencia de temperaturas entre dos partes del medio conductor. La diferencia de temperatura induce al flujo de energía. Considere una placa de material de grosor Δx y área de sección transversal A , con sus caras opuestas a diferentes temperaturas T_c y T_h , donde $T_h > T_c$ (figura 11.5). Por conducción térmica, la placa permite que se transfiera energía de la región de más alta temperatura a la de más baja temperatura por conducción térmica. La velocidad de esta transferencia de energía, $P = Q/\Delta t$, es proporcional al área de sección transversal de la placa y la diferencia de temperatura, e inversamente proporcional al grosor de la placa:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Observe que P tiene unidades de watts cuando Q está en joules y Δt en segundos.

Suponga que una sustancia tiene la forma de una varilla larga y uniforme de longitud L , como en la figura 11.6. Suponga también, que la varilla está aislada de manera que no pueda escapar energía por conducción desde su superficie excepto por los extremos. Un extremo está en contacto térmico con un depósito de energía a una temperatura T_c y el otro extremo está en contacto térmico con un depósito a una temperatura $T_h > T_c$. Cuando



Figura 11.4 La conducción hace que la manija de metal de una cacerola de cocina se caliente.

Tip 11.4 Frazadas y abrigos en clima frío

Cuando una persona que duerme bajo una frazada en invierno o en exteriores usa un abrigo grueso; la frazada y el abrigo no son fuentes de energía. Sirven como capa de material con baja conductividad térmica para reducir la transferencia de energía que el cuerpo pierde por calor. El medio aislante básico es el aire atrapado en pequeños sacos que hay dentro del material.

Las caras opuestas están a diferentes temperaturas, con $T_h > T_c$.

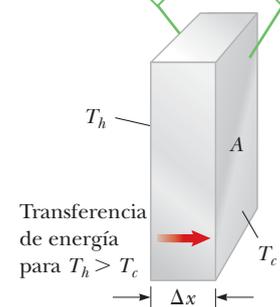


Figura 11.5 Transferencia de energía a través de una placa conductora de área de sección transversal A y de grosor Δx .

Los extremos opuestos de la barra están en contacto térmico con depósitos de energía en diferentes temperaturas.

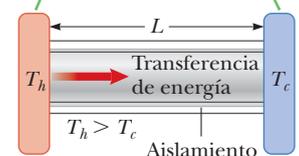


Figura 11.6 La conducción de la energía a través de una barra uniforme, con aislamiento de longitud L .

Tabla 11.3 Conductividades térmicas

Sustancia	Conductividad térmica (J/s · m · °C)
Metales (a 25°C)	
Aluminio	238
Cobre	397
Oro	314
Hierro	79.5
Plomo	34.7
Plata	427
Gases (a 20°C)	
Aire	0.023 4
Helio	0.138
Hidrógeno	0.172
Nitrógeno	0.023 4
Oxígeno	0.023 8
No metales (valores aproximados)	
Asbesto	0.08
Concreto	0.8
Vidrio	0.8
Hielo	2
Cucho	0.2
Agua	0.6
Madera	0.8

se alcanza un estado estacionario, la temperatura de cada punto a lo largo de la varilla es constante en el tiempo. En este caso, $\Delta T = T_h - T_c$ y $\Delta x = L$, de modo que

$$\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_h - T_c}{L}$$

La razón de transferencia de energía por conducción a través de la varilla está dada por la ecuación

$$P = kA \frac{(T_h - T_c)}{L} \quad [11.7]$$

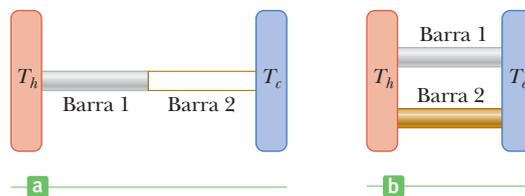
donde k es una constante de proporcionalidad, que depende del material, llamada **conductividad térmica**. Las sustancias que son buenos conductores tienen elevados valores de conductividad térmica, mientras que los buenos aislantes tienen valores bajos de conductividad térmica. La tabla 11.3 es una lista de conductividades térmicas de algunas sustancias.

Examen rápido

11.3 Un cubo de hielo envuelto en una frazada de lana, permanecerá congelado durante a) menos tiempo, b) el mismo tiempo o c) más tiempo que un cubo de hielo idéntico expuesto al aire a temperatura ambiente.

11.4 Dos barras de la misma longitud y diámetro están hechas de diferentes materiales. Las barras conectan dos regiones de diferente temperatura de modo que la energía se transfiere a través de las barras por calor. Pueden estar conectadas en serie, como en la figura 11.7a, o en paralelo, como en la figura 11.7b. ¿En cuál caso está el índice de transferencia de energía por calor más grande? a) Cuando las barras están en serie, b) cuando las barras están en paralelo, c) el índice es igual en ambos casos.

Figura 11.7 (Examen rápido 11.4) ¿En cuál caso se transfiere más rápido la energía?



EJEMPLO 11.8 Las pérdidas conductivas del cuerpo humano BIO

OBJETIVO Aplicar la ecuación de conducción de un ser humano.

PROBLEMA En un ser humano, una capa de grasa y músculo se encuentra debajo de la piel que tiene espesores diferentes en función del lugar. En respuesta a un ambiente frío, los capilares cerca de la superficie del cuerpo se contraen, reduciendo el flujo sanguíneo y por lo tanto la conductividad de los tejidos. Estos tejidos forman un caparazón de hasta una pulgada de espesor con una conductividad térmica de $0.21 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, la misma que la piel o grasa. **a)** Estimar la razón de pérdida de energía térmica debido a la conducción de la región central del cuerpo humano a la superficie de la piel, suponiendo un espesor de la capa de 2.0 cm y una temperatura de la piel de 33.0°C . (La temperatura de la piel varía en función de las condiciones externas.) **b)** Calcule la energía

térmica perdida debido a la conducción en 1.0 h . **c)** Calcule el cambio en la temperatura corporal en 1.0 h si la energía no se repone. Suponga una masa corporal de 75 kg y un área de superficie de la piel 1.73 m^2 .

ESTRATEGIA La solución al inciso a) requiere la aplicación de la ecuación 11.7 para la razón de transferencia de energía debido a la conducción. Multiplicando la potencia hallada en el inciso a) por el tiempo transcurrido se obtiene el total de transferencia de energía térmica en el tiempo dado. En el inciso c), una estimación para el cambio de temperatura si la energía no se repone se puede desarrollar mediante la ecuación 11.3, $Q = mc\Delta T$.

SOLUCIÓN

a) Estime la razón de pérdida de energía térmica debido a la conducción.

Escriba la ecuación de la conductividad térmica:

$$P = \frac{kA(T_h - T_c)}{L}$$

Sustituyendo valores:

$$P = \frac{(0.21 \text{ J/m} \cdot \text{K})(1.73 \text{ m}^2)(37.0^\circ\text{C} - 33.0^\circ\text{C})}{2.0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 73 \text{ W}$$

b) Calcule la energía térmica que ha perdido debido a la conducción en 1.0 h.

Multiplique la potencia P por el tiempo Δt :

$$Q = P\Delta t = (73 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 2.6 \times 10^5 \text{ J}$$

c) Calcule el cambio en la temperatura corporal en 1.0 h si la energía no se repone.

Escriba la ecuación 11.3 y resolver lo de ΔT :

$$Q = mc\Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{2.6 \times 10^5 \text{ J}}{(75 \text{ kg})(3470 \text{ J/kg} \cdot \text{K})} = 1.0^\circ\text{C}$$

OBSERVACIONES En el cálculo no se tiene en cuenta el gradiente térmico, que reduce aún más la razón de conducción a través de la piel. Mientras que la energía térmica se transfiere a través de la conducción de la piel, otros mecanismos eliminan esa energía de la superficie del cuerpo, porque el aire es un mal conductor de la energía térmica. Convección, radiación y la evaporación del sudor son los principales mecanismos que eliminan la energía térmica de la piel. El cálculo muestra que incluso en condiciones suaves el cuerpo constantemente debe reponer su energía interna. Es posible la muerte por exposición, incluso a temperaturas muy por encima de cero grados.

PREGUNTA 11.8 ¿Por qué un corredor de larga distancia requiere de muy poca ropa de abrigo cuando corre en un clima frío, pero se pone un suéter después de terminar la carrera?

EJERCICIO 11.8 BIO Una ballena minke hembra tiene una temperatura corporal de 35°C en sus entrañas y una temperatura de 29°C en la interfaz núcleo/grasa, con un espesor promedio de grasa de 4.0 cm y una conductividad térmica de $0.25 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. a) ¿Qué cantidad de energía es la que se pierde de las entrañas de la ballena por conducción a través de la grasa en agua a 5.0°C ? Suponga una temperatura de la piel de 12°C y una superficie total del cuerpo de 22 m^2 . b) ¿Qué porcentaje del presupuesto diario de energía es este número? (La hembra de la ballena minke requiere en promedio $8.0 \times 10^8 \text{ J}$ de energía por día, eso es una gran cantidad de plancton y krill.)

RESPUESTAS a) $2.3 \times 10^3 \text{ W}$ b) 25%

Aislamiento de casas

Para determinar si es necesario agregar aislamiento a un techo o alguna otra parte de un edificio, sólo tiene que aplicar lo que acaba de afirmar acerca de la conducción, por dos razones:

1. Las propiedades aislantes de los materiales empleados en edificios suelen expresarse en unidades de ingeniería (sistema usual en Estados Unidos) en lugar de unidades en SI. Las medidas estampadas en un paquete de tabla aislante de fibra de vidrio estará en unidades como Btu, pies y grados Fahrenheit.
2. En el tratamiento del aislamiento de un edificio, se debe considerar la conducción a través de una placa compuesta, con cada parte de la placa de diferente grosor y una conductividad térmica específica. Una pared típica de una casa está hecha de varios materiales, tales como paneles de madera, muros secos, aislamientos, entablados y forro de paredes.

La razón de transferencia de energía por conducción a través de una placa compuesta es

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i L_i/k_i} \quad [11.8]$$

donde T_h y T_c son las temperaturas de los *extremos exteriores* de la placa y la suma es sobre todas las partes de la placa. Esta fórmula puede ser obtenida algebraicamente, usando los hechos de que la temperatura en el interfaz entre dos materiales aislantes debe ser el mismo que a través de todos los otros aisladores. Si las lozas consisten en tres distintos materiales, el denominador es la suma de los tres términos. En la práctica de la ingeniería,

Tabla 11.4 Valores R de materiales de construcción comunes

Material	Valor de R^a (pies ² · °F · h/Btu)
Revestimiento de madera (1.0 pulg de espesor)	0.91
Las tejas de madera (recubrimiento)	0.87
Ladrillos (4.0 pulg de espesor)	4.00
Bloques de concreto (núcleos de relleno)	1.93
Espuma de poliestireno (1.0 pulg de espesor)	5.0
De fibra de vidrio de bateo (3.5 pulg de espesor)	10.90
De fibra de vidrio de bateo (6.0 pulg de espesor)	18.80
Fibra de vidrio de placa (1.0 pulg de espesor)	4.35
De fibra de celulosa (1.0 pulg de espesor)	3.70
Vidrio plano (0.125 pulg de espesor)	0.89
Vidrio aislante (de 0.25 pulg en espacio)	1.54
Espacio de aire verticales (3.5 pulg de espesor)	1.01
Capa estancada de aire	0.17
Paneles de yeso (0.50 pulg de grosor)	0.45
Revestimiento (0.50 pulg de espesor)	1.32

^a Los valores de esta tabla se pueden convertir en unidades del SI al multiplicar los valores por 0.1761.



Un trabajador instala aislamiento de fibra de vidrio en un hogar. La máscara protege al trabajador contra la inhalación de fibras microscópicas, que podrían ser peligrosas a su salud.

el término L/k para una sustancia particular se refiere como el valor R del material, así que la ecuación 11.8 reduce a

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i R_i} \quad [11.9]$$

Los valores R para algunos materiales de construcción aparecen en la tabla 11.4. Observe las unidades de R y el hecho de que los valores R están definidos para grosores específicos.

En seguida de cualquier superficie vertical exterior está una capa muy delgada de aire estancado que debe ser considerada cuando se calcule el valor total de R . El grosor de esta capa depende de la velocidad del viento. En consecuencia, la pérdida de energía por conducción de una casa en un día cuando el viento sopla con fuerza es mayor que la pérdida de energía en un día cuando la velocidad del viento es cero. En la tabla 11.4 se da un valor representativo de R de la capa de aire estancado. Los valores se dan típicamente en unidades inglesas, pero se pueden convertir a unidades métricas equivalentes al multiplicar los valores de la tabla por 0.1761.

EJEMPLO 11.9 Construcción y aislamiento térmico

OBJETIVO Calcular el valor R de varias capas de material aislante y su efecto sobre la transferencia de energía térmica.

PROBLEMA **a)** Encuentre la energía transferida por conducción en 1.00 h, a través de una pared de concreto de 2.0 m de altura, 3.65 m de largo y 0.20 m de grosor, si un lado de la pared se mantiene a 20.0 °C y el otro lado está a 5.00 °C (figura 11.8). Suponga que el concreto tiene una conductividad térmica de 0.80 J/s · m · °C. **b)** El propietario de la casa decide aumentar el aislamiento, por lo que se instala revestimiento de 0.50 pulg de espesor, relleno de fibra de vidrio de 3.5 pulg y yeso de 0.50 pulg de espesor. Calcule el factor R . **c)** Calcule la energía transferida por conducción en 1.00 h. **d)** ¿Cuál es la temperatura entre la pared de concreto y el revestimiento? Suponga que hay una capa de aire en el exterior de la pared de concreto, pero no entre el hormigón y el revestimiento.

ESTRATEGIA El valor R de la pared de concreto está dado por L/k . Agregue este al valor R de dos capas de aire y luego

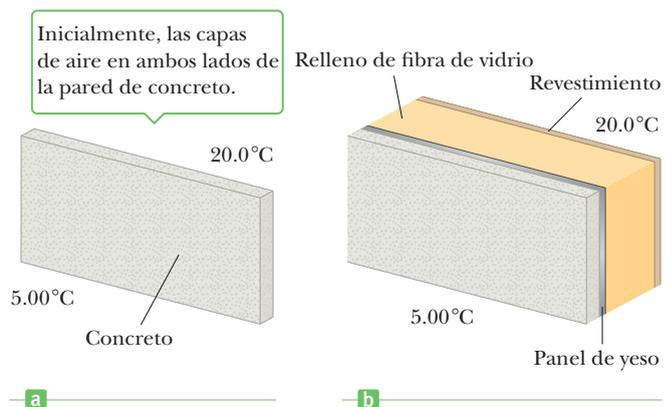


Figura 11.8 (Ejemplo 11.9) Una vista en sección transversal de a) una pared de concreto con dos capas de aire y b) la misma pared con revestimiento, relleno de fibra de vidrio, paneles de yeso y dos capas de aire.

sustituya en la ecuación 11.8, multiplicado por los segundos que hay en una hora para obtener la energía total que se transfiere a través de la pared en una hora. Repita este proceso, con diferentes materiales, para los incisos b) y c). El inciso d) requiere encontrar el valor R de una capa de aire y el muro de hormigón, y luego sustituir en la ecuación de la conductividad térmica. En este problema se utilizan unidades métricas, así que asegúrese de convertir los valores de R de la tabla. (La conversión a SI requiere la multiplicación de las unidades inglesas por 0.1761.)

SOLUCIÓN

a) Encuentre la energía transferida por conducción en 1.00 h a través de un muro de concreto.

Calcule el valor R del concreto y dos capas de aire:

$$\begin{aligned}\sum R &= \frac{L}{k} + 2R_{\text{capa de aire}} = \frac{0.20 \text{ m}}{0.80 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} + 2\left(0.030 \frac{\text{m}^2}{\text{J/s} \cdot ^\circ\text{C}}\right) \\ &= 0.31 \frac{\text{m}^2}{\text{J/s} \cdot ^\circ\text{C}}\end{aligned}$$

Escriba la ecuación de conducción térmica:

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum R}$$

Sustituya valores:

$$P = \frac{(7.3 \text{ m}^2)(20.0^\circ\text{C} - 5.00^\circ\text{C})}{0.31 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J}} = 353 \text{ W} \rightarrow 350 \text{ W}$$

Multiplique la potencia en watts por el número de segundos que hay en una hora:

$$Q = P\Delta t = (350 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 1.3 \times 10^6 \text{ J}$$

b) Calcule el factor R de la pared recién aislada.

Consulte la tabla 11.4 y sume las cantidades apropiadas después de convertir a unidades del SI:

$$\begin{aligned}R_{\text{total}} &= R_{\text{capa exterior de aire}} + R_{\text{concreto}} + R_{\text{revestimiento}} \\ &\quad + R_{\text{fibra de vidrio}} + R_{\text{panel de yeso}} + R_{\text{capa interior de aire}} \\ &= (0.030 + 0.25 + 0.233 + 1.92 + 0.079 + 0.030) \\ &= 2.5 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}/\text{J}\end{aligned}$$

c) Calcule la energía transferida por conducción en 1.00 h.

Escriba la ecuación de conducción térmica:

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum R}$$

Sustituya valores:

$$P = \frac{(7.3 \text{ m}^2)(20.0^\circ\text{C} - 5.00^\circ\text{C})}{2.5 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J}} = 44 \text{ W}$$

Multiplique la potencia en watts por el número de segundos en una hora:

$$Q = P\Delta t = (44 \text{ W})(3600 \text{ s}) = 1.6 \times 10^5 \text{ J}$$

d) Calcule la temperatura entre el concreto y el revestimiento.

Escriba la ecuación de conductividad térmica:

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum R}$$

Resuelva algebraicamente para T_h multiplicando ambos lados de la ecuación por $\sum R$ y dividiéndolos entre A :

$$P\sum R = A(T_h - T_c) \rightarrow (T_h - T_c) = \frac{P\sum R}{A}$$

Sume T_c a ambos lados:

$$T_h = \frac{P\sum R}{A} + T_c$$

Sustituya el valor R para el muro de concreto del inciso a) restándolo de una de las capas de aire calculadas en el inciso a).

$$\begin{aligned}T_h &= \frac{(44 \text{ W})(0.31 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J} - 0.03 \text{ m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}/\text{J})}{7.3 \text{ m}^2} + 5.00^\circ\text{C} \\ &= 6.7^\circ\text{C}\end{aligned}$$

COMENTARIOS ¡Observe el enorme ahorro de energía que se puede realizar con un buen aislamiento!

PREGUNTA 11.9 ¿Cuál de las siguientes opciones resulta en el mejor valor de R ? a) El uso de material con una pequeña conductividad térmica y espesor de gran tamaño. b) El uso de materiales delgados con una conductividad térmica de gran tamaño. c) El uso de materiales con una pequeña conductividad térmica y espesor reducido.

EJERCICIO 11.9 En lugar de las capas de aislamiento, el dueño instala un muro de ladrillos en el exterior de la pared de concreto. a) Calcule el factor R , incluyendo las dos capas de aire estancado en el interior y exterior de la pared. b) Calcule la energía transferida por conducción en 1.00 h, bajo las mismas condiciones que en el ejemplo. c) ¿Cuál es la temperatura entre el concreto y el ladrillo?

RESPUESTAS a) $1.02 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}/\text{J}$ b) $3.9 \times 10^5 \text{ J}$ c) 16°C

Convección

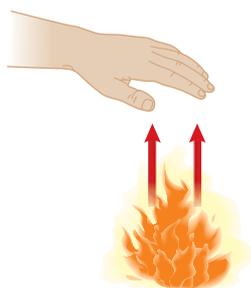


Figura 11.9 Calentamiento de las manos por convección.

Cuando calienta sus manos sobre el fuego, se ilustra en la figura 11.9, el aire directamente encima de la llama se calienta y se expande. Consecuentemente, la densidad de este aire disminuye y el aire se eleva, calentando sus manos mientras las mantenga cerca de este flujo. **La transferencia de energía por el movimiento de una sustancia se llama convección.** Cuando el movimiento es el resultado de diferencias en densidad, como el aire alrededor de un incendio, se dice que hay *convección natural*. La circulación de aire en una playa es un ejemplo de convección natural, como también lo es la mezcla que se presenta cuando el agua superficial en un lago se enfría y se hunde. Cuando una sustancia es forzada a moverse por un ventilador o una bomba, como en algunos sistemas de calefacción de aire y agua caliente, el proceso se llama *convección forzada*.

Las corrientes de convección ayudan a hervir el agua. Cuando se calienta agua en una tetera con una estufa, primero se calientan las capas más bajas de agua. El agua calentada tiene una densidad más baja y se eleva a la parte superior, mientras que el agua más densa, fría en la superficie, se hunde al fondo de la tetera y se calienta.

El mismo proceso ocurre cuando un radiador eleva la temperatura de un cuarto. El radiador calienta el aire en las regiones más bajas del cuarto. El aire caliente se expande y, debido a su densidad más baja, se eleva hacia el techo. El aire más frío y más denso de la parte superior desciende, con lo que se inicia el patrón continuo de corriente de aire que se ilustra en la figura 11.10.

APLICACIÓN

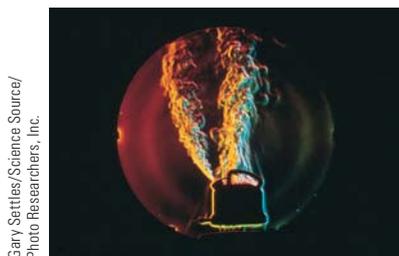
Enfriando motores de automóviles

Un motor de automóvil se mantiene a una temperatura de funcionamiento segura, por una combinación de conducción y de convección forzada. El agua (realmente, una mezcla de agua y anticongelante) circula dentro del motor. Mientras que la temperatura del metal del bloque del motor aumenta, la energía pasa del metal caliente al agua más fría por conducción térmica. La bomba de agua saca el agua del motor y la lleva al radiador, junto con la energía que ella posee (por convección forzada). En el radiador el agua caliente pasa a través de tuberías de metal que están en contacto con el aire exterior más frío, que por conducción pasan energía al aire. El agua enfriada es devuelta al motor por la bomba de agua para absorber más energía. El proceso de aire que se hace pasar al radiador por el ventilador también es convección forzada.

BIO APLICACIÓN

Proliferación de algas en estanques y lagos

La proliferación de algas que se ve en lagos templados y estanques durante la primavera o verano es causado por corrientes de convección de agua. Para entender este proceso,



Gary Settles/Science Source/
Photo Researchers, Inc.

Fotografía de una tetera que muestra vapor y corrientes turbulentas en la convección de aire.

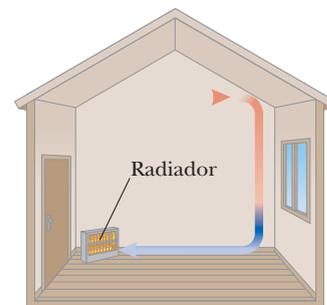


Figura 11.10 Corrientes de convección en un cuarto calentado por un radiador.

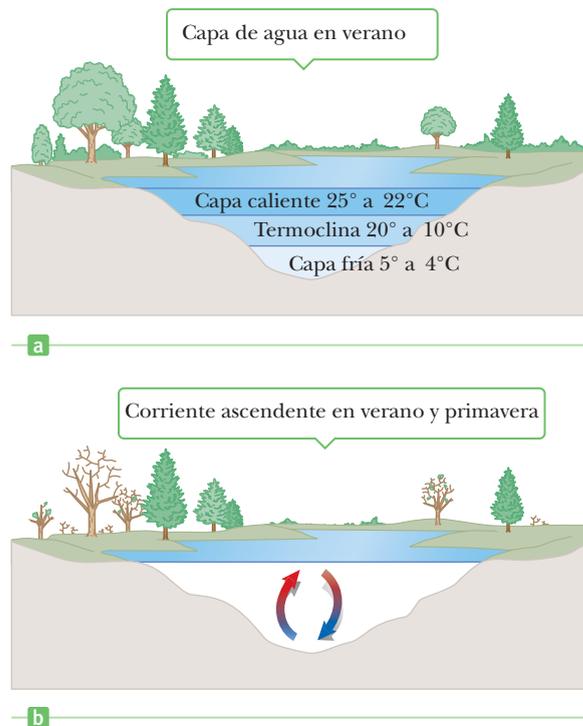


Figura 11.11 a) Durante el verano, una capa superior caliente de agua está separada de la capa más fría por una termoclina. b) Las corrientes de convección, durante la primavera o verano, mezclan el agua y pueden favorecer la proliferación de algas.

considere la figura 11.11. Durante el verano, las masas de agua forman gradientes de temperatura tales que una capa superior caliente es separada de una capa fría más baja por una zona intermedia llamada termoclina. En primavera o verano, los cambios en el agua descomponen esta termoclina e inician corrientes de convección que mezclan el agua. Este proceso de mezcla transporta nutrientes del fondo a la superficie. El agua rica en nutrientes que se forma en la superficie puede causar un rápido y temporal aumento de población de algas.

■ FÍSICA APLICADA 11.1 Temperatura corporal BIO

La temperatura corporal varía en mamíferos de unos 35 a 38 °C, mientras que la de las aves lo hace entre 40 a 43 °C. ¿Cómo se puede mantener estos rangos de temperatura en tiempo frío?

EXPLICACIÓN Un método natural para lograr este propósito es por medio de capas de grasa situadas bajo la piel. La grasa protege contra la conducción y convección porque tiene baja conductividad térmica, y hay pocos vasos sanguíneos en la grasa para llevar sangre a la superficie donde

pueden ocurrir pérdidas de energía por convección. Las aves erizan sus plumas en clima frío de modo que una capa de aire con baja conductividad térmica queda atrapada entre las plumas y la piel. Los animales con piel erizan ésta para producir el mismo efecto.

Los seres humanos se mantienen calientes con los suéteres y chaquetas de la lana que atrapan el aire más caliente en regiones cerca de sus cuerpos, reduciendo pérdida de energía por convección y conducción. ■

Radiación

Otra forma de transferir energía es por **radiación**. La figura 11.12 muestra cómo nos calentamos las manos con una lámpara mediante transferencia de energía por radiación. Tampoco la convección puede ser la responsable de este tipo de transferencia de energía. Debido a que sus manos no están en contacto físico con la lámpara y la conductividad del aire es baja no puede considerarse la transferencia de energía por conducción porque nuestras manos no están arriba de la lámpara en la trayectoria de las corrientes de convección. El proceso importante en este caso es la transferencia de energía por radiación.

Todos los objetos irradian energía continuamente en la forma de ondas electromagnéticas debido a vibraciones térmicas de sus moléculas. Estas vibraciones crean el característico brillo anaranjado del quemador de una estufa eléctrica, en un calentador eléctrico o en las bobinas de un tostador.

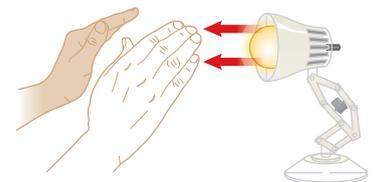


Figura 11.12 Calentando las manos por radiación.

La razón con la que un objeto irradia energía es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, lo que se conoce como **ley de Stefan**, y se expresa como

Ley de Stefan ►

$$P = \sigma A e T^4 \quad [11.10]$$

donde P es la potencia en watts (o joules por segundo) irradiada por el objeto, σ es la constante de Stefan-Boltzmann igual a $5.6696 \times 10^{-28} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A es el área superficial del objeto en metros cuadrados, e es la denominada constante de **emisividad** del objeto y T es la temperatura kelvin del objeto. El valor de e puede variar entre cero y uno, dependiendo de las propiedades de la superficie del objeto.

Aproximadamente 1370 J de radiación electromagnética del Sol pasan perpendicularmente por cada metro cuadrado en lo alto de la atmósfera de la Tierra, cada segundo. Esta radiación es, en esencia, luz visible, acompañada de cantidades considerables de radiación infrarroja y ultravioleta. Estudiaremos con detalle estos tipos de radiación en el capítulo 21. Parte de esta energía se refleja de nuevo hacia el espacio y parte es absorbida por la atmósfera, pero una cantidad suficiente llega a la superficie terrestre todos los días para satisfacer cientos de veces todas nuestras necesidades de energía, si se pudieran capturar y utilizar en forma eficiente. El aumento de casas solares en Estados Unidos es un ejemplo de los intentos por hacer uso de esta abundante energía. La energía radiante del Sol afecta en varias formas nuestra existencia diaria, influye en la temperatura promedio de nuestro planeta, en las corrientes oceánicas, agricultura, patrones de lluvias, etc. También puede afectar nuestra conducta.

Otro ejemplo de los efectos de transferencia de energía por radiación, es lo que le pasa a la temperatura atmosférica por la noche. Si hay nubes que cubran la Tierra, el vapor de agua que contienen absorbe parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra y la regresa a la superficie. En consecuencia, la temperatura en la superficie continúa a niveles moderados. En ausencia de nubes, no hay algo que evite que esta radiación escape al espacio y por ello la temperatura baja más en una noche despejada que cuando está nublado.

Cuando un objeto irradia energía a una razón dada por la ecuación 11.10, también absorbe radiación. Si no ocurre este último proceso, un objeto finalmente irradiaría toda su energía y su temperatura alcanzaría el cero absoluto. La energía que un objeto absorbe proviene de su entorno, que está formado por otros objetos que irradian energía. Si un objeto está a una temperatura T y su entorno está a una temperatura T_0 , la energía neta ganada o perdida por el objeto en cada segundo, como resultado de esta radiación es

$$P_{\text{neta}} = \sigma A e (T^4 - T_0^4) \quad [11.11]$$

Cuando un objeto está en equilibrio con su entorno, irradia y absorbe energía con la misma rapidez, por lo que su temperatura permanece constante. Cuando está más caliente que su entorno, irradia más energía de la que absorbe y por eso se enfría.

Un **absorbedor ideal** es un objeto que absorbe toda la radiación luminosa que incide sobre él, incluida la infrarroja invisible y la luz ultravioleta. Un objeto de este tipo se conoce como **cuerpo negro** porque un cuerpo negro a temperatura ambiente se vería negro. Debido a que un cuerpo negro no refleja radiación de ninguna longitud de onda, cualquier luz que venga de él es debida solamente a las vibraciones atómicas y moleculares. Un cuerpo negro perfecto tiene emisividad $e = 1$. Un absorbedor ideal también es un radiador ideal de energía. El Sol, por ejemplo, es muy cercano a un cuerpo negro perfecto. Esta afirmación puede ser contradictoria debido al brillo del Sol y no se percibe oscuro; sin embargo, la luz que viene del Sol es emitida, no reflejada. Los cuerpos negros son absorbedores perfectos que parecen negros a temperatura ambiente porque no reflejan ninguna luz. Todos los cuerpos negros, excepto aquellos que se encuentran a cero absoluto, emiten luz con un característico espectro, discutido en el capítulo 27. En contraste con los cuerpos negros, un objeto para el que $e = 0$ no absorbe nada de la energía que incide sobre él. Un objeto de este tipo refleja toda la energía incidente y, por lo tanto, es un **reflector ideal**.

La ropa de vestir blanca es más cómoda en verano que la oscura. La tela negra actúa como un buen absorbedor de luz solar entrante y como buen emisor de esta energía absorbida. Sin embargo, casi la mitad de la energía emitida se dirige hacia el cuerpo, lo que hace que la persona que usa la prenda se sienta demasiado caliente. En contraste, las prendas de vestir de color claro reflejan gran parte de la energía que entra.

APLICACIÓN

Ropa de colores claros para el verano

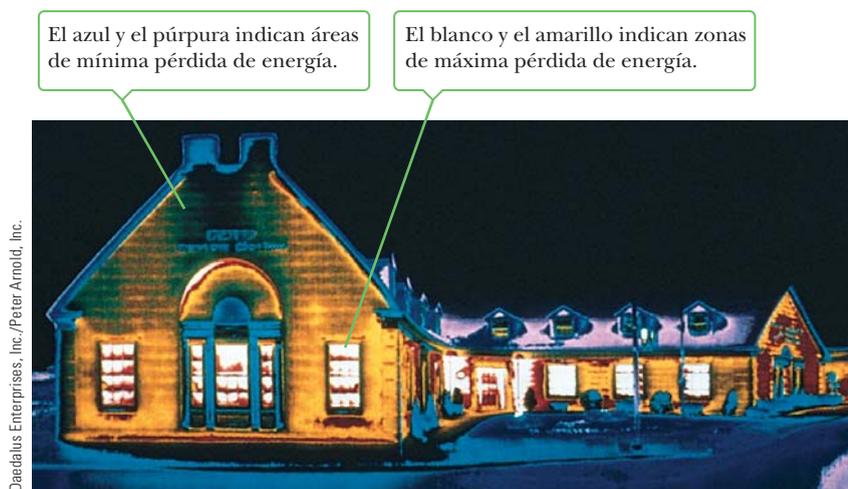


Figura 11.13 Termograma de una casa, tomada durante clima frío.

La cantidad de energía irradiada por un objeto se puede medir con un equipo de registro sensible a la temperatura, basado en una técnica llamada **termografía**. Una imagen del patrón formado por la variación de niveles de radiación es llamada **termograma**, es más brillante en las zonas más calientes. En la figura 11.13 se reproduce un termograma de una casa. Las partes más centrales de la puerta y ventanas son amarillas, lo que indica que las temperaturas son más altas que las de los lugares adyacentes. Una temperatura más alta por lo general indica un escape de energía. Los termogramas pueden ser útiles para conservar energía. Por ejemplo, los propietarios de esta casa podrían conservarla y reducir sus costos de calefacción si colocan más aislamiento en la parte del desván e instalan cortinas en las ventanas. Los termogramas también han sido utilizados en medicina para obtener imágenes de tejido fino dañado o enfermo, porque tales áreas están a menudo a una diferente temperatura que el tejido fino sano circundante, aunque muchos radiólogos consideran a los termogramas inadecuados como herramienta de diagnóstico.

La figura 11.14 muestra un termómetro de radiación recientemente inventado, que ha eliminado casi todo el riesgo de tomar la temperatura en niños o personas ancianas con un termómetro rectal tradicional, riesgo que se manifiesta como perforación del intestino o contaminación por bacterias. El instrumento mide la intensidad de radiación que sale del tímpano y tejidos cercanos, convirtiendo la información en una lectura numérica normal. El tímpano es un lugar particularmente bueno para medir la temperatura del cuerpo porque está cerca del hipotálamo, centro de control de la temperatura de nuestro cuerpo.

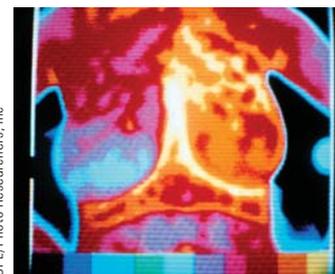
Examen rápido

11.5 Las estrellas *A* y *B* tienen la misma temperatura, pero la estrella *A* tiene el doble del radio que la estrella *B*. a) ¿Cuál es la razón entre la potencia de salida de la estrella *A* y la de la estrella *B* debido a radiación electromagnética? La emisividad de ambas estrellas se puede ver como 1. b) Repita la pregunta si las estrellas tienen el mismo radio, pero la estrella *A* tiene dos veces la temperatura absoluta de la estrella *B*. c) ¿Cuál es la razón si la estrella *A* tiene el doble de temperatura y el doble de radio que la estrella *B*?

FÍSICA APLICADA 11.2 Radiación térmica y visión nocturna

¿Cómo se puede utilizar la radiación térmica para ver objetos en una oscuridad total?

EXPLICACIÓN Hay dos métodos de visión nocturna, una que realza una combinación de la luz visible muy débil y de la luz infrarroja, y otra que usa solamente luz infrarroja. El último tiene la ventaja de crear imágenes en oscuridad absoluta. Debido a que todos los objetos encima del cero absoluto emiten radiación térmica, por la vibración de sus átomos, la



Termograma de las mamas de una mujer. La izquierda está dañada (rojo y anaranjado), la derecha está sana (tonos azulados).

BIO APLICACIÓN

Termografía

BIO APLICACIÓN

Termómetros de radiación para medir la temperatura corporal



Figura 11.14 Un termómetro de radiación mide la temperatura de un paciente al monitorear la intensidad de la radiación infrarroja que sale del oído.

luz infrarroja (invisible) puede ser enfocada con una lente especial y rastrear por medio de un detector de elementos infrarrojos. Estos elementos crean un termograma. La información de millares de puntos separados en el campo visual se convierte en impulsos eléctricos y es traducida por un microchip a una forma conveniente en una pantalla. A diferentes áreas de temperatura se le asignan diferentes colores, que se pueden discernir fácilmente en la pantalla. ■

EJEMPLO 11.10 Club del oso polar **BIO****OBJETIVO** Aplicar la ley de Stefan.

PROBLEMA Un miembro del club del oso polar, vestido solamente con un traje de baño de tamaño insignificante, se prepara para sumergirse en la playa del mar báltico en San Petersburgo, Rusia. El aire es tranquilo, con una temperatura de 5°C. Si la temperatura superficial del cuerpo del nadador es 25°C, calcule la razón neta de pérdida de energía de su piel debido a la radiación. ¿Cuánta energía se pierde en 10.0 minutos? Suponga que su emisividad es 0.900 y su área superficial es 1.50 m².

ESTRATEGIA Utilice la ecuación 11.11, la ecuación de radiación térmica, sustituyendo la información dada. ¡Recuerde convertir las temperaturas a Kelvin sumando 273 a cada valor en grados centígrados!

SOLUCIÓN

Convierta las temperaturas de Celsius a Kelvin:

$$T_{5^{\circ}\text{C}} = T_C + 273 = 5 + 273 = 278 \text{ K}$$

$$T_{25^{\circ}\text{C}} = T_C + 273 = 25 + 273 = 298 \text{ K}$$

Calcule la razón neta de pérdida de energía, utilizando la ecuación 11.11:

$$\begin{aligned} P_{\text{neto}} &= \sigma A e (T^4 - T_0^4) \\ &= (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1.50 \text{ m}^2) \\ &\quad \times (0.900)[(298 \text{ K})^4 - (278 \text{ K})^4] \end{aligned}$$

$$P_{\text{neto}} = 146 \text{ W}$$

Multiplique el resultado anterior por el tiempo, 10 minutos, para obtener la energía perdida en este tiempo, debido a la radiación:

$$Q = P_{\text{neto}} \times \Delta t = (146 \text{ J/s})(6.00 \times 10^2 \text{ s}) = 8.76 \times 10^4 \text{ J}$$

COMENTARIOS La energía también se pierde del cuerpo por convección y conducción. El arropar atrapa las capas de aire al lado de la piel, que son calentadas por radiación y conducción. El aire inmóvil de estas capas calientes se conservan más fácilmente. Incluso un miembro de club del oso polar goza de una cierta ventaja del aire inmóvil, al conservar mejor una capa estancada de aire al lado de la superficie de su piel.

PREGUNTA 11.10 Suponga que en una temperatura dada, el índice de pérdida de energía de un objeto debido a la radiación es igual a su pérdida por conducción. Cuando la temperatura del objeto se eleva, la pérdida de energía debido a la radiación es a) mayor que, b) igual a, o c) menor que el índice de pérdida de energía debido a la conducción? (Suponga que la temperatura del ambiente es constante.)

EJERCICIO 11.10 Repita el cálculo cuando el hombre está parado en su dormitorio, con una temperatura ambiente de 20.0°C. Suponga que su temperatura superficial del cuerpo es 27.0°C, con emisividad de 0.900.

RESPUESTA 55.9 W, $3.35 \times 10^4 \text{ J}$

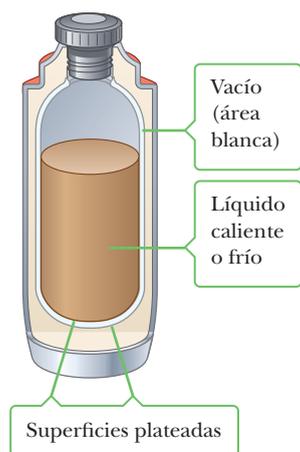


Figura 11.15 Vista de corte transversal de un termo diseñado para almacenar líquidos calientes o fríos.

El frasco de Dewar

Un termo, conocido como **frasco de Dewar** (en honor a su inventor), está diseñado para minimizar la transferencia de energía por conducción, convección y radiación. Los termos pueden almacenar líquidos fríos o calientes por largos periodos. El vaso estándar (figura 11.15) es un vaso de Pyrex de doble pared plateada. El espacio entre las paredes está al vacío para reducir al mínimo la transferencia de energía por conducción y convección. La superficie plateada reduce la transferencia de energía por radiación porque la plata es una buena reflectora y tiene baja emisividad. Se logra disminuir aún más la pérdida de energía si se reduce el tamaño del cuello. Por lo general, los frascos Dewar se utilizan para almacenar nitrógeno líquido (punto de ebullición 77 K) y oxígeno líquido (punto de ebullición 90 K).

Para guardar helio líquido (punto de ebullición 4.2 K), cuyo calor de evaporación es muy bajo, a veces es necesario usar un doble sistema Dewar, en el que el termo que contiene el líquido es rodeado por un segundo frasco de Dewar. El espacio entre los dos frascos se llena con nitrógeno líquido.

Algunos de los principios del termo se utilizan para proteger instrumentos electrónicos delicados de satélites espaciales que se encuentran en órbita. En la mitad de su órbita alrededor de nuestro planeta, un satélite está expuesto a la intensa radiación proveniente del Sol, y en la otra mitad está en la fría sombra de la Tierra. Sin protección, su interior estaría sometido a temperaturas extremas. El interior del satélite está cubierto

de capas de papel aluminio altamente reflector. La brillante superficie de las hojas refleja gran parte de la radiación solar mientras el satélite está en la parte no sombreada de la órbita, y ayuda a retener energía interior cuando el satélite está en la sombra de la Tierra.

APLICACIÓN

Termos

11.6 Calentamiento global y gases de efecto invernadero **BIO**

Muchos de los principios de transferencia de energía, y la oposición a esta, se pueden entender si se estudia la operación de un invernadero de vidrio. Durante el día, la luz solar entra a él y es absorbida por las paredes, la tierra y las plantas. Esta luz visible absorbida se irradia nuevamente como radiación infrarroja, lo que hace subir la temperatura del interior.

Además, las corrientes de convección quedan inhibidas en un invernadero, como consecuencia de lo cual el aire caliente no puede pasar con rapidez sobre las superficies del invernadero que están expuestas al aire exterior, con lo que se produce una pérdida de energía por conducción a través de esas superficies. Numerosos expertos consideran que esto es un efecto más importante de calentamiento que el de cualquier radiación infrarroja atrapada. De hecho, experimentos realizados han demostrado que cuando el vidrio de lo alto de un invernadero se sustituye por un vidrio especial, que se sabe transmite la luz infrarroja, la temperatura del interior se reduce sólo en forma ligera. Con base en esta evidencia, el mecanismo básico que eleva la temperatura de un invernadero no es atrapar radiación infrarroja, sino inhibir la circulación de aire que ocurre bajo cualquier techo (en un desván por ejemplo).

Un fenómeno conocido comúnmente como **efecto invernadero** también desempeña un importante papel en la determinación de la temperatura de la Tierra. Primero, observe que la atmósfera de la Tierra es un buen transmisor (y por lo tanto un mal absorbedor) de radiación visible y un buen absorbedor de radiación infrarroja. La luz visible que alcanza la superficie de la Tierra se absorbe e irradia como luz infrarroja, que alternadamente es absorbida (atrapada) por la atmósfera de la Tierra. Un caso extremo es el planeta más caliente, Venus, que tiene una atmósfera rica en bióxido de carbono (CO_2) y temperaturas que se acercan a 850°F .

Cuando se queman combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), se lanzan grandes cantidades de bióxido de carbono a la atmósfera, lo que hace que ésta conserve más energía. Estas emisiones son de gran preocupación para los científicos y gobiernos del mundo. Muchos científicos están convencidos de que el aumento de 10% en la cantidad de bióxido de carbono atmosférico desde 1970, podría conducir a cambios drásticos en el clima del mundo. El aumento en la concentración de bióxido de carbono atmosférico en la última parte del siglo xx se muestra en la figura 11.16. Según una estimación, duplicar el contenido de bióxido de carbono en la atmósfera hará que las temperaturas aumenten en 2°C . En regiones templadas como Europa y Estados Unidos, una subida de temperatura de 2°C ahorraría miles de millones de dólares por año en costos de combustible. Desafortunadamente, también derretiría una cantidad grande de hielo de los casquetes polares de Groenlandia y de la Antártida, elevando el nivel de los océanos y destruyendo muchas regiones costeras. Una subida 2°C también aumentaría la frecuencia de sequías

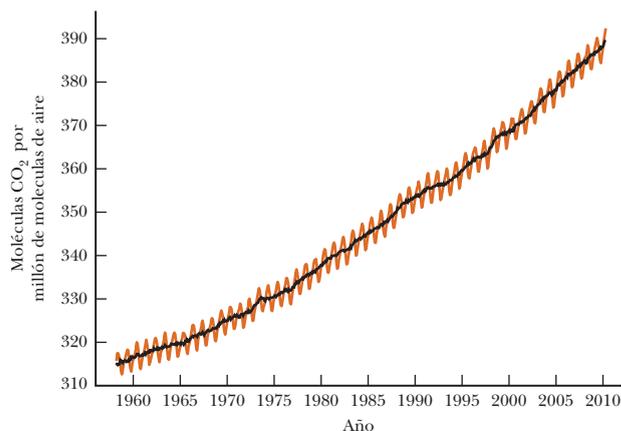
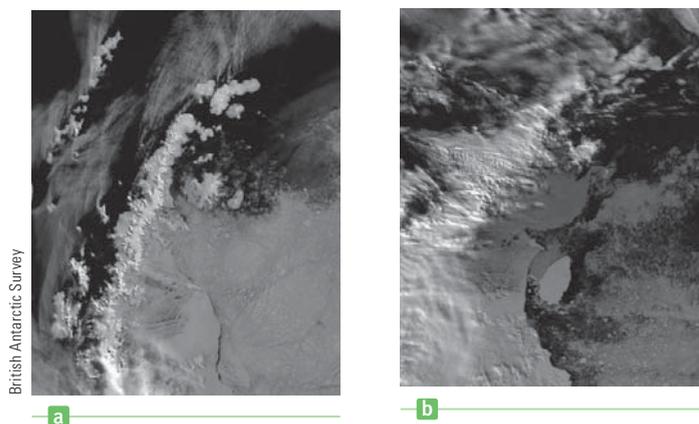


Figura 11.16 Concentración de bióxido de carbono atmosférico en partes por millón (ppm) de aire seco como función del tiempo durante la última parte del siglo xx. Estos datos se registraron en el observatorio Mauna Loa de Hawai. Las variaciones anuales (curvas rojas) coinciden con estaciones de crecimiento porque la vegetación absorbe bióxido de carbono del aire. El aumento continuo (curva negra) es causa de preocupación para los científicos.

Figura 11.17 Muerte de una plataforma de hielo. La imagen en el inciso a), fue tomada el 9 de enero de 1995 en una parte cercana al espectro visible, muestra la isla de James Ross (la formación en forma de telaraña, fuera del centro) antes del nacimiento del iceberg, pero después de la desintegración de la plataforma de hielo entre la isla de James Ross y la península antártica. La imagen en el inciso b), tomada el 12 de febrero de 1995, el iceberg ha nacido y comienza la mudanza lejos de tierra. El iceberg tiene cerca de 78 km por 27 km y 200 m de grueso. Hace un siglo la isla James Ross fue rodeada totalmente por el hielo que la unió a la Antártida.



y por lo tanto disminuirían las cosechas en países tropicales y subtropicales. Incluso promedios de temperatura levemente más altos podría hacer imposible que ciertas plantas y animales sobrevivan en sus ambientes naturales.

En la actualidad, cada año se arrojan unas 3.5×10^{11} toneladas de CO_2 a la atmósfera. La mayor parte de este gas resulta ser de la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles, deforestación y procesos de manufactura. Otros gases de invernadero también están aumentando su concentración en la atmósfera. Uno de estos gases es el metano (CH_4) que se libera en el proceso digestivo de las vacas y otros rumiantes. Este gas se origina en la parte del estómago del animal llamada *panza*, en donde digiere celulosa. Las termitas también son importantes productoras de este gas. Por último, los gases invernadero como el óxido nitroso (N_2O) y el dióxido de azufre (SO_2) están aumentando debido al uso del automóvil y a la contaminación industrial.

Sin importar si el aumento de los gases de efecto invernadero es o no responsable del aumento en la temperatura global promedio, hay evidencia convincente de que el calentamiento global ya está en proceso. La evidencia proviene del derretimiento del hielo en la Antártida y el retroceso de glaciares en lugares dispersos en todo el mundo (véase la figura 11.17). Por ejemplo, imágenes satelitales de la Antártida muestran que la isla James Ross está completamente rodeada por agua desde que se trazaron sus primeros mapas hace unos 100 años; en el pasado, la isla estaba conectada a tierra firme por un puente de hielo. Además, en diversos lugares del continente, las plataformas de hielo se están retirando y algunas de ellas a ritmo muy rápido.

Tal vez en ningún otro lugar del mundo se vigilen los glaciares con mayor interés que en Suiza. Ahí se ha comprobado que los Alpes han perdido casi 50% del hielo glacial, en comparación con el que había hace 130 años. En los trópicos, el retiro de los glaciares en picos de gran altura es todavía más grave que en Suiza. El glaciar Lewis que está en el monte Kenya y las nieves del Kilimanjaro son dos ejemplos. Sin embargo, continúa el avance de glaciares en ciertas regiones del planeta, en donde estas formaciones están cerca de grandes masas de agua y son alimentadas por frecuentes e intensas nevadas, de modo que el panorama general de calentamiento mundial catastrófico puede ser prematuro. No obstante, se espera que en aproximadamente 50 años la cantidad de bióxido de carbono de la atmósfera sea casi el doble de lo que era antes de la era industrial. Debido a este fenómeno, la mayoría de los científicos sostiene que las reducciones en emisiones de gases de efecto invernadero tienen que hacerse ahora.

RESUMEN

11.1 Calor y energía interna

La **energía interna** está asociada con los componentes microscópicos de un sistema. La energía interna incluye la energía cinética de traslación, rotación y vibración de moléculas así como su energía potencial.

El **calor** es la transferencia de energía a través de la frontera de un sistema resultante de una diferencia de temperatura

entre el sistema y sus alrededores. El símbolo Q representa la cantidad de energía transferida.

La **caloría** es la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de 1 g de agua de 14.5 a 15.5 °C. El **equivalente mecánico del calor** es 4.186 J/cal.

11.2 Calor específico

11.3 Calorimetría

La energía requerida para cambiar la temperatura de una sustancia de masa m en una cantidad ΔT es

$$Q = mc\Delta T \quad [11.3]$$

donde c es el **calor específico** de la sustancia. En problemas de calorimetría, el calor específico de una sustancia puede determinarse colocando dicha sustancia en agua con temperatura conocida, aislando el sistema y midiendo la temperatura en equilibrio. La suma de todas las pérdidas y ganancias de energía para todos los objetos en un sistema aislado está dado por

$$\sum Q_k = 0 \quad [11.5]$$

donde Q_k es el cambio de energía en el k -ésimo objeto en el sistema. Esta ecuación puede resolverse para el calor específico desconocido, o usado para determinar una temperatura de equilibrio.

11.4 Calor latente y cambio de fase

La energía requerida para cambiar la fase de una sustancia pura de masa m es

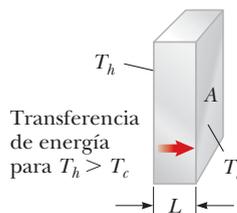
$$Q_k = \pm mL \quad [11.6]$$

donde L es el **calor latente** de la sustancia. El calor latente de fusión, L_f , describe una transferencia de energía durante un cambio de fase sólido a fase líquido (o viceversa), mientras el calor latente de vaporización, L_v , describe una transferencia de energía durante un cambio de fase líquido a fase gas (o viceversa). Los problemas de calorimetría que involucran cambios de fase se manejan con la ecuación 11.5, con términos de calor latente añadidos a los términos de calor específico.

11.5 Transferencia de energía

La energía puede transferirse por varios procesos diferentes, incluyendo trabajo, discutido en el capítulo 5, y por conducción, convección y radiación. La **conducción** puede verse como un intercambio de energía cinética entre moléculas o electrones que colisionan. La razón a la cual la energía se transfiere por conducción a través de una barra de área A y grosor L es

$$P = kA \frac{(T_h - T_c)}{L} \quad [11.7]$$



La transferencia de energía a través de una barra es proporcional al área de la sección transversal y la diferencia de temperatura, e inversamente proporcional al espesor.

donde k es la **conductividad térmica** del material que compone la barra.

La energía se transfiere por **convección** cuando una sustancia se mueve de un lugar a otro.

Todos los objetos emiten **radiación** desde sus superficies en forma de ondas electromagnéticas a una razón neta de

$$P_{\text{neta}} = \sigma A \epsilon (T^4 - T_0^4) \quad [11.11]$$

donde T es la temperatura del objeto y T_0 es la temperatura de los alrededores. Un objeto que es más caliente que sus alrededores radia más energía de la que absorbe, mientras que un objeto que es más frío que sus alrededores, absorbe más energía de la que irradia.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Convierta 3.50×10^3 cal a un número equivalente de joules. a) 2.74×10^4 J b) 1.47×10^4 J c) 3.24×10^4 J d) 5.33×10^4 J e) 7.20×10^5 J
- El alcohol etílico tiene alrededor de la mitad del calor específico del agua. Suponga que la misma cantidad de energía se transfiere por calor a las muestras líquidas de alcohol y agua de igual masa separadas en contenedores aislados. El agua sube de temperatura de 25°C . ¿Cuál será el aumento de temperatura del alcohol? a) Se incrementará en 12°C . b) Se incrementará en 25°C . c) Se incrementará en 50°C . d) Depende de la velocidad de transferencia de energía. e) No aumenta la temperatura.
- Un muro hecho de madera de 4.00 cm de espesor tiene un área de 48.0 m². Si la temperatura interior es de 25°C y la temperatura exterior es de 14°C , ¿a qué tasa se transporta la energía térmica a través de la pared por conducción? a) 82 W b) 210 W c) 690 W d) 1.1×10^3 W e) 2.1×10^3 W.
- Si 9.30×10^5 J de energía se transfieren a 2.00 kg de hielo a 0°C , ¿cuál es la temperatura final del sistema? a) 22.4°C b) 14.2°C c) 31.5°C d) 18.0°C e) 0°C
- ¿Cuánta energía se requiere para elevar la temperatura de 5.00 kg de plomo desde 20.0°C hasta su punto de fundición de 327°C ? a) 4.04×10^5 J b) 1.07×10^5 J c) 8.15×10^4 J d) 2.13×10^4 J e) 1.96×10^5 J
- Una pelota de granito con radio 2.00 m y emisividad 0.450 se calienta a 135°C , mientras que la temperatura ambiente es de 25.0°C . ¿Cuál es la potencia neta radiada de la pelota? a) 425 W b) 3.55×10^4 W c) 145 W d) 2.01×10^3 W e) 2.54×10^4 W
- ¿Cuánto tiempo le tomaría un elemento caliente a 1.00×10^3 W derretir 2.00 kg de hielo a -20.0°C , suponiendo que toda la energía es absorbida por el hielo? a) 4.19 s b) 419 s c) 555 min d) 12.5 min e) 2.00 h
- Supongamos que usted mide el calor específico de una muestra de metal caliente mediante el uso de un calorímetro

- que contiene agua. Debido a que su calorímetro no está aislado perfectamente, puede transferir energía por calor entre los contenidos del calorímetro y la habitación. Para obtener el resultado más exacto para el calor específico del metal, ¿cómo debe ser la temperatura inicial del agua? a) ligeramente inferior a la temperatura de la habitación, b) la misma que la temperatura de la habitación, c) ligeramente superior a la temperatura de la habitación, d) cualquiera porque la temperatura inicial no hace ninguna diferencia
- Una cantidad de energía se añade al hielo, elevando su temperatura desde -10° hasta -5°C . Una cantidad mayor de energía se añade a la misma masa de agua, elevando su temperatura de 15 a 20°C . De dichos resultados ¿qué puede concluirse? a) Superar el calor latente de fusión del hielo requiere de una energía de entrada. b) El calor latente de fusión del hielo proporciona alguna energía al sistema. c) El calor específico del hielo es menor que el del agua. d) El calor específico del hielo es mayor que el del agua. e) Se necesita más información para llegar a cualquier conclusión.
 - Un atizador es una barra no inflamable que se utiliza para empujar los troncos que se queman en el fuego de una chimenea. Suponga que está hecha de un solo material. Para mejor funcionalidad y seguridad el material del atizador debería ser hecho con un material con a) alto calor específico y alta conductividad térmica, b) bajo calor específico y baja conductividad térmica, c) bajo calor específico y alta conductividad térmica, d) alto calor específico y baja conductividad térmica o, e) bajo calor específico y baja densidad.
 - La estrella A tiene el doble de radio y el doble de la temperatura absoluta de la estrella B. ¿Cuál es la razón entre la potencia de salida de la estrella A a la de la estrella B? La emisividad de ambas estrellas puede suponerse de 1. a) 4 b) 8 c) 16 d) 32 e) 64
 - Una persona agita por algunos minutos una botella sellada y aislada que contiene café, ¿qué cambio hay en la temperatura del café? a) un gran decremento, b) un pequeño decremento, c) ningún cambio, d) un ligero incremento, e) un gran incremento.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Frote la palma de una de sus manos con una superficie de metal de 30 a 45 segundos. Coloque la otra palma sobre una porción del metal sin frotar y luego sobre la porción frotada. La porción frotada se sentirá más caliente. Ahora repita el proceso en una superficie de madera. ¿Por qué la diferencia de temperatura entre las porciones frotada y sin frotar de la superficie de madera parece mayor que en la superficie de metal?
- En invierno ¿por qué los pioneros almacenaban en un barril abierto, con agua, sus productos?
- En climas usualmente cálidos que experimentan fuertes fríos ocasionales, los agricultores de frutas rocían los árboles frutales con agua, procurando que se forme una capa de hielo sobre la fruta. ¿Por qué dicha capa es conveniente?
- Es la mañana de un día que puede volverse caluroso. Usted acaba de comprar bebidas para un día de campo y las deposita, con hielo, en un cofre en la parte trasera de su coche. a) Usted coloca una manta de lana alrededor del cofre. ¿No hacerlo ayuda a mantener las bebidas frías, o debe esperar que la manta de lana las caliente? Explique su respuesta. b) Su hermana menor le sugiere que la cubra con otra manta de lana para mantenerla fresca en el día caluroso como al cofre de hielo. Explique la respuesta que le daría.
- En una noche clara y fría, ¿por qué la escarcha tiende a formarse en los techos, más que en los lados de carros y buzones?
- El centavo de Estados Unidos se hace ahora de zinc cubierto de cobre. ¿Podría utilizarse un experimento de calorimetría para probar el contenido de metal en una colección de centavos? Si es así, describa el procedimiento.
- Tazas de agua para el café o el té pueden ser calentadas con una bobina que se encuentra inmersa en el agua y elevarlas a una alta temperatura por medio de la electricidad. a) ¿Por qué las instrucciones advierten a los usuarios de no operar las bobinas si falta el agua? b) ¿Puede usar la bobina de inmersión para calentar una taza de caldo?
- La temperatura del aire sobre áreas costeras está profundamente influido por el gran calor específico del agua. Una razón es que la energía liberada cuando 1 metro cúbico se enfría 1.0°C eleva la temperatura de un gran volumen de aire en 1.0°C . Estime qué volumen de aire. El calor específico del aire es aproximadamente $1.0\text{ kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$. Considere la densidad del aire como 1.3 kg/m^3 .
- Una losa en el piso puede ser incómodamente fría para unos pies descalzos, sin embargo un piso alfombrado unido al cuarto a la misma temperatura se siente caliente. ¿Por qué?
- En un día muy caluroso es posible cocinar un huevo sobre el cofre de un auto. ¿Elegiría usted un auto blanco o negro para cocinar el huevo? ¿Por qué?
- El concreto tiene un calor específico mayor que la tierra. Utilice este hecho para explicar (parcialmente) por qué una ciudad tiene una temperatura promedio mayor que el campo en sus alrededores. ¿Esperaría usted que la brisa vespertina soplara de la ciudad al campo o del campo a la ciudad? Explique.
- Usted necesita levantar una olla muy caliente en su cocina. Usted tiene un par de almohadillas. ¿Debería empaparlas en agua fría o mantenerlas secas para poder recoger la olla más cómodamente?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

11.1 Calor y energía interna

11.2 Calor específico

1. La caída de agua más alta registrada en el mundo se encuentra en la Catarata Ángel en Venezuela. Su cascada más larga tiene una altura de 807 m. Si el agua en la cima de la cascada está a 15.0 °C, ¿cuál es la temperatura máxima del agua en el fondo de la cascada? Suponga que toda la energía cinética del agua cuando llega al fondo, provoca el aumento de la temperatura del agua.
2. **M** La temperatura de una barra de plata aumenta 10.0 °C cuando absorbe 1.23 kJ de energía por calor. La masa de la barra es de 525 g. Determine el calor específico de la plata a partir de estos datos.
3. El lago Erie contiene aproximadamente $4.00 \times 10^{11} \text{ m}^3$ de agua. a) ¿Cuánta energía se requiere para elevar la temperatura de ese volumen de agua de 11.0 a 12.0 °C? b) ¿Cuántos años tomaría suministrar esta cantidad de energía utilizando los 1000 MW de energía de una planta eléctrica?
4. Una barra de aluminio tiene 20.0 cm de longitud a 20 °C y tiene una masa de 350 g. Si 10000 J de energía se añaden a la barra por calor, ¿cuál es el cambio en la longitud de la barra?
5. **C/C** Una moneda de cobre de 3.00 g a 25.0 °C cae 50.0 m al suelo. a) Suponiendo una variación de 60.0% en la energía potencial gravitatoria del sistema moneda-Tierra aumenta la energía interna de la moneda, determine la temperatura final de la moneda. b) ¿El resultado dependerá de la masa de la moneda? Explique.
6. **BIO** Una mujer de 55 kg hace trampa en su dieta y come una dona de jalea de 540 Calorías (540 kcal) para desayunar. a) ¿Cuántos joules de energía son el equivalente de una dona de jalea? b) ¿Cuántas escaleras debe subir la mujer para realizar una cantidad de trabajo mecánico equivalente a la energía de la dona? Suponga que la altura de un solo escalón es de 15 cm. c) Si el cuerpo humano es sólo eficiente en 25% convirtiendo la energía química en energía mecánica, ¿cuántas escaleras debe subir la mujer para equilibrar su desayuno?
7. **BIO C/C** Un velocista de 75 kg acelera desde el reposo a una velocidad de 11.0 m/s en 5.0 s. a) Calcule el trabajo mecánico hecho por el velocista durante este tiempo. b) Calcule la potencia promedio que debe generar el velocista. c) Si el velocista convierte la energía de la comida a energía mecánica con una eficiencia de 25%, ¿a qué razón promedio quema las Calorías? d) ¿Qué ocurre con el otro 75% de la energía de la comida que utiliza?

8. **BIO S** Un velocista de masa m acelera uniformemente desde el reposo a velocidad v en t segundos. a) Escriba una expresión simbólica para la potencia mecánica instantánea P requerida por el velocista en términos de la fuerza F y velocidad v . b) Utilice la segunda ley de Newton y una ecuación de cinemática para la velocidad en cualquier tiempo para obtener una expresión para la potencia instantánea en términos de m , a y t solamente. c) Si un velocista de 75.0 kg alcanza una velocidad de 11.0 m/s en 5.00 s, calcule la aceleración del velocista, suponiéndola como constante. d) Calcule la potencia mecánica promedio en función del tiempo t y e) dada la razón máxima a la cual él quema Calorías durante la carrera, suponiendo 25% de eficiencia de conversión de energía de comida a energía mecánica.
9. Una bala de plomo de 5.00 g que viaja a 300 m/s es detenida por un gran árbol. Si la mitad de la energía cinética de la bala se transforma en energía interna y permanece con la bala mientras la otra mitad se transmite al árbol, ¿cuál es el incremento de temperatura en la bala?
10. El aparato mostrado en la figura P11.10 fue usado por Joule para medir el equivalente mecánico del calor. Se realiza trabajo en el agua rotando una rueda con palas, la cual es controlada por dos bloques que caen a velocidad constante. La temperatura del agua revuelta se incrementa debido a la fricción entre el agua y las palas. Si la energía que se pierde en el rodamiento y a través de las paredes se desprecia, entonces la pérdida en la energía potencial asociada con los bloques es igual al trabajo realizado por la rueda con paletas sobre el agua. Si cada bloque tiene una masa de 1.50, kg y el tanque aislado se llena con 200 g de agua, ¿cuál es el incremento en la temperatura del agua después de que el bloque cae una distancia de 3.00 m?

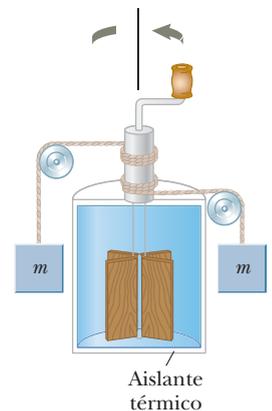


Figura P11.10 Los pesos que caen giran las paletas, provocando que la temperatura del agua se incremente.

11. Una taza de aluminio de 200 g contiene 800 g de agua en equilibrio térmico con la taza a 80 °C. La taza con agua combinados se enfrían uniformemente de modo que la temperatura decrece a 1.5 °C por minuto. ¿A qué razón se pierde la energía? Expresar su respuesta en watts.

12. Un bloque de cobre de 1.5 kg se mueve a una rapidez inicial de 3.0 m/s sobre una superficie aproximadamente horizontal. Debido a la fricción, el bloque llega finalmente al reposo. a) Si el bloque absorbe 85% de su energía cinética inicial como energía interna, calcule su incremento en temperatura. b) ¿Qué sucede con la energía restante?
13. Una vía férrea de acero tiene 13 yd de longitud y 70.0 lb/yd de peso. ¿Cuánta energía térmica se requiere para incrementar la longitud de dicha vía 3.00 mm? *Nota:* Suponga que el acero tienen el mismo calor específico que el hierro.
14. **PG** En el verano de 1958 en San Petersburgo, Florida, una nueva acera fue construida cerca del hogar de niñez de uno de los autores. No se utilizaron juntas de expansión y para mediados de julio, la acera había sido destruida completamente por la expansión térmica y tuvo que ser reemplazada, esta vez con la adición importante de juntas de expansión. Este evento se modela aquí.

Un bloque de concreto de 4.00 cm de espesor, 1.00 m de largo y 1.00 m de ancho se vacía para una acera a temperatura ambiente de 25 °C y listo para colocarse. El bloque se expone a la luz directa del Sol y colocado en una serie de dichos bloques sin las juntas de expansión apropiadas, de modo que la expansión lineal se previene. a) Utilizando la ecuación de expansión (ecuación 10.4), elimine ΔL de la ecuación de tensión y esfuerzo por compresión (ecuación 9.3). b) Utilice la expresión encontrada en el inciso a) para eliminar ΔT de la ecuación 11.3, y obtenga una ecuación simbólica para la energía térmica de transferencia Q . c) Calcule la masa del bloque de concreto cuya densidad es de $2.40 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. d) El concreto tiene una fuerza de compresión máxima de $2.00 \times 10^7 \text{ Pa}$, un calor específico de $880 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ y un módulo de Young de $2.1 \times 10^{10} \text{ Pa}$. ¿Cuánta energía térmica debe transferirse al bloque para alcanzar su esfuerzo de compresión? e) ¿Qué cambio de temperatura se requiere? f) Si el Sol proporciona $1.00 \times 10^3 \text{ W}$ de potencia a la superficie superior del bloque y si la mitad de energía, en promedio, es absorbida y retenida, ¿Cuánto tiempo le toma al bloque llegar a un punto en el cual existe peligro de ruptura debido al esfuerzo de compresión?

11.3 Calorimetría

15. ¿Qué masa de agua a 25.0 °C debe utilizarse para llegar al equilibrio térmico con un cubo de aluminio de 1.85 kg inicialmente a 1.50×10^2 °C para reducir la temperatura del aluminio a 65.0 °C? Suponga que el agua que se evapora subsecuentemente se recondensa.
16. Perdigones de plomo de 1.00 g de masa se calientan a 200 °C. ¿Cuántos perdigones deben añadirse a 500 g de agua que está inicialmente a 20.0 °C para provocar una temperatura de equilibrio de 25.0 °C? Desprecie cualquier energía transferida de o hacia el contenedor.
17. Una taza de aluminio contiene 225 g de agua y un agitador de cobre de 40 g, todos a 27 °C. Una muestra de 400 g de plata a temperatura inicial de 87 °C se coloca en el agua. El agitador se utiliza para agitar la mezcla hasta que alcanza su temperatura final de equilibrio de 32 °C. Calcule la masa de la taza de aluminio.

18. Durante un enfrentamiento en las calles de Laredo, el chico bueno deja caer una bala de plata de 5.0 g a una temperatura de 20 °C en una taza con agua de 100 cm³ a 90 °C. Simultáneamente, el chico malo deja caer una bala de cobre de 5.0 g a la misma temperatura inicial en una taza idéntica con agua. ¿Cuál de los dos termina el enfrentamiento con la taza con agua más fría del Oeste? Desprecie cualquier transferencia de energía de o hacia el contenedor.
19. **C/C** Un calorímetro de aluminio de 100 g contiene 250 g de agua. Las dos sustancias están en equilibrio térmico a 10.0 °C. Dos bloques metálicos se colocan en el agua. Uno es una pieza de cobre de 50.0 g a 80.0 °C. La otra muestra tiene una masa de 70.0 g y está originalmente a una temperatura de 100 °C. El sistema completo se estabiliza a una temperatura final de 20 °C. a) Determine el calor específico de la segunda muestra desconocida. b) Utilizando los datos de la tabla 11.1, se puede hacer un identificación positiva de la sustancia desconocida? ¿Puede usted identificar el material? c) Explique sus respuestas para el inciso b).
20. **M** Una herradura de hierro de 1.50 kg inicialmente a 600 °C cae en un balde con 20.0 kg de agua a 25.0 °C. ¿Cuál es la temperatura final del sistema agua-herradura? Ignore la capacidad calorífica del recipiente y suponga que una cantidad insignificante de agua hierve.
21. Un estudiante deja caer dos objetos metálicos en un contenedor de acero de 120 g con 150 g de agua a 25 °C. Un objeto es un cubo de cobre de 200 g que está inicialmente a 85 °C, y el otro es un trozo de aluminio que está inicialmente a 5.0 °C. Para sorpresa del estudiante, el agua alcanza una temperatura final de 25 °C, precisamente como comenzó. ¿Cuál es la masa del trozo de aluminio?
22. Cuando un conductor frena un automóvil, la fricción entre el tambor del freno y la balata convierte la fuerza cinética del coche en energía térmica. Si un automóvil de 1500 kg viajando a 30 m/s se detiene, ¿cuánto aumenta la temperatura en cada uno de los cuatro tambores de hierro de 8.0 kg? (El calor específico del hierro es de 448 J/kg · °C.)
23. **C/C** Masas iguales de 0.400 kg de plomo y de estaño a 60.0 °C se ponen en 1.00 kg de agua a 20.0 °C. a) ¿Cuál es la temperatura de equilibrio del sistema? b) Si una aleación es la mitad plomo y la mitad estaño por masa, ¿qué calor específico anticiparía usted para la aleación? c) ¿Cuántos átomos de estaño N_{Sn} hay en 0.400 kg de estaño, y cuántos átomos de plomo N_{pb} hay en 0.400 kg de plomo? d) Divida el número N_{Sn} de átomos de estaño por el número N_{pb} de los átomos de plomo y compare esta razón con el calor específico del estaño dividido por el calor específico del plomo. ¿Qué conclusión puede esbozarse?
24. Una sustancia desconocida tiene una masa de 0.125 kg y una temperatura inicial de 95.0 °C. Entonces, la sustancia se deja caer en un calorímetro hecho de aluminio, conteniendo 0.285 kg de agua inicialmente a 25.0 °C. La masa del envase de aluminio es 0.150 kg y la temperatura del calorímetro aumenta a una temperatura final de equilibrio de 32.0 °C. Suponiendo que ninguna energía

térmica es transferida al ambiente, calcule el calor específico de la sustancia desconocida.

11.4 Calor latente y cambio de fase

25. Un cubo de hielo de 75 g a 0°C se coloca en 825 g de agua a 25°C. ¿Cuál es la temperatura final de la mezcla?
26. Un cubo de hielo de 50 g a 0°C se calienta hasta que 45 g se convierten en agua a 100°C y 5.0 g se convierten en vapor a 100°C. ¿Cuánta energía fue agregada para lograr esta transformación?
27. Un cubo de 100 g de hielo a 0°C se deja caer en 1.0 kg de agua que estaba originalmente a 80°C. ¿Cuál es la temperatura final del agua después de que el hielo se haya derretido?
28. ¿Cuánta energía se requiere para cambiar un cubo de hielo de 40 g de hielo a -10°C a vapor a 110°C?
29. **M** Un esquiador a campo traviesa, de 75 kg de peso, avanza sobre nieve como se ve en la figura P11.29. El coeficiente de fricción entre los esquíes y la nieve es de 0.20. Suponga que toda la nieve bajo sus pies está a 0°C y que toda la energía interna generada por fricción se agrega a la nieve que se pega a sus esquíes hasta que se derrite. ¿Qué distancia tendría que esquiar para derretir 1.0 kg de nieve?



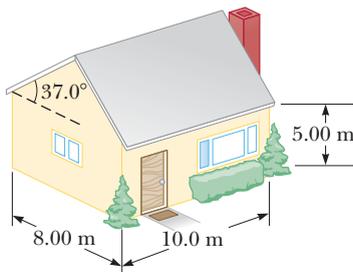
Figura P11.29

30. **PG** En un envase de aluminio de 0.500 kg a 20.0°C se colocan 6.00 kg de alcohol etílico a 30.0°C y 1.00 kg de hielo a -10.0°C. Suponga que el sistema está aislado de su ambiente. a) Identifique las cinco transferencias de energía térmica que ocurren mientras que el sistema va a un equilibrio de temperatura final T . Utilice la forma “sustancia en $X^\circ\text{C}$ para la sustancia a $Y^\circ\text{C}$ ”. b) Construya una tabla similar a la del ejemplo 11.5. c) Sume todos los términos en la columna de la derecha de la tabla y haga la suma igual a cero. d) Sustituya la información de la tabla en la ecuación encontrada en el inciso c) y resuelva para la temperatura final en equilibrio T .
31. Un bloque de 40 g de hielo se enfría a -78°C y después se agrega a 560 g de agua en un calorímetro de cobre de 80 g a una temperatura de 25°C. Determine la temperatura final del sistema que consiste en el hielo, el agua y el calorímetro. (Si no todo el hielo se derrite, determine cuánto hielo queda.) Recuerde que el hielo debe primero calentarse a 0°C, derretirse, y después continuar calentándose como agua. (El calor específico del hielo es $2.5 \times 10^6 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.)

32. **BIO** Cuando corre, la mayor parte de la energía del alimento que usted quema por encima de su razón metabólica básica (BMR) termina como energía interna que elevaría su temperatura corporal si ésta no fuera eliminada. La evaporación de la transpiración es el mecanismo primario para eliminar esta energía. Determine la cantidad de agua que pierde en la evaporación al funcionar por 30 minutos a una razón que utilice 400 kcal/h por encima de su BMR. (Esa cantidad se considera a menudo como la salida de energía de la “grasa máxima que se quema”.) El metabolismo de 1 gramo de grasa genera aproximadamente 9.0 kcal de energía y produce aproximadamente 1 gramo de agua (los átomos de hidrógeno en la molécula de grasa se transfieren al oxígeno para formar agua) ¿qué fracción de su requerimiento de agua será proporcionada por la grasa metabolizada? (El calor latente de la evaporación del agua en la temperatura ambiente es $2.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$.)
33. Una estufa de gas de alta calidad tiene generalmente por lo menos una hornilla clasificada en 14000 Btu/h. a) Si usted coloca una olla de aluminio de 0.25 kg que contiene 2.0 litros de agua a 20°C en esta hornilla, ¿cuánto tiempo tomará para elevar el agua al punto de ebullición, suponiendo que todo el calor de la hornilla entra a la olla? b) ¿Cuánto tiempo tomará para hervir toda el agua fuera de la olla?
34. **BIO** Un corredor de 60.0 kg consume 300 W de potencia cuando corre en una maratón. Si se supone que 10.0% de la energía se entrega al tejido muscular y que el exceso de ella se elimina básicamente del cuerpo por sudor, determine el volumen de fluido corporal (suponiendo que es agua) perdido por hora. (A 37.0°C el calor latente de evaporación del agua es $2.41 \times 10^6 \text{ J/kg}$.)
35. Se agrega vapor a 100°C a hielo a 0°C. a) Encuentre la cantidad de hielo derretida y la temperatura final cuando la masa de vapor es 10 g y la masa del hielo es 50 g. b) Repita con una masa de vapor de un 1.0 g y masa del hielo de 50 g.
36. **BIO** El exceso de energía interna del metabolismo se agota a través de una variedad de canales, como la radiación y evaporación directas de la transpiración. Considere otro camino para la pérdida de energía: humedad en la respiración exhalada. Suponga que usted exhala 22.0 veces por minuto, cada uno con un volumen de 0.600 L. Suponga también que usted inhala aire seco y exhala aire a 37°C que contiene vapor de agua con una presión de vapor de 3.20 kPa. El vapor viene de la evaporación del agua líquida en su cuerpo. Modele el vapor de agua como gas ideal. Suponga que el calor latente de evaporación a 37°C es igual a su calor de evaporación a 100°C. Calcule la rapidez a la que usted pierde energía exhalando el aire húmedo.
37. **CIC** Una bala del plomo de 3.00 g a 30.0°C se dispara a una velocidad de $2.40 \times 10^2 \text{ m/s}$ hacia un gran bloque de hielo a 0°C, en el que se incrusta. a) Describa las transformaciones de energía que ocurren mientras que se enfría la bala. ¿Cuál es la temperatura final de la bala? b) ¿Qué cantidad de hielo derrite?

11.5 Transferencia de energía

38. Una ventanilla de vidrio en un hogar es de 0.62 cm de grueso y tiene dimensiones de 1.0 m \times 2.0 m. En cierto día, la temperatura del interior es de 25 °C y la temperatura al aire libre es 0 °C. a) ¿Cuál es la rapidez en la cual la energía es transferida por el calor a través del vidrio? b) ¿Cuánta energía se pierde a través de la ventanilla en un día, suponiendo que las temperaturas interiores y exteriores permanecen constantes?
39. Un estanque con fondo plano, tiene una superficie de 820 m² y una profundidad de 2.0 m. En un día cálido, el agua superficial está a una temperatura de 25 °C, mientras que en el fondo del estanque está a 12 °C. Encontrar la velocidad a la cual la energía se transfiere por conducción desde la superficie hasta el fondo del estanque.
40. **BIO** Las conductividades térmicas de los finos tejidos humanos varían grandemente. La grasa y la piel tienen conductividades de cerca de 0.20 W/m \cdot K y 0.020 W/m \cdot K respectivamente, mientras que otros tejidos finos dentro del cuerpo tienen conductividades de cerca de 0.50 W/m \cdot K. Suponga que entre la región de la base del cuerpo y la superficie de la piel hay una capa de piel de 1.0 milímetro, una capa de grasa de 0.50 cm y 3.2 cm de otros tejidos finos. a) Encuentre el factor R para cada una de estas capas y el factor R equivalente para todas las capas tomadas juntas, conservando dos dígitos. b) Encuentre la razón de la pérdida de energía cuando la temperatura de la base del cuerpo es de 37 °C y la temperatura exterior es de 0 °C. Suponga que no hay ropa protectora ni una capa aislante inmóvil de aire, y un área del cuerpo de 2.0 m².
41. Un tubo de vapor se cubre con un material aislante de 1.50 cm de grueso y conductividad térmica de 0.200 cal/cm \cdot °C \cdot s. ¿Cuánto energía se pierde cada segundo cuando el vapor está a 200 °C y el aire circundante está a 20.0 °C? El tubo tiene una circunferencia de 800 cm y una longitud de 50.0 m. No tome en cuenta las pérdidas a través de los extremos del tubo.
42. El promedio de conductividad térmica de las paredes (incluyendo las ventanas) y el techo de una casa, en la figura P11.42 es 4.8×10^{-4} kW/m \cdot °C, y su promedio de grosor es 21.0 cm. La casa es calentada con gas natural, con un calor de combustión (energía liberada por metro cúbico quemado) de 9 300 kcal/m³. ¿Cuántos metros cúbicos de gas deben quemarse para cada día mantener una temperatura interior de 25.0 °C si la temperatura exterior es 0.0 °C? Ignore la radiación y la energía perdidas por calor a través de la tierra.

**Figura P11.42**

43. Considere dos ollas de cocina de las mismas dimensiones, cada una con la misma cantidad de agua a la misma

temperatura inicial. El fondo de la primera olla está hecha de cobre, mientras que la parte inferior de la segunda olla es de aluminio. Ambos recipientes se colocan sobre una superficie caliente a una temperatura de 145 °C. El agua que hierve en la olla con fondo de cobre se evapora por completo en 425 s. ¿Cuánto tiempo tarda el agua que hierve en la olla con fondo de aluminio en evaporarse por completo?

44. Una ventana térmica consiste en dos hojas de vidrio, cada una de 0.50 cm de grueso, con una capa sellada de 1.0 cm de grosor entre ellas. a) Si la temperatura de la superficie interior es de 23 °C y la temperatura superficial exterior es 0.0 °C, determine la rapidez de transferencia de energía por 1.0 m² de ventana. b) Compare su resultado con la rapidez de transferencia de energía por 1.0 m² de un solo vidrio de 1.0 cm de grueso.
45. **M** Una varilla de cobre y una de aluminio de igual diámetro se ponen extremo con extremo en buen contacto térmico. La temperatura del extremo libre de la varilla de cobre se mantiene constante a 100 °C, y el del extremo lejano de la varilla de aluminio se mantiene a 0 °C. Si la varilla de cobre mide 0.15 m de largo, ¿cuál debe ser la longitud de la varilla de aluminio para que la temperatura en la unión sea de 50 °C?
46. Una caja de espuma de estireno tiene un área superficial de 0.80 m² y un grosor de paredes de 2.0 cm. La temperatura de la superficie interior es de 5.0 °C, y la temperatura exterior es 25 °C. Si se requiere de 8.0 h para que se derritan 5.0 kg de hielo en el envase, determine la conductividad térmica de la espuma de estireno.
47. Un panel de cristal de la ventana rectangular de una casa tiene un ancho de 1.0 m, una altura de 2.0 m y un espesor de 0.40 cm. Encontrar la energía transferida por conducción a través de la ventana en 12 horas en un día, cuando la temperatura interior de la casa es 22 °C y la temperatura exterior es 2.0 °C. Tome las capas superficiales del aire en consideración.
48. Una vela solar se hace de aluminizado Mylar que tiene un emisividad de 0.03 y que refleja 97% de la luz que cae en él. Suponga que una vela con área 1.00 km² está orientada de modo que la luz del Sol caiga perpendicular a su superficie con una intensidad de 1.40×10^3 W/m². ¿A qué temperatura se calentará antes de que emita tanta energía (de ambos lados) por la radiación como la que absorbe en el lado asoleado? Suponga que la vela es tan delgada que la temperatura es uniforme y no se emite ninguna energía de los bordes. Tome el ambiente como 0 K.
49. Las mediciones en dos estrellas indican que la estrella X tiene una temperatura superficial de 5727 °C y la estrella Y tiene una temperatura superficial de 11 727 °C. Si ambas estrellas tienen el mismo radio, ¿cuál es la razón de luminosidad (salida de energía total) de la estrella Y a la luminosidad de la estrella X? Ambas estrellas pueden ser consideradas con una emisividad de 1.0.
50. El filamento de un foco de 75 W está a una temperatura de 3 300 K. Suponiendo que el filamento tiene una emisividad $e = 1.0$, encontrar su superficie.

Problemas adicionales

51. El fondo de una caldera de cobre tiene un radio de 10 cm y 2.0 mm de grosor. La temperatura de la superficie exterior

es de 102°C , y el agua dentro de la caldera está hirviendo a 1 atmósfera de presión. Encuentre la rapidez con la que la energía está siendo transferida a través del fondo de la caldera.

52. Una familia llega a casa después de unas largas vacaciones con ropa sucia y ganas de tomar una ducha. El calentador de agua se ha apagado durante las vacaciones. Si el calentador tiene una capacidad de 50.0 galones y un elemento de calefacción de 4800 W, ¿cuánto tiempo se requiere para elevar la temperatura del agua de 20.0°C a 60.0°C ? Suponga que el calentador está bien aislado y no se retira agua del tanque durante ese tiempo.

53. **M** Un cubo de hielo de 40 g flota en 200 g de agua en una taza de cobre de 100 g; todos están a una temperatura de 0°C . Un pedazo de plomo a 98°C se deja caer en la taza, y la temperatura final de equilibrio es de 12°C . ¿Cuál es la masa del plomo?

54. **BIO** La superficie de una persona sin ropa es de 1.50 m^2 , y su temperatura de la piel es 33.0°C . La persona se encuentra en un cuarto oscuro con una temperatura de 20.0°C y la emisividad de la piel es $e = 0.95$. a) ¿A qué razón es irradiada la energía por el cuerpo? b) ¿Cuál es el significado del signo de su respuesta?

55. Un bloque de 200 g de cobre a una temperatura de 90°C cae en 400 g de agua a 27°C . El agua está en un envase de vidrio de 300 g. ¿Cuál es la temperatura final de la mezcla?

56. **CIC** El nitrógeno líquido tiene un punto de ebullición de 77 K y un calor latente de evaporación de $2.01 \times 10^5\text{ J/kg}$. Un elemento de calefacción eléctrico de 25 W se sumerge en un recipiente aislado que contiene 25 L de nitrógeno líquido en su punto de ebullición. a) Describa las transformaciones de la energía que ocurren mientras la potencia es suministrada al elemento de calefacción. b) ¿Cuántos kilogramos de nitrógeno hierven en un período de 4.0 horas?

57. **CIC** Un estudiante mide los datos siguientes en un experimento de calorimetría diseñado para determinar el calor específico del aluminio:

Temperatura inicial del agua y del calorímetro:	70.0°C
Masa del agua:	0.400 kg
Masa del calorímetro:	0.040 kg
Calor específico del calorímetro:	$0.63\text{ kJ/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$
Temperatura inicial del aluminio:	27.0°C
Masa del aluminio:	0.200 kg
Temperatura final de la mezcla:	66.3°C

Utilice estos datos para determinar el calor específico del aluminio. Explique si su resultado está dentro de 15% del valor en la tabla 11.1.

58. **BIO** Del total de la energía usada por el cuerpo, 80% se debe eliminar como exceso de energía térmica y necesita ser disipada. Los mecanismos de eliminación son radiación, evaporación del sudor (2430 kJ/kg), evaporación de los pulmones (38 kJ/h), conducción y convección.

Una persona trabajando en un gimnasio tiene un índice metabólico de 2500 kJ/h . Su temperatura corporal es de 37°C y la temperatura exterior de 24°C . Suponga que la piel tiene un área de 2.0 m^2 y emisividad de 0.97.

a) ¿Con qué rapidez es disipado por radiación su exceso de energía térmica? b) Si la persona elimina 0.40 kg de transpiración durante esa hora ¿con qué rapidez es disipada la energía térmica por la evaporación del sudor? c) ¿Con qué rapidez es eliminada la energía por la evaporación desde los pulmones? d) ¿Con qué rapidez se debe eliminar el exceso de energía restante a través de la conducción y la convección?

59. El helio líquido tiene un punto de ebullición muy bajo, 4.2 K, así como un calor latente de vaporización muy bajo, $2.00 \times 10^4\text{ J/kg}$. Si la energía se transfiere a una tasa de 10.0 W a un contenedor de helio líquido en el punto de ebullición de un calentador eléctrico sumergido, ¿cuánto tiempo tarda en hervir 2.00 kg del líquido?

60. Un grupo de 10 estudiantes que toma un examen tiene una salida de potencia alrededor de 200 W por cada uno de ellos. Suponga que la temperatura inicial del salón es de 20°C y que sus dimensiones son 6.0 m por 15.0 m por 3.0 m. ¿Cuál es la temperatura del salón al final de 1.0 hora si toda la energía permanece en el aire del salón y no se agrega nada desde una fuente exterior? El calor específico del aire es $837\text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$, y su densidad es de alrededor de $1.3 \times 10^{-3}\text{ g/cm}^3$.

61. Una barra de oro (Au) está en contacto térmico con una barra de plata (Ag) de la misma longitud y área (figura P11.61). Un extremo de la barra compuesta se mantiene a 80.0°C , y el extremo opuesto está a 30.0°C . Encuentre la temperatura en la unión cuando el flujo de energía alcanza un estado estacionario.

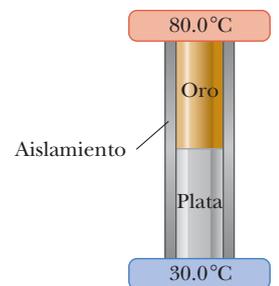


Figura P11.61

62. Una placa de hierro se mantiene contra una rueda de hierro, de modo que una fuerza de fricción de deslizamiento de 50 N actúa entre las dos piezas de metal. La velocidad relativa a la que las dos superficies se deslizan una sobre otra es de 40 m/s. a) Calcule la velocidad a la que la energía mecánica se convierte en energía interna. b) La placa y la rueda tienen masas de 5.0 kg cada una, y también cada una recibe 50% de la energía interna. Si el sistema se hace funcionar durante 10 s como se describe y cada objeto se deja llegar a una temperatura interna uniforme, ¿cuál es el aumento de temperatura resultante?

63. Un automóvil tiene una masa de 1500 kg, y sus frenos de aluminio tienen una masa total de 60.00 kg. a) Si se supone que toda la energía interna transformada por fricción cuando el automóvil se detiene se deposita en los frenos, y se desprecia la transferencia de energía ¿cuántas veces podría frenar el automóvil hasta el reposo, empezando de 25.00 m/s (56 mi/h) antes de que los frenos empiecen a fundirse? (Suponga una temperatura inicial de 20.0°C) b) Identifique algunos efectos que se pasan por alto en el inciso a) pero que es probable sean importantes en una evaluación más realista del aumento de temperatura en los frenos.

64. Tres líquidos están a temperaturas de 10, 20 y 30°C , respectivamente. Se mezclan masas iguales de los primeros

dos líquidos y la temperatura de equilibrio es de 17°C . Luego, masas iguales del segundo y tercero se mezclan y la temperatura de equilibrio llega a 28°C . Encuentre la temperatura de equilibrio cuando se mezclan masas iguales del primero y el tercero.

65. **CIC** Un *calorímetro de flujo* es un aparato que se emplea para medir el calor específico de un líquido. La técnica es medir la diferencia de temperaturas entre los puntos de entrada y salida de una corriente del líquido mientras se agrega energía a una razón conocida. a) Comience con las ecuaciones $Q = mc(\Delta T)$ y $m = \rho V$ y demuestre que la razón a la que se agrega energía al líquido está dado por la expresión $\Delta Q/\Delta t = \rho c(\Delta T)(\Delta V/\Delta t)$. b) En un experimento particular, un líquido de densidad 0.72 g/cm^3 fluye por el calorímetro a razón de $3.5\text{ cm}^3/\text{s}$. En estado estable, se establece una diferencia de temperatura de 5.8°C entre los puntos de entrada y salida cuando se alimenta energía a razón de 40 J/s . ¿Cuál es calor específico del líquido?
66. Una estufa de madera se utiliza para calentar una habitación. La estufa tiene forma cilíndrica con un diámetro de 40.0 cm y una longitud de 50.0 cm , y funciona a una temperatura de 400°F . a) Si la temperatura de la habitación es 70.0°F , determine la cantidad de energía radiante entregada a la habitación por la estufa en cada segundo, si la emisividad es 0.920 . b) Si la habitación es un cuadrado con paredes que tienen 8.00 pies de altura y 25.0 pies de ancho, determine el valor R requerido en las paredes y el techo para mantener la temperatura interior a 70.0°F si la temperatura exterior es de 32.0°F . Observe que no estamos haciendo caso de cualquier calor transportado por la estufa por convección y cualquier energía perdida a través de las paredes (y de las ventanas!) por convección o radiación.
67. Una “cocina solar” consiste en un espejo curvado que refleja la luz del Sol enfocándola sobre el objeto que se desea calentar (figura P11.67). La energía solar por unidad de área que llega a la Tierra en el foco de la cocina solar de 0.50 m de diámetro es 600 W/m^2 . Si se supone que 50% de la energía incidente se convierte en energía térmica, ¿cuánto tiempo llevará hervir 1.0 L de agua que está inicialmente a 20°C ? (Desprecie el calor específico del envase.)

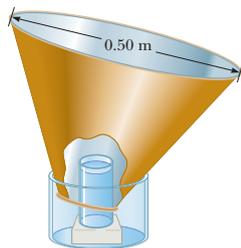


Figura P11.67

68. **BIO** Para las pruebas bacteriológicas de los abastecimientos de agua y en clínicas médicas, las muestras rutinariamente se deben incubar por 24 h a 37°C . Las soluciones estándares a temperatura constante con calefacción eléctrica y control termostático no son algo apropiado en países en desarrollo, sin una operación continua de líneas de energía eléctrica. La Corporación de Voluntariado de Paz y el ingeniero Amy Smith del MIT inventaron una barata incubadora de bajo mantenimiento para satisfacer esta necesidad. El dispositivo consiste en una caja aislada de espuma que contiene varios paque-

tes de un material ceroso que se derrite a 37.0°C , entremezclado entre tubos, platos o botellas que contienen las muestras y el medio de crecimiento (alimento para las bacterias). Fuera de la caja, el material ceroso primero es derretido por una estufa o un colector de energía solar. Después se pone dentro de la caja para mantener las muestras de prueba calientes mientras que solidifica. El calor de fusión del cambio de fase del material es 205 kJ/kg . Modele el aislamiento como un panel con un área superficial de 0.490 m^2 , 9.50 cm de grosor y conductividad de $0.0120\text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$. Suponga que la temperatura exterior es de 23.0°C por 12.0 h y 16.0°C por 12.0 h . a) ¿Cuánta masa del material ceroso se requiere para llevar a cabo la prueba bacteriológica? b) Explique por qué su cálculo puede hacerse sin saber la masa de las muestras de prueba o del aislamiento.

69. La superficie del Sol tiene una temperatura de alrededor de 5800 K . El radio del Sol es $6.96 \times 10^8\text{ m}$. Calcular la energía total radiada por el Sol cada segundo. Supongamos que la emisividad del Sol es 0.986 .
70. **BIO** La evaporación de la transpiración es el mecanismo primario del cuerpo humano para refrescarse. Estime la cantidad de agua que usted perderá cuando se tiende al Sol en la playa por una hora. Utilice un valor de 1000 W/m^2 para la intensidad de luz solar y observe que la energía requerida para evaporar un líquido a una temperatura particular es aproximadamente igual a la suma de la energía requerida para elevar su temperatura al punto de ebullición y el calor latente de evaporación (determinada en el punto de ebullición).
71. En el tiempo $t = 0$, un recipiente contiene una mezcla de 10 kg de agua y una masa desconocida de hielo en equilibrio a 0°C . La temperatura de la mezcla se mide durante una hora, con los siguientes resultados: durante los primeros 50 minutos, la mezcla permanece a 0°C ; de los 50 a 60 minutos la temperatura aumenta constantemente de 0 a 2°C . Despreciando la capacidad calorífica del recipiente, determine la masa de hielo que fue colocado inicialmente en él. Suponga que una energía constante entra al envase.
72. **CIC** Una bandeja de cubos de hielo se llena con 75.0 g de agua. Después de que la bandeja llena alcanza un equilibrio de temperatura a los 20.0°C , se coloca en un congelador a -8.00°C para hacer los cubos de hielo. a) Describa los procesos que ocurren cuando la energía está convirtiendo el agua en hielo. b) Calcule la energía que se debe quitar al agua para hacer cubos de hielo a -8.00°C .
73. Una varilla de aluminio y una varilla de hierro se unen extremo con extremo en buen contacto térmico. Las dos varillas tienen iguales longitudes y radios. El extremo libre de la varilla de aluminio se mantiene a una temperatura de 100°C , y el extremo libre de la varilla de hierro a 0°C . a) Determine la temperatura de la superficie de contacto entre las dos varillas. b) Si cada varilla mide 15 cm de largo y cada una tiene un área de sección transversal de 5.0 cm^2 , ¿qué cantidad de energía es conducida por la combinación en 30 minutos?



Una ciclista es una máquina: ella requiere de combustible y oxígeno para quemarlo, y el resultado es el trabajo que la conduce hacia adelante mientras que su exceso de energía inútil se expulsa por medio de la evaporación del sudor.

Leyes de la termodinámica

12

Según la primera ley de la termodinámica, la energía interna de un sistema puede ser aumentada agregando energía al sistema o realizando trabajo sobre él. Esto significa que la energía interna de un sistema, que es simplemente la suma de las energías cinética y potencial moleculares, puede cambiar como resultado de dos tipos diferentes de transferencia de energía a través de la frontera del sistema. Aunque la primera ley impone la conservación de la energía para la energía agregada por el calor y el trabajo realizado sobre un sistema, no predice cuál de los posibles procesos que respetan la conservación de energía ocurre realmente en la naturaleza.

La segunda ley de la termodinámica, limita a la primera ley, ya que establece cuáles de los procesos permitidos por la primera ley ocurren realmente. Por ejemplo, la segunda ley nos dice que la energía por calor nunca fluye espontáneamente de un objeto frío a uno caliente. Una importante aplicación de esta ley está en el estudio de los motores térmicos (tales como el motor de combustión interna) y de los principios que limitan su eficiencia.

- 12.1** Trabajo en procesos termodinámicos
- 12.2** Primera ley de la termodinámica
- 12.3** Procesos térmicos
- 12.4** Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica
- 12.5** Entropía
- 12.6** Metabolismo humano

12.1 Trabajo en procesos termodinámicos

La energía se puede transferir a un sistema por calor y por trabajo realizado sobre el sistema. En la mayoría de los casos tratados aquí, el sistema es un volumen de gas, lo que nos ayudará a entender el funcionamiento de los motores. Se supondrá que todos los sistemas de gas están en equilibrio termodinámico, de modo que cada parte del gas esté a la misma presión y temperatura. Si no fuera así, la ley de los gases ideales no se aplicaría y la mayor parte de los resultados aquí presentados no serían válidos. Considere un gas en equilibrio contenido en un cilindro equipado en su interior con un pistón móvil (figura activa 12.1a, página 306). El gas ocupa un volumen V y ejerce una presión uniforme P sobre las paredes

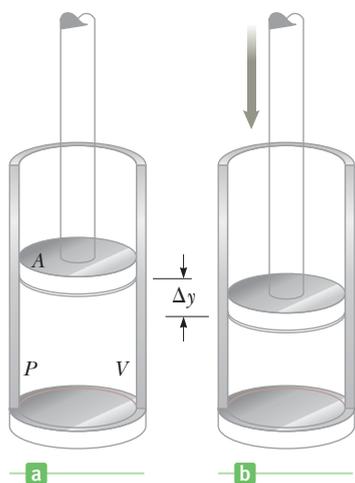


Figura activa 12.1 a) Un gas en un cilindro que ocupa un volumen V a una presión P . b) El pistón es empujado hacia abajo para comprimir el gas.

Tip 12.1 Trabajo realizado "sobre" frente a trabajo realizado "por"

El trabajo realizado *sobre* el gas se denomina W . Esta definición se centra en la energía interna del sistema. El trabajo realizado *por* el gas, por ejemplo en un pistón, se denomina W_{ent} , donde la atención se centra en el aprovechamiento de la energía interna de un sistema para realizar un trabajo sobre algo externo al gas; por esta razón, W y W_{ent} son dos maneras diferentes de mirar la misma cosa. Siempre es cierto que $W = -W_{\text{ent}}$.

del cilindro y el pistón. El gas se comprime lo suficientemente lento, como para permitir que el sistema permanezca esencialmente en equilibrio termodinámico en todo momento. Cuando el pistón es empujado hacia abajo a una distancia Δy por una fuerza externa F , el trabajo hecho sobre el gas es:

$$W = -F\Delta y = -PA\Delta y$$

donde tenemos que la magnitud F de la fuerza externa es igual a PA , porque la presión es la misma en todos lados del sistema (por la suposición de equilibrio). Observe que si el pistón es empujado hacia abajo, $\Delta y = y_f - y_i$ es negativa, así que es necesario un signo negativo explícito en la expresión de W para hacer positivo el trabajo. El cambio en volumen del gas es $\Delta V = A\Delta y$, lo que conduce a la siguiente definición:

El trabajo W realizado sobre un gas a presión constante está dado por

$$W = -P\Delta V \quad [12.1]$$

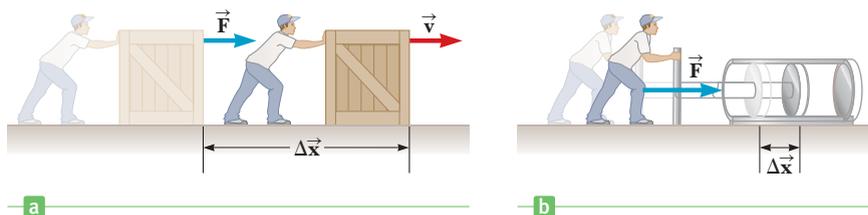
donde P es la presión sobre el gas y ΔV es el cambio de volumen del gas durante el proceso.

Si el gas es comprimido como en la figura activa 12.1b, ΔV es negativo y el trabajo realizado sobre el gas es positivo. Si el gas se expande, ΔV es positivo y el trabajo realizado sobre el gas es negativo. El trabajo hecho por el gas sobre su entorno, W_{ent} , es simplemente el negativo del trabajo hecho sobre el gas. En ausencia de un cambio de volumen, el trabajo realizado sobre el gas es cero.

La definición de trabajo W en la ecuación 12.1 especifica el **trabajo realizado sobre** un gas. En muchos textos, el trabajo W se define como el **trabajo realizado por** un gas. En este texto, el *trabajo realizado* por un gas se denota por W_{ent} . En todos los casos, $W = -W_{\text{ent}}$, por lo que las dos definiciones difieren por un signo menos. La razón más importante para definir el trabajo W como el trabajo realizado *sobre* un gas es hacer que el concepto de trabajo en termodinámica sea consistente con el concepto de trabajo en mecánica. En ésta, el sistema es un objeto y cuando se hace trabajo positivo en ese objeto, su energía aumenta. Cuando el trabajo W realizado sobre un gas tal como se define en la ecuación 12.1 es positivo, la energía interna del gas aumenta, lo cual es consistente con la definición de la mecánica.

En la figura 12.2a el hombre empuja una caja, realizando un trabajo positivo sobre la misma, por lo que la caja se desplaza y por lo tanto, su energía cinética se incrementa. En la figura 12.2b el hombre empuja un pistón hacia la derecha, comprimiendo el gas en el recipiente y realiza un trabajo positivo sobre el gas. La velocidad media de las moléculas del gas aumenta, así que la temperatura y la energía interna del gas aumenta. En consecuencia, hacer un trabajo en una caja aumenta su energía cinética, realizar un trabajo sobre un sistema de gas aumenta su energía interna.

Figura 12.2 a) Cuando se ejerce una fuerza sobre un cajón, el trabajo realizado por esa fuerza aumenta la energía mecánica del cajón. b) Cuando un pistón es empujado, el gas comprime el recipiente, aumentando la energía térmica del gas.



■ EJEMPLO 12.1 Trabajo realizado por un gas en expansión

OBJETIVO Aplicar la definición de trabajo a presión constante.

PROBLEMA En un sistema semejante al que se muestra en la figura activa 12.1, el gas en el cilindro está a una presión de 1.01×10^5 Pa y el pistón tiene un área de 0.100 m^2 . Cuando la energía es lentamente agregada al gas por medio de calor, el pistón es empujado una distancia de 4.00 cm . Calcule el trabajo realizado por la expansión del gas sobre el entorno, W_{ent} , suponiendo que la presión permanece constante.

ESTRATEGIA El trabajo realizado sobre el entorno es el negativo del trabajo realizado sobre el gas dado en la ecuación 12.1. Calcule el cambio de volumen y multiplique por la presión.

SOLUCIÓN

Encuentre el cambio de volumen del gas, ΔV , que es el área de sección transversal multiplicado por el desplazamiento:

$$\Delta V = A \Delta y = (0.100 \text{ m}^2)(4.00 \times 10^{-2} \text{ m}) = 4.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Multiplique este resultado por la presión, para obtener el trabajo realizado por el entorno, W_{ent} :

$$W_{\text{ent}} = P \Delta V = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(4.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 404 \text{ J}$$

COMENTARIOS El volumen del gas aumenta, así que el trabajo realizado sobre el entorno es positivo. El trabajo realizado sobre el sistema durante este proceso es $W = -404 \text{ J}$. La energía requerida para realizar el trabajo positivo sobre el entorno debe venir de la energía del gas.

PREGUNTA 12.1 Si no se agregara energía al gas durante la expansión, ¿podría permanecer constante la presión?

EJERCICIO 12.1 Un gas en un cilindro similar al de la figura 12.1, mueve un pistón con área de 0.200 m^2 mientras que se agrega energía lentamente al sistema. Si $2.00 \times 10^3 \text{ J}$ de trabajo se hace sobre el entorno y la presión del gas en el cilindro permanece constante a $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$, encuentre el desplazamiento del pistón.

RESPUESTA $9.90 \times 10^{-2} \text{ m}$

La ecuación 12.1 se puede utilizar para calcular el trabajo realizado sobre el sistema *solamente* cuando la presión del gas permanece constante durante la expansión o la compresión. Un proceso en el que la presión permanece constante se llama **proceso isobárico**. La gráfica presión contra volumen, o **diagrama PV**, de un proceso isobárico se muestra en la figura 12.3. La curva de esta gráfica se llama *trayectoria* entre los estados inicial y final, donde las flechas indican la dirección del proceso; en este caso, del volumen más grande al más pequeño. El área bajo la curva es:

$$\text{Área} = P(V_f - V_i) = P \Delta V$$

El área bajo la gráfica en un diagrama PV es igual en magnitud al trabajo realizado sobre el gas.

En general, esto es cierto si la presión permanece constante o no durante el proceso. Con el diagrama PV del proceso se encuentra el área por debajo de la gráfica (y sobre el eje horizontal) y esa área será igual en magnitud al trabajo realizado sobre el gas. Si la flecha en la gráfica apunta en la dirección del volumen más grande, el trabajo realizado sobre el gas es negativo. Si la flecha en la gráfica apunta en la dirección del volumen más pequeño, el trabajo hecho sobre el gas es positivo.

Siempre que se haga trabajo negativo sobre un sistema, se realiza trabajo positivo por el sistema sobre su entorno. El trabajo negativo hecho sobre el sistema representa una pérdida de energía del sistema; el costo de realizar trabajo positivo sobre el entorno.

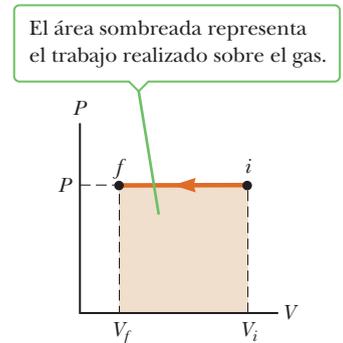


Figura 12.3 Diagrama PV para un gas que se comprime a presión constante.

Examen rápido

12.1 Por inspección visual, ordene los diagramas de la figura 12.4 del trabajo más negativo realizado sobre el sistema, al trabajo más positivo realizado sobre el sistema a) a, b, c, d; b) a, c, b, d; c) d, b, c, a; d) d, a, c, b.

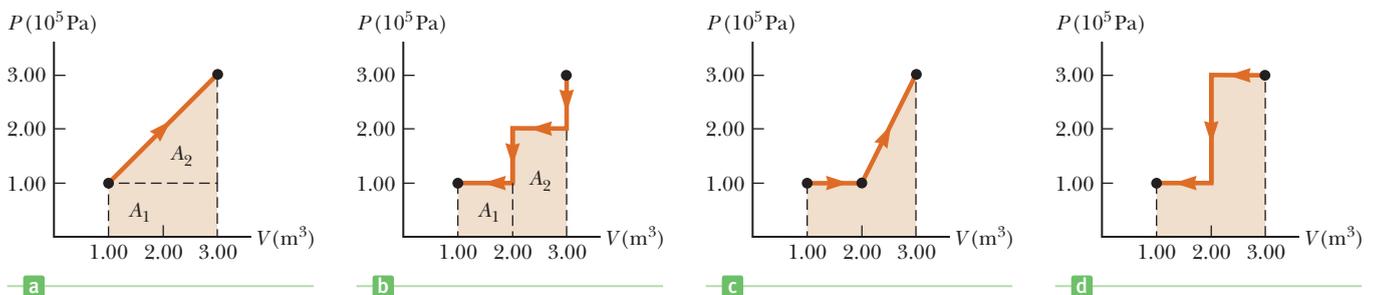


Figura 12.4 (Examen rápido 12.1 y ejemplo 12.2)

Observe que todas las gráficas de la figura 12.4 tienen los mismos puntos extremos, pero las áreas por debajo de las curvas son diferentes. El trabajo realizado sobre el sistema depende de la trayectoria tomada del diagrama PV .

■ EJEMPLO 12.2 Trabajo y diagramas PV

OBJETIVO Calcular el trabajo a partir de un diagrama PV .

PROBLEMA Encuentre la magnitud del trabajo realizado sobre el gas en **a)** la figura 12.4a y **b)** la figura 12.4b.

ESTRATEGIA Las regiones en cuestión están compuestas de rectángulos y triángulos. Utilice fórmulas elementales de geometría para encontrar las áreas bajo cada curva. Verifique la dirección de las flechas para determinar los signos.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el trabajo realizado sobre el gas en la figura 12.4a.

Calcule las áreas A_1 y A_2 en la figura 12.4a. A_1 es un rectángulo y A_2 es un triángulo.

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{altura} \times \text{ancho} = (1.00 \times 10^5 \text{ Pa})(2.00 \text{ m}^3) \\ &= 2.00 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{1}{2} \text{ base} \times \text{altura} \\ &= \frac{1}{2}(2.00 \text{ m}^3)(2.00 \times 10^5 \text{ Pa}) = 2.00 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Área} = A_1 + A_2 = 4.00 \times 10^5 \text{ J}$$

$$W = -4.00 \times 10^5 \text{ J}$$

Sume las áreas (las flechas apuntan hacia el incremento de volumen, así que el trabajo realizado sobre el gas es negativo):

b) Encuentre el trabajo realizado sobre el gas en la figura 12.4b.

Calcule las áreas de las dos regiones rectangulares:

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{altura} \times \text{ancho} = (1.00 \times 10^5 \text{ Pa})(1.00 \text{ m}^3) \\ &= 1.00 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \text{altura} \times \text{ancho} = (2.00 \times 10^5 \text{ Pa})(1.00 \text{ m}^3) \\ &= 2.00 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

$$\text{Área} = A_1 + A_2 = 3.00 \times 10^5 \text{ J}$$

$$W = +3.00 \times 10^5 \text{ J}$$

Sume las áreas (las flechas apuntan hacia la disminución del volumen, así que el trabajo hecho sobre el gas es positivo):

COMENTARIOS Observe que en ambos casos las trayectorias en los diagramas PV empiezan y terminan en los mismos puntos, pero las respuestas son diferentes.

PREGUNTA 12.2 ¿Se hace trabajo sobre un sistema durante un proceso en el cual su volumen permanece constante?

EJERCICIO 12.2 Calcule el trabajo realizado sobre el sistema en las figuras 12.4c y 12.4d.

RESPUESTAS $-3.00 \times 10^5 \text{ J}$, $+4.00 \times 10^5 \text{ J}$

12.2 Primera ley de la termodinámica

La **primera ley de la termodinámica** es otra ley de la conservación de la energía que relaciona cambios en la energía interna, la energía asociada con la posición y la vibración de todas las moléculas de un sistema, con las transferencias de energía debidas al calor y al trabajo. La primera ley es universalmente válida, aplicable a toda clase de procesos y proporciona una conexión entre los mundos microscópicos y macroscópicos.

Hay dos maneras en que la energía se puede transferir entre un sistema y su entorno: haciendo el trabajo que requiere un desplazamiento macroscópico de un objeto con el uso de una fuerza y por el intercambio de energía interna que ocurre a través de la frontera del sistema, a menudo por calor. El calor es la transferencia de energía entre un sistema y su entorno debido a una diferencia de temperatura y por lo general ocurre a través de uno o más de los mecanismos de radiación, conducción y convección. Por ejemplo, en la

figura 12.5 gases calientes y radiación influyen en el cilindro, elevando su temperatura, y la energía Q se transmite por conducción al gas, donde se distribuye principalmente por medio de la convección. Existen otros procedimientos para la transferencia de energía en un sistema, como una reacción química o una descarga eléctrica. Toda la energía Q intercambiada entre el sistema y el entorno y cualquier trabajo realizado a través de la expansión o compresión del sistema resulta en un **cambio en la energía interna**, ΔU , del sistema. Un cambio en la energía interna da como resultado cambios mensurables en las variables macroscópicas del sistema tales como la presión, la temperatura y el volumen. La relación entre el cambio de la energía interna ΔU , la energía Q y el trabajo W realizado sobre el sistema viene dada por la **primera ley de la termodinámica**:

Si un sistema experimenta un cambio de un estado inicial a un estado final, entonces el cambio en la energía interna ΔU del sistema, está dado por:

$$\Delta U = U_f - U_i = Q + W \quad [12.2]$$

donde Q es el intercambio de energía entre el sistema y el entorno y W es el trabajo realizado sobre el sistema.

◀ Primera ley de la termodinámica

La cantidad Q es positiva cuando la energía es transferida dentro del sistema y negativa cuando la energía es eliminado del sistema.

La figura 12.5 ilustra la primera ley para un cilindro de gas y cómo el sistema interactúa con el entorno. El cilindro de gas contiene un pistón sin fricción, y el bloque está inicialmente en reposo. La energía Q se introduce en el gas a medida que el gas se expande contra el pistón con una presión P constante. Hasta que el pistón se detiene, ejerce una fuerza sobre el bloque, el cual acelera sobre una superficie sin fricción. W es el trabajo negativo realizado sobre el gas, y al mismo tiempo de trabajo positivo $W_{ent} = -W$ efectuado por el gas en el bloque. Agregando el trabajo realizado sobre el medio ambiente, W_{ent} , al trabajo realizado sobre el gas, W , el trabajo neto es cero, como debe ser, porque la energía debe ser conservada.

De la ecuación 12.2 también vemos que la energía interna de cualquier sistema aislado debe permanecer constante, por lo que $\Delta U = 0$. Aun cuando un sistema no está aislado, el cambio de energía interna será cero si el sistema pasa por un proceso cíclico en el que todas las variables termodinámicas de presión, volumen, temperatura y moles de gas vuelven a sus valores originales.

Es importante recordar que las cantidades en la ecuación 12.2 se refieren a un *sistema*, no al efecto sobre el entorno del sistema a través del trabajo. Si el sistema es vapor caliente que se expande contra un pistón, como en la figura 12.5, el trabajo W del sistema es *negativo* porque el pistón sólo puede expandirse a expensas de la energía interna del gas. El trabajo W_{ent} realizado por el vapor caliente sobre el *entorno* (en este caso, moviendo un pistón que lo guía) es positivo, pero eso no es trabajo W en la ecuación 12.2. Esta manera de definir el trabajo en la primera ley es consistente con el concepto de trabajo definido en el capítulo 5. En ambos casos, mecánicos y térmicos, el efecto sobre el sistema es el mismo: el trabajo positivo aumenta la energía del sistema, y el trabajo negativo disminuye la energía del sistema.

Tip 12.2 Convenciones de doble signo

Muchos libros de física e ingeniería presentan la primera ley como $\Delta U = Q - W$, con un signo menos entre el calor y el trabajo. La razón es que en ese enfoque, el trabajo se define como el trabajo realizado por el sistema en lugar de sobre el sistema, como en nuestro enfoque. Usando nuestra notación, este equivalente de la primera ley podría leerse $\Delta U = Q - W_{ent}$.

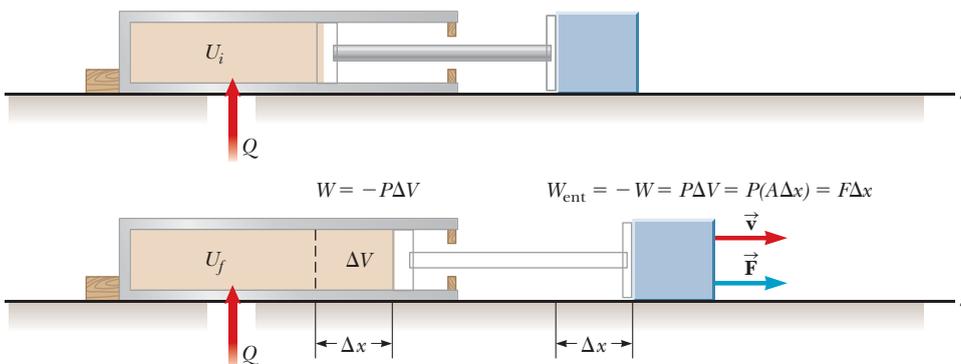


Figura 12.5 La energía térmica Q es transferida al gas, incrementando su energía interna. El gas presiona contra el pistón, desplazándolo y realizando un trabajo mecánico sobre el entorno o, equivalentemente, realizando un trabajo negativo sobre el gas, reduciendo la energía interna.

Algunos libros de texto identifican W como el trabajo realizado por el gas sobre su entorno. Esto es una formulación equivalente, pero significa que W debe llevar un signo menos en la primera ley. Esta convención no es consistente con las discusiones anteriores sobre la energía de un sistema, porque cuando W es positivo el sistema *pierde* energía, mientras que en el capítulo 5, que W sea positivo significa que el sistema *gana* energía. Por esa razón, esta vieja convención no se utiliza en este libro.

■ EJEMPLO 12.3 Calentando un gas

OBJETIVO Combinar la primera ley de la termodinámica con el trabajo realizado durante un proceso a presión constante.

PROBLEMA Un gas ideal absorbe $5.00 \times 10^3 \text{ J}$ de energía mientras realiza $2.00 \times 10^3 \text{ J}$ de trabajo sobre el entorno durante un proceso a presión constante. **a)** Calcule el cambio en la energía interna del gas. **b)** Si la energía interna ahora disminuye hasta $4.50 \times 10^3 \text{ J}$ y $7.50 \times 10^3 \text{ J}$ es expulsado del sistema, encuentre el cambio de volumen, suponiendo un proceso a presión constante a $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$.

ESTRATEGIA El inciso a) requiere sustituir la información dada en la primera ley, ecuación 12.2. Observe que, sin embargo, el trabajo dado está hecho sobre el *entorno*. El negativo de esta cantidad es el trabajo hecho sobre el *sistema*, representando una pérdida de energía interna. En el inciso b) es cuestión de sustituir la ecuación por el trabajo a presión constante en la primera ley y resolver para el cambio de volumen.

SOLUCIÓN

a) Calcule el cambio de energía interna del gas.

Sustituya los valores en la primera ley, observando que el trabajo hecho sobre el gas es negativo:

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W = 5.00 \times 10^3 \text{ J} - 2.00 \times 10^3 \text{ J} \\ &= 3.00 \times 10^3 \text{ J}\end{aligned}$$

b) Encuentre el cambio de volumen, observando que ΔU y Q son ambos negativos en este caso.

Sustituya la ecuación por el trabajo realizado a presión constante en la primera ley:

$$\begin{aligned}\Delta U &= Q + W = Q - P\Delta V \\ -4.50 \times 10^3 \text{ J} &= -7.50 \times 10^3 \text{ J} - (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})\Delta V\end{aligned}$$

Resuelva para el cambio de volumen, ΔV :

$$\Delta V = -2.97 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

COMENTARIOS El cambio en volumen es negativo, así que el sistema se contrae, haciendo trabajo negativo sobre el entorno, mientras el trabajo W sobre el sistema es positivo.

PREGUNTA 12.3 Verdadero o Falso: Cuando un gas ideal se expande a presión constante, el cambio en la energía interna debe ser positivo.

EJERCICIO 12.3 Suponga que la energía interna de un gas ideal se eleva por $3.00 \times 10^3 \text{ J}$ a una presión constante de $1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$, mientras el sistema gana $4.20 \times 10^3 \text{ J}$ de energía por calor. Encuentre el cambio de volumen del sistema.

RESPUESTA $1.20 \times 10^{-2} \text{ m}^3$

Recuerde que una expresión para la energía interna de un gas ideal es

$$U = \frac{3}{2}nRT \quad [12.3a]$$

Esta expresión es válida sólo para un gas ideal *monoatómico*, lo que significa que las partículas del gas consisten en un solo átomo. El cambio de energía interna, U , para tales gases está dado por

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T \quad [12.3b]$$

El **calor específico molar a volumen constante** de un gas ideal *monoatómico*, C_v , está definido por

$$C_v \equiv \frac{3}{2}R \quad [12.4]$$

Tabla 12.1 Calor específico molar de varios gases

Gas	Calor específico molar (J/mol · K) ^a			
	C_p	C_v	$C_p - C_v$	$\gamma = C_p/C_v$
Gases monoatómicos				
He	20.8	12.5	8.33	1.67
Ar	20.8	12.5	8.33	1.67
Ne	20.8	12.7	8.12	1.64
Kr	20.8	12.3	8.49	1.69
Gases diatómicos				
H ₂	28.8	20.4	8.33	1.41
N ₂	29.1	20.8	8.33	1.40
O ₂	29.4	21.1	8.33	1.40
CO	29.3	21.0	8.33	1.40
Cl ₂	34.7	25.7	8.96	1.35
Gases poliatómicos				
CO ₂	37.0	28.5	8.50	1.30
SO ₂	40.4	31.4	9.00	1.29
H ₂ O	35.4	27.0	8.37	1.30
CH ₄	35.5	27.1	8.41	1.31

^a Todos los valores excepto para el agua se obtuvieron a 300 K.

El cambio en la energía interna de un gas ideal puede también ser escrito

$$\Delta U = nC_v \Delta T \quad [12.5]$$

Para gases ideales, esta expresión es siempre válida, aunque el volumen no es constante. El valor del calor específico molar, sin embargo, depende del gas y puede variar bajo diferentes condiciones de presión y temperatura.

Un gas con un calor específico molar más grande requiere más energía para realizar un cambio de temperatura dado. La magnitud del calor específico molar depende de la estructura de la molécula del gas y de cuántas maneras diferentes puede almacenar energía. Un gas monoatómico tal como el helio puede almacenar energía como movimiento en tres diferentes direcciones.

Un gas como el hidrógeno, por otra parte, es diatómico en rangos de temperatura normales y además del movimiento en tres direcciones, puede también girar en dos diferentes direcciones. Así, las moléculas de hidrógeno pueden almacenar energía en la forma de movimiento traslacional y además pueden almacenar energía al caer. Más aún, las moléculas pueden también almacenar energía en las vibraciones de sus átomos constitutivos. Un gas integrado por moléculas con más formas de almacenar energía tendrá un calor específico molar más grande.

Cada diferente manera en que una molécula de gas puede almacenar energía se le llama *grado de libertad*. Cada grado de libertad contribuye $\frac{1}{2}R$ al calor específico molar. Ya que un gas atómico ideal puede moverse en tres direcciones, tiene una capacidad de calor específico molar $C_v = 3(\frac{1}{2}R) = \frac{3}{2}R$. Un gas diatómico como el oxígeno, O₂, puede también caer en dos diferentes direcciones. Esto agrega $2 \times \frac{1}{2}R = R$ al calor específico molar, como $C_v = \frac{5}{2}R$ para los gases diatómicos. La rotación alrededor de un gran eje que conecta los dos átomos es generalmente insignificante. La vibración de los átomos en una molécula puede también contribuir a la capacidad calórica. A menudo, un análisis completo de un sistema dado es complejo, así que, en general, el calor específico molar se debe determinar experimentalmente. Algunos valores representativos de C_v se pueden encontrar en la tabla 12.1.

12.3 Procesos térmicos

Los ciclos de un motor pueden ser muy complejos. Afortunadamente, a menudo se pueden analizar en una serie de procesos simples. En esta sección los cuatro procesos más

comunes serán estudiados e ilustrados por su efecto sobre un gas ideal. Cada proceso corresponde a hacer constante una de las variables en la ley de los gases ideales o suponiendo que una de las tres cantidades en la primera ley de la termodinámica es cero. Los cuatro procesos se llaman isobárico (presión constante), isotérmico (temperatura constante, correspondiendo a $\Delta U = 0$), isovolumétrico (volumen constante, correspondiendo a $W = 0$) y adiabático (ninguna transferencia de energía térmica o $Q = 0$). Naturalmente, muchos otros procesos no caen en una de estas cuatro categorías, así que serán cubiertos en una quinta categoría, llamada genérica. Lo esencial en cada caso es ser capaz de calcular las tres cantidades termodinámicas en la primera ley: el trabajo W , la transferencia de energía térmica Q , y el cambio de energía interna ΔU .

Procesos isobáricos

Recuerde de la sección 12.1 que en un proceso isobárico la presión permanece constante cuando el gas se expande o es comprimido. Un gas expandido hace trabajo sobre su entorno, dado por $W_{\text{ent}} = P \Delta V$. El diagrama PV de una expansión isobárica está dado en la figura 12.3. Como se analizó previamente, la magnitud del trabajo realizado sobre el gas es justamente el área bajo la trayectoria en su diagrama PV ; la altura multiplicada por su longitud o $P \Delta V$. El negativo de esta cantidad, $W = -P \Delta V$, es la energía perdida por el gas, porque éste hace trabajo cuando se expande. Esta cantidad debe sustituirse en la primera ley.

El trabajo hecho por el gas sobre su entorno debe venir a expensas del cambio en su energía interna, ΔU . Debido a que el cambio en la energía interna en un gas ideal está dado por $\Delta U = nC_v \Delta T$, la temperatura de un gas en expansión debe disminuir cuando la energía interna disminuye. El volumen en expansión y la disminución de temperatura significan que la presión debe estar decreciendo, de acuerdo con la ley de los gases ideales, $PV = nRT$. Consecuentemente, la única manera de que tal proceso pueda permanecer a presión constante es que la energía térmica Q sea transferida dentro del gas por calor. Reacomodando la primera ley, obtenemos

$$Q = \Delta U - W = \Delta U + P \Delta V$$

Ahora, podemos sustituir la expresión en la ecuación 12.3b por ΔU y usar la ley de los gases ideales para sustituir $P \Delta V = nR \Delta T$:

$$Q = \frac{3}{2}nR \Delta T + nR \Delta T = \frac{5}{2}nR \Delta T$$

Otro modo de expresar esta transferencia de energía por calor es

$$Q = nC_p \Delta T \quad [12.6]$$

donde $C_v = \frac{5}{2}R$. Para los gases ideales, la capacidad de calor molar a presión constante, C_p , es la suma de la capacidad de calor molar a volumen constante, C_v , y la constante del gas R :

$$C_p = C_v + R \quad [12.7]$$

Esto puede verse en la cuarta columna de la tabla 12.1, donde $C_p - C_v$ es calculado para un número de gases diferentes. Los distintos trabajos se aproximan a R en casi todos los casos.

■ EJEMPLO 12.4 La expansión de un gas

OBJETIVO Utilizar el calor específico molar y la primera ley en un proceso a presión constante.

PROBLEMA Suponga que un sistema de gas ideal monoatómico a 2.00×10^5 Pa y una temperatura inicial de 293 K se expande lentamente a presión constante de un volumen de 1.00 L a 2.50 L. **a)** Encuentre el trabajo realizado sobre el entorno **b)** Encuentre el cambio en la energía interna del gas. **c)** Utilice la primera ley de la termodinámica para obtener la energía térmica absorbida por el gas durante el proceso.

d) Utilice la capacidad de calor molar a presión constante para encontrar la energía térmica absorbida. **e)** ¿Cómo cambiarían las respuestas para un gas ideal diatómico?

ESTRATEGIA Este problema implica principalmente sustituir valores en las ecuaciones apropiadas. Sustituya el trabajo a presión constante en la ecuación para obtener la respuesta

para el inciso a). Use en el inciso b) la ley ideal de los gases dos veces: para encontrar la temperatura cuando $V = 2.00$ L y encontrar el número de moles del gas. Estas cantidades se pueden entonces utilizar para obtener el cambio en la energía interna, ΔU . El inciso c) puede entonces ser resuelto sus-

tituyendo en la primera ley, obteniendo Q , la respuesta se comprueba en la parte d) con la ecuación 12.6. Repita estos pasos para el inciso e) después de aumentar el calor específico molar por R debido a los dos grados de libertad adicionales asociados a un gas diatómico.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el trabajo hecho sobre el entorno.

Aplique la definición de trabajo a presión constante:

$$W_{\text{ent}} = P\Delta V = (2.00 \times 10^5 \text{ Pa})(2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$$

$$W_{\text{ent}} = 3.00 \times 10^2 \text{ J}$$

b) Encuentre el cambio en la energía interna del gas.

Primero, obtenga la temperatura final utilizando la ley de los gases ideales, observando que $P_i = P_f$:

$$\frac{P_f V_f}{P_i V_i} = \frac{T_f}{T_i} \rightarrow T_f = T_i \frac{V_f}{V_i} = (293 \text{ K}) \frac{(2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}$$

$$T_f = 733 \text{ K}$$

Utilizando otra vez la ley de los gases ideales, obtenga el número de moles de gas:

$$n = \frac{P_i V_i}{RT_i} = \frac{(2.00 \times 10^5 \text{ Pa})(1.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3)}{(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(293 \text{ K})}$$

$$= 8.21 \times 10^{-2} \text{ mol}$$

Utilice estos resultados y las cantidades dadas para calcular el cambio en energía interna, ΔU :

$$\Delta U = nC_v\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T$$

$$= \frac{3}{2}(8.21 \times 10^{-2} \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(733 \text{ K} - 293 \text{ K})$$

$$\Delta U = 4.50 \times 10^2 \text{ J}$$

c) Utilice la primera ley para obtener la energía transferida por calor.

Resuelva la primera ley para Q y sustituya ΔU y $W = -W_{\text{ent}} = -3.00 \times 10^2 \text{ J}$:

$$\Delta U = Q + W \rightarrow Q = \Delta U - W$$

$$Q = 4.50 \times 10^2 \text{ J} - (-3.00 \times 10^2 \text{ J}) = 7.50 \times 10^2 \text{ J}$$

d) Utilice la capacidad de calor molar a presión constante para obtener Q .

Sustituya los valores en la ecuación 12.6:

$$Q = nC_p\Delta T = \frac{5}{2}nR\Delta T$$

$$= \frac{5}{2}(8.21 \times 10^{-2} \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(733 \text{ K} - 293 \text{ K})$$

$$= 7.50 \times 10^2 \text{ J}$$

e) ¿Cómo cambiarían las respuestas para un gas diatómico?

Obtenga el nuevo cambio en energía térmica, ΔU , observando que $C_v = \frac{5}{2}R$ para un gas diatómico:

$$\Delta U = nC_v\Delta T = \left(\frac{5}{2} + 1\right)nR\Delta T$$

$$= \frac{7}{2}(8.21 \times 10^{-2} \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(733 \text{ K} - 293 \text{ K})$$

$$\Delta U = 7.50 \times 10^2 \text{ J}$$

Obtenga la nueva energía transferida por calor, Q :

$$Q = nC_p\Delta T = \left(\frac{5}{2} + 1\right)nR\Delta T$$

$$= \frac{7}{2}(8.21 \times 10^{-2} \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(733 \text{ K} - 293 \text{ K})$$

$$Q = 1.05 \times 10^3 \text{ J}$$

COMENTARIOS El inciso b) también se podría solucionar con menos pasos utilizando la ecuación del gas ideal $PV = nRT$ una vez que el trabajo es conocido. La presión y el número de moles se mantienen constantes, y el gas es ideal, por lo que $P\Delta V = nR\Delta T$. Teniendo en cuenta que $C_v = \frac{3}{2}R$, el cambio en la energía interna ΔU se puede calcular en términos de la expresión para trabajo:

$$\Delta U = nC_v\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T = \frac{3}{2}P\Delta V = \frac{3}{2}W$$

Métodos similares pueden utilizarse en otros procesos.

(continúa)

PREGUNTA 12.4 Verdadero o Falso: Durante una compresión a presión constante, la temperatura de un gas ideal siempre debe disminuir y el gas siempre debe agotar la energía térmica ($Q < 0$).

EJERCICIO 12.4 Suponga que un gas ideal monoatómico a una temperatura inicial de 475 K se comprime de 3.00 a 2.00 L mientras su presión permanece constante a 1.00×10^5 Pa. Encuentre a) el trabajo realizado sobre el gas, b) el cambio en la energía interna y c) la energía transferida por calor, Q .

RESPUESTAS a) 1.00×10^2 J b) -150 J c) -250 J

Procesos adiabáticos

En un proceso adiabático, ninguna energía se incorpora o abandona el sistema por calor. Tal sistema está térmicamente aislado de su entorno. Sin embargo, generalmente el sistema no se aísla mecánicamente, así que aún puede hacer trabajo. Un proceso suficientemente rápido se puede considerar aproximadamente adiabático porque no hay tiempo para ninguna transferencia significativa de la energía por calor.

Para procesos adiabáticos $Q = 0$, así que la primera ley resulta

$$\Delta U = W \text{ (proceso adiabático)}$$

El trabajo hecho durante un proceso adiabático puede calcularse encontrando el cambio en la energía interna. Alternativamente, el trabajo puede calcularse de un diagrama PV . Para un gas ideal que experimenta un proceso adiabático, se puede demostrar que

$$PV^\gamma = \text{constante} \quad [12.8a]$$

donde

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad [12.8b]$$

se conoce como *índice adiabático* del gas. Los valores de los índices adiabáticos para diferentes gases se dan en la tabla 12.1. Después de calcular la constante del lado derecho de la ecuación 12.8a y resolver para la presión P , el área bajo la curva en el diagrama PV puede encontrarse por conteo de cuadros, obteniendo el trabajo.

Si a un gas caliente se le permite expandirse tan rápidamente que no hay tiempo para que la energía entre o abandone el sistema por calor, el trabajo realizado sobre el gas es negativo y la energía interna decrece. Este decrecimiento ocurre porque la energía cinética es transferida de las moléculas de gas al pistón en movimiento. Semejante expansión adiabática es de importancia práctica y es cercana a la realizada en un motor de combustión interna, cuando una mezcla de aire y gasolina es encendida y se expande rápidamente contra un pistón. El siguiente ejemplo ilustra este proceso.

■ EJEMPLO 12.5 Trabajo y el cilindro de un motor

OBJETIVO Utilizar la primera ley para encontrar el trabajo realizado en un proceso adiabático.

PROBLEMA En un motor de automóvil que funciona a una frecuencia de 1.80×10^3 rev/min (revoluciones por minuto), la expansión de un gas caliente a alta presión contra un pistón ocurre en cerca de 10 ms. Debido a que la transferencia de energía por calor toma típicamente un tiempo del orden de minutos a horas, es seguro suponer que poca energía abandona el gas caliente durante la expansión. Encuentre el trabajo realizado por el gas sobre el pistón durante esta expansión adiabática, suponiendo que el cilindro del

motor contiene 0.100 moles de un gas ideal monoatómico que va de 1.200×10^3 K a 4.00×10^2 K, temperaturas típicas de un motor durante la expansión.

ESTRATEGIA Encuentre el cambio en la energía interna utilizando las temperaturas dadas. Para un proceso adiabático, esto es igual al trabajo realizado sobre el gas, que es el negativo del trabajo hecho sobre el entorno, en este caso, el pistón.

SOLUCIÓN

Empiece con la primera ley, tomando $Q = 0$:

$$W = \Delta U - Q = \Delta U - 0 = \Delta U$$

Encuentre ΔU de la expresión para la energía interna de un gas ideal monoatómico:

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_f - U_i = \frac{3}{2}nR(T_f - T_i) \\ &= \frac{3}{2}(0.100 \text{ mol})(8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(4.00 \times 10^2 \text{ K} - 1.20 \times 10^3 \text{ K}) \\ \Delta U &= -9.97 \times 10^2 \text{ J}\end{aligned}$$

El cambio en la energía interna es igual al trabajo realizado sobre el sistema, el cual es el negativo del trabajo hecho sobre el pistón:

$$W_{\text{piston}} = -W = -\Delta U = 9.97 \times 10^2 \text{ J}$$

COMENTARIOS El trabajo realizado sobre el pistón se realiza a expensas de la energía interna del gas. En una expansión adiabática ideal, la pérdida de energía interna es completamente convertida en trabajo útil. En un motor real, siempre hay pérdidas.

PREGUNTA 12.5 En una expansión adiabática de un gas ideal, ¿por qué siempre debe ser negativo el cambio de temperatura?

EJERCICIO 12.5 Un gas monoatómico ideal con volumen 0.200 L es rápidamente comprimido, por lo que el proceso puede considerarse adiabático. Si el gas está inicialmente a $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ y $3.00 \times 10^2 \text{ K}$ y la temperatura final es de 477 K, encuentre el trabajo realizado por el gas sobre el entorno, W_{ent} .

RESPUESTA -17.9 J

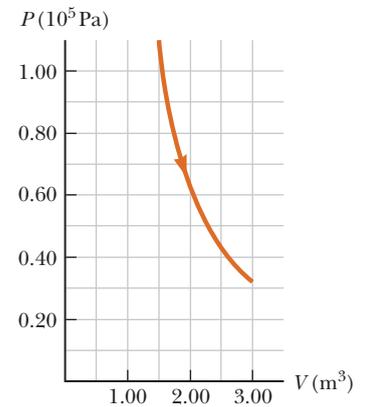
■ EJEMPLO 12.6 Una expansión adiabática

OBJETIVO Utilizar la relación presión adiabática contra volumen para encontrar un cambio en la presión y el trabajo realizado sobre el gas.

PROBLEMA Un gas monoatómico ideal a una presión inicial de $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ se expande adiabáticamente desde un volumen inicial de 1.50 m^3 , duplicando su volumen (figura 12.6). **a)** Encuentre la nueva presión. **b)** Esboce el diagrama PV y estime el trabajo realizado sobre el gas.

ESTRATEGIA No hay bastante información para resolver este problema con la ley de los gases ideales. En vez de esto, utilice la ecuación 12.8a, b y la información dada para encontrar el índice adiabático y la constante C para el proceso. Para el inciso b), bosqueje el diagrama PV y cuente los cuadros para estimar el área bajo la gráfica, que da como resultado el trabajo.

Figura 12.6 (Ejemplo 12.6) Diagrama PV de una expansión adiabática: la gráfica de $P = CV^{-\gamma}$, donde C es una constante y $\gamma = C_p/C_v$.



SOLUCIÓN

a) Encuentre la nueva presión.

Primero, calcule el índice adiabático:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} = \frac{5}{3}$$

Utilice la ecuación 12.8a para encontrar la constante C :

$$\begin{aligned}C &= P_1 V_1^\gamma = (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(1.50 \text{ m}^3)^{5/3} \\ &= 1.99 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^5\end{aligned}$$

La constante C se fija para todo el proceso y puede utilizarse para encontrar P_2 :

$$\begin{aligned}C &= P_2 V_2^\gamma = P_2 (3.00 \text{ m}^3)^{5/3} \\ 1.99 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^5 &= P_2 (6.24 \text{ m}^5) \\ P_2 &= 3.19 \times 10^4 \text{ Pa}\end{aligned}$$

b) Estime el trabajo realizado sobre el gas a partir del diagrama PV .

Cuente el número de cuadros entre $V_1 = 1.50 \text{ m}^3$ y $V_2 = 3.00 \text{ m}^3$ en la gráfica de $P = (1.99 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^5)V^{-5/3}$ en el diagrama PV mostrado en la figura 12.6:

Número de cuadros ≈ 17

Cada cuadro tiene un "área" de $5.00 \times 10^3 \text{ J}$.

$$W \approx -17 \cdot 5.00 \times 10^3 \text{ J} = -8.5 \times 10^4 \text{ J}$$

(continúa)

COMENTARIOS La respuesta exacta, obtenida con cálculo, es -8.43×10^4 J, así que nuestro resultado es una buena estimación. La respuesta es negativa porque el gas se está expandiendo, haciendo positivo el trabajo sobre el entorno, de manera que reduce su propia energía interna.

PREGUNTA 12.6 Para una expansión adiabática entre dos volúmenes dados y una presión inicial, ¿qué gas hace más trabajo, uno monoatómico o uno diatómico?

EJERCICIO 12.6 Repita los cálculos anteriores para un gas diatómico ideal que se expande adiabáticamente de un volumen inicial de 0.500 m^3 a uno final de 1.25 m^3 , empezando a una presión de $P_1 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$. Utilice la misma técnica que en el ejemplo.

RESPUESTAS $P_2 = 2.80 \times 10^4 \text{ Pa}$, $W \approx -4 \times 10^4 \text{ J}$

Procesos isovolumétricos

Un **proceso isovolumétrico**, algunas veces llamado proceso *isocórico* (que es más difícil de recordar), ocurre a volumen constante, correspondiendo a rectas verticales en un diagrama PV . Si el volumen no cambia, no hay trabajo realizado sobre o por el sistema, así que $W = 0$ y la primera ley de la termodinámica se lee

$$\Delta U = Q \quad (\text{proceso isovolumétrico})$$

Este resultado nos dice que **en un proceso isovolumétrico, el cambio en la energía interna de un sistema es igual a la energía transferida al sistema por calor**. De la ecuación 12.5, la energía transferida por calor en procesos a un volumen constante está dada por

$$Q = nC_v \Delta T \quad [12.9]$$

■ EJEMPLO 12.7 Un proceso isovolumétrico

OBJETIVO Aplicar la primera ley a un proceso a volumen constante.

PROBLEMA Un gas monoatómico ideal tiene una temperatura $T = 3.00 \times 10^2 \text{ K}$ y con un volumen constante de 1.50 L . Si hay 5.00 moles de gas. **a)** ¿Cuánta energía térmica debe agregarse para elevar la temperatura del gas a $3.80 \times 10^2 \text{ K}$? **b)** Calcule el cambio en la presión del gas, ΔP . **c)** ¿Cuánta energía térmica se requeriría si el gas fuera ideal y diatómico? **d)** Calcule el cambio en la presión para el gas diatómico.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuánta energía térmica debe agregarse para elevar la temperatura del gas a $3.80 \times 10^2 \text{ K}$?

Aplique la ecuación 12.9 utilizando el hecho de que $C_v = 3R/2$ para un gas monoatómico ideal:

$$\begin{aligned} (1) \quad Q &= \Delta U = nC_v \Delta T = \frac{3}{2} nR \Delta T \\ &= \frac{3}{2} (5.00 \text{ mol}) (8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol}) (80.0 \text{ K}) \\ Q &= 4.99 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$

b) Calcule el cambio en la presión del gas, ΔP .

Use la ecuación de gas ideal $PV = nRT$ y la ecuación (1) para relacionar ΔP con Q :

$$\Delta(PV) = (\Delta P)V = nR \Delta T = \frac{2}{3} Q$$

Despejando ΔP :

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{2}{3} \frac{Q}{V} = \frac{2}{3} \frac{4.99 \times 10^3 \text{ J}}{1.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \\ &= 2.22 \times 10^6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

c) ¿Cuánta energía térmica se requeriría si el gas fuera ideal y diatómico?

Repita los cálculos ahora con $C_v = 5R/2$:

$$Q = \Delta U = nC_v \Delta T = \frac{5}{2} nR \Delta T = 8.31 \times 10^3 \text{ J}$$

d) Calcule el cambio en la presión para el gas diatómico.

Use el resultado del inciso c) y repita los cálculos del inciso b), con $2/5$ en lugar de $2/3$ por tratarse de un gas diatómico:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{2}{5} \frac{Q}{V} = \frac{2}{5} \frac{8.31 \times 10^3 \text{ J}}{1.50 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \\ &= 2.22 \times 10^6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El volumen constante de un gas diatómico, en las mismas condiciones, requiere más energía térmica por cada grado de cambio de temperatura debido a que hay más formas de almacenar energía para las moléculas diatómicas. A pesar de la energía extra añadida, el gas diatómico llega a la misma presión final que el gas monoatómico.

PREGUNTA 12.7 Si la misma cantidad de energía encontrada en el inciso a) se transfiriera a 5.00 moles de dióxido de carbono a la misma temperatura inicial, ¿cómo se compara la temperatura final?

EJERCICIO 12.7 a) Encuentre el cambio en temperatura ΔT de 22.0 moles de un gas monoatómico ideal si éste absorbe 9 750 J a volumen constante de 2.40 L. b) ¿Cuál es el cambio en la temperatura ΔP ? c) Si el sistema es un gas diatómico ideal, encuentre el cambio en su temperatura. d) Encuentre el cambio en la presión del gas diatómico.

RESPUESTAS a) 35.6 K b) 2.71×10^6 Pa c) 21.3 K d) 1.63×10^6 Pa

Procesos isotérmicos

Durante un proceso isotérmico, la temperatura de un sistema no cambia. En un gas ideal la energía interna U depende sólo de la temperatura, así que $\Delta U = 0$ porque $\Delta T = 0$. En este caso, la primera ley de la termodinámica da

$$W = -Q \quad (\text{proceso isotérmico})$$

Vemos que si el sistema es un gas ideal que experimenta un proceso isotérmico, el trabajo realizado sobre el sistema es igual al negativo de la energía térmica transferida al sistema. Tales procesos pueden visualizarse en la figura 12.7. Un cilindro lleno de gas está en contacto con un gran depósito de energía que puede intercambiar ésta con el gas sin cambiar su temperatura. Para una temperatura constante del gas ideal

$$P = \frac{nRT}{V}$$

donde el numerador del lado derecho de la ecuación es constante. El diagrama PV de un proceso isotérmico típico se muestra en la figura 12.8, comparado con un proceso adiabático. Cuando el proceso es adiabático, la presión cae más rápidamente debido a que la energía no puede ser transferida al sistema. En una expansión isotérmica, el sistema pierde energía mediante el trabajo en el entorno, pero recupera una cantidad igual de energía a través de la frontera.

Utilizando métodos de cálculo, se puede demostrar que el trabajo realizado sobre el entorno durante un proceso isotérmico está dado por

$$W_{\text{ent}} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \quad [12.10]$$

El símbolo “ln” en la ecuación 12.10 es una abreviación para el logaritmo natural, discutido en el apéndice A. El trabajo W realizado sobre el gas es justamente el negativo de W_{ent} .

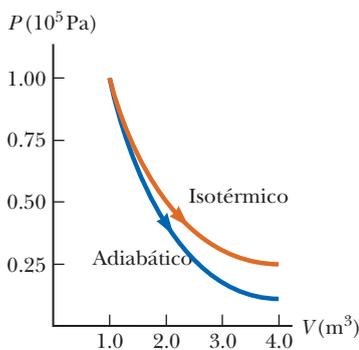


Figura 12.8 El diagrama PV de una expansión isotérmica, gráfica de $P = CV^{-1}$, donde C es una constante, en comparación con una expansión adiabática, $P = C_A V^{-\gamma}$. C_A es una constante igual a la magnitud de C en este caso, pero con diferentes unidades.

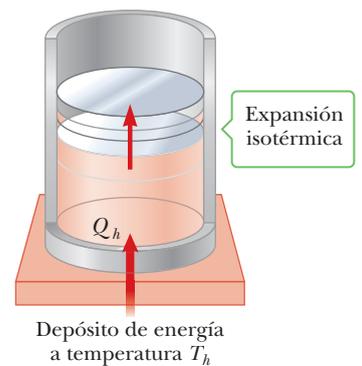


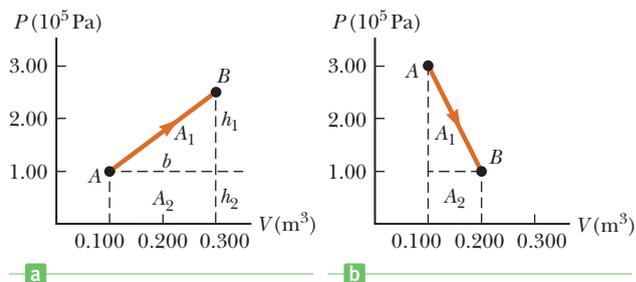
Figura 12.7 El gas en el cilindro se expande isotérmicamente mientras esté en contacto con un depósito a temperatura T_h .

EJEMPLO 12.8 Un globo en expansión isotérmica**OBJETIVO** Encontrar el trabajo realizado durante una expansión isotérmica.**PROBLEMA** Un globo contiene 5.00 moles de un gas monoatómico ideal. Cuando la energía es agregada al sistema por calor (digamos por absorción del Sol), el volumen crece 25% a una temperatura constante de 27.0 °C. Encuentre el trabajo W_{ent} realizado por el gas del globo en expansión, la energía térmica Q transferida al gas y el trabajo W realizado sobre el gas.**ESTRATEGIA** Asegúrese de convertir las temperaturas a grados kelvin. Utilice la ecuación 12.10 del trabajo isotérmico para encontrar el trabajo W realizado sobre el globo, que satisface la igualdad $W = -W_{\text{ent}}$. Además, para un proceso isotérmico, la energía térmica Q transferida al sistema es igual al trabajo W_{ent} hecho por el sistema sobre el entorno.**SOLUCIÓN**Sustituya en la ecuación 12.10, encontrando el trabajo realizado durante la expansión isotérmica. Observe que $T = 27.0^\circ\text{C} = 3.00 \times 10^2 \text{ K}$.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{ent}} &= nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \\
 &= (5.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(3.00 \times 10^2 \text{ K}) \\
 &\quad \times \ln\left(\frac{1.25 V_0}{V_0}\right) \\
 W_{\text{ent}} &= 2.78 \times 10^3 \text{ J} \\
 Q = W_{\text{ent}} &= 2.78 \times 10^3 \text{ J}
 \end{aligned}$$

El negativo de esta cantidad es el trabajo realizado sobre el gas:

$$W = -W_{\text{ent}} = -2.78 \times 10^3 \text{ J}$$

COMENTARIOS Observe la relación entre el trabajo realizado sobre el gas, el trabajo realizado sobre el entorno y la energía transferida. Estas relaciones son ciertas para todo proceso isotérmico.**PREGUNTA 12.8** Verdadero o Falso: En un proceso isotérmico no hay transferencia de energía térmica.**EJERCICIO 12.8** Suponga que subsecuentemente a este calentamiento, se remueven $1.50 \times 10^4 \text{ J}$ de energía térmica del gas isotérmico. Encuentre el volumen final en términos del volumen inicial del ejemplo, V_0 . (*Sugerencia:* Siga los mismos pasos del ejemplo, pero a la inversa. También observe que el volumen inicial en este ejercicio es $1.25 V_0$.)**RESPUESTA** $0.375V_0$ **Caso general**Cuando un proceso no sigue ninguno de los cuatro modelos, aún es posible utilizar la primera ley para obtener información acerca de él. El trabajo puede calcularse a partir del área bajo la curva en el diagrama PV , si la temperatura en los puntos extremos puede encontrarse, ΔU se obtiene de la ecuación 12.5, como se ilustra en el siguiente ejemplo.**EJEMPLO 12.9** Un proceso general**OBJETIVO** Encontrar las cantidades termodinámicas para un proceso que no cae en ninguna de las cuatro categorías discutidas anteriormente.**PROBLEMA** 4.00 moles de un gas monoatómico ideal se expanden de un volumen inicial de 0.100 m^3 a un volumen final de 0.300 m^3 y a una presión de $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ (figura 12.9a). Calcule **a)** el trabajo realizado sobre el gas, **b)** el cambio de energía interna del gas y **c)** la energía térmica transferida al gas.**ESTRATEGIA** El trabajo realizado sobre el gas es igual al negativo del área bajo la curva en el diagrama PV . Utilice la ley de los gases ideales para obtener el cambio de temperatura y, subsecuentemente, el cambio en la energía interna. Finalmente, la primera ley da la energía térmica transferida por calor.**Figura 12.9** a) (Ejemplo 12.9) b) (Ejercicio 12.9)

SOLUCIÓN

a) Encuentre el trabajo realizado sobre el gas calculando el área bajo la curva de la figura 12.9a.

Encuentre A_1 , el área del triángulo:

$$A_1 = \frac{1}{2}bh_1 = \frac{1}{2}(0.200 \text{ m}^3)(1.50 \times 10^5 \text{ Pa}) = 1.50 \times 10^4 \text{ J}$$

Encuentre A_2 , el área del rectángulo:

$$A_2 = bh_2 = (0.200 \text{ m}^3)(1.00 \times 10^5 \text{ Pa}) = 2.00 \times 10^4 \text{ J}$$

Sume las dos áreas (el gas está expandiéndose, así que el trabajo realizado sobre el gas es negativo, por lo que debe ponerse un signo de menos):

$$W = -(A_1 + A_2) = -3.50 \times 10^4 \text{ J}$$

b) Encuentre el cambio en la energía interna durante el proceso.

Calcule la temperatura en los puntos A y B con la ley de los gases ideales:

$$T_A = \frac{P_A V_A}{nR} = \frac{(1.00 \times 10^5 \text{ Pa})(0.100 \text{ m}^3)}{(4.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})} = 301 \text{ K}$$

$$T_B = \frac{P_B V_B}{nR} = \frac{(2.50 \times 10^5 \text{ Pa})(0.300 \text{ m}^3)}{(4.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})} = 2.26 \times 10^3 \text{ K}$$

Calcule el cambio en energía interna:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{3}{2}nR\Delta T \\ &= \frac{3}{2}(4.00 \text{ mol})(8.31 \text{ J/K} \cdot \text{mol})(2.26 \times 10^3 \text{ K} - 301 \text{ K}) \\ \Delta U &= 9.77 \times 10^4 \text{ J} \end{aligned}$$

c) Calcule Q con la primera ley:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U - W = 9.77 \times 10^4 \text{ J} - (-3.50 \times 10^4 \text{ J}) \\ &= 1.33 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Mientras sea posible calcular el trabajo, los ciclos que involucran estos procesos más exóticos pueden ser completamente analizados. Por lo general, sin embargo, es necesario utilizar cálculo. Observe que la solución al inciso b) podría haber sido facilitado por otra aplicación de $PV = nRT$:

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR\Delta T = \frac{3}{2}\Delta(PV) = \frac{3}{2}(P_B V_B - P_A V_A)$$

Este resultado significa que, incluso en ausencia de información sobre el número de moles o las temperaturas, el problema podría resolverse conociendo las presiones inicial y final y los volúmenes.

PREGUNTA 12.9 Para una curva con bajas presiones pero los mismos puntos extremos que en la figura 12.9a, ¿podría la energía térmica transferida ser a) más pequeña que, b) igual a o c) mayor que la energía térmica transferida de una trayectoria en línea recta?

EJERCICIO 12.9 La figura 12.9b representa un proceso que involucra 3.00 moles de un gas ideal monoatómico en expansión de 0.100 m^3 a 0.200 m^3 . Encuentre el trabajo realizado sobre el sistema, el cambio en la energía interna del sistema y la energía térmica transferida en el proceso.

RESPUESTAS $W = -2.00 \times 10^4 \text{ J}$, $\Delta U = -1.50 \times 10^4 \text{ J}$, $Q = 5.00 \times 10^3 \text{ J}$

Dados todos los diferentes procesos y las fórmulas, es fácil confundirse cuando hay acercamientos a uno de estos problemas de gases ideales, aunque la mayoría de las veces sólo se requiere sustituir en la fórmula correcta. Los hechos esenciales y las fórmulas se compilan en la tabla 12.2, ambos para referencias fáciles; también se muestran semejanzas y diferencias entre los procesos.

Examen rápido

12.2 Identifique las trayectorias A, B, C y D en la figura 12.10 como isobárico, isotérmico, isovolumétrico o adiabático. Para la trayectoria B, $Q = 0$.

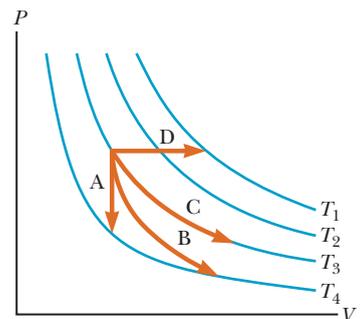


Figura 12.10 (Examen rápido 12.2) Identifique la naturaleza de las trayectorias A, B, C y D.

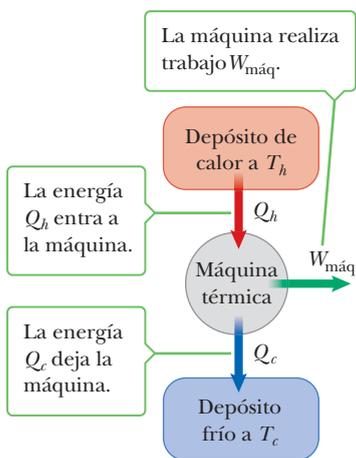


Figura activa 12.11 En esta representación esquemática de una máquina térmica, parte de la energía térmica del depósito de calor se convierte en trabajo mientras que el resto es expulsado al depósito frío.

Proceso cíclico ►

Tabla 12.2 La primera ley y procesos termodinámicos (gases ideales)

Proceso	ΔU	Q	W
Isobárico	$nC_v \Delta T$	$nC_p \Delta T$	$-P\Delta V$
Adiabático	$nC_v \Delta T$	0	ΔU
Isovolúmetrico	$nC_v \Delta T$	ΔU	0
Isotérmico	0	$-W$	$-nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right)$
General	$nC_v \Delta T$	$\Delta U - W$	(PV área)

12.4 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

Una **máquina térmica** admite energía por calor y la convierte parcialmente a otras formas de energía, como eléctrica y mecánica. En un proceso típico para producir electricidad en una central eléctrica, por ejemplo, el carbón o algún otro combustible se quema y la energía interna que resulta se utiliza para convertir agua en vapor. El vapor se dirige a las paletas de una turbina, proporcionándole una rotación. Finalmente, la energía mecánica asociada a esta rotación se utiliza para mover un generador eléctrico. En otra máquina térmica, por ejemplo el motor de combustión interna de un automóvil, la energía entra al motor cuando el combustible se inyecta en un cilindro y una parte de esta energía se convierte en energía mecánica.

Una máquina térmica somete generalmente a alguna sustancia a un **trabajo cíclico**¹ durante el cual 1) se transfiere energía térmica (calor) a partir de una fuente a alta temperatura, 2) la máquina realiza trabajo, 3) la máquina expulsa energía por medio de calor a una fuente que está a una temperatura más baja. Como ejemplo, considere la operación de un motor de vapor en el que la sustancia de trabajo es agua. Esta agua se somete a un ciclo en el cual primero se evapora en una caldera y enseguida se expande contra un pistón. Después que el vapor se condensa con agua para enfriamiento, vuelve a la caldera y se repite el proceso.

Es útil dibujar una máquina térmica esquemáticamente, como en la figura activa 12.11. La máquina absorbe la energía Q_h del depósito caliente, realiza trabajo W_{maq} y luego cede energía Q_c al depósito frío. (Observe que el trabajo *negativo* está hecho *sobre* el motor, de modo que $W = -W_{maq}$.) Como la sustancia de trabajo pasa durante un ciclo, sus energías internas inicial y final son iguales, o sea $\Delta U = 0$. Por lo tanto, de la primera ley de la termodinámica

$$\Delta U = 0 = Q + W \rightarrow Q_{total} = -W = W_{maq}$$

La última ecuación demuestra que **el trabajo W_{maq} realizado por una máquina térmica es igual a la energía total absorbida por la máquina**. Como podemos ver en la figura 12.11, $Q_{neto} = |Q_h| - |Q_c|$. Por lo tanto,

$$W_{maq} = |Q_h| - |Q_c| \quad [12.11]$$

Ordinariamente, una transferencia de energía térmica Q puede ser positiva o negativa, así que el uso del signo de valor absoluto hace explícitos los signos de Q_h y Q_c .

Si la sustancia de trabajo es un gas, **el trabajo realizado por una máquina térmica en un proceso cíclico es el área encerrada por la curva que representa el proceso en un diagrama PV**. Esta área se muestra para un proceso cíclico arbitrario en la figura 12.12.

La **eficiencia térmica** e de una máquina térmica se define como el trabajo realizado por el motor, W_{maq} , dividido por la energía absorbida durante un ciclo:

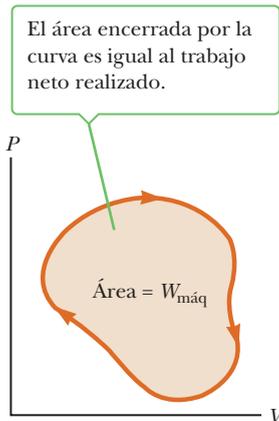


Figura 12.12 El diagrama PV para un proceso cíclico arbitrario.

¹ Hablando estrictamente, el motor de un automóvil no es una máquina térmica de acuerdo con la descripción de un proceso cíclico. Esto porque la mezcla aire-combustible pasa sólo por un ciclo y después se le despidió por el sistema de escape.

$$e \equiv \frac{W_{\text{máq}}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} \quad [12.12]$$

Podemos pensar la eficiencia térmica como la razón entre lo que se gana (trabajo) y lo que se cede (transferencia de energía a la temperatura más alta). La ecuación 12.12 demuestra que una máquina térmica tiene 100% de eficiencia ($e = 1$) sólo si $Q_c = 0$, es decir, si no se expulsa energía al depósito frío. En otras palabras, una máquina térmica con eficiencia perfecta tendría que expulsar toda la energía de entrada por trabajo mecánico. Esto es imposible, como puede verse en la sección 12.5.

EJEMPLO 12.10 La eficiencia de un motor

OBJETIVO Aplicar la fórmula de la eficiencia de una máquina térmica.

PROBLEMA Durante un ciclo, un motor extrae $2.00 \times 10^3 \text{ J}$ de energía de un depósito caliente y transfiere $1.50 \times 10^3 \text{ J}$ a un depósito frío. **a)** Encuentre la eficiencia térmica del motor. **b)** ¿Cuánto trabajo realiza este motor en un ciclo? **c)** ¿Cuánta potencia genera el motor a través de cuatro ciclos en 2.50 s?

ESTRATEGIA Aplique la ecuación 12.12 para obtener la eficiencia térmica; después utilice la primera ley adaptada al motor (ecuación 12.11), para encontrar el trabajo realizado en un ciclo. Para obtener la potencia generada, divida el trabajo realizado en cuatro ciclos entre el tiempo que toma correr estos ciclos.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la eficiencia térmica del motor.

Sustituya Q_c y Q_h en la ecuación 12.12:

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{1.50 \times 10^3 \text{ J}}{2.00 \times 10^3 \text{ J}} = 0.250, \text{ o } 25.0\%$$

b) ¿Cuánto trabajo realiza este motor en un ciclo?

Aplique la primera ley en la forma de la ecuación 12.11 para encontrar el trabajo realizado por el motor:

$$W_{\text{máq}} = |Q_h| - |Q_c| = 2.00 \times 10^3 \text{ J} - 1.50 \times 10^3 \text{ J} = 5.00 \times 10^2 \text{ J}$$

c) Encuentre la potencia de salida del motor.

Multiplique la respuesta del inciso b) por cuatro y divida entre el tiempo:

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{4.00 \times (5.00 \times 10^2 \text{ J})}{2.50 \text{ s}} = 8.00 \times 10^2 \text{ W}$$

COMENTARIOS Problemas como este, usualmente se reducen a resolver dos ecuaciones con dos incógnitas, como aquí, donde las dos ecuaciones son la de la eficiencia y la de la primera ley, y las incógnitas son la eficiencia y el trabajo realizado por el motor.

PREGUNTA 12.10 ¿Puede mejorarse siempre la eficiencia de un motor aumentando la energía térmica puesta en el sistema durante un ciclo? Explique.

EJERCICIO 12.10 La energía absorbida por un motor es tres veces mayor que el trabajo que realiza. **a)** ¿Cuál es su eficiencia térmica? **b)** ¿Qué parte de la energía absorbida es expulsada hacia el depósito frío? **c)** ¿Cuál es la potencia de salida del motor si la energía de entrada es 1650 J cada ciclo y ocurre durante dos ciclos cada 3 segundos?

RESPUESTAS a) $\frac{1}{3}$ b) $\frac{2}{3}$ c) 367 W

EJEMPLO 12.11 Analizando un ciclo de una máquina

OBJETIVO Combinar varios conceptos para analizar un ciclo de una máquina.

PROBLEMA Una máquina térmica contiene un gas ideal monoatómico confinado en un cilindro con un pistón. El gas empieza en A, donde $T = 3.00 \times 10^2 \text{ K}$ (véase la figura 12.13a). El proceso $B \rightarrow C$ es una expansión isotérmica.

a) Encuentre el número de moles n del gas y la temperatura en B. **b)** Encuentre ΔU , Q y W para el proceso isovolumétrico $A \rightarrow B$. **c)** Repita para el proceso isotérmico $B \rightarrow C$. **d)** Repita para el proceso isobárico $C \rightarrow A$. **e)** Encuentre el cambio

(continúa)

neto en la energía interna para el ciclo completo. *f*) Encuentre la energía térmica Q_h transferida en el sistema, la energía térmica rechazada, Q_c , la eficiencia térmica y el trabajo neto sobre el entorno realizado por la máquina.

ESTRATEGIA En el inciso a) n , T y V pueden hallarse a partir de la ley de los gases ideales, la cual conecta los valores en equilibrio de P , V y T . Una vez que la temperatura T es conocida en los puntos A , B y C , el cambio en la energía interna, ΔU , puede calcularse de la fórmula de la tabla 12.2 para cada proceso. De manera similar pueden calcularse Q y W deducidos de la primera ley, utilizando las técnicas aplicadas en los ejemplos de un solo proceso.

SOLUCIÓN

a) Encuentre n y T_B con la ley de los gases ideales:

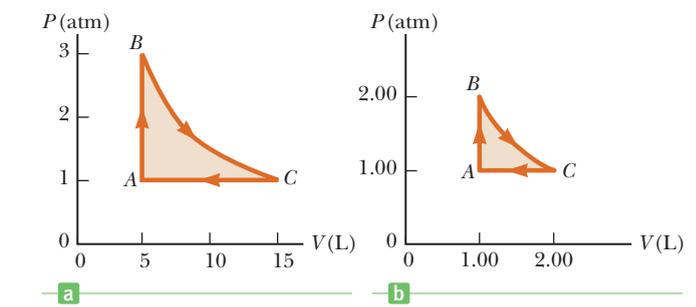


Figura 12.13 a) (Ejemplo 12.11) b) (Ejercicio 12.11)

$$n = \frac{P_A V_A}{RT_A} = \frac{(1.00 \text{ atm})(5.00 \text{ L})}{(0.0821 \text{ L} \cdot \text{atm}/\text{mol} \cdot \text{K})(3.00 \times 10^2 \text{ K})} = 0.203 \text{ mol}$$

$$T_B = \frac{P_B V_B}{nR} = \frac{(3.00 \text{ atm})(5.00 \text{ L})}{(0.203 \text{ mol})(0.0821 \text{ L} \cdot \text{atm}/\text{mol} \cdot \text{K})} = 9.00 \times 10^2 \text{ K}$$

b) Encuentre ΔU_{AB} , Q_{AB} y W_{AB} para un proceso $A \rightarrow B$ a volumen constante.

Calcule ΔU_{AB} , observando que $C_v = \frac{3}{2}R = 12.5 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}$:

$$\Delta U_{AB} = nC_v \Delta T = (0.203 \text{ mol})(12.5 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K}) \times (9.00 \times 10^2 \text{ K} - 3.00 \times 10^2 \text{ K})$$

$$\Delta U_{AB} = 1.52 \times 10^3 \text{ J}$$

$$W_{AB} = 0$$

$$Q_{AB} = \Delta U_{AB} = 1.52 \times 10^3 \text{ J}$$

$\Delta V = 0$ para procesos isovolumétricos, así que no hay trabajo realizado:

Podemos encontrar Q_{AB} de la primera ley:

c) Encuentre ΔU_{BC} , Q_{BC} , y W_{BC} para el proceso isotérmico $B \rightarrow C$.

Este proceso es isotérmico, así que la temperatura no cambia y el cambio en la energía interna es cero:

$$\Delta U_{AB} = nC_v \Delta T = 0$$

Calcule el trabajo realizado sobre el sistema, utilizando el negativo de la ecuación 12.10:

$$W_{BC} = -nRT \ln \left(\frac{V_C}{V_B} \right) = -(0.203 \text{ mol})(8.31 \text{ J}/\text{mol} \cdot \text{K})(9.00 \times 10^2 \text{ K}) \times \ln \left(\frac{1.50 \times 10^{-2} \text{ m}^3}{5.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \right)$$

$$W_{BC} = -1.67 \times 10^3 \text{ J}$$

Calcule Q_{BC} a partir de la primera ley:

$$0 = Q_{BC} + W_{BC} \rightarrow Q_{BC} = -W_{BC} = 1.67 \times 10^3 \text{ J}$$

d) Encuentre ΔU_{CA} , Q_{CA} y W_{CA} para un proceso isobárico $C \rightarrow A$.

Calcule el trabajo sobre el sistema, con la presión constante:

$$W_{CA} = -P \Delta V = -(1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(5.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 1.50 \times 10^{-2} \text{ m}^3)$$

$$W_{CA} = 1.01 \times 10^3 \text{ J}$$

Encuentre el cambio en la energía interna, ΔU_{CA} :

$$\Delta U_{CA} = \frac{3}{2}nR \Delta T = \frac{3}{2}(0.203 \text{ mol})(8.31 \text{ J}/\text{K} \cdot \text{mol}) \times (3.00 \times 10^2 \text{ K} - 9.00 \times 10^2 \text{ K})$$

$$\Delta U_{CA} = -1.52 \times 10^3 \text{ J}$$

Calcule la energía térmica, Q_{CA} , de la primera ley:

$$Q_{CA} = \Delta U_{CA} - W_{CA} = -1.52 \times 10^3 \text{ J} - 1.01 \times 10^3 \text{ J} \\ = -2.53 \times 10^3 \text{ J}$$

e) Encuentre el cambio neto en la energía interna, ΔU_{neto} , para el ciclo:

$$\Delta U_{\text{neto}} = \Delta U_{AB} + \Delta U_{BC} + \Delta U_{CA} \\ = 1.52 \times 10^3 \text{ J} + 0 - 1.52 \times 10^3 \text{ J} = 0$$

f) Encuentre la energía de entrada, Q_h ; la energía rechazada, Q_c ; la eficiencia térmica, y el trabajo neto realizado por la máquina:

Sume todas las contribuciones positivas para encontrar Q_h :

$$Q_h = Q_{AB} + Q_{BC} = 1.52 \times 10^3 \text{ J} + 1.67 \times 10^3 \text{ J} \\ = 3.19 \times 10^3 \text{ J}$$

Sume todas las contribuciones negativas (en este caso, hay sólo una):

$$Q_c = -2.53 \times 10^3 \text{ J}$$

Encuentre la eficiencia térmica y el trabajo neto realizado por el motor:

$$e = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{2.53 \times 10^3 \text{ J}}{3.19 \times 10^3 \text{ J}} = 0.207 \\ W_{\text{máq}} = -(W_{AB} + W_{BC} + W_{CA}) \\ = -(0 - 1.67 \times 10^3 \text{ J} + 1.01 \times 10^3 \text{ J}) \\ = 6.60 \times 10^2 \text{ J}$$

COMENTARIOS Los problemas cíclicos son muy largos, pero los pasos individuales son a menudo sustituciones cortas. Observe que el cambio en la energía interna para el ciclo es cero y que el trabajo neto realizado sobre el entorno es idéntico a la energía térmica neta transferida, ambas como deben ser.

PREGUNTA 12.11 Si BC fuera una trayectoria recta, ¿sería afectado el trabajo realizado por el ciclo? ¿Cómo?

EJERCICIO 12.11 4.05×10^{-2} moles de un gas ideal monoatómico pasan a través del proceso mostrado en la figura 12.13b. La temperatura en el punto A es $3.00 \times 10^2 \text{ K}$ y está a $6.00 \times 10^2 \text{ K}$ durante el proceso isotérmico $B \rightarrow C$. a) Hallar Q , ΔU , y W para el proceso a volumen constante. $A \rightarrow B$. b) Haga lo mismo para el proceso isotérmico $B \rightarrow C$. c) Repita para el proceso a presión constante $C \rightarrow A$. d) Encuentre Q_h , Q_c y la eficiencia. e) Encuentre $W_{\text{máq}}$.

RESPUESTAS a) $Q_{AB} = \Delta U_{AB} = 151 \text{ J}$, $W_{AB} = 0$ b) $\Delta U_{BC} = 0$, $Q_{BC} = -W_{BC} = 1.40 \times 10^2 \text{ J}$ c) $Q_{CA} = -252 \text{ J}$, $\Delta U_{CA} = -151 \text{ J}$, $W_{CA} = 101 \text{ J}$ d) $Q_h = 291 \text{ J}$, $Q_c = -252 \text{ J}$, $e = 0.134$ e) $W_{\text{máq}} = 39 \text{ J}$

Refrigeradores y bombas de calor

Las máquinas térmicas pueden funcionar al revés. En este caso, la energía se inyecta en la máquina, modelada como trabajo W en la figura activa 12.14, resultando la extracción de energía del depósito frío y transferida al depósito caliente. El sistema actúa como una bomba de calor, un ejemplo común de la operación de un refrigerador (figura 12.15 en la siguiente página). La energía Q_c se extrae del interior del refrigerador y se entrega como energía Q_h , al aire más caliente de la cocina. El trabajo se hace en la unidad del compresor del refrigerador, comprimiendo un refrigerante tal como el freón, provocando el aumento de la temperatura.

El acondicionador de una casa es otro ejemplo de una bomba térmica. Algunos hogares son calentados y enfriados por bombas térmicas. En invierno, la bomba térmica de calor extrae energía Q_c del aire frío exterior y entrega de energía Q_h en el aire caliente interior. En verano la energía Q_h es removida del aire frío interior, mientras la energía Q_c expulsa aire caliente al exterior.

Para un refrigerador o un aire acondicionado, una bomba térmica funcionando en modo de enfriamiento, lo que usted paga es el trabajo W , en términos de la energía eléctrica que hace funcionar al compresor, mientras que Q_c es el beneficio deseado. El más eficiente refrigerador o acondicionador de aire es aquel que remueve la cantidad más grande de energía del depósito frío con la menor cantidad de trabajo.

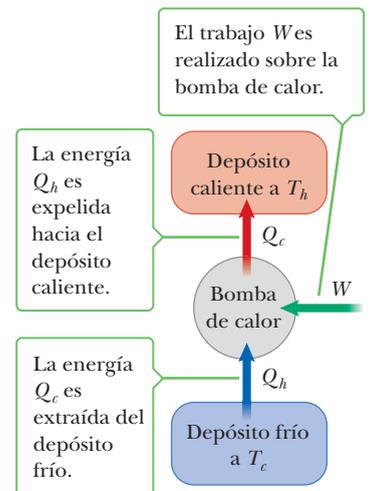


Figura activa 12.14 Parte trasera de un refrigerador doméstico. El aire que rodea las bobinas es el depósito caliente.

Las bobinas en la parte trasera del refrigerador transfieren energía en forma de aire.



© Charles D. Winters/Cengage Learning

Figura 12.15 Parte trasera de un refrigerador doméstico. El aire que rodea las bobinas es el depósito caliente.

El coeficiente de operación (COP) para un refrigerador o un acondicionador de aire es la magnitud de la energía extraída de un depósito frío $|Q_c|$, dividido entre el trabajo W realizado por el dispositivo:

$$\text{COP}(\text{modo de enfriamiento}) = \frac{|Q_c|}{W} \quad [12.13]$$

Unidades SI: adimensionales

Cuanto más grande es este cociente, mejor es el funcionamiento, porque más energía está siendo removida por una cantidad dada de trabajo. Un buen refrigerador o acondicionador de aire tendrá un COP de 5 o 6.

Una bomba de calor que funciona en modo de calefacción, calienta el interior de una casa en invierno extrayendo energía del aire al aire libre más frío. Esta afirmación puede parecer paradójica, pero recuerde que este proceso es equivalente a un refrigerador que quita energía de su interior y que la expulsa en la cocina.

El coeficiente del funcionamiento de una bomba de calor que funciona en el modo de calefacción es la magnitud de la energía rechazada al depósito caliente, $|Q_h|$, dividido por el trabajo W hecho por la bomba:

$$\text{COP}(\text{modo de calentamiento}) = \frac{|Q_h|}{W} \quad [12.14]$$

Unidades SI: adimensionales

En efecto, el COP de una bomba de calor en el modo de calefacción es la razón de lo que usted gana (energía entregada al interior de su hogar) a lo que usted cede (trabajo de entrada). Los valores típicos para este COP son mayores que 1, porque $|Q_h|$ es generalmente mayor que W .

En una bomba de calor de agua subterránea, la energía se extrae en el invierno del agua profunda en la tierra más bien que del aire exterior, mientras que la energía se entrega a esa agua en el verano. Esta estrategia aumenta la eficiencia, a lo largo de todo el año, de las unidades de calentamiento y enfriamiento porque el agua subterránea está a una temperatura más alta que el aire en invierno y a una temperatura más fresca que el aire en verano.

■ EJEMPLO 12.12 Enfriando los sobrantes

OBJETIVO Aplicar el coeficiente de operación de un refrigerador.

PROBLEMA Un recipiente de 2.00 L con sobrantes de sopa a una temperatura de 323 K se mete a un refrigerador. Suponga que el calor específico de la sopa es igual que el del agua y la densidad es $1.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. El refrigerador enfría la sopa a 283 K. **a)** Si el COP del refrigerador es 5.00, encuentre la energía requerida, bajo la forma de trabajo, para enfriar la sopa. **b)** Si el compresor tiene una potencia de 0.250 caballos de fuerza, ¿por qué intervalo mínimo de tiempo debe funcionar para enfriar la sopa a 283 K? (El tiempo mínimo supone que la sopa se enfría a la misma

razón que la bomba de calor expulsa energía térmica del refrigerador.)

ESTRATEGIA La solución de este problema requiere de tres pasos: primero, encuentre la masa m de la sopa. Segundo, utilizando $Q = mc \Delta T$, donde $Q = Q_c$, encuentre la energía transferida requerida para enfriar la sopa. Tercero, sustituya Q_c y el COP en la ecuación 12.13, resolviendo para W . Divida el trabajo por la potencia para obtener una estimación del tiempo requerido para enfriar la sopa.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el trabajo necesario para enfriar la sopa.

Calcule la masa de la sopa:

$$m = \rho V = (1.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3) = 2.50 \text{ kg}$$

Encuentre la energía transferida requerida para enfriar la sopa:

$$\begin{aligned} Q_c &= Q = mc \Delta T \\ &= (2.50 \text{ kg})(4190 \text{ J/kg} \cdot \text{K})(283 \text{ K} - 323 \text{ K}) \\ &= -4.19 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Sustituya Q_c y el COP en la ecuación 12.13:

$$\text{COP} = \frac{|Q_c|}{W} = \frac{4.19 \times 10^5 \text{ J}}{W} = 5.00$$

$$W = 8.38 \times 10^4 \text{ J}$$

b) Encuentre el tiempo necesario para enfriar la sopa.

Convierta los caballos de fuerza a watts:

$$P = (0.250 \text{ caballos de fuerza})(746 \text{ W}/1 \text{ caballos de fuerza}) = 187 \text{ W}$$

Divida el trabajo por la potencia para encontrar el tiempo transcurrido:

$$\Delta t = \frac{W}{P} = \frac{8.38 \times 10^4 \text{ J}}{187 \text{ W}} = 448 \text{ s}$$

COMENTARIOS Este ejemplo ilustra cómo se enfrían diferentes sustancias que requieren de distintas cantidades de trabajo debido a la diferencia de calores específicos. El problema no toma en cuenta las propiedades de aislamiento del recipiente y de la sopa misma, lo que retarda el proceso de enfriamiento.

PREGUNTA 12.12 Si la puerta del refrigerador se deja abierta, ¿se enfriará la cocina? ¿Por qué sí o por qué no?

EJERCICIO 12.12 a) ¿Cuánto trabajo debe hacer una bomba de calor con un COP de 2.50 para extraer 1.00 MJ de energía térmica de afuera (el depósito frío)? b) Si la unidad opera a 0.500 caballos de fuerza, ¿qué tanto tiempo le llevará al proceso? (Asegúrese de usar el COP correcto.)

RESPUESTAS a) $6.67 \times 10^5 \text{ J}$ b) $1.79 \times 10^3 \text{ s}$

La segunda ley de la termodinámica

Hay límites a la eficiencia de los motores térmicos. El motor ideal convertiría toda la energía de entrada en trabajo útil, pero resulta que tal motor es imposible de construir.

La formulación de Kelvin-Planck de la **segunda ley de la termodinámica** puede ser establecida como sigue:

Ningún motor térmico que funciona en un ciclo puede absorber energía de un depósito y utilizarla totalmente para hacer una cantidad igual de trabajo.

Esta forma de la segunda ley significa que la eficiencia $e = W_{\text{máq}}/|Q_h|$ siempre debe ser menor que 1. Algún tipo de energía $|Q_c|$ debe perderse en el entorno. Es decir, es teóricamente imposible construir un motor térmico con una eficiencia de 100%.

Para resumir, la primera ley dice que **no podemos conseguir una mayor cantidad de energía de un proceso cíclico que los que se pone dentro**, y la segunda ley dice que **no podemos igualarlas**. No importa qué motor se utilice, una cierta energía se debe transferir por calor al depósito frío. En la ecuación 12.11, la segunda ley significa simplemente que $|Q_c|$ es siempre mayor que cero.

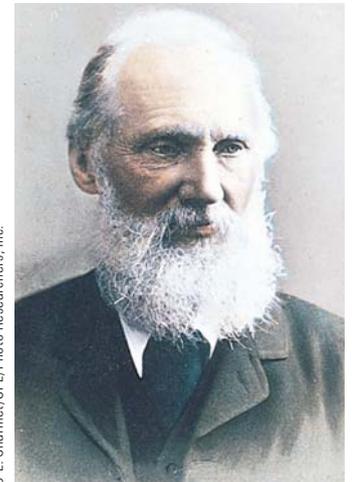
Hay otra afirmación equivalente de la segunda ley:

Si dos sistemas están en contacto térmico, la energía térmica neta es transferida espontáneamente por calor del sistema más caliente al sistema más frío.

Aquí, espontáneo significa que la transferencia de energía ocurre naturalmente, sin que se haga trabajo. La energía térmica se transfiere naturalmente de sistemas más calientes a sistemas más fríos. Sin embargo, para transferir energía térmica de un sistema más frío a un sistema más caliente, debe hacerse trabajo. Un ejemplo es el refrigerador, que transfiere energía térmica del interior del refrigerador a la cocina caliente.

Procesos reversibles e irreversibles

Ningún motor puede funcionar con una eficiencia de 100%, pero diferentes diseños rinden diferentes eficiencias y hay un diseño particular que entrega la máxima eficiencia posible. Este diseño es el ciclo de Carnot, analizado en la siguiente subsección. Entenderlo requiere de los conceptos de procesos reversibles e irreversibles. En un proceso **reversible**, cada estado a lo largo de la trayectoria es un estado de equilibrio, así que el sistema puede



J.-L. Charmet/SPL/Photo Researchers, Inc.

Lord Kelvin Físico y matemático inglés (1824-1907)

Nacido en Belfast con el nombre original de William Thomson, Kelvin fue el primero en proponer el uso de una escala absoluta de temperatura. Sus estudios relacionados con la teoría de Carnot, fundamentaron la idea de que espontáneamente no puede pasar energía de un objeto más frío a uno más caliente; este principio es conocido como la segunda ley de la termodinámica.

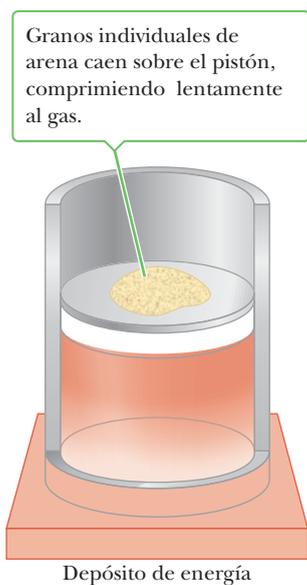


Figura 12.16 Un método para comprimir un gas en un proceso reversible e isotérmico.

regresar a sus condiciones iniciales a lo largo de la misma trayectoria o en la dirección contraria. Un proceso que no satisface este requisito es **irreversible**.

La mayoría de los procesos naturales se sabe que son irreversibles; los procesos reversibles son una idealización. Aunque los procesos reales son siempre irreversibles, algunos son *casi* reversibles. Si un proceso real ocurre tan lentamente que el sistema está virtualmente siempre en equilibrio, el proceso se puede considerar reversible. Imagine comprimir un gas muy lentamente haciendo caer granos de arena sobre un pistón sin fricción, como en la figura 12.16. La temperatura puede mantenerse constante poniendo el gas en contacto térmico con un depósito de energía. La presión, el volumen y la temperatura del gas están bien definidos durante esta compresión isotérmica. Cada grano de arena agregado representa un cambio a un nuevo estado de equilibrio. El proceso se puede invertir lentamente removiendo los granos de arena del pistón.

La máquina de Carnot

En 1824, en un esfuerzo por entender la eficiencia de los motores reales, el ingeniero francés Sadi Carnot (1796-1832) describió un motor teórico actualmente conocido como *máquina de Carnot*, de gran importancia desde los puntos de vista teórico y práctico. Carnot demostró que una máquina térmica que funciona en un ciclo ideal, reversible, ahora llamado **ciclo de Carnot**, entre dos depósitos de energía es el motor más eficiente posible. Tal motor establece un límite superior en las eficiencias de todos los motores reales. El **teorema de Carnot** puede establecerse como sigue:

Ningún motor verdadero que funciona entre dos depósitos de energía puede ser más eficiente que una máquina de Carnot que funciona entre los mismos dos depósitos.

En un ciclo de Carnot, un gas ideal está contenido en un cilindro con un pistón en un extremo. La temperatura del gas varía entre T_c y T_h . Las paredes del cilindro y el pistón no son térmicamente conductores. La figura activa 12.17 muestra las cuatro etapas del ciclo de Carnot y la figura activa 12.18 es el diagrama PV para el ciclo. El ciclo consiste en dos procesos adiabáticos y dos isotérmicos, todos reversibles:

1. El proceso $A \rightarrow B$ es una expansión isotérmica a temperatura T_h en la cual el gas se pone en contacto térmico con un depósito caliente (un horno grande, por ejemplo) a temperatura T_h (figura activa 12.17a). Durante el proceso, el gas absorbe energía Q_h del depósito y realiza trabajo W_{AB} para levantar el pistón.
2. En el proceso $B \rightarrow C$, la base del cilindro es reemplazada por una pared térmicamente no conductora y el gas se expande en forma adiabática, así que ninguna energía se incorpora o abandona el sistema por calor (figura activa 12.17b). Durante el proceso, la temperatura cae de T_h a T_c y el gas hace trabajo W_{BC} cuando levanta el pistón.
3. En el proceso $C \rightarrow D$, el gas se pone en contacto térmico con un depósito frío a temperatura T_c (figura activa 12.17c) y se comprime isotérmicamente a temperatura T_c . Durante este tiempo, el gas expelle energía Q_c al depósito y el trabajo hecho sobre el gas es W_{CD} .
4. En el proceso final, $D \rightarrow A$, la base del cilindro es sustituida otra vez por una pared térmicamente no conductora (figura activa 12.17d) y el gas es adiabáticamente comprimido. La temperatura del gas aumenta a T_h y el trabajo hecho sobre el gas es W_{DA} .

Para una máquina de Carnot, las siguientes relaciones entre la energía térmica transferida y la temperatura absoluta pueden ser obtenidas de:



J.-L. Charmet/SPL/Photo Researchers, Inc.

Sadi Carnot

Ingeniero francés (1796-1832)

Carnot es considerado como el fundador de la ciencia de la termodinámica. Algunas de sus notas descubiertas después de su muerte indican que él fue el primero en reconocer la relación entre trabajo y calor.

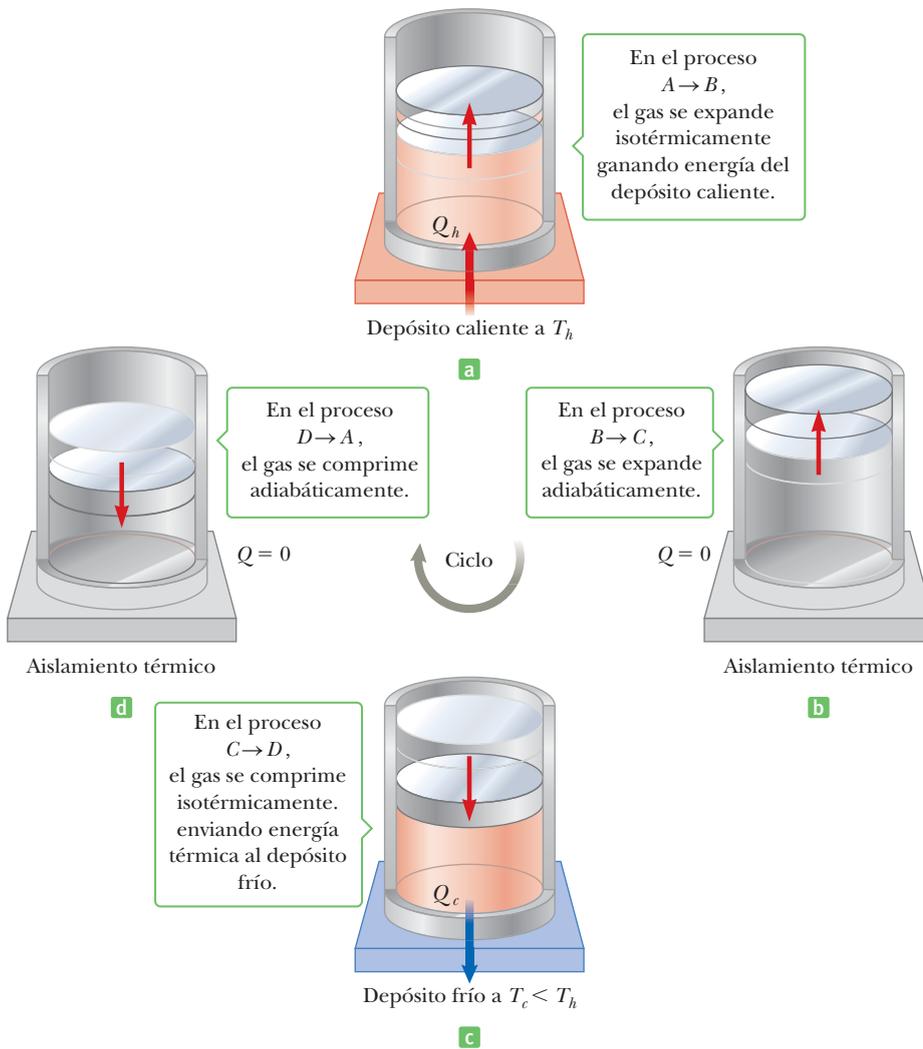


Figura activa 12.17
El ciclo de Carnot, las letras A , B , C y D , se refieren a los estados del gas mostrado en la figura activa 12.18. Las flechas en el pistón indican la dirección de su movimiento durante cada proceso.

Tip 12.3 No compre una máquina de Carnot
La máquina de Carnot es una idealización; si se desarrollara una máquina de Carnot en un esfuerzo por maximizar la eficiencia, tendría una potencia de salida cero, porque para que todos los procesos sean reversibles, la máquina tendría que funcionar con lentitud infinita.

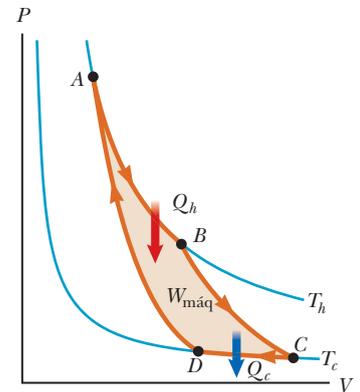


Figura activa 12.18
Diagrama PV para el ciclo de Carnot. El trabajo neto hecho, $W_{máq}$, es igual a la energía neta transferida dentro de la máquina de Carnot en un ciclo, $|Q_h| - |Q_c|$.

$$\frac{|Q_c|}{|Q_h|} = \frac{T_c}{T_h} \quad [12.15]$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación 12.12, encontramos que la eficiencia térmica de una máquina de Carnot es

$$e_c = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad [12.16]$$

donde T debe estar en grados kelvin. De este resultado vemos que **todas las máquinas de Carnot que funcionen reversiblemente entre las mismas dos temperaturas tienen la misma eficiencia.**

La ecuación 12.16 se puede aplicar a cualquier sustancia de trabajo que opere en un ciclo de Carnot entre dos depósitos de energía. De acuerdo con esta ecuación, la eficiencia es cero si $T_c = T_h$. La eficiencia aumenta cuando T_c disminuye y cuando T_h aumenta. La eficiencia puede ser uno (100%), sin embargo, sólo si $T_c = 0$ K. De acuerdo con la **tercera ley de la termodinámica** es imposible bajar la temperatura de un sistema al cero absoluto en un número finito de pasos, así que tales depósitos no están disponibles y la eficiencia máxima es siempre menor que uno. En la mayoría de los casos prácticos, el depósito frío está cercano a la temperatura ambiente, cerca de 300 K, así que el aumento de la eficiencia requiere elevar la temperatura del depósito caliente. **Todos los motores reales funcionan irreversiblemente, debido a la fricción y a la brevedad de sus ciclos, y son por lo tanto menos eficientes que la máquina de Carnot.**

◀ Tercera ley de la termodinámica

Examen rápido

12.3 Tres motores operan entre depósitos separados en temperaturas de 300 K. Las temperaturas de los depósitos son:

$$\text{Motor A: } T_h = 1\,000\text{ K, } T_c = 700\text{ K}$$

$$\text{Motor B: } T_h = 800\text{ K, } T_c = 500\text{ K}$$

$$\text{Motor C: } T_h = 600\text{ K, } T_c = 300\text{ K}$$

Enliste los motores de acuerdo con la eficiencia teóricamente posible, de la más alta a la más baja. a) A, B, C b) B, C, A c) C, B, A y d) C, A, B

EJEMPLO 12.13 El motor de vapor

OBJETIVO Aplicar las ecuaciones de un motor ideal (Carnot).

PROBLEMA Un motor de vapor tiene una caldera que opera a $5.00 \times 10^2\text{ K}$. La energía de la caldera transforma el agua en vapor que mueve el pistón. La temperatura de escape es la del aire exterior, $3.00 \times 10^2\text{ K}$. **a)** ¿Cuál es la eficiencia del motor si es un motor ideal? **b)** Si los $3.50 \times 10^3\text{ J}$ de energía se suministran de la caldera, encuentre la energía transferida al depósito frío y el trabajo realizado por el motor sobre su entorno.

ESTRATEGIA Este problema requiere la sustitución en las ecuaciones 12.15 y 12.16, ambos aplicables a una máquina de Carnot. La primera ecuación relaciona la razón Q_c/Q_h con la razón T_c/T_h , y la segunda resulta en la eficiencia de la máquina de Carnot.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la eficiencia del motor, suponiendo que es ideal.

Sustituya en la ecuación 12.16, la ecuación para la eficiencia de una máquina de Carnot:

$$e_C = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 1 - \frac{3.00 \times 10^2\text{ K}}{5.00 \times 10^2\text{ K}} = 0.400, \text{ o } 40.0\%$$

b) Encuentre la energía transferida al depósito frío y el trabajo realizado sobre el entorno si $3.50 \times 10^3\text{ J}$ es liberado al motor durante un ciclo.

La razón de energías es igual a la razón de temperaturas:

$$\frac{|Q_c|}{|Q_h|} = \frac{T_c}{T_h} \rightarrow |Q_c| = |Q_h| \frac{T_c}{T_h}$$

Sustituya, encontrando la energía transferida al depósito frío:

$$|Q_c| = (3.50 \times 10^3\text{ J}) \left(\frac{3.00 \times 10^2\text{ K}}{5.00 \times 10^2\text{ K}} \right) = 2.10 \times 10^3\text{ J}$$

Utilice la ecuación 12.11 para encontrar el trabajo realizado por el motor:

$$W_{\text{máq}} = |Q_h| - |Q_c| = 3.50 \times 10^3\text{ J} - 2.10 \times 10^3\text{ J} = 1.40 \times 10^3\text{ J}$$

COMENTARIOS Este problema difiere de los ejemplos anteriores en trabajo y eficiencia porque utilizamos las relaciones especiales de Carnot, ecuaciones 12.15 y 12.16. Recuerde que estas ecuaciones pueden ser utilizadas solamente cuando el ciclo se identifica como ideal o de Carnot.

PREGUNTA 12.13 Verdadero o Falso: Un motor no ideal que opera entre los mismos extremos de temperatura que una máquina de Carnot y que tiene igual entrada de energía térmica realizará la misma cantidad de trabajo que la máquina de Carnot.

EJERCICIO 12.13 La eficiencia teórica más alta de un motor de gasolina basado en el ciclo de Carnot es 0.300, o 30.0%.

a) Si este motor expulsa sus gases a la atmósfera, que tiene una temperatura de $3.00 \times 10^2\text{ K}$, ¿cuál es la temperatura en el cilindro inmediatamente después de la combustión? **b)** Si la máquina térmica absorbe 837 J de energía del depósito caliente durante cada ciclo, ¿cuánto trabajo puede realizar en cada ciclo?

RESPUESTAS a) 429 K b) 251 J

12.5 Entropía

La temperatura y la energía interna, asociadas con la ley cero y la primera ley de la termodinámica, respectivamente, son ambas variables de estado, lo que significa que se pueden

utilizar para describir el estado termodinámico de un sistema. Una variable de estado llamada **entropía**, S , se relaciona con la segunda ley de la termodinámica. Definimos entropía en una escala macroscópica como la expresó en 1865 el físico alemán Rudolf Clausius (1822-1888):

Sea Q_r la energía absorbida o expulsada durante un proceso reversible a temperatura constante, entre dos estados de equilibrio. Entonces el cambio en entropía durante cualquier proceso a temperatura constante que conecta los dos estados de equilibrio se define como:

$$\Delta S \equiv \frac{Q_r}{T} \quad [12.17]$$

Unidades SI: joules/kelvin (J/k)

Una fórmula similar se utiliza cuando la temperatura no es constante, pero su obtención exige cálculo y no será considerada aquí. Calcular el cambio en entropía, ΔS , durante una transición entre dos estados de equilibrio requiere encontrar una trayectoria reversible que conecte los estados. El cambio de entropía calculado sobre esta trayectoria reversible se toma como ΔS para la trayectoria *real*. Este acercamiento es necesario porque las cantidades tales como la temperatura de un sistema se pueden definir solamente para los sistemas en equilibrio y una trayectoria reversible consiste en una secuencia de estados de equilibrio. El subíndice r en el término Q_r , enfatiza que la trayectoria elegida para el cálculo debe ser reversible. El cambio en entropía ΔS , como los cambios en la energía interna ΔU y los cambios en energía potencial, dependen solamente de los puntos extremos y no de la trayectoria que los conecta.

El concepto de entropía ganó amplia aceptación en parte porque proporcionó otra variable para describir el estado de un sistema, junto con la presión, el volumen y la temperatura. Su significado fue realizado cuando se encontró que **la entropía del Universo aumenta en todos los procesos naturales**. Ésta es otra manera de expresar la segunda ley de la termodinámica.

Aunque la entropía del *Universo* aumenta en todos los procesos naturales, la entropía de un *sistema* puede disminuir. Por ejemplo, si el sistema A transfiere energía Q al sistema B por calor, la entropía del sistema A disminuye. Esta transferencia, sin embargo, puede ocurrir solamente si la temperatura del sistema B es menor que la temperatura del sistema A. Debido a que la temperatura aparece en el denominador en la definición de la entropía, el aumento en entropía en el sistema B, será mayor que lo que decrece el sistema A, así que tomadas juntas, la entropía del Universo aumenta.

Por siglos, los individuos han procurado construir máquinas de movimiento perpetuo que funcionen continuamente sin ninguna entrada de energía o aumento de entropía. Las leyes de la termodinámica imposibilitan la invención de tales máquinas.

El concepto de entropía es satisfactorio porque nos permite presentar la segunda ley de la termodinámica en forma matemática. En la siguiente sección veremos que la entropía también se puede interpretar en términos de probabilidades, una relación que tiene profundas implicaciones.

■ Examen rápido

12.4 De las expresiones siguientes, ¿cuál es verdadera en el caso de cambio de entropía de un sistema que experimenta un proceso reversible, adiabático? a) $\Delta S < 0$ b) $\Delta S = 0$ c) $\Delta S > 0$.

■ EJEMPLO 12.14 Derritiendo un trozo de plomo

OBJETIVO Calcular el cambio en entropía debido al cambio de fase.

PROBLEMA a) Encuentre el cambio en entropía de 3.00×10^2 g de plomo, cuando se derrite a 327°C . El plomo tiene un calor latente de fusión de 2.45×10^4 J/kg. b) Suponga que la misma cantidad de energía es utilizada para derretir parte de una pieza de plata, la cual tiene un punto de fusión 961°C . Encuentre el cambio en entropía de la plata.



Library of Congress

Rudolf Clausius Físico alemán (1822-1888)

Nacido con el nombre de Rudolf Gottlieb, adoptó el nombre clásico de Clausius, que era algo que se acostumbraba en su tiempo. “Propongo... llamar S a la entropía de un cuerpo, derivada de la palabra griega ‘transformación’. A propósito he inventado la palabra ‘entropía’ para que sea semejante a energía, porque estas cantidades son tan análogas en su significado físico, que una analogía de denominaciones puede ser útil”.

Tip 12.4 Entropía \neq Energía

No confunda energía con entropía, pues aunque los nombres suenen parecido, los conceptos son diferentes.

ESTRATEGIA Este problema se puede resolver sustituyendo en la ecuación 12.17. Asegúrese de usar la escala de temperatura Kelvin.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el cambio de entropía del plomo.

Encuentre la energía necesaria para derretir el plomo:

$$Q = mL_f = (0.300 \text{ kg})(2.45 \times 10^4 \text{ J/kg}) = 7.35 \times 10^3 \text{ J}$$

Convierta la temperatura en grados Celsius a Kelvin:

$$T = T_C + 273 = 327 + 273 = 6.00 \times 10^2 \text{ K}$$

Sustituya las cantidades encontradas en la ecuación de entropía:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{7.35 \times 10^3 \text{ J}}{6.00 \times 10^2 \text{ K}} = 12.3 \text{ J/K}$$

b) Encuentre el cambio de entropía de la plata.

La energía agregada es la misma que en el inciso a), por sustitución. Sustituya en la ecuación de la entropía, después de convertir el punto de fusión de la plata a Kelvin:

$$T = T_C + 273 = 961 + 273 = 1.234 \times 10^3 \text{ K}$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{7.35 \times 10^3 \text{ J}}{1.234 \times 10^3 \text{ K}} = 5.96 \text{ J/K}$$

COMENTARIOS Este ejemplo muestra que agregando una cantidad de energía a un sistema se incrementa su desorden, pero agregando la misma cantidad de energía a otro sistema a mayor temperatura resulta un menor incremento de desorden. Esto es porque el cambio en entropía es inversamente proporcional a la temperatura.

PREGUNTA 12.14 Si la misma cantidad de energía fuera utilizada para derretir hielo a 0°C en agua a 0°C , enliste el cambio de entropía para el hielo, la plata y el plomo, de menor a mayor.

EJERCICIO 12.14 Encuentre el cambio en entropía de un bloque de 2.00 kg de oro a 1063°C cuando se derrite para convertirse en oro líquido a 1063°C . (El calor latente de fusión para el Au es $6.44 \times 10^4 \text{ J/kg}$.)

RESPUESTA 96.4 J/K

■ EJEMPLO 12.15 Hielo, vapor y la entropía del Universo

OBJETIVO Calcular el cambio en entropía para un sistema y su entorno.

PROBLEMA Un bloque del hielo a 273 K se pone en contacto térmico con un contenedor de vapor a 373 K, convirtiendo 25.0 g de hielo a agua a 273 K mientras que condensa algo del vapor a agua a 373 K. a) Encuentre el cambio en entropía del hielo. b) Encuentre el cambio en entropía del vapor. c) Encuentre el cambio en entropía del Universo.

ESTRATEGIA Primero calcule la transferencia de energía necesaria para derretir el hielo. La cantidad de energía ganada por el hielo es perdida por el vapor. Calcule el cambio de entropía para cada proceso y sume para obtener el cambio de entropía del Universo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el cambio en entropía del hielo.

Utilice el calor latente de fusión, L_f , para calcular la energía térmica necesaria para derretir 25.0 g de hielo:

$$Q_{\text{hielo}} = mL_f = (0.025 \text{ kg})(3.33 \times 10^5 \text{ J}) = 8.33 \times 10^3 \text{ J}$$

Calcule el cambio en entropía del hielo:

$$\Delta S_{\text{hielo}} = \frac{Q_{\text{hielo}}}{T_{\text{hielo}}} = \frac{8.33 \times 10^3 \text{ J}}{273 \text{ K}} = 30.5 \text{ J/K}$$

b) Encuentre el cambio en entropía del vapor.

Por suposición, la energía térmica perdida por el vapor es igual a la energía térmica ganada por el hielo:

$$\Delta S_{\text{vapor}} = \frac{Q_{\text{vapor}}}{T_{\text{vapor}}} = \frac{-8.33 \times 10^3 \text{ J}}{373 \text{ K}} = -22.3 \text{ J/K}$$

c) Encuentre el cambio en entropía del Universo.

Sume los dos cambios en entropía:

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{universo}} &= \Delta S_{\text{hielo}} + \Delta S_{\text{vapor}} = 30.5 \text{ J/K} - 22.3 \text{ J/K} \\ &= +8.2 \text{ J/K} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe que la entropía del Universo aumenta, como debe ser en todos los procesos naturales.

PREGUNTA 12.15 Verdadero o Falso: Para una magnitud dada de energía térmica transferida, el cambio en entropía es más pequeño para procesos que proceden a temperaturas bajas.

EJERCICIO 12.15 Un bloque de 4.00 kg de hielo a 273 K encajonado en una fina cáscara plástica de masa insignificante se derrite en un gran lago a 293 K. En el instante que el hielo se ha derretido totalmente en la cáscara y todavía está a 273 K, calcule el cambio en entropía a) del hielo, b) el lago (que esencialmente permanece a 293 K) y c) el Universo.

RESPUESTAS a) $4.88 \times 10^3 \text{ J/K}$ b) $4.55 \times 10^3 \text{ J/K}$ c) $3.3 \times 10^2 \text{ J/K}$

■ EJEMPLO 12.16 Una roca cayendo

OBJETIVO Combinar la energía mecánica y la entropía.

PROBLEMA Un pedazo de roca de masa $1.00 \times 10^3 \text{ kg}$ a 293 K cae de un acantilado de altura 125 m en un gran lago, también a 293 K. Encuentre el cambio en la entropía del lago, si se supone que toda la energía cinética de la roca al introducirse en su totalidad en el lago se convierte en energía térmica absorbida por el lago.

ESTRATEGIA La energía potencial gravitacional cuando la roca está en lo alto del acantilado se convierte a energía cinética de la roca antes que entre al lago, entonces se transfiere al lago como energía térmica. El cambio en la temperatura del lago es insignificante (debido a su masa). Divida la energía mecánica de la roca entre la temperatura del lago para estimar el cambio de entropía del lago.

SOLUCIÓN

Calcule la energía potencial gravitacional asociada con la roca en la cima del acantilado:

$$EP = mgh = (1.00 \times 10^3 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(125 \text{ m}) \\ = 1.23 \times 10^6 \text{ J}$$

Esta energía es transferida al lago como energía térmica, resultando en un incremento de entropía del lago:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{1.23 \times 10^6 \text{ J}}{293 \text{ K}} = 4.20 \times 10^3 \text{ J/K}$$

COMENTARIOS Este ejemplo muestra cómo un proceso mecánico simple puede causar incrementos en la entropía del Universo.

PREGUNTA 12.16 Si usted quita cuidadosamente su libro de física (muy pesado) de un estante y lo coloca en el suelo, ¿qué sucede con la entropía del Universo? ¿Aumenta, disminuye o sigue siendo igual? Explique.

EJERCICIO 12.16 Estime el cambio en entropía de un tronco de árbol a 15.0°C cuando una bala de masa 5.00 g que viaja a $1.00 \times 10^3 \text{ m/s}$ se encaja en él. (Suponga que la energía cinética de la bala se transforma en energía térmica, que es absorbida por el árbol.)

RESPUESTA 8.68 J/K

Entropía y desorden

Los procesos naturales tienen inherente un gran componente de azar. El espaciamiento entre los árboles en un bosque natural, por ejemplo, es al azar; si usted descubriera un bosque donde estuvieran equidistantes todos los árboles, usted concluiría que habían sido plantados. Asimismo, las hojas bajan a la tierra con arreglos al azar. Sería muy poco probable encontrar las hojas presentadas en filas perfectamente rectas. Podemos expresar los resultados de tales observaciones diciendo que **un arreglo desordenado es mucho más probable que un arreglo ordenado, si se deja que las leyes de la naturaleza actúen sin interferencia.**

La entropía encontró originalmente su lugar en la termodinámica, pero su importancia creció enormemente cuando se desarrolló el campo de la mecánica estadística. Este enfoque analítico emplea una interpretación alterna de la entropía. En mecánica estadística, el comportamiento de una sustancia es descrito por el comportamiento estadístico de los átomos y de las moléculas contenidas en él. Una de las principales conclusiones del enfoque estadístico es que **los sistemas aislados tienden hacia un mayor desorden y la entropía es una medida de ese desorden.**

Tip 12.5 No confunda las W

El símbolo W se emplea aquí como *probabilidad*, por lo que no debe confundirse con el símbolo utilizado para trabajo.

A la luz de este nuevo punto de vista de la entropía, Boltzmann encontró otro método para calcular la entropía con el uso de la relación

$$S = k_B \ln W \quad [12.18]$$

donde $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ es la constante de Boltzmann y W es un número proporcional a la probabilidad de que el sistema tenga una configuración particular. El símbolo “ln” se utiliza otra vez para el logaritmo natural, analizado en el apéndice A.

La ecuación 12.18 se puede aplicar a una bolsa de canicas. Imagine que usted tiene 100 canicas, 50 rojas y 50 verdes, en una bolsa. Se le permite sacar cuatro canicas de la bolsa según las reglas siguientes: saque una canica, registre su color, devuélvala a la bolsa y saque una canica otra vez. Continúe este proceso hasta haya sacado cuatro canicas. Observe que como cada canica se devuelve al bolso antes que se saque la siguiente, la probabilidad de sacar una canica roja es siempre igual que la probabilidad de sacar una verde.

Los resultados de todas las posibles secuencias de sacar canicas de la bolsa, se muestran en la tabla 12.3. Por ejemplo, el resultado **RRVR** significa que una canica roja fue sacada primero, luego otra roja, una verde en tercer lugar y una roja más en cuarto lugar. La tabla indica que hay solamente una manera posible de sacar cuatro canicas rojas. Hay cuatro secuencias posibles que producen una verde y tres rojas; seis secuencias que producen dos verdes y dos rojas; cuatro secuencias que producen tres verdes y una roja; y una secuencia que produce todas verdes. De la ecuación 12.18, vemos que el estado con el que el mayor desorden (dos canicas rojas y dos verdes) tiene la entropía más alta porque es el más probable. En cambio, los estados más ordenados (todas las canicas rojas y todas las canicas verdes) son los menos probables de ocurrir y son los estados de entropía más baja.

El resultado del evento puede variar entre estos estados altamente ordenados (la entropía más baja) y estados altamente desordenados (entropía más alta). Así, la entropía se puede ver como índice de hasta dónde un sistema ha avanzado de un estado ordenado a un estado desordenado.

La segunda ley de la termodinámica es realmente una declaración de lo que es más probable en lugar de lo que debe ser. Imagine que se coloca un cubo de hielo en contacto con un pedazo de pizza caliente. No hay nada en la naturaleza que prohíba absolutamente la transferencia de energía por calor del hielo a la pizza mucho más caliente. Estadísticamente, es posible que una molécula de lento movimiento del hielo choque con una molécula de rápido movimiento de la pizza de modo que la lenta transfiera algo de su energía a la más rápida. Sin embargo, cuando se considera el gran número de moléculas presentes en el hielo y la pizza, las probabilidades están aplastantemente a favor de la transferencia de energía de las moléculas móviles más rápidas a las moléculas más lentas. Además, este ejemplo demuestra que un sistema tiende naturalmente a moverse de un estado de orden a un estado de desorden. El estado inicial, en el cual todas las moléculas de la pizza tienen alta energía cinética y todas las moléculas del hielo tienen energía cinética más baja, es mucho más ordenado que el estado final después que haya ocurrido la transferencia de energía y el hielo se ha derretido.

De manera más general, la segunda ley de la termodinámica define la dirección del tiempo para todos los acontecimientos, como la dirección en la que la entropía del Universo aumenta. Aunque la conservación de la energía no se viola si la energía fluye espontáneamente de un objeto frío (el cubo de hielo) a un objeto caliente (la rebanada de pizza), ese acontecimiento viola la segunda ley porque representa un aumento espontáneo de

APLICACIÓN

La dirección del tiempo

Tabla 12.3 Posibles resultados de sacar cuatro canicas de una bolsa

Resultado final	Resultados parciales	Número total de resultados iguales
Todas R	RRRR	1
1V, 3R	RRRV, RRVR, RVRR, VRRR	4
2V, 2R	RRVV, RVRV, VRRV, RVVR, VRVR, VVRR	6
3V, 1R	VVVR, VVRV, VRVV, RVVV	4
Todas V	VVVV	1

orden. Por supuesto, tal acontecimiento también viola la experiencia diaria. Si el cubo de hielo que se derrite se filma y la película se pasa a máxima velocidad, la diferencia entre correr la película hacia adelante y luego al contrario sería obvia para una audiencia. Sucedería lo mismo si se filmara cualquier evento en el que participe una gran cantidad de partículas, tales como un plato que cae al piso y se rompe.

Como otro ejemplo, suponga que es posible medir las velocidades de todas las moléculas de aire en una habitación en el mismo instante. Es muy poco probable que todas las moléculas se muevan en la misma dirección con la misma velocidad, lo que sería en verdad un estado altamente ordenado. La situación más probable es un sistema de moléculas que se muevan al azar en todas direcciones con una amplia distribución de velocidades; un estado altamente desordenado. Esta situación física se puede comparar al experimento de sacar canicas de una bolsa: si un recipiente contiene 10^{23} moléculas de un gas, la probabilidad de encontrar todas las moléculas que se mueven en la misma dirección con la misma velocidad en un cierto instante sería similar a la de sacar canicas de la bolsa 10^{23} veces y sacar una canica roja cada vez, lo que es claramente un sistema de eventos muy poco probable.

La tendencia de la naturaleza a moverse hacia un estado de desorden afecta la capacidad de un sistema para hacer trabajo. Considere una pelota lanzada hacia una pared. La pelota tiene energía cinética y su estado es ordenado, lo que significa que todos los átomos y las moléculas de la bola se mueven al mismo tiempo a la misma velocidad y en la misma dirección (aparte de sus movimientos internos al azar). Sin embargo, cuando la bola golpea la pared, parte de su energía cinética se transforma en el movimiento interno al azar y desordenado de las moléculas en la pelota y la pared, y las temperaturas de la pelota y de la pared aumentan levemente. Antes de la colisión, la pelota era capaz de hacer trabajo. Podría meter un clavo en la pared, por ejemplo. Con la transformación de parte de la energía ordenada en energía interna desordenada, su capacidad para hacer trabajo se reduce. La pelota rebota con menos energía cinética que la que originalmente tenía, porque la colisión es inelástica.

Varias formas de energía se pueden convertir en energía interna, como en la colisión entre la pelota y la pared, pero la transformación inversa nunca es completa. En general, dadas dos clases de energía, A y B , si A se puede convertir totalmente en B y viceversa, decimos que A y B son del *mismo grado*. Sin embargo, si A puede ser completamente convertida en B , pero B no completamente en A , entonces A está en un *grado más alto* de energía que B . En el caso de una pelota que golpea una pared, la energía cinética de la pelota está en un grado más alto que la energía interna contenida en la bola y la pared después de la colisión. Cuando energía de alto grado se convierte en energía interna, nunca puede ser recuperada completamente como energía de alto grado.

Esta conversión de energía de alto grado a energía interna se identifica como la **degradación de la energía**. La energía se llama degradada porque adquiere una forma que es menos útil para hacer trabajo. Es decir **en todos los procesos reales, la energía disponible para hacer trabajo disminuye**.

Finalmente, observe de nuevo que la afirmación de que la entropía debe aumentar en todos los procesos naturales es verdad solamente para sistemas aislados. Hay casos en los cuales la entropía de un cierto sistema disminuye, pero con un correspondiente aumento neto de entropía para algún otro sistema. Cuando todos los sistemas se toman juntos para formar el Universo, **la entropía del Universo siempre aumenta**.

En última instancia, la entropía del Universo podría alcanzar un máximo. En ese momento, el Universo estaría en un estado de temperatura y densidad uniforme. Todos los procesos físicos, químicos y biológicos cesarían, porque un estado de desorden perfecto implica que no existe energía disponible para hacer trabajo. Esta tenebrosa situación es algunas veces llamada la “muerte térmica” del Universo.

Examen rápido

12.5 Suponga que usted está lanzando dos dados en un juego amistoso. Para cualquier tiro, los dos números que quedan cara arriba tienen una suma de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 o 12. ¿Qué resultado es el más probable? ¿Cuál es menos probable?



© Cengage Learning/George Semple

a



© Cengage Learning/George Semple

b

a) Una flor imperial es una mano altamente deseada en el póquer, con una baja probabilidad de ocurrencia. b) Una mano desordenada y sin valor en el póquer. La probabilidad de que esta mano *particular* ocurra es la misma que la de la flor imperial. Hay muchas manos sin valor; sin embargo, la probabilidad de ser repartido con una mano sin valor es mucho más alta que la de ser repartido con una flor imperial. ¿Puede usted calcular la probabilidad de ser repartido con un full (un par y tres de una clase) de un mazo estándar de 52 cartas?

12.6 Metabolismo humano **BIO**

Los animales trabajan y ceden energía por calor, lo que nos lleva a creer que la primera ley de la termodinámica se puede aplicar a los organismos vivos para describirlos de una manera general. La energía interna almacenada en seres humanos se transforma en otras formas de energía necesarias para mantener y reparar los principales órganos de nuestro cuerpo y es transferida hacia afuera por trabajo cuando una persona camina o levanta un objeto pesado y por calor cuando el cuerpo está más caliente que su entorno. Debido a que las tasas de cambio de la energía interna, pérdida de energía por calor y pérdida de energía por trabajo varían ampliamente con la intensidad y duración de la actividad humana, es mejor medir las tasas de cambio de ΔU , Q y W . Si reescribimos la primera ley, estas tasas de cambio están relacionados por

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} + \frac{W}{\Delta t} \quad [12.19]$$

En promedio, la energía Q sale del cuerpo y el trabajo es realizado por el cuerpo sobre su entorno, así que $Q/\Delta t$ y $W/\Delta t$ son negativos. Esto significa que $U/\Delta t$ sería negativo y la energía interna y temperatura del cuerpo disminuirían con el tiempo, si un ser humano fuera un sistema cerrado sin manera de ingerir materia o reabastecerse de reserva de energía interna. Debido a que todos los animales son en realidad sistemas abiertos, incorporan energía interna (energía potencial química) a sí mismos en los procesos de comer y respirar, así que la energía interna y temperatura del organismo se mantienen constantes. En general, en última instancia, la energía de la oxidación del alimento provee el trabajo hecho por el cuerpo y la energía perdidos del cuerpo por calor y ésta es la interpretación que damos a la ecuación 12.19. Es decir, $\Delta U/\Delta t$ es la razón en la cual la energía interna es agregada a nuestros cuerpos por el alimento y este término balancea precisamente la razón de pérdida de energía por calor, $Q/\Delta t$, y por trabajo, $W/\Delta t$. Finalmente, si tenemos una manera de medir $\Delta U/\Delta t$ y $W/\Delta t$ para un ser humano, podemos calcular $Q/\Delta t$ de la ecuación 12.19 y obtener información útil sobre la eficiencia del cuerpo como una máquina.



© BSI/Photo Researchers, Inc.

Figura 12.19 Monitoreo del consumo de oxígeno de esta ciclista.

Medición de la razón, velocidad metabólica $\Delta U/\Delta t$

El valor de $W/\Delta t$, que es el trabajo realizado por una persona por unidad de tiempo, se determina fácilmente si se mide la potencia de salida proveída por un ser humano (al pedalear una bicicleta, por ejemplo). **El ritmo metabólico $\Delta U/\Delta t$ es la razón a la que la energía potencial química de los alimentos y oxígeno son transformados en energía interna para balancear precisamente las pérdidas de energía interna del cuerpo por trabajo y calor.** Aunque los mecanismos de oxidación del alimento y liberación de energía del cuerpo son complicados, porque intervienen muchas reacciones intermedias y enzimas de compuestos orgánicos que aceleran las reacciones químicas del cuerpo que ocurren a “bajas” temperaturas), una regla asombrosamente simple resume estos procesos: **el ritmo metabólico es directamente proporcional a la razón de consumo de oxígeno por volumen.** Así, se puede decir que en una dieta promedio, el consumo de un litro de oxígeno libera 4.8 kcal, o 20 kJ, de energía. En resumen, se puede expresar esta importante regla como

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = 4.8 \frac{\Delta V_{O_2}}{\Delta t} \quad [12.20]$$

donde la velocidad metabólica $\Delta U/\Delta t$ se mide en kcal/s y $\Delta V_{O_2}/\Delta t$, la razón de consumo de oxígeno por volumen, se mide en L/s. Así, al medir la razón de uso de oxígeno durante varias actividades que van desde dormir hasta una intensa carrera de bicicletas, es posible medir la variación de razón metabólica o la variación de potencia total que genera nuestro cuerpo. Una medida simultánea del trabajo por unidad de tiempo realizado por una persona, junto con la velocidad metabólica, permite determinar la eficiencia del cuerpo como máquina. La figura 12.19 muestra el monitoreo del consumo de oxígeno de una persona mientras monta una bicicleta unida a un dinamómetro, un dispositivo para medir salida de potencia.

Ecuación de la razón velocidad $\Delta U/\Delta t$ metabólica

Tabla 12.4 Velocidad metabólica de consumo de oxígeno para varias actividades de un hombre de 65 kg^a

Actividad	Ritmo de consumo de O ₂ (mL/min · kg)	Ritmo metabólico (kcal/h)	Ritmo metabólico (W)
Dormir	3.5	70	80
Actividad ligera (vestirse, caminar lento, trabajo de escritorio)	10	200	230
Actividad moderada (caminar de prisa)	20	400	465
Actividad fuerte (basquetbol, brazada rápida de pecho)	30	600	700
Actividad extrema (carrera de bicicleta)	70	1 400	1 600

^aFuente: *A Companion to Medical Studies*, 2/c, R. Passinore, Philadelphia, F. A. Davis, 1968.

Velocidad metabólica, actividad y aumento de peso

La tabla 12.4 muestra las medidas de la razón de consumo de oxígeno en mililitros por minuto por kilogramo de masa corporal y la razón metabólica calculada para un hombre de 65 kg ocupado en distintas actividades. Una persona que duerme utiliza unos 80 W de potencia, el **ritmo metabólico basal**, apenas para mantener y hacer funcionar diversos órganos del cuerpo tales como el corazón, los pulmones, el hígado, los riñones, el cerebro y los músculos esqueléticos. Una actividad más intensa aumenta la velocidad metabólica a un máximo de unos 1 600 W en el caso de un ciclista de alto rendimiento, aunque un ritmo tan alto se puede mantener solamente por periodos de algunos segundos. Cuando nos sentamos a mirar una película en la que fijamos la atención, cedemos más o menos la misma energía por calor que una bombilla encendida de 250 W.

Sin importar el nivel de la actividad, la toma de comida diaria debe apenas balancear la pérdida en energía interna si una persona no quiere ganar peso. Además, el ejercicio es un deficiente sustituto de la dieta como método para perder peso. Por ejemplo, la pérdida de 1 lb de grasa corporal requiere que los músculos consuman 4 100 kcal de energía. Si la meta es perder 1 lb de grasa en 35 días, una persona trotando podría correr una milla extra diariamente ya que un corredor de 65 kg utiliza cerca de 120 kcal en una milla (35 días × 120 kcal/día = 4 200 kcal). Una forma fácil de perder la libra de grasa sería someterse a dieta y comer dos rebanadas menos de pan por día durante 35 días, porque el pan tiene un contenido calórico de 60 kcal/rebanada (35 días × 2 rebanadas/día × 60 kcal/rebanada = 4 200 kcal).

■ EJEMPLO 12.17 Lucha contra la obesidad

OBJETIVO Estimar la energía humana gastada durante un día normal.

PROBLEMA En el curso de 24 horas, una mujer de 65 kg pasa 8 h en un escritorio, 2 h en trabajo sin importancia en casa, 1 h en trotar 5 millas, 5 h en actividad moderada y 8 h en dormir. ¿Cuál es el cambio en su energía interna durante este periodo?

ESTRATEGIA La tasa de tiempo de energía utilizada o potencia, multiplicada por el tiempo da como resultado la cantidad de energía usada durante una actividad determinada. Utilice la tabla 12.4 para encontrar la energía requerida para cada actividad, multiplique cada uno por el tiempo y súmelos todos.

SOLUCIÓN

$$\begin{aligned}\Delta U &= -\sum P_i \Delta t_i = -(P_1 \Delta t_1 + P_2 \Delta t_2 + \cdots + P_n \Delta t_n) \\ &= -(200 \text{ kcal/h})(10 \text{ h}) - (5 \text{ mi/h})(120 \text{ kcal/mi})(1 \text{ h}) - (400 \text{ kcal/h})(5 \text{ h}) - (70 \text{ kcal/h})(8 \text{ h}) \\ \Delta U &= -5\,000 \text{ kcal}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Si esto es un día típico en la vida de la mujer, ella tendrá que consumir menos de 5 000 kilocalorías sobre una base diaria para perder peso. Una complicación radica en el hecho de que el metabolismo humano tiende a disminuir cuando se reduce la ingesta de comida.

PREGUNTA 12.17 ¿Cómo podría el pasar por alto las comidas totalmente llevar al aumento del peso?

(continúa)

EJERCICIO 12.17 Si una mujer de 60.0 kg ingesta 3000 kcal un día y pasa 6 h durmiendo, 4 h caminando enérgicamente, 8 h sentada en trabajo de escritorio, 1 h nadando rápido en estilo de pecho y 5 h mirando películas de acción en la TV, ¿cuánto peso ganará o perderá diario la mujer? (*Nota:* Recuerde que usar cerca de 4100 kcal de energía consumirá una libra de grasa.)

RESPUESTA Ella perderá poco más de la mitad de la libra de grasa en un día.

Tabla 12.5 Salud física y ritmo máximo de consumo de oxígeno^a

Nivel de salud	Ritmo máximo de consumo de oxígeno (mL/min · kg)
Muy pobre	28
Pobre	34
Regular	42
Bueno	52
Excelente	70

^aFuente: *Aerobics*, K.H. Cooper, Bantam Books, New York, 1968.

Salud física y eficiencia del cuerpo humano como máquina

Una medida de la salud física de una persona es su máxima capacidad para utilizar o consumir oxígeno. Esta salud “aeróbica” puede aumentarse y mantenerse con ejercicio regular, pero disminuye cuando se deja de hacer ejercicio. Los ritmos típicos máximos de consumo y niveles correspondientes de salud se muestran en la tabla 12.5; vemos que el ritmo de máximo consumo de oxígeno varía a partir de 28 mL/min · kg de masa corporal para personas en malas condiciones físicas hasta 70 mL/min · kg para atletas de alto rendimiento.

Ya hemos precisado que la primera ley de la termodinámica puede ser reescrita para relacionar la razón metabólica $\Delta U/\Delta t$ con la razón en la cual la energía sale del cuerpo por trabajo y por calor:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} + \frac{W}{\Delta t}$$

Ahora considere el cuerpo como una máquina capaz de proveer energía mecánica al mundo exterior y pedirle eficiencia. Se define la eficiencia e del cuerpo como la razón entre la potencia mecánica proporcionada por un ser humano la razón metabólica o la entrada total de potencia al cuerpo:

$$e = \text{eficiencia corporal} = \frac{\left| \frac{W}{\Delta t} \right|}{\left| \frac{\Delta U}{\Delta t} \right|} \quad [12.21]$$

En esta definición, se utilizan signos de valor absoluto para mostrar que e es un número positivo y para evitar explícitamente el empleo de los signos de menos requeridos por nuestra definición de W y de Q en la primera ley. La tabla 12.6 muestra la eficiencia de trabajadores ocupados en diferentes actividades por varias horas. Estos valores fueron obtenidos midiendo la salida de potencia y consumo simultáneo de oxígeno de los trabajadores mineros y calculando la razón metabólica del consumo de oxígeno. La tabla muestra que una persona puede proveer constantemente potencia mecánica por varias horas aproximadamente a 100 W con una eficiencia de cerca de 17%. También muestra la dependencia de la eficiencia en cada actividad y que e puede disminuir a valores de hasta sólo 3% en actividades altamente ineficientes como usar palas, que implica muchos comienzos y paradas. Finalmente, es interesante ver que, en comparación con el promedio de resultados de la tabla 12.6, un atleta en gran condición física acoplado a un aparato mecánico para extraer potencia (¡una bicicleta!), puede proveer una potencia de alrededor de 300 W por cerca de 30 minutos a máxima eficiencia de 22 por ciento.

Tabla 12.6 Velocidad metabólica, potencia de salida y eficiencia en diferentes actividades^a

Actividad	Ritmo metabólico	Potencia de salida	Eficiencia e
	$\frac{\Delta U}{\Delta t}$ (watts)	$\frac{W}{\Delta t}$ (watts)	
Ciclismo	505	96	0.19
Empujar carros cargados de carbón en una mina	525	90	0.17
Trabajar con la pala	570	17.5	0.03

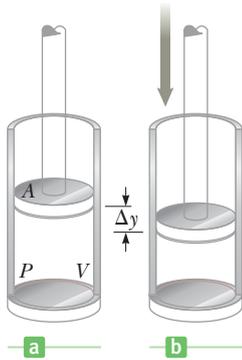
^aFuente: “Inter-and Intra-Individual Differences in Energy Expenditure and Mechanical Efficiency”, C.H. Wyndham *et al.*, *Ergonomics* 9, 17 (1966).

RESUMEN

12.1 Trabajo en procesos termodinámicos

El trabajo realizado sobre un gas a presión constante es

$$W = -P\Delta V \quad [12.1]$$



El trabajo positivo es realizado sobre un gas, comprimiéndolo.

El trabajo realizado sobre el gas es positivo si el gas es comprimido (\$\Delta V\$ es negativo) y negativo si el gas se expande (\$\Delta V\$ es positivo). En general, el trabajo realizado sobre un gas tomado desde algún estado inicial a algún estado final es el negativo del área bajo la curva en un diagrama \$PV\$.

12.2 Primera ley de la termodinámica

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, cuando un sistema sufre de un cambio de estado a otro, el cambio en su energía interna \$\Delta U\$ es

$$\Delta U = U_f - U_i = Q + W \quad [12.2]$$

donde \$Q\$ es la energía transferida al sistema por calor y \$W\$ es el trabajo realizado sobre el sistema. \$Q\$ es positivo cuando la energía entra al sistema por calor y negativo cuando el sistema pierde energía. \$W\$ es positivo cuando se realiza trabajo sobre el sistema (por ejemplo, por compresión) y negativo cuando el sistema realiza trabajo positivo sobre su entorno.

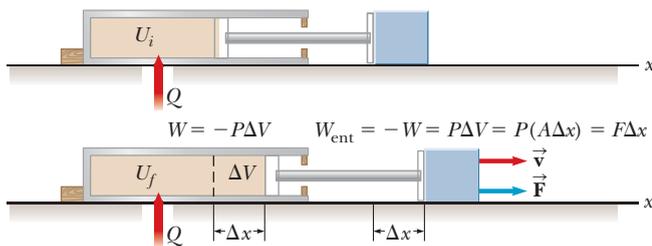


Ilustración de la primera ley de la termodinámica.

El cambio en la energía interna, \$\Delta U\$, de un gas ideal está dado por

$$\Delta U = nC_v\Delta T \quad [12.5]$$

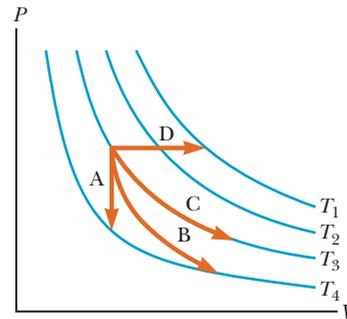
donde \$C_v\$ es el calor específico molar a volumen constante.

12.3 Procesos térmicos

Un **proceso isobárico** es aquel que ocurre a una presión constante. El trabajo sobre el sistema en tal proceso es \$-P\Delta V\$, mientras que la energía térmica transferida por calor está dada por

$$Q = nC_p\Delta T \quad [12.6]$$

con capacidad calorífica molar a presión constante dada por \$C_p = C_v + R\$.



Cuatro procesos de gas: A es un proceso isocórico (volumen constante); B es una expansión adiabática (no hay transferencia de energía térmica); C es un proceso isotérmico (temperatura constante); D es un proceso isobárico (presión constante).

En un **proceso adiabático** no se transfiere energía por calor entre el sistema y sus alrededores (\$Q = 0\$). En este caso la primera ley resulta \$\Delta U = W\$, lo cual quiere decir que la energía interna cambia solamente como una consecuencia del trabajo realizado sobre el sistema. La presión y volumen en proceso adiabático están relacionados por

$$PV^\gamma = \text{constante} \quad [12.8a]$$

donde \$\gamma = C_p/C_v\$ es el índice adiabático.

En un **proceso isovolumétrico** el volumen no cambia y no hay trabajo realizado. Para tales procesos, la primera ley resulta \$\Delta U = Q\$.

Un **proceso isotérmico** ocurre a temperatura constante. El trabajo realizado por un gas ideal sobre el entorno es

$$W_{ent} = nRT \ln \left(\frac{V_f}{V_i} \right) \quad [12.10]$$

12.4 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

En un **proceso cíclico** (en el cual el sistema regresa a su estado inicial), \$\Delta U = 0\$ y por lo tanto \$Q = W_{máq}\$, lo que significa que la energía transferida al sistema por calor es igual al trabajo realizado sobre el sistema durante el ciclo.

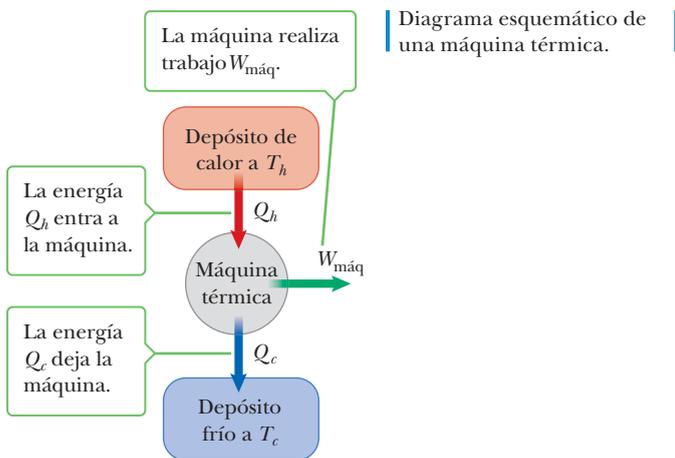
Una **máquina térmica** recibe energía por calor y la convierte parcialmente en otra forma de energía como energía mecánica y energía eléctrica. El trabajo \$W_{máq}\$ realizado por una máquina térmica al transportar una sustancia de operación a través de un proceso cíclico (\$\Delta U = 0\$) es

$$W_{máq} = |Q_h| - |Q_c| \quad [12.11]$$

donde \$Q_h\$ es la energía absorbida de un depósito caliente y \$Q_c\$ es la energía expulsada a un depósito frío.

La **eficiencia térmica** de una máquina térmica está definida como la razón del trabajo realizado por la máquina a la energía transferida a la máquina por ciclo:

$$e \equiv \frac{W_{máq}}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} \quad [12.12]$$

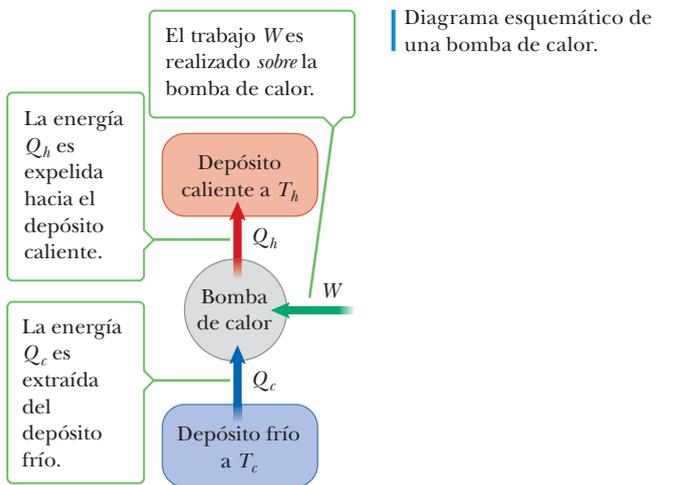


Las bombas de calor son máquinas térmicas en sentido inverso. En un refrigerador la bomba de calor remueve la energía térmica del interior de éste. La bomba de calor operando en modo de enfriamiento tiene un coeficiente de rendimiento dado por

$$\text{COP}(\text{modo de enfriamiento}) = \frac{|Q_c|}{W} \quad [12.13]$$

Una bomba de calor en modo de calefacción tiene un coeficiente de rendimiento

$$\text{COP}(\text{modo de calentamiento}) = \frac{|Q_h|}{W} \quad [12.14]$$

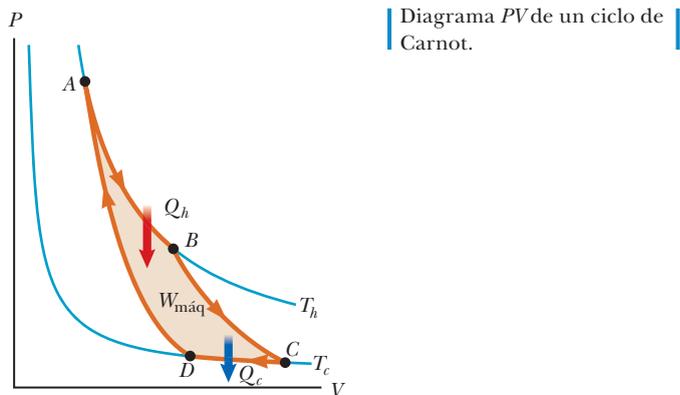


Los procesos reales proceden en un orden gobernado por la **segunda ley de la termodinámica**, que se puede establecer de dos maneras:

1. La energía no fluye de manera espontánea por calor de un objeto frío a uno caliente.
2. No existe una máquina térmica que operando en un ciclo pueda absorber energía de un depósito y realizar una cantidad igual de trabajo.

No existe una máquina térmica que operando entre las temperaturas kelvin T_h y T_c pueda exceder la eficiencia de una máquina operando entre las mismas dos temperaturas en un ciclo de Carnot, dado por

$$e_c = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad [12.16]$$



La eficiencia perfecta de una máquina de Carnot requiere de un depósito frío de 0 K, cero absoluto. Sin embargo, de acuerdo con la **tercera ley de la termodinámica**, es imposible bajar la temperatura de un sistema al cero absoluto en un número finito de pasos.

12.5 Entropía

La segunda ley puede también establecerse en términos de una cantidad llamada **entropía** (S). El **cambio en entropía** de un sistema es igual a la energía Q fluyendo por calor dentro (o fuera) del sistema, cuando el sistema cambia de un estado a otro por un proceso reversible, dividido por la temperatura absoluta:

$$\Delta S \equiv \frac{Q_r}{T} \quad [12.17]$$

Uno de los primeros resultados de la mecánica estadística es que los sistemas tienden hacia el desorden y que la entropía es una medida de este desorden. La entropía del Universo aumenta en todos los procesos naturales; éste es un enunciado alternativo de la segunda ley.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Un gas monoatómico ideal se expande de 1.00 a 2.50 m³ a una presión constante de 2.00 × 10⁵ Pa: encuentre el cambio en la energía interna del gas a) 7.50 × 10⁵ J b) 1.05 × 10⁶ J c) 4.50 × 10⁵ J d) 3.00 × 10⁵ J e) -4.50 × 10⁵ J
2. Un sistema de un gas ideal de 2.0 moles es mantenido a un volumen constante de 4.0 litros. Si 100 J de energía térmica se transfieren al sistema, ¿cuánto es el cambio en energía interna del sistema? a) 0 b) 400 J c) 70 J d) 100 J e) -0.100 J

3. Un gas ideal es mantenido a una presión constante de 70.0 kPa durante un proceso isobárico mientras su volumen decrece por 0.20 m^3 . ¿Cuál es el trabajo realizado por el sistema sobre su entorno? a) 14 kJ b) 35 kJ c) -14 kJ d) -35 kJ e) -72 kJ
4. ¿Cuánto trabajo neto es realizado por el gas que experimenta el proceso cíclico mostrado en la figura POM12.4? Elija la mejor estimación a) $1 \times 10^5 \text{ J}$ b) $2 \times 10^5 \text{ J}$ c) $3 \times 10^5 \text{ J}$ d) $4 \times 10^5 \text{ J}$ e) $5 \times 10^5 \text{ Pa}$

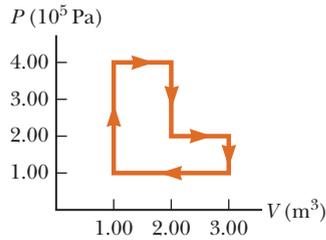


Figura POM12.4

5. Un gas diatómico ideal se expande adiabáticamente de un volumen de 1.00 m^3 a un volumen final de 3.50 m^3 . Si la presión inicial es $1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$, ¿cuál es la presión final? a) $6.62 \times 10^4 \text{ Pa}$ b) $1.24 \times 10^5 \text{ Pa}$ c) $3.54 \times 10^4 \text{ Pa}$ d) $2.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ e) $1.73 \times 10^4 \text{ Pa}$
6. Un gas ideal conduce un pistón cuando se expande de 1.00 a 2.00 m^3 a una temperatura constante de 850 K . Si hay 390 moles de gas en el pistón. ¿Cuánto trabajo hace el gas en desplazar el pistón? a) $1.9 \times 10^6 \text{ J}$ b) $2.5 \times 10^6 \text{ J}$ c) $4.7 \times 10^6 \text{ J}$ d) $2.1 \times 10^5 \text{ J}$ e) $3.5 \times 10^6 \text{ J}$
7. Un motor hace 15 kJ de trabajo mientras rechaza 37 kJ al depósito frío. ¿Cuál es la eficiencia del motor? a) 0.15 b) 0.29 c) 0.33 d) 0.45 e) 1.2
8. Un refrigerador realiza 18 kJ de trabajo mientras mueve 115 kJ de energía térmica del interior del refrigerador. ¿Cuál es su coeficiente de operación? a) 3.4 b) 2.8 c) 8.9 d) 6.4 e) 5.2
9. Si un gas es comprimido isotérmicamente, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) La energía es transferida al gas por calor. b) No hay trabajo realizado sobre el gas. c) La temperatura del gas aumenta. d) La energía interna del gas permanece constante. e) Ninguna de las anteriores.
10. Un bloque de 1.00 kg de hielo a 0°C y 1.0 atm se derrete completamente en agua a 0°C . Calcule el cambio de entropía del hielo durante el proceso de derretimiento. (Para el hielo $L_f = 3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}$.) a) 3340 J/K b) 2170 J/K c) -3340 J/K d) 1220 J/K e) -1220 J/K
11. Una turbina de vapor opera con una caldera a temperatura de 450 K y a una temperatura de extracción de $3.0 \times 10^2 \text{ K}$. ¿Cuál es la eficiencia teórica máxima de este sistema? a) 0.24 b) 0.50 c) 0.33 d) 0.67 e) 0.15
12. Cuando un gas ideal experimenta una expansión adiabática, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) La temperatura del gas no cambia. b) No hay trabajo realizado por el gas. c) No se entrega energía al gas por calor. d) La energía interna del gas no cambia. e) La presión crece.
13. Si un gas ideal experimenta un proceso isobárico, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es correcta? a) La temperatura del gas no cambia. b) El trabajo es realizado sobre o por el gas. c) No hay energía transferida por calor al o del gas. d) El volumen del gas permanece igual. e) La presión del gas decrece uniformemente.
14. Dos gases ideales, denominados *A* y *B*, ocupan recipientes con volúmenes idénticos. Los gases tienen las mismas presiones y temperaturas iniciales. La misma cantidad de energía térmica *Q* se transfiere a cada uno de ellos. La presión final del gas *A* es mayor que la presión final del gas *B*. ¿Cuál de los enunciados siguientes podría explicar la discrepancia? a) El gas *A* es monoatómico; el gas *B* es diatómico. b) El gas *A* es diatómico, el gas *B* es monoatómico. c) Hay más moles de gas *A* que de gas *B*. d) Hay más moles de gas *B* que de gas *A*. e) El calor molar específico del gas *A* es menor que el del gas *B*.
15. Si un gas ideal es comprimido a la mitad de su volumen inicial, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera con respecto al trabajo realizado sobre el gas? a) El proceso isotérmico involucra el mayor trabajo. b) El proceso adiabático involucra el mayor trabajo. c) El proceso isobárico involucra el mayor trabajo. d) El proceso isovolumétrico involucra el mayor trabajo. e) El trabajo realizado es independiente del proceso.
16. Un proceso termodinámico ocurre cuando la entropía de un sistema cambia por -6 J/K . De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, ¿qué puede usted concluir acerca del cambio de entropía del entorno? a) Debe ser $+6 \text{ J/K}$ o menor. b) Debe ser igual a 6 J/K . c) Debe estar entre 6 J/K y 0. d) Debe ser 0. e) Debe ser $+6 \text{ J/K}$ o más.
17. Cuando se añade suficiente energía térmica a una sustancia como el plomo, este se funde. ¿Qué sucede con la entropía de la sustancia que se derrite? a) sigue siendo la misma, b) aumenta, c) disminuye, d) puede aumentar o disminuir, dependiendo de la masa de la sustancia. e) puede aumentar o disminuir dependiendo del proceso utilizado.
18. Un acondicionador de aire de ventana se coloca en una mesa dentro de un apartamento bien aislado, se enchufa y se enciende, ¿qué sucede con el promedio de temperatura del apartamento? a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece constante. d) Aumenta hasta que la unidad se calienta y después disminuye. e) La respuesta depende de la temperatura inicial del apartamento.

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿Cuáles son algunos factores que afectan la eficiencia de un motor de automóvil?
- Si usted sacude un tarro lleno de frijoles de diferentes tamaños, los frijoles más grandes tienden a aparecer más cerca de la tapa y los más pequeños tienden a irse hacia el fondo. a) ¿Por qué ocurre esto? b) ¿Viola este proceso la segunda ley de la termodinámica?
- BIO** Suponga que el cuerpo humano realiza un extenuante ejercicio, como levantar pesas o montar en bicicleta. El trabajo lo está haciendo el cuerpo y la energía se está escapando por conducción de la piel al aire circundante. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, la temperatura del cuerpo debería disminuir constantemente durante el ejercicio. Sin embargo, esto no pasa. ¿Se invalida la primera ley en esta situación? Explique.
- Distinga claramente entre temperatura, calor y energía interna.
- Para un gas ideal en un proceso isotérmico, no hay cambio en la energía interna. Suponga que el gas realiza trabajo W durante tal proceso. ¿Cuánta energía fue transferida por calor?
- Una turbina de vapor es un importante componente de una planta generadora de electricidad. ¿Por qué es ventajoso aumentar tanto como sea posible la temperatura del vapor?
- ¿Es posible construir una máquina térmica que no produzca contaminación térmica?
- En los estanques solares construidos en Israel, la energía del Sol se concentra cerca del fondo de un estanque de agua salada. Con capas adecuadas de sal en el agua, se evita la convección y se pueden alcanzar temperaturas de 100°C . ¿Puede usted intuir la máxima eficiencia con la que se puede extraer trabajo mecánico del estanque?
- Cuando se agita un termo sellado lleno de café caliente, ¿qué cambios, si los hay, tienen lugar en a) la temperatura del café y b) su energía interna?
- Dé algunos ejemplos de procesos irreversibles que ocurren en la naturaleza. Dé un ejemplo de un proceso en la naturaleza que sea casi reversible.
- La primera ley de la termodinámica sostiene que de un proceso no se puede sacar más de lo que se pone, pero la segunda ley afirma que no podemos salir ganando. Explique este enunciado.
- Si lentamente se deja evaporar una solución supersaturada de azúcar, se forman cristales de azúcar en el recipiente. Por lo tanto, las moléculas de esta sustancia pasan de una forma desordenada (en solución) a una forma cristalina altamente ordenada. ¿Viola este proceso la segunda ley de la termodinámica? Explique.
- Usando la primera ley de la termodinámica, explique por qué la energía *total* de un sistema aislado es siempre constante.
- ¿Qué está mal en la siguiente declaración: “Dados dos cuerpos, el que tiene la temperatura más alta contiene más calor.”

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

12.1 Trabajo en procesos termodinámicos

- C/C** Un gas ideal está encerrado en un cilindro con un pistón móvil en la parte superior del mismo. El pistón tiene una masa de 8000 g , y un área de 5.00 cm^2 y está libre para deslizarse hacia arriba y hacia abajo, manteniendo la presión de la constante de los gases. a) ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas, la temperatura de 0.200 mol del gas se eleva de 20.0 a 300°C ? b) ¿Qué indica el signo de su respuesta sobre el inciso a)?
- Esboce un diagrama PV para encontrar el trabajo realizado por el gas durante las siguientes etapas: a) Un gas se expande de un volumen de 1.0 a 3.0 L a una presión

constante de 3.0 atm . b) El gas es después enfriado a volumen constante hasta que la presión baja a 2.0 atm . c) Después, el gas es comprimido a presión constante de 2.0 atm de un volumen de 3.0 a 1.0 L . (*Nota:* Sea cuidadoso con los signos.) d) El gas es calentado hasta que su presión crece de 2.0 a 3.0 atm a un volumen constante. e) Encuentre el trabajo neto realizado durante el ciclo completo.

- M** Un gas en un contenedor está a una presión de 1.5 atm y un volumen de 4.0 m^3 . ¿Cuál es el trabajo realizado *sobre* el gas, a) si se expande a presión constante al doble de su volumen inicial? b) ¿Cuál si se comprime a presión constante a un cuarto de su volumen inicial?

4. Un proyectil de 40.0 g es lanzado por la expansión de un gas caliente en una disposición que se muestra en la figura P12.4a. El área de la sección transversal del tubo de lanzamiento es de 1.0 cm^2 y la distancia que el proyectil recorre por el tubo de lanzamiento después de su arranque desde el reposo es de 32 cm. Cuando el gas se expande, varía la presión, como se aprecia en la figura P12.4b. Los valores de la presión y volumen iniciales son $P_i = 11 \times 10^5 \text{ Pa}$ y $V_i = 8.0 \text{ cm}^3$, mientras que los valores finales son $P_f = 1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ y $V_f = 40.0 \text{ cm}^3$. La fricción entre el proyectil y el tubo de lanzamiento es mínimo. a) Si el proyectil es lanzado en el vacío, ¿cuál es su rapidez cuando sale del tubo de lanzamiento? b) Si, por el contrario, el proyectil es lanzado en aire a una presión de $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$, ¿qué fracción del trabajo realizado por el gas en expansión en el tubo es consumida por el proyectil que aparta aire de su camino cuando avanza por el tubo?

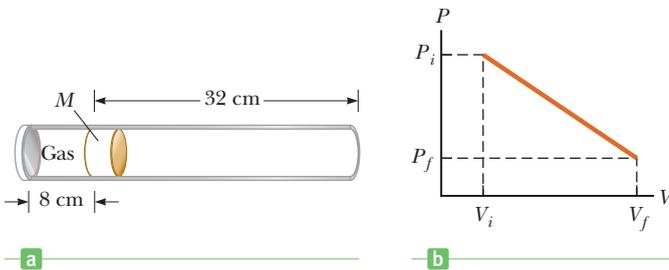


Figura P12.4

5. Un gas se expande de I a F a lo largo de las tres trayectorias indicadas en la figura P12.5. Calcule el trabajo realizado *sobre* el gas a lo largo de las trayectorias a) IAF , b) IF y c) IBF .

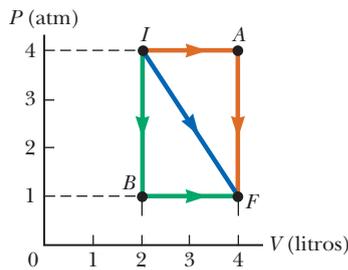


Figura P12.5 (Problemas 5 y 13).

6. Trace un diagrama PV de los siguientes procesos: a) Un gas se expande a presión constante P_1 del volumen V_1 al volumen V_2 . Luego se mantiene a volumen constante mientras que la presión se reduce a P_2 . b) Un gas reduce su presión de P_1 a P_2 mientras que su volumen se mantiene constante en V_1 . Luego se expande a presión constante P_2 a un volumen final V_2 . c) ¿En cuál de los procesos hay más trabajo realizado *por* el gas? ¿Por qué?
7. Una muestra de helio se comporta como gas ideal cuando se calienta a presión constante de 273 a 373 K. Si durante este proceso el gas realiza 20.0 J de trabajo, ¿cuál es la masa de helio presente?

8. a) Determine el trabajo realizado *por* un gas ideal, que se expande del punto A al punto B a lo largo de la ruta que se muestra en la figura P12.8. b) ¿Cuánto trabajo realiza el gas si se comprime de B a A por el mismo camino?

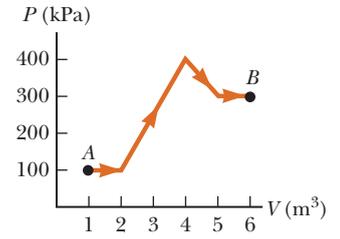


Figura P12.8

9. Un mol de un gas ideal inicialmente a una temperatura de $T_i = 0^\circ\text{C}$ experimenta una expansión a una presión constante de 1.00 atm a cuatro veces su volumen original. a) Calcule la nueva temperatura T_f del gas. b) Calcule el trabajo realizado *sobre* el gas durante la expansión.
10. a) Determine el trabajo realizado *sobre* un fluido que se expande de i a f como se indica en la figura P12.10. b) ¿Cuánto trabajo es realizado sobre el fluido si es comprimido de f a i a lo largo de la misma trayectoria?

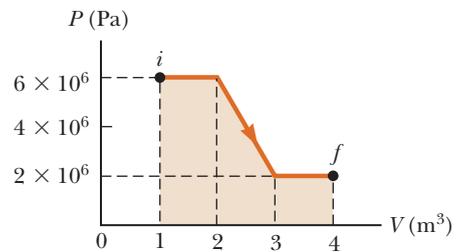


Figura P12.10

12.2 Primera ley de la termodinámica

12.3 Procesos térmicos

11. **S** La única forma de energía poseída por las moléculas de un gas ideal monoatómico, es por energía cinética de traslación. Usando el resultado de la discusión de la teoría cinética en la sección 10.5, demuestre que la energía interna de un gas ideal a presión P y que ocupa un volumen V puede expresarse como $U = \frac{3}{2}PV$.
12. **PG** Un cilindro de volumen de 0.300 m^3 contiene 10.0 moles de gas neón a 20.0°C . Suponga que el neón se comporta como un gas ideal. a) ¿Cuál es la presión del gas? b) Encuentre la energía interna del gas. c) Suponga que el gas se expande a presión constante a un volumen de 1.000 m^3 , ¿cuánto trabajo es realizado sobre el gas? d) ¿Cuál es la temperatura del gas en el nuevo volumen? e) Encuentre la energía interna del gas cuando su volumen es 1.000 m^3 . f) Calcule el cambio en la energía interna durante la expansión. g) Calcule $\Delta U - W$. h) ¿Debe la energía térmica ser transferida al gas durante la expansión a presión constante o quitarse? i) Calcule Q la energía térmica de transferencia. j) ¿Cuál es la relación simbólica entre Q , ΔU y W que sugieren los valores obtenidos?
13. **M** Un gas se expande de I a F en la figura P12.5. La energía agregada al gas por calor es 418 J cuando el gas

va de I a F a lo largo de la trayectoria diagonal. a) ¿Cuál es el cambio en energía interna del gas? b) ¿Cuánta energía debe agregarse al gas por calor para la trayectoria indirecta IAF para dar el mismo cambio en energía interna?

14. **CIC** En una competencia, un velocista realiza 4.8×10^5 J de trabajo y su energía interna disminuye en 7.5×10^5 J. a) Determine el calor transferido entre su cuerpo y su entorno durante este evento. b) ¿Qué indica el signo de su respuesta al inciso a)?

15. Un gas es comprimido a una presión constante de 0.800 atm de 9.00 a 2.00 L. En el proceso, 400 J de energía abandona el gas por calor. a) ¿Cuál es el trabajo realizado sobre el gas? b) ¿Cuál es el cambio en su energía interna?

16. Cierta cantidad de un gas ideal monoatómico experimenta un proceso en el que su presión y volumen se duplican como se ve en la figura P12.16. ¿Cuál es la energía absorbida por calor en el gas durante este proceso? (*Sugerencia:* La energía interna de un gas monoatómico ideal a presión P y que ocupa un volumen V está dada por $U = PV$.)

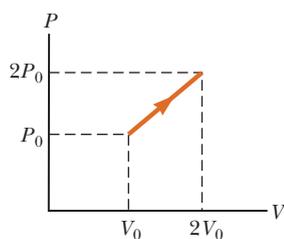


Figura P12.16

17. Un gas está encerrado en un contenedor que tiene un pistón de área de sección transversal de 0.150 m^2 . La presión del gas se mantiene a 6 000 Pa cuando el pistón se mueve hacia adentro 20.0 cm. a) Calcule el trabajo realizado por el gas. b) Si la energía interna del gas decrece por 8.00 J, encuentre la cantidad de calor removido del sistema por calor durante la compresión.

18. Un gas ideal monoatómico experimenta el proceso termodinámico que se muestra en el diagrama PV de la figura P12.18. Determine si cada uno de los valores ΔU , Q y W para el gas es positivo, negativo o cero. (*Sugerencia:* La energía interna de un gas monoatómico ideal a presión P y que ocupa un volumen V está dada por $U = \frac{3}{2}PV$.)

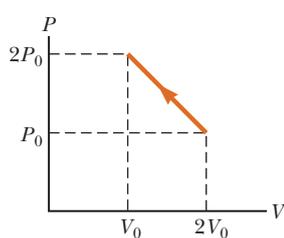


Figura P12.18

19. **CIC** Un gas ideal es comprimido de un volumen $V_i = 5.00$ L a un volumen $V_f = 3.00$ L, mientras está en contacto térmico con un depósito caliente a $T = 295$ K como se muestra en la figura P12.19. Durante el proceso de compresión, el pistón se mueve hacia abajo una distancia de $d = 0.130$ m bajo la acción de una fuerza externa promedio $F = 25.0$ kN. Encuentre a) el trabajo realizado sobre el gas, b) el cambio en energía

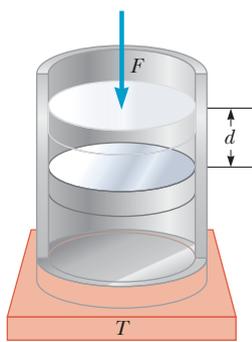


Figura P12.19

interna del gas y c) el intercambio de energía térmica entre el gas y el depósito. d) Si el gas está aislado térmicamente por lo que la energía térmica no podría ser intercambiada, ¿qué pasaría con la temperatura del gas durante la compresión?

20. Un sistema que consiste en 0.025 6 moles de un gas diatómico ideal es llevado del estado A al estado C a lo largo de la ruta mostrada en la figura P12.20. a) ¿Cuánto trabajo se realiza sobre el gas durante este proceso? b) ¿Cuál es la temperatura más baja del gas durante este proceso y donde se produce? c) Encuentre la variación de energía interna del gas y d) la energía entregada al gas en cuando va de A a C. *Sugerencia:* Para el inciso c), adapte la ecuación dada en los comentarios del ejemplo 12.9 a un gas diatómico ideal.

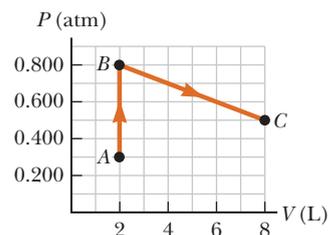


Figura P12.20

21. Un gas monoatómico ideal se expande isotérmicamente desde 0.500 a 1.25 m^3 a una temperatura constante de 675 K. Si la presión inicial es de 1.00×10^5 Pa, encuentre a) el trabajo realizado sobre el gas, b) la transferencia de energía térmica Q y c) el cambio en la energía interna.

22. **S** Un gas ideal se expande a presión constante. a) Demuestre que $P\Delta V = nR\Delta T$. b) Si el gas es monoatómico, parta de la definición de energía interna y demuestre que $\Delta U = \frac{3}{2}W_{\text{ent}}$, donde W_{ent} es el trabajo hecho por el gas sobre su entorno. c) Para el mismo gas ideal monoatómico, demuestre con la primera ley que $Q = \frac{5}{2}W_{\text{ent}}$. d) ¿Es posible que un gas ideal se expanda a presión constante, mientras que agota energía térmica? Explique.

23. **PG** Un gas monoatómico ideal está contenido en un recipiente de volumen constante de 0.200 m^3 . La temperatura inicial y la presión del gas es de 300 K y 5.00 atm, respectivamente. El objetivo de este problema es encontrar la temperatura y la presión del gas después de que 16.0 kJ de energía térmica se suministran al gas. a) Utilice la ley del gas ideal y las condiciones iniciales para calcular el número de moles de gas en el recipiente. b) Determinar el calor específico del gas. c) ¿Cuál es el trabajo realizado por el gas durante este proceso? d) Utilice la primera ley de la termodinámica para encontrar el cambio en la energía interna del gas. e) Determine la variación de la temperatura del gas. f) Calcule la temperatura final del gas. g) Utilice la expresión de los gases ideales para encontrar la presión final del gas.

24. Considere el proceso cíclico descrito por la figura P12.24. Si Q es negativa para el proceso BC y ΔU es negativa para el proceso CA , determine los signos de Q , W y ΔU asociados con cada proceso.

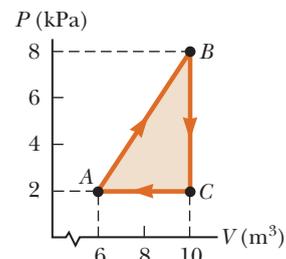


Figura P12.24

25. Un bloque de 5.0 kg de aluminio es calentado de 20 a 90 °C a presión atmosférica. Encuentre a) el trabajo realizado por el aluminio, b) la cantidad de energía que le es transferida por calor y c) el incremento de su energía interna.

26. Un mol de gas está inicialmente a una presión de 2.00 atm, volumen de 0.300 L y tiene una energía interna igual a 91.0 J. En su estado final, el gas está a una presión de 1.50 atm y un volumen de 0.800 L, y su energía interna es igual a 182 J. En las trayectorias IAF, IBF e IF en la figura

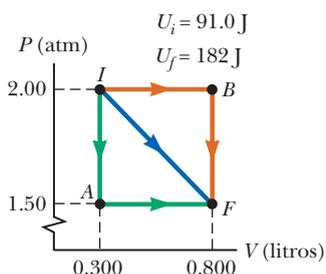


Figura P12.26

P12.26, calcule a) el trabajo realizado sobre el gas y b) la energía neta transferida al gas por calor en el proceso.

27. **S** Considere al Universo como una expansión adiabática de un átomo de gas de hidrógeno. a) Utilice la ley de los gases ideales y la ecuación 12.8a para demostrar que $TV^{\gamma-1} = C$, donde C es una constante. b) El Universo actual se extiende al menos 15 mil millones de años luz en todas direcciones (1.4×10^{26} m), y la temperatura actual del Universo es 2.7 K. Estime la temperatura del Universo cuando su tamaño era del tamaño de una cáscara de nuez, con un radio de 2.0 cm. (Para este cálculo, suponga que el Universo es esférico).

28. Suponga que el Universo es considerado como un gas ideal de átomos de hidrógeno que se expanden adiabáticamente. a) Si la densidad del gas en el Universo es de un átomo de hidrógeno por metro cúbico, calcule el número de moles por unidad de volumen (n/V). b) Calcule la presión del Universo, tomando la temperatura del Universo como 2.7 K. c) Si el radio actual del Universo es de 15 mil millones de años luz (1.4×10^{26} m), encuentre la presión del Universo cuando su tamaño era el de una nuez, con radio 2.0×10^{-2} m. Sea cuidadoso, su calculadora puede colapsarse.

12.4 Máquinas térmicas y la segunda ley de la termodinámica

29. Un gas incrementa su presión de 2.00 a 6.00 atm a un volumen constante de 1.00 m³ y después se expande a presión constante a un volumen de 3.00 m³ antes de regresar a su estado inicial, como se muestra en la figura P12.29. ¿Cuánto trabajo es realizado en un ciclo?

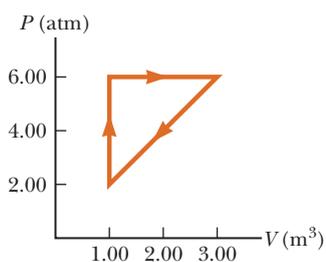


Figura P12.29

30. Un gas ideal se expande a presión constante de 6.00×10^5 Pa de un volumen de 1.00 m³ a un volumen de 4.00 m³ y después es comprimido a una tercera parte de esa pre-

sión y un volumen de 2.50 m³ como se muestra en la figura P12.30, antes de regresar a su estado inicial. ¿Cuánto trabajo es realizado por un gas durante un ciclo del proceso mostrado en la figura?

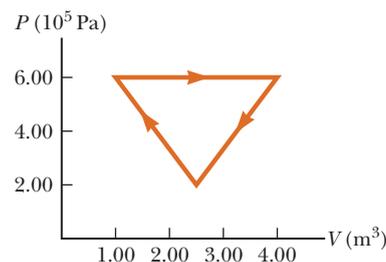


Figura P12.30

31. Un motor térmico opera entre un depósito a 25 °C y uno a 375 °C. ¿Cuál es la eficiencia máxima posible para este motor?

32. **CIC** Un motor térmico está siendo diseñado para tener una eficiencia de 65% cuando opera entre dos depósitos de calor. a) Si la temperatura del depósito frío es 20 °C. ¿Cuál debe ser la temperatura del depósito caliente? b) ¿Puede la eficiencia real del motor ser igual a 65%? Explique.

33. El trabajo realizado por un motor es igual a la cuarta parte de la energía absorbida de un depósito. a) ¿Cuál es su eficiencia térmica? b) ¿Qué fracción de la energía absorbida es expulsada al depósito frío?

34. En cada ciclo de su funcionamiento, una máquina de calor expulsa a 2400 J de energía y lleva a cabo 1800 J de trabajo mecánico. a) ¿Cuánta energía térmica se debe agregar al motor en cada ciclo? b) Hallar el rendimiento térmico del motor.

35. Una de las máquinas más eficientes que se han construido es una turbina de vapor alimentada por carbón, instalada en el Río Ohio, que mueve un generador eléctrico cuando opera entre 1870 y 430 °C. a) ¿Cuál es su máxima eficiencia teórica? b) Su eficiencia real es de 42.0%. ¿Cuánta potencia mecánica entrega la máquina si absorbe 1.40×10^5 J de energía cada segundo desde el depósito caliente?

36. Una pistola es una máquina térmica. En particular, es una máquina de combustión interna con un pistón que no opera en un ciclo, pero viene aparte durante un proceso adiabático de expansión. Cierta pistola consiste en 1.80 kg de hierro. Dispara una bala de 2.40 g a 320 m/s con una eficiencia de energía de 1.10%. Suponga que el cuerpo de la pistola absorbe toda la energía de escape y aumenta su temperatura para un corto tiempo antes de perder cualquier energía por calor en el entorno. Encuentre su incremento de temperatura.

37. Una máquina absorbe 1.70 kJ de un depósito caliente a 277 °C y expulsa 1.20 kJ hacia un depósito frío a 27 °C en cada ciclo. a) ¿Cuál es la eficiencia de la máquina?

- b) ¿Cuánto trabajo se realiza en cada ciclo? c) ¿Cuál es la salida de potencia mecánica de la máquina si cada ciclo dura 0.300 s?
38. Una bomba de calor tiene un coeficiente de operación de 3.80 y funciona con un consumo de energía de 7.03×10^3 W. (Esta potencia es el correspondiente a 2 unidades/tonelada.) a) ¿Cuánta energía libera la bomba de calor en un hogar durante 8.00 h de funcionamiento continuo? b) ¿Cuánta energía se extrae del aire exterior en 8.00 h?
39. Un congelador tiene un coeficiente de funcionamiento de 6.30. El congelador advierte que su uso es a 457 kW-h/año. a) En promedio ¿cuánta energía utiliza el congelador en un sólo día? b) En promedio ¿cuánta energía térmica es removida del congelador cada día? c) ¿Qué cantidad máxima de agua a 20.0°C puede congelar en un solo día? (Un kilowatt hora es una cantidad de energía igual a tener funcionando un electrodoméstico 1 kW por una hora.)
40. **CIC** Suponga que una bomba de calor ideal (Carnot) pudiera ser construida. a) Utilizando la ecuación 12.15, obtenga una expresión para el coeficiente de funcionamiento para esa bomba en términos de T_c y T_h . b) ¿Podría esa bomba de calor trabajar mejor si la diferencia de las temperaturas de operación fueran mayores o menores? c) Calcule el coeficiente de operación para tal bomba de calor si el depósito frío está a 50.0°C y la temperatura interior es de 70.0°C .
41. En un ciclo, una máquina térmica absorbe 500 J de un depósito de alta temperatura y expulsa 300 J hacia un depósito de baja temperatura. Si la eficiencia de esta máquina es 60% de la eficiencia de una máquina de Carnot. ¿Cuál es la razón entre la temperatura baja y la temperatura alta en la máquina de Carnot?
42. **CIC** Se ha propuesto una planta generadora de electricidad para utilizar el gradiente de temperatura del océano. El sistema debe operar entre 20.0°C (temperatura de la superficie del agua) y 5.00°C (temperatura del agua a una profundidad de alrededor de 1 km). a) ¿Cuál es la máxima eficiencia de este sistema? b) Si la salida de potencia útil de la planta es de 75.0 MW. ¿Cuánta energía es absorbida por hora? c) En vista de la respuesta en a) ¿piensa que este sistema vale la pena (considerando que no hay costo de combustible)?
43. Una planta nuclear de energía eléctrica tiene una salida de potencia eléctrica de 435 MW. La velocidad a la que la energía debe ser suministrada a la planta es 1 420 MW. a) ¿Cuál es la eficiencia térmica de la central? b) ¿A qué velocidad la energía térmica es expulsada?
44. **M** Una máquina térmica opera en un ciclo de Carnot entre 80.0 y 350°C . Absorbe 21 000 J de energía por ciclo desde un depósito caliente. La duración de cada ciclo es de 1.00 s. a) ¿Cuál es la salida de potencia mecánica de esta máquina? b) ¿Cuánta energía expulsa en cada ciclo por calor?

12.5 Entropía

45. Un vaso de poliestireno que contiene 125 g de agua caliente a $1.00 \times 10^2^\circ\text{C}$ se enfría a temperatura ambiente de 20.0°C . ¿Cuál es el cambio de entropía de la habitación? (Desprecie el calor específico del vaso y cualquier cambio de temperatura de la habitación.)
46. Un cubo de hielo de 65 g se encuentra inicialmente a 0.0°C . a) Hallar la variación de entropía del cubo después de que se derrita completamente a 0.0°C . b) ¿Cuál es el cambio de entropía del medio ambiente en este proceso? *Sugerencia:* El calor latente de fusión del agua es 3.33×10^5 J/kg.
47. Un congelador se utiliza para congelar completamente 1.0 L de agua hasta convertirla en hielo. El agua y el congelador permanecen a una temperatura constante de $T = 0^\circ\text{C}$. Determine a) el cambio en la entropía del agua y b) el cambio en la entropía del congelador.
48. ¿Cuál es el cambio en entropía de 1.00 kg de agua líquida a 100°C cuando cambia a vapor a 100°C ?
49. Un tronco de 70.0 kg cae desde una altura de 25.0 m en un lago. Si el tronco, el lago y el aire están a 300 K, encuentre el cambio de entropía del Universo durante este proceso.
50. Si usted lanza un par de dados, ¿cuál es el número total de maneras en las cuales usted puede obtener a) 12 b) 7?
51. **M** La superficie del Sol está aproximadamente a 5 700 K y la temperatura de la superficie de la Tierra está aproximadamente a 290 K. ¿Qué cambio de entropía ocurre cuando 1000 J de energía es transferida por calor del Sol a la Tierra?
52. **CIC** Cuando una barra de aluminio es temporalmente conectada entre un depósito caliente a 725 K y un depósito frío a 310 K, 2.50 kJ de energía es transferida por calor de un depósito caliente a un depósito frío. En este proceso irreversible, calcule el cambio en entropía en: a) el depósito caliente, b) el depósito frío y c) el Universo, despreciando cualquier cambio en entropía de la varilla de aluminio. d) Matemáticamente, ¿por qué el resultado en el inciso c) tiene que ser positivo?
53. Prepare una tabla como la tabla 12.3 para los siguientes resultados: lance cuatro monedas al aire simultáneamente y registre todos los posibles resultados de los lanzamientos en términos del número de caras (H) y cruces (T) que se pueden obtener (por ejemplo, HHTH y HTHH son dos posibles maneras en las que tres caras y una cruz pueden ser obtenidos). a) Sobre la base de su tabla, ¿cuál es el resultado más probable de un lanzamiento? En términos de entropía, b) ¿cuál es el estado más ordenado y c) cuál es el más desordenado?
54. **S** Esta es una versión simbólica del problema 52. Cuando una barra de metal está temporalmente conectada entre un depósito caliente a T_h y un depósito frío a T_c , la energía transferida por calor del depósito caliente al frío es Q_h . En este proceso irreversible, encuentre expresiones para el cambio en entropía de a) el depósito caliente, b) el depósito frío y c) el Universo.

12.6 Metabolismo humano

55. En un día típico, un hombre de 65 kg duerme durante 8.0 h, hace tareas ligeras por 3.0 h, camina lentamente durante 1.0 h y corre a un ritmo moderado durante 0.5 h. ¿Cuál es el cambio en su energía interna para todas estas actividades?
56. **BIO C/C** Un levantador de pesas tiene una tasa de metabolismo basal de 80.0 W. Cuando él está trabajando, su tasa metabólica se incrementa alrededor de 650 W. a) ¿Cuántas horas de trabajo le tomará eliminar un panecillo de 450 Calorías si permanece en cama todo el día? b) ¿Cuánto tiempo le llevará si está trabajando? c) Calcule la cantidad de trabajo mecánico necesario para levantar una barra con pesas de 120 kg, a una altura de 2.00 m. d) Deja caer la barra al suelo y la levanta repetidamente. ¿Cuántas veces por minuto debe repetir este proceso para hacer una cantidad de trabajo mecánico equivalente a su aumento de tasa metabólica de 650 W durante el ejercicio? e) ¿Podría realmente hacer repeticiones a la tasa encontrada en el inciso d) al nivel metabólico dado? Explique.
57. **BIO** Sudar es uno de los principales mecanismos con los que el cuerpo disipa calor. El sudor se evapora con un calor latente de 2 430 kJ/kg a la temperatura corporal y el cuerpo puede producir tanto como 1.5 kg de sudor por hora. Si el sudor fuera el único mecanismo de disipación de calor, ¿cuál sería la máxima tasa metabólica sostenible, en watts, si 80% de la energía utilizada por el cuerpo es calor inútil?

Problemas adicionales

58. Una máquina de Carnot opera entre las temperaturas $T_h = 100^\circ\text{C}$ y $T_c = 20^\circ\text{C}$. ¿Por qué factor se incrementa la eficiencia teórica si la temperatura del depósito caliente se incrementa a 550°C ?
59. Un motor térmico de 1 500 kW opera con una eficiencia del 25%. La energía térmica expulsada a la temperatura baja es absorbida por una corriente de agua que enfría las bobinas a 20°C . Si 60 L fluyen a través de las bobinas por segundo, determine el incremento de temperatura del agua.
60. Una máquina de Carnot opera entre 100 y 20°C . ¿Cuánto hielo puede derretir la máquina de su extractor después de hacer un trabajo de $5.0 \times 10^4 \text{ J}$?
61. Una sustancia experimenta el proceso cíclico que se muestra en la figura P12.61. La salida de trabajo ocurre a lo largo de la trayectoria AB, mientras que la entrada de trabajo se requiere a lo largo de la trayectoria BC, y no interviene trabajo en el proceso CA de volumen constan-

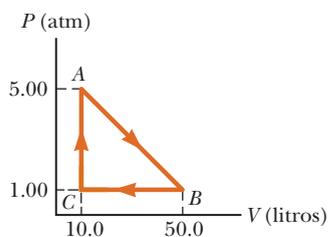


Figura P12.61

te. Ocurren transferencias de energía por calor durante cada proceso del ciclo. a) ¿Cuál es la salida de trabajo durante el proceso AB? b) ¿Cuánto trabajo entrante se necesita durante el proceso BC? c) ¿Cuál es la entrada neta de energía Q durante este ciclo?

62. Cuando un gas sigue la trayectoria 123 en el diagrama PV de la figura P12.62, 418 J de energía entran al sistema por calor y -167 J de trabajo se realizan sobre el gas. a) ¿Cuál es el cambio de energía interna del sistema? b) ¿Cuánta energía Q entra al sistema si el gas sigue la trayectoria 143? El trabajo realizado sobre el gas a lo largo de esta trayectoria es de -63.0 J . ¿Qué trabajo neto sería realizado sobre y por el sistema si éste sigue c) la trayectoria 12341? y d) la trayectoria 14321? e) ¿Cuál es el cambio de energía interna del sistema en los procesos descritos en los incisos c) y d)?

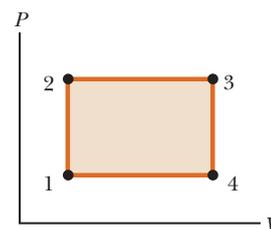


Figura P12.62

63. Una barra de soporte de acero de 100 kg en un edificio tiene una longitud de 2.0 m a una temperatura de 20°C . La barra soporta una carga colgante de 6000 kg. Encuentre a) el trabajo realizado sobre la barra cuando la temperatura se incrementa a 40°C , b) la energía Q añadida a la barra (suponga que el calor específico del acero es el mismo que el del hierro) y c) el cambio en la energía interna de la barra.

64. **S** Un gas ideal inicialmente a presión P_0 , volumen V_0 , y temperatura T_0 se toma a través del ciclo descrito en la figura P12.64. a) Encuentre el trabajo total realizado por el gas por ciclo en términos de P_0 y V_0 . b) ¿Cuál es la energía total Q añadida al sistema por ciclo? c) Obtenga un valor numérico para el trabajo por ciclo total realizado por 1.00 moles de gas inicialmente a 0°C . *Sugerencia:* Recuerde que el trabajo realizado por el sistema es igual al área bajo la curva PV.

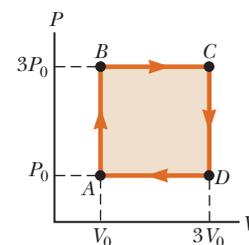


Figura P12.64

65. **M** Un mol de gas neón se calienta de 300 a 420 K a presión constante. Calcule a) la energía Q transferida al gas, b) el cambio en la energía interna del gas y c) el trabajo realizado sobre el gas. Observe que el neón tiene un calor específico molar de $c = 20.79 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ para un proceso a presión constante.

66. Cada segundo en las Cataratas del Niágara, caen aproximadamente 5000 m^3 de agua desde una distancia de 50.0 m. ¿Cuál es el incremento en entropía por segundo debido a la caída de agua? Suponga que la masa de los alrededores es tan grande que su temperatura y la del agua permanecen casi constantes a 20.0°C . También suponga que una cantidad despreciable de agua se evapora.

67. Un cilindro que contiene 10.0 moles de un gas monoatómico ideal se expande de A a B lo largo de la trayectoria

mostrada en la figura P12.67. a) Encuentre la temperatura del gas en el punto A y la temperatura en el punto B. b) ¿Cuánto trabajo realiza el gas durante esta expansión? c) ¿Cuál es el cambio en la energía interna del gas? d) Encuentre la energía transferida al gas por calor en este proceso.

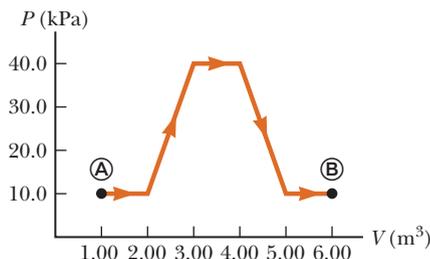


Figura P12.67

68. **PG** Dos moles de hidrógeno molecular (H_2) reaccionan con 1 mol de oxígeno molecular (O_2) para producir 2 moles de agua (H_2O) junto con una liberación de energía de 241.8 kJ/mol de agua. Suponga que un envase esférico de radio 0.500 m contiene 14.4 moles de H_2 y 7.2 moles de O_2 a $20.0^\circ C$. a) ¿Cuál es la presión inicial en el envase? b) ¿Cuál es la energía interna inicial del gas? c) Suponga que una chispa enciende la mezcla y los gases se convierten completamente a vapor en agua. ¿Cuánta energía se produce? d) Encuentre la temperatura y presión del vapor suponiendo que es un gas ideal. e) Encuentre la masa del vapor y luego calcule la densidad del vapor. f) Si se hiciera un hueco pequeño en la esfera, ¿cuál sería la velocidad de escape del vapor si se arrojara al vacío? (Utilice la ecuación de Bernoulli.)
69. **BIO** Suponga que pasa 30.0 minutos en una máquina escaladora, escalando a una tasa de 90.0 peldaños por minuto, con cada escalón de 8.00 pulgadas de altura. Si usted pesa 150 lb y la máquina reporta que deben quemarse 600 kcal al final de la rutina, ¿qué eficiencia utiliza la máquina para obtener este resultado? Si su eficiencia actual es de 0.18, ¿cuántas calorías realmente quemó?
70. **BIO** En el piso del océano profundo se encuentran rejillas de ventilación hidrotérmicas que expulsan chorros de agua a temperaturas tan altas de $570^\circ C$. Esta temperatura está debajo del punto de ebullición del agua debido a la presión tan inmensa a esa profundidad. Debido a que la temperatura del océano es de $4.0^\circ C$, un organis-

mo podría utilizar el gradiente de temperatura como una fuente de energía. a) Suponiendo que el calor específico del agua bajo estas condiciones es de $1.0 \text{ cal/g} \cdot ^\circ C$, ¿cuánta energía es liberada cuando 1.0 litro de agua se enfría de 570 a $4.0^\circ C$? b) ¿Cuál es la máxima energía utilizable que un organismo puede extraer de esta fuente de energía? (Suponga que el organismo tiene algún tipo de máquina térmica interna que actúa entre los dos extremos de temperatura.) c) El agua de estas rejillas contiene sulfuro de hidrógeno (H_2S) a una concentración de 0.90 mmol/litro. La oxidación de 1.0 moles de H_2S produce de energía. ¿Cuánta energía está disponible por medio de la oxidación de H_2S de 1.0 L de agua?

71. Una planta eléctrica tiene una eficiencia total de 15%. La planta va a proporcionar 150 MW de potencia eléctrica a una ciudad y su turbina utiliza carbón como combustible. El carbón quemado produce vapor a $190^\circ C$, el cual mueve las turbinas. El vapor se condensa en agua a $25^\circ C$ cuando pasa por espirales que están en contacto con el agua del río. a) ¿Cuántas toneladas métricas de carbón consume la planta cada día (1 tonelada métrica = $1 \times 10^3 \text{ kg}$)? b) ¿Cuál es el costo total de combustible por año si el precio de entrega es de \$8 por tonelada métrica? c) Si el agua de río está a $20^\circ C$ ¿a qué tasa mínima debe fluir sobre las espirales enfriadoras de modo que su temperatura no exceda los $25^\circ C$? (Nota: El calor de combustión del carbón es $7.8 \times 10^3 \text{ cal/g}$.)
72. Un gas ideal diatómico se expande desde un volumen $V_A = 1.00 \text{ m}^3$ hasta $V_B = 3.00 \text{ m}^3$ a lo largo de la ruta que se muestra en la figura P12.72. Si la presión inicial es $P_A = 2.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ y hay 87.5 moles de gas, calcule a) el trabajo realizado sobre el gas durante este proceso, b) el cambio en la temperatura del gas y c) el cambio en la energía interna del gas. d) ¿Cuánta energía térmica se transfiere al sistema?

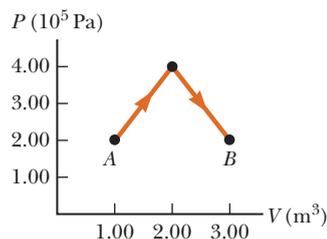


Figura P12.72



Las olas del océano combinan características de ondas transversales y longitudinales. Con el equilibrio y la sincronización apropiados, una persona que practica surf puede aprovechar parte de la energía de la ola y utilizarla para un paseo.

Vibraciones y ondas

13

El movimiento periódico, desde masas sobre resortes hasta vibraciones de átomos, es una de las clases más importantes de comportamiento físico. En este capítulo revisaremos más detalladamente la ley de Hooke, donde la fuerza es proporcional al desplazamiento, tendiendo a restaurar a los objetos a una cierta posición de equilibrio. Una gran cantidad de sistemas físicos se pueden modelar con éxito con esta simple idea, incluyendo las vibraciones de cuerdas, la oscilación de un péndulo y la propagación de las ondas de todas las clases. Todos estos fenómenos físicos involucran un movimiento periódico.

Las vibraciones periódicas pueden causar perturbaciones que se mueven en un medio bajo la forma de ondas. Muchas clases de ondas se observan en la naturaleza como ondas acústicas, ondas del agua, ondas sísmicas y ondas electromagnéticas. Estos fenómenos físicos muy diversos son descritos por términos comunes y conceptos introducidos aquí.

13.1 Ley de Hooke

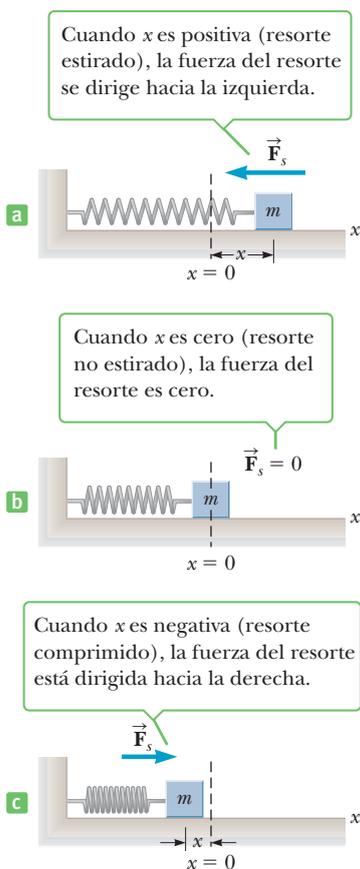
Una de las clases más simples de movimiento vibratorio es el de un objeto unido a un resorte, analizado previamente en el contexto de la energía en el capítulo 5. Supusimos el movimiento del objeto en una superficie horizontal sin fricción. Si se estira el resorte o se comprime una pequeña distancia x desde su posición sin estirar o de equilibrio y luego se suelta, se ejerce una fuerza sobre el objeto, como se muestra en la figura 13.1 (página 438). Distintos experimentos han demostrado que esta fuerza del resorte obedece a la ecuación

$$F_s = -kx$$

[13.1]

donde x es el desplazamiento del objeto desde su posición de equilibrio ($x = 0$) y k es una constante positiva llamada la **constante del resorte**. Esta ley de la fuerza de resortes fue

- 13.1 Ley de Hooke
- 13.2 Energía potencial elástica
- 13.3 Comparación del movimiento armónico simple con el movimiento circular uniforme
- 13.4 Posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo
- 13.5 Movimiento de un péndulo
- 13.6 Oscilaciones amortiguadas
- 13.7 Ondas
- 13.8 Frecuencia, amplitud y longitud de onda
- 13.9 Velocidad de ondas sobre cuerdas
- 13.10 Interferencia de ondas
- 13.11 Reflexión de ondas
- ◀ Ley de Hooke

**Figura activa 13.1**

La fuerza ejercida por un resorte sobre un objeto, varía de acuerdo con el desplazamiento del objeto desde la posición de equilibrio, $x = 0$.

descubierta por Roberto Hooke en 1678 y se conoce como **ley de Hooke**. El valor de k es una medida de la rigidez del resorte. Los resortes rígidos tienen grandes valores de k , y los resortes suaves tienen valores pequeños de k .

El signo negativo en la ecuación 13.1 significa que la fuerza ejercida por el resorte está siempre dirigida en sentido *opuesto* al desplazamiento del objeto. Cuando el objeto está a la derecha de la posición de equilibrio, como en la figura activa 13.1a, x es positiva y F_s es negativa. Esto significa que la fuerza se ejerce en la dirección negativa, hacia la izquierda. Cuando el objeto está a la izquierda de la posición de equilibrio, como en la figura activa 13.1c, x es negativa y F_s es positiva, indicando que la dirección de la fuerza es hacia la derecha. Por supuesto, cuando $x = 0$, como en la figura activa 13.1b, el resorte no está estirado y $F_s = 0$. Como la fuerza del resorte actúa siempre hacia la posición de equilibrio, algunas veces se le llama **fuerza restauradora**. **Una fuerza restauradora siempre empuja o jala del objeto hacia la posición de equilibrio.**

Suponga que el objeto es jalado inicialmente a una distancia A a la derecha y es soltado desde el reposo. La fuerza ejercida por el resorte sobre el objeto tira de él hacia la posición del equilibrio. Cuando el objeto se mueve hacia $x = 0$, la magnitud de la fuerza disminuye (porque x decrece) y alcanza cero en $x = 0$. El objeto gana velocidad cuando se mueve hacia la posición de equilibrio; sin embargo alcanza su velocidad máxima cuando $x = 0$. La cantidad de movimiento ganada por el objeto lo hace llegar más allá de la posición del equilibrio y comprimir el resorte. Cuando el objeto se mueve a la izquierda de la posición del equilibrio (valores negativos de x), la fuerza del resorte actúa a la derecha, aumentando constantemente en fuerza, y disminuyendo la velocidad del objeto. Finalmente el objeto viene brevemente al reposo en $x = -A$ antes de acelerar de regreso hacia $x = 0$ y en última instancia volver a la posición original en $x = A$. El proceso entonces se repite y el objeto continúa oscilando hacia adelante y hacia atrás sobre la misma trayectoria. Este tipo de movimiento se llama **movimiento armónico simple**. **El movimiento armónico simple ocurre cuando la fuerza neta a lo largo de la dirección del movimiento obedece a la ley de Hooke, es decir, cuando la fuerza neta es proporcional al desplazamiento desde el punto de equilibrio y siempre se dirige hacia el punto de equilibrio.**

No todo movimiento periódico sobre la misma trayectoria se puede clasificar como movimiento armónico simple. Una pelota que va y viene entre un padre y su hijo, se mueve de forma repetitiva, pero el movimiento no es armónico simple porque la fuerza que actúa sobre la bola no tiene la forma de la ley de Hooke de la ecuación 13.1.

El movimiento de un objeto suspendido de un resorte vertical también es un movimiento armónico simple. En este caso, la fuerza de gravedad que actúa sobre el objeto estira el resorte hasta alcanzar el equilibrio y el objeto queda suspendido en el reposo. Por definición, la posición de equilibrio del objeto es cuando $x = 0$. Cuando el objeto se mueve alejándose de la posición de equilibrio una distancia x y luego es liberado, una fuerza neta actúa hacia la posición de equilibrio. Debido a que la fuerza neta es proporcional a x , el movimiento es armónico simple.

Los siguientes tres conceptos son importantes en el análisis de cualquier tipo de movimiento periódico:

- La **amplitud** A es la distancia máxima del objeto desde su posición de equilibrio. En ausencia de fricción, un objeto en movimiento armónico simple oscila entre las posiciones $x = -A$ y $x = +A$.
- El **periodo** T es el tiempo que le toma al objeto en realizar un ciclo completo de movimiento; es decir, de $x = A$ a $x = -A$ y de regreso a $x = A$.
- La **frecuencia** f es el número de ciclos o vibraciones completas por unidad de tiempo, y es el recíproco del periodo ($f = 1/T$).

La aceleración de un objeto que se mueve con movimiento armónico simple se puede encontrar mediante el uso de la ley de Hooke en la ecuación de la segunda ley de Newton, $F = ma$. Esto da

$$ma = F = -kx$$

$$a = -\frac{k}{m}x$$

[13.2]

La ecuación 13.2, que es un ejemplo de una *ecuación de un oscilador armónico*, da la aceleración como una función de la posición. Como el valor máximo de x está definido como la amplitud A , la aceleración está entre los valores $-kA/m$ y $+kA/m$. En la siguiente sección encontraremos ecuaciones para la velocidad como una función de la posición y para la posición como una función del tiempo. Los resortes que satisfacen la ley de Hooke también se llaman resortes *ideales*. En los resortes reales, la elasticidad de la masa del resorte, la fricción interna, y la elasticidad variable afectan a la ley de la fuerza y el movimiento.

Examen rápido

13.1 Un bloque en el extremo de un resorte horizontal, se jala de su posición de equilibrio en $x = 0$ a $x = A$ y se suelta. ¿Qué distancia total se desplaza en un ciclo completo de su movimiento? a) $A/2$ b) A c) $2A$ d) $4A$

13.2 Para un oscilador armónico simple, ¿cuáles de los siguientes pares de cantidades vectoriales no pueden estar en la misma dirección? (El vector de posición es el desplazamiento desde el equilibrio.) a) La posición y la velocidad. b) La velocidad y la aceleración. c) La posición y la aceleración.

Tip 13.1 Las ecuaciones para la aceleración constante no aplican

La aceleración a de una partícula en movimiento armónico simple *no* es constante. Cambia variando con x , así que no es posible aplicar las ecuaciones de la cinemática para aceleración constante del capítulo 2.

EJEMPLO 13.1 Movimiento armónico simple sobre una superficie sin fricción

OBJETIVO Calcule las fuerzas y la aceleración para un sistema con un resorte horizontal.

PROBLEMA Un objeto de 0.350 kg unido a un resorte cuya constante es 1.30×10^2 N/m se mueve libremente sobre una superficie horizontal sin fricción, como se muestra en la figura 13.1. Si el objeto se suelta desde el reposo en $x = 0.100$ m, encuentre la fuerza sobre él y su aceleración en $x = 0.100$ m, $x = 0.050$ m, $x = 0$ m, $x = -0.050$ m y $x = -0.100$ m.

ESTRATEGIA Sustituya las cantidades dadas en la ley de Hooke para encontrar las fuerzas; después calcule las aceleraciones con la segunda ley de Newton. La amplitud A es la misma cuando el punto de liberación a partir del reposo está en $x = 0.100$ m.

SOLUCIÓN

Escriba la fuerza en términos de la ley de Hooke.

$$F_s = -kx$$

Sustituya el valor de k y tome $x = A = 0.100$ m, para hallar la fuerza en ese punto:

$$F_{\text{máx}} = -kA = -(1.30 \times 10^2 \text{ N/m})(0.100 \text{ m}) = -13.0 \text{ N}$$

Resuelva la segunda ley de Newton para a y sustituya para encontrar la aceleración en $x = A$:

$$ma = F_{\text{máx}} \\ a = \frac{F_{\text{máx}}}{m} = \frac{-13.0 \text{ N}}{0.350 \text{ kg}} = -37.1 \text{ m/s}^2$$

Repita el proceso para los otros cuatro puntos y forme la tabla:

Posición (m)	Fuerza (N)	Aceleración (m/s ²)
0.100	-13.0	-37.1
0.050	-6.50	-18.6
0	0	0
-0.050	+6.50	+18.6
-0.100	+13.0	+37.1

COMENTARIOS La tabla anterior muestra que cuando la posición inicial se parte a la mitad, también se parten en la misma proporción la fuerza y la aceleración. Además, los valores positivos de x dan valores negativos de la fuerza y la aceleración, mientras que valores negativos de x dan valores positivos de la fuerza y la aceleración. Cuando el objeto se mueve a la izquierda y pasa por el punto de equilibrio, la fuerza del resorte resulta positiva (para valores negativos de x), retardando al objeto.

PREGUNTA 13.1 Al duplicar un desplazamiento dado ¿siempre se duplicará la magnitud de la fuerza del resorte? Explique.

EJERCICIO 13.1 Para el mismo sistema masa-resorte, encuentre la fuerza ejercida por el resorte y la posición x cuando la aceleración del objeto es $+9.00$ m/s².

RESPUESTAS 3.15 N, -2.42 cm

EJEMPLO 13.2 Masa en un resorte vertical

OBJETIVO Aplique la segunda ley de Newton, junto con la fuerza de la gravedad y la ley de Hooke.

PROBLEMA Un resorte se cuelga verticalmente (figura 13.2a), y un objeto de masa m unida al extremo inferior se baja lentamente a una distancia d del punto de equilibrio (figura 13.2b). **a)** Encontrar el valor de la constante del resorte, si este es desplazado 2.0 cm y la masa es de 0.55 kg. **b)** Si un segundo resorte idéntico se une al objeto de forma paralela al primer resorte (figura 13.2 d), ¿en dónde se encuentra el nuevo punto de equilibrio del sistema? **c)** ¿Cuál es la constante de eficiencia de resorte de los dos resortes que actúan como uno solo?

ESTRATEGIA Este ejemplo es una aplicación de la segunda ley de Newton. La fuerza del resorte es hacia arriba, equilibrando la fuerza hacia abajo de la gravedad mg , cuando el sistema está en equilibrio. (Ver figura 13.2c.) Debido a que el objeto suspendido está en equilibrio, la suma de las fuerzas en el objeto es cero y es posible resolver la constante del resorte k . El inciso b) se resuelve de la misma manera, pero tiene dos fuerzas de resorte equilibrando la fuerza de gravedad. Se conocen las constantes de resorte, por lo que la condición de equilibrio puede ser resuelta por el desplazamiento del resorte. El inciso c) implica el uso del desplazamiento encontrado en el inciso b). Tratando los dos resortes como un resorte equivalente, la segunda ley conduce a la constante de eficiencia para el sistema de dos resortes..

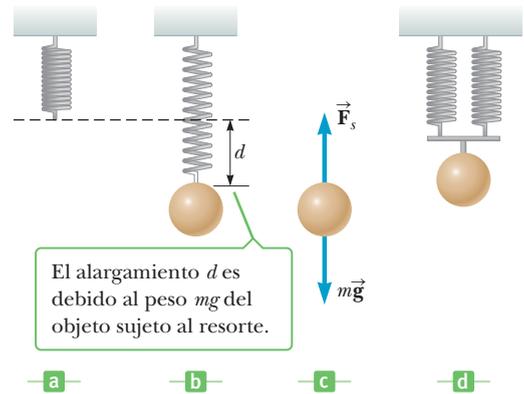


Figura 13.2 (Ejemplo 13.2) a)-c) Determinación de la constante de un resorte. El alargamiento d del resorte se debe al peso suspendido mg . Como la fuerza hacia arriba del resorte equilibra el peso cuando el sistema está en equilibrio, se deduce que $k = mg/d$. d) Un sistema que implica dos resortes en paralelo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el valor de la constante del resorte, si este es desplazado 2.0 cm y la masa es de 0.55 kg.

Aplique la segunda ley de Newton para el objeto (con $a = 0$) y resuelva para la constante de resorte k :

$$\sum F = F_g + F_s = -mg + kd = 0$$

$$k = \frac{mg}{d} = \frac{(0.55 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{2.0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 2.7 \times 10^2 \text{ N/m}$$

b) Si un segundo resorte idéntico se une al objeto de forma paralela al primer resorte (figura 13.2d), encuentre el nuevo punto de equilibrio del sistema.

Aplique la segunda ley de Newton, pero con dos resortes actuando sobre el objeto:

$$\sum F = F_g + F_{s1} + F_{s2} = -mg + kd_2 + kd_2 = 0$$

$$d_2 = \frac{mg}{2k} = \frac{(0.55 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{2(2.7 \times 10^2 \text{ N/m})} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}$$

Despeje d_2 :

c) ¿Cuál es la constante de resorte efectivo, de los dos resortes actuando como uno solo?

Escriba la segunda ley para el sistema, con una constante de resorte eficaz k_{ef} :

$$\sum F = F_g + F_s = -mg + k_{ef}d_2 = 0$$

$$k_{ef} = \frac{mg}{d_2} = \frac{(0.55 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{1.0 \times 10^{-2} \text{ m}} = 5.4 \times 10^2 \text{ N/m}$$

Despeje k_{ef} :

COMENTARIOS En este caso la fuerza del resorte es positiva porque está dirigida hacia arriba. Una vez que la masa es jalada hacia abajo desde su posición de equilibrio y luego liberada, oscila alrededor de su posición de equilibrio, justo como el resorte horizontal. Tenga en cuenta que colocar un resorte adicional idéntico en paralelo es equivalente a tener un solo resorte con el doble de fuerza constante. Sin embargo, el ejercicio 13.2 muestra que cuando los resortes

están unidos extremo con extremo en serie, todos son iguales, ya que resortes grandes tienen constantes de fuerza más pequeñas que los resortes más cortos.

PREGUNTA 13.2 Generalizando: Cuando dos resortes con constantes de fuerza k_1 y k_2 actúan en paralelo sobre un objeto, ¿cuál es la constante elástica k_{eq} del único resorte que sería equivalente a los otros dos, en términos de k_1 y k_2 ?

EJERCICIO 13.2 Cuando un hombre de 75.0 kg añade lentamente su peso a un resorte vertical colgado al techo, alcanza el equilibrio cuando el resorte se estira 6.5 cm. a) Encontrar la constante del resorte. b) Si un segundo resorte idéntico se cuelga del primero y el hombre nuevamente

añade su peso al sistema, ¿cuánto se estira el sistema de resortes? c) ¿Cuál sería la constante del resorte equivalente?

RESPUESTAS a) 1.13×10^4 N/kg b) 13.0 cm c) 5.65×10^3 N/m

13.2 Energía potencial elástica

En esta sección revisaremos el material cubierto en la sección 4 del capítulo 5.

Un sistema de objetos interactuando tiene una energía potencial asociada con la configuración del sistema. Un resorte comprimido tiene una energía potencial que, cuando se le permite expandirse, es capaz de realizar un trabajo sobre un objeto, transformando la energía potencial del resorte del objeto en energía cinética. Por ejemplo, la figura 13.3 muestra una pelota que es proyectada por medio de un resorte en un rifle, donde el resorte es comprimido una distancia x . Cuando el rifle es disparado, el resorte comprimido realiza un trabajo sobre la pelota imprimiéndole una energía cinética.

Recuerde que la energía almacenada en un resorte estirado o comprimido, o algún otro material elástico, se le llama energía potencial elástica, EP_s , y está dada por

$$EP_s \equiv \frac{1}{2}kx^2$$

[13.3]

◀ Energía potencial elástica

Recuerde también que la ley de la conservación de la energía, incluyendo a la energía potencial gravitacional y la del resorte, está dada por

$$(EC + EP_g + EP_s)_i = (EC + EP_g + EP_s)_f$$

[13.4]

Si están presentes fuerzas no conservativas, como la fricción, entonces el cambio en energía mecánica debe ser igual al trabajo realizado por las fuerzas no conservativas:

$$W_{nc} = (EC + EP_g + EP_s)_f - (EC + EP_g + EP_s)_i$$

[13.5]

La energía cinética rotatoria debe estar incluida en ambas ecuaciones, 13.4 y 13.5, para sistemas que involucran torques.

Como ejemplo de las conversiones de energía que tienen lugar cuando un resorte se incluye en el sistema, considere la figura 13.4, página 442. Un bloque de masa m se desliza sobre una superficie horizontal sin fricción, con velocidad constante \vec{v}_i , y choca con un resorte helicoidal. La siguiente descripción se simplifica mucho si se supone que el resorte es muy ligero y, por lo tanto, tiene energía cinética despreciable. Cuando el resorte es comprimido, ejerce una fuerza a la izquierda sobre el bloque. A compresión máxima, el bloque se detiene por un instante (figura 13.4c). La energía inicial total del sistema (bloque-resorte) antes de la colisión es la energía cinética del bloque. Después que el bloque choca con el resorte y éste se comprime parcialmente, como en la figura 13.4b, el bloque tiene energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ (donde $v < v_i$) y el resorte tiene una energía potencial $\frac{1}{2}kx^2$. Cuando el bloque se detiene en un instante en el punto de máxima compresión, la energía cinética es cero. Como la fuerza del resorte es conservativa y debido a que no hay fuerzas externas que puedan realizar trabajo sobre el sistema, **la energía mecánica total del sistema**

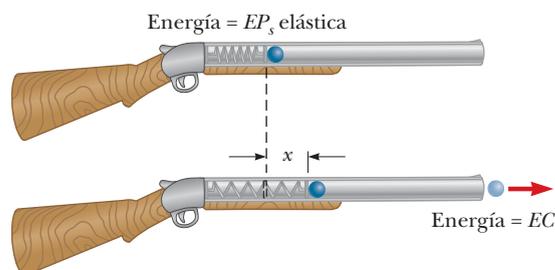
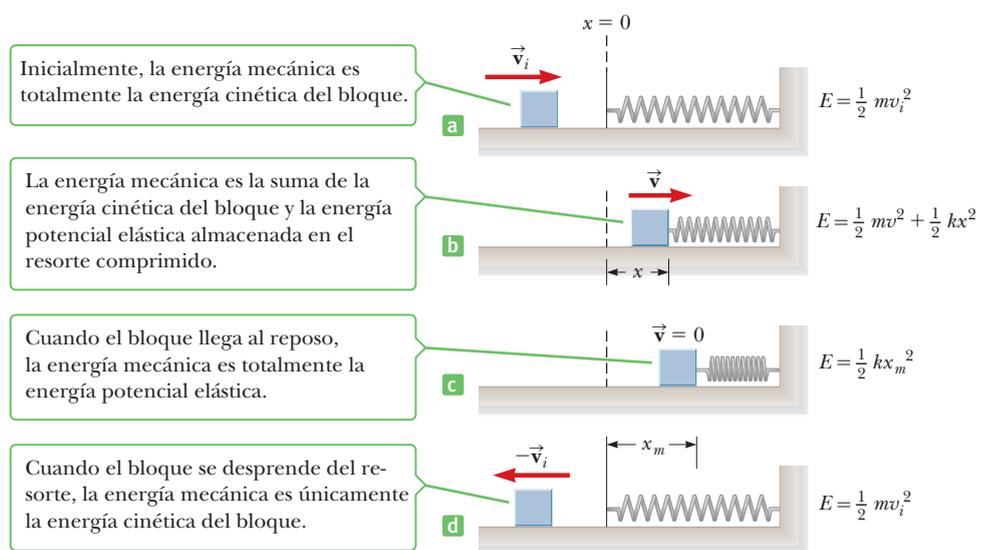


Figura 13.3 Una pelota proyectada desde un rifle con carga de resorte. La energía potencial elástica almacenada en el resorte se transforma en la energía cinética de la pelota.

Figura 13.4 Un bloque que se desliza sobre una superficie horizontal sin fricción choca con un resorte ligero. Ante la ausencia de fricción, la energía mecánica permanece constante.



APLICACIÓN

Arquería



Figura 13.5 La energía potencial elástica se almacena en este arco tensado.

bloque-resorte permanece constante. La energía es transformada de la energía cinética del bloque a la energía potencial almacenada en el resorte. Cuando el resorte se expande, el bloque se mueve en dirección opuesta y vuelve a adquirir toda su energía cinética inicial, como en la figura 13.4d.

Cuando un arquero tira de la cuerda de un arco, se almacena energía potencial elástica en el arco estirado y la cuerda tensada (figura 13.5). Cuando la flecha es lanzada, la energía potencial almacenada en el sistema se transforma en energía cinética de la flecha. Dispositivos como ballestas y hondas trabajan del mismo modo.

Examen rápido

13.3 Cuando un objeto que se mueve en movimiento armónico simple está en su máximo desplazamiento desde el punto de equilibrio, ¿cuál de las siguientes cantidades está en un máximo? a) La velocidad, b) la aceleración o c) la energía cinética.

EJEMPLO 13.3

¡Detengan ese automóvil!

OBJETIVO Aplicar la conservación de la energía y el teorema del trabajo con la energía potencial gravitacional sobre un resorte.

PROBLEMA Un automóvil de 13000 N parte del reposo y se desliza cuesta abajo en una colina de altura 10.0 m (figura 13.6). Después, se mueve por una superficie nivelada hasta chocar con un riel unido a un resorte ligero. a) Despreciando cualquier pérdida debida a la fricción y despreciando la energía cinética rotatoria de las ruedas, encuentre la distancia máxima que se comprime el resorte, suponiendo que la constante del resorte igual a 1.0×10^6 N/m. b) Calcule la aceleración máxima del automóvil después de contactar con el resorte, suponiendo que no hay pérdidas por fricción. c) Si el resorte es comprimido sólo por 0.30 m, encuentre el cambio en la energía mecánica debida a la fricción.

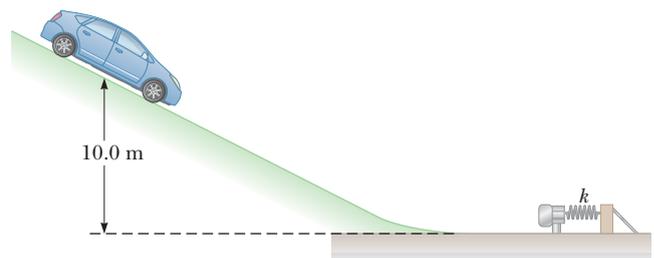


Figura 13.6 (Ejemplo 13.3) Un automóvil parte del reposo sobre una colina en la posición que se muestra. Cuando el automóvil alcanza la parte baja de la colina, choca con un riel unido a un resorte.

ESTRATEGIA Como las pérdidas debidas a la fricción se desprecian, utilice la conservación de la energía en la forma de la ecuación 13.4 para resolver el desplazamiento en el inciso a). Los valores inicial y final de la energía cinética del automóvil son cero, así que la energía potencial del sistema automóvil-resorte-tierra es convertido completamente a energía potencial elástica en el resorte al final del viaje. En el inciso b) aplique la segunda ley de Newton, sustituyendo la respuesta del inciso a) para x , porque la compresión máxima dará la aceleración máxima. En el inciso c) la fricción ya no se descuida, así que utilice el teorema del trabajo y la energía, ecuación 13.5. El cambio en energía mecánica debe ser igual a la energía mecánica perdida debida a la fricción.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la compresión máxima del resorte, suponiendo que no hay pérdida de energía debida a la fricción.

Aplique la conservación de la energía mecánica. Inicialmente sólo hay energía potencial gravitacional y en la compresión máxima del riel-resorte, sólo hay energía potencial en el resorte.

Resuelva para x :

$$(EC + EP_g + EP_s)_i = (EC + EP_g + EP_s)_f$$

$$0 + mgh + 0 = 0 + 0 + \frac{1}{2}kx^2$$

$$x = \sqrt{\frac{2mgh}{k}} = \sqrt{\frac{2(13\,000\text{ N})(10.0\text{ m})}{1.0 \times 10^6\text{ N/m}}} = 0.51\text{ m}$$

b) Calcule la aceleración máxima del automóvil por el resorte, despreciando la fricción.

Aplique la segunda ley de Newton:

Sustituya valores:

$$ma = -kx \rightarrow a = -\frac{kx}{m} = -\frac{kxg}{mg} = -\frac{kxg}{w}$$

$$a = -\frac{(1.0 \times 10^6\text{ N/m})(0.51\text{ m})(9.8\text{ m/s}^2)}{13\,000\text{ N}}$$

$$= -380\text{ m/s}^2$$

c) Si la compresión del riel-resorte es sólo de 0.30 m, encuentre el cambio en la energía mecánica debida a la fricción.

Utilice el teorema del trabajo y la energía:

$$W_{nc} = (EC + EP_g + EP_s)_f - (EC + EP_g + EP_s)_i$$

$$= (0 + 0 + \frac{1}{2}kx^2) - (0 + mgh + 0)$$

$$= \frac{1}{2}(1.0 \times 10^6\text{ N/m})(0.30)^2 - (13\,000\text{ N})(10.0\text{ m})$$

$$W_{nc} = -8.5 \times 10^4\text{ J}$$

COMENTARIOS La respuesta en el inciso b) es cerca de 40 veces mayor que la aceleración de la gravedad, así que mejor ajuste sus cinturones. Observe que la solución no requiere del cálculo de la velocidad del automóvil.

PREGUNTA 13.3 Verdadero o Falso: En ausencia de pérdidas de energía debido a la fricción, duplicar la altura de la colina duplica la aceleración máxima aportada por el resorte.

EJERCICIO 13.3 Un arma cargada con un resorte dispara un disco de hockey a lo largo de una mesa. El disco se desliza por una rampa curvada y sale volando hacia arriba de la mesa. Si el resorte es desplazado 12.0 cm del punto de equilibrio y la constante del resorte es 875 N/m. a) ¿Qué tanto se eleva el disco si se desprecia la fricción? b) Si en vez de esto, se eleva sólo a una altura de 5.00 m debido a la fricción, ¿cuál es el cambio en la energía mecánica?

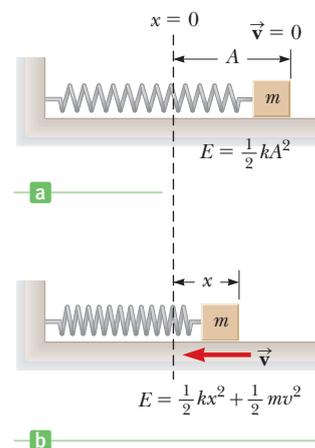
RESPUESTAS a) 6.43 m b) -1.40 J

Además del estudio del ejemplo anterior, le conviene revisar los ejemplos dados en la sección 5.4.

La velocidad como una función de la posición

La conservación de la energía proporciona un método simple para obtener una expresión para la velocidad de un objeto que experimenta un movimiento periódico como una función de la posición. El objeto en cuestión está inicialmente a su máxima extensión A (figura 13.7a, página 444) y después se suelta desde el reposo. La energía inicial del sistema es totalmente energía potencial elástica almacenada en el resorte, $\frac{1}{2}kA^2$. Cuando el objeto se mueve del origen hacia alguna nueva posición x (figura 13.7b), parte de esta energía es transformada en energía cinética y la energía potencial almacenada en el resorte se reduce a $\frac{1}{2}kx^2$. Como la energía total del sistema es igual a $\frac{1}{2}kA^2$ (la energía inicial almacenada en

Figura 13.7 a) Un objeto unido a un resorte sobre una superficie sin fricción se suelta desde el reposo con el resorte extendido una distancia A . Inmediatamente antes de soltarlo, la energía total es energía potencial elástica $\frac{1}{2}kA^2$. b) Cuando el objeto llega a la posición x , tiene una energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ y la energía potencial elástica ha disminuido $\frac{1}{2}kx^2$.



el resorte), podemos igualar esta cantidad a la suma de las energías cinética y potencial en la posición x :

$$\frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$

Resolviendo para v , tenemos

$$v = \pm \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \quad [13.6]$$

Esta expresión demuestra que la velocidad del objeto es máxima en $x = 0$ y es cero en las posiciones extremas $x = \pm A$.

El lado derecho de la ecuación está precedido del signo \pm porque la raíz cuadrada de un número puede ser positiva o negativa. Si el objeto en la figura 13.7 se está moviendo a la derecha, v es positiva; si el objeto se está moviendo a la izquierda, v es negativa.

■ EJEMPLO 13.4 Revisión del sistema objeto-resorte

OBJETIVO Aplicar la expresión de la velocidad independiente del tiempo (ecuación 13.6), a un sistema objeto-resorte.

PROBLEMA Un objeto de 0.500 kg unido a un resorte ligero con una constante de 20.0 N/m oscila sobre una superficie horizontal sin fricción. **a)** Calcule la energía total del sistema y la velocidad máxima del objeto si la amplitud de movimiento es 3.00 cm. **b)** ¿Cuál es la velocidad del objeto cuando el desplazamiento es 2.00 cm? **c)** Calcule las energías cinética y potencial del sistema cuando el desplazamiento es 2.00 cm.

ESTRATEGIA La energía total del sistema puede encontrarse más fácilmente en la amplitud $x = A$, donde la energía cinética es cero. Ahí, la energía potencial sola es igual a la energía total. Entonces, la conservación de la energía proporciona la velocidad en $x = 0$. Para el inciso b), obtenga la velocidad sustituyendo el valor dado de x en la ecuación de la velocidad independiente del tiempo. Utilizando este resultado la energía cinética pedida en el inciso c) puede encontrarse por sustitución y la energía potencial puede hallarse sustituyendo en la ecuación 13.3.

SOLUCIÓN

a) Calcule la energía total y la velocidad máxima si la amplitud es 3.00 cm.

Sustituya $x = A = 3.00$ cm y $k = 20.0$ N/m en la ecuación para la energía mecánica total E :

$$\begin{aligned} E &= EC + EP_g + EP_s \\ &= 0 + 0 + \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(20.0 \text{ N/m})(3.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2 \\ &= 9.00 \times 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

Utilice la conservación de la energía con $x_i = A$ y $x_f = 0$ para calcular la velocidad del objeto en el origen:

$$\begin{aligned} (EC + EP_g + EP_s)_i &= (EC + EP_g + EP_s)_f \\ 0 + 0 + \frac{1}{2}kA^2 &= \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 + 0 + 0 \\ \frac{1}{2}mv_{\text{máx}}^2 &= 9.00 \times 10^{-3} \text{ J} \\ v_{\text{máx}} &= \sqrt{\frac{18.0 \times 10^{-3} \text{ J}}{0.500 \text{ kg}}} = 0.190 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Calcule la velocidad del objeto cuando el desplazamiento es 2.00 cm.

Sustituya los valores conocidos directamente en la ecuación 13.6:

$$\begin{aligned} v &= \pm \sqrt{\frac{k}{m} (A^2 - x^2)} \\ &= \pm \sqrt{\frac{20.0 \text{ N/m}}{0.500 \text{ kg}} [(0.030 \text{ m})^2 - (0.020 \text{ m})^2]} \\ &= \pm 0.141 \text{ m/s} \end{aligned}$$

c) Calcule las energías cinética y potencial cuando el desplazamiento es 2.00 cm.

Sustituya en la ecuación para la energía cinética:

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(0.500 \text{ kg})(0.141 \text{ m/s})^2 = 4.97 \times 10^{-3} \text{ J}$$

Sustituya en la ecuación para la energía potencial del resorte:

$$\begin{aligned} EP_s &= \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}(20.0 \text{ N/m})(2.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2 \\ &= 4.00 \times 10^{-3} \text{ J} \end{aligned}$$

COMENTARIO Con la información dada, es imposible decidir entre las soluciones positiva y negativa en el inciso b). Observe que la suma $EC + EP_s$, en el inciso c) es igual a la energía total E encontrada en el inciso a), como debe ser (excepto por pequeñas discrepancias numéricas por razones de redondeo).

PREGUNTA 13.4 Verdadero o Falso: Al duplicar el desplazamiento inicial se duplica la rapidez del objeto en el punto de equilibrio.

EJERCICIO 13.4 ¿Para qué valores de x la rapidez del objeto es 0.10 m/s?

RESPUESTA $\pm 2.55 \text{ cm}$

13.3 Comparación del movimiento armónico simple con el movimiento circular uniforme

Podemos entender y visualizar mejor muchos aspectos del movimiento armónico simple a lo largo de una recta, observando su relación con el movimiento circular uniforme. La figura activa 13.8 es una vista superior de una distribución experimental que es útil para este propósito. Una pelota se une al borde de una tornamesa de radio A , iluminada en un lado por una lámpara. Encontramos que **cuando la tornamesa gira con una velocidad angular constante, la sombra de la pelota se mueve hacia atrás y adelante con movimiento armónico simple.**

Este hecho se puede comprender examinando la ecuación 13.6, que dice que la velocidad de un objeto con movimiento armónico simple está relacionada con el desplazamiento por la ecuación

$$v = C\sqrt{A^2 - x^2}$$

donde C es una constante. Para ver que la sombra también obedece esta relación, considere la figura 13.9 (página 446), que demuestra que la pelota moviéndose con velocidad constante v_0 en una dirección tangente a la trayectoria circular. En este instante, la velocidad de la pelota en la dirección x está dada por $v = v_0 \sin \theta$, o bien

$$\sin \theta = \frac{v}{v_0}$$

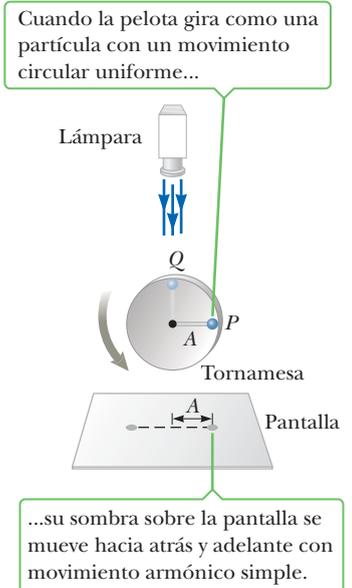


Figura activa 13.8 Dispositivo experimental para mostrar la conexión entre movimiento armónico simple y movimiento circular uniforme.

La componente x de la velocidad de la pelota es igual a la proyección de \vec{v}_0 sobre el eje x .

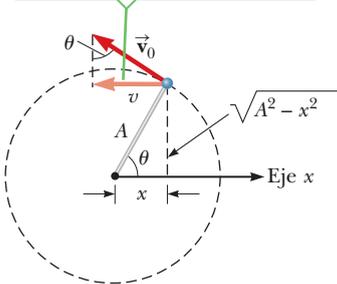


Figura 13.9 La pelota gira con velocidad constante v_0 .

Del mayor triángulo en la figura se puede obtener una segunda expresión para el $\text{sen } \theta$:

$$\text{sen } \theta = \frac{\sqrt{A^2 - x^2}}{A}$$

Igualando los lados derechos de ambas ecuaciones para el $\text{sen } \theta$, se obtiene la siguiente relación entre la velocidad v y el desplazamiento x :

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\sqrt{A^2 - x^2}}{A}$$

o bien

$$v = \frac{v_0}{A} \sqrt{A^2 - x^2} = C \sqrt{A^2 - x^2}$$

La velocidad de la pelota en la dirección de x está relacionada con el desplazamiento en x , exactamente del mismo modo que cuando la velocidad experimenta un movimiento armónico simple.

Un valioso ejemplo de la relación entre el movimiento armónico simple y el movimiento circular, se puede ver en vehículos y máquinas que utilizan el movimiento hacia adelante y atrás de un pistón para generar el movimiento rotatorio de una rueda. Considere la rueda motriz de una locomotora. En la figura 13.10, las bielas están conectadas a un pistón que las mueve hacia adelante y atrás en un movimiento armónico simple. Las bielas que transforman el movimiento de vaivén del pistón en movimiento rotatorio de las ruedas. Un mecanismo similar en el motor de un automóvil transforma el movimiento de vaivén de los pistones en movimiento rotatorio del cigüeñal.

Periodo y frecuencia

El periodo T de la sombra en la figura 13.8, que representa el tiempo requerido para un recorrido completo hacia atrás y adelante, es también el tiempo que toma la pelota en dar una vuelta completa sobre el tornamesa. Debido a que la pelota se desplaza una distancia $2\pi A$ (la circunferencia del círculo) en el tiempo T , la velocidad v_0 de la pelota alrededor de la trayectoria circular es

$$v_0 = \frac{2\pi A}{T}$$

y el periodo es

$$T = \frac{2\pi A}{v_0} \tag{13.7}$$

Imagine que la pelota se mueve de P a Q , un cuarto de revolución, en la figura activa 13.8. El movimiento de la sombra es equivalente al movimiento horizontal de un objeto en el extremo de un resorte. Por esta razón, el radio A del movimiento circular es el mismo que la amplitud A del movimiento armónico simple de la sombra. Durante el cuarto de ciclo mostrado, la sombra se mueve desde un punto donde la energía del sistema (pelota-resorte) es únicamente energía potencial elástica a un punto donde sólo es energía cinética. Por conservación de la energía, se tiene

$$\frac{1}{2} kA^2 = \frac{1}{2} mv_0^2$$

que se puede resolver para A/v_0 :

$$\frac{A}{v_0} = \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Sustituyendo esta expresión para A/v_0 en la ecuación 13.7, tenemos que el periodo es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \tag{13.8}$$

APLICACIÓN

Pistones y ruedas motrices



Figura 13.10 Mecanismo de ruedas motrices en una antigua locomotora.

Periodo de un sistema objeto-resorte que se mueve con movimiento armónico simple

La ecuación 13.8 representa el tiempo requerido para que un objeto de masa m unido a un resorte de constante k complete un ciclo de su movimiento. La raíz cuadrada de la masa está en el numerador, así que una masa muy grande derivará en un gran periodo, lo que está de acuerdo con la intuición. La raíz cuadrada de la constante del resorte k está en el denominador, así que una constante muy grande derivará en un pequeño periodo, otra vez, coincidiendo con la intuición. También es interesante ver que el periodo no depende de la amplitud A .

El inverso del periodo es la frecuencia del movimiento:

$$f = \frac{1}{T} \quad [13.9]$$

De aquí, la frecuencia del movimiento periódico de una masa sobre un resorte es

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [13.10]$$

◀ Frecuencia de un sistema objeto-resorte

Las unidades de frecuencia son ciclos por segundo (s^{-1}) o **hertz** (Hz). La **frecuencia angular** ω es

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [13.11]$$

◀ Frecuencia angular de un sistema objeto-resorte

La frecuencia y la frecuencia angular son conceptos estrechamente relacionados. Las unidades de la frecuencia son ciclos por segundo, donde un ciclo puede pensarse como unidades angulares correspondientes a 2π radianes o 360° . Visto de este modo, la frecuencia angular es justamente una unidad de conversión de frecuencia. La medida en radianes es utilizada principalmente para ángulos porque proporciona un conveniente y natural enlace entre las cantidades lineales y angulares.

Aunque un sistema ideal masa-resorte tiene un periodo proporcional a la raíz cuadrada de la masa m del objeto, experimentalmente se demuestra que la gráfica de T^2 contra m , no pasa por el origen. Esto es porque el objeto tiene en sí mismo una masa. La espiral del resorte oscila justo como el objeto, excepto que las amplitudes son menores para todas las espirales, excepto para la última. Para un resorte cilíndrico, los argumentos de la energía se pueden utilizar para demostrar que la masa adicional *efectiva* de un resorte ligero, es un tercio de la masa del resorte. El cuadrado del periodo es proporcional a la masa total en oscilación, así que la gráfica de T^2 contra la masa total (la masa colgando del resorte más la masa efectiva en oscilación del resorte) pasaría por el origen.

Tip 13.2 Frecuencias Gemelas

La *frecuencia* proporciona el número de ciclos por segundo, mientras que la *frecuencia angular* proporciona el número de radianes por segundo. Estos dos conceptos físicos son casi idénticos y están relacionados por el factor de conversión 2π rad/ciclo.

Examen rápido

13.4 Un objeto de masa m unido a un resorte horizontal, que es estirado un desplazamiento A del punto de equilibrio y luego liberado, experimenta una oscilación armónica sobre una superficie sin fricción con periodo T_0 . El experimento es repetido con una masa de $4m$. ¿Cuál es el nuevo periodo de oscilación? a) $2T_0$ b) T_0 c) $T_0/2$ d) $T_0/4$

13.5 Considere la situación del examen rápido 13.4. ¿Es la subsecuente energía mecánica total del objeto de $4m$ a) mayor que, b) menor que o c) igual a la energía mecánica original total?

■ FÍSICA APLICADA 13.1 Saltando de un bungee

Un cordón elástico (bungee) se puede modelar como un resorte. Si usted salta desde un puente atado a un bungee, subirá y bajará en el extremo del cordón tras su salto (figura 13.11, página 448). Supongamos que usted se lanza y mide la frecuencia de su rebote. Después pasa a otro puente y descubre que el cordón es demasiado largo para saltar desde este puente. ¿Qué posible solución puede haber? En términos de la frecuencia original, ¿cuál es la frecuencia de vibración asociada con la solución?

EXPLICACIÓN Hay dos posibles soluciones: haga el cordón más pequeño o dóblelo por la mitad. Esto último lleva a dos opciones, como puede verse. La fuerza ejercida por el bungee, modelado como resorte, es proporcional a la separación de las espiras del resorte cuando es extendido. Primero, extenderemos el resorte para una distancia dada y mediremos la distancia entre las espiras. Después cortamos el resorte a la mitad. Si una de las mitades es ahora extendida la misma distancia, las espiras estarán el doble de aparta-

das que cuando el resorte estaba completo. Por esto, toma dos veces más fuerza para estirar la mitad del resorte con el mismo desplazamiento, así que la mitad del resorte tiene una constante dos veces del resorte completo. La cuerda doblada puede entonces ser modelada como dos mitades de resorte paralelas. Cada mitad tiene el doble de la constante de resorte que la cuerda original del bungee. Además, un objeto colgando de la cuerda doblada experimentará dos fuerzas, una para cada mitad. Como resultado, la fuerza necesaria para una extensión dada, será cuatro veces el bungee original. La constante efectiva del resorte correspondiente a la cuerda doblada es, por lo tanto, cuatro veces más grande que la constante original. Debido a que la frecuencia de oscilación es proporcional a la raíz cuadrada de la constante del resorte, su frecuencia en la cuerda original será dos veces la de la cuerda original.

Este análisis desprecia el hecho de que las espiras de un resorte tienen una separación original. También es importante recordar que una espira más corta puede perder elasticidad de forma más fácil, posiblemente llegando al límite elástico del material con resultados desastrosos. ¡Saltar en un bungee es peligroso, la prudencia es aconsejable! ■



Figura 13.11 (Física aplicada 13.1) Un saltador en bungee se basa en las fuerzas elásticas para tirar de él hasta apenas por encima de un impacto mortal.

■ EJEMPLO 13.5 ¡Este auto necesita amortiguadores!

OBJETIVO Identificar las relaciones entre periodo, frecuencia y frecuencia angular.

PROBLEMA Un automóvil de 1.30×10^3 kg es construido sobre un bastidor sostenido por cuatro amortiguadores. Cada amortiguador tiene una constante de resorte de 2.00×10^4 N/m. Si dos personas que viajan en el automóvil tienen una masa combinada de 1.60×10^2 kg, encuentre la frecuencia de vibración del automóvil cuando éste es conducido, sobre un bache en el camino. Encuentre además, el período y la frecuencia angular del sistema. Suponga que el peso está uniformemente distribuido.

ESTRATEGIA Como el peso se distribuye uniformemente, cada resorte soporta la cuarta parte de la masa. Sustituya este valor y la constante del resorte en la ecuación 13.10 para obtener la frecuencia. El recíproco es el periodo y multiplicando la frecuencia por 2π se obtiene la frecuencia angular.

SOLUCIÓN

Calcule un cuarto de la masa total:

$$m = \frac{1}{4}(m_{\text{auto}} + m_{\text{ocup}}) = \frac{1}{4}(1.30 \times 10^3 \text{ kg} + 1.60 \times 10^2 \text{ kg}) = 365 \text{ kg}$$

Sustituya en la ecuación 13.10 para encontrar la frecuencia:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2.00 \times 10^4 \text{ N/m}}{365 \text{ kg}}} = 1.18 \text{ Hz}$$

Tome el recíproco para obtener el periodo:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1.18 \text{ Hz}} = 0.847 \text{ s}$$

Multiplique la frecuencia por 2π para obtener la frecuencia angular.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(1.18 \text{ Hz}) = 7.41 \text{ rad/s}$$

COMENTARIO Para resolver este problema no se requiere del conocimiento del tamaño de los baches porque la frecuencia no depende de la amplitud del movimiento.

PREGUNTA 13.5 Verdadero o Falso: La frecuencia de vibración de un vehículo pesado es mayor que la de un vehículo ligero, suponiendo que ambos están soportados por el mismo tipo de resortes.

EJERCICIO 13.5 Un niño de 45.0 kg salta sobre un bastón saltarín con constante del resorte de 3650 N/m. Encuentre a) la frecuencia angular, b) la frecuencia y c) el periodo del movimiento del niño.

RESPUESTAS a) 8.54 rad/s b) 1.36 Hz c) 0.735 s

13.4 Posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo

Podemos obtener una expresión para la posición de un objeto en movimiento armónico simple, como una función del tiempo, regresando a la relación entre movimiento armónico simple y movimiento circular uniforme. Considere, otra vez, una pelota en el borde de una tornamesa de radio A , como en la figura activa 13.12. Nos referiremos a la circunferencia descrito por la pelota como la *circunferencia de referencia* para el movimiento. Supondremos que la tornamesa gira a una velocidad angular *constante* ω . Como la pelota gira sobre la circunferencia de referencia, el ángulo θ descrito por la recta OP con el eje x cambia con el tiempo. Mientras tanto, la proyección de P sobre el eje x , Q , se mueve hacia atrás y adelante a lo largo del eje x con movimiento armónico simple.

Del triángulo OPQ , vemos que $\cos \theta = x/A$, por lo tanto la coordenada x de la pelota es

$$x = A \cos \theta$$

Como la pelota gira con velocidad angular constante, tenemos que $\theta = \omega t$ (ver capítulo 7), así que

$$x = A \cos (\omega t) \quad [13.12]$$

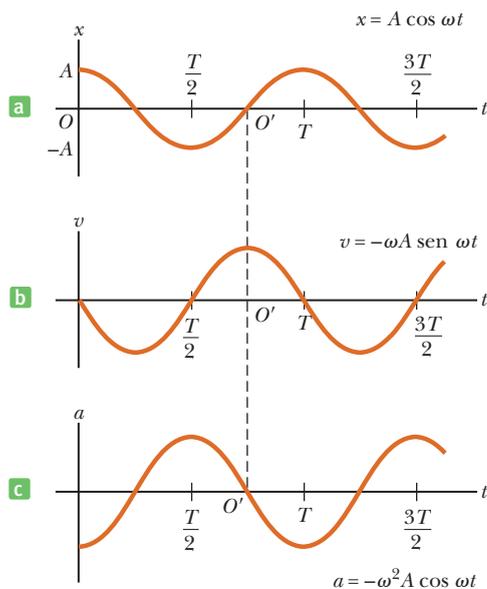
En una revolución completa, la pelota gira todo un ángulo de 2π rad en el periodo T . En otras palabras, el movimiento se repite cada T segundos, por lo tanto

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [13.13]$$

donde f es la frecuencia del movimiento. La velocidad angular de la pelota cuando se mueve alrededor de la circunferencia de referencia, es la misma que la frecuencia angular del movimiento armónico simple proyectado. En consecuencia, la ecuación 13.12 se puede escribir como

$$x = A \cos (2\pi f t) \quad [13.14a]$$

Esta función coseno representa la posición de un objeto que se mueve con movimiento armónico simple como una función del tiempo y aparece graficada en la figura 13.13a. Como la función coseno varía entre 1 y -1 , x varía entre A y $-A$. A la forma de la gráfica se le llama *sinusoidal*.



Cuando la pelota en P gira sobre una circunferencia con velocidad angular uniforme, su proyección Q a lo largo del eje x se mueve con movimiento armónico simple.

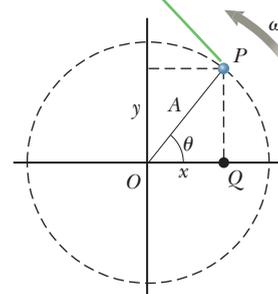


Figura activa 13.12 Circunferencia de referencia.

Figura 13.13 a) Desplazamiento, b) velocidad y c) aceleración contra el tiempo para un objeto que se mueve con movimiento armónico simple bajo condiciones iniciales $x_0 = A$ y $v_0 = 0$ en $t = 0$.

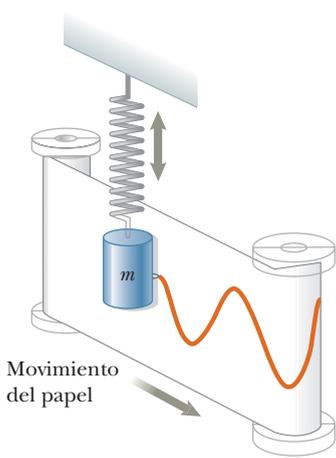


Figura 13.14 Un dispositivo experimental para demostrar el movimiento armónico simple. Un lápiz unido al objeto en oscilación traza una onda sinusoidal sobre el papel en movimiento.

Las figuras activas 13.13b y 13.13c representan curvas para la velocidad y la aceleración como una función del tiempo. Para hallar la ecuación para la velocidad, utilice las ecuaciones 13.6 y 13.14a junto con la identidad $\cos^2 \theta + \sin^2 \theta = 1$, para obtener

$$v = -A\omega \sin(2\pi \text{pies}) \quad [13.14b]$$

donde hemos utilizado el hecho de que $\omega = \sqrt{k/m}$. El signo \pm ya no es muy necesario porque el seno puede tomar valores positivos y negativos. Para obtener una expresión para la aceleración, hay que sustituir la ecuación 13.14a en la ecuación 13.2, la segunda ley de Newton para resortes:

$$a = -A\omega^2 \cos(2\pi \text{pies}) \quad [13.14c]$$

Los pasos detallados para esta obtención se dejan como un ejercicio al estudiante. Observe que cuando el desplazamiento en x está en un máximo, en $x = A$ o $x = -A$, la velocidad es cero, y cuando x es cero, la magnitud de la velocidad es un máximo. Además, cuando $x = +A$, su mayor valor positivo, la aceleración es un máximo pero en la dirección x negativa, y cuando x está en la mayor posición negativa, $x = -A$, la aceleración tiene su valor máximo en la dirección x positiva. Estos hechos son consistentes con nuestro análisis anterior acerca de los puntos en los cuales v y a alcanzan los valores máximo, mínimo y cero.

Los valores máximos de la posición, la velocidad y la aceleración son siempre iguales a la magnitud de la expresión delante de la función trigonométrica en cada ecuación porque el valor más grande para el seno o el coseno, es 1.

La figura 13.14 ilustra un arreglo experimental que muestra la naturaleza sinusoidal del movimiento armónico simple. Un objeto unido a un resorte tiene un lápiz marcador unido a él. Mientras el objeto vibra verticalmente, una hoja de papel se mueve horizontalmente con velocidad constante. El lápiz traza un patrón sinusoidal.

Examen rápido

13.6 Si la amplitud de un sistema que se mueve con movimiento armónico simple se duplica, ¿cuál de las siguientes cantidades *no* cambia? a) la energía total, b) la velocidad máxima, c) la aceleración máxima y d) el periodo

EJEMPLO 13.6 Vibración del sistema objeto-resorte

OBJETIVO Identificar los parámetros físicos de un oscilador armónico desde su descripción matemática.

PROBLEMA a) Encuentre la amplitud, la frecuencia y el periodo del movimiento para un objeto en vibración en el extremo de un resorte horizontal, si la ecuación para su posición como función del tiempo es

$$x = (0.250 \text{ m}) \cos\left(\frac{\pi}{8.00} t\right)$$

b) Encuentre la magnitud máxima de la velocidad y la aceleración. **c)** ¿Cuál es la posición, la velocidad y la aceleración del objeto después de que ha transcurrido 1.00 s?

ESTRATEGIA En el inciso a) la amplitud y la frecuencia pueden hallarse comparando las ecuaciones dadas con la forma estándar de la ecuación 13.14a, marcando los valores numéricos con los correspondientes términos en la forma estándar. En el inciso b) la velocidad máxima ocurrirá cuando la función seno en la ecuación 13.14b sea igual a 1 o -1 , que sean los valores extremos de la función seno (y de igual modo para la aceleración y la función coseno). En cada caso, encuentre la magnitud de la expresión delante de cada función trigonométrica. En el inciso c) es sólo cuestión de sustituir valores en las ecuaciones 13.14a, b y c.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la amplitud, frecuencia y periodo.

Escriba la forma estándar dada por la ecuación 13.14a y abajo escriba la ecuación dada:

$$(1) \quad x = A \cos(2\pi \text{pies})$$

$$(2) \quad x = (0.250 \text{ m}) \cos\left(\frac{\pi}{8.00} t\right)$$

$$A = 0.250 \text{ m}$$

Igualando las ecuaciones (1) y (2) para encontrar las amplitudes:

La frecuencia angular ω es el factor enfrente de t en las ecuaciones (1) y (2). Iguale estos factores:

$$\omega = 2\pi f = \frac{\pi}{8.00} \text{ rad/s} = 0.393 \text{ rad/s}$$

Divida ω entre 2π para obtener la frecuencia f :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 0.0625 \text{ Hz}$$

El periodo T es el recíproco de la frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} = 16.0 \text{ s}$$

b) Encuentre las magnitudes máximas de la velocidad y la aceleración.

Calcule la velocidad máxima a partir del factor enfrente de la función seno en la ecuación 13.14b:

$$v_{\text{máx}} = A\omega = (0.250 \text{ m})(0.393 \text{ rad/s}) = 0.0983 \text{ m/s}$$

Calcule la aceleración máxima a partir del factor enfrente de la función coseno en la ecuación 13.14c:

$$a_{\text{máx}} = A\omega^2 = (0.250 \text{ m})(0.393 \text{ rad/s})^2 = 0.0386 \text{ m/s}^2$$

c) Encuentre la posición, la velocidad y la aceleración del objeto después de 1.00 s.

Sustituya $t = 1.00 \text{ s}$ en la ecuación dada:

$$x = (0.250 \text{ m}) \cos(0.393 \text{ rad}) = 0.231 \text{ m}$$

Sustituya valores en la ecuación de la velocidad:

$$\begin{aligned} v &= -A\omega \sin(\omega t) \\ &= -(0.250 \text{ m})(0.393 \text{ rad/s}) \sin(0.393 \text{ rad/s} \cdot 1.00 \text{ s}) \\ v &= -0.0376 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Sustituya valores en la ecuación de la aceleración:

$$\begin{aligned} a &= -A\omega^2 \cos(\omega t) \\ &= -(0.250 \text{ m})(0.393 \text{ rad/s})^2 \cos(0.393 \text{ rad/s} \cdot 1.00 \text{ s}) \\ a &= -0.0357 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

COMENTARIOS Al evaluar las funciones seno y coseno, el ángulo está en radianes, así que en ambos casos su calculadora debe estar en modo de radianes para evaluar funciones trigonométricas o convertir radianes a grados.

PREGUNTA 13.6 Si se duplica la masa, ¿la magnitud de la aceleración del sistema en cualquier posición a) se duplica b) es la mitad o c) no cambia?

EJERCICIO 13.6 Si el sistema objeto-resorte se describe por $x = (0.330 \text{ m}) \cos(1.50t)$, encuentre a) la amplitud, la frecuencia angular, la frecuencia y el periodo, b) las magnitudes máximas de la velocidad y la aceleración y c) la posición, la velocidad y la aceleración cuando $t = 0.250 \text{ s}$.

RESPUESTAS a) $A = 0.330 \text{ m}$, $\omega = 1.50 \text{ rad/s}$, $f = 0.239 \text{ Hz}$, $T = 4.18 \text{ s}$ b) $v_{\text{máx}} = 0.495 \text{ m/s}$, $a_{\text{máx}} = 0.743 \text{ m/s}^2$ c) $x = 0.307 \text{ m}$, $v = -0.181 \text{ m/s}$, $a = -0.691 \text{ m/s}^2$

13.5 Movimiento de un péndulo

Un péndulo simple es otro sistema mecánico que exhibe un movimiento periódico. Consiste de una pequeña pesa de masa m suspendida por una cuerda ligera de longitud L fija en su parte superior como se ve en la figura activa 13.15, página 452 (por cuerda ligera, queremos decir que la masa de la cuerda es muy pequeña comparada con la masa de la pesa, por lo que puede ser despreciada). Cuando se suelta, la cuerda oscila en vaivén sobre la misma trayectoria, pero ¿es armónico su movimiento?

Contestar esta pregunta requiere del análisis de la fuerza restauradora, la fuerza de gravedad, que actúa sobre el péndulo. La masa del péndulo se mueve a lo largo de un arco de circunferencia, más que hacia adelante y hacia atrás en línea recta. Sin embargo, cuando las oscilaciones son pequeñas, el movimiento de la pesa es casi rectilíneo, así que se puede aplicar la ley de Hooke con una buena aproximación.

La fuerza restauradora que hace que el péndulo experimente movimiento armónico simple es la componente del peso tangente a la trayectoria de movimiento, $-mg \sen \theta$.

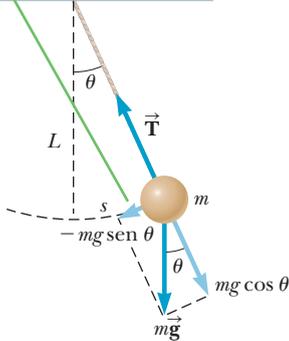


Figura activa 13.15 Un péndulo simple consiste de una pesa de masa m suspendida por una cuerda ligera de longitud L (L es la distancia desde el pivote al centro de masa de la pesa).

Tip 13.3 El movimiento de un péndulo no es armónico

Recuerde que el péndulo *no* exhibe verdadero movimiento armónico simple para *cualquier* ángulo. Si el ángulo es menor a 15° , el movimiento se puede *modelar* como armónico simple.

El periodo de un péndulo simple depende sólo de la longitud L y g

APLICACIÓN
Relojes de péndulo

En la figura activa 13.15, s es el desplazamiento de la pesa desde su punto de equilibrio a lo largo del arco. La ley de Hooke es $F = -kx$, así que buscamos una expresión similar que involucre a s , $F_t = -ks$, donde F_t es la fuerza que actúa en dirección tangencial al arco de circunferencia. De la figura, la fuerza de restauración está dada por

$$F_t = -mg \sen \theta$$

Como $s = L\theta$, la expresión para F_t puede escribirse como

$$F_t = -mg \sen \left(\frac{s}{L} \right)$$

Esta expresión no tiene la forma $F_t = -ks$, así que en general, el movimiento de un péndulo *no* es armónico simple. Sin embargo, para ángulos pequeños menores de 15° , el ángulo θ medido en radianes y el seno del ángulo θ son aproximadamente iguales. Por ejemplo, $\theta = 10.0^\circ = 0.175$ rad y $\sen(10.0^\circ) = 0.174$. Por esto, si podemos restringir el movimiento a ángulos *pequeños*, la aproximación $\sen \theta \approx \theta$ es válida y la fuerza de restauración puede escribirse como

$$F_t = -mg \sen \theta \approx -mg \theta$$

Sustituyendo $\theta = s/L$, obtenemos

$$F_t = -\left(\frac{mg}{L} \right) s$$

Esta ecuación sigue la forma general de la fuerza en la ley de Hooke $F_t = -ks$, con $k = mg/L$. Con estas consideraciones, estamos justificados si decimos que un péndulo experimenta movimiento armónico simple sólo cuando oscila en vaivén con amplitudes muy pequeñas (o bien, en este caso, pequeños valores de θ , de modo que $\sen \theta \cong \theta$).

Recordemos que para el sistema objeto-resorte, la frecuencia angular está dada por la ecuación 13.11:

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sustituyendo la expresión de k para un péndulo, obtenemos

$$\omega = \sqrt{\frac{mg/L}{m}} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

Esta frecuencia angular puede sustituirse en la ecuación 13.12, la cual describe matemáticamente el movimiento de un péndulo. La frecuencia es justamente la frecuencia angular dividida por 2π , mientras el periodo es el recíproco de la frecuencia, o

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad [13.15]$$

Esta ecuación deja ver el sorprendente resultado de que el periodo de un péndulo simple no depende de la masa, sino sólo de la longitud del péndulo y de la aceleración en caída libre. Además, la amplitud del movimiento no interviene mientras sea relativamente pequeña. La analogía entre el movimiento de un péndulo simple y el sistema objeto-resorte se muestra en la figura activa 13.16.

Galileo fue el primero en observar que el periodo de un péndulo es independiente de su amplitud. Supuestamente observó esto mientras asistía a un servicio religioso en la catedral de Pisa. El péndulo que él estudió era un candelabro oscilante que se movió cuando alguien tropezó con él para encender sus luces. Galileo pudo medir su periodo mediante la sincronización de las oscilaciones con su pulso.

La dependencia del periodo de un péndulo con su longitud y de la aceleración en caída libre nos permite utilizar un péndulo como cronómetro para un reloj. Varios diseños de relojes utilizan este dispositivo, con la longitud ajustada de modo que su periodo sirve como base para el ritmo al cual se mueven las manecillas del reloj. Por supuesto, estos relojes

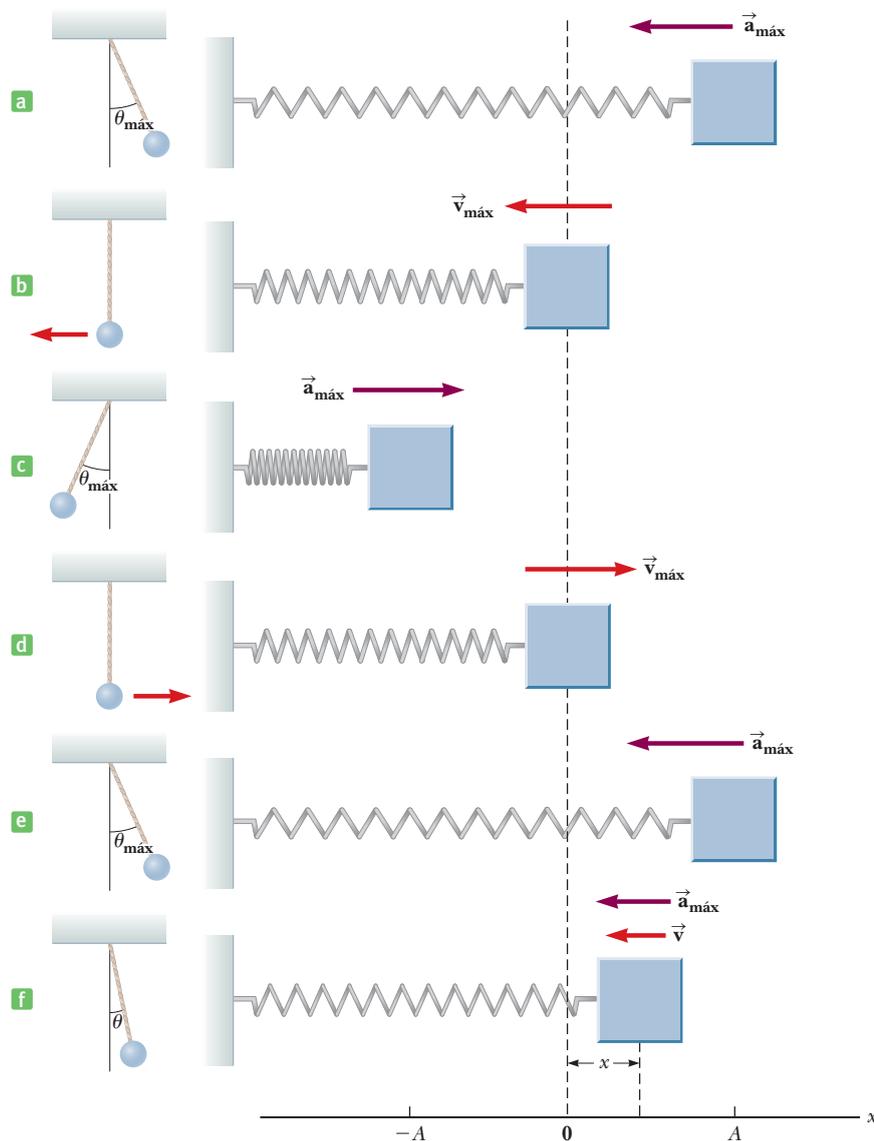


Figura activa 13.16 Movimiento armónico simple de un sistema objeto-resorte y su analogía, el movimiento de un péndulo simple.

se utilizan en diferentes lugares en nuestro planeta, por lo que habrá algunas variaciones en la aceleración en la caída libre. Para compensar estas diferencias, el péndulo de un reloj debe tener alguna masa movable para que la longitud efectiva se pueda ajustar a las variaciones de g .

Algunas veces, los geólogos utilizan el péndulo simple y la ecuación 13.15 cuando hacen exploraciones en busca de petróleo o minerales. Los depósitos bajo la superficie terrestre pueden producir irregularidades en la caída libre sobre una región en estudio. Un péndulo especialmente diseñado con longitud conocida se utiliza para medir el periodo, que a su vez se usa para calcular g . Aun cuando esta medida en sí no es concluyente, es una importante herramienta para levantamientos geológicos.

APLICACIÓN

Uso del péndulo en prospección

Examen rápido

13.7 Un péndulo simple está suspendido del cielo raso de un elevador detenido y se mide su periodo. Si el elevador se mueve con velocidad constante ¿el periodo a) crece, b) decrece o c) permanece igual? Si el elevador acelera hacia arriba ¿el periodo a) crece, b) decrece o c) permanece igual?

13.8 Un reloj de péndulo depende del periodo de su péndulo para mantener el tiempo correcto. Suponga que un reloj de péndulo mantiene un tiempo correcto y luego, Daniel el travieso desliza hacia abajo la pesa del péndulo en la varilla oscilante. ¿El reloj a) se atrasa, b) se adelanta o c) sigue igual?

13.9 El periodo de un péndulo simple se mide en la Tierra como T . Si el mismo péndulo se lleva a la Luna, su periodo en la superficie lunar será a) ¿menor que T ? b) ¿mayor que T ? y c) ¿igual a T ?

■ EJEMPLO 13.7 Medida del valor de g

OBJETIVO Determinar g a partir del movimiento de un péndulo.

PROBLEMA Utilizando un pequeño péndulo de longitud 0.171 m, un geofísico cuenta 72.0 oscilaciones completas en un tiempo de 60.0 s. ¿Cuál es el valor de g en esta localidad?

ESTRATEGIA Primero calcule el periodo del péndulo dividiendo el tiempo total entre el número de oscilaciones completas. Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores.

SOLUCIÓN

Calcule el periodo dividiendo el tiempo total transcurrido por el número de oscilaciones completas:

$$T = \frac{\text{tiempo}}{\# \text{ de oscilaciones}} = \frac{60.0 \text{ s}}{72.0} = 0.833 \text{ s}$$

Resuelva la ecuación 13.15 para g y sustituya valores:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow T^2 = 4\pi^2 \frac{L}{g}$$

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} = \frac{(39.5)(0.171 \text{ m})}{(0.833 \text{ s})^2} = 9.73 \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La medición de tales oscilaciones es una buena manera para determinar los valores locales de la aceleración de la gravedad.

PREGUNTA 13.7 Verdadero o Falso: Un péndulo simple de longitud 0.50 m tiene una frecuencia mayor de oscilación que un péndulo simple de longitud de 1.0 m.

EJERCICIO 13.7 ¿Cuál sería el periodo de un péndulo de 0.171 m sobre la Luna, donde la aceleración de la gravedad g es 1.62 m/s^2 ?

RESPUESTA 2.04 s

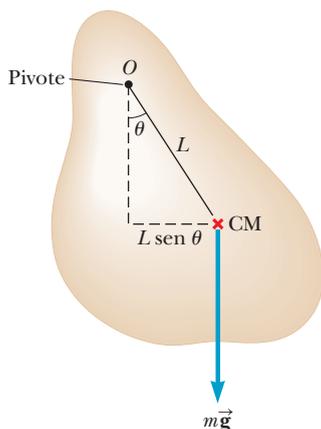


Figura 13.17 Un péndulo físico con pivote en O .

El péndulo físico

El péndulo simple analizado hasta ahora consiste de una masa unida al extremo de una cuerda. Sin embargo, un péndulo puede tener cualquier forma. El caso general es el llamado *péndulo físico*.

En la figura 13.17 un objeto rígido está pivotado en el punto O , ubicado a una distancia L del centro de masa del objeto. El centro de masa oscila a lo largo de un arco de circunferencia, tal como el péndulo simple. El periodo de un péndulo físico está dado por

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgL}} \quad [13.16]$$

donde I es el momento de inercia del objeto y m su masa. Como puede verificar, observe que en el caso especial de un péndulo simple con un brazo de longitud L y masa despreciable, el momento de inercia es $I = mL^2$. Sustituyendo en la ecuación 13.16 resulta

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{mL^2}{mgL}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

que es el periodo correcto para un péndulo simple.

13.6 Oscilaciones amortiguadas

Los movimientos vibratorios que hemos visto hasta ahora han tenido lugar en sistemas ideales, es decir, sistemas que *oscilan indefinidamente* bajo la acción de una fuerza restau-

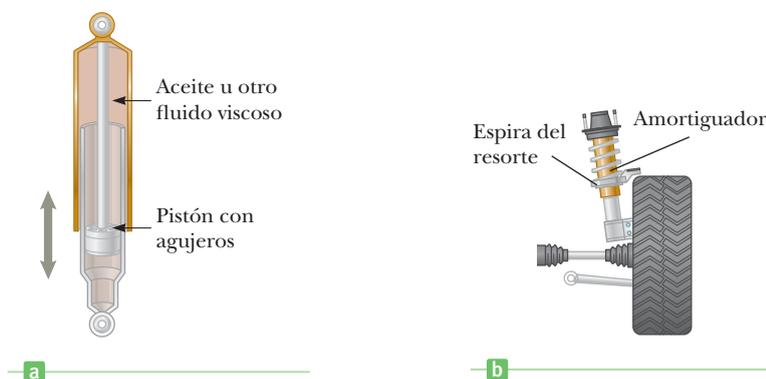


Figura 13.18 a) Un amortiguador consiste de un pistón oscilante en una cámara llena de aceite. Cuando el pistón oscila, el aceite es presionado a pasar por unos orificios situados entre el pistón y la cámara, lo que ocasiona un amortiguamiento de las oscilaciones del pistón. b) Tipo de sistemas de suspensión en automóviles, en el que el amortiguador se coloca dentro de un resorte en cada rueda.

radora lineal. En todos los sistemas mecánicos reales, las fuerzas de fricción retardan el movimiento, así que los sistemas no oscilan indefinidamente. La fricción reduce la energía mecánica del sistema al transcurrir el tiempo, por lo que el movimiento es **amortiguado**.

Los amortiguadores en automóviles (figura 13.18) son una aplicación práctica del movimiento amortiguado. Un amortiguador consiste de un pistón que se mueve en un líquido como el aceite. La parte superior del amortiguador está sujeta firmemente al cuerpo del automóvil. Cuando éste pasa sobre un bache en el camino, unos orificios hechos en el pistón le permiten subir y bajar en el fluido en forma amortiguada.

El movimiento amortiguado varía dependiendo del fluido que se utilice. Por ejemplo, si el fluido tiene una viscosidad relativamente baja, el movimiento vibratorio se preserva pero la amplitud de vibración disminuye con el tiempo y el movimiento cesa en última instancia. Este proceso se conoce como oscilación *subamortiguada*. La curva de posición, contra tiempo de un objeto que experimenta tal oscilación, aparece en la figura activa 13.19. La figura 13.20 compara tres tipos de movimiento amortiguado, con la curva a) representado una oscilación *sobreamortiguada*. Si la viscosidad del fluido aumenta, el objeto regresa rápidamente al equilibrio después que ha sido soltado y no oscila. En este caso el sistema se llama *críticamente amortiguado* y se muestra en la curva b) en la figura 13.20. El pistón regresa a la posición de equilibrio en el tiempo más corto posible sin exceder la posición de equilibrio. Si la viscosidad es mayor aún, el sistema se llama *sobreamortiguado*. En este caso el pistón regresa al equilibrio sin pasar nunca por el punto de equilibrio, pero el tiempo necesario para llegar al equilibrio es mayor que el amortiguamiento crítico, como se ve en la curva c) en la figura 13.20.

Para hacer más cómoda la marcha de los automóviles se diseñan amortiguadores ligeramente subamortiguados. Esto se puede demostrar mediante un rápido empuje hacia abajo en el capó del automóvil. Después de retirar la fuerza aplicada, la carrocería del automóvil oscila un par de veces alrededor de la posición de equilibrio antes de regresar a su posición fija.

13.7 Ondas

El mundo está lleno de ondas; ondas acústicas, ondas en una cuerda, ondas sísmicas y ondas electromagnéticas como la luz visible, las ondas de radio, las señales de televisión y los rayos x. Todas estas ondas tienen como fuente un objeto en vibración, así que podemos aplicar los conceptos de movimiento armónico simple en su descripción.

En el caso de las ondas acústicas, las vibraciones que producen ondas vienen de fuentes como las cuerdas vocales de una persona o al pulsar la cuerda de una guitarra. Las vibraciones de electrones en una antena producen ondas de radio o televisión y el simple movimiento hacia arriba y hacia abajo de una mano puede producir una onda sobre una cuerda. Ciertos conceptos son comunes a todas las ondas, sin importar su naturaleza. En el resto de este capítulo, enfocaremos nuestra atención a las propiedades generales de las ondas. En los capítulos posteriores estudiaremos tipos específicos de ondas, como las acústicas y las electromagnéticas.

APLICACIÓN

Amortiguadores

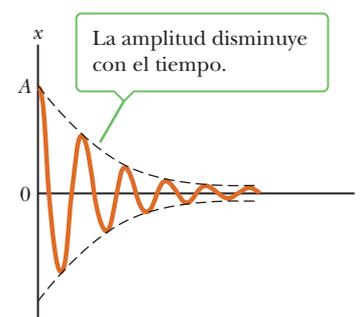


Figura activa 13.19 Gráfica de desplazamiento contra tiempo de un oscilador subamortiguado. Observe la disminución de amplitud con el tiempo.

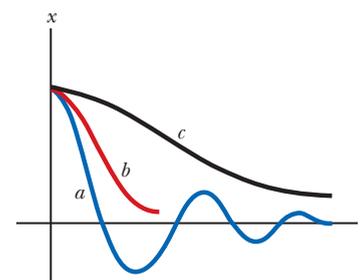


Figura 13.20 Gráficas de desplazamiento contra tiempo para a) un oscilador subamortiguado, b) un oscilador críticamente amortiguado y c) un oscilador sobreamortiguado.

¿Qué es una onda?

Cuando usted deja caer un guijarro en una piscina con agua, la perturbación produce ondas de agua, que se mueven alejándose del punto de entrada del guijarro. Una hoja flotando cerca del punto de perturbación se mueve hacia arriba y hacia abajo y hacia atrás y hacia adelante de su posición original, pero no experimenta ningún desplazamiento neto atribuible a la perturbación. Esto significa que las ondas de agua (o perturbación) se mueven de un lugar a otro, *pero no se llevan al agua consigo*.

Cuando observamos una onda en el agua, vemos un nuevo arreglo de la superficie del agua. Sin el agua, no habría una onda. De manera similar, una onda viajando sobre una cuerda no podría existir sin una cuerda. Las ondas de sonido viajan a través del aire como resultado de las variaciones de presión de punto a punto. Por esto, podemos considerar a una onda como *el movimiento de una perturbación*. En el capítulo 21 analizaremos las ondas electromagnéticas, que no requieren de un medio.

Las ondas mecánicas estudiadas en este capítulo requieren 1) alguna fuente de perturbación, 2) un medio que pueda ser perturbado y 3) alguna conexión física o mecanismo por medio del cual las partes adyacentes del medio puedan influirse una con otra. Todas las ondas llevan energía y cantidad de movimiento. La cantidad de energía transmitida por un medio y el mecanismo responsable del transporte de energía difieren de un caso a otro. Por ejemplo, la energía transportada por las olas oceánicas durante una tormenta es mucho mayor que la llevada por una onda acústica generada por una sola voz humana.

■ FÍSICA APLICADA 13.2 Sepultando a Bond

En una escena de *Al servicio de su majestad*, película de James Bond de 1960, Bond estaba escapando sobre unos esquíes. Tenía una buena ventaja y era difícil pegarle a un blanco en movimiento, por lo que los chicos malos no querían desperdiciar balas disparándole, así que ¿por qué abrieron fuego?

EXPLICACIÓN Estos distinguidos caballeros tienen un buen conocimiento de la física de ondas. Un impulso de sonido, como un disparo puede causar una perturbación

acústica que se propaga por el aire, si se impacta un borde de nieve que está listo para romperse y quedar libre para iniciar una avalancha. Un desastre como este ocurrió en 1916 durante la Primera Guerra Mundial, cuando soldados austriacos en las Alpes fueron sepultados por una avalancha causada por un disparo de cañón. Así que los chicos malos, que nunca han sido capaces de golpear con una bala a Bond, decidieron utilizar el sonido de los disparos para iniciar una avalancha. ■

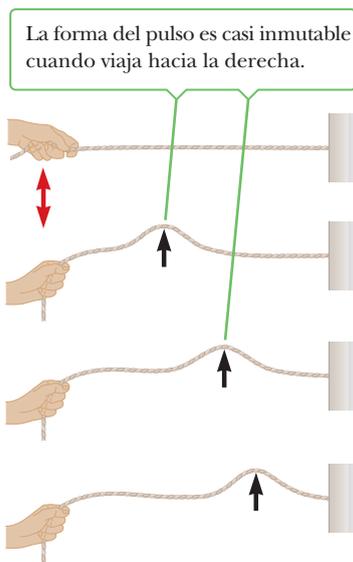


Figura activa 13.21

Una mano mueve el extremo de una cuerda estirada hacia arriba y hacia abajo (flecha roja) generando un pulso que se desplaza a lo largo de una cuerda estirada.

Tipos de ondas

Una de las formas más sencillas de demostrar el movimiento ondulatorio es mediante el movimiento de un extremo de una cuerda larga que esté bajo tensión y tenga su extremo opuesto fijo, como en la figura 13.21. La protuberancia, (llamada pulso) viaja hacia la derecha con una velocidad definida. Una perturbación de este tipo se llama **onda viajera**. La figura muestra la forma de la cuerda en tres instantes estrechamente separados.

Cuando el pulso de una onda viajera se desplaza a lo largo de la cuerda, **cada segmento de la cuerda que es perturbado se mueve perpendicularmente al movimiento de la onda**. La figura 13.22 ilustra este punto para un pequeño segmento P en particular. La cuerda nunca se mueve en dirección de la onda. Una onda viajera como ésta, en las que las partículas de un medio perturbado se mueven perpendicularmente a la velocidad de la onda, se llama **onda transversal**. La figura 13.23a ilustra la formación de las ondas transversales sobre un resorte largo.

En otra clase de ondas, llamadas **ondas longitudinales**, los elementos del medio experimentan desplazamientos paralelos en la dirección del movimiento de la onda. Las ondas del sonido en el aire son longitudinales. Su perturbación corresponde a una serie de regiones de alta y baja presión que viaja por el aire o cualquier otro medio material con cierta velocidad. Un pulso longitudinal se puede producir fácilmente en un resorte estirado, como en la figura 13.23b. El extremo libre se mueve en vaivén a lo largo de todo el resorte. Esta acción produce regiones comprimidas y estiradas de la espira que viajan a lo largo del resorte, paralelas al movimiento de la onda.

Las ondas no necesitan ser puramente transversales o puramente longitudinales: en el océano las ondas exhiben una superposición de ambos tipos. Cuando una onda en el océano se encuentra en corcho, éste realiza un movimiento circular que va hacia arriba y hacia abajo mientras que se mueve hacia delante y hacia atrás.

Otro tipo de onda llamada **solitón**, consiste en un frente de onda solitario que se propaga aisladamente. Las ondas de agua ordinarias generalmente se separan y se disipan, pero los solitones tienden a mantener su forma. El estudio de los solitones empezó en 1849, cuando el ingeniero escocés John Scott Russell notó una onda solitaria abandonando la turbulencia delante de una lancha y que se propagaba hacia delante por sí sola. La onda mantuvo su forma y viajó por un canal hacia abajo aproximadamente a 10 mi/h. Russell persiguió a caballo la onda dos millas antes de perderla. Hasta la década de los años 60 los científicos tomaron a los solitones muy en serio; ahora son ampliamente utilizados para modelar fenómenos físicos, desde partículas elementales hasta la gigante mancha roja de Júpiter.

Fotografía de una onda

La figura activa 13.24 muestra la forma curvada de una cuerda que vibra. Este patrón es una curva sinusoidal, la misma que en el movimiento armónico simple. La curva café se puede considerar como la instantánea de una onda viajera que se toma en algún instante de tiempo, por ejemplo $t = 0$; la curva azul es una instantánea de la misma onda viajera en un tiempo posterior. Esta fotografía puede también ser utilizada para representar una onda sobre el agua. En tal caso, el punto alto correspondería a la *cresta* de la onda y el punto bajo a la *depresión* de la onda.

La misma forma de la onda puede utilizarse para describir una onda longitudinal, aun cuando no esté ocurriendo ningún movimiento arriba-abajo. Considere una onda longitudinal que se mueve en un resorte. La figura 13.25a es una instantánea de esta onda en algún instante y la figura 13.25b muestra la curva sinusoidal que representa la onda. Los puntos donde las espiras del resorte son comprimidas corresponden a las crestas de la forma de onda y las regiones estiradas corresponden a las depresiones.

El tipo de onda representado por la curva en la figura 13.25b se conoce como *onda de densidad o de presión*, porque las crestas, donde las espiras del resorte están comprimidas, son regiones de alta densidad y las depresiones, donde las espiras son estiradas, son regiones de baja densidad. Las ondas de sonido son longitudinales, que se propagan como series de regiones de baja y alta densidad.

Cualquier elemento P (punto negro) en la cuerda se mueve perpendicularmente a la dirección de propagación del movimiento ondulatorio (flechas rojas).

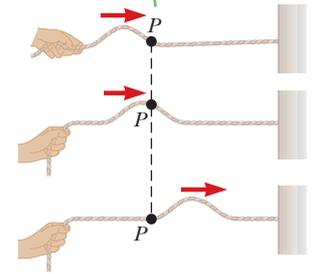


Figura 13.22 Un pulso viajero en una cuerda estirada es una onda transversal.

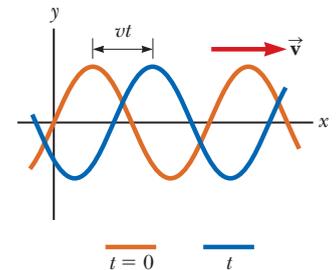


Figura activa 13.24 Una onda sinusoidal en una dimensión que viaja hacia la derecha con rapidez v . La curva café es una instantánea de la onda en $t = 0$, y la curva azul es otra instantánea en algún tiempo t después.

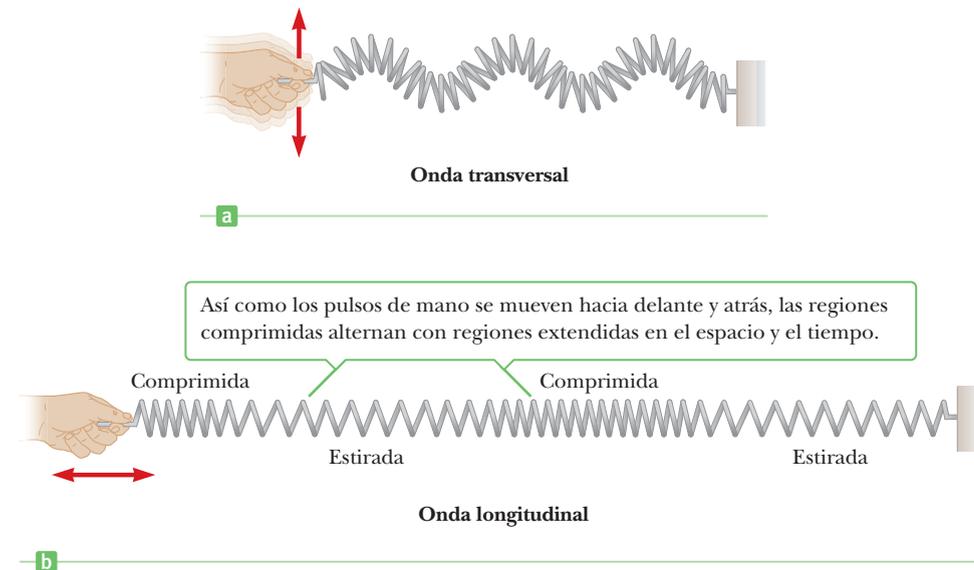


Figura 13.23 a) Una onda transversal se inicia en un resorte cuando se mueve un extremo de éste perpendicularmente a su longitud. b) Pulso longitudinal a lo largo de un resorte estirado.

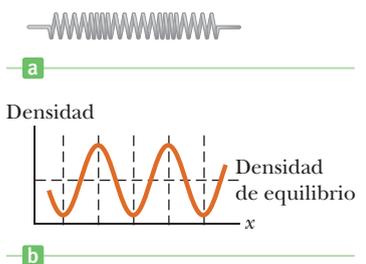


Figura 13.25 a) Onda longitudinal sobre un resorte. b) Las crestas de la onda corresponden a regiones comprimidas del resorte, y las depresiones corresponden a regiones estiradas del mismo.

13.8 Frecuencia, amplitud y longitud de onda

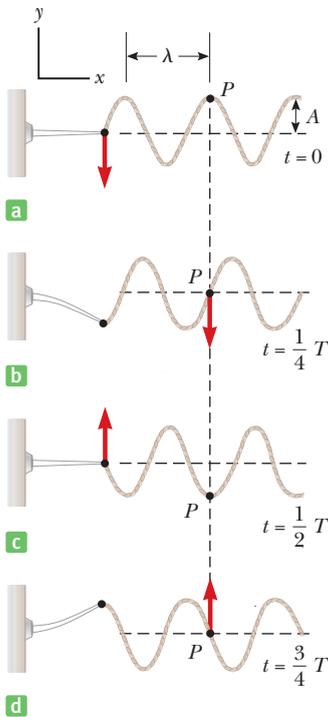


Figura activa 13.26 Un método para producir ondas viajeras sobre una cuerda continua. El extremo izquierdo de la cuerda está conectado a una hoja que se pone en vibración. Cada segmento de la cuerda, por ejemplo un punto P , oscila verticalmente con movimiento armónico simple.

La figura activa 13.26 muestra un método para producir una onda continua o una corriente constante de pulsos en una cuerda muy larga. Uno de los extremos de la cuerda está conectado a una hoja que se pone a vibrar. Cuando la hoja oscila verticalmente con movimiento armónico simple, se inicia una onda viajera que se mueve hacia la derecha de la cuerda. La figura activa 13.26 consiste de vistas de la onda a intervalos de un cuarto de periodo. Observe que **cada pequeño segmento de la cuerda, por ejemplo P , oscila verticalmente en la dirección de y con movimiento armónico simple**. Éste debe ser el caso, porque cada segmento sigue el movimiento armónico simple de la hoja. Cada segmento de la cuerda puede, por lo tanto, ser tratado como un oscilador armónico simple que vibra con la misma frecuencia que la hoja que acciona la cuerda.

Las frecuencias de las ondas estudiadas en este curso varían de valores pequeños de ondas en cuerdas y ondas en el agua, hasta valores de ondas de sonido entre 20 y 20 000 Hz (recuerde que $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$), y a frecuencias mucho mayores para ondas electromagnéticas. Estas ondas tienen diferentes fuentes físicas, pero pueden ser descritas con los mismos conceptos.

La línea horizontal punteada en la figura activa 13.26 representa la posición de la cuerda cuando la onda no está presente. La distancia máxima que la cuerda se mueve arriba o abajo de este valor de equilibrio es la llamada **amplitud A** de la onda. Para las ondas con las que trabajamos, las amplitudes de la cresta y la depresión serán idénticas.

La figura activa 13.26b muestra otra característica de una onda. Las flechas horizontales muestran la distancia entre dos puntos sucesivos de comportamiento idéntico. Esta distancia se llama **longitud de onda λ** (letra griega lambda).

Podemos utilizar estas definiciones para deducir una expresión para la velocidad de una onda. Empezamos por definir la ecuación para la **velocidad v de la onda**:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La velocidad de la onda es la rapidez a la cual una parte de la onda en particular, por ejemplo una cresta, se mueve por el medio.

Una onda avanza una distancia de una longitud de onda en un intervalo de tiempo igual a un periodo de vibración. Tomando $\Delta x = \lambda$ y $\Delta t = T$, vemos que

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Como la frecuencia es el recíproco del periodo, tenemos

$$v = f\lambda$$

[13.17]

Velocidad de la onda ►

Esta importante ecuación general se aplica a muchos diferentes tipos de ondas, tales como las de sonido y las electromagnéticas.

■ EJEMPLO 13.8 Una onda viajera

OBJETIVO Obtener información acerca de una onda a partir de su gráfica.

PROBLEMA Una onda viaja en la dirección positiva de x como se ilustra en la figura 13.27a. Encuentre la amplitud, la longitud de onda, la rapidez y el periodo de la onda si tiene una frecuencia de 8.00 Hz. En la figura 13.27a, $\Delta x = 40.0 \text{ cm}$ y $\Delta y = 15.0 \text{ cm}$.

ESTRATEGIA La amplitud y longitud de onda pueden leerse directamente de la figura. El máximo desplazamiento vertical es la amplitud y la distancia desde una cresta a la siguiente es la longitud de onda. Multiplicando la longitud de onda por la frecuencia se obtiene la rapidez, mientras el periodo es el recíproco de la frecuencia.

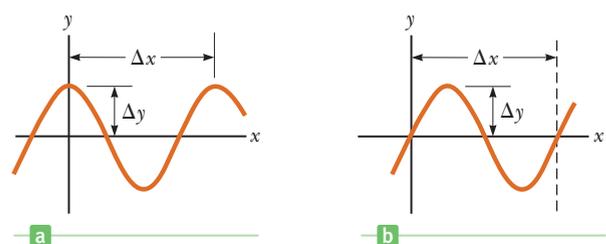


Figura 13.27 a) (Ejemplo 13.8) b) (Ejercicio 13.8)

SOLUCIÓN

El máximo desplazamiento de la onda es la amplitud A :

$$A = \Delta y = 15.0 \text{ cm} = 0.150 \text{ m}$$

La distancia de cresta a cresta es la longitud de onda:

$$\lambda = \Delta x = 40.0 \text{ cm} = 0.400 \text{ m}$$

Multiplique la longitud de onda por la frecuencia para obtener la velocidad:

$$v = f\lambda = (8.00 \text{ Hz})(0.400 \text{ m}) = 3.20 \text{ m/s}$$

Tome el recíproco de la frecuencia para obtener el periodo:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{8.00 \text{ Hz}} = 0.125 \text{ s}$$

COMENTARIOS Es importante no confundir la onda con el medio a través del que viaja. Una onda es energía transmitida a través de un medio; algunas ondas, como las de luz, no requieren de un medio.

PREGUNTA 13.8 ¿La frecuencia de una onda es afectada por la amplitud?

EJERCICIO 13.8 Una onda que viaja en la dirección x positiva, se muestra en la figura 13.27b. Encuentre la amplitud, la longitud de onda, la velocidad y el periodo de la onda si ésta tiene una frecuencia de 15.0 Hz. En la figura, $\Delta x = 72.0 \text{ cm}$ y $\Delta y = 25.0 \text{ cm}$.

RESPUESTAS $A = 0.250 \text{ m}$, $\lambda = 0.720 \text{ m}$, $v = 10.8 \text{ m/s}$, $T = 0.0667 \text{ s}$

■ EJEMPLO 13.9 Sonido y luz

OBJETIVO Realizar cálculos elementales utilizando la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia.

PROBLEMA Una onda tiene una longitud de 3.00 m. Calcule la frecuencia de la onda si ésta es a) una onda de sonido y b) una onda de luz. Tome la velocidad del sonido como 343 m/s y la de la luz como $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la frecuencia de una onda de sonido con $\lambda = 3.00 \text{ m}$.

Resuelva la ecuación 3.17 para la frecuencia y sustituya:

$$(1) \quad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343 \text{ m/s}}{3.00 \text{ m}} = 114 \text{ Hz}$$

b) Encuentre la frecuencia de una onda de luz con $\lambda = 3.00 \text{ m}$.

Sustituya en la ecuación 1), utilizando la velocidad de la luz para c :

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{3.00 \text{ m}} = 1.00 \times 10^8 \text{ Hz}$$

COMENTARIOS La misma ecuación puede ser utilizada para encontrar la frecuencia en cada caso, a pesar de la gran diferencia entre los fenómenos físicos. Observe qué tan grandes son las frecuencias de las ondas de luz en relación con las de sonido.

PREGUNTA 13.9 Una onda en un medio encuentra un nuevo medio e ingresa en él. ¿Cuál de las siguientes propiedades de las ondas pueden resultar afectadas en el proceso? a) la longitud de onda, b) la frecuencia y c) la velocidad.

EJERCICIO 13.9 a) Encuentre la longitud de onda de una onda electromagnética con frecuencia $9.00 \text{ GHz} = 9.00 \times 10^9 \text{ Hz}$ ($G = \text{giga} = 10^9$), que está en el rango de microondas. b) Encuentre la velocidad de una onda de sonido en un medio fluido desconocido si con una frecuencia de 567 Hz tiene una longitud de onda de 2.50 m.

RESPUESTAS a) 0.0333 m b) $1.42 \times 10^3 \text{ m/s}$

13.9 Velocidad de ondas sobre cuerdas

En esta sección enfocaremos nuestra atención en la velocidad de una onda transversal sobre una cuerda estirada.

Para una cuerda en vibración, hay dos tipos de velocidad a considerar. Una es la velocidad de la cuerda física que vibra hacia arriba y abajo, transversal a la cuerda, en la dirección y . La otra es la *velocidad de la onda*, la cual es la velocidad a la que la perturbación se propaga a lo largo de la longitud de la cuerda en la dirección de x . Deseamos encontrar una expresión para la velocidad de la onda.

Si una cuerda horizontal bajo tensión es jalada verticalmente y después soltada, comienza de su desplazamiento máximo, $y = A$, y toma una cierta cantidad de tiempo para ir a $y = -A$ y regresar a A . Esta cantidad de tiempo es el periodo de la onda y es el mismo que el tiempo necesario para que la onda avance *horizontalmente* por una longitud de onda. Dividiendo la longitud de onda por el periodo de una oscilación transversal se obtiene la velocidad de la onda.

Para una longitud de onda fija, una cuerda bajo gran tensión F tiene una gran velocidad de onda porque el periodo de vibración es corto y la onda avanza una longitud de onda durante un periodo. También tiene sentido que una cuerda con mayor masa por unidad de longitud, μ , vibre más lentamente conduciendo a un periodo más largo y a una velocidad de onda más lenta. La velocidad de la onda está dada por

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [13.18]$$

donde F es la tensión de la cuerda y μ es la masa de la cuerda por unidad de longitud, llamada *densidad lineal*. De la ecuación 13.18, es claro que una gran tensión F resulta en una gran velocidad de onda, mientras una gran densidad lineal μ da una velocidad de onda más lenta, como se esperaba.

De acuerdo con la ecuación 13.18, la velocidad de propagación de una onda mecánica, tal como la onda sobre una cuerda, depende sólo de las propiedades de la cuerda a través de la cual viaja la perturbación. No depende de la amplitud de vibración. Esto resulta generalmente cierto para ondas en varios medios.

Una demostración de la ecuación 13.18 requiere de cálculo, pero un análisis dimensional puede verificar fácilmente que la expresión es dimensionalmente correcta. Observe que las dimensiones de F son ML/T^2 , y las dimensiones de μ son M/L . Las dimensiones de F/μ son por lo tanto L^2/T^2 , así que las de $\sqrt{F/\mu}$ son L/T , lo que da las dimensiones de la velocidad. Ninguna otra combinación de F y μ es dimensionalmente correcta, así que en el caso en el que la tensión y la densidad de masa sean los únicos factores físicos relevantes, hemos verificado la ecuación 13.18 para toda constante.

APLICACIÓN
Cuerdas de guitarra

De acuerdo con la ecuación 13.18, podemos incrementar la velocidad de una onda estirando la cuerda, aumentando la tensión en ésta. Incrementando la masa por unidad de longitud, por otro lado, decrece la velocidad de onda. Estos hechos físicos están detrás de las espiras metálicas que sirven para tensar las cuerdas en guitarras y pianos con fines de afinación. Los enrollados aumentan la masa por unidad de longitud, μ disminuyendo la velocidad de onda y, por lo tanto, la frecuencia, resultando en un tono bajo. Templar una cuerda a una frecuencia deseada es sólo cuestión de cambiar la tensión en la cuerda.

EJEMPLO 13.10 Pulso viajando sobre una cuerda

OBJETIVO Calcule la velocidad de una onda en una cuerda.

PROBLEMA Una cuerda uniforme tienen una masa M de 0.030 0 kg y una longitud L de 6.00 m. La tensión se mantiene en la cuerda suspendiendo un bloque de masa $m = 2.00$ kg de uno de los extremos (figura 13.28). **a)** Encuentre la velocidad de un pulso transversal de la onda sobre la cuerda. **b)** Encuentre el tiempo que toma el pulso en viajar desde la pared a la polea. Desprecie la masa de la parte colgante de la cuerda.

ESTRATEGIA La tensión F puede obtenerse de la segunda ley de Newton para el equilibrio aplicado al bloque y la masa por unidad de longitud de la cuerda es $\mu = M/L$. Con estas cantidades, la velocidad del pulso transversal puede encontrarse sustituyendo en la ecuación 13.18. En el inciso b) se requiere de la fórmula $d = vt$.

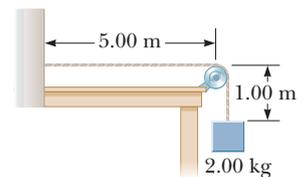


Figura 13.28 (Ejemplo 13.10) La tensión F en la cuerda, se mantiene debido al bloque suspendido. La velocidad v de la onda está dada por la expresión $v = \sqrt{F/\mu}$.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad del pulso de la onda.

Aplice la segunda ley de Newton para el bloque: la tensión F es igual y opuesta a la fuerza de gravedad.

$$\sum F = F - mg = 0 \rightarrow F = mg$$

Sustituya las expresiones para F y μ en las ecuaciones 13.18:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{mg}{M/L}} \\ &= \sqrt{\frac{(2.00 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{(0.0300 \text{ kg})/(6.00 \text{ m})}} = \sqrt{\frac{19.6 \text{ N}}{0.00500 \text{ kg/m}}} \\ &= 62.6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Encuentre el tiempo que toma el pulso para viajar desde la pared a la polea.

Despeje el tiempo de la fórmula de la distancia:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{5.00 \text{ m}}{62.6 \text{ m/s}} = 0.0799 \text{ s}$$

COMENTARIOS No confunda la velocidad de la onda sobre la cuerda con la velocidad de la onda de sonido producida por la vibración de la cuerda (ver capítulo 14).

PREGUNTA 13.10 Si la masa del bloque se cuadruplica, ¿qué pasa con la velocidad de la onda?

EJERCICIO 13.10 ¿A qué tensión debe una cuerda con masa 0.010 0 kg y longitud 2.50 m ser tensada para que la onda viaje a una velocidad de 125 m/s?

RESPUESTA 62.5 N

13.10 Interferencia de ondas

Muchos fenómenos ondulatorios interesantes requieren de dos o más ondas que pasen por la misma región del espacio en el mismo tiempo. **Dos ondas viajeras pueden encontrarse y pasar una a través de la otra sin ser destruidas o alteradas.** Por ejemplo, cuando dos guijarros se lanzan a una charca las ondas circulares que se expanden no se destruyen. De hecho, las ondas pasan una sobre la otra. Asimismo, cuando las ondas acústicas provenientes de dos fuentes se mueven a través del aire, pasan una a través de la otra. En la región de traslape, la onda resultante se encuentra sumando los desplazamientos de las ondas individuales. Para tales análisis, se aplica el **principio de superposición**:

Cuando dos o más ondas viajeras se encuentran una con otra mientras se mueven a través de un medio, la onda resultante se encuentra sumando punto a punto los desplazamientos de las ondas individuales.

Los experimentos muestran que el principio de superposición es válido solamente cuando las ondas individuales tienen amplitudes de desplazamiento pequeñas, lo cual es un supuesto en todos nuestros ejemplos.

Las figuras 13.29a y 13.29b muestran dos ondas con la misma amplitud y frecuencia. Si en algún instante estas dos ondas tratan de viajar por la misma región del espacio, la onda resultante en ese momento tendría una forma como la de la figura 13.29c. Por ejemplo, suponga que las ondas son de agua con amplitud de 1 m. En el instante en que se superponen de modo que se encuentran cresta con cresta y depresión con depresión, la onda resultante tiene una amplitud de 2 m. Cuando las ondas se unen de esta forma se dice que están *en fase* y experimentan una **interferencia constructiva**.

Las figuras 13.30a y 13.30b (página 462) muestran dos ondas similares. Sin embargo, en este caso la cresta de una coincide con la depresión de la otra, así que una onda está *invertida* en relación con la otra. La onda resultante, mostrada en la figura 13.30c, se ve

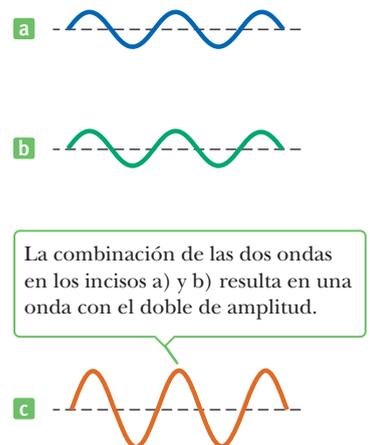
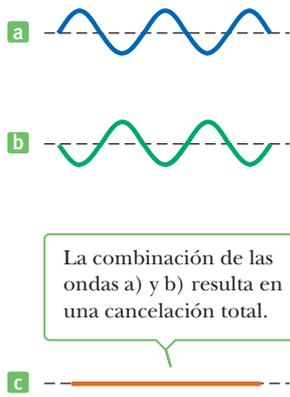


Figura 13.29 Interferencia constructiva. Si dos ondas que tienen la misma frecuencia y amplitud están en fase, como en a) y b), la onda resultante cuando se combinan es c), que tiene la misma frecuencia que las ondas individuales pero el doble de su amplitud.



La combinación de las ondas a) y b) resulta en una cancelación total.

Figura 13.30 Interferencia destructiva. Las dos ondas en a) y b) tienen la misma frecuencia y amplitud pero están 180° fuera de fase.

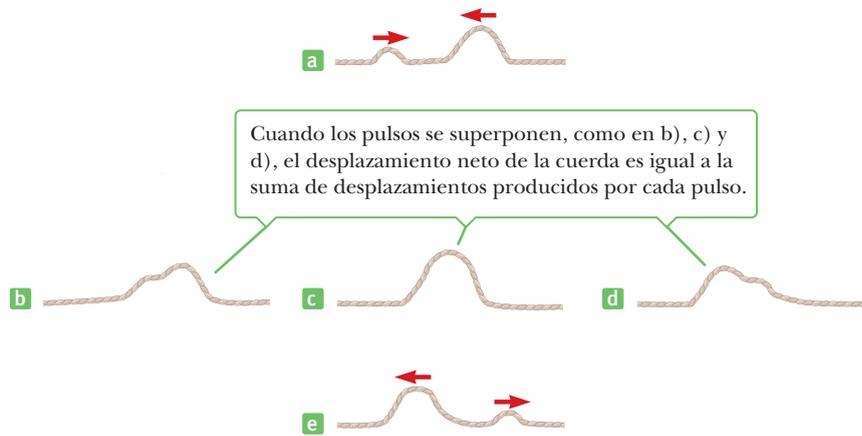


Figura activa 13.32

Cuando dos pulsos de onda que viajan en una cuerda estirada en direcciones opuestas se pasan uno al otro.



Figura 13.31 Patrones de interferencia producidos por ondas que se extienden hacia fuera a partir de muchas gotas de líquido que caen en un cuerpo de agua.

como un estado de cancelación. Si estas dos fueran ondas de agua viajando juntas, una de las ondas ejercería una fuerza hacia arriba sobre las gotas individuales de agua en el mismo instante que la otra onda ejercería una fuerza hacia abajo. El resultado sería que no habría movimiento en el agua. En tal situación las dos ondas están 180° fuera de fase y exhiben una **interferencia destructiva**. La figura 13.31 ilustra la interferencia de ondas de agua producidas por gotas de agua cayendo en un charco.

La figura activa 13.32 muestra interferencia constructiva en dos pulsos moviéndose uno hacia el otro a lo largo de una cuerda estirada; la figura 13.33 muestra interferencia destructiva en dos pulsos. Observe en ambas figuras que cuando los dos pulsos se separan, sus formas no cambian, ¡como si nunca se hubieran encontrado!

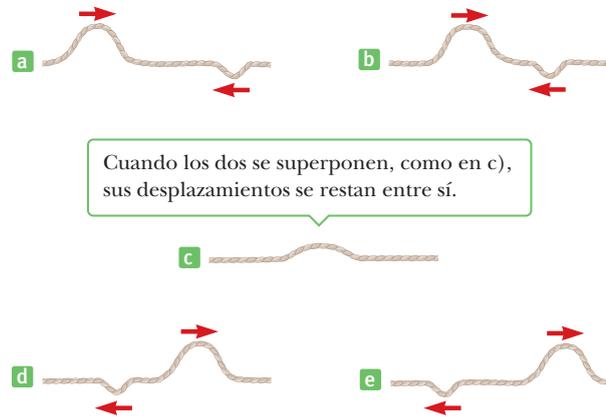


Figura activa 13.33 Dos pulsos de onda que viajan en direcciones opuestas, con desplazamientos que están invertidos uno con respecto al otro.

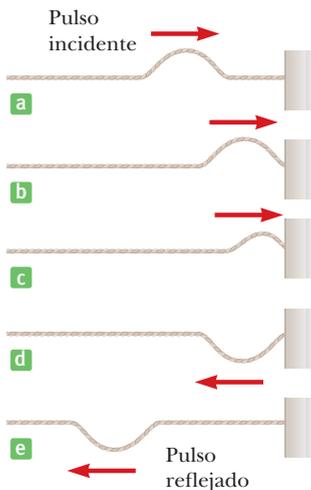


Figura activa 13.34 Reflexión de una onda viajera en el extremo fijo de una cuerda estirada. Observe que el pulso reflejado está invertido, pero su forma permanece igual.

13.11 Reflexión de ondas

Hasta ahora, en nuestro análisis hemos supuesto que las ondas podrían viajar indefinidamente sin chocar con ningún objeto. Con frecuencia, tales condiciones no ocurren en la práctica. Siempre que una onda viajera alcanza un obstáculo, parte de ella o toda, se refleja. Por ejemplo, considere un pulso viajando en una cuerda que está fija en uno de los extremos (figura activa 13.34). Cuando el pulso alcanza la pared, se refleja.

Observe que el pulso reflejado se invierte, lo cual se puede explicar como sigue: cuando el pulso se encuentra con la pared, la cuerda ejerce una fuerza hacia arriba sobre ésta. De acuerdo con la tercera ley de Newton, la pared debe ejercer una fuerza de reacción igual y opuesta (hacia abajo) sobre la cuerda. Esta fuerza hacia abajo causa la inversión del pulso en la reflexión.

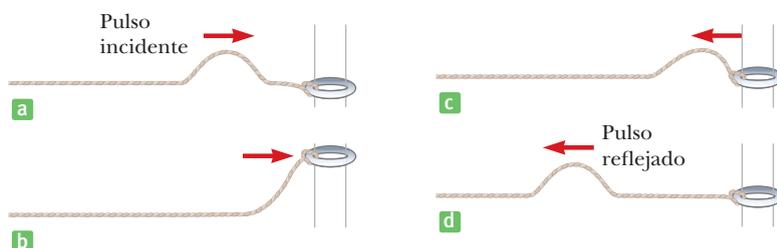


Figura activa 13.35 Reflexión de una onda viajera en el extremo libre de una cuerda estirada. En este caso, el pulso reflejado no se invierte.

Ahora suponga que el pulso llega al extremo de la cuerda y que este extremo está unido a un anillo de masa despreciable que puede deslizarse a lo largo del poste sin fricción (figura activa 13.35). Otra vez el pulso es reflejado, pero esta vez no se invierte. Al llegar al poste, el pulso ejerce una fuerza sobre el anillo acelerándolo hacia arriba. El anillo regresa entonces a su posición original por acción de la componente hacia abajo de la tensión en la cuerda.

Un método alternativo para mostrar que el pulso se refleja sin invertirse cuando llega al extremo libre de una cuerda, es enviar dicho pulso en una cuerda que cuelgue verticalmente. Cuando el pulso pegue en el extremo libre, se reflejará sin invertirse, justo como en la figura activa 13.35.

Finalmente, cuando un pulso llega a una frontera, una parte se refleja y otra se transmite a través de dicha frontera hacia el nuevo medio. Este efecto es de fácil observación por medio de dos cuerdas de distinta densidad unidas en una frontera determinada.

RESUMEN

13.1 Ley de Hooke

El **movimiento armónico simple** ocurre cuando la fuerza total sobre un objeto a lo largo de la dirección de movimiento es proporcional al desplazamiento del objeto y en la dirección opuesta:

$$F_s = -kx \quad [13.1]$$

Esta ecuación se conoce como ley de Hooke. El tiempo requerido para una vibración completa es llamado **periodo** del movimiento. El recíproco del periodo es la **frecuencia** del movimiento, la cual es el número de oscilaciones por segundo.

Cuando un objeto se mueve con movimiento armónico simple, su **aceleración** en función de la posición es

$$a = -\frac{k}{m}x \quad [13.2]$$

13.2 Energía potencial elástica

La energía almacenada en un resorte comprimido o estirado o en algún otro material elástico es llamada **energía potencial elástica**:

$$EP_s \equiv \frac{1}{2}kx^2 \quad [13.3]$$

La **velocidad** de un objeto en función de la posición, cuando éste se sigue un movimiento armónico simple es

$$v = \pm \sqrt{\frac{k}{m}(A^2 - x^2)} \quad [13.6]$$

13.3 Comparación del movimiento armónico simple con el movimiento circular uniforme

El **periodo** de un objeto de masa m se mueve con movimiento armónico simple, mientras está unido a un resorte cuya constante de k es

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad [13.8]$$

donde T es independiente de la amplitud A .

La **frecuencia** del sistema objeto-resorte es $f = 1/T$. La **frecuencia angular** ω del sistema en rad/s es

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [13.11]$$

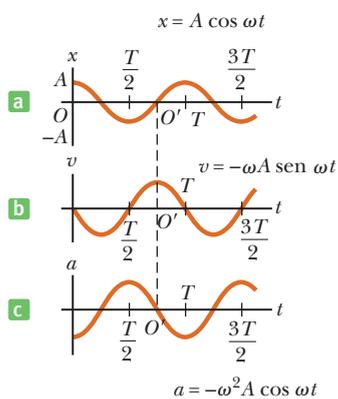
13.4 Posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo

Cuando un objeto sigue un movimiento armónico simple, la **posición**, **velocidad** y **aceleración** del objeto en función del tiempo están dados por

$$x = A \cos(2\pi f t) \quad [13.14a]$$

$$v = -A\omega \sin(2\pi f t) \quad [13.14b]$$

$$a = -A\omega^2 \cos(2\pi f t) \quad [13.14c]$$



a) El desplazamiento, b) la velocidad y c) la aceleración en función del tiempo de un objeto que se mueve con movimiento armónico simple en las condiciones iniciales $x_0 = a$ y $v_0 = 0$ en $t = 0$.

13.5 Movimiento de un péndulo

Un **péndulo simple** de longitud L sigue un movimiento armónico simple para pequeños desplazamientos angulares desde la vertical, con un periodo de

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad [13.15]$$

13.7 Ondas

En una **onda transversal** los elementos del medio se mueven en dirección perpendicular a la dirección de la onda. Un ejemplo es una onda en una cuerda estirada.

En una **onda longitudinal** los elementos del medio se mueven en paralelo a la dirección de la velocidad de la onda. Un ejemplo es una onda de sonido.

13.8 Frecuencia, amplitud y longitud de onda

La relación entre la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia de una onda es

$$v = f\lambda \quad [13.17]$$

Esta relación se mantiene para una amplia variedad de ondas diferentes.

13.9 Velocidad de ondas sobre cuerdas

La velocidad de una onda viajando por una cuerda estirada de masas por unidad de longitud μ y bajo presión F es

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [13.18]$$

13.10 Interferencia de ondas

El **principio de superposición** establece que si dos o más ondas viajeras se mueven a través de un medio, la onda resultante se encuentra sumando las ondas individuales juntas punto por punto. Cuando las ondas se encuentran cresta con cresta y depresión con depresión, sufren de **interferencia constructiva**. Cuando las crestas se encuentran con las depresiones, las ondas sufren de **interferencia destructiva**.

13.11 Reflexión de ondas

Cuando el pulso de una onda se refleja desde una frontera rígida, el pulso se invierte. Cuando la frontera está libre, el pulso reflejado no se invierte.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- La distancia entre una cresta y la siguiente depresión de una onda de agua es de 2 m. Si la frecuencia de una onda particular es de 2 Hz, ¿cuál es la velocidad de la onda? a) 4 m/s b) 1 m/s c) 8 m/s d) 2 m/s e) es imposible de determinar con la información proporcionada.
- La posición de un objeto que sigue un movimiento armónico simple está dada por $x = 4 \cos(6\pi t)$, donde x está en metros y t está en segundos. ¿Cuál es el periodo de oscilación del sistema? a) 4 s b) $\frac{1}{6}$ s c) $\frac{1}{3}$ s d) 6π s e) es imposible de determinar con la información proporcionada.
- Un sistema bloque-resorte que vibra sobre una superficie horizontal sin fricción con una amplitud de 6.0 cm tiene una energía total de 12 J. Si el bloque se reemplaza por uno que tiene el doble de masa del bloque original y la amplitud del movimiento es nuevamente 6.0 cm, ¿cuál es la energía del sistema con mayor masa? a) 12 J b) 24 J c) 6 J d) 48 J e) ninguna de las respuestas.
- Una masa de 0.40 kg cuelga desde un resorte con una constante de resorte de 80.0 N/m, se le aplica un movimiento armónico simple de arriba-abajo. Si la masa se desliza desde el equilibrio a 0.10 m y se libera desde el reposo, ¿cuál es su velocidad cuando se mueve a través del punto de equilibrio? a) 0 b) 1.4 m/s c) 2.0 m/s d) 3.4 m/s e) 4.2 m/s
- Si un objeto de masa m unido a un resorte ligero se reemplaza por otro de masa $9m$, la frecuencia de vibración del sistema cambia ¿en qué factor? a) $\frac{1}{9}$ b) $\frac{1}{3}$ c) 3.0 d) 9.0 e) 6.0
- Un objeto de masa 0.40 kg cuelga de un resorte con una constante de resorte de 8.0 N/m, se le aplica un movimiento armónico simple de arriba-abajo. ¿Cuál es la magnitud de la aceleración del objeto cuando está en su máximo desplazamiento de 0.10 m? a) 0 b) 0.45 m/s² c) 1.0 m/s² d) 2.0 m/s² e) 2.40 m/s²
- Un vagón de ferrocarril con masa de 3.0×10^5 kg corre deslizándose a lo largo de una pista de nivel a 2 m/s cuando colisiona elásticamente con una valla con resortes al final de la pista. Si la constante de resorte de la valla es 2.0×10^6 N/m, ¿cuál es la máxima compresión del resorte durante la colisión? a) 0.77 m b) 0.58 m c) 0.34 m d) 1.07 m e) 1.24 m
- Si un péndulo simple oscila con amplitud pequeña y su longitud se duplica, ¿qué ocurre con la frecuencia de su movimiento? a) se duplica, b) se vuelve $\sqrt{2}$ veces de largo,

- c) se reduce a la mitad, d) se vuelve $1/\sqrt{2}$ de largo, e) permanece igual.
9. Un péndulo simple tiene un periodo de 2.5 s. ¿Cuál es su periodo si su longitud se hace cuatro veces más grande? a) 0.625 s b) 1.25 s c) 2.5 s d) 3.54 s e) 5.0 s
10. Una partícula sobre un resorte sigue un movimiento armónico simple a lo largo del eje x entre los puntos de retorno en $x_1 = 100$ cm y $x_2 = 140$ cm. ¿En cuál de las siguientes posiciones la partícula tiene su máxima energía cinética? a) 100 cm b) 110 cm c) 120 cm d) 130 cm e) 140 cm
11. ¿Cuál de las siguientes declaraciones *no* es cierta de acuerdo con un sistema masa-resorte que sigue un movimiento armónico simple en ausencia de fricción? a) La energía total del sistema permanece constante. b) La energía del sistema se transforma continuamente entre energía cinética y potencial. c) La energía total del sistema es proporcional al cuadrado de su amplitud. d) La energía potencial almacenada en el sistema es máxima cuando la masa pasa a través de la posición de equilibrio. e) La velocidad de oscilación de la masa tiene su máximo valor cuando la masa pasa a través de la posición de equilibrio.
12. Un bloque se une a un resorte que cuelga verticalmente. Después de bajarse lentamente, el bloque cuelga en reposo con el resorte estirado a 15.0 cm. Si el bloque es regresado arriba y liberado desde el reposo con el resorte sin estirar, ¿qué distancia máxima caerá? a) 7.5 cm b) 15.0 cm c) 30.0 cm d) 60.0 cm e) es imposible determinar sin conocer la masa y la constante de resorte.
13. Un sistema objeto-resorte que se mueve con movimiento armónico simple tiene una amplitud A . Cuando la energía cinética del objeto es igual a dos veces la energía potencial almacenada en el resorte, ¿cuál es la posición x del objeto? a) A b) $\frac{1}{3}A$ c) $A/\sqrt{3}$ d) 0 e) ninguna de las respuestas.
14. Usted está parado en el extremo de un trampolín y salta para ponerlo en oscilación. Encuentre una respuesta máxima en términos de la amplitud de la oscilación del extremo de la tabla cuando rebotan en una frecuencia f . Ahora, se mueve a la mitad de la tabla y repite el experimento. ¿La frecuencia de resonancia de las oscilaciones forzadas en este punto es a) mayor, b) más bajo o c) la misma que f ?

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Un sistema objeto-resorte sigue un movimiento armónico simple con una amplitud A . ¿Cambia la energía total si la masa se duplica pero la magnitud no cambia? ¿Las energías cinética y potencial se afectan en algún momento por el cambio en la masa? Explique.
2. Si un sistema objeto-resorte se cuelga verticalmente y se pone en oscilación, ¿por qué el movimiento eventualmente se detiene?
3. Un objeto se cuelga de un resorte y se mide la frecuencia de oscilación f del sistema. El objeto, un segundo objeto idéntico y el resorte se llevan al espacio en un trasbordador espacial. Los dos objetos se unen a los extremos del resorte y el sistema se saca al espacio en una caminata espacial. El resorte se estira y el sistema se libera para oscilar mientras flota en el espacio. Las espirales del resorte no se golpean unas con otras. ¿Cuál es la frecuencia de oscilación para este sistema en términos de f ?
4. Si un resorte se corta a la mitad, ¿qué ocurre con su constante de resorte?
5. Un péndulo con peso está hecho de una esfera llena con agua. ¿qué le pasaría a la frecuencia de vibración de este péndulo si la esfera tuviera un agujero que permitiera que el agua se fugara lentamente?
6. Si el péndulo de un reloj mantiene un tiempo perfecto en la base de una montaña, ¿seguirá manteniendo un tiempo perfecto en la cima de la montaña? Explique.
7. a) ¿Una pelota que rebota es un ejemplo de movimiento armónico simple? b) ¿El movimiento diario de un estudiante desde su casa a la escuela es un movimiento armónico simple?
8. Si el reloj del abuelo se estuviera retrasando, ¿cómo podría ajustarse la longitud del péndulo para corregir el tiempo?
9. ¿Qué ocurre con la velocidad de una onda sobre una cuerda cuando la frecuencia se duplica? Suponga que la tensión en la cuerda permanece igual.
10. Si usted estira una manguera de hule y la arranca, puede observar un pulso viajando arriba y debajo de la manguera. ¿Qué sucede con la velocidad del pulso si estira la manguera más apretadamente? ¿Qué sucede con la velocidad si llena la manguera con agua?
11. Explique por qué las energías cinética y potencial de un sistema objeto-resorte nunca pueden ser negativas.
12. Un reloj del abuelo depende del periodo de un péndulo para mantener el tiempo correcto. Suponga que dicho reloj se calibra correctamente y después la temperatura del cuarto en el cual se encuentra, aumenta. ¿El reloj se atrasará, se adelantará o seguirá correcto? *Sugerencia:* Un material se expande cuando la temperatura aumenta.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
- 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

13.1 Ley de Hooke

- 1.** Un bloque de $m = 0.60$ kg unido a un resorte con fuerza constante de 130 N/m es libre para moverse sobre una superficie horizontal sin fricción como en la figura P13.1. El bloque se libera desde el reposo, después que el resorte se estira $A = 0.13$ m. En dicho instante, encuentre a) la fuerza sobre el bloque y b) su aceleración.

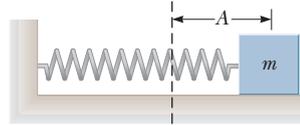


Figura P13.1

- 2.** Un resorte orientado verticalmente se une a una superficie horizontal dura como en la figura P13.2. El resorte tiene una fuerza constante de 1.46 kN/m. ¿Cuánto se comprime el resorte cuando un objeto de masa $m = 2.30$ kg se coloca en la parte superior del resorte y el sistema está en reposo?
- 3.** La fuerza constante de un resorte es 137 N/m. Encontrar la magnitud de la fuerza necesaria para a) comprimir el resorte 4.80 cm de su longitud sin estirar y b) estirar el resorte 7.36 cm de su longitud sin estirar.
- 4.** Una carga de 50 N unida a un resorte que cuelga verticalmente estira el resorte 5.0 cm. El resorte se coloca ahora horizontalmente sobre una mesa y se estira 11 cm. a) ¿Qué fuerza se requiere para estirar el resorte para esta cantidad? b) Realice una gráfica de la fuerza (sobre el eje y) contra el desplazamiento del resorte desde la posición de equilibrio a lo largo del eje x .

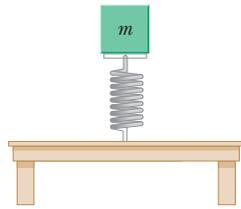


Figura P13.2

- 5.** Un resorte cuelga desde el techo y un objeto unido a su extremo inferior estira el resorte una distancia $d = 5.00$ cm desde su posición sin estirar cuando el sistema está en equilibrio en la figura P13.5. Si la constante del resorte es 47.5 N/m, determine la masa del objeto.

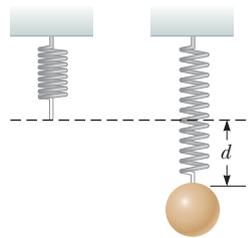


Figura P13.5

- 6.** Un arquero debe ejercer una fuerza de 375 N sobre la cuerda del arco mostrado en la figura P13.6a de tal modo que la cuerda forma un ángulo de $\theta = 35.0^\circ$ con la vertical. a) Determine la tensión de la cuerda. b) Si la fuerza aplicada se reemplaza por un resorte estirado como en la figura P13.6b y el resorte se

estira 30.0 cm desde su longitud sin estirar, ¿cuál es la constante del resorte?

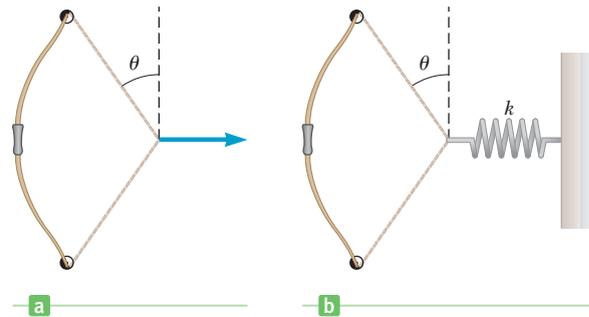


Figura P13.6

- 7.** **C/C** Un resorte de 1.50 m de longitud con constante de fuerza 475 N/m está colgado desde el techo de un elevador y un bloque de 10.0 kg de masa se une al final del resorte. a) ¿En cuánto se estira el resorte cuando el bloque es lentamente bajado a su punto de equilibrio? b) Si el elevador subsecuentemente acelera hacia arriba a 2.00 m/s², ¿cuál es la posición del bloque, considerando la posición de equilibrio encontrada en el inciso a) siendo $y = 0$ y hacia arriba la dirección positiva de y . c) Si el cable del elevador se parte durante la aceleración, describa el movimiento subsecuente del bloque relativo a la caída libre del elevador. ¿Cuál es la amplitud de su movimiento?

13.2 Energía potencial elástica

- 8.** Un bloque de masa $m = 2.00$ kg se une a un resorte de constante $k = 5.00 \times 10^2$ N/m que se encuentra sobre una superficie horizontal sin fricción, como se muestra en la figura P13.8. El bloque es jalado a una posición $x_i = 5.00$ cm hacia la derecha de la posición de equilibrio y se suelta desde el reposo. Encuentre a) el trabajo necesario para estirar el resorte y b) la velocidad del bloque cuando pasa a través de la posición de equilibrio.
- 9.** Un tirachinas consiste en una copa ligera de cuero que contiene una piedra. La copa se jala hacia atrás en contra dos bandas de hule paralelas. Se requiere de una fuerza

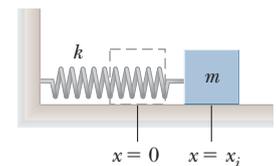


Figura P13.8

de 15 N para estirar cada una de estas bandas 1.0 cm.
 a) ¿Cuál es la energía potencial almacenada en las dos bandas juntas cuando una piedra de 50 g se coloca en la copa y se jala hacia atrás 0.20 m desde la posición de equilibrio? b) ¿Con qué velocidad sale la piedra del tirachinas?

10. Una arquera jala la cuerda de su arco hacia atrás 0.400 m ejerciendo una fuerza que se incrementa uniformemente desde 0 hasta 230 N. a) ¿Cuál es la constante equivalente de resorte del arco? b) ¿Cuánto trabajo es realizado para jalar del arco?

11. El juguete de un niño consiste en una pieza de plástico unida a un resorte (figura P13.11). El resorte se comprime en contra del piso una distancia de 2.00 cm y el juguete se libera. Si el juguete tiene una masa de 100 g y alcanza una altura máxima de 60.0 cm, estime la constante de fuerza del resorte.

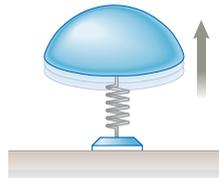


Figura P13.11

12. Un automóvil que tiene una masa de 1 000 kg es conducido hacia una pared de ladrillos en una prueba de seguridad. La valla se comporta como un resorte con constante 5.00×10^6 N/m y se comprime 3.16 cm hasta que el auto llega al reposo. ¿Cuál era la velocidad del auto antes del impacto, suponiendo que no se pierde energía en la colisión contra la pared?

13. Una bala de 10.0 g se dispara y queda alojada en un bloque de 2.00 kg unido a un resorte con una constante de fuerza de 19.6 N/m y cuya masa es despreciable. ¿Qué tanto se comprime el resorte si la bala tenía una velocidad de 300 m/s justo antes de golpear el bloque y éste se desliza sobre una superficie sin fricción? *Nota:* Debe utilizar el momento de conservación para este problema. ¿Por qué?

14. **S** Un sistema objeto-resorte que sigue un movimiento armónico simple tiene una amplitud A . a) ¿Cuál es la energía total del sistema en términos de k y A solamente? b) Suponga que en cierto instante la energía cinética es el doble que la energía potencial elástica. Escriba una ecuación que describa esta situación, usando sólo las variables para la masa m , la velocidad v , la constante de resorte k y la posición x . c) Utilizando los resultados de los incisos a) y b) y la ecuación de conservación de energía, encuentre la posición x del objeto cuando su energía cinética es igual al doble de la energía potencial almacenada en el resorte. (La respuesta debe estar en términos de A solamente.)

15. **PG** Un sistema bloque-resorte horizontal, con el bloque sobre una superficie sin fricción, tiene una energía mecánica total $E = 47.0$ J y un máximo desplazamiento desde el equilibrio de 0.240 m. a) ¿Cuál es la constante del resorte? b) ¿Cuál es la energía cinética del sistema en el punto de equilibrio? c) Si la máxima velocidad del bloque es de 3.45 m/s, ¿Cuál es su masa? d) ¿Cuál es la velocidad del bloque cuando su desplazamiento es 0.160 m? e) Encuentre la energía cinética del bloque en $x = 0.160$ m. f) Encuentre la energía potencial almacenada en el resorte cuando $x = 0.160$ m. g) Suponga que el mismo sistema

es liberado desde el reposo en $x = 0.240$ m sobre una superficie rugosa de modo que pierde 14.0 J por el tiempo en el alcanza su primer punto de retorno (después de pasar el equilibrio en $x = 0$). ¿Cuál es su posición en ese instante?

16. **CIC** Un bloque de 0.250 kg que descansa sobre una superficie horizontal sin fricción está unido a un resorte que tiene una constante de fuerza de 83.8 N/m como se muestra en la figura P13.16. Una fuerza horizontal \vec{F} provoca que el resorte se estire una distancia de 5.46 cm desde su punto de equilibrio. a) Encuentre el valor de F b) ¿Cuál es la energía total almacenada en el sistema cuando el resorte se estira? c) Encuentre la magnitud de la aceleración del bloque inmediatamente después de que la fuerza aplicada es removida. d) Encuentre la velocidad del bloque cuando alcanza por primera vez la posición de equilibrio. e) Si la superficie no tiene fricción pero el bloque de todos modos alcanza la posición de equilibrio, ¿cómo cambia su respuesta del inciso d)? f) ¿Qué otra información necesitaría para conocer la respuesta al inciso d) en este caso?

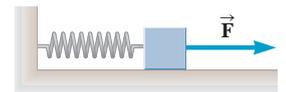


Figura P13.16

13.3 Comparación del movimiento armónico simple con el movimiento circular uniforme

13.4 Posición, velocidad y aceleración como una función del tiempo

17. Un objeto de 0.40 kg conectado a un resorte ligero con una fuerza constante de 19.6 N/m oscila sobre una superficie horizontal sin fricción. Si el resorte se comprime 4.0 cm y se libera desde el reposo, determine a) la velocidad máxima del objeto, b) la velocidad del objeto cuando el resorte está comprimido 1.5 cm y c) la velocidad del objeto cuando el resorte está estirado 1.5 cm a partir de su posición de equilibrio. d) ¿Para qué valor de x la velocidad es igual a la mitad de la velocidad máxima?

18. Un sistema objeto-resorte oscila con una amplitud de 3.5 cm. Si la constante de resorte es de 250 N/m y el objeto tiene una masa de 0.50 kg, determine a) la energía mecánica del sistema, b) la velocidad máxima del objeto y c) la aceleración máxima del objeto.

19. **M** En un mercado callejero, una penca de plátanos se pone en movimiento oscilatorio con una amplitud de 20.0 cm sobre un resorte con una fuerza constante de 16.0 N/m. Se ha observado que la velocidad máxima de la penca de plátanos es de 40.0 cm/s. ¿Cuál es el peso de los plátanos en newtons?

20. Un objeto de 50.0 g se une a un resorte horizontal con una constante de fuerza de 10.0 N/m y es liberado desde el reposo con una amplitud de 25.0 cm. ¿Cuál es la velocidad del objeto cuando está a medio camino de la posición de equilibrio si la superficie no tiene fricción?

21. Un resorte horizontal fijado a la pared tiene una constante de fuerza $k = 850$ N/m. Un bloque de masa $m = 1.00$ kg se une al resorte y descansa sobre una superficie sin fricción

horizontal como se muestra en la figura P13.21. a) El bloque se jala a una posición $x_i = 6.00$ cm de equilibrio y se suelta. Encontrar la energía potencial almacenada en el resorte cuando el bloque está a 6.00 cm de la posición de equilibrio. b) Determinar la velocidad del bloque cuando pasa por la posición de equilibrio. c) ¿Cuál es la velocidad del bloque cuando está en una posición $x_i/2 = 3.00$ cm?

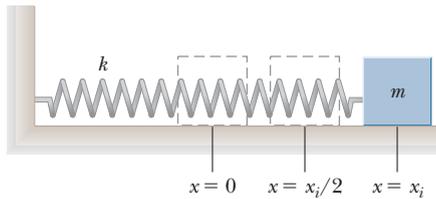


Figura P13.21

22. Un objeto se mueve uniformemente alrededor de una trayectoria circular de radio 20.0 cm, realizando una revolución completa cada 2.00 s. ¿Cuál es a) la velocidad traslacional del objeto, b) la frecuencia del movimiento en hertz y c) la velocidad angular del objeto?
23. Considere una simplificación de la máquina de un solo pistón mostrado en la figura P13.23. Si la rueda gira a una velocidad angular constante ω , explique ¿por qué la barra del pistón oscila en un movimiento armónico simple?

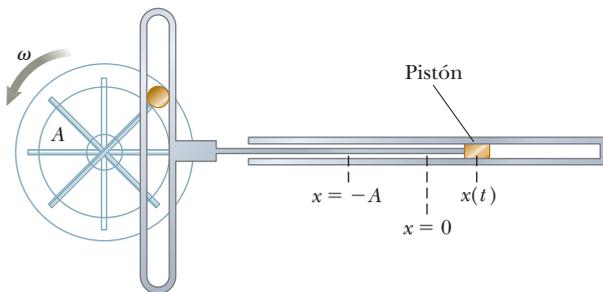


Figura P13.23

24. El periodo de movimiento de un sistema objeto-resorte es $T = 0.528$ s cuando un objeto de masa $m = 238$ g se une al resorte. Encuentre a) la frecuencia del movimiento en hertz y b) la constante de fuerza del resorte. c) Si la energía total del movimiento de oscilación es 0.234 J, encuentre la amplitud de las oscilaciones.
25. **M** Un resorte vertical se estira 3.9 cm cuando un objeto de 10 g cuelga de él. El objeto es reemplazado con un bloque de masa 25 g que oscila en movimiento armónico simple. Calcule el periodo de movimiento.
26. Cuando cuatro personas con masa combinada de 320 kg se sientan en un coche, notan que éste baja 0.80 cm sobre sus resortes. a) Ellos pueden salir del carro y rebotarlo de arriba abajo. b) ¿Cuál es la frecuencia de vibración del auto si su masa (sin pasajeros) es de 2.0×10^3 kg?

27. Una carreta de 250 g de masa se coloca sobre una pista aérea horizontal sin fricción. Un resorte con constante

de resorte de 9.5 N/m se une entre la carreta y el extremo izquierdo de la pista. Cuando está en equilibrio, la carreta se localiza a 12 cm del extremo izquierdo de la pista. Si la carreta está desplazada 4.5 cm de su posición de equilibrio, encuentre a) el periodo al cual oscila, b) su velocidad máxima y c) su velocidad cuando está a 2 cm del extremo izquierdo de la pista.

28. La posición de un objeto conectado a un resorte varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $x = (5.2 \text{ cm}) \sin(8.0\pi t)$. Encuentre a) el periodo de este movimiento, b) la frecuencia del movimiento, c) la amplitud del movimiento y d) la primera vez después que $t = 0$ que el objeto alcanza la posición $x = 2.6$ cm.
29. Un objeto de 326 g se une a un resorte y ejecuta un movimiento armónico simple con un periodo de 0.250 s. Si la energía total del sistema es de 5.83 J, encuentre a) la velocidad máxima del objeto, b) la constante de fuerza del resorte y c) la amplitud del movimiento.
30. **S** Un objeto ejecuta un movimiento armónico simple con una amplitud A . a) ¿En qué valor de su posición su velocidad es igual a la mitad de su máxima velocidad? b) ¿En qué valores de su posición su energía potencial es igual a la mitad de la energía total?
31. Un objeto de 2.00 kg sobre una pista horizontal sin fricción se conecta al extremo de un resorte horizontal cuya constante de fuerza es 5.00 N/m. El objeto se desplaza 3.00 m a la derecha desde su punto de equilibrio y luego es liberado iniciando un movimiento armónico simple. a) ¿Cuál es la fuerza (magnitud y dirección) que actúa sobre el objeto 3.50 s después que se libera? b) ¿Cuántas veces oscila el objeto en 3.50 s?
32. **PG** Un resorte de masa despreciable se estira 3.00 cm desde su longitud relajada cuando se aplica una fuerza de 7.50 N. Una partícula de 0.500 kg descansa sobre una superficie horizontal sin fricción y es unida al extremo libre del resorte. La partícula se desplaza desde el origen a $x = 5.00$ cm y liberada desde el reposo a $t = 0$. a) ¿Cuál es la constante de fuerza del resorte? b) ¿Cuál es la frecuencia angular ω , la frecuencia y el periodo de movimiento? c) ¿Cuál es la energía total del sistema? d) ¿Cuál es la amplitud del movimiento? e) ¿Cuál es la velocidad máxima y la aceleración máxima de la partícula? f) Determine el desplazamiento x de la partícula desde la posición de equilibrio a $t = 0.500$ s. g) Determine la velocidad y aceleración de la partícula cuando $t = 0.500$ s.
33. Dado que $x = A \cos(\omega t)$ es una función sinusoidal del tiempo, demuestre que v (velocidad) y a (aceleración) son también funciones del tiempo sinusoidales. *Sugerencia:* Utilice las ecuaciones 13.6 y 13.2.

13.5 Movimiento de un péndulo

34. Un hombre entra en una torre alta necesitando saber su altura. Él nota que un largo péndulo se extiende desde el techo casi hasta el piso y que su periodo es 15.5 s. a) ¿Qué tan alta es la torre? b) Si el péndulo es llevado a la Luna, donde la aceleración en caída libre es de 1.67 m/s^2 , ¿cuál es el periodo ahí?

35. Un péndulo simple tiene una longitud de 52.0 cm y realiza 82.0 oscilaciones completas en 2.00 min. Encuentre a) el periodo del péndulo y b) el valor de g en la ubicación del péndulo.
36. Un péndulo de “segundos” es aquel que se mueve a través de su posición de equilibrio una vez cada segundo. (El periodo del péndulo es 2.000 s.) La longitud de un péndulo de segundos es 0.9927 m en Tokio y 0.994 2 m en Cambridge, Inglaterra. ¿Cuál es la razón de las aceleraciones en caída libre en estas dos locaciones?
37. Un reloj de péndulo que funciona perfectamente en la Tierra es llevado a la Luna. a) ¿Irás más rápido o más lento ahí? b) Si el reloj comienza a funcionar a la medianoche, ¿cuál será su lectura después de un día terrestre (24.0 h)? Suponga que la aceleración en caída libre en la Luna es 1.63 m/s^2 .

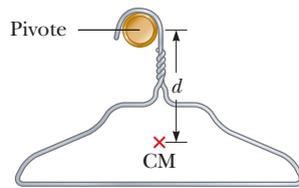


Figura P13.38

38. Una percha de masa $m = 0.238 \text{ kg}$ oscila sobre una clavija como un péndulo físico, como se muestra en la figura P13.38. La distancia desde el pivote en el centro de masa de la percha es $d = 18.0 \text{ cm}$ y el periodo del movimiento es $T = 1.25 \text{ s}$. Determinar el momento de inercia de la percha sobre el pivote.
39. **M** La aceleración en caída libre en Marte es 3.7 m/s^2 . a) ¿Qué longitud del péndulo tiene un periodo de 1 s en la Tierra? b) ¿Qué longitud del péndulo tendría un periodo de 1 s en Marte? Un objeto se suspende de un resorte con constante de fuerza 10 N/m . Encuentre la masa suspendida desde este resorte que resultaría en un periodo de 1 s c) sobre la Tierra y d) sobre Marte.
40. Un péndulo simple tiene 5.00 m de largo. a) ¿Cuál es el periodo del movimiento armónico simple para este péndulo si está localizado en un elevador que acelera hacia arriba a 5.00 m/s^2 ? b) ¿Cuál es su periodo si el elevador está acelerando hacia abajo a 5.00 m/s^2 ? c) ¿Cuál es el periodo de un movimiento armónico simple para el péndulo si está colocado en un camión que acelera horizontalmente a 5.00 m/s^2 ?

13.6 Oscilaciones amortiguadas

13.7 Ondas

13.8 Frecuencia, amplitud y longitud de onda

41. La onda sinusoidal mostrada en la figura P13.41 viaja en la dirección positiva en x y tienen una frecuencia de 18.0 Hz.

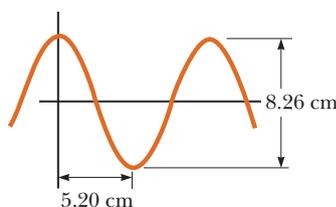


Figura P13.41

Encuentre a) la amplitud, b) la longitud de onda, c) el periodo y d) la velocidad de la onda.

42. Un objeto unido a un resorte vibra con un movimiento armónico simple como lo describe la figura P13.42. Para este movimiento, encuentre a) la amplitud, b) el periodo, c) la frecuencia angular, d) la velocidad máxima, e) la aceleración máxima y f) una ecuación para su posición x en términos de una función seno.

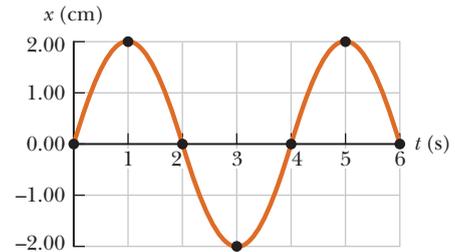


Figura P13.42

43. Las ondas de luz son ondas electromagnéticas que viajan a $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. El ojo es más sensible a la luz que tiene una longitud de onda de $5.50 \times 10^{-7} \text{ m}$. Encuentre a) la frecuencia de esta onda de luz y b) su periodo.
44. La distancia entre dos ondas trasversales sucesivas es 2.76 m. Cinco crestas de la onda pasan un punto dado a lo largo de la dirección en que viajan cada 14.0 s. Encuentre a) la frecuencia de la onda y b) la velocidad de la onda.
45. Una onda armónica viaja a lo largo de una cuerda. Se observa que el oscilador que genera la onda completa 40.0 vibraciones en 30.0 s. También, se da un máximo de viajes de 425 cm a lo largo de la cuerda en 10.0 s. ¿Cuál es la longitud de onda?
46. **BIO** Un murciélago puede detectar objetos pequeños, como un insecto cuyo tamaño es aproximadamente igual a una longitud de una onda de sonido que hace el murciélago. Si los murciélagos pían a una frecuencia de 60.0 kHz y la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, ¿cuál es el insecto más pequeño que puede detectar un murciélago?
47. Un corcho sobre la superficie de una laguna cabecea arriba y abajo dos veces por segundo sobre las ondas del agua que tienen una longitud de onda de 8.50 cm. Si el corcho está a 10.0 m de la orilla, ¿cuánto tiempo le tomará a una onda llevar al corcho hasta a la orilla?
48. Olas del océano viajan hacia el este a 4.0 m/s con una distancia de 20 m entre crestas. ¿Con qué frecuencia las olas golpean el frente de un bote a) cuando el bote está anclado y b) cuando el bote se mueve hacia el oeste a 1.0 m/s?

13.9 Velocidad de ondas sobre cuerdas

49. El cable de un teléfono tiene 4.00 m de longitud y tiene una masa de 0.200 kg. Un pulso de onda trasversal se produce arrancando un extremo del cable. El pulso realiza cuatro viajes abajo y arriba a lo largo del cable en 0.800 s. ¿Cuál es la tensión en el cable?

50. Un artista de circo estira una cuerda tensa entre dos torres. Él golpea un extremo de la cuerda y envía una onda en dirección de la otra torre. Él nota que le toma a la onda 0.800 s alcanzar la torre opuesta a 20.0 m de distancia. Si una longitud de 1.00 m de cuerda tiene una masa de 0.350 kg, encuentre la tensión en la cuerda.
51. Una cuerda de piano de masa por unidad de longitud 5.00×10^{-3} kg/m se encuentra bajo una tensión de 1350 N. Determinar la velocidad con que una onda se desplaza en esta cuerda.
52. **CIC S** Una estudiante que toma un examen encuentra en una hoja de referencia las dos ecuaciones

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{y} \quad v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Ella se ha olvidado de lo que T representa en cada ecuación. a) Utilice el análisis dimensional para determinar las unidades necesarias para T en cada ecuación. b) Explique cómo identificaría la cantidad física que cada T representa a partir de las unidades.

53. Una cuerda estirada produce ondas transversales con una velocidad de 50.0 m/s. Se utiliza una cuerda de 5.00 m de longitud con una masa total de 0.060 0 kg. a) ¿Cuál es la tensión requerida en la cuerda? b) Calcule la velocidad de la onda en la cuerda si la tensión es de 8.00 N.
54. Un astronauta sobre la Luna desea medir el valor local de g cronometrando los pulsos que viajan a través de un alambre que tiene un objeto grande suspendido de él. Suponga un alambre de masa 4.00 g, 1.60 m de longitud y que el objeto tiene 3.00 kg de masa. Un pulso requiere 36.1 ms para recorrer la longitud del alambre. Calcule g_{luna} de estos datos. (Puede despreciar la masa del alambre cuando calcule la tensión en él.)
55. Un péndulo simple consiste en una pelota de 5.00 kg de masa colgando de una cuerda uniforme de masa 0.060 0 kg y longitud L . Si el periodo de oscilación del péndulo es de 2.00 s, determine la velocidad de una onda transversal en la cuerda cuando el péndulo cuelga verticalmente.
56. Una cuerda tiene 50.0 cm de longitud y tiene una masas de 3.00 g. Una onda viaja a 5.00 m/s a lo largo de esta cuerda. Una segunda cuerda tiene la misma longitud, pero la mitad de masa de la primera. Si las dos cuerdas están bajo la misma tensión, ¿cuál es la velocidad de una onda a lo largo de la segunda cuerda?
57. **M** Una cuerda se mantiene en tensión como se muestra en la figura P13.57. La velocidad de una onda observada es de $v = 24.0$ m/s cuando la masa suspendida es de $m = 3.00$ kg. a) ¿Cuál es la masa por unidad de longitud de la cuerda? b) ¿Cuál es la velocidad de la onda cuando la masa suspendida es de $m = 2.00$ kg?
58. El límite elástico de una pieza de alambre de acero es de 2.70×10^9 Pa. ¿Cuál es la velocidad máxima a la cual pul-

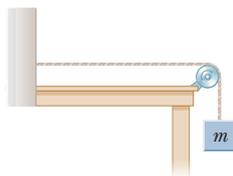


Figura P13.57

so de una onda transversal pueden propagarse a lo largo del alambre sin exceder su límite elástico? (La densidad del acero es 7.86×10^3 kg/m³.)

59. **CIC** Una línea de potencia de 2.65 kg que corre entre dos torres tiene una longitud de 38.0 m se encuentra bajo una tensión de 12.5 N. a) ¿Cuál es la velocidad del pulso transversal establecido sobre la línea? b) Si la tensión en la línea fuera desconocido, describa el procedimiento que un trabajador en el suelo podría utilizar para estimar la tensión.
60. **S** Un tirante de un tendedero tiene una longitud L y una masa M . Un pulso transversal se produce arrancando un extremo del tendedero. Si el pulso hace n viajes redondos a lo largo del tendedero en t segundos, encuentre expresiones para a) la velocidad del pulso en términos de n , L y t y b) la tensión F en el tendedero en términos de las mismas variables y masa M .

13.10 Interferencia de ondas

13.11 Reflexión de ondas

61. Una onda de amplitud 0.30 m interfiere con una segunda onda de amplitud 0.20 m viajando en la misma dirección. ¿Cuáles son a) la mayor y b) la menor amplitud resultante que pueden ocurrir y bajo qué condiciones ocurren este máximo y mínimo?

Problemas adicionales

62. La posición de un objeto de 0.30 kg unido a un resorte está descrito por
- $$x = (0.25 \text{ m}) \cos(0.4\pi t)$$
- Encuentre a) la amplitud del movimiento, b) la constante de resorte, c) la posición del objeto en $t = 0.30$ s y d) la velocidad del objeto en $t = 0.30$ s.
63. Un objeto de 2.00 kg de masa oscila libremente sobre un resorte vertical con un periodo de 0.600 s. Otro objeto de masa desconocida sobre el mismo resorte oscila con un periodo de 1.05 s. Encuentre a) la constante de resorte k y b) la masa desconocida.
64. Un diapason vibra a una frecuencia de 196 Hz mientras cada punta de sus dos lados tiene una amplitud de 0.850 mm. a) ¿Cuál es el periodo de su movimiento? b) Encuentre la longitud de onda del sonido producido por el diapason, considerando la velocidad del sonido en el aire como 343 m/s.
65. Un péndulo simple tiene una masa de 1.20 kg y una longitud de 0.700 m. a) ¿Cuál es el periodo del péndulo cerca de la superficie de la Tierra? b) Si la misma masa se une a un resorte, ¿cuál constante de resorte resultaría en el periodo de movimiento encontrado en el inciso a)?
66. Un bloque de 500 g se libera desde el reposo y se desliza hacia abajo por una pista sin fricción que comienza a 2.00 m por encima de la horizontal como se muestra en la figura P13.66. En el fondo de la pista, donde la superficie es horizontal, el bloque golpea y se pega a un resorte ligero con una constante de resorte de 20.0 N/m. Encuentre la distancia máxima que el resorte se comprime.

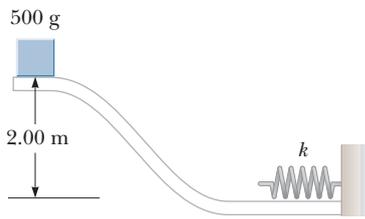


Figura P13.66

67. Un objeto de 3.00 kg se sujeta a un resorte ligero con un cordón que pasa a través de una polea (figura P13.67). La polea no tiene fricción y su inercia puede ser despreciada. El objeto se libera desde el reposo cuando el resorte está sin estirar. Si el objeto cae 10.0 cm antes de detenerse, encuentre a) la constante de resorte y b) la velocidad del objeto cuando está a 5.00 cm bajo su punto inicial.

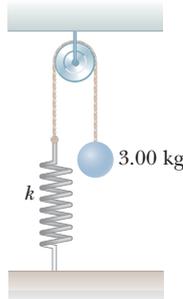


Figura P13.67

68. Una bala de 5.00 g que se mueve con una velocidad inicial de 400 m/s es disparada y pasa a través de un bloque de 1.00 kg de masa como se muestra en la figura P13.68. El bloque, inicialmente en reposo sobre una superficie horizontal sin fricción, está conectado a un resorte con una constante de resorte de 900 N/m. Si el bloque se mueve 5.00 cm a la derecha después del impacto, encuentre a) la velocidad a la cual la bala emerge del bloque y b) la energía mecánica perdida en la colisión.

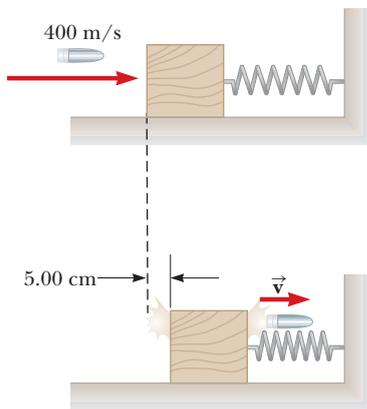


Figura P13.68

69. **M** Un gran bloque *P* ejecuta un movimiento armónico simple horizontal que se desliza sobre una superficie sin fricción con una frecuencia de $f = 1,50$ Hz. El bloque *B* se descansa sobre este, como se muestra en la figura P13.69, y el coeficiente de fricción estática entre los dos es $\mu_s = 0.600$. ¿Cuál es la máxima amplitud de oscilación que el sistema puede tener si el bloque *B* no se resbala?

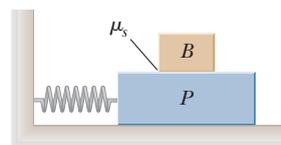


Figura P13.69

70. El resorte en una pistola de juguete tiene una constante de resorte de 9.80 N/m y puede comprimirse 20.0 cm más allá de la posición de equilibrio. Un perdigón de 1.00 g descansa en contra del resorte que es expulsado hacia fuera cuando el resorte se libera. a) Encuentre la velocidad inicial del perdigón. b) Si el perdigón es disparado horizontalmente desde una altura de 1.00 m por encima del piso, ¿cuál es su alcance?
71. **CIC** Un globo ligero de densidad 0.179 kg/m³ lleno con helio está atado a una cuerda ligera de longitud $L = 3.00$ m. La cuerda está atada al piso formando un péndulo simple “invertido” (figura P13.71a). Si el globo se desplaza ligeramente del equilibrio, como en la figura P13.71b, demuestre que el movimiento es armónico simple y b) determine el periodo del movimiento. Considere la densidad del aire como 1.29 kg/m³. *Sugerencia:* haga una analogía con el péndulo simple analizado en el texto y vea el capítulo 9.

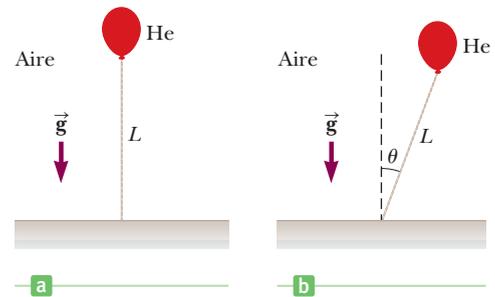


Figura P13.71

72. **S** Un objeto de masa m se conecta a dos bandas de hule de longitud L , cada una bajo tensión F , como en la figura P13.72. El objeto está desplazado verticalmente una pequeña distancia y . Suponiendo que la tensión no cambia, demuestre que a) la fuerza de restauración es $-(2F/L)y$ y b) el sistema presenta un movimiento armónico simple con frecuencia angular $\omega = \sqrt{2F/mL}$.

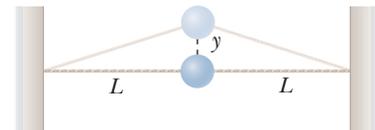


Figura P13.72

73. Suponga que se hace un agujero a través del centro de la Tierra. Puede demostrarse que un objeto de masa m a una distancia r desde el centro de la Tierra es jalado hacia el centro sólo por el material en la porción sombreada de la figura P13.73. Suponga que la Tierra tiene una densidad uniforme ρ . Escriba la ley de

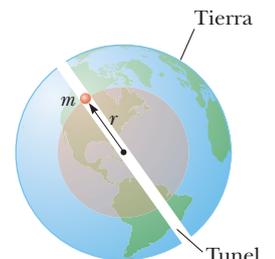


Figura P13.73

Newton de la gravitación para un objeto a una distancia r desde el centro de la Tierra y demuestre que la fuerza en él, tiene la forma de la ley de Hooke, $F = -kr$, con una constante de fuerza efectiva de $k = (\frac{4}{3})\pi\rho Gm$, donde G es la constante gravitacional.

74. **BIO** La figura P13.74 muestra el modelo burdo del ala de un insecto. La masa m representa la masa entera del ala, la cual pivotea en el fulcro F . El resorte representa el tejido que conecta. El movimiento del ala corresponde a la vibración del resorte. Suponga que la masa del ala es de 0.30 g y que la constante de resorte efectiva del tejido es 4.7×10^{-4} N/m. Si la masa m se mueve arriba y abajo a una distancia de 2.0 mm desde su posición de equilibrio, ¿cuál es la velocidad máxima de la punta exterior del ala?

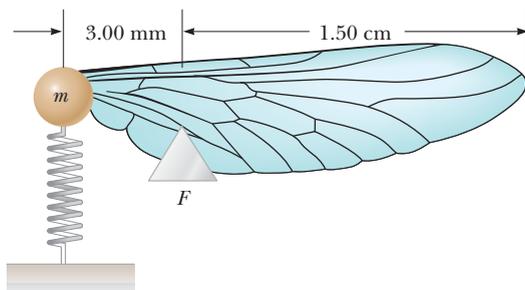


Figura P13.74

75. Un bloque de 2.00 kg se cuelga sin vibrar en el extremo de un resorte ($k = 500$ N/m) que se fija en el techo de un ascensor. El elevador asciende con una aceleración hacia arriba de $g/3$ cuando la aceleración de repente cesa

(en $t = 0$). a) ¿Cuál es la frecuencia angular de oscilación del bloque después de que la aceleración cesa? b) ¿Qué tamaño tiene el resorte estirado durante el tiempo que la cabina del ascensor se está acelerando?

76. **CIC S** Un sistema consiste en un resorte vertical con constante de fuerza $k = 1250$ N/m, longitud $L = 1.50$ m y un objeto de masa $m = 5.00$ kg unido al extremo (figura P13.76). El objeto es colocado al nivel del punto de ensamble con el resorte sin estirar, en la posición $y_i = L$, y luego es liberado de modo tal que se balancea como un péndulo. a) Escriba simbólicamente la segunda ley de Newton de este sistema conforme el objeto pasa a través de su punto más bajo. (Observe que en el punto más bajo se tiene que $r = L - y_f$.) b) Escriba simbólicamente la ecuación de conservación de la energía, igualando la energía total mecánica en el punto inicial y el punto más bajo. c) Encuentre la posición en coordenadas del punto más bajo. d) ¿El periodo de este péndulo será mayor o menor que el periodo de un péndulo simple con la misma masa m y una longitud de masa L ? Explique.

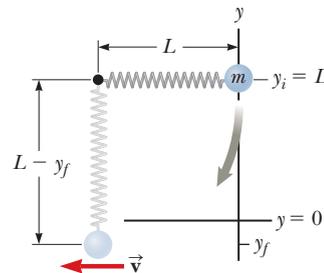


Figura P13.76



La pianista Jamila Tekalli explota la física de cuerdas vibrantes para producir la gran variedad de sonidos típicos de un piano de cola. Observe que las cuerdas son más cortas en la izquierda, donde se originan las frecuencias más altas, y más largas a la derecha, donde se producen las frecuencias más bajas. Las cuerdas graves están enrolladas a lo largo con alambre para aumentar su densidad lineal, lo que baja aún más sus frecuencias naturales. Cuando cualquier cuerda es golpeada por un martillo, otras cuerdas resuenan en respuesta, lo que contribuye al sonido característico del piano.

Sonido

14

Las ondas de sonido o acústicas son el ejemplo más importante de ondas longitudinales. En este capítulo analizaremos las características de las ondas acústicas: cómo se producen, qué son y cómo viajan a través de la materia. Posteriormente investigamos qué sucede cuando las ondas acústicas se interfieren unas con otras. La comprensión de este capítulo nos ayudará a entender cómo oímos.

14.1 Producción de ondas de sonido

No importa si la transmisión tiene su origen en el estridente ruido del motor de un avión a reacción o en las suaves notas de un cantante, cualquier onda acústica tiene su fuente en un objeto que vibra. Los instrumentos musicales producen sonidos en una variedad de maneras. El sonido de un clarinete es producido por una lengüeta que vibra, el sonido de un tambor por la vibración del parche tenso en la parte superior, el sonido de un piano por las cuerdas que vibran y el sonido de un cantante por la vibración de las cuerdas vocales.

Las ondas acústicas son ondas longitudinales que viajan a través de un medio, tal como el aire. Para investigar cómo se producen las ondas acústicas, centramos nuestra atención en un diapasón, un dispositivo común utilizado para producir notas musicales puras. Un diapasón consiste de dos ramas metálicas que vibran cuando se les pulsa. Su vibración altera el aire circundante, como se ve en la figura 14.1, página 474. (La amplitud de vibración de la rama mostrada en la figura se ha exagerado para mayor claridad.) Cuando una rama se mueve a la derecha, como en la figura 14.1a, las moléculas de una parte del aire frente al movimiento son forzadas a estar más juntas que lo normal. Esta región de alta densidad molecular y elevada presión del aire es una **compresión**. Esta compresión se aleja del diapasón como una onda en una charca. Cuando la rama del diapasón se mueve a la izquierda como en la figura 14.1b, las moléculas en un elemento de aire a la derecha de la rama se separan, y la densidad y presión del aire en esta región son más bajas que lo normal. Esta región de densidad más baja de lo normal se denomina **rarefacción**. Las moléculas

- 14.1 Producción de ondas de sonido
- 14.2 Características de las ondas de sonido
- 14.3 La velocidad del sonido
- 14.4 Energía e intensidad de las ondas de sonido
- 14.5 Ondas esféricas y planas
- 14.6 El efecto Doppler
- 14.7 Interferencia de las ondas de sonido
- 14.8 Ondas estacionarias
- 14.9 Vibraciones forzadas y resonancia
- 14.10 Ondas estacionarias en columnas de aire
- 14.11 Pulsaciones
- 14.12 Calidad del sonido
- 14.13 El oído



Figura 14.1 Diapasón vibrando. a) Cuando la rama derecha del diapasón se mueve hacia ese lado, se forma una región de alta densidad (compresión) de aire enfrente de su movimiento. b) Cuando la rama derecha del diapasón se mueve hacia la izquierda, se forma una región de baja densidad (rarefacción) de aire detrás de él.

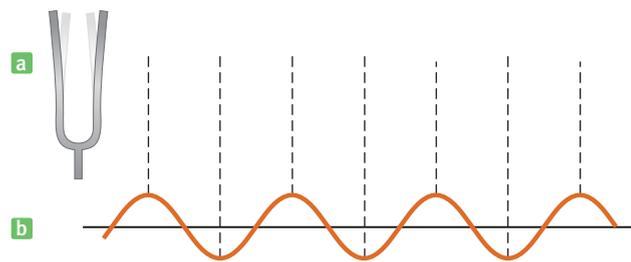


Figura 14.2 a) Cuando vibra el diapasón, se emiten series de compresiones y rarefacciones que se alejan. b) Las crestas de la onda corresponden a compresiones, y las depresiones o valles a rarefacciones.

situadas a la derecha de la rarefacción en la figura se mueven a la izquierda. Por lo tanto, la rarefacción en sí se mueve hacia la derecha, es decir, sigue a la compresión previamente producida.

A medida que el diapasón continúa vibrando, se forma una sucesión de compresiones y rarefacciones que salen del diapasón. El patrón resultante en el aire es parecido al de la figura 14.2a. Podemos utilizar una curva sinusoidal para representar una onda acústica, como en la figura 14.2b. Observe que hay crestas en la onda sinusoidal en los puntos donde la onda acústica tiene compresiones, y depresiones donde tiene rarefacciones. Las compresiones y rarefacciones de las ondas sonoras están superpuestas en el movimiento térmico aleatorio de los átomos y moléculas (estudiados en el capítulo 10) y por lo tanto las ondas acústicas en gases se desplazan a aproximadamente la velocidad rms molecular.

14.2 Características de las ondas de sonido

Como ya hemos observado, el movimiento general de elementos de aire cercanos al objeto en vibración toma formas de vaivén entre regiones de compresión y rarefacción. Este movimiento de vaivén de los elementos del medio en dirección de la perturbación es una característica de una onda longitudinal. **El movimiento de los elementos del medio en una onda longitudinal acústica es en vaivén a lo largo de la dirección en que la onda se desplaza.** En contraste, **en una onda transversal las vibraciones de los elementos del medio forman ángulos rectos con la dirección de desplazamiento de la onda.**

Categorías de las ondas de sonido

Las ondas acústicas pueden clasificarse en tres categorías que cubren gamas diferentes de frecuencia. Las **ondas audibles** son ondas longitudinales que están dentro del rango de la sensibilidad del oído humano, aproximadamente 20 a 20 000 Hz. Las **ondas infrasónicas** son ondas longitudinales con frecuencias debajo de la gama audible, por ejemplo las ondas sísmicas. Las **ondas ultrasónicas** son ondas longitudinales con frecuencias por encima de la gama audible de los seres humanos y son producidas por cierto tipo de silbatos. Animales tales como los perros, pueden oír ondas emitidas por estos silbatos.

Aplicaciones del ultrasonido

Las ondas de ultrasonido son ondas acústicas con frecuencias mayores de 20 kHz. Debido a su alta frecuencia y longitudes de onda corta correspondientes, las ondas ultrasónicas se utilizan para producir imágenes de objetos pequeños, por lo que hoy en día tienen amplio uso en aplicaciones médicas, como herramienta de diagnóstico y en ciertos tratamientos. Los órganos internos se examinan por medio de imágenes producidas por la reflexión y absorción de ondas ultrasónicas. Aunque las ondas ultrasónicas son más seguras que los

BIO APLICACIÓN

Usos médicos del ultrasonido

rayos X, sus imágenes no tienen tanto detalle. Sin embargo, ciertos órganos tales como el hígado y el bazo, que son invisibles a los rayos X, se pueden observar mediante ondas de ultrasonido.

Los trabajadores de la medicina pueden medir la velocidad del flujo sanguíneo en el cuerpo con el empleo de un aparato llamado medidor de flujo ultrasónico, que hace uso del efecto Doppler (que se ve en la sección 14.6). Al comparar la frecuencia de las ondas dispersadas debido a la circulación sanguínea con la frecuencia incidente, es posible obtener la velocidad de flujo.

La figura 14.3 ilustra la técnica que produce ultrasonido con fines de uso clínico. Se hacen contactos eléctricos a las caras opuestas de un cristal, por ejemplo cuarzo o titanato de estroncio. Si se aplica un voltaje alterno de alta frecuencia a estos contactos, el cristal vibra con la misma frecuencia que el voltaje aplicado y emite un haz de ondas ultrasónicas. En un tiempo, ésta era la forma en que casi todos los audífonos producían sonido. Este método de transformar energía eléctrica en energía mecánica, llamado **efecto piezoeléctrico**, es reversible. Si alguna fuente externa hace vibrar el cristal, se produce un voltaje alterno entre las terminales del cristal. Por lo tanto, un solo cristal puede ser utilizado tanto para generar como para recibir ondas de ultrasonido.

El principio físico fundamental que hace posible las imágenes de ultrasonido es el hecho de que una onda sonora se refleja parcialmente siempre que incida sobre la superficie de dos materiales de diferentes densidades. Si una onda acústica se desplaza en un material de densidad ρ_i y choca con un material de densidad ρ_t el porcentaje de la intensidad reflejada de la onda acústica incidente, PR , está dado por

$$PR = \left(\frac{\rho_t - \rho_i}{\rho_t + \rho_i} \right)^2 \times 100$$

Esta ecuación supone que la dirección de la onda acústica incidente es perpendicular a la frontera y que la velocidad del sonido es aproximadamente la misma en los dos materiales. Esta última suposición se cumple muy bien en el cuerpo humano porque la velocidad del sonido no varía mucho en los órganos del cuerpo.

Los médicos recurren a las ondas ultrasónicas para observar fetos. Esta técnica presenta mucho menos riesgo que los rayos X, que depositan más energía en las células y pueden producir defectos de nacimiento. Primero se cubre el abdomen de la madre con un líquido, que puede ser aceite mineral. Si esto no se hiciera, la mayor parte de las ondas ultrasónicas de la fuente piezoeléctrica se reflejarían en la frontera entre el aire y la piel de la madre. El aceite mineral tiene una densidad similar a la de la piel y una muy pequeña fracción de la onda ultrasónica incidente es reflejada cuando $\rho_i \approx \rho_t$. La energía de ultrasonido se emite en pulsaciones más que como una onda continua, así que el mismo cristal puede ser utilizado como un detector al igual que como transmisor. Una imagen del feto se obtiene utilizando un arreglo de transductores colocados sobre el abdomen. Las ondas acústicas reflejadas captadas por los transductores son convertidas en señales eléctricas, que se usan para formar una imagen en una pantalla fluorescente. Dificultades tales como la probabilidad de un aborto espontáneo o que el feto se encuentre en mala posición en el útero, se detectan fácilmente con esta técnica. De igual modo, anomalías fetales como la espina bífida y agua en el cerebro, se observan con facilidad.

Una aplicación médica relativamente nueva del ultrasonido es el *aspirador quirúrgico ultrasónico cavitron* (CUSA). Este aparato ha hecho posible eliminar quirúrgicamente tumores cerebrales que antes eran inoperables. La sonda del CUSA emite ondas de ultrasonido (aproximadamente de 23 kHz) en su punta. Cuando la punta hace contacto con un tumor, la parte del tumor cercano a la sonda se rompe y el residuo puede ser absorbido (aspirado) por la sonda hueca. Utilizando esta técnica, los neurocirujanos pueden remover tumores cerebrales sin causar daños serios a los tejidos sanos circundantes.

El ultrasonido también es utilizado para destruir fibroides uterinos y tumores en la próstata. Un nuevo aparato de ultrasonido desarrollado en 2009 permite a los neurocirujanos realizar la cirugía del cerebro sin abrir el cráneo o cortar la piel. Ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU) se crean con una serie de mil transductores de ultrasonido colocados en el cráneo del paciente. Cada transductor puede ser individual o centrado en una región seleccionada del cerebro. El ultrasonido calienta el tejido cerebral en un área pequeña y lo destruye. Los pacientes están conscientes durante el procedimiento y reportan hormigueo o mareos momentáneos, a veces un dolor de cabeza leve.

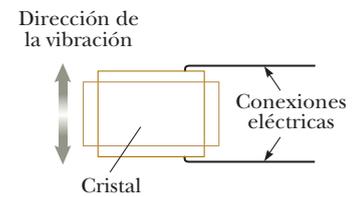


Figura 14.3 Un voltaje alterno aplicado a las caras de un cristal piezoeléctrico hace que el cristal vibre.



Una imagen de ultrasonido de un feto humano en la matriz.

BIO APLICACIÓN

Aspirador quirúrgico ultrasónico cavitron

BIO APLICACIÓN

Ultrasonido focalizado de alta densidad (HIFU)

Un sistema de refrigeración es necesario para evitar el sobrecalentamiento del cráneo del paciente. El dispositivo puede eliminar los tumores y el mal funcionamiento del tejido neuronal, y puede tener aplicación en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson y derrames cerebrales. También puede ser posible el uso de HIFU para orientar la entrega de los medicamentos terapéuticos en lugares específicos del cerebro.

El ultrasonido también se utiliza para romper los cálculos renales que de otra manera son demasiado grandes para pasar. Antes de eso, la cirugía invasiva era necesaria.

APLICACIÓN

Unidad de frecuencia ultrasónica para cámaras

Otra aplicación interesante del ultrasonido es la unidad de frecuencia ultrasónica que se utiliza en algunas cámaras para obtener una medición casi instantánea de la distancia entre la cámara y el objeto que será fotografiado. El principal componente de este aparato es un cristal que actúa como altavoz y como micrófono. Una pulsación de ondas de ultrasonido se emite desde el transductor al objeto que refleja parte de la señal, produciendo un eco que es detectado por el aparato. El intervalo de tiempo entre la pulsación de salida y el eco detectado se convierte electrónicamente en un valor de distancia, porque la velocidad del sonido es una cantidad conocida.

14.3 La velocidad del sonido

La velocidad de una onda de sonido en un fluido depende de compresibilidad e inercia. Si el fluido tiene un módulo volumétrico B y una densidad de equilibrio ρ , la velocidad del sonido es

Velocidad del sonido ►
en un fluido

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad [14.1]$$

La ecuación 14.1 también es válida para un gas. Recuerde del capítulo 9, que el módulo volumétrico se define como la razón entre el cambio de presión, ΔP , y el cambio relativo de volumen $\Delta V/V$:

$$B \equiv - \frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad [14.2]$$

B es siempre positivo porque un aumento de presión (positivo ΔP) provoca una disminución de volumen. Por lo tanto, la razón $\Delta P/\Delta V$ es siempre negativa.

Es interesante comparar la ecuación 14.1 con la ecuación 13.18 para la velocidad de ondas transversales en una cuerda $v = \sqrt{F/\mu}$, estudiada en el capítulo 13. En ambos casos la velocidad de las ondas depende de la propiedad elástica del medio (B o F) y de una propiedad inercial del medio (ρ o μ). De hecho, la velocidad de toda onda mecánica sigue una expresión de la forma general

$$v = \sqrt{\frac{\text{propiedad elástica}}{\text{propiedad inercial}}}$$

Otro ejemplo de esta forma general es la **velocidad de una onda longitudinal en una varilla sólida**, la cual es

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad [14.3]$$

donde Y es el módulo de Young de un sólido (ver ecuación 9.3) y ρ es su densidad. Esta expresión es válida sólo para una varilla sólida delgada.

La tabla 14.1 es una lista de velocidad del sonido en varios medios. La velocidad del sonido es mucho mayor en los sólidos que en los gases porque las moléculas en un sólido interactúan más estrechamente una con otra, que las moléculas en un gas. Golpear un largo riel con un martillo, por ejemplo, produce dos ondas acústicas: una moviéndose a través del riel y una onda más lenta que se mueve a través del aire. Un estudiante con un oído presionado contra el riel, primero oye el sonido que se mueve a través del riel y después el sonido que se mueve a través del aire. En general, el sonido viaja más rápidamente

Tabla 14.1 Velocidad del sonido en varios medios

Medio	v (m/s)
Gases	
Aire (0 °C)	331
Aire (100 °C)	386
Hidrógeno (0 °C)	1286
Oxígeno (0 °C)	317
Helio (0 °C)	972
Líquidos a 25 °C	
Agua	1493
Alcohol metílico	1143
Agua de mar	1533
Sólidos^a	
Aluminio	6420
Cobre (enrollado)	5010
Hierro	5950
Plomo (enrollado)	1960
Caucho vulcanizado	1600

^a Los valores dados son para la propagación de las ondas longitudinales en medios a granel. Las velocidades de las ondas longitudinales en varillas delgadas son más pequeñas y las velocidades de las ondas transversales en grandes cantidades son todavía más pequeñas.

a través de los sólidos que en líquidos y en líquidos más rápido que en los gases, aunque hay excepciones.

La velocidad del sonido también depende de la temperatura del medio. Para el sonido que viaja por el aire, la relación entre la velocidad del sonido y la temperatura es

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \quad [14.4]$$

donde 331 m/s es la velocidad del sonido en el aire a 0 °C y T es la temperatura absoluta (Kelvin). Utilizando esta ecuación, la velocidad del sonido en el aire a 293 K (típica temperatura ambiente) es aproximadamente 343 m/s.

Examen rápido

14.1 ¿Cuál de las siguientes acciones incrementa la velocidad del sonido en el aire?

- a) disminuyendo la temperatura del aire, b) incrementando la frecuencia del sonido, c) incrementando la temperatura del aire, d) incrementando la amplitud de la onda de sonido, e) reduciendo la presión del aire.

FÍSICA APLICADA 14.1 Los sonidos escuchados durante una tormenta

¿Cómo un relámpago produce un trueno y qué causa el prolongado estruendo?

EXPLICACIÓN Suponga que estamos al nivel del suelo y que pasamos por alto las reflexiones que éste produce. Cuando cae un relámpago, un canal de aire ionizado transporta una intensa corriente eléctrica de una nube hasta el suelo. Este fenómeno provoca un rápido aumento de temperatura de este canal de aire cuando la corriente se mueve por él; el aumento de temperatura ocasiona una rápida expansión del aire, tan repentina e intensa que en el aire se produce una tremenda perturbación, el trueno. La longi-

tud entera del canal produce el sonido en esencialmente el mismo instante. El sonido producido en el fondo del canal nos llega primero, si estamos en el suelo, porque es el punto más cercano. Los sonidos de partes progresivamente más altas del canal nos alcanzan tiempo después como un gran trueno. Si el canal del relámpago fuera una línea recta, el sonido resultante podría ser un estruendo continuo, pero la forma de zigzag de la trayectoria genera una vibración de gran volumen, con diferentes cantidades de energía sónica de diferentes segmentos arribando en cualquier instante. ■

EJEMPLO 14.1 Explosión sobre una capa de hielo

OBJETIVO Calcular el tiempo de viaje para un sonido en varios medios.

PROBLEMA Ocurre una explosión a 275 m sobre una capa de hielo de 867 m de grueso que flota sobre el agua del océano. Si la temperatura del aire es -7.00°C , ¿cuánto tiempo le tomará al sonido alcanzar un recipiente de prueba 1250 m debajo del hielo? Desprecie cualquier cambio en el módulo volumétrico y la densidad con temperatura y profundidad. (Utilice $B_{\text{hielo}} = 9.2 \times 10^9 \text{ Pa}$.)

ESTRATEGIA Calcule la velocidad del sonido en el aire con la ecuación 14.4 y utilice $d = vt$ para encontrar el tiempo requerido para que el sonido alcance la superficie del hielo. Utilice la ecuación 14.1 para calcular la velocidad del sonido en el aire, encontrando otra vez el tiempo con la ecuación de la distancia. Finalmente, utilice la velocidad del sonido en el agua salada para encontrar el tiempo requerido para atravesar el agua árida y sume los tres tiempos.

SOLUCIÓN

Calcule la velocidad del sonido en el aire a -7.00°C , lo que es equivalente a 266 K:

$$v_{\text{aire}} = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{266 \text{ K}}{273 \text{ K}}} = 327 \text{ m/s}$$

Calcule el tiempo de viaje a través del aire:

$$t_{\text{aire}} = \frac{d}{v_{\text{aire}}} = \frac{275 \text{ m}}{327 \text{ m/s}} = 0.841 \text{ s}$$

Calcule la velocidad del sonido en el agua, utilizando el módulo volumétrico y densidad del hielo:

$$v_{\text{hielo}} = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{9.2 \times 10^9 \text{ Pa}}{917 \text{ kg/m}^3}} = 3.2 \times 10^3 \text{ m/s}$$

(continúa)

Calcule el tiempo de viaje a través del hielo:

$$t_{\text{hielo}} = \frac{d}{v_{\text{hielo}}} = \frac{867 \text{ m}}{3\,200 \text{ m/s}} = 0.27 \text{ s}$$

Calcule el tiempo de viaje a través del agua del océano:

$$t_{\text{agua}} = \frac{d}{v_{\text{agua}}} = \frac{1250 \text{ m}}{1533 \text{ m/s}} = 0.815 \text{ s}$$

Sume los tres tiempos para obtener el tiempo total de propagación:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{aire}} + t_{\text{hielo}} + t_{\text{agua}} = 0.841 \text{ s} + 0.27 \text{ s} + 0.815 \text{ s} \\ = 1.93 \text{ s}$$

COMENTARIOS Observe que la velocidad del sonido es mayor en hielo sólido, segunda más alta en agua líquida y más lenta en el aire. La velocidad del sonido depende de la temperatura, por lo que la respuesta tendría que ser modificada si las temperaturas reales del hielo y el agua de mar eran conocidas. A 0°C , por ejemplo, la velocidad del sonido en agua de mar corresponde a $1\,449 \text{ m/s}$.

PREGUNTA 14.1 ¿Es la velocidad del sonido en caucho más alta o más baja que la velocidad del sonido en aluminio? ¿Por qué?

EJERCICIO 14.1 Calcule la velocidad del sonido en las siguientes sustancias a 273 K : a) plomo ($Y = 1.6 \times 10^{10} \text{ Pa}$), b) mercurio ($B = 2.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$) y c) aire a -15.0°C .

RESPUESTAS a) $1.2 \times 10^3 \text{ m/s}$ b) $1.4 \times 10^3 \text{ m/s}$ c) 322 m/s

14.4 Energía e intensidad de las ondas de sonido

Cuando las ramas de un diapasón se mueven en vaivén en el aire, ejercen una fuerza sobre una capa de aire y hacen que se mueva. En otras palabras, las ramas realizan trabajo sobre la capa de aire. El hecho de que el diapasón propague energía en el aire en forma de sonido es una de las razones por las que sus vibraciones se reducen lentamente. (Otros factores, por ejemplo la pérdida de energía por fricción cuando las ramas se doblan, también son causantes de la disminución del movimiento.)

El promedio de **intensidad** I de una onda sobre una superficie dada se define como la razón con la que fluye energía a través de la superficie, $\Delta E/\Delta t$, dividida por el área de la superficie A :

$$I \equiv \frac{1}{A} \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad [14.5]$$

donde la dirección del flujo de energía es perpendicular a la superficie en todo punto.

Unidades SI: watts por metro cuadrado (W/m^2)

Una razón de transferencia de energía define la potencia, así que la ecuación 14.5 puede ser escrita en la forma alternativa

Intensidad de una onda ►

$$I \equiv \frac{\text{potencia}}{\text{área}} = \frac{P}{A} \quad [14.6]$$

donde P es la potencia del sonido que pasa por la superficie, medida en watts y la intensidad tiene unidades de watts por metro cuadrado.

Los sonidos más débiles que el oído humano puede detectar a una frecuencia de 1000 Hz tienen una intensidad de cerca de $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Esta intensidad es llamada **umbral de audibilidad**. Los sonidos más fuertes que el oído puede tolerar tienen una intensidad de más o menos 1 W/m^2 (**umbral del dolor**). En el umbral de audibilidad, el aumento de presión en el oído es de aproximadamente $3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ sobre la presión atmosférica normal. Debido a que la presión atmosférica es de cerca de $1 \times 10^5 \text{ Pa}$, esto significa que ¡el oído puede detectar fluctuaciones de presión de sólo tres partes en 10^{10} ! El máximo desplazamiento de una molécula de aire en el umbral de audibilidad es de alrededor de $1 \times 10^{-11} \text{ m}$, que es un número extraordinariamente pequeño. Si comparamos este resultado con el diámetro de una molécula (alrededor de 10^{-10} m), vemos que el oído es un detector asombrosamente sensible de ondas sonoras.

Los sonidos más fuertes que el oído humano puede tolerar a 1 kHz corresponden a una variación de presión de más o menos 29 Pa por encima de la presión atmosférica normal, con un desplazamiento máximo de moléculas de aire de 1×10^{-5} m.

Nivel de intensidad en decibeles

Los sonidos más fuertes tolerables tienen intensidades de alrededor de 1.0×10^{12} veces más grande que los sonidos más débiles que se pueden detectar. Sin embargo, el sonido más intenso no se percibe como de 1.0×10^{12} veces más fuerte que el sonido más débil, lo que se debe a que la sensación de intensidad del sonido es aproximadamente logarítmica en el oído humano. (Para revisar logaritmos, véase sección A.3, encabezado G, apéndice A.) La intensidad relativa de un sonido se denomina **nivel de intensidad** o **nivel de decibeles** y se define como

$$\beta \equiv 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \tag{14.7}$$

◀ Nivel de intensidad

La constante $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ es la intensidad de referencia, I es la intensidad de sonido en el umbral de audibilidad y β es el correspondiente nivel de intensidad medido en decibeles (dB) (la palabra *decibel*, que es la décima parte de una *bel*, se deriva del nombre del inventor del teléfono, Alexander Graham Bell [1847-1922]).

Para tener una estimación para varios niveles de decibeles, podemos sustituir algunos números representativos en la ecuación 14.7, empezando con $I = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2}{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log (1) = 0 \text{ dB}$$

De este resultado, vemos que el más bajo umbral del oído humano ha sido elegido como cero en la escala de decibeles. Aumentando progresivamente en potencias de 10

$$\beta = 10 \log \left(\frac{1.0 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2}{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log (10) = 10 \text{ dB}$$

$$\beta = 10 \log \left(\frac{1.0 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2}{1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log (100) = 20 \text{ dB}$$

Observe el patrón: *multiplicar* una intensidad dada por 10 *agrega* 10 db al nivel de intensidad. Este patrón se mantiene a través de la escala en decibeles. Por ejemplo, un sonido de 50 dB es 10 veces más intenso que un sonido de 40 dB, mientras que un sonido de 60 dB es 100 veces más intenso que un sonido de 40 dB.

En esta escala, el umbral del dolor ($I = 1.0 \text{ W/m}^2$) corresponde a un nivel de intensidad de $\beta = 10 \log (1/1 \times 10^{-12}) = 10 \log (10^{12}) = 120 \text{ dB}$. Aviones a reacción cercanos pueden crear niveles de intensidad de 150 dB y sistemas de transporte colectivo y máquinas remachadoras tienen niveles de 90 a 100 dB. El sonido electrónicamente amplificado en los conciertos de rock puede alcanzar niveles de hasta 120 dB, el umbral del dolor. La exposición a tales niveles de intensidad puede dañar seriamente el oído. Se recomienda usar tapones en los oídos siempre que los niveles de intensidad prolongados excedan 90 dB. Evidencias recientes han demostrado que la contaminación por ruido, que es común en la mayoría de las grandes ciudades y en algunos ambientes industriales, puede ser un factor decisivo de presión arterial alta, ansiedad y nerviosismo. La tabla 14.2 da los niveles de intensidad aproximados de varios sonidos.

Tip 14.1 Intensidad contra nivel de intensidad

No confunda la intensidad con el nivel de intensidad. La intensidad es una cantidad física con unidades de watts por metro cuadrado; el nivel de intensidad o nivel de decibeles, es una conveniente transformación matemática de la intensidad a una escala logarítmica.

Tabla 14.2 Niveles de intensidad en decibeles para diferentes fuentes

Fuente de sonido	β (dB)
Avión a reacción cercano	150
Martillo neumático; ametralladora	130
Sirena, concierto de rock	120
Subterráneo, podadora eléctrica	100
Tránsito intenso	80
Aspiradora	70
Conversación normal	50
Zumbido de mosquito	40
Susurro	30
Caída de hojas del árbol	10
Umbral de audibilidad	0

■ EJEMPLO 14.2 Trituradora ruidosa

OBJETIVO Trabajar con watts y decibeles.

PROBLEMA Una trituradora ruidosa de una fábrica produce una intensidad de sonido de $1.00 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$. Calcule **a)** el nivel de decibeles de esta máquina y **b)** el nuevo nivel de intensidad cuando una segunda máquina idéntica es agregada

(continúa)

a la fábrica. **c)** Un cierto número de tales máquinas adicionales se ponen en operación junto a estas dos máquinas. Cuando todas las máquinas están trabajando juntas al mismo tiempo el nivel de decibeles es de 77.0. Encuentre la intensidad del sonido.

ESTRATEGIA Los incisos a) y b) requieren de la sustitución en la ecuación 14.7 para los decibeles, para con la intensidad en el inciso b) se utiliza dos veces la intensidad en el inciso a). En el inciso c), el nivel de intensidad en decibeles está dado y es necesario trabajar hacia atrás utilizando la función inversa del logaritmo, para obtener la intensidad en watts por metro cuadrado.

SOLUCIÓN

a) Calcule el nivel de intensidad de una trituradora.

Sustituya la intensidad en la fórmula de decibeles:

$$\begin{aligned}\beta &= 10 \log \left(\frac{1.00 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2}{1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log (10^7) \\ &= \mathbf{70.0 \text{ dB}}\end{aligned}$$

b) Calcule el nuevo nivel de intensidad cuando se agrega una máquina.

Sustituya dos veces la intensidad del inciso a) en la fórmula de decibeles:

$$\beta = 10 \log \left(\frac{2.00 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2}{1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = \mathbf{73.0 \text{ dB}}$$

c) Encuentre la intensidad correspondiente a un nivel de intensidad de 77.0 dB.

Sustituya 77.0 dB en la fórmula de decibeles y divida ambos entre 10:

$$\begin{aligned}\beta &= 77.0 \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \\ 7.70 &= \log \left(\frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \right)\end{aligned}$$

Escriba ambas partes en base 10. De lado derecho, $10^{\log u} = u$, por definición de logaritmos de base 10.

$$\begin{aligned}10^{7.70} &= 5.01 \times 10^7 = \frac{I}{1.00 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \\ I &= \mathbf{5.01 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2}\end{aligned}$$

COMENTARIOS La respuesta es cinco veces la intensidad de una sola trituradora, así que en el inciso c) hay cinco de esas máquinas que funcionan simultáneamente. Debido a la definición logarítmica del nivel de intensidad, grandes cambios en intensidad corresponden a pequeños cambios en nivel de intensidad.

PREGUNTA 14.2 ¿Por cuántos decibeles se eleva el nivel de intensidad cuando la intensidad de sonido se duplica?

EJERCICIO 14.2 Suponga que una planta de manufactura tiene un nivel de intensidad de sonido promedio de 97.0 dB producido por 25 máquinas idénticas. **a)** Encuentre la intensidad total creada por todas las máquinas. **b)** Encuentre la intensidad total producida por una máquina. **c)** ¿Cuál es el nivel de intensidad de sonido si cinco de las máquinas están funcionando?

RESPUESTAS a) $5.01 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ b) $2.00 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ c) 90.0 dB

BIO APLICACIÓN

Regulaciones de la OSHA sobre el nivel de ruido

Las regulaciones federales de la OSHA (Agencia de Administración de Seguridad y Salud Ocupacional) exigen que ningún trabajador de oficina o fábrica sea expuesto a niveles de ruido que promedien más de 85 dB en una jornada de 8 h. De esto se han obtenido noticias buenas y malas. Las buenas: una máquina en la fábrica puede producir un nivel de ruido de 70 dB, pero una segunda máquina, aun doblando la intensidad total, aumenta el nivel de ruido por solamente 3 dB. Debido a la naturaleza logarítmica de los niveles de intensidad, duplicar la intensidad no duplica el nivel de intensidad; de hecho, lo altera por una cantidad asombrosamente pequeña. Esto significa que se puede agregar equipamiento a la fábrica sin alterar en forma apreciable el nivel de intensidad del ambiente.

Ahora las malas noticias: como se removió maquinaria ruidosa, el nivel de intensidad no se reduce de manera apreciable. En el ejercicio 14.2, ¡la reducción del nivel de la intensidad por 7 dB requiere del retiro de 20 de las 25 máquinas! Para bajar el nivel otros 7 dB habría que quitar el 80% de las máquinas restantes, en cuyo caso permanecería solamente una máquina.

14.5 Ondas esféricas y planas

Si un pequeño objeto esférico oscila de manera que su radio cambia periódicamente, se produce una onda esférica (figura 14.4). La onda se mueve hacia fuera de la fuente con velocidad constante.

Debido a que todos los puntos en una esfera que vibra se comportan de la misma forma, concluimos que la energía en una onda esférica se propaga igualmente en todas direcciones. Esto significa que ninguna dirección tiene preferencia sobre otra. Si P_{prom} es la potencia promedio emitida por la fuente, entonces a cualquier distancia r de la fuente, esta energía se debe distribuir sobre una superficie esférica de área $4\pi r^2$, suponiendo que no hay ninguna absorción por el medio. (Recuerde que $4\pi r^2$ es el área superficial de una esfera.) Así, la **intensidad** del sonido a una distancia r de la fuente es

$$I = \frac{\text{Potencia promedio}}{\text{área}} = \frac{P_{\text{prom}}}{A} = \frac{P_{\text{prom}}}{4\pi r^2} \quad [14.8]$$

Esta ecuación demuestra que la intensidad de una onda decrece con el incremento de la distancia a la fuente, como debe esperarse. El hecho de que I varíe en relación con $1/r^2$ es un resultado del supuesto de que una pequeña fuente (algunas veces llamada **fente puntual**) emite una onda esférica. (De hecho, las ondas luminosas también obedecen a la relación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r). Debido a que la potencia promedio es igual en cualquier superficie esférica centrada en la fuente, vemos que las intensidades a distancias r_1 y r_2 (figura 14.4) del centro de la fuente son

$$I_1 = \frac{P_{\text{prom}}}{4\pi r_1^2} \quad I_2 = \frac{P_{\text{prom}}}{4\pi r_2^2} \quad [14.9]$$

La razón entre las intensidades de estas dos superficies esféricas es

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Es útil representar gráficamente ondas esféricas con una serie de arcos circulares (líneas de máxima intensidad) concéntricos con la fuente que representa parte de una superficie esférica, como en la figura 14.5. A este arco se le llama **frente de onda**. La distancia entre los frentes de onda adyacentes es igual a la longitud de onda λ . Las líneas radiales que apuntan hacia fuera de la fuente y que cortan perpendicularmente los arcos se llaman **rayos**.

Ahora considere una porción pequeña de un frente de onda que esté a una *gran* distancia (en relación con λ) de la fuente, como en la figura 14.6. En este caso los rayos son casi paralelos y los frentes de onda están muy cerca de ser planos. A grandes distancias de la fuente, en relación con la longitud de onda, podemos aproximar el frente de onda con planos paralelos y llamarlas **ondas planas**. Cualquier porción pequeña de una onda esférica que esté lejos de la fuente se puede considerar una onda plana. La figura 14.7 ilustra una onda plana que se propaga a lo largo del eje x . Si la dirección x positiva se toma como

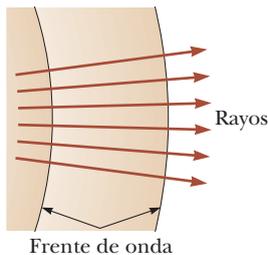


Figura 14.6 Lejos de una fuente puntual, los frentes de onda son casi planos paralelos y los rayos son casi rectas paralelas perpendiculares a los planos. Por lo tanto, un pequeño segmento de un frente de onda esférico es aproximadamente una onda plana.

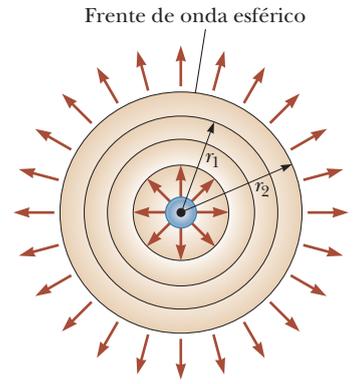


Figura 14.4 Onda esférica que se propaga radialmente hacia fuera desde una esfera en oscilación. La intensidad de la onda esférica varía en relación con $1/r^2$.

Los rayos son líneas radiales que apuntan hacia fuera desde la fuente, perpendiculares a los frentes de onda.

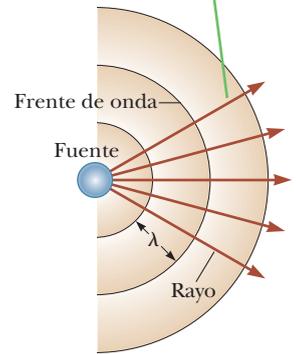


Figura 14.5 Ondas esféricas emitidas por una fuente puntual. Los arcos circulares representan los frentes de onda esférica concéntricos en relación con la fuente.

Los frentes de onda son planos paralelos al plano yz .

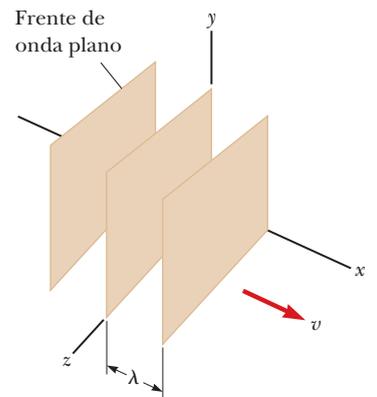


Figura 14.7 Representación de una onda plana que se mueve en la dirección x positiva con rapidez v .

la dirección del movimiento de la onda (o del rayo) en esta figura, entonces los frentes de onda son paralelos al plano yz .

■ EJEMPLO 14.3 Variaciones de intensidad de una fuente puntual

OBJETIVO Relacionar intensidades de sonido y sus distancias a una fuente puntual.

PROBLEMA Una pequeña fuente emite ondas de sonido con una potencia de salida de 80.0 watts. **a)** Encuentre la intensidad a 3.00 m de la fuente. **b)** ¿A qué distancia la intensidad sería un cuarto de lo que es en $r = 3.00$ m? **c)** Encuentre la distancia a la que el nivel de sonido es de 40.0 dB.

ESTRATEGIA La fuente es pequeña, así que las ondas emitidas son esféricas y la intensidad en el inciso a) se puede encontrar sustituyendo valores en la ecuación 14.8. El inciso b) implica resolver para r en la ecuación 14.8 y después sustituir (aunque también se puede utilizar la ecuación 14.9). En el inciso c), convertir del nivel de intensidad del sonido a la intensidad en W/m^2 , usando la ecuación 14.7. Después sustituya en la ecuación 14.9 (aunque también se puede utilizar la ecuación 14.8) y resolver para r_2 .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la intensidad a 3.00 m de la fuente.

Sustituya $P_{\text{prom}} = 80.0$ W y $r = 3.00$ m en la ecuación 14.8:

$$I = \frac{P_{\text{prom}}}{4\pi r^2} = \frac{80.0 \text{ W}}{4\pi(3.00 \text{ m})^2} = 0.707 \text{ W}/\text{m}^2$$

b) ¿A qué distancia la intensidad sería un cuarto de lo que es en $r = 3.00$ m?

Tome $I = (0.707 \text{ W}/\text{m}^2)/4$ y resuelva para r en la ecuación 14.8:

$$r = \left(\frac{P_{\text{prom}}}{4\pi I} \right)^{1/2} = \left[\frac{80.0 \text{ W}}{4\pi(0.707 \text{ W}/\text{m}^2)/4.0} \right]^{1/2} = 6.00 \text{ m}$$

c) Encuentre la distancia a la que el nivel de sonido es de 40.0 dB.

Convierta el nivel de intensidad de 40.0 dB a una intensidad en W/m^2 para resolver la ecuación 14.7 para I :

$$40.0 = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \rightarrow 4.00 = \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

$$10^{4.00} = \frac{I}{I_0} \rightarrow I = 10^{4.00} I_0 = 1.00 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2$$

Resuelva la ecuación 14.9 para r_2^2 , sustituya la intensidad y el resultado del inciso a) y tome la raíz cuadrada:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \rightarrow r_2^2 = r_1^2 \frac{I_1}{I_2}$$

$$r_2^2 = (3.00 \text{ m})^2 \left(\frac{0.707 \text{ W}/\text{m}^2}{1.00 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2} \right)$$

$$r_2 = 2.52 \times 10^4 \text{ m}$$

COMENTARIOS Una vez que la intensidad se conoce en una posición a cierta distancia de la fuente, es más fácil utilizar la ecuación 14.9 que la ecuación 14.8 para encontrar la intensidad en cualquier otra posición. Esto es particularmente cierto para el inciso b) donde, usando la ecuación 14.9, podemos ver en seguida que al duplicar la distancia reduce la intensidad a un cuarto de su valor anterior.

PREGUNTA 14.3 La potencia de salida de un sistema de sonido es aumentada por un factor de 25. ¿Por qué factor debe usted ajustar la distancia de los altavoces para que la intensidad del sonido sea la misma?

EJERCICIO 14.3 Suponga que cierto avión de reacción produce un nivel de intensidad de 125 dB a una distancia de 5.00 m. ¿Qué nivel de intensidad se produce sobre la tierra directamente por debajo del avión al volar a una altitud de 2.00 km?

RESPUESTA 73.0 dB

14.6 El efecto Doppler

Si un automóvil o un camión se mueven mientras hacen sonar su bocina, la frecuencia del sonido que usted oye es más alta cuando el vehículo se le acerca y más baja cuando se aleja. Este fenómeno es un ejemplo del *efecto Doppler*, llamado así en honor del físico austriaco Christian Doppler (1803-1853), quien lo descubrió. Se oye el mismo efecto si usted está en

una motocicleta y la bocina está fija: la frecuencia es más alta cuando usted se acerca a la fuente y baja cuando se aleja.

Aunque el efecto Doppler se asocia más a menudo con el sonido, es común a todas las ondas, incluyendo las de luz.

Para estudiar el efecto Doppler, suponemos que el aire está inmóvil y que todas las medidas de la velocidad están hechas en relación con este medio inmóvil. La velocidad v_o corresponde al observador, v_s es la velocidad de la fuente y v es la velocidad del sonido.

Caso 1: El observador se está moviendo en relación con una fuente estacionaria

En la figura 14.8 un observador se está moviendo con una velocidad v_o hacia la fuente (considerada una fuente puntual), que está en reposo ($v_s = 0$).

Tomamos la frecuencia de la fuente como f_s , la longitud de onda de la fuente como λ_s y la velocidad del sonido en el aire como v . Si el observador y la fuente están estacionarios, el observador detecta f_s frentes de onda por segundo. (Es decir, cuando $v_o = 0$ y $v_s = 0$, la frecuencia observada f_o es igual a la frecuencia de la fuente f_s). Cuando se mueve hacia la fuente, el observador se mueve una distancia de $v_o t$ en t segundos. Durante este intervalo, **el observador detecta un número adicional de frentes de onda**. El número de frentes de onda adicionales es igual a la distancia recorrida, $v_o t$, dividido por la longitud de onda λ_s :

$$\text{Frentes de onda adicionales detectados} = \frac{v_o t}{\lambda_s}$$

Dividiendo esta ecuación por el tiempo t se obtiene el número de frentes de onda adicionales detectados *por segundo*, v_o/λ_s . Por lo tanto, la frecuencia oída por el observador se incrementa por

$$\lambda_o = \lambda_s - \frac{v_s}{f_s}$$

Sustituyendo $\lambda_s = v/f_s$ en esta expresión para f_o , obtenemos

$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v} \right) \tag{14.10}$$

Cuando el observador se *mueve alejándose* de la fuente inmóvil (figura 14.9), observa disminuciones en la frecuencia. Una derivación que conduce al mismo resultado que con la ecuación 14.10, pero con $v - v_o$ en el numerador. Por lo tanto, cuando el observador se está alejando de la fuente, se sustituye $-v_o$ para el v_o en la ecuación 14.10.

Caso 2: La fuente se mueve en relación con un observador estacionario

Ahora considere una fuente que se mueve hacia un observador en reposo, como en la figura activa 14.10. Aquí, los frentes de onda que pasan por el observador *A* están cercanamente juntos porque la fuente se está moviendo en dirección de la onda saliente. Consecuen-

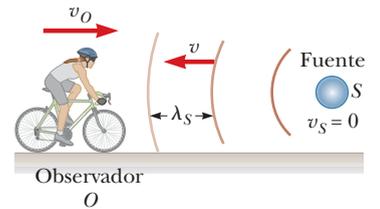


Figura activa 14.8 Un observador que se mueve con una velocidad v_o hacia una fuente puntual estacionaria (S) escucha una frecuencia f_o que es *mayor* que la frecuencia de la fuente f_s .

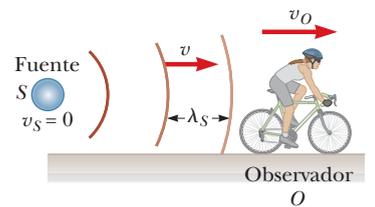


Figura 14.9 Un observador que se *aleja* con velocidad v_o de una fuente estacionaria escucha una frecuencia f_o que es *menor* a la frecuencia de la fuente f_s .

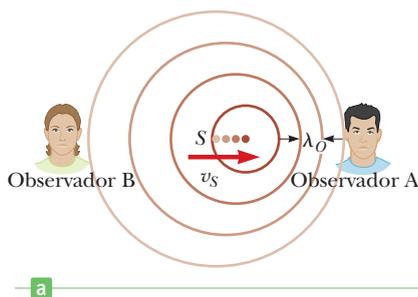


Figura activa 14.10 a) Una fuente S moviéndose con velocidad v_s hacia un observador estacionario y alejándose del observador B . El observador A escucha una *incremento* de frecuencia y el observador B escucha una *disminución* de frecuencia. b) El efecto Doppler en agua observado en un tanque de ondas.

Cortesía del Educational Development Center, Newton, MA.

Tip 14.2 El efecto Doppler no depende de la distancia

El sonido de una fuente que se aproxima con una velocidad constante se incrementará en intensidad, pero la frecuencia observada (elevada) permanecerá sin cambio. El efecto Doppler no depende de la distancia.

temente, la longitud de onda λ_o , medida por el observador A es más corta que la longitud de onda λ_s de la fuente en reposo. Durante cada vibración, que dura un intervalo T (el periodo), la fuente se mueve una distancia $v_s T = v_s / f_s$ y **la longitud de onda disminuye por esa cantidad**. La longitud de onda observada por lo tanto está dada por

$$\lambda_o = \lambda_s - \frac{v_s}{f_s}$$

Como $\lambda_s = v/f_s$, la frecuencia observada por A es

$$f_o = \frac{v}{\lambda_o} = \frac{v}{\lambda_s - \frac{v_s}{f_s}} = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s}}$$

o bien,

$$f_o = f_s \left(\frac{v}{v - v_s} \right) \quad [14.11]$$

Como se esperaba, **la frecuencia observada aumenta cuando la fuente se está moviendo hacia el observador**. Cuando la fuente se está alejando de un observador en reposo, el signo de menos en el denominador se debe sustituir por un signo más, así que el factor se convierte en $(v + v_s)$.

Caso general

Cuando la fuente y el observador se mueven en relación con la Tierra, las ecuaciones 14.10 y 14.11 pueden combinarse para dar

$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) \quad [14.12]$$

Ecuación del efecto Doppler: observador y fuente en movimiento ▶

En esta expresión, los signos para los valores sustituidos por v_o y v_s dependen de la dirección de la velocidad. Cuando el observador se mueve *hacia* la fuente, una velocidad *positiva* es sustituida por v_o ; cuando el observador se *aleja* de la fuente, una velocidad *negativa* es sustituida por v_o . De manera análoga, una velocidad *positiva* es sustituida por v_s cuando la fuente se mueve *hacia* el observador; una velocidad *negativa* cuando la fuente se aleja del observador.

Elegir signos incorrectos es el error más común en que se incurre cuando se trabaja en problemas que involucran al efecto Doppler. Las siguientes reglas pueden ser útiles: la palabra *hacia* es asociada con un *incremento* en la frecuencia observada; las palabras *alejándose* de se asocian a una *disminución* de la frecuencia observada.

Estas dos reglas se derivan de la perspicacia física de que cuando el observador se está moviendo hacia la fuente (o la fuente hacia el observador), hay un periodo observado más pequeño entre crestas de la onda, por lo tanto una frecuencia más grande; cuando el observador se está alejando de la fuente (o la fuente alejándose del observador) invierte la situación y se observa una pequeña frecuencia. Mantenga la perspicacia física presente siempre que tenga usted duda sobre los signos en la ecuación 14.12; ajústelos cuanto sea necesario para conseguir el resultado físico correcto.

La segunda equivocación más común en que se incurre al aplicar la ecuación 14.12 es invertir accidentalmente el numerador y el denominador. Algunos encuentran provechoso recordar la ecuación en la forma siguiente:

$$\frac{f_o}{v + v_o} = \frac{f_s}{v - v_s}$$

La ventaja de esta forma es su simetría: ambos lados son casi completamente iguales, con los O 's a la izquierda y los S 's a la derecha. Olvidar qué lado tiene el signo de más y cuál tiene el signo de menos no es un problema serio mientras la intuición física se utilice para comprobar la respuesta y para hacer ajustes cuando sea necesario.

■ Examen rápido

14.2 Suponga que usted es un pasajero de un globo de aire caliente, que lleva un timbre que emite un sonido de frecuencia f . Si accidentalmente deja usted caer el timbre desde el globo que se eleva a velocidad constante, ¿qué puede usted concluir acerca del sonido que se escucha cuando cae el timbre hacia el suelo? a) La frecuencia y la intensidad se incrementa. b) La frecuencia decrece y la intensidad crece. c) La frecuencia decrece y la intensidad decrece. d) La frecuencia permanece igual, pero la intensidad decrece.

■ FÍSICA APLICADA 14.2 Altavoces desubicados

Suponga que coloca los altavoces de su estéreo bastante separados y usted corre de derecha a izquierda o de izquierda a derecha. Si usted corre lo bastante rápido y es capaz de distinguir muy bien los tonos, notará que la música parece salirse de tono cuando está entre los altavoces, ¿por qué?

EXPLICACIÓN Cuando está usted entre los altavoces, corre alejándose de uno de ellos, pero se acerca al otro, así

que hay un efecto Doppler hacia abajo en el sonido del altavoz que queda detrás y un efecto Doppler hacia arriba en el sonido proveniente del altavoz que está delante. Como resultado, el sonido de los dos altavoces estará desafinado. Un cálculo muestra que un corredor de alta velocidad de clase mundial, podría correr con suficiente velocidad para generar una diferencia de semitono en el sonido de los dos altavoces. ■

■ EJEMPLO 14.4 Escuche, pero no se quede en la vía

OBJETIVO Resolver un problema de efecto Doppler cuando solamente la fuente se está moviendo.

PROBLEMA Un tren que avanza a una velocidad de 40.0 m/s hace sonar su silbato, cuya frecuencia es 5.00×10^2 Hz. Determine la frecuencia escuchada por un observador estacionario cuando el tren se *aproxima* al observador. La temperatura ambiente es de 24.0 °C.

ESTRATEGIA Utilice la ecuación 14.4 para calcular la velocidad del sonido a la temperatura ambiente; después sustituya los valores en la ecuación 14.12 para el efecto Doppler. Debido a que el tren se acerca al observador, la frecuencia observada será muy grande. Elija el signo de v_s para evidenciar este hecho.

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación 14.4 para calcular la velocidad del sonido en el aire a $T = 24.0$ °C:

$$\begin{aligned} v &= (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \\ &= (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{(273 + 24.0) \text{ K}}{273 \text{ K}}} = 345 \text{ m/s} \end{aligned}$$

El observador es estacionario, así que $v_o = 0$. El tren se mueve *hacia* el observador, así que $v_s = +40.0$ m/s (*positivo*). Sustituya estos valores y la velocidad del sonido en la ecuación del efecto Doppler:

$$\begin{aligned} f_o &= f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) \\ &= (5.00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \text{ m/s}}{345 \text{ m/s} - 40.0 \text{ m/s}} \right) \\ &= 566 \text{ Hz} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Si el tren se aleja del observador, se habría elegido $v_s = -40.0$ m/s.

PREGUNTA 14.4 ¿El efecto Doppler cambia debido a las variaciones de la temperatura? Si es así, ¿por qué? Para las variaciones típicas diarias en temperatura en un clima moderado. ¿El cambio en el efecto Doppler sería caracterizado lo mejor posible como a) no existente, b) pequeño o c) grande?

EJERCICIO 14.4 Determine la frecuencia escuchada por el observador estacionario cuando el tren *se aleja* del observador.

RESPUESTA 448 Hz

EJEMPLO 14.5 El ruido de la sirena

OBJETIVO Resolver un problema de efecto Doppler cuando la fuente y el observador se están moviendo.

PROBLEMA Una ambulancia transita por una carretera a una velocidad de 75.0 mi/h, mientras su sirena emite sonido a una frecuencia de 4.00×10^2 Hz. ¿Qué frecuencia es oída por el pasajero de un automóvil que viaja a 55.0 mi/h en dirección opuesta cuando el automóvil y la ambulancia **a)** se *aproximan* uno al otro y **b)** pasan y se *alejan* uno del otro? Tome la velocidad del sonido en aire como $v = 345$ m/s.

ESTRATEGIA Aparte de convertir mi/h a m/s, este problema requiere sólo sustituir en la fórmula del efecto Doppler, pero dos signos se deben elegir correctamente en cada parte. En el inciso a) el observador se mueve hacia la fuente y ésta se mueve hacia el observador, así que ambos, v_o y v_s , se deben elegir positivos. Cambie los signos después que se pasen uno al otro.

SOLUCIÓN

Convierta la velocidad de mi/h a m/s:

$$v_s = (75.0 \text{ mi/h}) \left(\frac{0.447 \text{ m/s}}{1.00 \text{ mi/h}} \right) = 33.5 \text{ m/s}$$

$$v_o = (55.0 \text{ mi/h}) \left(\frac{0.447 \text{ m/s}}{1.00 \text{ mi/h}} \right) = 24.6 \text{ m/s}$$

a) Calcule la frecuencia observada cuando la ambulancia y el automóvil se aproximan uno al otro.

Cada vehículo va hacia el otro, así que sustituya $v_o = +24.6$ m/s y $v_s = +33.5$ m/s en la fórmula del corrimiento Doppler:

$$\begin{aligned} f_o &= f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) \\ &= (4.00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \text{ m/s} + 24.6 \text{ m/s}}{345 \text{ m/s} - 33.5 \text{ m/s}} \right) = 475 \text{ Hz} \end{aligned}$$

b) Calcule la frecuencia observada cuando la ambulancia y el automóvil se alejan uno del otro.

Cada vehículo se aleja del otro, así que sustituya $v_o = -24.6$ m/s y $v_s = -33.5$ m/s en la fórmula del corrimiento Doppler:

$$\begin{aligned} f_o &= f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) \\ &= (4.00 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{345 \text{ m/s} + (-24.6 \text{ m/s})}{345 \text{ m/s} - (-33.5 \text{ m/s})} \right) \\ &= 339 \text{ Hz} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe cómo fueron manipulados los signos. En el inciso b) se requirieron los signos negativos en las velocidades porque ambos observadores y la fuente se movieron alejándose uno del otro. Por supuesto, algunas veces una velocidad es negativa y la otra positiva.

PREGUNTA 14.5 ¿El efecto Doppler es afectado por el nivel de intensidad de sonido?

EJERCICIO 14.5 Repita este problema, pero suponga que la ambulancia y el automóvil van en la misma dirección, con la ambulancia inicialmente detrás del automóvil. La velocidad y la frecuencia de la sirena son las mismas que en el ejemplo. Encuentre la frecuencia oída por el observador en el automóvil a) antes y b) después que la ambulancia rebese al automóvil. *Nota:* posteriormente, ¡la patrulla de caminos entrega al conductor del automóvil una multa por no hacerse a un lado cuando pasa el vehículo de emergencia!

RESPUESTAS a) 411 Hz b) 391 Hz

Ondas de choque

¿Qué pasa cuando la velocidad de la fuente v_s *excede* la velocidad de la onda v ? La figura 14.11 describe esta situación gráficamente. Las circunferencias representan frentes de onda esférica emitidos por la fuente en varios tiempos durante su movimiento. En $t = 0$, la fuente está en el punto S_0 , y en algún tiempo t después, la fuente está en el punto S_n . En el intervalo t , el frente de onda centrado en S_0 alcanza un radio vt . En este mismo intervalo, la fuente viaja a S_n a una distancia $v_s t$. En el instante en que la fuente está en S_n , las ondas que apenas empiezan a generarse en este punto tienen frentes de onda de radio cero. La recta trazada de S_n al frente de onda con centro en S_0 es tangente a todos los otros frentes

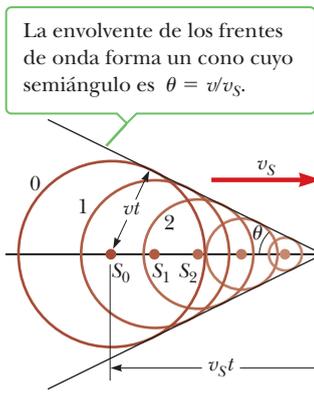


Figura 14.11 Representación de una onda de choque, producida cuando una fuente se mueve de S_0 a S_n con una rapidez v_s , que es mayor que la rapidez de la onda v , en ese medio.

de onda generados en tiempos intermedios. Todas estas rectas tangentes se encuentran sobre la superficie de un cono. En ángulo θ entre una de estas rectas tangentes y la dirección de desplazamiento está dada por

$$\text{sen } \theta = \frac{v}{v_s}$$

La razón v_s/v se conoce como **número de Mach**. El frente de onda cónico producido cuando $v_s > v$ (velocidad supersónica) se conoce como **onda de choque**. Un ejemplo interesante de una onda de choque es el frente de onda en forma de V producido por un barco (la ola de proa), cuando la velocidad del barco supera la velocidad de las ondas en el agua (figura 14.12).

Los aviones a reacción y transbordadores espaciales que vuelan a velocidades supersónicas, producen ondas de choque que son causantes de la fuerte explosión o estampido sónico, que se escucha en la tierra. Una onda de choque lleva una gran cantidad de energía concentrada en la superficie del cono, con variaciones de presión igualmente grandes. Las ondas de choque son muy desagradables al oído y pueden dañar edificios cuando vuelan aviones a velocidad supersónica a baja altitud. De hecho un avión volando a velocidades supersónicas produce un estruendo doble debido a que se forman dos ondas de choque: una de la nariz del avión y la otra de la cola (figura 14.13).

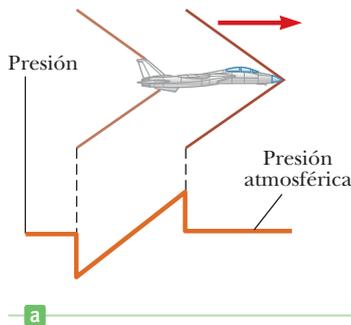
Examen rápido

14.3 Cuando un avión que vuela a una velocidad constante pasa de una masa de aire frío a una masa de aire caliente, el número de Mach a) aumenta, b) disminuye y c) permanece constante.



© Robert Holland/Stone/Getty Images

Figura 14.12 La onda en la proa en forma de V en un bote, se forma porque éste navega más rápido que las ondas del agua. Una onda en la proa es análoga a una onda de choque formada por un avión que vuela más rápido que el sonido.



a

La gran variación de presión en la onda de choque hace que el vapor del aire se condense en pequeñas gotas de agua.



© Keith Lawson/Bettmann/Corbis

b

Figura 14.13 a) Dos ondas de choque producidas por la nariz y cola de un avión que vuela a velocidad supersónica. b) La onda de choque debida a un avión que vuela a una velocidad del sonido se hace visible como niebla de vapor de agua.

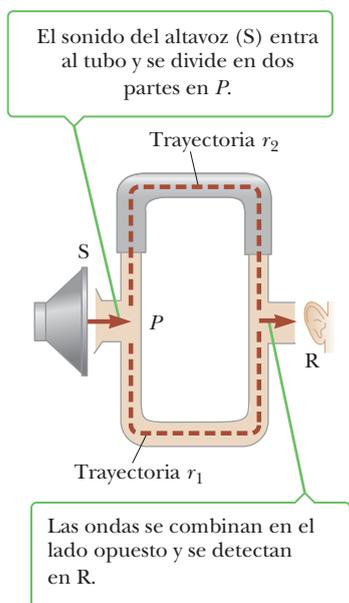


Figura 14.14 Sistema acústico para mostrar la interferencia de ondas de sonido. La longitud de la trayectoria superior se hace variar por medio de la acción deslizante.

Condición para interferencia destructiva ►

APLICACIÓN

Conexión de los altavoces de un estéreo

Tip 14.3 ¿Realmente interfieren las ondas?

En el lenguaje popular, *interferir* significa “entrar en conflicto con algo” o “intervenir para afectar un resultado”. Esto es muy diferente al uso que se da en la física, donde las ondas pasan entre ellas y se interfieren, pero no se afectan en forma alguna.

14.7 Interferencia de las ondas de sonido

Las ondas de sonido se pueden interferir una con otra, fenómeno que se puede demostrar con el aparato mostrado en la figura 14.14. El sonido de un altavoz en S es enviado hacia un tubo P, donde hay una bifurcación. El sonido se divide y sigue dos trayectorias separadas que se indican con flechas rojas. La mitad del sonido se desplaza hacia arriba y la otra mitad hacia abajo. Finalmente, los dos sonidos se unen en una abertura donde una persona coloca su oído. Si las dos trayectorias r_1 y r_2 tienen la misma longitud, las ondas que entran en el tubo se van a separar en dos mitades, recorrerán las dos trayectorias y luego se combinarán otra vez en el oído. Esta reunión de las dos ondas produce *interferencia constructiva* y, por lo tanto, la persona escucha un sonido fuerte. Si la trayectoria superior se ajusta a toda una longitud de onda más larga que la trayectoria inferior, vuelve a ocurrir la interferencia constructiva de las dos ondas y el sonido fuerte se detecta en el receptor. En general, **si la diferencia de trayectoria $r_2 - r_1$ es cero o un múltiplo entero de longitudes de onda, entonces ocurre interferencia constructiva y**

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad [14.13]$$

Supongamos que la longitud de la trayectoria r_2 se ajusta de modo que la trayectoria superior sea la mitad de una longitud de onda *más larga* que la trayectoria inferior r_1 . En este caso, una onda sonora que entra se divide y recorre las dos trayectorias como antes, pero ahora la onda a lo largo de la trayectoria superior debe recorrer una distancia equivalente a la mitad de una longitud de onda más que la onda que se mueve a lo largo de la trayectoria inferior. En consecuencia, la cresta de una onda se encuentra con la depresión de la otra cuando se unen en el receptor, causando que las dos ondas se cancelen una con otra. Este fenómeno es llamado *interferencia destructiva total*, y no se detecta sonido en el receptor. En general, **si la diferencia de trayectorias $r_2 - r_1$ es $\frac{1}{2}, 1\frac{1}{2}, 2\frac{1}{2} \dots$ longitudes de onda, ocurre interferencia destructiva y**

$$r_2 - r_1 = (n + \frac{1}{2})\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad [14.14]$$

La naturaleza proporciona muchos otros ejemplos de fenómenos de interferencia, la mayoría en conexión con las ondas luminosas, descritas en el capítulo 24.

Al conectar los cables de un sistema estéreo con sus altavoces, se puede observar que los cables tienen códigos de colores y que los altavoces tienen signo positivo y negativo en las conexiones. La razón para esto es que los altavoces necesitan estar conectados con la misma “polaridad”. Si no es así, la misma señal eléctrica alimentada a los altavoces resultará en que un cono de altavoz se mueve hacia fuera al mismo tiempo que el otro cono se mueve hacia dentro. En este caso, el sonido que sale de los altavoces estará 180° fuera de fase entre ellos. Si una persona se coloca a igual distancia entre los altavoces, los sonidos de ambos recorren la misma distancia y conservan la diferencia de fase que tenía cuando salieron. En una situación ideal, en el caso de una diferencia de fase de 180° tendría que existir completa interferencia destructiva y ¡sin sonido! En realidad, la cancelación no es completa y es mucho más significativa para las notas graves (que tienen una longitud de onda larga) que para las notas agudas de longitud de onda más corta. Sin embargo, para evitar una reducción importante de la intensidad de notas bajas, los alambres de código de colores y los signos de las conexiones de altavoces deben observarse con todo cuidado.

■ EJEMPLO 14.6 Dos altavoces activados por la misma fuente

OBJETIVO Utilice el concepto de interferencia para calcular una frecuencia.

PROBLEMA Dos altavoces colocados a 3.00 m uno del otro son activados por el mismo oscilador (figura 14.15). Una persona está originalmente en el punto O, a 8.00 m de la línea de centro que conecta los dos altavoces. La persona camina hasta el punto P, a una distancia de 0.350 m perpendicular al punto O,

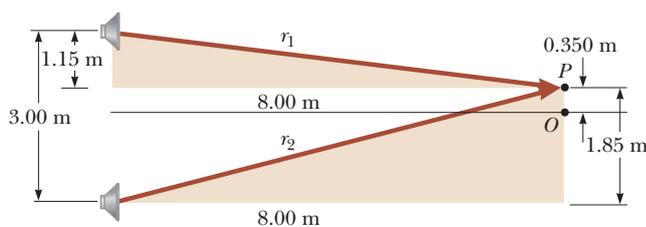


Figura 14.15 (Ejemplo 14.6). Dos altavoces activados por la misma fuente pueden producir interferencia.

antes de llegar al *primer mínimo* de intensidad de sonido. ¿Cuál es la frecuencia del oscilador? Tome la velocidad del sonido en el aire como $v_s = 343$ m/s.

ESTRATEGIA La posición del primer mínimo en intensidad de sonido está dada y es un punto de interferencia destructiva. Podemos encontrar las longitudes de trayectoria r_1 y r_2 con el teorema de Pitágoras y después utilizar la ecuación 14.14 de la interferencia destructiva para encontrar la longitud de onda λ . Utilizando $v = f\lambda$ se encuentra la frecuencia.

SOLUCIÓN

Utilice el teorema de Pitágoras para encontrar la longitud de las trayectorias r_1 y r_2 :

$$r_1 = \sqrt{(8.00 \text{ m})^2 + (1.15 \text{ m})^2} = 8.08 \text{ m}$$

$$r_2 = \sqrt{(8.00 \text{ m})^2 + (1.85 \text{ m})^2} = 8.21 \text{ m}$$

Sustituya estos valores y $n = 0$ en la ecuación 14.14, resolviendo para la longitud de onda:

$$r_2 - r_1 = (n + \frac{1}{2})\lambda$$

$$8.21 \text{ m} - 8.08 \text{ m} = 0.13 \text{ m} = \lambda/2 \rightarrow \lambda = 0.26 \text{ m}$$

Resuelva $v = \lambda f$ para la frecuencia f y sustituya la velocidad del sonido y la longitud de onda:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{343 \text{ m/s}}{0.26 \text{ m}} = 1.3 \text{ kHz}$$

COMENTARIOS Para problemas que involucran interferencia constructiva, la única diferencia es que la ecuación 14.13, $r_2 - r_1 = n\lambda$, debería usarse en lugar de la ecuación 14.14.

PREGUNTA 14.6 Verdadero o Falso: En el mismo contexto, pequeñas longitudes de onda de sonido crearían más interferencia máxima y mínima, que las grandes longitudes de onda.

EJERCICIO 14.6 Si la frecuencia del oscilador se ajusta de manera que la posición del primer mínimo está a una distancia de 0.750 m de O , ¿cuál es la nueva frecuencia?

RESPUESTA 0.62 kHz

14.8 Ondas estacionarias

Las ondas estacionarias se pueden provocar si se sujeta un extremo de una cuerda estirada a una abrazadera estacionaria y el otro extremo a un objeto en vibración, por ejemplo la rama de un diapasón o sacudiendo la mano arriba y abajo a un ritmo constante (figura 14.16). Las ondas viajeras se reflejan en los extremos, lo que crea ondas viajeras en ambas direcciones de la cuerda. Las ondas incidentes y reflejadas se combinan de acuerdo con el **principio de superposición** (véase la sección 13.10). Si la cuerda vibra a la frecuencia correcta, la onda parece no moverse y de ahí su nombre de **onda estacionaria**. Un **nodo** ocurre donde las dos ondas viajeras siempre tienen la misma magnitud de desplazamiento pero signo opuesto, de modo que el desplazamiento neto es cero en ese punto. No hay movimiento de la cuerda en los nodos, pero a la mitad entre dos nodos adyacentes, en un **antinodo**, la cuerda vibra con la máxima amplitud.

La figura 14.17 (página 490) muestra instantáneas de la oscilación de una onda estacionaria durante la mitad de un ciclo. Las flechas rojas indican la dirección del movimiento de diferentes partes de la cuerda. Observe que **todos los puntos sobre la cuerda oscilan juntos verticalmente con la misma frecuencia, pero diferentes puntos tienen diferentes amplitudes de movimiento**. Los puntos en que la cuerda está unida a la pared también son nodos, etiquetados con N en la figura 14.17a. De la figura, observe que la distancia entre nodos adyacentes es la mitad de la longitud de onda de la onda:

$$d_{NN} = \frac{1}{2}\lambda$$

Considere una cuerda de longitud L que está fija en ambos extremos, como en la figura activa 14.18 en la página 490. En una cuerda, podemos iniciar patrones de onda estacionaria de muchas frecuencias; cuantos más lazos, mayor es la frecuencia. La figura 14.19 (página 490) es una fotografía múltiple de una onda estacionaria en una cuerda.

Primero, **los extremos de la cuerda deben ser nodos porque estos puntos están fijos**. Si la cuerda está desplazada en su punto medio y luego liberada, se puede producir la vibración que se muestra en la figura activa 14.18b, en cuyo caso el centro de la cuerda es

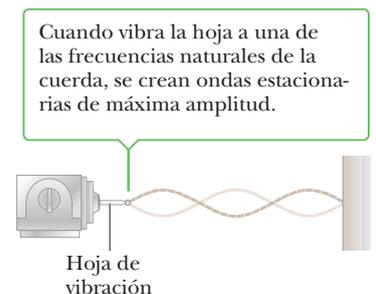


Figura 14.16 Se pueden iniciar ondas estacionarias en una cuerda estirada al conectar un extremo de ella a una hoja en vibración.

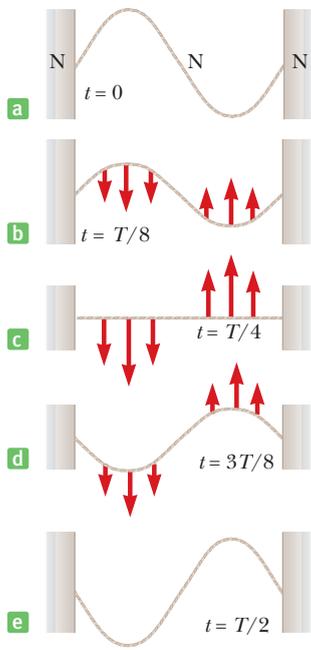


Figura 14.17 Patrón de onda estacionaria en una cuerda estirada, vista mediante instantáneas de la cuerda durante la mitad de un ciclo. En el inciso a) N denota un nodo.

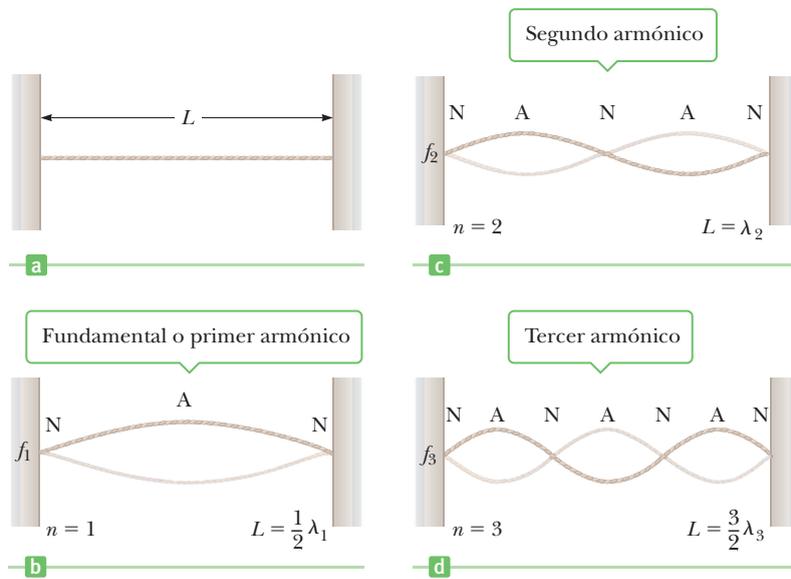


Figura activa 14.18

a) Ondas estacionarias en una cuerda estirada de longitud L fija en ambos extremos. Las frecuencias características de vibración forman una serie armónica; b) frecuencia fundamental o primer armónico; c) el segundo armónico y d) el tercer armónico. Observe que N denota un nodo; A es un antinodo.

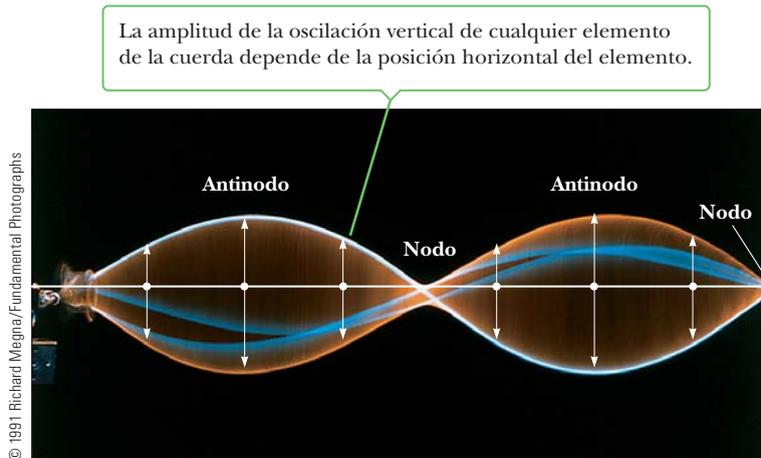
un antinodo, marcado con A. Observe que de extremo a extremo, el patrón es N–A–N. La distancia desde un nodo a su antinodo adyacente, N–A, es siempre igual a la cuarta parte de la longitud de onda, $\lambda_1/4$. Hay dos de estos segmentos, N–A y A–N, así que $L = 2(\lambda_1/4) = \lambda_1/2$ y $\lambda_1 = 2L$. La frecuencia de esta vibración es, por lo tanto

$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} \quad [14.15]$$

Recuerde que la velocidad de una onda sobre una cuerda es $v = \sqrt{F/\mu}$, donde F es la tensión en la cuerda y μ es su masa por unidad de longitud (capítulo 13). Sustituyendo en la ecuación 14.15, obtenemos

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad [14.16]$$

Figura 14.19 Fotografías sucesivas de patrones de una onda estacionaria de dos lazos en el segundo armónico ($n = 2$) de una cuerda movida por un vibrador situado en el extremo izquierdo.



Ésta es la frecuencia más baja de vibración y se denomina **frecuencia fundamental** de la cuerda en vibración o **primer armónico**.

El primer armónico tiene nodos solamente en los extremos: los puntos de unión con patrón nodo-antinodo de N–A–N. El siguiente armónico, llamado el **segundo armónico** (también llamado **primer tono parcial**), puede construirse insertando un segmento adicional nodo-antinodo entre dos puntos extremos. Esto hace el patrón N–A–N–A–N, como en la figura activa 14.18c. Contamos los pares nodo-antinodo: N–A, A–N, N–A y A–N, cuatro segmentos por todos, cada uno representando un cuarto de longitud de onda. Entonces tenemos $L = 4(\lambda_2/4) = \lambda_2$, y el segundo armónico (primer tono parcial) es

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L} = 2 \left(\frac{v}{2L} \right) = 2f_1$$

Esta frecuencia es *dos veces* la frecuencia fundamental. El **tercer armónico (segundo tono parcial)** se construye de manera similar. Insertando un segmento N–A más, obtenemos la figura activa 14.18d, los patrones de nodos de lectura N–A–N–A–N–A–N. Hay seis segmentos nodo-antinodo, así que $L = 6(\lambda_3/4) = 3(\lambda_3/2)$, lo que significa que $\lambda_3 = 2L/3$, da

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{2L} = 3f_1$$

Todos los armónicos superiores, resultan ser un número entero positivo múltiplo del fundamental:

$$f_n = nf_1 = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

[14.17]

◀ Frecuencias naturales de una cuerda fija en ambos extremos

Las frecuencias f_1 , $2f_1$, $3f_1$ y así sucesivamente, forman una **serie armónica**.

■ Examen rápido

14.4 ¿Cuál de las siguientes frecuencias son armónicos superiores de una cuerda con frecuencia fundamental de 150 Hz? a) 200 Hz b) 300 Hz c) 400 Hz d) 500 Hz e) 600 Hz

Cuando una cuerda estirada se deforma y toma el aspecto que corresponde a cualquiera de sus armónicos, después de ser soltada vibra sólo a la frecuencia de ese armónico. Sin embargo, si la cuerda es golpeada o arqueada, la vibración resultante incluye diferentes cantidades de varios armónicos, entre ellos el fundamental. Las ondas que no se encuentran en la serie armónica se amortiguan rápidamente en una cuerda fija en ambos extremos. En efecto, cuando está perturbada, la cuerda “selecciona” las frecuencias de las ondas estacionarias. Como veremos más adelante, la presencia de varios armónicos en una cuerda da a los instrumentos de cuerda su característico sonido, que hacen posible que distingamos uno del otro incluso cuando producen frecuencias fundamentales idénticas.

La frecuencia de una cuerda en un instrumento musical se puede cambiar ya sea modificando la tensión o la longitud. La tensión de las cuerdas de una guitarra o un violín varía cuando se hacen girar las clavijas del cuello del instrumento. Cuando la tensión aumenta, se incrementa la frecuencia de la serie armónica de acuerdo con la ecuación 14.17. Una vez afinado el instrumento, el músico varía la frecuencia al presionar las cuerdas contra el cuello en varias posiciones, con lo que cambia las longitudes efectivas de las porciones en vibración de las cuerdas. Cuando se reduce la longitud, aumenta la frecuencia, como se ve de la ecuación 14.17.

Finalmente, la ecuación 14.17 demuestra que una cuerda de longitud fija se puede hacer vibrar con una vibración fundamental más baja si se aumenta su masa por unidad de longitud. En las cuerdas de tonos bajos de guitarras y pianos, este efecto se logra si se les rodea con devanados de metal.

APLICACIÓN

Afinación de un instrumento musical

EJEMPLO 14.7 Fundamentos de la guitarra

OBJETIVO Aplicar el concepto de onda estacionaria a un instrumento de cuerda.

PROBLEMA La nota Mi mayor sobre una guitarra mide 64.0 cm de longitud y tiene una frecuencia fundamental de 329 Hz. Cuando un guitarrista aprieta la cuerda de modo que esté en contacto con el primer traste (figura 14.20a), la cuerda emite una nota Fa cuya frecuencia es de 349 Hz. **a)** ¿Qué tan lejos está el traste de la cejilla? **b)** Los tonos parciales pueden ser producidos sobre una cuerda de guitarra, colocando suavemente el dedo índice en la posición de un nodo de un armónico más alto. La cuerda se debe tocar, pero no presionar contra un traste (dado la anchura de un dedo, presionando demasiado fuerte se amortiguan también los armónicos más altos). De este modo la frecuencia fundamental se suprime, permitiendo oír tonos parciales. ¿Dónde se debe colocar ligeramente el dedo sobre la cuerda de la guitarra, en relación con la cejilla, para oír el segundo armónico? ¿El cuarto armónico? (Esto es equivalente a encontrar la posición de los nodos en cada caso.)

ESTRATEGIA Para el inciso a) utilice la ecuación 14.15 correspondiente a la frecuencia fundamental, para encontrar la velocidad de las ondas sobre la cuerda. Acortar la cuerda para tocar una nota más alta no afecta la velocidad de la onda, la cual depende sólo de la tensión y de la densidad lineal de la cuerda (la cual no cambia). Resuelva la ecuación 14.15 para la nueva longitud L , utilizando la nueva frecuencia fundamental y reste esta longitud de la longitud original, para encontrar la distancia de la cejilla al primer traste. En el inciso b) recuerde que la distancia de nodo a nodo es la mitad de la longitud de onda. Calcule la longitud de onda, divida en dos y localice los nodos, los cuales son números enteros de medias longitudes de onda desde la cejilla. *Nota:* La cejilla es una pequeña pieza de madera o hueso en la parte superior del brazo de la guitarra. La distancia de la cejilla al puente (debajo del agujero de la caja acústica) es la longitud de la cuerda (ver figura 14.20b).

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia de la cejilla al primer traste.

Sustituya $L_0 = 0.640$ m y $f_1 = 329$ Hz en la ecuación 14.15, para encontrar la velocidad de la onda sobre la cuerda:

$$f_1 = \frac{v}{2L_0}$$

$$v = 2L_0 f_1 = 2(0.640 \text{ m})(329 \text{ Hz}) = 421 \text{ m/s}$$

Resuelva la ecuación 14.15 para la longitud L y sustituya la velocidad de onda y la frecuencia de una nota Fa.

$$L = \frac{v}{2f} = \frac{421 \text{ m/s}}{2(349 \text{ Hz})} = 0.603 \text{ m} = 60.3 \text{ cm}$$

Reste esta longitud de la longitud original L_0 para encontrar la distancia de la cejilla al primer traste:

$$\Delta x = L_0 - L = 64.0 \text{ cm} - 60.3 \text{ cm} = 3.7 \text{ cm}$$

b) Encuentre la posición de los nodos para el segundo y cuarto armónicos.

El segundo armónico tiene una longitud de onda $\lambda_2 = L_0 = 64.0$ cm. La distancia de la cejilla al nodo corresponde a la mitad de una longitud de onda.

$$\Delta x = \frac{1}{2}\lambda_2 = \frac{1}{2}L_0 = 32.0 \text{ cm}$$

El cuarto armónico, de longitud $\lambda_4 = \frac{1}{2}L_0 = 32.0$ cm, tiene tres nodos entre los puntos extremos:

$$\Delta x = \frac{1}{2}\lambda_4 = 16.0 \text{ cm}, \Delta x = 2(\lambda_4/2) = 32.0 \text{ cm},$$

$$\Delta x = 3(\lambda_4/2) = 48.0 \text{ cm}$$

COMENTARIOS Colocando un dedo en la posición $\Delta x = 32.0$ cm se amortiguan los armónicos fundamentales y los impares, pero no todos los más altos incluyendo los armónicos. El segundo armónico domina porque la cuerda en reposo está libre para vibrar. Colocando el dedo en $\Delta x = 16.0$ cm o 48.0 cm se amortiguan los primeros a terceros armónicos, permitiendo que el cuarto armónico sea escuchado.

PREGUNTA 14.7 Verdadero o Falso: Si una cuerda de la guitarra tiene longitud L , poniendo suavemente un objeto delgado en la posición $(\frac{1}{2})^n L$ siempre dará lugar a un sonido armónico más alto, donde n es un número entero positivo.



© Charles D. Winters/
Cengage Learning

a



b

Figura 14.20 (Ejemplo 14.7) a) Tocando una nota Fa sobre una guitarra. b) Algunas partes de la guitarra.

EJERCICIO 14.7 Presionar la cuerda de Mi menor en el brazo de trastes apenas sobre el segundo traste pellizca la cuerda firmemente contra el traste, dando un Fa agudo, que tiene frecuencia 3.70×10^2 Hz. a) ¿Dónde debería localizarse el segundo traste? b) Encuentre dos posiciones donde usted podría tocar sobre la cuerda un Mi y oír el tercer armónico.

RESPUESTAS a) 7.1 cm de la cejilla y 3.4 cm del primer traste. Observe que la distancia del primero al segundo traste no es igual que de la cejilla al primer traste. b) 21.3 cm y 42.7 cm de la cejilla.

■ EJEMPLO 14.8 Armónicos de una cuerda estirada

OBJETIVO Calcular armónicos de una cuerda, relacionarlos con el sonido y combinarlos con la tensión de extensión.

PROBLEMA a) Encuentre las frecuencias del segundo y el tercero de los armónicos fundamentales, de un alambre de acero de 1.00 m de largo con una masa por unidad de longitud de 2.00×10^{-3} kg/m y bajo tensión de 80.0 N. b) Encuentre las longitudes de onda de las ondas acústicas creadas por el alambre que vibra para los tres modos. Suponga que la velocidad del sonido en el aire es 345 m/s. c) Suponga que el alambre es acero de carbón con una densidad de 7.80×10^3 kg/m³, un área de sección transversal $A = 2.56 \times 10^{-7}$ m² y un límite elástico de 2.80×10^8 Pa. Encuentre la frecuencia fundamental si el alambre se tensa al límite elástico. Desprecie cualquier estimamiento del alambre (que reduciría levemente la masa por longitud de unidad).

ESTRATEGIA a) Es más fácil encontrar la velocidad de las ondas sobre el alambre después de sustituir en la ecuación 14.15 para encontrar el primer armónico. Los dos siguientes son múltiplos del primero, dados por la ecuación 14.17. b) Las frecuencias de las ondas acústicas son iguales a las frecuencias del alambre que vibra, pero las longitudes de onda son diferentes. Utilice $v_s = f\lambda$, donde v_s es la velocidad del sonido en el aire, para encontrar las longitudes de onda en el aire. c) Encuentre la fuerza correspondiente al límite elástico y sustitúyala en la ecuación 14.16.

SOLUCIÓN

a) Encuentre los tres armónicos en la tensión dada.

Utilice la ecuación 13.18 para calcular la velocidad de la onda sobre el alambre:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{80.0 \text{ N}}{2.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m}}} = 2.00 \times 10^2 \text{ m/s}$$

Encuentre la frecuencia fundamental del alambre a partir de la ecuación 14.15:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{2.00 \times 10^2 \text{ m/s}}{2(1.00 \text{ m})} = 1.00 \times 10^2 \text{ Hz}$$

Encuentre los dos siguientes armónicos por medio de una multiplicación:

$$f_2 = 2f_1 = 2.00 \times 10^2 \text{ Hz}, f_3 = 3f_1 = 3.00 \times 10^2 \text{ Hz}$$

b) Encuentre la longitud de onda de las ondas acústicas producidas.

Resuelva $v_s = f\lambda$ para la longitud de onda y sustituya las frecuencias:

$$\lambda_1 = v_s/f_1 = (345 \text{ m/s})/(1.00 \times 10^2 \text{ Hz}) = 3.45 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = v_s/f_2 = (345 \text{ m/s})/(2.00 \times 10^2 \text{ Hz}) = 1.73 \text{ m}$$

$$\lambda_3 = v_s/f_3 = (345 \text{ m/s})/(3.00 \times 10^2 \text{ Hz}) = 1.15 \text{ m}$$

c) Encuentre la frecuencia fundamental correspondiente al límite elástico.

Calcule la tensión en el alambre a partir del límite elástico:

$$\frac{F}{A} = \text{límite elástico} \rightarrow F = (\text{límite elástico})A$$

$$F = (2.80 \times 10^8 \text{ Pa})(2.56 \times 10^{-7} \text{ m}^2) = 71.7 \text{ N}$$

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Sustituya los valores de F , μ y L en la ecuación 14.16:

$$f_1 = \frac{1}{2(1.00 \text{ m})} \sqrt{\frac{71.7 \text{ N}}{2.00 \times 10^{-3} \text{ kg/m}}} = 94.7 \text{ Hz}$$

COMENTARIOS De la respuesta al inciso c), parece que necesitamos elegir un alambre más grueso o utilizar un mejor grado de acero con un límite elástico más alto. ¡La frecuencia que corresponde al límite elástico es más pequeña que la fundamental!

(continúa)

PREGUNTA 14.8 Una cuerda en una guitarra se sustituye por una de densidad lineal más baja. Para obtener la misma frecuencia de sonido previa, ¿debe la nueva tensión de la cuerda ser a) mayor que, b) menor que o c) igual a la tensión en la vieja cuerda?

EJERCICIO 14.8 a) Encuentre la frecuencia fundamental y el segundo armónico si la tensión en el alambre se aumenta a 115 N. (Suponga que el alambre no estira ni se rompe.) b) Utilizando una velocidad del sonido de 345 m/s, encuentre las longitudes de onda de las ondas acústicas producidas.

RESPUESTAS a) 1.20×10^2 Hz, 2.40×10^2 Hz b) 2.88 m, 1.44 m

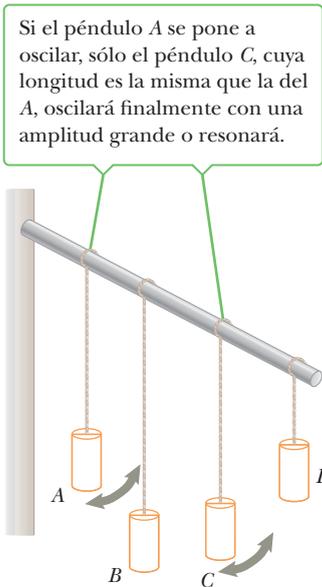


Figura 14.21 Demostración de resonancia.

APLICACIÓN

Rompiendo copas con la voz

APLICACIÓN

Integridad estructural y resonancia

14.9 Vibraciones forzadas y resonancia

En el capítulo 13 aprendimos que la energía de un oscilador amortiguado decrece al transcurrir el tiempo, debido a la fricción. Es posible compensar esta pérdida de energía si se aplica una fuerza externa que realice trabajo sobre el sistema.

Por ejemplo, suponga un sistema objeto-resorte que tiene alguna frecuencia natural de vibración f_0 es empujado en vaivén con una fuerza periódica cuya frecuencia es f . El sistema vibra a la frecuencia f de la fuerza motriz. Este tipo de movimiento se conoce como **vibración forzada**. Su amplitud alcanza un máximo cuando la frecuencia de la fuerza motriz es igual a la frecuencia natural del sistema f_0 , llamada **frecuencia resonante** del sistema. Bajo esta condición, se dice que el sistema está en **resonancia**.

En la sección 14.8 aprendimos que una cuerda estirada puede vibrar en uno o más de sus modos naturales. Aquí, de nuevo, si una fuerza periódica es aplicada a la cuerda, la amplitud de vibración aumenta cuando la frecuencia de la fuerza aplicada se aproxima a una de las frecuencias naturales de vibración.

Ocurren vibraciones de resonancia en una amplia variedad de circunstancias. En la figura 14.21 se ilustra un experimento que muestra una condición de resonancia. Varios péndulos de diferentes longitudes están suspendidos de una barra flexible. Si uno de ellos, digamos el A, se pone en movimiento, los otros empiezan a oscilar debido a las vibraciones de la barra flexible. El péndulo C, de la misma longitud que el A, oscila con la máxima amplitud debido a que su frecuencia natural es igual a la del péndulo A (la fuerza motriz).

Otro sencillo ejemplo de resonancia ocurre en el caso de un niño que es empujado en un columpio, que es esencialmente un péndulo con frecuencia natural que depende de la longitud del columpio. Éste se mantiene en movimiento mediante una serie de empujones apropiadamente sincronizados. Para aumentar su amplitud, el columpio debe empujarse cada vez que regrese a las manos de la persona. Esto corresponde a una frecuencia igual a la frecuencia natural del columpio. Si la energía puesta en el sistema por ciclo de movimiento es exactamente igual a la energía perdida por efecto de la fricción, la amplitud permanece constante.

Se sabe que los cantantes de ópera ponen copas de cristal en vibración con sus poderosas voces. Éste es otro ejemplo de resonancia; las ondas acústicas emitidas por el cantante pueden causar vibraciones de gran amplitud en el vidrio. Si una onda acústica altamente amplificadora tiene la frecuencia correcta, la amplitud de las vibraciones forzadas del vidrio aumenta al punto en donde la copa es sometida a fuertes deformaciones y se rompe.

El ejemplo clásico de resonancia estructural ocurrió en 1940, cuando el viento puso en oscilación el puente Tacoma Narrows del estado de Washington (figura 14.22). La amplitud de las oscilaciones aumentó rápidamente y alcanzó un valor elevado hasta que finalmente el puente se colapsó (probablemente por fatiga del metal). Sin embargo, en años recientes algunos investigadores han dado una explicación a esta cuestión. Las ráfagas del viento, en general, no proporcionan la fuerza periódica necesaria para sostener una condición de resonancia y el puente exhibió grandes oscilaciones de torsión, en lugar de simples oscilaciones de arriba hacia abajo esperadas en la resonancia.

Un ejemplo más reciente de destrucción por resonancia estructural ocurrió durante el sismo de Loma Prieta, cerca de Oakland, California, en 1989. En una sección de casi una milla de largo de la autopista Nimitz, de dos pisos, el piso superior se derrumbó sobre el piso inferior y mató a varias personas. El colapso ocurrió porque esta sección en particular se construyó sobre relleno arcilloso, mientras que otras partes se construyeron sobre roca sólida. Cuando las ondas sísmicas pasan por rellenos de tierra u otros tipos de tierra suelta,

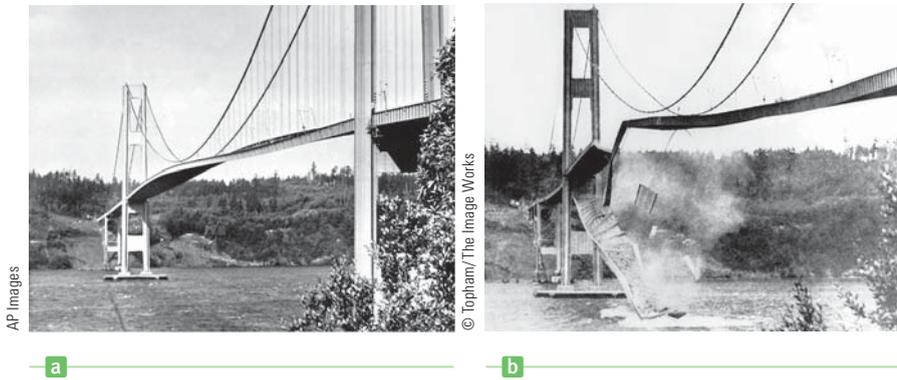


Figura 14.22 a) En 1940, vientos muy fuertes causaron vibraciones de torsión en el puente colgante Tacoma Narrows, haciendo que éste oscilara a una de sus frecuencias naturales. b) Una vez establecida, esta condición de resonancia llevó al desplome del puente. Matemáticos y físicos han desafiado esta interpretación.

la velocidad de sus ondas decrece y la amplitud de la onda aumenta. En consecuencia, la sección de la autopista que se derrumbó osciló con la misma frecuencia que las otras secciones, pero con una amplitud mucho mayor.

14.10 Ondas estacionarias en columnas de aire

Es posible iniciar ondas estacionarias en un tubo de aire; por ejemplo un tubo de órgano, como resultado de la interferencia entre ondas acústicas que se desplazan en direcciones opuestas. La relación entre la onda incidente y la onda reflejada depende de que el extremo reflector del tubo esté abierto o cerrado. Una parte de la onda acústica es reflejada hacia el tubo incluso en un extremo abierto. **Si un extremo está cerrado, debe existir un nodo en él porque el movimiento de aire está restringido. Si el extremo está abierto, los elementos de aire tienen completa libertad de movimiento y existe un antinodo.**

La figura 14.23a muestra los primeros tres modos de la vibración de un tubo abierto en ambos extremos. Cuando el aire se dirige contra un borde de la izquierda, se forman on-

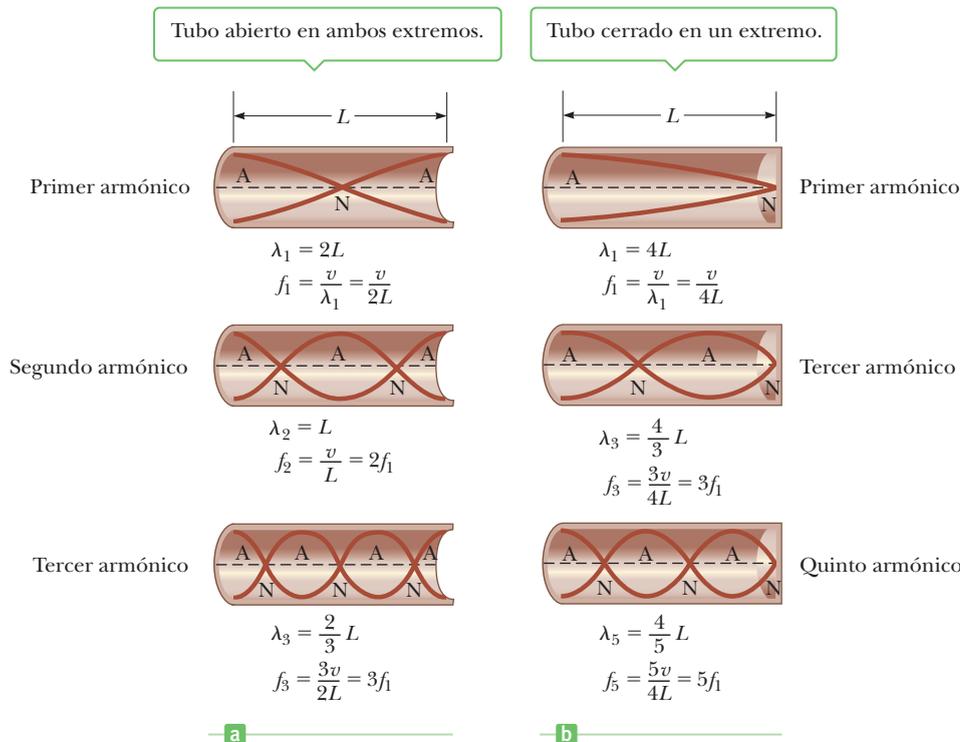


Figura 14.23 a) Ondas estacionarias longitudinales en un tubo de órgano abierto en ambos extremos. Las frecuencias $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots$ forman una serie armónica. b) Ondas estacionarias longitudinales en un tubo de órgano cerrado en un extremo. Sólo están presentes armónicas *impares*, y las frecuencias naturales son $f_1, 3f_1, 5f_1$ y así sucesivamente.

Tip 14.4 Las ondas acústicas no son transversales

Las ondas longitudinales estacionarias de la figura 14.23 se dibujan como ondas transversales. Esto es porque resulta difícil trazar desplazamientos longitudinales debido a que están en la misma dirección que la propagación. En la figura, el eje vertical representa presión o desplazamiento horizontal de los elementos del medio.

Tubo cerrado en ambos extremos; todos los armónicos están presentes

Tubo cerrado en un extremo; sólo armónicos impares están presentes

das longitudinales estacionarias y el tubo vibra a sus frecuencias naturales. Observe que, de extremo a extremo, el patrón es A–N–A, el mismo patrón que en la cuerda que vibraba, excepto que el nodo y el antinodo han intercambiado posiciones. Como antes, un antinodo y su nodo adyacente, A–N, representan un cuarto de longitud de onda y hay dos, A–N y N–A, así que $L = 2(\lambda_1/4) = \lambda_1/2$ y $\lambda_1 = 2L$. La frecuencia fundamental del tubo abierto en ambos extremos es entonces $f_1 = v/\lambda_1 = v/2L$. El armónico siguiente tiene un nodo y un antinodo adicional entre los extremos, creando el patrón A–N–A–N–A. Contamos los pares: A–N, N–A, A–N y N–A, haciendo cuatro segmentos, cada uno con longitud $\lambda_2/4$. Tenemos $L = 4(\lambda_2/4) = \lambda_2$ y el segundo armónico (primer tono parcial) es $f_2 = v/\lambda_2 = v/L = 2(v/2L) = 2f_1$. Todos los armónicos más altos resultan múltiplos enteros positivos del fundamental:

$$f_n = n \frac{v}{2L} = nf_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [14.18]$$

donde v es la velocidad del sonido en el aire. Observe la similitud con la ecuación 14.17, que involucra múltiplos del fundamental.

Si un tubo está abierto en un extremo y está cerrado en el otro, el extremo abierto es un antinodo y el extremo cerrado es un nodo (figura 14.23b). En tal tubo, la frecuencia fundamental consiste de un solo par antinodo-nodo, A–N, así que $L = \lambda_1/4$ y $\lambda_1 = 4L$. El armónico fundamental para un tubo cerrado en un extremo es entonces $f_1 = v/\lambda_1 = v/4L$. El primer tono parcial tiene otro nodo y antinodo entre el extremo abierto y el extremo cerrado, haciendo el patrón A–N–A–N. Hay tres segmentos antinodo-nodo en este patrón (A–N, N–A y A–N), así que $L = 3(\lambda_3/4)$ y $\lambda_3 = 4L/3$. El primer tono parcial por lo tanto, tiene frecuencia $f_3 = v/\lambda_3 = 3v/4L = 3f_1$. Similarmente, $f_5 = 5f_1$. En contraste con el tubo abierto en ambos extremos, **no hay múltiplo par del armónico fundamental**. Los armónicos impares para una tubo abierto en un extremo están dados por

$$f_n = n \frac{v}{4L} = nf_1 \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad [14.19]$$

Examen rápido

14.5 Un tubo cerrado en ambos extremos resuena con una frecuencia fundamental f_{abierto} . Cuando un extremo está cubierto y el tubo está otra vez en resonancia, la frecuencia fundamental es f_{cerrado} . ¿Cuál de las siguientes expresiones describe cómo se comparan estas dos frecuencias de resonancia? a) $f_{\text{cerrado}} = f_{\text{abierto}}$ b) $f_{\text{cerrado}} = \frac{3}{2} f_{\text{abierto}}$ c) $f_{\text{cerrado}} = 2 f_{\text{abierto}}$ d) $f_{\text{cerrado}} = \frac{1}{2} f_{\text{abierto}}$ e) ninguna de éstas

14.6 El parque de Balboa en San Diego tiene un órgano al aire libre. Cuando la temperatura del aire aumenta, la frecuencia fundamental de uno de los tubos del órgano a) aumenta, b) disminuye, c) permanece igual o d) es imposible determinar. (La expansión térmica del tubo es insignificante.)

FÍSICA APLICADA 14.3 Oscilaciones en un puerto

¿Por qué a veces ocurre que las ondas del océano (olas) hacen que el agua en un puerto experimente oscilaciones muy grandes, llamadas *seiche*?

EXPLICACIÓN El agua en un puerto está encerrada y posee una frecuencia natural basada en el tamaño del puerto. Esto es similar a la frecuencia natural del aire encerrado en una botella, que se puede excitar soplando en el

borde. Las olas del océano pasan por la abertura del puerto con cierta frecuencia. Si esta frecuencia empareja a la del puerto encerrado, entonces se puede poner en movimiento una gran ola estacionaria en el agua por resonancia. Esta situación se puede simular trasladando una pecera con agua. Si la frecuencia con la que camina la persona empareja la frecuencia natural del agua mientras chapotea hacia adelante y hacia atrás, se puede establecer una gran onda estacionaria en la pecera. ■

■ FÍSICA APLICADA 14.4 ¿Por qué deben calentarse los instrumentos?

¿Por qué las cuerdas estarán en bemol y los instrumentos de viento en sostenido durante una actuación si la orquesta no calienta de antemano?

EXPLICACIÓN Sin el calentamiento, todos los instrumentos estarán a temperatura ambiente al principio del concierto. Mientras que se tocan los instrumentos de viento se llenan de aire caliente con la exhalación del ejecutante. El incremento de la temperatura del aire en el instrumento causa un aumento en la velocidad del sonido, que sube las frecuencias

de resonancia de las columnas de aire. Consecuentemente, los instrumentos pasan a tono sostenido. Las cuerdas de los instrumentos también aumentan de temperatura debido a la fricción por frotamiento con el arco. Esto da lugar a la expansión térmica, que causa una disminución de la tensión en las cuerdas. Con el decremento de la tensión, la velocidad de la onda en las cuerdas y las frecuencias fundamentales disminuye, así que los instrumentos de cuerda pasan a tono bemol. ■

■ FÍSICA APLICADA 14.5 ¿Cómo funciona un clarín?

Un clarín no tiene válvulas, teclas, varas corredizas ni agujeros para los dedos, así que ¿cómo puede tocar una pieza musical?

EXPLICACIÓN Las canciones para el clarín están limitadas a armónicas de frecuencia fundamental, porque no hay control sobre las frecuencias sin válvulas, teclas, varas corredizas ni agujeros para los dedos. El ejecutante obtiene dife-

rentes notas cuando cambia la tensión en los labios cuando toca el clarín, para excitar diferentes armónicas. La gama normal de ejecución de un clarín está entre los armónicos tercera, cuarta, quinta y sexta de la fundamental. Por ejemplo, “Reveille” se toca con sólo tres notas: Sol, Do y Fa. “Taps” se toca con estas tres notas con la nota de Sol una octava arriba de la nota de Sol baja. ■

■ EJEMPLO 14.9 Armónicas de un tubo

OBJETIVO Encontrar frecuencias de tubos abiertos y cerrados.

PROBLEMA Un tubo tiene 2.46 m de largo. **a)** Determine las frecuencias de los primeros tres armónicos si el tubo está abierto en ambos extremos. Tome 343 m/s como la velocidad del sonido en el aire. **b)** ¿Cuántas frecuencias armónicas de este tubo caen en el rango audible, de 20 a 20 000 Hz? **c)** ¿Cuáles son las tres frecuencias más bajas posibles si el tubo está cerrado en un extremo y abierto en el otro?

ESTRATEGIA Sustituya en la ecuación 14.18 para el inciso a) y la ecuación 14.19 para el inciso c). Todos los armónicos, $n = 1, 2, 3, \dots$ están disponibles para el tubo abierto en ambos extremos, pero solamente los armónicos con $n = 1, 3, 5, \dots$ para el tubo cerrado en un extremo. Para el inciso b), haga que la frecuencia en la ecuación 14.18 sea igual a 2.00×10^4 Hz.

SOLUCIÓN

a) Encuentre las frecuencias si el tubo está abierto en ambos extremos.

Sustituya en la ecuación 14.18, con $n = 1$:

$$f_1 = \frac{v}{2L} = \frac{343 \text{ m/s}}{2(2.46 \text{ m})} = 69.7 \text{ Hz}$$

Multiplique para encontrar el segundo y tercer armónicos:

$$f_2 = 2f_1 = 139 \text{ Hz} \quad f_3 = 3f_1 = 209 \text{ Hz}$$

b) ¿Cuántos armónicos están entre 20 y 20 000 Hz para este tubo?

Ponga la frecuencia en la ecuación 14.18 igual a 2.00×10^4 Hz y resuelva para n :

$$f_n = n \frac{v}{2L} = n \frac{343 \text{ m/s}}{2 \cdot 2.46 \text{ m}} = 2.00 \times 10^4 \text{ Hz}$$

$$n = 286$$

Esto resuelve para $n = 286.88$, que debe truncarse como ($n = 287$, lo que da una frecuencia sobre 2.00×10^4 Hz):

c) Encuentre las frecuencias para el tubo cerrado por un extremo.

Aplique la ecuación 14.19 con $n = 1$:

$$f_1 = \frac{v}{4L} = \frac{343 \text{ m/s}}{4(2.46 \text{ m})} = 34.9 \text{ Hz}$$

Los siguientes dos armónicos son múltiplos impares del primero:

$$f_3 = 3f_1 = 105 \text{ Hz} \quad f_5 = 5f_1 = 175 \text{ Hz}$$

(continúa)

PREGUNTA 14.9 Verdadero o Falso: La longitud de onda fundamental de un tubo largo es mayor que la longitud de onda fundamental de un tubo corto.

EJERCICIO 14.9 a) ¿Qué longitud del tubo abierto en ambos extremos tiene una frecuencia fundamental de 3.70×10^2 Hz? Encuentre el primer tono parcial. b) Si ahora un extremo de este tubo está cerrado, ¿cuál es la nueva frecuencia fundamental? Encuentre el primer tono parcial. c) Si el tubo está abierto sólo en un extremo, ¿cuántos armónicos son posibles en la gama audible normal a partir de los 20 a 20 000 Hz?

RESPUESTAS a) 0.464 m, 7.40×10^2 Hz b) 185 Hz, 555 Hz c) 54

EJEMPLO 14.10 Resonancia en un tubo de longitud variable

OBJETIVO Identificar la resonancia en tubos y realice cálculos elementales.

PROBLEMA La figura 14.24a muestra un aparato sencillo para demostrar la resonancia en un tubo. Un largo tubo abierto en ambos extremos está parcialmente sumergido en un recipiente con agua, a la vez que se coloca un diapasón con vibración de frecuencia desconocida cerca de la parte superior del tubo. La longitud de la columna de aire L , se ajusta al mover el tubo verticalmente. Las ondas sonoras generadas por el diapasón se refuerzan cuando la longitud de la columna de aire corresponde a una de las frecuencias resonantes del tubo. Suponga que el valor más pequeño de L en el que ocurre un pico de la intensidad de sonido es de 9.00 cm. **a)** Con esta medida determine la frecuencia del diapasón. **b)** Encuentre la longitud de onda y las dos siguientes longitudes de las columnas de aire resonantes. Tome la velocidad del sonido como 343 m/s.

ESTRATEGIA Una vez que el tubo está en el agua, la disposición es igual que un tubo cerrado en un extremo. Para el inciso a), sustituya los valores para v y L en la ecuación 14.19 con $n = 1$ y encuentre la frecuencia del diapasón. b) La siguiente resonancia máxima ocurre cuando el nivel del agua es lo bastante bajo para permitir un segundo nodo (ver figura 14.24b), que es otra mitad de longitud de onda en distancia. La tercera resonancia ocurre cuando el tercer nodo se alcanza, requiriendo otra mitad-longitud de onda de distancia. La frecuencia en cada caso es igual porque es generada por el diapasón.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la frecuencia del diapasón.

Sustituya $n = 1$, $v = 343$ m/s y $L_1 = 9.00 \times 10^{-2}$ m en la ecuación 14.19:

$$f_1 = \frac{v}{4L_1} = \frac{343 \text{ m/s}}{4(9.00 \times 10^{-2} \text{ m})} = 953 \text{ Hz}$$

b) Encuentre la longitud de onda y los dos siguientes niveles de agua que dan la resonancia.

Calcule la longitud de onda, utilizando el hecho de que, para un tubo abierto por el extremo, $\lambda = 4L$ para el fundamental.

$$\lambda = 4L_1 = 4(9.00 \times 10^{-2} \text{ m}) = 0.360 \text{ m}$$

Suma la mitad de la longitud de onda de la distancia a L_1 para obtener la siguiente posición de resonancia:

$$L_2 = L_1 + \lambda/2 = 0.090 \text{ m} + 0.180 \text{ m} = 0.270 \text{ m}$$

Suma la otra mitad de la longitud de onda a L_2 para obtener la tercera posición de resonancia:

$$L_3 = L_2 + \lambda/2 = 0.270 \text{ m} + 0.180 \text{ m} = 0.450 \text{ m}$$

COMENTARIOS Este arreglo experimental se utiliza frecuentemente para medir la velocidad del sonido, en cuyo caso la frecuencia del diapasón debe conocerse previamente.

PREGUNTA 14.10 Verdadero o Falso: La frecuencia de resonancia de una columna de aire depende de la longitud de la columna y de la velocidad del sonido.

EJERCICIO 14.10 Un gas desconocido es introducido en el aparato anteriormente mencionado utilizando el mismo diapasón, y la primera resonancia ocurre cuando la columna de aire es de 5.84 cm de largo. Encuentre la velocidad del sonido en el gas.

RESPUESTA 223 m/s

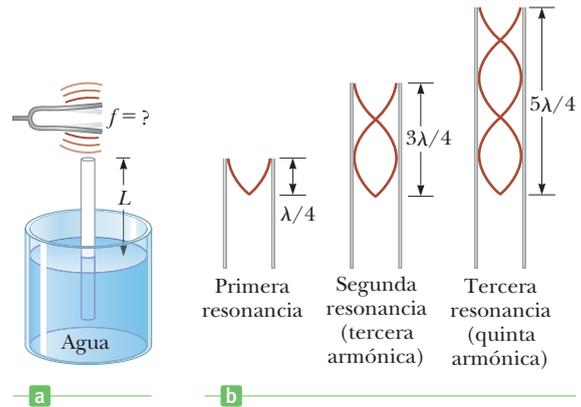


Figura 14.24 (Ejemplo 14.10) a) Aparato para demostrar la resonancia de ondas sonoras en un tubo cerrado en un extremo. La longitud L de la columna de aire varía cuando el tubo, parcialmente sumergido en agua, se mueve verticalmente. b) Primeras tres resonancias del sistema.

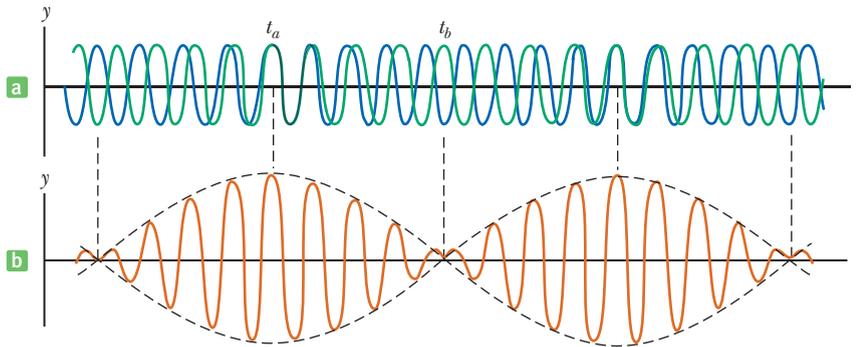


Figura activa 14.25 Las pulsaciones se forman por la combinación de dos ondas de frecuencias ligeramente diferentes que se desplazan en la misma dirección. a) Ondas individuales que un observador escucha en un punto fijo en el espacio. b) La onda combinada tiene una amplitud (línea interrumpida) que oscila en el tiempo.

14.11 Pulsaciones

Los fenómenos de interferencia que se han estudiado hasta ahora abarcan la superposición de dos o más ondas de la misma frecuencia que se desplazan en direcciones opuestas. Hay otro tipo de efecto de interferencia que resulta de la superposición de dos ondas con frecuencias ligeramente diferentes. En tal situación, en algún punto fijo, las ondas están periódicamente en fase o fuera de ésta, correspondiendo a una alternancia temporal entre interferencias constructiva y destructiva. Para entender este fenómeno, considere la figura activa 14.25. Las dos ondas de la figura activa 14.25a se emitieron por dos diapasones con frecuencias ligeramente diferentes; en la figura activa 14.25b se muestra la superposición de estas dos ondas. En algún tiempo t_a , las ondas están en fase y ocurre interferencia constructiva, como lo muestra la curva resultante de la figura activa 14.25b. Sin embargo, en un tiempo posterior, las vibraciones de los dos diapasones se desfazan. En el tiempo t_b , un diapasón emite una compresión mientras que el otro emite una rarefacción presentándose una interferencia destructiva, como se ve en la curva de la figura. Cuando el tiempo pasa las vibraciones de los dos diapasones se desfazan, luego entran en fase y así sucesivamente. En consecuencia, un observador situado en un punto fijo escucha una intensidad acústica alternada, conocida como **pulsaciones**. El número de pulsaciones por segundo, o *frecuencia de pulsación*, es igual a la diferencia en frecuencia entre las dos fuentes:

$$f_b = |f_2 - f_1| \quad [14.20]$$

◀ Frecuencia de pulsación

donde f_b es la frecuencia de pulsación y f_1 y f_2 son las dos frecuencias. El valor absoluto se usa porque la frecuencia de pulsación es una cantidad positiva, por lo que es posible obviar el orden de la resta.

Es posible afinar instrumentos de cuerda tales como un piano, pulsando una nota del instrumento contra una nota de frecuencia conocida. La cuerda se puede afinar entonces a la frecuencia deseada al ajustar la tensión hasta que no se escuchen las pulsaciones.

APLICACIÓN

Uso de las pulsaciones para afinar un instrumento musical

Examen rápido

14.7 Usted está afinando una guitarra comparando el sonido de la cuerda con el de un diapasón estándar. Usted nota una frecuencia de pulsación de 5 Hz cuando ambos sonidos están presentes. Cuando aprieta la cuerda de la guitarra, la frecuencia de pulsación se eleva constantemente a 8 Hz. Para afinar la cuerda exactamente con el diapasón, usted debe a) continuar apretando la cuerda, b) aflojar la cuerda o c) imposible determinar con la información dada.

EJEMPLO 14.11 Notas estropeadas

OBJETIVO Aplicar el concepto de frecuencia de pulsación.

PROBLEMA Cierta cuerda del piano se pone a vibrar en una frecuencia de 4.40×10^2 Hz. Para comprobar su frecuencia, un diapasón que se sabe vibra a una frecuencia 4.40×10^2 Hz,

se toca al mismo tiempo que las teclas del piano, a una frecuencia de 4 pulsaciones por segundo. a) Encuentre las dos frecuencias posibles en las cuales la cuerda podría vibrar.

(continúa)

b) Suponga que el afinador corre hacia el piano, sosteniendo en vibración el diapasón mientras que su ayudante toca la nota, la cual está a 436 Hz. A su velocidad máxima, el afinador del piano observa que la frecuencia de pulsación cae de 4 a 2 Hz (sin pasar por una frecuencia de pulsación de cero). ¿Qué tan rápido se mueve el afinador? Utilice una velocidad del sonido de 343 m/s. c) Mientras que el sintonizador del piano está corriendo, ¿qué frecuencia de pulsación es observada por el ayudante? *Nota:* Suponga que todos los números son exactos a dos decimales, necesarios para este último cálculo.

ESTRATEGIA a) La frecuencia de pulsación es igual al valor absoluto de la diferencia de frecuencias entre las dos fuentes de sonido y ocurre si la cuerda del piano es afinada de manera muy baja o muy alta. Resuelva la ecuación 14.20 para estas dos posibles frecuencias. b) El moverse hacia el piano incrementa la frecuencia observada de la cuerda. Resuelva la fórmula de corrimiento Doppler, ecuación 14.12, para la velocidad del observador. c) El ayudante observa un corrimiento Doppler para el observador. Aplique la ecuación 14.12.

SOLUCIÓN

a) Encuentre las dos posibles frecuencias.

Caso 1: $f_2 - f_1$ ya es positivo, así que omita el signo de valor absoluto:

$$f_b = f_2 - f_1 \rightarrow 4 \text{ Hz} = f_2 - 4.40 \times 10^2 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 444 \text{ Hz}$$

Caso 2: $f_2 - f_1$ es negativo, así que omita el valor absoluto, aplicando un signo negativo a toda la resta:

$$f_b = -(f_2 - f_1) \rightarrow 4 \text{ Hz} = -(f_2 - 4.40 \times 10^2 \text{ Hz})$$

$$f_2 = 436 \text{ Hz}$$

b) Encuentre la velocidad del observador si correr hacia el piano conduce a una frecuencia de pulsación de 2 Hz.

Aplique el corrimiento Doppler al caso en que la frecuencia de la cuerda del piano escuchada por el observador que corre es $f_o = 438 \text{ Hz}$:

$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right)$$

$$438 \text{ Hz} = (436 \text{ Hz}) \left(\frac{343 \text{ m/s} + v_o}{343 \text{ m/s}} \right)$$

$$v_o = \left(\frac{438 \text{ Hz} - 436 \text{ Hz}}{436 \text{ Hz}} \right) (343 \text{ m/s}) = 1.57 \text{ m/s}$$

c) ¿Qué frecuencia de pulsación observa el ayudante?

Aplique la ecuación 14.12. Ahora la fuente es el diapasón, así que $f_s = 4.40 \times 10^2 \text{ Hz}$.

$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right)$$

$$= (4.40 \times 10^2 \text{ Hz}) \left(\frac{343 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s} - 1.57 \text{ m/s}} \right) = 442 \text{ Hz}$$

Calcule la frecuencia de pulsación:

$$f_b = f_2 - f_1 = 442 \text{ Hz} - 436 \text{ Hz} = 6 \text{ Hz}$$

COMENTARIOS El ayudante en el banco del piano y el afinador que corre con el diapasón observan diferentes frecuencias de pulsación. Muchas observaciones físicas dependen del estado de movimiento del observador, un tema que se discute de forma más completa en el capítulo 26, en relatividad.

PREGUNTA 14.11 ¿Por qué las pulsaciones no se oyen cuando dos diferentes notas se tocan en el piano?

EJERCICIO 14.11 El ayudante ajusta la tensión en la misma cuerda del piano, y se oye una frecuencia de pulsación de 2.00 Hz cuando la nota y el diapasón se tocan al mismo tiempo. a) Encuentre las dos frecuencias posibles de la cuerda. b) Suponga que la frecuencia real de la cuerda es la frecuencia más alta. Si el afinador del piano corre alejándose del piano a 4.00 m/s mientras sostiene el diapasón que vibra, ¿qué frecuencia de pulsación oye? c) ¿Qué frecuencia de pulsación oye el ayudante en el banco? Utilice 343 m/s para la velocidad del sonido.

RESPUESTAS a) 438 Hz, 442 Hz b) 3 Hz c) 7 Hz

14.12 Calidad del sonido

Los patrones acústicos de ondas producidos por la mayoría de los instrumentos musicales son complejos. La figura 14.26 muestra formas de onda características (la presión se traza en el eje vertical y el tiempo en el eje horizontal) producidas por un diapasón, una flauta

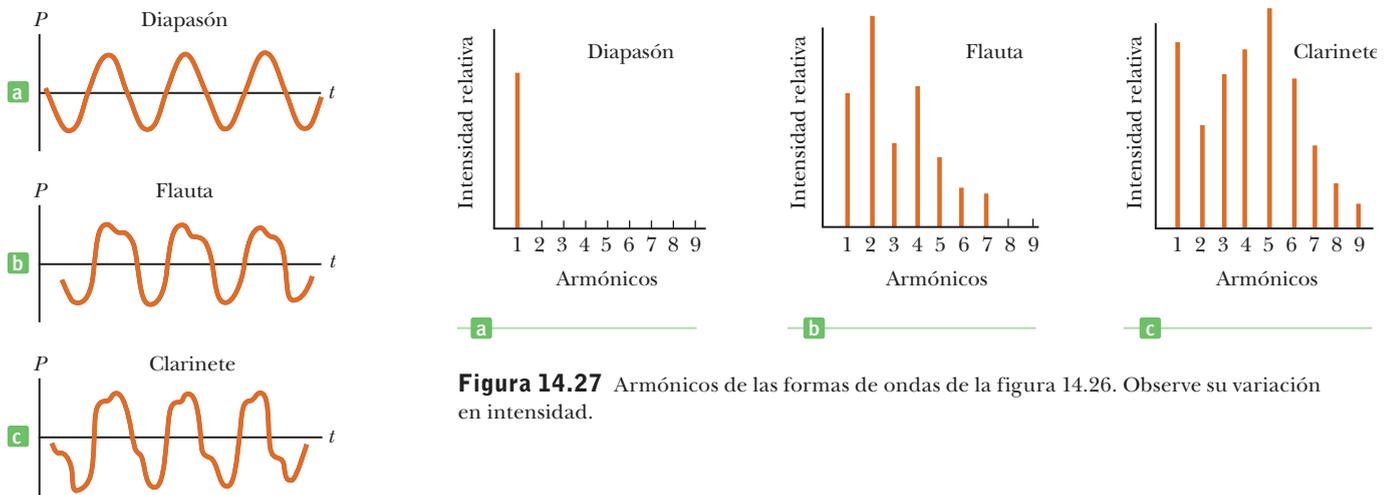


Figura 14.27 Armónicos de las formas de onda de la figura 14.26. Observe su variación en intensidad.

Figura 14.26 Formas de onda producidas por a) un diapasón, b) una flauta y c) un clarinete; todas con aproximadamente la misma frecuencia. La presión está graficada en el eje vertical y el tiempo en el horizontal.

y un clarinete, cada uno tocando la misma nota. Aunque cada instrumento tiene su propio patrón característico, la figura revela que cada una de las formas de la onda es periódica. Observe que el diapasón produce solamente un armónico (la frecuencia fundamental), pero los dos instrumentos emiten mezclas de armónicos. En la figura 14.27 se muestran gráficas de las formas de onda de la figura 14.26. Cuando la nota es tocada con la flauta (figura 14.26b), parte del sonido consiste en una vibración en la frecuencia fundamental, una intensidad aun más alta es aportada por el segundo armónico; el cuarto armónico produce una intensidad casi igual que el fundamental y así sucesivamente. Estos sonidos se suman juntos según el principio de la superposición para dar la forma compleja de la onda mostrada. El clarinete emite una cierta intensidad a una frecuencia del primer armónico, cerca de la mitad de la intensidad con la frecuencia del segundo armónico y así sucesivamente. La superposición resultante de estas frecuencias produce el patrón que se ve en la figura 14.26c. El diapasón (figuras 14.26a y 14.27a) emite sólo sonidos a la frecuencia del primer armónico.

En música, el sonido característico de cualquier instrumento se conoce como *calidad*, o *timbre*, del sonido. La calidad depende de la mezcla de armónicos en el sonido. Decimos que la nota Do de una flauta difiere en calidad de la misma nota Do de un clarinete. Instrumentos como el clarín, la trompeta, el violín y la tuba son ricos en armónicos. Los músicos que tocan instrumentos de viento pueden hacer resaltar uno u otro de estos armónicos al cambiar la configuración de sus labios y pueden así tocar diferentes notas musicales con las mismas aberturas de válvula.

Tip 14.5 Tono no es lo mismo que frecuencia

Aunque el tono está relacionado principalmente (pero no por completo) con la frecuencia, no son lo mismo. Una frase como “el tono del sonido”, es incorrecta porque tono no es una propiedad física del sonido. Frecuencia es la medición física del número de oscilaciones por segundo del sonido. Tono es una reacción fisiológica al sonido que hace posible que una persona ponga el sonido en una escala baja o alta, o de agudo a grave. Por lo tanto, frecuencia es el estímulo y tono es la respuesta.

■ FÍSICA APLICADA 14.6 ¿Por qué el profesor habla como el pato Donald?

Un profesor realiza una demostración en la cual respira helio y después habla con una voz cómica. Un estudiante explica, “la velocidad del sonido en el helio es más alta que en el aire, así que la frecuencia fundamental de las ondas estacionarias en la boca se incrementa”. Otro estudiante dice, “no, la frecuencia fundamental está determinada por los pliegues vocales y no puede ser cambiada. Solamente la calidad de la voz ha cambiado”. ¿Cuál estudiante está en lo correcto?

EXPLICACIÓN El segundo estudiante está en lo correcto. La frecuencia fundamental del complejo tono de la voz es

determinada por la vibración de los pliegues vocales y no cambia cuando en la boca hay un gas diferente. La introducción del helio en la boca da lugar a armónicos de frecuencias más altas que son excitadas más que en la voz normal, pero la frecuencia fundamental de la voz es la misma, sólo la calidad ha cambiado. La inclusión inusual de los armónicos de frecuencia más alta da lugar a una descripción común de este efecto como voz “aguda”, pero esa descripción es incorrecta. (Es realmente un timbre “de pato”). ■

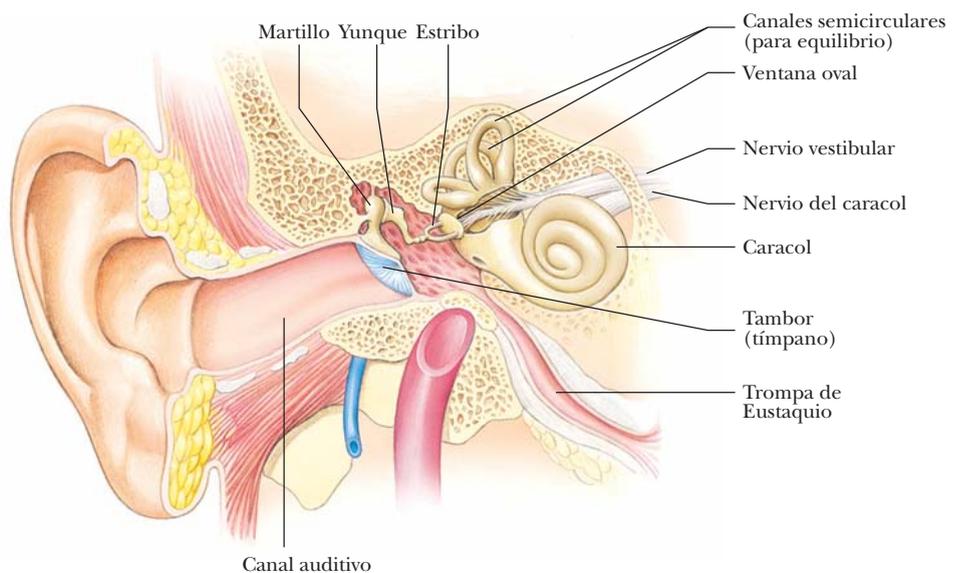
14.13 El oído **BIO**

El oído humano se divide en tres regiones: oído externo, oído medio y oído interno (figura 14.28). El *oído externo* consiste del canal auditivo (que está abierto a la atmósfera), terminando en el tambor (tímpano). El sonido viaja por el canal auditivo hasta el tambor que vibra en vaivén en fase con los movimientos en un sentido y otro, causados por las alternantes presiones alta y baja de las ondas acústicas. Detrás del tambor están tres pequeños huesos del *oído medio*, llamados martillo, yunque y estribo debido a sus formas. Estos huesos transmiten la vibración al *oído interno*, que contiene el caracol, un tubo en forma de caracol de cerca de 2 cm de largo. El caracol hace contacto con el estribo en la ventana oval y está dividido a lo largo de su longitud por la membrana basilar, que consta de pequeños pelos (cilios) y fibras nerviosas. Esta membrana varía en masa por unidad de longitud y en tensión en su longitud y diferentes porciones de ella resuenan ante diferentes frecuencias. (Recordemos que la frecuencia natural de una cuerda depende de su masa por unidad de longitud y de la tensión sobre ella.) A lo largo de la membrana basilar hay numerosas terminaciones nerviosas, que detectan la vibración de la membrana y alternadamente transmiten impulsos al cerebro. El cerebro interpreta los impulsos como sonidos de frecuencia variable, dependiendo de las localizaciones a lo largo de la membrana basilar de los nervios que transmiten los impulsos y de la velocidad con que se transmiten los impulsos.

La figura 14.29 demuestra las curvas de respuesta de frecuencia de un oído humano promedio para sonidos de igual intensidad, extendiéndose a partir de 0 a 120 dB. Para interpretar esta serie de gráficas, tome la curva inferior como el umbral de audibilidad. Compare este nivel de intensidad en el eje vertical para las dos frecuencias de 100 y 1000 Hz. El eje vertical muestra que el sonido 100 Hz debe ser cerca de 38 dB mayor que el de 1000 Hz para estar en el umbral de audibilidad, que significa que este umbral depende en gran medida de la frecuencia. Las frecuencias más fáciles de oír son de alrededor 3 300 Hz; las superiores a 12 000 Hz o inferiores a unos 50 Hz deben ser relativamente intensas para el oído.

Ahora considere la curva etiquetada con 80. Esta curva utiliza como referencia un tono de 1000 Hz a un nivel de intensidad de 80 dB. La curva muestra que un tono de frecuencia de 100 Hz tendría que ser cerca de 4 dB más fuerte que el tono de 80 dB y 1000 Hz para que suene igualmente fuerte. Observe que las curvas se aplanan mientras que los niveles de las intensidades de los sonidos aumentan, así que cuando los sonidos son fuertes, todas las frecuencias se pueden oír igualmente bien.

Figura 14.28 La estructura del oído humano. Los tres diminutos huesos (osículos) que conectan el tambor a la ventana del caracol actúan como un sistema de doble palanca para reducir la amplitud de vibración y, por lo tanto, aumentar la presión sobre el fluido del caracol.



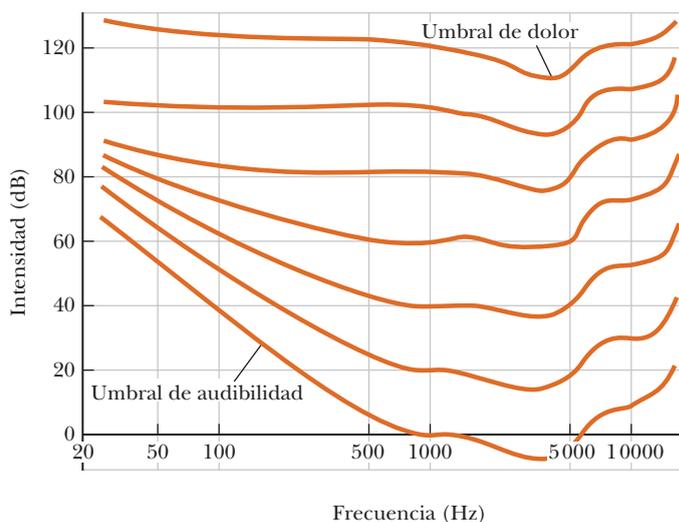


Figura 14.29 Curvas de nivel de intensidad contra frecuencia de sonidos que son percibidos como de igual intensidad. Observe que el oído es más sensible a una frecuencia de cerca de 3300 Hz. La curva más baja corresponde al umbral de audibilidad de sólo 1% de la población.

Los pequeños huesos en el oído medio representan un sistema intrincado de palancas que aumenta la fuerza sobre la ventana oval. La presión se amplifica grandemente porque el área superficial del tambor es cerca de 20 veces el de la ventana oval (en analogía con una prensa hidráulica). El oído medio, junto con el tambor y la ventana oval, actúa como red de adaptación entre el aire y el oído externo y el líquido del oído interno. La transferencia de energía total entre el oído externo y el oído interno es muy eficiente, con factores de amplificación de presión de varios miles. Es decir las variaciones de presión en el oído interno son mucho mayores que las del oído externo.

El oído tiene su propia protección integrada contra sonidos fuertes. Los músculos que conectan los tres huesos del oído medio a las paredes controlan el volumen del sonido al cambiar la tensión sobre los huesos cuando aumenta un sonido, lo que reduce su capacidad para transmitir vibraciones. Además, el tambor se hace más tenso cuando aumenta la intensidad de un sonido. Estos dos factores hacen que el oído sea menos sensible a captar sonidos intensos. Sin embargo, existe un retardo entre el principio de un sonido fuerte y la reacción protectora del oído, de manera que un ruido intenso y muy repentino puede dañarlo.

Se cree que la compleja estructura del oído humano está relacionada con el hecho de que los mamíferos se desarrollaron de criaturas provenientes del mar. En comparación, los oídos de los insectos son considerablemente más simples en diseño porque los insectos han sido siempre residentes de la tierra. Un oído típico de un insecto consiste en un tambor expuesto directamente al aire en un lado y una cavidad llena de aire en el otro lado. Unas células nerviosas comunican directamente la cavidad y el cerebro, sin la necesidad del intermediario complejo de un oído interno y medio. Este diseño simple permite que el oído sea colocado virtualmente dondequiera en el cuerpo. Por ejemplo, un saltamontes tiene sus oídos en sus patas. Una ventaja del oído simple del insecto es que la distancia y la orientación de los oídos se pueden variar de modo que sea más fácil localizar fuentes del sonido, tales como otros insectos.

Uno de los avances médicos más asombrosos de décadas recientes es el implante de un caracol, permitiendo que un sordo oiga. La sordera puede ocurrir cuando los sensores semejantes a pelos (cilios) se rompen, o por efecto de una prolongada exposición a sonidos fuertes. Como los cilios no crecen, el oído pierde sensibilidad a ciertas frecuencias de sonido. El implante de caracol estimula los nervios en el oído electrónicamente para restaurar la pérdida de oído por cilios dañados o ausentes.

BIO APLICACIÓN
Implantes de caracol

RESUMEN

14.2 Características de las ondas de sonido

Las **ondas de sonido** son ondas longitudinales. Las **ondas audibles** son ondas de sonido con frecuencias entre 20 y 20 000

Hz. Las **ondas infrasónicas** tienen frecuencias por debajo del intervalo audible y las **ondas ultrasónicas** tienen frecuencias por encima del intervalo audible.

14.3 La velocidad del sonido

La velocidad del sonido en un medio con módulo volumétrico B y densidad ρ está dada por

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad [14.1]$$

La velocidad del sonido depende también de la temperatura del medio. La relación entre la temperatura y la rapidez del sonido en el aire es

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} \quad [14.4]$$

donde T es la temperatura absoluta (Kelvin) y 331 m/s es la velocidad del sonido en el aire a 0°C.

14.4 Energía e intensidad de las ondas de sonido

La **intensidad promedio** del sonido incidente sobre una superficie está definido por

$$I \equiv \frac{\text{potencia}}{\text{área}} = \frac{P}{A} \quad [14.6]$$

donde la potencia P es la energía por unidad de tiempo que fluye a través de la superficie la cual tiene área A . El **nivel de intensidad** de una onda de sonido está dado por

$$\beta \equiv 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad [14.7]$$

La constante $I_0 = 1.0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ es una referencia de intensidad que se toma usualmente como umbral de audición, e I es la intensidad a nivel β , medida en **decibeles** (dB).

14.5 Ondas esféricas y planas

La **intensidad** de una *onda esférica* producida por una fuente puntual es proporcional a la potencia promedio emitida e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde la fuente:

$$I = \frac{P_{\text{prom}}}{4\pi r^2} \quad [14.8]$$

14.6 El efecto Doppler

El cambio en la frecuencia escuchada por un observador cuando existe un movimiento relativo entre la fuente de sonido y el observador es llamado **efecto Doppler**. Si el observador se mueve con velocidad v_o y la fuente se mueve con velocidad v_s , la frecuencia observada es

$$f_o = f_s \left(\frac{v + v_o}{v - v_s} \right) \quad [14.12]$$

donde v es la velocidad del sonido. Una velocidad positiva se sustituye por v_o cuando el observador se mueve hacia la fuente, mientras que una velocidad negativa, cuando el observador se mueve lejos de la fuente. Similarmente, una velocidad positiva se sustituye por v_s cuando las fuentes se mueven hacia el observador y una velocidad negativa, cuando las fuentes se mueven lejos. Las velocidades se miden en relación con el medio en el cual se propaga el sonido.

14.7 Interferencia de las ondas de sonido

Cuando las ondas se interfieren, la onda resultante se encuentra sumando las ondas individuales punto por punto. Cuando las crestas se unen con crestas y las depresiones con depresiones, las ondas sufren de **interferencia constructiva**, con diferencia en la longitud de trayectoria de

$$r_2 - r_1 = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad [14.13]$$

Cuando las crestas se encuentran con las depresiones, ocurre una **interferencia destructiva**, con diferencia en la longitud de trayectoria de

$$r_2 - r_1 = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad [14.14]$$

14.8 Ondas estacionarias

Las **ondas estacionarias** se forman cuando dos ondas con la misma frecuencia, amplitud y longitud de onda viajan en direcciones opuestas a través de un medio. Las frecuencias naturales de vibración de una cuerda estirada de longitud L , fija en ambos extremos, son

$$f_n = n f_1 = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [14.17]$$

donde F es la tensión en la cuerda y μ es su masa por unidad de longitud.

14.9 Vibraciones forzadas y resonancia

Un sistema capaz de oscilar se dice que está en **resonancia** con una fuente de conducción cuando la frecuencia de la fuente se acopla con las frecuencias naturales del sistema. Cuando el sistema está en resonancia, éste oscila con amplitud máxima.

14.10 Ondas estacionarias en columnas de aire

Las ondas estacionarias pueden ser producidas en un tubo de aire. Si el extremo reflector en el tubo está *abierto*, todos los armónicos están presentes y las frecuencias naturales de vibración son

$$f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [14.18]$$

Si el tubo está *cerrado* en el extremo reflector, sólo los armónicos *impares* están presentes y las frecuencias naturales de vibración son

$$f_n = n \frac{v}{4L} = n f_1 \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad [14.19]$$

14.11 Pulsaciones

El fenómeno de **pulsaciones** es un efecto de interferencia que ocurre cuando dos ondas con pequeñas diferencias en frecuencia se combinan en un punto fijo en el espacio. Para ondas de sonido, la intensidad del sonido resultante cambia periódicamente con el tiempo. La *frecuencia de pulsación* es

$$f_b = |f_2 - f_1| \quad [14.20]$$

donde f_2 y f_1 son dos fuentes de frecuencias.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una onda de sonido que viaja por el aire tiene una frecuencia f y una longitud de onda λ . Una segunda onda de sonido que viaja por el aire tiene longitud de onda $\lambda/2$. ¿Cuál es la frecuencia de la segunda onda de sonido? a) $4f$ b) $2f$ c) f d) $\frac{1}{2}f$ e) $\frac{1}{4}f$
- La temperatura en Furnace Creek en el Valle de la Muerte alcanzó los 134°F el 10 de julio de 1913. ¿Cuál es la velocidad del sonido en el aire a esta temperatura? a) 321 m/s b) 343 m/s c) 364 m/s d) 375 m/s e) 405 m/s
- El alcohol etílico tiene una densidad de $0.806 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y su módulo volumétrico es $1.0 \times 10^9 \text{ Pa}$. Calcule la velocidad del sonido en alcohol etílico. a) 1100 m/s b) 340 m/s c) 820 m/s d) 450 m/s e) 1300 m/s
- Considerando el pie de nota de la tabla 14.1, ¿cuál es la velocidad de una onda longitudinal en una barra de aluminio? a) 340 m/s b) 570 m/s c) 1400 m/s d) 3200 m/s e) 5100 m/s
- La intensidad de sonido de un avión jet mientras aterriza en cierto punto es de 105 dB. ¿Cuál es la intensidad del sonido en este punto? a) $2.45 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ b) $3.54 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ c) $8.25 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ d) $3.16 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ e) $1.05 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$
- Una fuente puntual emite sonido en un medio uniforme. Si la distancia desde la fuente se triplica, ¿cuánto cambia la intensidad? a) Se hace un noveno más grande. b) Se hace un tercio más grande. c) Permanece sin cambios. d) Se hace tres veces mayor. e) Se hace nueve veces mayor.
- Si una fuente de 1.00 kHz de sonido se mueve con una velocidad de 50.0 m/s hacia una persona la cual se mueve con una velocidad de 30.0 m/s en dirección opuesta de la fuente, ¿cuál es la frecuencia aparente oída por el escucha? (La velocidad del sonido es de 340 m/s.) a) 796 Hz b) 949 Hz c) 1000 Hz d) 1070 Hz e) 1270 Hz
- ¿Qué ocurre con una onda viajera de sonido cuando viaja del aire hacia el agua? a) Su intensidad se incrementa. b) Su longitud de onda disminuye. c) Su frecuencia se incrementa. d) Su frecuencia permanece igual. e) Su velocidad disminuye.
- Cuando dos diapasones suenan al mismo tiempo, ocurre una frecuencia de pulsación de 5 Hz. Si uno de los diapasones tiene una frecuencia de 245 Hz, ¿cuál es la frecuencia del otro diapason? a) 240 Hz b) 242.5 Hz c) 247.5 Hz d) 250 Hz e) Más de una respuesta podría ser correcta.
- Una flauta tiene una longitud de 58.0 cm. Si la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s, ¿cuál es la frecuencia fundamental de una flauta suponiendo que es un tubo cerrado en un extremo y abierto en el otro? a) 148 Hz b) 296 Hz c) 444 Hz d) 591 Hz e) Ninguna de las anteriores.
- La frecuencia fundamental de un tubo resonador es 150 Hz y las siguientes frecuencias de resonancia mayor son 300 y 450 Hz. De esta información, ¿qué puede usted concluir? a) El tubo está abierto en un extremo y cerrado en el otro. b) El tubo podría estar abierto en cada extremo o cerrado en cada extremo. c) El tubo debe estar abierto en ambos extremos. d) El tubo debe estar cerrado en cada extremo. e) El tubo está abierto en ambos extremos para la frecuencia menor solamente.
- Mientras usted viaja por la autopista en su coche, una ambulancia se aproxima a usted desde atrás a alta velocidad sonando su sirena a una frecuencia de 500 Hz. ¿Cuál declaración es correcta? a) Usted escucha una frecuencia menor de 500 Hz. b) Usted escucha una frecuencia igual a 500 Hz. c) Usted escucha una frecuencia mayor a 500 Hz. d) Usted escucha una frecuencia mayor de 500 Hz mientras que el conductor de la ambulancia escucha una frecuencia menor de 500 Hz. e) Usted escucha una frecuencia menor de 500 Hz mientras que el conductor escucha una frecuencia de 500 Hz.
- Dos sirenas A y B suenan de modo tal que la frecuencia de A es dos veces la frecuencia de B. Comparado con la velocidad del sonido de A, ¿la velocidad del sonido de B es a) el doble de rápido, b) la mitad de rápido, c) cuatro veces más rápido, d) un cuarto más rápido o e) la misma?
- Un tubo hueco (tal como en un tubo de órgano abierto en ambos extremos) se hace entrar en resonancia a frecuencia f_{abierto} . Un extremo del tubo está cubierto ahora y el tubo se hace entrar nuevamente en resonancia ahora a frecuencia f_{cerrado} . Ambas resonancias están en los primeros armónicos. ¿Cómo son en comparación estas dos resonancias? a) Son las mismas. b) $f_{\text{abierto}} = 2f_{\text{cerrado}}$ c) $f_{\text{cerrado}} = 2f_{\text{abierto}}$ d) $f_{\text{abierto}} = f_{\text{cerrado}}$ e) $f_{\text{cerrado}} = \frac{3}{2}f_{\text{abierto}}$
- Duplicar la potencia de salida de una fuente de sonido que emite una frecuencia única resultará en ¿qué incremento en el nivel de decibeles? a) 0.50 dB b) 2.0 dB c) 3.0 dB d) 4 dB e) encima de 20 dB

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- a) Usted conduce por la autopista cuando una patrulla sonando su sirena lo rebasa. Si la frecuencia en reposo es f_0 , la frecuencia que usted escucha mientras la patrulla lo está alcanzando ¿es mayor o menor que f_0 ? b) ¿Qué ocurre con la frecuencia que escucha cuando la patrulla lo ha rebasado?

- Un modelo burdo de la garganta humana es aquel de un tubo abierto en ambos extremos con una fuente vibrante que introduce el sonido dentro del tubo por un extremo. Suponiendo que la fuente vibrante produce un intervalo de frecuencias, analice el efecto de cambiar la longitud del tubo.
- Una cámara de autoenfoco envía una pulsación de sonido y mide el tiempo que le toma alcanzar el objeto, reflejarse en él y regresar para ser detectado. ¿Puede la temperatura afectar el enfoque de la cámara? Las nuevas cámaras utilizan un sistema infrarrojo más fiable.
- Explique cómo puede determinarse la distancia de un rayo contando los segundos entre el destello y el sonido del trueno.



Figura PC14.4

- Los agentes secretos en las películas siempre desean un teléfono seguro con un distorsionador de voz. ¿Cómo funcionan estos dispositivos?
- ¿Por qué la cuerda que vibra en una guitarra suena más fuerte cuando está puesta en el instrumento que cuando vibra fuera de éste?
- Usted conduce hacia un barranco y hace sonar su claxon.
 - ¿Existe corrimiento Doppler del sonido cuando usted escucha el eco? Si es así, ¿éste es como de una fuente en movimiento o un observador en movimiento?
 - ¿Qué pasa si la reflexión ocurre no desde un barranco sino desde la orilla frontal de una enorme nave alienígena que se mueve hacia usted mientras maneja?
- El sistema de radar utilizado por la policía para detectar infractores de velocidad es sensible al corrimiento Doppler de una pulsación de onda de radio. Analice cómo esta sensibilidad puede utilizarse para medir la velocidad de un coche.
- Un arquero dispara una flecha desde un arco. ¿La cuerda del arco presenta ondas estacionarias después que la flecha se va? Si es así y el arco es perfectamente simétrico de tal modo que la flecha sale desde el centro de la cuerda, ¿qué armónicos son excitados?
- Una botella de bebida suave resuena conforme el aire es soplado a través de la cima. ¿Qué ocurre con la frecuencia de resonancia conforme el nivel del fluido en la botella disminuye?
- Un mecánico de aviones nota que el sonido de una turbina varía rápidamente en fuerza cuando ambas turbinas están encendidas. ¿Cuál podría ser la causa de esta variación de mayor a menor?

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, **2.** denota problema intermedio, **3.** denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

14.2 Características de las ondas de sonido

14.3 La velocidad del sonido

Nota: A menos que se establezca lo contrario, considere 343 m/s como la velocidad del sonido en el aire, este valor es en aire a una temperatura de 20.0 °C. Para cualquier otra temperatura Celsius T_C , la velocidad del sonido en el aire está descrita por la ecuación 14.4:

$$v = 331 \sqrt{1 + \frac{T_C}{273}}$$

donde v está en m/s y T está en °C. Use la tabla 14.1 para encontrar la velocidad del sonido en otros medios.

- C|C** Suponga que escucha un trueno 16.2 s después de haber visto un rayo asociado a él. La velocidad de las ondas de sonido en el aire es de 343 m/s y la velocidad de la luz en el aire es de 3.00×10^8 m/s. a) ¿Qué tan lejos se encuentra del rayo? b) ¿Necesita saber el valor de la rapidez de la luz para responder? Explique.
- Los terremotos en las líneas de falla de la corteza de la Tierra provocan ondas sísmicas las cuales son longitudinales (ondas P) o transversales (ondas S). Las ondas P tienen una velocidad de aproximadamente 7 km/s. Calcule el módulo volumétrico promedio de la corteza terrestre dado que la densidad de la roca es cerca de 2500 kg/m³.
- En un caluroso día de verano, la temperatura del aire en Arizona llega a 114 °F. ¿Cuál es la velocidad del sonido en el aire a esa temperatura?

4. **BIO** Un delfín sumergido en agua de mar a una temperatura de 25°C emite un sonido dirigido hacia el fondo del océano a 150 m de profundidad. ¿Cuánto tiempo pasa antes que el delfín escuche el eco?
5. Un grupo de montañistas escucha un eco 3.00 s después de gritar. Si la temperatura es de 22.0°C , ¿qué tan lejos está la montaña que reflejó la onda de sonido?
6. **BIO** El intervalo de audición del hombre se extiende aproximadamente desde 20 hasta 20000 Hz. Encuentre las longitudes de onda en estos extremos a una temperatura de 27°C .
7. Una onda de sonido que se propaga en el aire tiene una frecuencia de 4.00 kHz. Calcular el cambio en la longitud de onda cuando ésta, que inicialmente viajaba en una región donde $T = 27.0^{\circ}\text{C}$, entra en una región donde $T = 10.0^{\circ}\text{C}$.
8. Una piedra es arrojada desde el reposo hacia un pozo. El sonido del choque con el agua se escucha exactamente 2.00 s más tarde. Encuentre la profundidad del pozo si la temperatura del aire es de 10.0°C .
9. **CIC** Un martillo golpea un extremo de un riel de acero de espesor de longitud 8.50 m. Un micrófono situado en el extremo opuesto de la barra detecta dos pulsos de sonido, uno que viaja por el aire y una onda longitudinal que viaja a través del riel. a) ¿Qué pulso alcanza primero al micrófono? b) Hallar la separación en el tiempo entre la llegada de los dos pulsos.
14. **BIO** El área de un tímpano típico es cerca de $5.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Calcule la potencia del sonido (energía por segundo) que incide en el tímpano en a) el umbral de audición y b) el umbral del dolor.
15. **BIO** El pez sapo utiliza la resonancia en un tubo cerrado para producir sonidos muy fuertes. El tubo es su vejiga natatoria que utiliza como un amplificador. El nivel de sonido de esta criatura ha alcanzado hasta 100 dB según mediciones. a) Calcule la intensidad de la onda de sonido emitida. b) ¿Cuál es el nivel de intensidad si tres de estos peces trataran de emitir un sonido al mismo tiempo?
16. **PG** Una trompeta provoca un nivel de intensidad de sonido de $1.15 \times 10^2 \text{ dB}$ a una distancia de 1.00 m. a) ¿Cuál es la intensidad del sonido de una trompeta a esta distancia? b) ¿Cuál es la intensidad de sonido de cinco trompetas a esta distancia? c) Encuentre la intensidad de sonido de cinco trompetas en la primera fila de la audiencia si ésta se encuentra a 8.00 m, suponiendo por simplicidad que el sonido se propaga uniformemente en todas las direcciones. d) Calcule el nivel de decibeles de las cinco trompetas en la primera fila. e) Si las trompetas se tocan en un auditorio al aire libre, ¿qué tan lejos (en teoría) pueden escucharse sus sonidos combinados? f) En la práctica dicho sonido no puede escucharse una vez que el escucha está a 2–3 km de distancia. ¿Por qué no puede escucharse a la distancia encontrada en el inciso e)? *Sugerencia:* en un cuarto tranquilo la intensidad del sonido en el ambiente es cerca de 30 dB.

14.4 Energía e intensidad de las ondas de sonido

14.5 Ondas esféricas y planas

10. **CIC** El nivel de intensidad producido por un avión jet en cierto punto es de 150 dB. a) Calcule la intensidad de la onda de sonido generada por el jet en dicha ubicación. b) Compare la respuesta del inciso a) con el umbral de dolor y explique por qué los empleados que dirigen jets en los aeropuertos deben usar equipo protector para los oídos.
11. Uno de los sonidos más fuertes en la historia reciente fue hecho por la explosión del Krakatoa los días 26-27 de agosto de 1883. De acuerdo con las medidas barométricas, el sonido tuvo un nivel de intensidad de 180 dB a una distancia de 161 km. Suponga que la intensidad decrece con el inverso de la distancia al cuadrado, ¿cuál es el nivel de decibeles en la Isla Rodríguez a 4800 km de distancia?
12. Una onda de sonido de una sirena tiene una intensidad de 100.0 W/m^2 en cierto punto y una segunda onda de sonido de una ambulancia cercana tiene un nivel de intensidad de 10 dB mayor que el sonido de la sirena en el mismo punto. ¿Cuál es la intensidad de la onda de sonido debido a la ambulancia?
13. **BIO** Una persona utiliza un audífono que uniformemente incrementa el nivel de intensidad de todas las frecuencias de sonido audibles a 30.0 dB. El audífono recibe el sonido con una frecuencia de 250 Hz a una intensidad de $3.0 \times 10^{-11} \text{ W/m}^2$. ¿Cuál es la intensidad que entrega al tímpano?
17. Existe evidencia de que los elefantes se comunican con infrasonido generando vocalizaciones de resonancia bajas de hasta 14 Hz que pueden viajar hasta 10 km. El nivel de intensidad de estos sonidos pueden alcanzar hasta 103 dB medido a una distancia de 5.0 m desde la fuente. Determine el nivel de intensidad del infrasonido a 10 km desde la fuente, suponiendo que la energía del sonido radia uniformemente en todas direcciones.
18. Un show familiar sobre hielo se lleva a cabo en una arena cerrada. Los patinadores interpretan música que suena a un nivel de 80.0 dB. Este nivel de intensidad es muy alto para su bebé, quien grita a 75.0 dB. a) ¿Qué nivel de intensidad lo envuelve a usted? b) ¿Cuál es el nivel de intensidad combinado?
19. **M** Un tren suena su bocina cuando se aproxima a una intersección. La bocina puede escucharse a un nivel de 50 dB por un observador a 10 km de distancia. a) ¿Cuál es la potencia promedio generada por la bocina? b) ¿Cuál es el nivel de intensidad que escucha alguien a 50 m de la intersección? Considere la bocina como una fuente puntal y desprece cualquier absorción del sonido producida por el aire.
20. Un altavoz exterior (considerado como una fuente pequeña) emite ondas de sonido con una potencia de salida de 100 W. a) Encuentre la intensidad a 10.0 m de la fuente. b) Encuentre el nivel de intensidad en decibeles a esa distancia. c) ¿A qué distancia experimentaría usted el sonido en el umbral de dolor, 120 dB?

- 21. S** Demuestre que la diferencia en los niveles de decibel β_1 y β_2 de una fuente de sonido se relaciona con la razón de sus distancias r_1 y r_2 desde el receptor por la fórmula

$$\beta_2 - \beta_1 = 20 \log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)$$

- 22.** Un cohete explota a 100 m por encima del suelo (figura P14.22). Tres observadores están separados a 100 m de distancia estando el primero (A) directamente debajo de la explosión. a) ¿Cuál es la relación de la intensidad de sonido escuchada por el observador A con aquella escuchada por el observador B? b) ¿Cuál es la relación de la intensidad escuchada por el observador A con aquella escuchada por el observador C?

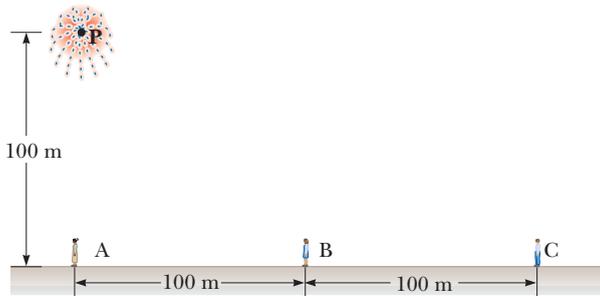


Figura P14.22

14.6 El efecto Doppler

- 23.** Un tren suburbano pasa una plataforma de pasajeros a una velocidad constante de 40.0 m/s. La bocina del tren suena a su frecuencia característica de 320 Hz. a) ¿Qué cambio total en la frecuencia detecta una persona sobre la plataforma conforme el tren se acerca y se aleja? b) ¿Qué longitud de onda detecta una persona sobre la plataforma conforme el tren se aproxima?
- 24.** Un avión que viaja a la mitad de la velocidad del sonido emite un sonido a una frecuencia de 5.00 kHz. ¿A qué frecuencia un observador estacionario escucha el sonido a) cuando el avión se aproxima y b) después que pasa?
- 25.** Dos trenes en vías separadas se mueven uno hacia el otro. El tren 1 tiene una velocidad de 130 km/h, mientras que el tren 2 tiene una velocidad de 90.0 km/h. El tren 2 toca su bocina emitiendo una frecuencia de 500 Hz. ¿Cuál es la frecuencia escuchada por el conductor del tren 1?
- 26.** El claxon de un coche en reposo suena como la nota La (440 Hz). El coche se mueve en la calle mientras el claxon permanece sonando. Un ciclista que se mueve en la misma dirección a un tercio de la velocidad del coche escucha una frecuencia de 415 Hz. a) ¿El ciclista está adelante o atrás del coche? b) ¿Cuál es la velocidad del coche?
- 27.** Un estudiante de física se para a un lado de las vías mientras un tren pasa lentamente. Él nota que la frecuencia del silbato del tren es 465 Hz cuando el tren se aproxima a él y 441 Hz cuando el tren se aleja de él. Utilizando estas frecuencias, el estudiante calcula la rapidez del tren. ¿Qué valor encontró?

- 28. BIO C/C** Un murciélago que vuela a 5.00 m/s persigue un insecto que vuela en la misma dirección. Si el murciélago emite un pitido a 40.0 kHz y recibe un eco de vuelta a 40.4 kHz, a) ¿cuál es la velocidad del insecto? b) ¿El murciélago es capaz de atrapar al insecto? Explique.

- 29.** Un diapasón que vibra a 512 Hz se deja caer desde el reposo y se acelera a 9.80 m/s². ¿Qué tan lejos del punto de liberación está el diapasón cuando llegan ondas a 485 Hz de frecuencia a dicho punto?

- 30. BIO** Los futuros padres se emocionan por escuchar el latido de corazón de su bebé antes de nacer que es revelado por un detector de movimiento ultrasónico. Suponga que la pared ventricular del feto sigue un movimiento armónico simple con amplitud de 1.80 mm y una frecuencia de 115 pulsaciones por minuto. El detector de movimiento en contacto con el abdomen de la madre produce sonido precisamente a 2 Mhz, el cual viaja a través del tejido a 1.50 km/s. a) Encuentre la velocidad lineal máxima de la pared del corazón. b) Encuentre la frecuencia máxima a la cual el sonido llega a la pared del corazón del bebé. c) Encuentre la frecuencia máxima a la cual el sonido reflejado es recibido por el detector de movimiento. (Gracias a un “escucha” electrónico de ecos a una frecuencia diferente de la frecuencia de transmisión, el detector de movimiento puede producir pitidos de sonido audible en sincronía con el latido fetal.)

- 31. M** Un avión supersónico que viaja a Mach 3.00 a una altura de $h = 20\,000$ m se encuentra directamente sobre una persona en el tiempo $t = 0$ como se muestra en la figura P14.31. Supongamos que la velocidad media del sonido en el aire es 335 m/s en la trayectoria del sonido. a) ¿En qué momento se encuentra la persona con la onda de choque debido al sonido emitido en $t = 0$? b) ¿Dónde estará el avión cuando esta onda de choque se escucha?

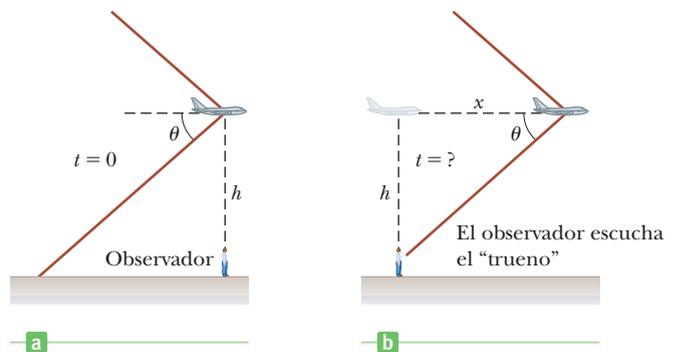


Figura P14.31

- 32. PG** Un submarino amarillo que viaja horizontalmente a 11.0 m/s utiliza un sonar con una frecuencia de 5.27×10^3 Hz. Un submarino rojo está enfrente del submarino amarillo y se mueve a 3.00 m/s relativo al agua en la misma dirección. Un tripulante del submarino rojo observa ondas de sonido (“pings”) desde el submarino amarillo. Considere la velocidad del sonido en el agua de mar como 1533 m/s. a) Escriba la ecuación 14.12. b) ¿Cuál submarino es la fuente de sonido? c) ¿Cuál submarino lleva al

observador? d) ¿El movimiento del submarino del observador aumenta o reduce el tiempo entre la máxima presión de las ondas de sonido que llegan? ¿Cómo afecta esto el periodo observado? ¿Y la frecuencia observada? e) ¿El signo de v_0 debería ser positivo o negativo? f) ¿El movimiento del submarino fuente aumenta o disminuye el tiempo observado entre la máxima presión? ¿Cómo afecta este movimiento al periodo observado? ¿Y la frecuencia observada? g) ¿Qué signo debería escogerse para v_s ? h) Sustituya los números apropiados y obtenga la frecuencia observada por el tripulante en el submarino rojo.

14.7 Interferencia de las ondas de sonido

33. Dos altavoces son conducidos por un oscilador común a 8.00×10^2 Hz y encarados uno a otro una distancia de 1.25 m. Localice los puntos a lo largo de la línea que une los altavoces donde se espera la amplitud mínima relativa de la presión. (Considere $v = 343$ m/s.)
34. El sistema acústico mostrado en la figura P14.34 es manejado por un altavoz que emite sonido a una frecuencia de 756 Hz. a) Si la interferencia constructiva ocurre en un instante particular, ¿en qué cantidad mínima debería aumentar la longitud de trayectoria en el tubo en forma de U superior de modo tal que ocurra interferencia destructiva en su lugar? b) ¿Qué incremento mínimo en la longitud original del tubo superior producirá nuevamente interferencia constructiva?

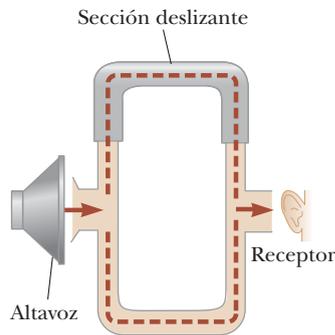


Figura P14.34

35. El barco en la figura P14.35 viaja a lo largo de una línea recta paralela a la orilla y a una distancia $d = 600$ m desde ésta. La radio del barco recibe señales simultáneas a la misma frecuencia desde las antenas A y B, separadas por una distancia $L = 800$ m. Las señales se interfieren cons-

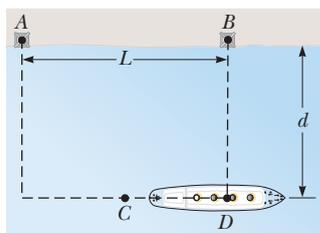


Figura P14.35

tructivamente en el punto C, el cual es equidistante de A y B. La señal pasa por el primer mínimo en el punto D que está fuera de la costa a partir del punto B. Determine la longitud de onda de las ondas de radio.

36. Dos altavoces se colocan arriba y abajo uno del otro como en la figura P14.36 y se manejan con la misma fuente a una frecuencia de 4.50×10^2 Hz. Un observador se encuentra enfrente de los altavoces (a la derecha) en el punto O a la misma distancia de cada altavoz. ¿Si la velocidad del sonido es 345 m/s, ¿cuál es la distancia mínima vertical hacia arriba que debe ser movido el altavoz superior para crear una interferencia destructiva en el punto O?

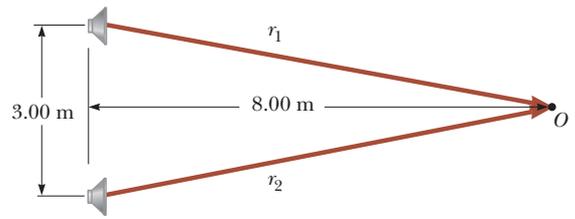


Figura P14.36

37. Un par de altavoces separados por una distancia $d = 0.700$ m son manejados por el mismo oscilador a una frecuencia de 686 Hz. Un observador posicionado originalmente en uno de los altavoces comienza a caminar a lo largo de una línea perpendicular a la línea que une a los altavoces como se muestra en la figura P14.37. a) ¿Qué tan lejos debe caminar el observador antes de alcanzar una intensidad máxima relativa? b) ¿Qué tan lejos estará el observador del altavoz cuando detecte el primer mínimo relativo de intensidad?

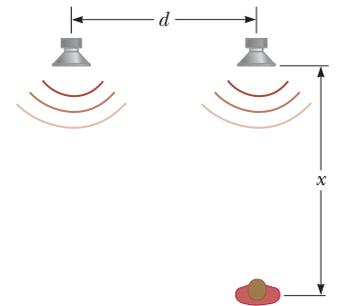


Figura P14.37

14.8 Ondas estacionarias

38. Un alambre de acero en un piano tiene una longitud de 0.700 m y una masa de 4.300×10^{-3} kg. ¿A qué tensión debe estirarse este alambre de modo tal que la vibración fundamental corresponda a un Do central ($f_c = 261.6$ Hz en la escala musical cromática)?
39. Una cuerda estirada fija en cada extremo tiene una masa de 40.0 g y una longitud de 8.00 m. La tensión en la cuerda es de 49.0 N. a) Determine las posiciones de los nodos y antinodos para el tercer armónico. b) ¿Cuál es la frecuencia de vibración para este armónico?
40. ¿En qué medida y en qué dirección, un violonchelista podría mover un dedo para ajustar el tono de una cuerda fuera de tono de 449 Hz a una en sintonía de 440 Hz? La cuerda tiene 68.0 cm de largo y el dedo está a 20.0 cm de la tuerca para el tono de 449 Hz.

41. Una cuerda tensa de longitud L vibra en cinco partes iguales, cuando es impulsada por un oscilador de 630 Hz. ¿Qué frecuencia del oscilador creará una onda estacionaria de manera que la cuerda vibre en tres segmentos?
42. Dos pedazos de alambre de acero con secciones cruzadas idénticas tienen longitudes L y $2L$. Los alambres están fijos en ambos extremos y se estiran de tal modo que la tensión en el alambre más largo es cuatro veces más grande que el corto. Si la frecuencia fundamental en el alambre corto es de 60 Hz, ¿cuál es la frecuencia del segundo armónico en el alambre más largo?
43. Un alambre de acero de 25.0 g de masa y 1.35 m de longitud se coloca en un bajo de tal modo que la distancia desde el peine hasta el puente es de 1.10 m. a) Calcule la densidad lineal de la cuerda. b) ¿Qué velocidad de onda sobre la cuerda producirá la frecuencia fundamental deseada de la cuerda de Mi, 41.2 Hz? c) Calcule la tensión requerida para obtener la frecuencia apropiada. d) Calcule la longitud de onda de la vibración de la cuerda. e) ¿Cuál es la longitud de onda del sonido producido en el aire? (Suponga que la velocidad del sonido en el aire es de 343 m/s.)
44. **S** Una onda estacionaria se configura en una cuerda de longitud variable y se tensiona con un vibrador de frecuencia variable. Ambos extremos de la cuerda están fijos. Cuando el vibrador tiene una frecuencia f_A , en una cuerda de longitud L_A y bajo una tensión T_A , n_A antinodos se aprecian en la cuerda. a) Escriba una expresión para la frecuencia f_A de una onda estacionaria en términos del número n_A , la longitud L_A , la tensión T_A y la densidad lineal μ_A . b) Si la longitud de la cuerda se duplica de $L_B = 2L_A$, ¿qué frecuencia f_B (escrita como un múltiplo de f_A) resultará en el mismo número de antinodos? Suponga que la tensión y la densidad lineal no cambian. *Sugerencia:* haga una relación de las expresiones para f_B y f_A . c) Si la frecuencia y la longitud permanecen constantes, ¿qué tensión T_B producirá $n_A + 1$ antinodos? d) Si la frecuencia se triplica y la longitud de la cuerda se duplica, ¿en qué factor debería cambiar la tensión de modo tal que se produzcan el doble de antinodos?
45. Un objeto de 12.0 kg cuelga en equilibrio desde una cuerda de longitud total $L = 5.00$ m y una densidad lineal de masa $\mu = 0.001\ 00$ kg/m. La cuerda se cruza alrededor de dos poleas ligeras sin fricción que están separadas una distancia $d = 2.00$ m (figura P14.45a). a) Determine la tensión en la cuerda. b) ¿A qué frecuencia debe vibrar

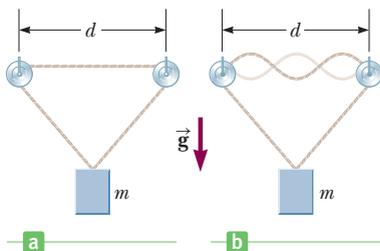


Figura P14.45

la cuerda entre las poleas para formar el patrón de onda estacionaria mostrado en la figura P14.45b?

46. **M** En el arreglo mostrado en la figura P14.46, un objeto de masa $m = 5.0$ kg cuelga desde un cordón alrededor de una polea ligera. La longitud del cordón entre el punto P y la polea es $L = 2.0$ m. a) Cuando el vibrador se configura a una frecuencia de 150 Hz, se forma una onda estacionaria de seis bucles. ¿Cuál debe ser la densidad lineal de masa del cordón? b) ¿Cuántos bucles (si hay alguno) resultarán si m cambia a 45 kg? c) ¿Cuántos bucles (si hay alguno) resultarán si m cambia a 10 kg?

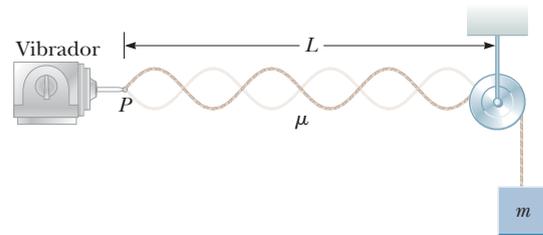


Figura P14.46

47. **BIO** Una cuerda para guitarra de 60.00 cm bajo una tensión de 50.000 N tiene una masa por unidad de longitud de 0.100 00 g/cm. ¿Cuál es la frecuencia de resonancia mayor que puede escuchar una persona capaz de oír frecuencias de hasta 20 000 Hz?

14.9 Vibraciones forzadas y resonancia

48. Las vibraciones de una onda estacionaria se configuran en una copa de cristal con cuatro nodos y cuatro antinodos igualmente espaciados alrededor de una circunferencia de 20.0 cm sobre su borde. Si ondas transversales se mueven alrededor del vidrio a 900 m/s, ¿de qué frecuencia una cantante de ópera debería producir un armónico para romper el vidrio con vibración resonante?

14.10 Ondas estacionarias en columnas de aire

49. La tráquea de una grulla blanca típica mide cerca de 5.0 pies de largo. ¿Cuál es la frecuencia de resonancia más baja de este tubo suponiendo que está cerrado en un extremo? Suponga una temperatura de 37°C.
50. La longitud total de un flautín es de 32.0 cm. La columna de aire resonante vibra como en un tubo que está abierto en ambos extremos. a) Encuentre la frecuencia de la nota más baja que puede tocar un flautín. b) Los huecos abiertos a un lado efectivamente acortan la longitud de la columna resonante. Si la nota más alta que un flautín puede tocar es de 4000 Hz, encuentre la distancia entre los antinodos adyacentes para este modo de vibración.
51. **BIO** El canal auditivo humano tiene cerca de 2.8 cm de largo. Si se considera como un tubo que está abierto en un extremo y cerrado en el tímpano, ¿cuál es la frecuencia fundamental alrededor de la cual se esperaría la audición fuera más sensible?

52. **CIC** Un túnel debajo de un río tiene 2.00 km de largo.
 a) ¿A qué frecuencias puede resonar el aire en el túnel?
 b) Explique si sería bueno hacer una ley en contra de sonar el claxon del auto mientras se está en el túnel.
53. **M** Un tubo abierto en ambos extremos tiene una frecuencia fundamental de 300 Hz cuando la temperatura es de 0 °C. a) ¿Cuál es la longitud del tubo? b) ¿Cuál es la frecuencia fundamental a una temperatura de 30.0 °C?
54. Dos frecuencias naturales adyacentes de un tubo de un órgano son 550 y 650 Hz. a) Calcule la frecuencia fundamental y la longitud de este tubo. b) Determine si el tubo está abierto en ambos extremos o sólo abierto en un extremo. c) ¿Cuál es la longitud del tubo?

14.11 Pulsaciones

55. En ciertos intervalos del teclado de un piano, más de una cuerda se afina a la misma nota para proveer fuerza extra. Por ejemplo, la nota a 1.10×10^2 Hz tiene dos cuerdas a esta frecuencia. Si una cuerda resbala de su tensión normal de 6.00×10^2 N a 5.40×10^2 N, ¿qué frecuencia de pulsación se escucha cuando el martillo golpea las dos cuerdas simultáneamente?
56. La cuerda de Sol en un violín tiene una frecuencia fundamental de 196 Hz. Tiene 30.0 cm de longitud y tiene una masa de 0.500 g. Mientras esta cuerda suena, una violinista cercana acorta efectivamente la cuerda de Sol en un violín idéntico (deslizándolo su dedo por la cuerda) hasta que se escucha una frecuencia de pulsación de 2.00 Hz entre las dos cuerdas. Cuando esto ocurre, ¿cuál es la longitud efectiva de su cuerda?
57. Dos silbatos de trenes tienen frecuencias idénticas de 1.80×10^2 Hz. Cuando un tren está en reposo en la estación y el otro se mueve cerca, una persona parada en la estación escucha pulsaciones con una frecuencia de 2.00 pulsaciones/s cuando los silbatos suenan al mismo tiempo. ¿Cuáles son las dos velocidades posibles y direcciones que puede tener el tren en movimiento?
58. Dos tubos de igual longitud están abiertos en un extremo. Cada uno tiene una frecuencia fundamental de 480 Hz a 300 K. En un tubo la temperatura del aire aumenta a 305 K. Si los dos tubos se hacen sonar juntos, ¿qué frecuencia de pulsación resulta?
59. Un estudiante sostiene un diapasón que oscila a 256 Hz. Él camina hacia una pared con una velocidad constante de 1.33 m/s. a) ¿Qué frecuencia de pulsación observa entre el diapasón y su eco? b) ¿Qué tan rápido debe caminar alejándose de la pared para observar una frecuencia de pulsación de 5.00 Hz?

14.13 El oído

60. **BIO** Puede pensarse que si el canal auditivo humano se parece a un tubo de órgano cerrado en uno de sus extremos que resuena a la frecuencia fundamental de 3000 Hz, ¿cuál es la longitud del canal? Utilice una temperatura de cuerpo normal de 37 °C para determinar la velocidad del sonido en el canal.

61. **BIO** Algunos estudios sugieren que el límite de frecuencia superior de la audición está determinada por el diámetro del tímpano. La longitud de onda de la onda de sonido y el diámetro del tímpano son aproximadamente iguales en este límite superior. Si la relación se mantiene exacta, ¿cuál es el diámetro del tímpano de una persona capaz de escuchar 20000 Hz? (Suponga una temperatura corporal de 37 °C.)

Problemas adicionales

62. El nivel de sonido típico de un mosquito zumbando es de 40 dB, y el de una aspiradora es de casi 70 dB. ¿Aproximadamente cuántos mosquitos zumbando producirían una intensidad de sonido igual a la de una aspiradora?
63. Suponga que un altavoz de 150 W emite sonido de igual forma en todas direcciones y produce un sonido con un nivel de 103 dB a una distancia de 1.60 m desde su centro. a) Encuentre la potencia de salida del altavoz. Si una vendedora afirma estarle dando 150 W por canal, se está refiriendo a la potencia eléctrica de entrada del altavoz. b) Encuentre la eficiencia del altavoz, esto es, la fracción de potencia de entrada que es convertida en potencia de salida útil.
64. Dos altavoces pequeños emiten ondas de sonido de diferentes frecuencias de igual manera en todas direcciones. El altavoz A tiene una salida de 1.00 mW y el altavoz B tiene una salida de 1.50 mW. Determine el nivel de sonido (en decibelios) en el punto C en la figura P14.64 suponiendo a) sólo el altavoz A emite sonido, b) sólo el altavoz B emite sonido y c) ambos altavoces emiten sonido.

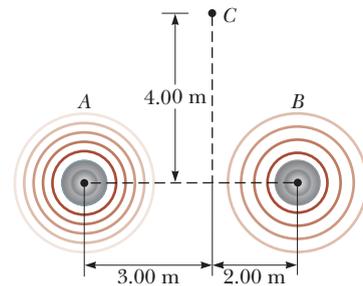


Figura P14.64

65. Se ha construido una autopista interestatal cerca de un vecindario pobre en una ciudad. En la tarde, el nivel de sonido en un cuarto rentado es de 80.0 dB mientras 100 coches pasan fuera de la ventana cada minuto. Tarde por la noche, el tráfico es sólo de cinco coches por minuto. ¿Cuál es el nivel promedio de sonido por la noche?
66. Un estudiante utiliza un oscilador de audio de frecuencia ajustable para medir la profundidad de un pozo con agua. El reporta haber escuchado dos resonancias sucesivas a 52.0 y 60.0 Hz. Si la velocidad del sonido es de 345 m/s, ¿qué tan profundo es el pozo?

67. Un altavoz estéreo se coloca entre dos observadores que están separados a 36 m de distancia, a lo largo de la línea que los conecta. Si un observador registra un nivel de intensidad de 60 dB y los demás registros un nivel de intensidad de 80 dB, ¿qué tan lejos está el altavoz de cada observador?
68. **M** Dos barcos se mueven a lo largo de una línea hacia el este (figura P14.68). Una de las naves tiene una velocidad de $v_1 = 64.0$ km/h, y la nave principal tiene una velocidad de $v_2 = 45.0$ km/h en relación con ese punto. Las dos naves se encuentran en una región del océano donde la corriente se mueve de manera uniforme hacia el oeste, en $v_{\text{corriente}} = 10.0$ km/h. La segunda nave transmite una señal de sonar a una frecuencia de 1200.0 Hz a través del agua. ¿Qué frecuencia es controlada por la primera nave?



Figura P14.68

69. Un reloj de cuarzo contiene un oscilador de cristal en forma de un bloque de cuarzo que vibra al contraerse y expandirse. Dos caras opuestas del bloque separadas 7.05 mm son antinodos que se mueven alternadamente hacia y en contra de las caras. El plano a la mitad de estas dos caras es un nodo de vibración. La velocidad del sonido en el cuarzo es de 3.70×10^3 m/s. Encuentre la frecuencia de la vibración. Una oscilación de voltaje acompaña la oscilación mecánica de tal modo que el cuarzo se describe como un *piezoeléctrico*. Un circuito eléctrico alimenta de energía y mantiene la oscilación al mismo tiempo que cuenta las pulsaciones de voltaje para mantener el tiempo.

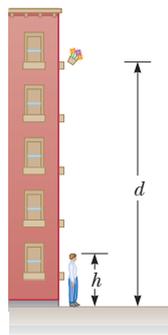


Figura P14.70

70. Una maceta es arrojada desde un balcón de una altura $d = 20.0$ m sobre la banqueta y cae sobre un hombre desprevenido de estatura $h = 1.75$ m que está parado abajo. Suponga que el hombre requiere de 0.300 s para responder a la advertencia. ¿Qué tan cerca de la banqueta puede caer la maceta antes que sea demasiado tarde como para prevenir al hombre gritando desde el balcón?
71. En un día laboral, el nivel promedio de decibeles de una calle ocupada es de 70 dB, con 100 coches por minuto pasando. Si el número de coches se reduce a 25 por minuto en un fin de semana, ¿cuál es el nivel de decibeles en la calle?

72. Una flauta está diseñada de tal modo que reproduce una frecuencia de 261.6 Hz, un Do central, cuando todos los huecos están cubiertos y la temperatura es 20.0°C . a) Considere la flauta como un tubo abierto en ambos extremos y encuentre su longitud, suponiendo que el Do central es la frecuencia fundamental. b) Un segundo intérprete, cerca en un cuarto más frío, intenta también tocar un Do central en una flauta idéntica. Se escucha una frecuencia de pulsación de 3.00 pulsaciones/s. ¿Cuál es la temperatura del cuarto?
73. Un bloque con un altavoz atornillado a él se conecta a un resorte con constante de resorte $k = 20.0$ N/m, como se muestra en la figura P14.73. La masa total del bloque y el altavoz es de 5.00 kg y la amplitud del movimiento de la unidad es de 0.500 m. Si el altavoz emite ondas de sonido con frecuencia de 440 Hz, determine a) las frecuencias más bajas y b) las más altas escuchadas por la persona a la derecha del altavoz.

74. Un estudiante se para a varios metros frente de una pa-

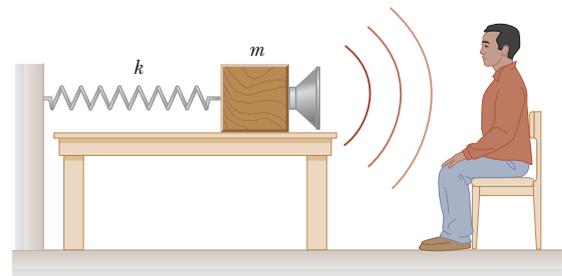


Figura P14.73

red reflectora suave sosteniendo un tablero sobre el cual un alambre está fijo en cada extremo. El alambre vibra, en su tercer armónico tiene 75.0 cm de largo y tiene una masa de 2.25 g con una tensión de 400 N. Un segundo estudiante escucha 8.30 pulsaciones por segundo mientras se mueve hacia la pared. ¿Cuál es la velocidad del estudiante al aproximarse a la pared?

75. Por excitación propia es posible producir tanto ondas longitudinales como ondas transversales en una larga barra de metal. En un caso particular, la barra tiene 150 cm de largo y 0.200 cm de radio y tiene una masa de 50.9 g. El módulo de Young del material es 6.80×10^{10} Pa. Determine la tensión requerida en la barra de modo tal que la proporción entre la velocidad de las ondas longitudinales y la velocidad de las ondas transversales sea 8.
76. Un tubo de cobre de 0.500 m de longitud, abierto en ambos extremos tiene una frecuencia fundamental de 350 Hz. a) Determinar la temperatura del aire en la tubería. b) Si la temperatura se incrementa en 20.0°C , ¿cuál es la nueva frecuencia fundamental de la tubería? Asegúrese de incluir los efectos de la temperatura tanto en la velocidad del sonido en el aire y la longitud de la tubería.



Ésta es una vista nocturna de los múltiples destellos de relámpagos cayendo en el observatorio de Kitt Peak en Tucson, Arizona. Durante una tormenta eléctrica, una alta concentración de carga eléctrica en una nube crea un campo eléctrico mayor al normal entre la nube y la superficie terrestre con carga negativa. Este fuerte campo eléctrico crea una descarga eléctrica, una enorme chispa, entre la nube cargada y la tierra. Otras descargas que se observan en el cielo incluyen descargas nube a nube y las más frecuentes descargas intranube.

Fuerzas eléctricas y campos eléctricos

15

La electricidad es el alma de la civilización tecnológica y la sociedad moderna. Sin ella, se regresaría a mediados del siglo XIX: no teléfonos, no televisión, ninguno de los aparatos electrodomésticos que se dan por sentado. La medicina moderna sería una fantasía y, debido a la falta de equipo experimental sofisticado y computadoras rápidas, y especialmente la lenta diseminación de la información, la ciencia y la tecnología crecerían a un ritmo glacial.

En lugar de ello, con el descubrimiento y dominio de las fuerzas y campos eléctricos, se pueden ver arreglos de átomos, sondear el funcionamiento interior de una célula y enviar naves espaciales más allá de los límites del sistema solar. Todo esto fue posible sólo en las últimas generaciones de la vida humana; un parpadeo en comparación con los millones de años que la especie pasó forrajeando en las sabanas de África.

Alrededor de 700 a.C., los antiguos griegos realizaron el primer estudio conocido de la electricidad. Todo comenzó cuando alguien notó que un material fósil llamado ámbar atraía pequeños objetos después de frotarse con lana. Desde entonces se sabe que este fenómeno no se restringe al ámbar y la lana, sino que ocurre (en cierto grado) cuando casi cualesquiera dos sustancias no conductoras se frotan una con otra.

En este capítulo utilizamos el efecto de cargar mediante fricción para comenzar una investigación de las fuerzas eléctricas. Luego estudiamos la ley de Coulomb, que es la ley fundamental de fuerza entre cualesquiera dos partículas cargadas estacionarias. Se introduce el concepto de campo eléctrico asociado con cargas y se describen sus efectos sobre otras partículas cargadas. Se finaliza con discusiones del generador Van de Graaff y de la ley de Gauss.

- 15.1** Propiedades de las cargas eléctricas
- 15.2** Aislantes y conductores
- 15.3** Ley de Coulomb
- 15.4** El campo eléctrico
- 15.5** Líneas de campo eléctrico
- 15.6** Conductores en equilibrio electrostático
- 15.7** El experimento de la gota de aceite de Millikan
- 15.8** El generador Van de Graaff
- 15.9** Flujo eléctrico y ley de Gauss



© American Philosophical Society/AIP

Benjamín Franklin (1706-1790)

Franklin fue impresor, escritor, científico físico, inventor, diplomático y uno de los padres fundadores de Estados Unidos. Su obra acerca de la electricidad a finales de 1740 transformó una madeja de observaciones no relacionadas en una ciencia coherente.

Cargas iguales se repelen; ▶
cargas diferentes se atraen

15.1 Propiedades de las cargas eléctricas

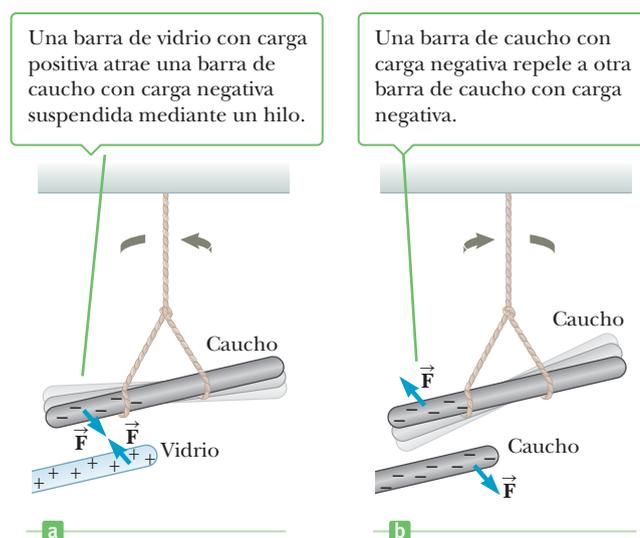
Después de pasar un peine de plástico por el cabello, descubrirá que el peine atrae trozos de papel. A menudo, la fuerza de atracción es lo suficientemente fuerte como para suspender el papel del peine, lo que desafía el jalón gravitacional de toda la Tierra. El mismo efecto ocurre con otros materiales que se frotran, como vidrio y caucho duro.

Otro experimento simple es frotar un globo inflado contra lana (o en el cabello). En un día seco, el globo frotado se pegará a la pared de una habitación, con frecuencia durante horas. Estos materiales quedaron cargados eléctricamente. Usted puede dar a su cuerpo una carga eléctrica si frota sus zapatos vigorosamente sobre un tapete de lana o al deslizarse a través del asiento de un automóvil. Luego puede sorprender y molestar a un amigo o compañero de trabajo con un toque de luz en el brazo, lo que entrega un ligero choque tanto a usted como a su víctima. (Si el compañero de trabajo es su jefe, ¡no espere un ascenso!) Estos experimentos funcionan mejor en un día seco porque la humedad excesiva puede facilitar la fuga de la carga.

Los experimentos también demuestran que existen dos tipos de carga eléctrica, que Benjamín Franklin (1706–1790) nombró **positiva** y **negativa**. La figura 15.1 ilustra la interacción de las dos cargas. Una barra dura de caucho (o plástico) que se frotó con piel se suspende mediante un trozo de cuerda. Cuando se le acerca una barra de vidrio que se frotó con seda, la barra de caucho es atraída hacia la barra de vidrio (figura 15.1a). Si dos barras de caucho cargadas (o dos barras de vidrio cargadas) se acercan una a la otra, como en la figura 15.1b, la fuerza entre ellas es repulsiva. Estas observaciones se pueden explicar al suponer que las barras de caucho y vidrio adquirieron diferentes tipos de exceso de carga. Se usa la convención sugerida por Franklin, donde el exceso de carga eléctrica en la barra de vidrio se denomina positiva y la de la barra de caucho se llama negativa. Sobre la base de tales observaciones, concluimos que **cargas iguales se repelen** y **cargas distintas se atraen**. Por lo general, los objetos contienen igual cantidad de carga positiva y negativa; las fuerzas eléctricas entre los objetos surgen cuando dichos objetos tienen cargas netas negativa o positiva.

Los portadores básicos de carga positiva de la naturaleza son los protones, que junto con los neutrones, se ubican en los núcleos de los átomos. Los núcleos, aproximadamente de 10^{-15} m de radio, están rodeados por una nube de electrones con carga negativa aproximadamente 10 mil veces más grande. Un electrón tiene la misma magnitud de carga que un protón, pero con signo opuesto. En un gramo de materia existen alrededor de 10^{23} protones con carga positiva e igual número de electrones con carga negativa, de modo que la carga neta es cero.

Figura 15.1 Un sistema experimental para la observación de la fuerza eléctrica entre dos objetos cargados.



Puesto que el núcleo de un átomo se mantiene firmemente en su lugar dentro de un sólido, los protones nunca se mueven de un material a otro. Los electrones son mucho más ligeros que los protones y por lo tanto se aceleran más fácilmente mediante fuerzas. Más aún, ocupan las regiones exteriores del átomo. En consecuencia, los objetos se cargan al ganar o perder electrones.

La carga se transfiere fácilmente de un tipo de material a otro. Frotar los dos materiales uno con otro sirve para aumentar el área de contacto, lo que facilita el proceso de transferencia.

Una característica importante de la carga es que **la carga eléctrica siempre se conserva**. La carga no se *crea* cuando dos objetos neutros se frotan uno con otro; en vez de ello, los objetos se cargan porque **la carga negativa se transfiere de un objeto al otro**. Un objeto gana una carga negativa mientras el otro pierde una cantidad igual de carga negativa y por lo tanto se queda con una carga positiva neta. Cuando una barra de vidrio se frota con seda, como en la figura 15.2, los electrones se transfieren de la barra a la seda. Como resultado, la barra de vidrio porta una carga positiva neta, la seda una carga negativa neta. Del mismo modo, cuando el caucho se frota con piel, los electrones se transfieren de la piel al caucho.

En 1909, Robert Millikan (1886–1953) descubrió que si un objeto está cargado, su carga siempre es un múltiplo de una unidad fundamental de carga, que se designa mediante el símbolo e . En términos modernos, decimos que la carga está **cuantizada**, lo cual significa que la carga ocurre en paquetes discretos que no se pueden subdividir más. Un objeto puede tener una carga de $\pm e$, $\pm 2e$, $\pm 3e$, etc., pero nunca¹ una carga fraccional de $\pm 0.5e$ o $\pm 0.22e$. Otros experimentos en la época de Millikan demostraron que el electrón tiene una carga de $-e$ y el protón tiene una carga igual pero opuesta de $+e$. Algunas partículas, como un neutrón, no tienen carga neta. Un átomo neutro (un átomo sin carga neta) contiene tantos protones como electrones. Ahora sabemos que el valor de e es $1.602\ 19 \times 10^{-19}$ C. (La unidad SI de carga eléctrica es el **coulomb** o C.)

15.2 Aislantes y conductores

Las sustancias se pueden clasificar en términos de su habilidad para conducir carga eléctrica.

En los **conductores**, las cargas eléctricas se mueven libremente en respuesta a una fuerza eléctrica. Todos los otros materiales se llaman **aislantes**.

El vidrio y el caucho son aislantes. Cuando tales materiales se cargan mediante frotación, sólo el área frotada queda cargada y no hay tendencia de que la carga se mueva hacia otras regiones del material. En contraste, los materiales como cobre, aluminio y plata son buenos conductores. Cuando tales materiales se cargan en alguna pequeña región, la carga se distribuye por sí misma con facilidad sobre toda la superficie del material. Si sostiene una barra de cobre en su mano y frota la barra con lana o piel, no atraerá un trozo de papel. Esto puede sugerir que un metal no se puede cargar. Sin embargo, si sostiene la barra de cobre con un aislante y luego la frota con lana o piel, la barra permanece cargada y atrae al papel. En el primer caso, las cargas eléctricas producidas por la frotación se movieron fácilmente desde el cobre a través de su cuerpo y finalmente a tierra. En el segundo caso, el mango aislante evita el flujo de carga a tierra.

Los **semiconductores** son una tercera clase de materiales y sus propiedades eléctricas están en algún lugar entre las de los aislantes y los conductores. Silicio y germanio son semiconductores bien conocidos que se usan ampliamente en la fabricación de una variedad de dispositivos electrónicos.

◀ La carga se conserva

Cada electrón (carga negativa) transferido desde la barra a la seda deja una carga equivalente positiva en la barra.

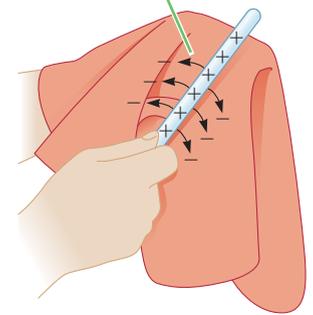


Figura 15.2 Cuando una barra de vidrio se frota con seda, los electrones se transfieren del vidrio a la seda. Debido a la conservación de carga, cada electrón agrega carga negativa a la seda y una carga positiva igual queda en la barra. Además, puesto que las cargas se transfieren en paquetes discretos, las cargas en los dos objetos son $\pm e$, $\pm 2e$, $\pm 3e$, etcétera.

¹ Existe fuerte evidencia de la existencia de partículas fundamentales llamadas **quarks** que tienen cargas de $\pm e/3$ o $\pm 2e/3$. La carga *todavía* está cuantizada, pero en unidades de $\pm e/3$ en lugar de $\pm e$. En el capítulo 30 se presenta un análisis más completo de los quarks y sus propiedades.

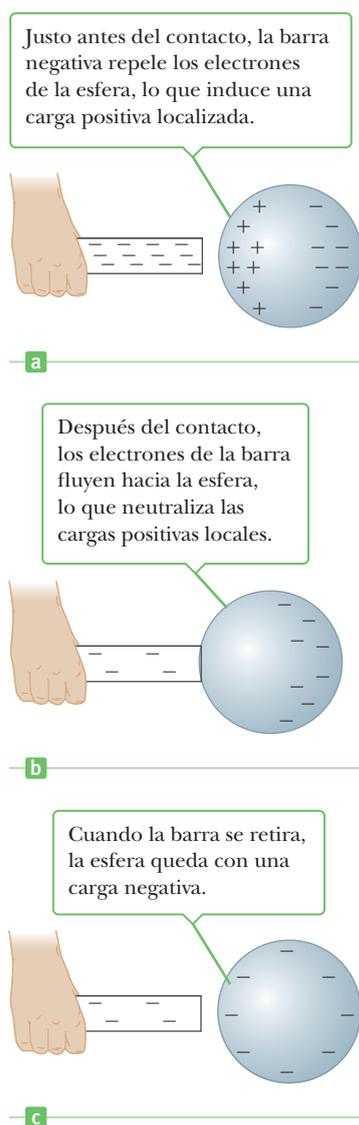


Figura 15.3 Carga de un objeto metálico mediante conducción.

Carga mediante conducción

Considere una barra de caucho con carga negativa que se pone en contacto con una esfera conductora neutra aislada. El exceso de electrones en la barra repele a los electrones en la esfera, lo que crea cargas positivas locales en la esfera neutra. En contacto, algunos electrones en la barra ahora son capaces de moverse hacia la esfera, como en la figura 15.3, lo que neutraliza las cargas positivas. Cuando la barra se retira, la esfera queda con una carga negativa neta. A este proceso se le conoce como carga mediante **conducción**. El objeto que se carga por tal proceso (la esfera) siempre queda con una carga que tiene el mismo signo que el objeto que efectúa la carga (la barra de caucho).

Carga mediante inducción

Decimos que un objeto está **aterizado** cuando se conecta a un alambre conductor o tubería de cobre introducida en la tierra. La tierra se puede considerar como un depósito infinito de electrones; en efecto, puede aceptar o suministrar un número ilimitado de electrones. Con esta idea en mente, es posible comprender la carga de un conductor mediante un proceso conocido como **inducción**.

Considere una barra de caucho con carga negativa que se acerca a una esfera conductora neutra (no cargada) aislada, de modo que no hay ruta de conducción a tierra (figura 15.4). Inicialmente, la esfera es eléctricamente neutra (figura 15.4a). Cuando la barra con carga negativa se acerca más a la esfera, la fuerza repulsiva entre los electrones en la barra y los de la esfera provoca que algunos electrones se muevan hacia el lado de la esfera más alejado de la barra (figura 15.4b). La región de la esfera más cercana a la barra con carga negativa tiene un exceso de carga positiva debido a la migración de electrones lejos de dicha ubicación. Si un alambre conductor aterizado se conecta a la esfera, como en la figura 15.4c, entonces algunos de los electrones dejan la esfera y viajan a tierra. Si el alambre a tierra se retira (figura 15.4d), entonces la esfera conductora queda con un exceso de carga positiva inducida. Finalmente, cuando la barra de caucho se remueve de la vecindad de la esfera (figura 15.4e), la carga positiva inducida permanece en la esfera no aterizada. Aun cuando los núcleos atómicos con carga positiva permanecen fijos, este exceso de carga positiva se distribuye uniformemente sobre la superficie de la esfera no aterizada debido a las fuerzas repulsivas entre las cargas iguales y la enorme movilidad de los electrones en un metal.

En el proceso de inducir una carga sobre la esfera, la barra de caucho cargada no pierde parte de su carga negativa porque nunca entra en contacto con la esfera. Más aún, la esfera queda con una carga opuesta a la de la barra de caucho. **Cargar un objeto mediante inducción no requiere contacto con el objeto que induce la carga.**

Un proceso similar para cargar mediante inducción en conductores también tiene lugar en los aislantes. En la mayoría de los átomos o moléculas neutras, el centro de carga positiva coincide con el centro de carga negativa. Sin embargo, en presencia de un objeto cargado, estos centros pueden separarse ligeramente, lo que resulta en más carga positiva sobre un lado de la molécula que en el otro. Este efecto se conoce como **polarización**. El realineamiento de carga dentro de moléculas individuales produce una carga inducida en la superficie del aislante, como se muestra en la figura 15.5a. Esta propiedad explica por qué un globo cargado mediante frotación se pegará a una pared eléctricamente neutra o por qué el peine que acabas de usar en el cabello atrae pequeños trozos de papel neutro.

Examen rápido

- 15.1** Una pared neutra atrae un objeto suspendido *A*. Éste también es atraído por un objeto con carga positiva *B*. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero acerca del objeto *A*? a) No está cargado. b) Tiene carga negativa. c) Tiene carga positiva. d) Puede estar cargado o no cargado.

15.3 Ley de Coulomb

En 1785, Charles Coulomb (1736–1806) estableció experimentalmente la ley fundamental de la fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estacionarias.

Una **fuerza eléctrica** tiene las siguientes propiedades:

1. Está dirigida a lo largo de una recta que une las dos partículas y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación r entre ellas.
2. Es proporcional al producto de las magnitudes de las cargas, $|q_1|$ y $|q_2|$, de las dos partículas.
3. Es atractiva si las cargas son de signo opuesto y repulsiva si las cargas tienen el mismo signo.

A partir de estas observaciones, Coulomb propuso la siguiente forma matemática para la fuerza eléctrica entre dos cargas:

La magnitud de la fuerza eléctrica F entre las cargas q_1 y q_2 separada por una distancia r está dada por

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [15.1]$$

donde k_e es una constante llamada *constante de Coulomb*.

La ecuación 15.1, conocida como **ley de Coulomb**, se aplica exactamente sólo a cargas puntuales y a distribuciones esféricas de cargas, en cuyo caso r es la distancia entre los dos centros de carga. Las fuerzas eléctricas entre cargas inmóviles se llaman fuerzas *electrostáticas*. Las cargas en movimiento, además, crean fuerzas magnéticas, que se estudian en el capítulo 19.

El valor de la constante de Coulomb en la ecuación 15.1 depende de la elección de unidades. La unidad SI de carga es el **coulomb** (C). A partir del experimento, sabemos que la **constante de Coulomb** en unidades SI tiene el valor

$$k_e = 8.987\,5 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad [15.2]$$

Este número se puede redondear, dependiendo de la exactitud de otras cantidades en un problema dado. En el texto emplearemos dos o tres dígitos significativos, como siempre.

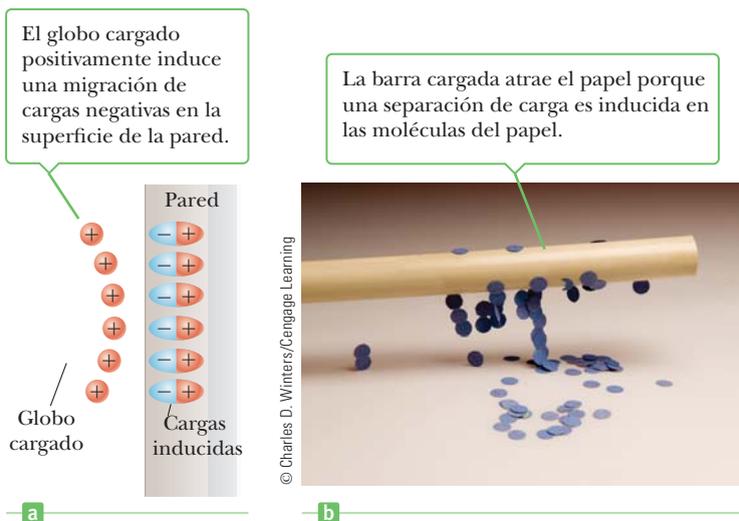
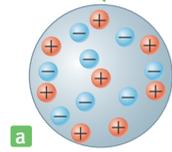
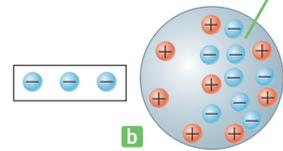


Figura 15.5 a) Un globo cargado es acercado a una pared aislante. b) Una barra de carga es acercada a trozos de papel.

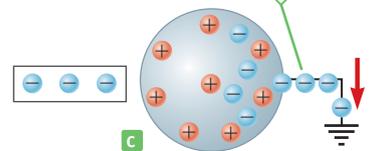
Una esfera metálica neutra, con igual número de cargas positivas y negativas.



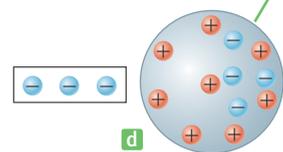
Los electrones en una esfera neutra se redistribuyen cuando una barra de caucho cargada se coloca cerca de la esfera.



Cuando la esfera está aterrizada, algunos de sus electrones salen a través del alambre de tierra.



Cuando la conexión a tierra se retira, la esfera tiene exceso de carga positiva que no se distribuye uniformemente.



Cuando la barra se retira, los electrones restantes se redistribuyen uniformemente y hay una distribución uniforme neta de carga positiva sobre la esfera.

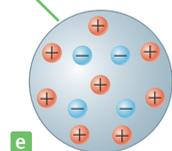


Figura 15.4 Carga de un objeto metálico mediante *inducción*. a) Una esfera metálica neutra b) una barra de caucho cargada se coloca cerca de la esfera c) la esfera está aterrizada d) la conexión a tierra se retira e) la barra se retira.

AIP/Emilio Segre Visual Archives, E. Scott Barr Collection



Charles Coulomb (1736-1806)

La principal contribución de Coulomb a la ciencia fue en el campo de la electrostática y el magnetismo. Durante su vida, también investigó las resistencias de los materiales e identificó las fuerzas que afectan a los objetos en vigas y, por lo tanto, contribuyó al campo de la mecánica estructural.

Tabla 15.1 Carga y masa de electrón, protón y neutrón

Partícula	Carga (C)	Masa (kg)
Electrón	-1.60×10^{-19}	9.11×10^{-31}
Protón	$+1.60 \times 10^{-19}$	1.67×10^{-27}
Neutrón	0	1.67×10^{-27}

La carga sobre el protón tiene una magnitud de $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C. Por lo tanto, se necesitarían $1/e = 6.3 \times 10^{18}$ protones para crear una carga total de +1.0 C. Del mismo modo, 6.3×10^{18} electrones tendrían una carga de -1.0 C. Compare esta carga con el número de electrones libres en 1 cm³ de cobre, que está en el orden de 10^{23} . Aún así, 1.0 C es una cantidad muy grande. En experimentos electrostáticos típicos en los que una barra de caucho o vidrio se carga mediante fricción, hay una carga neta en el orden de 10^{-6} C (= 1 μC). Sólo una fracción muy pequeña de la carga total disponible se transfiere entre la barra y el material que frota. La tabla 15.1 menciona las cargas y masas de electrón, protón y neutrón.

Cuando use la ley de fuerza de Coulomb, recuerde que la fuerza es una cantidad vectorial y se debe tratar en concordancia. La figura activa 15.6a muestra la fuerza de repulsión eléctrica entre dos partículas con carga positiva. Como otras fuerzas, las fuerzas eléctricas obedecen la tercera ley de Newton; por lo tanto, las fuerzas \vec{F}_{12} y \vec{F}_{21} son iguales en magnitud pero opuestas en dirección. (La notación \vec{F}_{12} denota la fuerza que ejerce la partícula 1 sobre la partícula 2; del mismo modo, \vec{F}_{21} es la fuerza que ejerce la partícula 2 sobre la partícula 1.) A partir de la tercera ley de Newton, F_{12} y F_{21} siempre son iguales sin importar si q_1 y q_2 tienen la misma magnitud.

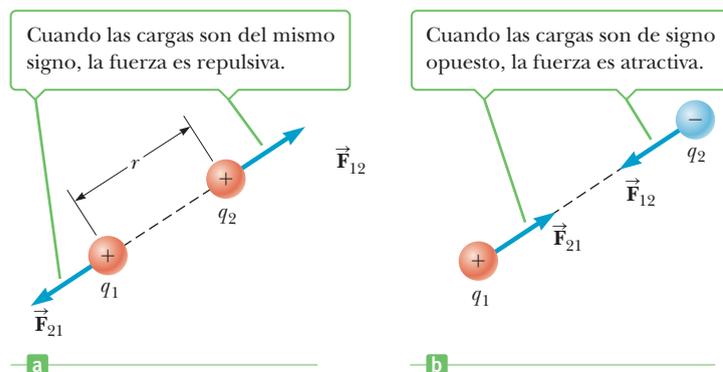
Examen rápido

15.2 El objeto A tiene una carga de +2 μC y el objeto B una carga de +6 μC. ¿Cuál enunciado es verdadero?

- a) $\vec{F}_{AB} = -3\vec{F}_{BA}$
- b) $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$
- c) $3\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$

La fuerza de Coulomb es similar a la fuerza gravitacional. Ambas actúan a una distancia sin contacto directo. Ambas son inversamente proporcionales a la distancia al cuadrado, con la fuerza dirigida a lo largo de una recta que conecta los dos cuerpos. La forma matemática es la misma, con las masas m_1 y m_2 en la ley de Newton sustituidas por q_1 y q_2 en la ley de Coulomb y con la constante k_e de Coulomb en sustitución de la constante G de Newton. Existen dos diferencias importantes: 1) las fuerzas eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas, pero las fuerzas gravitacionales siempre son atractivas y 2) la fuerza eléctrica entre partículas elementales cargadas es mucho más intensa que la fuerza gravitacional entre las mismas partículas, como lo demuestra el siguiente ejemplo.

Figura activa 15.6 Dos cargas puntuales separadas una distancia r ejercen una fuerza mutua dada por la ley de Coulomb. La fuerza sobre q_1 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza sobre q_2 .



EJEMPLO 15.1 Fuerzas en un átomo de hidrógeno

OBJETIVO Contrastar las magnitudes de una fuerza eléctrica y una fuerza gravitacional.

PROBLEMA El electrón y el protón de un átomo de hidrógeno están separados (en promedio) por una distancia de aproximadamente 5.3×10^{-11} m. **a)** Determine las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional que cada partícula ejerce sobre la otra y la razón de la fuerza eléctrica F_e a la fuerza gravitacional F_g . **b)** Calcule la aceleración causada por la fuerza eléctrica del protón sobre el electrón. Repita para la aceleración gravitacional.

ESTRATEGIA Resolver este problema sólo es cuestión de sustituir cantidades conocidas en las dos leyes de fuerza y luego encontrar la razón.

SOLUCIÓN

a) Calcule las magnitudes de las fuerzas eléctrica y gravitacional, y encuentre la razón F_e/F_g .

Sustituya $|q_1| = |q_2| = e$ y la distancia en la ley de Coulomb para encontrar la fuerza eléctrica:

$$F_e = k_e \frac{|e|^2}{r^2} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Sustituya las masas y la distancia en la ley de gravedad de Newton para encontrar la fuerza gravitacional:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \left(6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2} = 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

Encuentre la razón entre las dos fuerzas:

$$\frac{F_e}{F_g} = 2.3 \times 10^{39}$$

b) Calcule la aceleración del electrón causada por la fuerza eléctrica. Repita para la aceleración gravitacional.

Use la segunda ley de Newton y la fuerza eléctrica que encontró en el inciso a):

$$m_e a_e = F_e \rightarrow a_e = \frac{F_e}{m_e} = \frac{8.2 \times 10^{-8} \text{ N}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 9.0 \times 10^{22} \text{ m/s}^2$$

Use la segunda ley de Newton y la fuerza gravitacional que encontró en el inciso a):

$$m_e a_g = F_g \rightarrow a_g = \frac{F_g}{m_e} = \frac{3.6 \times 10^{-47} \text{ N}}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = 4.0 \times 10^{-17} \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La fuerza gravitacional entre los constituyentes cargados del átomo es despreciable en comparación con la fuerza eléctrica entre ellos. Sin embargo, la fuerza eléctrica es tan intensa que cualquier carga neta sobre un objeto atrae rápidamente cargas opuestas cercanas, lo que neutraliza el objeto. Como resultado, la gravedad juega un mayor papel en la mecánica de los objetos en movimiento de la vida diaria.

PREGUNTA 15.1 Si la distancia entre dos cargas se duplica, ¿en qué factor cambia la magnitud de la fuerza eléctrica?

EJERCICIO 15.1 a) Encuentre la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos protones separados por 1 femtómetro (10^{-15} m), aproximadamente la distancia entre dos protones en el núcleo de un átomo de helio. b) Si los protones no se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte, ¿cuál sería su aceleración inicial debido a la fuerza eléctrica entre ellos?

RESPUESTAS a) 2×10^2 N b) 1×10^{29} m/s²

El principio de superposición

Cuando un número de cargas separadas actúa sobre la carga de interés, cada una ejerce una fuerza eléctrica. Estas fuerzas eléctricas se pueden calcular por separado, una a la vez,

y luego sumarse como vectores. Éste es otro ejemplo del **principio de superposición**. A continuación se ilustra este procedimiento en una dimensión.

EJEMPLO 15.2 Encontrar equilibrio electrostático

OBJETIVO Aplicar la ley de Coulomb en una dimensión.

PROBLEMA Tres cargas yacen a lo largo del eje x , como en la figura 15.7. La carga positiva $q_1 = 15 \mu\text{C}$ está en $x = 2.0 \text{ m}$, y la carga positiva $q_2 = 6.0 \mu\text{C}$ está en el origen. ¿Dónde debe colocarse una carga *negativa* q_3 sobre el eje x , de modo que la fuerza eléctrica resultante sobre ella sea cero?

ESTRATEGIA Si q_3 está a la derecha o a la izquierda de las otras dos cargas, la fuerza neta sobre q_3 no puede ser cero porque entonces \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} actúan en la misma dirección. En consecuencia, q_3 se debe encontrar entre las otras dos cargas. Escriba \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} en términos de la posición coordenada desconocida x , luego súmelas e iguale a cero y resuelva para la incógnita. La solución se puede obtener con la fórmula cuadrática.

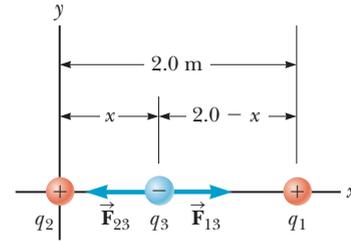


Figura 15.7 (Ejemplo 15.2) Tres cargas puntuales se colocan a lo largo del eje x . La carga q_3 es negativa, mientras que q_1 y q_2 son positivas. Si la fuerza resultante sobre q_3 es cero, la fuerza \vec{F}_{13} ejercida por q_1 sobre q_3 debe ser igual en magnitud y opuesta a la fuerza \vec{F}_{23} ejercida por q_2 sobre q_3 .

SOLUCIÓN

Escriba la componente x de \vec{F}_{13} :

$$F_{13x} = +k_e \frac{(15 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{(2.0 \text{ m} - x)^2}$$

Escriba la componente x de \vec{F}_{23} :

$$F_{23x} = -k_e \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{x^2}$$

Igualé la suma a cero:

$$k_e \frac{(15 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{(2.0 \text{ m} - x)^2} - k_e \frac{(6.0 \times 10^{-6} \text{ C})|q_3|}{x^2} = 0$$

Cancele k_e , 10^{-6} y q_3 de la ecuación y reordene términos (las cifras significativas explícitas y las unidades se suspenden temporalmente por claridad):

$$(1) \quad 6(2 - x)^2 = 15x^2$$

Escriba esta ecuación en forma cuadrática estándar, $ax^2 + bx + c = 0$:

$$6(4 - 4x + x^2) = 15x^2 \rightarrow 2(4 - 4x + x^2) = 5x^2$$

$$3x^2 + 8x - 8 = 0$$

Aplique la fórmula cuadrática:

$$x = \frac{-8 \pm \sqrt{64 - (4)(3)(-8)}}{2 \cdot 3} = \frac{-4 \pm 2\sqrt{10}}{3}$$

Sólo la raíz positiva tiene sentido:

$$x = 0.77 \text{ m}$$

COMENTARIOS Advierta que se requirió razonamiento físico para elegir entre dos posibles respuestas para x , que casi siempre es el caso cuando se involucran ecuaciones cuadráticas. Podría evitarse el uso de la fórmula cuadrática al tomar la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación (1); sin embargo, con frecuencia este atajo no está disponible.

PREGUNTA 15.2 Si q_1 tiene la misma magnitud que antes, pero es negativa, ¿en qué región a lo largo del eje x sería posible que la fuerza eléctrica neta sobre q_3 sea cero? a) $x < 0$ b) $0 < x < 2 \text{ m}$ c) $2 \text{ m} < x$

EJERCICIO 15.2 Tres cargas se encuentran a lo largo del eje x . Una carga positiva $q_1 = 10.0 \mu\text{C}$ está en $x = 1.00 \text{ m}$, y una carga negativa $q_2 = -2.00 \mu\text{C}$ está en el origen. ¿Dónde se debe colocar una carga positiva q_3 sobre el eje x de modo que la fuerza resultante sea cero?

RESPUESTA $x = -0.809 \text{ m}$

■ EJEMPLO 15.3 Un triángulo de carga

OBJETIVO Aplicar la ley de Coulomb en dos dimensiones.

PROBLEMA Considere tres cargas puntuales en las esquinas de un triángulo, como se muestra en la figura 15.8, donde $q_1 = 6.00 \times 10^{-9} \text{ C}$, $q_2 = -2.00 \times 10^{-9} \text{ C}$ y $q_3 = 5.00 \times 10^{-9} \text{ C}$. **a)** Encuentre los componentes de la fuerza \vec{F}_{23} ejercida por q_2 sobre q_3 . **b)** Encuentre las componentes de la fuerza \vec{F}_{13} ejercida por q_1 sobre q_3 . **c)** Encuentre la fuerza resultante sobre q_3 , en términos de las componentes y también en términos de magnitud y dirección.

ESTRATEGIA La ley de Coulomb da la magnitud de cada fuerza, que se puede separar con trigonometría de triángulo recto en componentes x y y . Sume los vectores en forma de componentes y luego encuentre la magnitud y dirección del vector resultante.

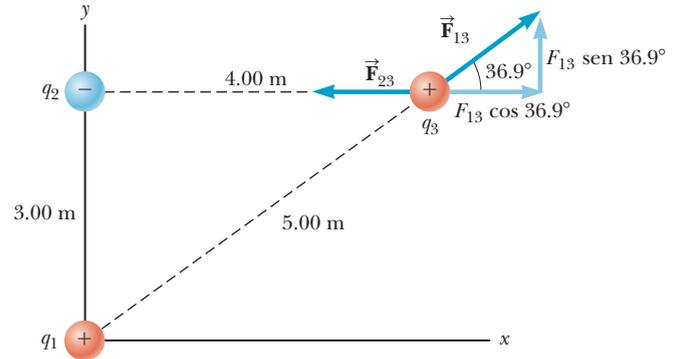


Figura 15.8 (Ejemplo 15.3) La fuerza ejercida por q_1 sobre q_3 es \vec{F}_{13} . La fuerza ejercida por q_2 sobre q_3 es \vec{F}_{23} . La fuerza resultante \vec{F}_3 ejercida sobre q_3 es la suma vectorial $\vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$.

SOLUCIÓN

a) Determine las componentes de la fuerza ejercida por q_2 sobre q_3 .

Encuentre la magnitud de \vec{F}_{23} con la ley de Coulomb:

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.00 \times 10^{-9} \text{ C})(5.00 \times 10^{-9} \text{ C})}{(4.00 \text{ m})^2}$$

$$F_{23} = 5.62 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Puesto que \vec{F}_{23} es horizontal y apunta en la dirección negativa, el negativo de la magnitud proporciona la componente x , y la componente y es cero:

$$F_{23x} = -5.62 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$F_{23y} = 0$$

b) Determine las componentes de la fuerza ejercida por q_1 sobre q_3 .

Encuentre la magnitud de \vec{F}_{13} :

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(6.00 \times 10^{-9} \text{ C})(5.00 \times 10^{-9} \text{ C})}{(5.00 \text{ m})^2}$$

$$F_{13} = 1.08 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Use el triángulo dado para encontrar las componentes de \vec{F}_{13} :

$$F_{13x} = F_{13} \cos \theta = (1.08 \times 10^{-8} \text{ N}) \cos (36.9^\circ) = 8.64 \times 10^{-9} \text{ N}$$

$$F_{13y} = F_{13} \sin \theta = (1.08 \times 10^{-8} \text{ N}) \sin (36.9^\circ) = 6.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

c) Determine las componentes del vector resultante.

Sume las componentes x para encontrar la resultante F_x :

$$F_x = -5.62 \times 10^{-9} \text{ N} + 8.64 \times 10^{-9} \text{ N} = 3.02 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Sume las componentes y para encontrar la resultante F_y :

$$F_y = 0 + 6.48 \times 10^{-9} \text{ N} = 6.48 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Encuentre la magnitud de la fuerza resultante sobre la carga q_3 , con el uso del teorema de Pitágoras:

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(3.01 \times 10^{-9} \text{ N})^2 + (6.50 \times 10^{-9} \text{ N})^2} = 7.15 \times 10^{-9} \text{ N}$$

Determine el ángulo que la fuerza resultante forma con respecto al eje x positivo:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{6.48 \times 10^{-9} \text{ N}}{3.02 \times 10^{-9} \text{ N}}\right) = 65.0^\circ$$

(continúa)

COMENTARIOS Los métodos utilizados aquí son como los empleados con la ley de gravedad de Newton en dos dimensiones.

PREGUNTA 15.3 Sin calcular realmente la fuerza eléctrica sobre q_2 , determine el cuadrante hacia donde apunta el vector de fuerza eléctrica.

EJERCICIO 15.3 Con el mismo triángulo, encuentre las componentes vectoriales de la fuerza eléctrica sobre q_1 , así como la magnitud y dirección del vector.

RESPUESTAS $F_x = -8.64 \times 10^{-9} \text{ N}$, $F_y = 5.52 \times 10^{-9} \text{ N}$, $F = 1.03 \times 10^{-8} \text{ N}$, $\theta = 147^\circ$

15.4 El campo eléctrico

La fuerza gravitacional y la fuerza electrostática son capaces de actuar a lo largo del espacio, lo que produce un efecto incluso cuando no hay algún contacto físico entre los objetos involucrados. Las fuerzas de campo se pueden estudiar en varias formas, pero un enfoque desarrollado por Michael Faraday (1791–1867) es el más práctico. En este enfoque, se dice que existe un **campo eléctrico** en la región de espacio alrededor de un objeto cargado. El campo eléctrico ejerce una fuerza eléctrica sobre cualquier otro objeto cargado dentro del campo. Esto difiere del concepto de la ley de Coulomb de una fuerza ejercida a una distancia en que la fuerza ahora se ejerce por algo, el campo, que está en la misma posición que el objeto cargado.

La figura 15.9 muestra un objeto con una pequeña carga positiva q_0 colocada cerca de un segundo objeto con una carga positiva mucho más grande Q .

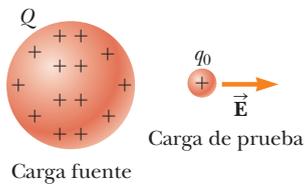


Figura 15.9 Un pequeño objeto con una carga positiva q_0 , colocado cerca de un objeto con una carga positiva mayor Q , experimenta un campo eléctrico \vec{E} dirigido como se muestra. La magnitud del campo eléctrico en la posición de q_0 se define como la fuerza eléctrica sobre q_0 dividida entre la carga q_0 .

El campo eléctrico \vec{E} producido por una carga Q en la posición de una pequeña carga “de prueba” q_0 se define como la fuerza eléctrica \vec{F} ejercida por Q sobre q_0 , dividida entre la carga de prueba q_0 :

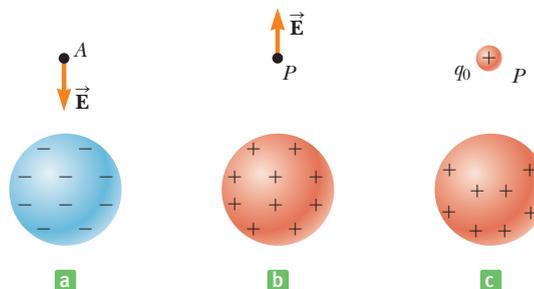
$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [15.3]$$

Unidad SI: newton por coulomb (N/C)

Conceptual y experimentalmente, se requiere que la carga de prueba q_0 sea muy pequeña (arbitrariamente pequeña, de hecho), de modo que no cause reordenamiento significativo de la carga que crea el campo eléctrico \vec{E} . Sin embargo, matemáticamente, el tamaño de la carga de prueba no hace diferencia: el cálculo resulta el mismo, sin importar lo anterior. En vista de esto, el uso de $q_0 = 1 \text{ C}$ en la ecuación 15.3 puede ser conveniente, si no riguroso.

Cuando se usa una carga de prueba positiva, el campo eléctrico siempre tiene la misma dirección que la fuerza eléctrica sobre la carga de prueba, lo que se sigue a partir de la ecuación 15.3. Por lo tanto, en la figura 15.9, la dirección del campo eléctrico es horizontal y hacia la derecha. El campo eléctrico en el punto A de la figura 15.10a es vertical y hacia abajo, porque en dicho punto una carga de prueba positiva se atraería hacia la esfera con carga negativa.

Figura 15.10 a) El campo eléctrico en A debido a la esfera con carga negativa es hacia abajo, hacia la carga negativa. b) El campo eléctrico en P debido a la esfera conductora con carga positiva es hacia arriba, alejándose de la carga positiva. c) Una carga de prueba q_0 colocada en P causará un reordenamiento de carga sobre la esfera, a menos que q_0 sea muy pequeña en comparación con la carga sobre la esfera.



Una vez que se conoce el campo eléctrico debido a un ordenamiento dado de cargas en algún punto, la fuerza sobre *cualquier* partícula con carga q colocada en dicho punto se puede calcular a partir de un reordenamiento de la ecuación 15.3:

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad [15.4]$$

Aquí, q_0 se sustituyó con q , que no necesita ser una simple carga de prueba.

Como se muestra en la figura activa 15.11, la dirección de \vec{E} es la dirección de la fuerza que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en el campo. Se dice que **en un punto existe un campo eléctrico si en dicho lugar una carga de prueba experimenta una fuerza eléctrica.**

Considere una carga puntual q ubicada a una distancia r de una carga de prueba q_0 . De acuerdo con la ley de Coulomb, la *magnitud* de la fuerza eléctrica de la carga q sobre la carga de prueba es

$$F = k_e \frac{|q||q_0|}{r^2} \quad [15.5]$$

Puesto que la magnitud del campo eléctrico en la posición de la carga de prueba se define como $E = F/q_0$, vemos que la *magnitud* del campo eléctrico debido a la carga q en la posición de q_0 es

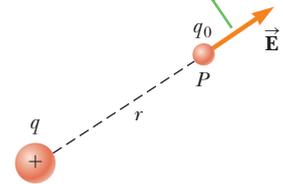
$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad [15.6]$$

La ecuación 15.6 puntualiza una importante propiedad de los campos eléctricos que los convierte en cantidades útiles para describir los fenómenos eléctricos. Como la ecuación indica, un campo eléctrico en un punto dado depende sólo de la carga q sobre el objeto que establece el campo y la distancia r desde dicho objeto hacia un punto específico en el espacio. Como resultado, se puede decir que en el punto P de la figura activa 15.11 existe un campo eléctrico haya o no una carga de prueba en P .

El principio de superposición se sostiene cuando se calcula el campo eléctrico debido a un grupo de cargas puntuales. Primero use la ecuación 15.6 para calcular el campo eléctrico producido por cada carga individualmente en un punto y luego sume los campos eléctricos como vectores.

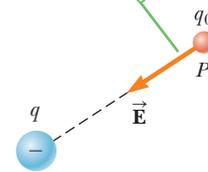
También es importante explotar cualquier simetría de la distribución de carga. Por ejemplo, si en $x = a$ y $x = -a$ se colocan cargas iguales, el campo eléctrico es cero en el origen, por simetría. De igual modo, si el eje x tiene una distribución uniforme de carga positiva, se puede suponer por simetría que el campo eléctrico apunta alejándose del eje x y es cero paralelo a dicho eje.

Si q es positiva, el campo eléctrico en P apunta radialmente hacia afuera desde q .



a

Si q es negativa, el campo eléctrico en P apunta radialmente hacia adentro, hacia q .



b

Figura activa 15.11

Una carga de prueba q_0 en P está a una distancia r de una carga puntual q .

Examen rápido

15.3 Una carga de prueba de $+3 \mu\text{C}$ está en un punto P donde el campo eléctrico debido a otras cargas se dirige hacia la derecha y tiene una magnitud de $4 \times 10^6 \text{ N/C}$. Si la carga de prueba se sustituye con una carga de $-3 \mu\text{C}$, el campo eléctrico en P

a) tiene la misma magnitud que antes, pero cambia de dirección, b) aumenta en magnitud y cambia de dirección, c) permanece igual, d) disminuye en magnitud y cambia de dirección.

15.4 Un anillo circular de carga, con radio b , tiene una carga total q distribuida uniformemente a su alrededor. Determine la magnitud del campo eléctrico en el centro del anillo. a) 0 b) $k_e q/b^2$ c) $k_e q^2/b^2$ d) $k_e q^2/b$ e) ninguna de las anteriores respuestas es correcta.

15.5 Un electrón “libre” y un protón “libre” se colocan en un campo eléctrico idéntico. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero? a) Sobre cada partícula actúa la misma fuerza eléctrica y tiene la misma aceleración. b) La fuerza eléctrica sobre el protón es mayor en magnitud que la fuerza eléctrica sobre el electrón, pero en la dirección opuesta. c) La fuerza eléctrica sobre el protón es igual en magnitud a la fuerza eléctrica sobre el electrón, pero en la dirección opuesta. d) La magnitud de la aceleración del electrón es mayor que la del protón. e) Ambas partículas tienen la misma aceleración.

EJEMPLO 15.4 Aceite electrificado

OBJETIVO Usar las fuerzas y campos eléctricos, junto con la segunda ley de Newton, en un problema unidimensional.

PROBLEMA En un experimento, diminutas gotas de aceite adquieren una pequeña carga negativa mientras caen a través de un vacío (presión = 0). Un campo eléctrico de magnitud 5.92×10^4 N/C apunta en línea recta hacia abajo. **a)** Se observa que una gotita en particular permanece suspendida contra la gravedad. Si la masa de la gotita es 2.93×10^{-15} kg, determine la carga que porta la gotita. **b)** Otra gotita de la misma masa cae 10.3 cm desde el reposo en 0.250 s, de nuevo moviéndose a través de un vacío. Determine la carga que porta la gotita.

ESTRATEGIA Use la segunda ley de Newton con las fuerzas gravitacional y eléctrica. En ambas partes el campo eléctrico \vec{E} apunta hacia abajo, que se toma como la dirección negativa, como es usual. En la parte a), la aceleración es igual a cero. En el inciso b), la aceleración es uniforme, de modo que las ecuaciones cinemáticas dan la aceleración. Entonces la ley de Newton se puede resolver para q .

SOLUCIÓN

a) Determine la carga sobre la gotita suspendida.

Aplique la segunda ley de Newton a la gotita en la dirección vertical:

E apunta hacia abajo, por lo tanto es negativo. Sea $a = 0$ en la ecuación (1) y resuelva para q :

$$(1) \quad ma = \sum F = -mg + Eq$$

$$q = \frac{mg}{E} = \frac{(2.93 \times 10^{-15} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{-5.92 \times 10^4 \text{ N/C}} \\ = -4.85 \times 10^{-19} \text{ C}$$

b) Determine la carga sobre la gotita que cae.

Use la ecuación de desplazamiento cinemático para encontrar la aceleración:

Sustituya $\Delta y = -0.103$ m, $t = 0.250$ s y $v_0 = 0$:

$$\Delta y = \frac{1}{2}at^2 + v_0t$$

$$-0.103 \text{ m} = \frac{1}{2}a(0.250 \text{ s})^2 \rightarrow a = -3.30 \text{ m/s}^2$$

Resuelva la ecuación (1) para q y sustituya:

$$q = \frac{m(a + g)}{E} \\ = \frac{(2.93 \times 10^{-15} \text{ kg})(-3.30 \text{ m/s}^2 + 9.80 \text{ m/s}^2)}{-5.92 \times 10^4 \text{ N/C}} \\ = -3.22 \times 10^{-19} \text{ C}$$

COMENTARIOS Este ejemplo muestra características similares al experimento de la gota de aceite de Millikan que se estudió en la sección 15.7 y que determinó el valor de la carga eléctrica fundamental e . Observe que, en ambas partes del ejemplo, la carga casi es un múltiplo de e .

PREGUNTA 15.4 ¿Cuál sería la aceleración de la gota de aceite en el inciso a), si el campo eléctrico súbitamente invierte su dirección sin cambiar su magnitud?

EJERCICIO 15.4 Suponga que una gota de masa desconocida permanece suspendida contra la gravedad cuando $E = -2.70 \times 10^5$ N/C. ¿Cuál es la masa mínima de la gota?

RESPUESTA 4.41×10^{-15} kg

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS**Cálculo de fuerzas y campos eléctricos**

El siguiente procedimiento se utiliza para calcular fuerzas eléctricas. El mismo se puede usar para calcular un campo eléctrico, simplemente sustituyendo la carga de interés, q , con una carga de prueba conveniente y al final dividir entre la carga de prueba:

1. **Dibuje** un diagrama de las cargas en el problema.
2. **Identifique** la carga de interés, q , y enciérrela en un círculo.
3. **Convierta todas las unidades** a SI, con cargas en coulombs y distancias en metros, para ser consistente con el valor SI de la constante de Coulomb k_e .
4. **Aplique la ley de Coulomb.** Para cada carga Q , determine la fuerza eléctrica sobre la carga de interés, q . La magnitud de la fuerza se puede encontrar a partir de la ley de Coulomb.

La dirección vectorial de la fuerza eléctrica es a lo largo de la recta de las dos cargas, con dirección alejándose de Q si las cargas tienen el mismo signo y hacia Q si las cargas tienen el signo opuesto. Determine el ángulo θ que este vector forma con el eje x positivo. La componente x de la fuerza eléctrica ejercida por Q sobre q será $F \cos \theta$, y la componente y será $F \sin \theta$.

5. **Sume todas las componentes x** , y obtenga la componente x de la fuerza eléctrica resultante.
6. **Sume todas las componentes y** , y obtenga la componente y de la fuerza eléctrica resultante.
7. **Use el teorema de Pitágoras y trigonometría** para encontrar la magnitud y dirección de la fuerza resultante si se desea.

■ EJEMPLO 15.5 Campo eléctrico debido a dos cargas puntuales

OBJETIVO Usar el principio de superposición para calcular el campo eléctrico debido a dos cargas puntuales.

PROBLEMA La carga $q_1 = 7.00 \mu\text{C}$ está en el origen y la carga $q_2 = -5.00 \mu\text{C}$ está en el eje x , 0.300 m del origen (figura 15.12). **a)** Encuentre la magnitud y dirección del campo eléctrico en el punto P , que tiene coordenadas $(0, 0.400)$ m. **b)** Encuentre la fuerza sobre una carga de 2.00×10^{-8} C colocada en P .

ESTRATEGIA Siga la estrategia para solución de problemas, encuentre el campo eléctrico en el punto P debido a cada carga individual en términos de las componentes x y y , luego sume las componentes de cada tipo para obtener las componentes x y y del campo eléctrico resultante en P . La magnitud de la fuerza en el inciso b) se puede encontrar al simplemente multiplicar la magnitud del campo eléctrico por la carga.

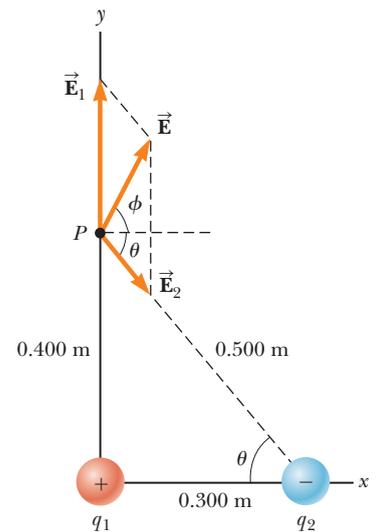


Figura 15.12 (Ejemplo 15.5) El campo eléctrico resultante \vec{E} en P es igual a la suma vectorial $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$, donde \vec{E}_1 es el campo debido a la carga positiva q_1 y \vec{E}_2 es el campo debido a la carga negativa q_2 .

SOLUCIÓN

a) Calcule el campo eléctrico en P .

Encuentre la magnitud de \vec{E}_1 con la ecuación 15.6:

El vector \vec{E}_1 es vertical y forma un ángulo de 90° con respecto al eje positivo x . Use este hecho para encontrar sus componentes:

A continuación, encuentre la magnitud de \vec{E}_2 , de nuevo con la ecuación 15.6:

Obtenga la componente x de \vec{E}_2 , a partir del triángulo en la figura 15.12 para encontrar $\cos \theta$:

Obtenga la componente y de la misma forma, pero se tiene que proporcionar un signo menos para $\sin \theta$ porque esta componente se dirige hacia abajo:

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(7.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.400 \text{ m})^2}$$

$$= 3.93 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_{1x} = E_1 \cos(90^\circ) = 0$$

$$E_{1y} = E_1 \sin(90^\circ) = 3.93 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.500 \text{ m})^2}$$

$$= 1.80 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\cos \theta = \frac{\text{ady}}{\text{hip}} = \frac{0.300}{0.500} = 0.600$$

$$E_{2x} = E_2 \cos \theta = (1.80 \times 10^5 \text{ N/C})(0.600) \\ = 1.08 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$\sin \theta = \frac{\text{op}}{\text{hip}} = \frac{0.400}{0.500} = 0.800$$

$$E_{2y} = E_2 \sin \theta = (1.80 \times 10^5 \text{ N/C})(-0.800) \\ = -1.44 \times 10^5 \text{ N/C}$$

(continúa)

Sume las componentes x para obtener la componente x del vector resultante:

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = 0 + 1.08 \times 10^5 \text{ N/C} = 1.08 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Sume las componentes y para obtener la componente y del vector resultante:

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 3.93 \times 10^5 \text{ N/C} - 1.44 \times 10^5 \text{ N/C}$$

$$E_y = 2.49 \times 10^5 \text{ N/C}$$

Use el teorema de Pitágoras para encontrar la magnitud del vector resultante:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 2.71 \times 10^5 \text{ N/C}$$

La función tangente inversa produce la dirección del vector resultante:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2.49 \times 10^5 \text{ N/C}}{1.08 \times 10^5 \text{ N/C}}\right) = 66.6^\circ$$

b) Determine la fuerza sobre una carga de $2.00 \times 10^{-8} \text{ C}$ colocada en P .

Calcule la magnitud de la fuerza (la dirección es la misma que la de \vec{E} porque la carga es positiva):

$$F = Eq = (2.71 \times 10^5 \text{ N/C})(2.00 \times 10^{-8} \text{ C})$$

$$= 5.42 \times 10^{-3} \text{ N}$$

COMENTARIOS En este problema hubo muchos pasos, pero cada uno fue muy corto. Cuando se atacan tales problemas, es importante enfocarse en un pequeño paso a la vez. La solución no proviene de un salto de genialidad, sino del ensamble de algunas partes relativamente sencillas.

PREGUNTA 15.5 Suponga que q_2 se mueve lentamente hacia la derecha. ¿Qué ocurriría con el ángulo ϕ ?

EJERCICIO 15.5 a) Coloque una carga de $-7.00 \mu\text{C}$ en el punto P y encuentre la magnitud y dirección del campo eléctrico en la ubicación de q_2 debido a q_1 y la carga en P . b) Determine la magnitud y dirección de la fuerza sobre q_2 .

RESPUESTAS a) $5.84 \times 10^5 \text{ N/C}$, $\phi = 20.2^\circ$ b) $F = 2.92 \text{ N}$, $\phi = 200^\circ$.

15.5 Líneas de campo eléctrico

Un conveniente auxiliar para visualizar los patrones de campo eléctrico es dibujar líneas que apuntan en la dirección del vector de campo eléctrico en cualquier punto. Estas líneas, que introdujo Michael Faraday y llamó **líneas de campo eléctrico**, se relacionan con el campo eléctrico en cualquier región del espacio en la siguiente forma:

1. El vector de campo eléctrico \vec{E} es tangente a las líneas del campo eléctrico en cada punto.
2. El número de líneas por unidad de área a través de una superficie perpendicular a las líneas es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en una región dada.

Tip 15.1 Las líneas de campo eléctrico no son trayectorias de partículas

Las líneas de campo eléctrico *no* son objetos materiales. Se usan solamente como una representación visual del campo eléctrico en varias posiciones. Excepto en casos especiales, *no* representan la trayectoria de una partícula cargada liberada en un campo eléctrico.

Observe que \vec{E} es grande cuando las líneas de campo están juntas y pequeño cuando las líneas están separadas.

La figura 15.13a muestra algunas líneas de campo eléctrico representativas para una sola carga puntual positiva. Este dibujo bidimensional contiene sólo las líneas de campo que yacen en el plano que contiene la carga puntual. En realidad, las líneas se dirigen radialmente hacia afuera desde la carga en *todas* direcciones, un poco como las púas de un puerco espín enojado. Puesto que una carga q repelería una carga de prueba positiva colocada en este campo, las líneas se dirigen radialmente alejándose de la carga positiva. Las líneas de campo eléctrico para una sola carga puntual negativa se dirigen hacia la carga (figura 15.13b) porque una carga de prueba positiva es atraída por una carga negativa. En cualquier caso, las líneas son radiales y se extienden hacia el infinito. Observe que las

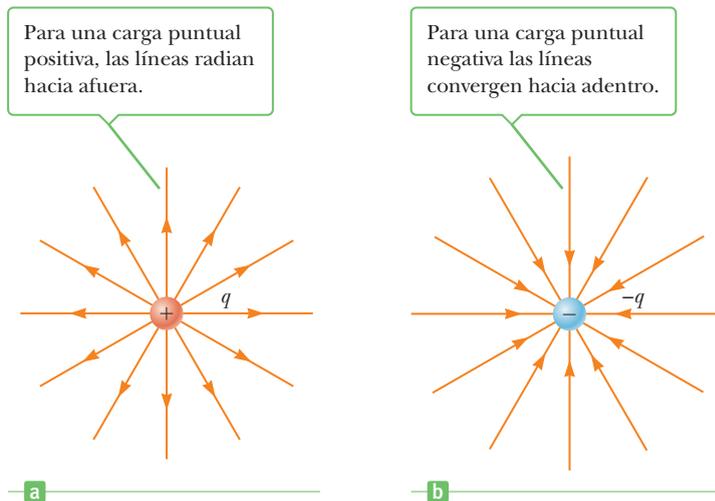


Figura 15.13 a), b) Líneas de campo eléctrico para una carga puntual. Observe que las figuras sólo muestran aquellas líneas de campo que yacen en el plano de la página.

líneas están más juntas conforme se acercan a la carga, lo que indica que la intensidad del campo aumenta. La ecuación 15.6 verifica que, de hecho, éste es el caso.

Las reglas para dibujar líneas de campo eléctrico para cualquier distribución de carga se siguen directamente de la relación entre líneas de campo eléctrico y vectores de campo eléctrico:

1. Las líneas para un grupo de cargas puntuales deben comenzar en las cargas positivas y terminar en las cargas negativas. En el caso de un exceso de carga, algunas líneas comenzarán o terminarán infinitamente lejos.
2. El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o terminan en una carga negativa es proporcional a la magnitud de la carga.
3. Dos líneas de carga no pueden cruzarse una a otra.

La figura 15.14 muestra la hermosa simetría de las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud pero signo opuesto. Esta configuración de carga se llama **dipolo eléctrico**. Observe que el número de líneas que comienzan en la carga positiva debe ser igual al número de las que terminan en la carga negativa. En puntos muy cercanos a cualquier carga, las líneas son casi radiales. La alta densidad de las líneas entre las cargas indica un intenso campo eléctrico en esta región.

La figura 15.15 muestra las líneas de campo eléctrico en la vecindad de dos cargas puntuales positivas iguales. De nuevo, cerca de cualquier carga las líneas son casi radiales. El mismo número de líneas surge de cada carga porque las cargas son iguales en magnitud. A

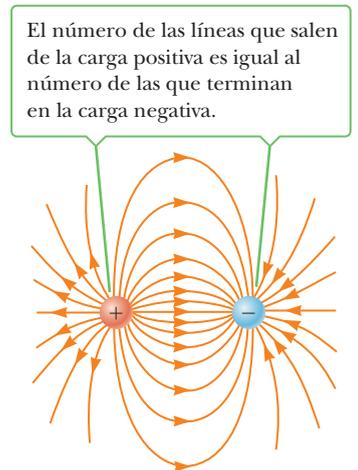


Figura 15.14 Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales iguales y opuestas (un dipolo eléctrico).

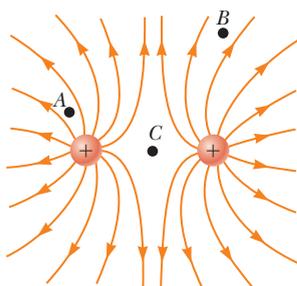


Figura 15.15 Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales positivas. Los puntos A, B y C se analizan en la pregunta rápida 15.6.

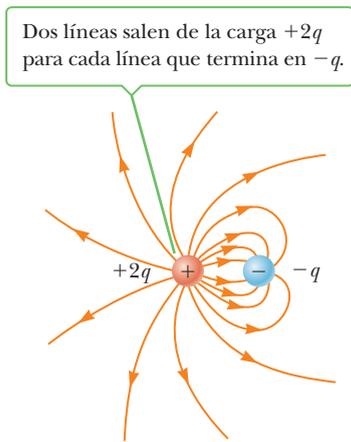


Figura activa 15.16 Líneas de campo eléctrico para una carga puntual de $+2q$ y una segunda carga puntual de $-q$.

grandes distancias de las cargas, el campo es aproximadamente igual al de una sola carga puntual de magnitud $2q$. La protuberancia de las líneas de campo eléctrico entre las cargas refleja la naturaleza repulsiva de la fuerza eléctrica entre cargas iguales. Además, la baja densidad de las líneas de campo entre las cargas indica un campo débil en esta región, a diferencia del dipolo.

Finalmente, la figura activa 15.16 es un bosquejo de las líneas de campo eléctrico asociado con la carga positiva $+2q$ y la carga negativa $-q$. En este caso, el número de líneas que salen de la carga $+2q$ es el doble del número de las que terminan en la carga $-q$. Por lo tanto, sólo la mitad de las líneas que salen de la carga positiva terminan en la carga negativa. La mitad restante termina en las cargas negativas que se supuso se ubican en el infinito. A grandes distancias de las cargas (grande en comparación con la separación de las cargas), las líneas de campo eléctrico son equivalentes a las de una sola carga $+q$.

Examen rápido

15.6 Clasifique las magnitudes del campo eléctrico en los puntos A , B y C en la figura 15.15, de mayor a menor.

- a) A, B, C b) A, C, B c) C, A, B d) La respuesta no se puede determinar mediante inspección visual.

FÍSICA APLICADA 15.1 Medición de los campos eléctricos atmosféricos

El campo eléctrico cerca de la superficie de la Tierra con buen clima es de aproximadamente 100 N/C hacia abajo. Bajo una nube de tormenta, el campo eléctrico puede ser muy grande, del orden de 20000 N/C . ¿Cómo se midieron estos campos eléctricos?

EXPLICACIÓN Un dispositivo para medir estos campos se llama *molino de campo*. La figura 15.17 muestra las componentes fundamentales de un molino de campo: dos placas metálicas paralelas al suelo. Cada placa se conecta a tierra con un alambre, con un amperímetro (un dispositivo de baja resistencia para medir el flujo de carga, que será analizado en la sección 17.3) en la ruta. Considere primero sólo la placa inferior. Puesto que se conecta a tierra y la tierra porta una carga negativa, la placa tiene carga negativa. Por lo tanto, las líneas de campo eléctrico se dirigen hacia abajo y terminan en la placa como en la figura 15.17a.

Ahora imagine que la placa superior se mueve súbitamente sobre la placa inferior, como en la figura 15.17b. Esta placa se conecta a tierra y también tiene carga negativa, de modo que las líneas de campo ahora terminan en la placa superior. Las cargas negativas en la placa inferior se repelen por las de la placa superior y deben pasar a través del amperímetro, que registra un flujo de carga. La cantidad de carga que estaba en la placa inferior se relaciona con la intensidad del campo eléctrico. De esta forma, el flujo de carga a través del amperímetro se puede calibrar para medir el campo eléctrico. Por lo general, las placas se diseñan como las aspas de un ventilador y la placa superior gira de modo que la placa inferior alternativamente se cubre y descubre. Como resultado, las cargas fluyen de ida y vuelta de manera continua a través del amperímetro y la lectura se puede relacionar con la intensidad del campo eléctrico. ■

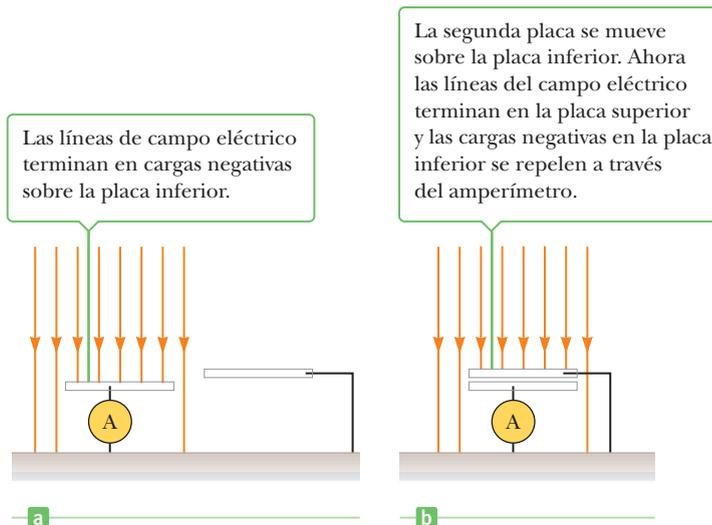


Figura 15.17 Configuración experimental para física aplicada 15.1.

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

Un buen conductor eléctrico como el cobre, aunque eléctricamente neutro, contiene cargas (electrones) que no están ligadas a átomo alguno y tienen libertad de moverse dentro del material. Cuando no ocurre movimiento neto de carga dentro de un conductor, se dice que el conductor está en **equilibrio electrostático**. Un conductor aislado (aquel que está aislado de tierra) tiene las siguientes propiedades:

1. El campo eléctrico es cero en todas partes dentro del material conductor.
2. Cualquier exceso de carga en un conductor aislado reside por completo en su superficie.
3. El campo eléctrico justo afuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del conductor.
4. En un conductor con forma irregular, la carga se acumula en los puntos agudos, donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño.

◀ Propiedades de un conductor aislado

La primera propiedad se puede entender al examinar lo que ocurriría si *no* fuese cierta. Si hubiese un campo eléctrico dentro de un conductor, la carga libre se movería y crearía un flujo de carga, o corriente. Sin embargo, si hubiese un movimiento neto de carga, el conductor ya no estaría en equilibrio electrostático.

La propiedad 2 es un resultado directo de la repulsión $1/r^2$ entre cargas iguales descrita por la ley de Coulomb. Si por algún medio un exceso de carga se coloca dentro de un conductor, las fuerzas repulsivas entre las cargas iguales las empuja tan lejos como sea posible, lo que hace que rápidamente migren hacia la superficie. (Aquí no se demostrará, pero el exceso de carga reside en la superficie porque la ley de Coulomb es una ley de cuadrado inverso. Con cualquier otra ley de potencia, en la superficie existiría un exceso de carga, pero habría una distribución de carga, o del mismo o de signo opuesto, dentro del conductor.)

La propiedad 3 se puede entender al considerar nuevamente lo que ocurriría si no fuese cierta. Si el campo eléctrico en la figura 15.18 no fuese perpendicular a la superficie, tendría una componente a lo largo de la superficie, que haría que las cargas libres del conductor se muevan (hacia la izquierda en la figura). Sin embargo, si las cargas se mueven, se crearía una corriente y el conductor ya no estaría en equilibrio electrostático. Por lo tanto, \vec{E} debe ser perpendicular a la superficie.

Para ver por qué la propiedad 4 debe ser cierta, considere la figura 15.19a (página 530), que muestra un conductor que es bastante plano en un extremo y relativamente afilado en el otro. Cualquier exceso de carga colocada en el objeto se mueve hacia su superficie. La figura 15.19b muestra las fuerzas entre dos de tales cargas en el extremo más plano del objeto. Estas fuerzas se dirigen predominantemente paralelas a la superficie, de modo que

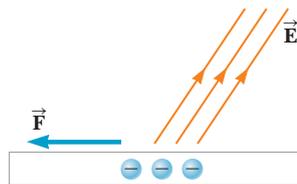
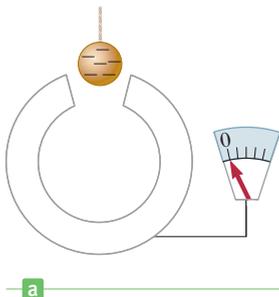
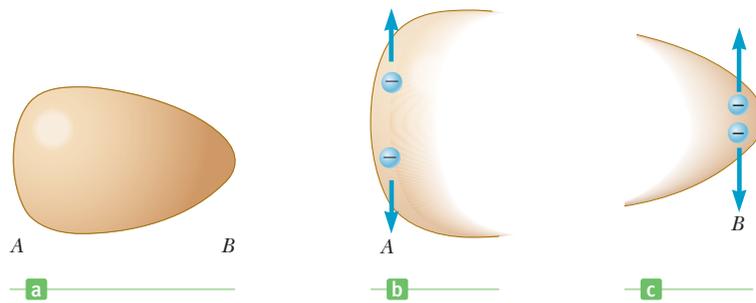
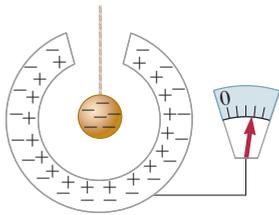


Figura 15.18 Esta situación es imposible si el conductor está en equilibrio electrostático. Si el campo eléctrico \vec{E} tenía una componente paralela a la superficie, una fuerza eléctrica que se ejerce sobre las cargas a lo largo de la superficie y que se trasladaría a la izquierda.

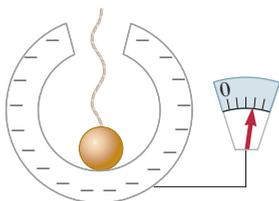
Figura 15.19 a) Un conductor con un extremo más plano *A* y un extremo *B* relativamente afilado. El exceso de carga colocado en este conductor reside por completo en su superficie y se distribuye de modo que b) hay menos carga por unidad de área sobre el extremo más plano y c) hay una gran carga por unidad de área sobre el extremo afilado.



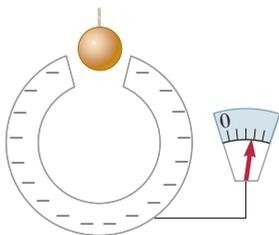
a



b



c



d

Figura 15.20 Un experimento que demuestra que cualquier carga transferida a un conductor reside en su superficie en equilibrio electrostático. El conductor hueco está aislado de tierra y la pequeña bola metálica está sostenida por un hilo aislante.

las cargas se separan hasta que las fuerzas repulsivas de otras cargas cercanas establecen un equilibrio. No obstante, en el extremo afilado, las fuerzas de repulsión entre dos cargas se dirigen predominantemente alejándose de la superficie, como en la figura 15.19c. Como resultado, aquí hay menos tendencia para que las cargas se separen a lo largo de la superficie y la cantidad de carga por unidad de área es mayor que en el extremo plano. El efecto acumulativo de tales fuerzas hacia fuera, provenientes de cargas cercanas en el extremo afilado produce una gran fuerza resultante dirigida alejándose de la superficie, que puede ser lo suficientemente grande como para hacer que las cargas salten de la superficie hacia el aire circundante.

Muchos experimentos han mostrado que la carga neta sobre un conductor reside sobre su superficie. Uno de tales experimentos lo realizó primero Michael Faraday y se le conoce como *experimento del balde de hielo*. Faraday bajó una bola metálica, que tenía una carga negativa, colocada en el extremo de un hilo de seda (un aislante), en un conductor hueco sin carga aislado de tierra, un balde de hielo metálico, como en la figura 15.20a. Conforme la bola entró al balde, observó la desviación de la aguja en un electrómetro unido a la superficie exterior del balde. (Un electrómetro es un dispositivo que se utiliza para medir carga.) La aguja se desvió porque la bola cargada indujo una carga positiva en la pared interior del balde, lo que dejó una carga negativa igual en la pared exterior (figura 15.20b).

A continuación, Faraday tocó la superficie interior del balde con la bola y notó que la desviación de la aguja no cambió, o cuando la bola tocaba la superficie del balde (figura 15.20c) o cuando se removía (figura 15.20d). Más aún, descubrió que la bola ahora no estaba cargada porque, cuando tocó el interior del balde, la carga negativa en exceso sobre la bola se extrajo, lo que neutralizó la carga positiva inducida en la superficie interior del balde. De esta forma Faraday descubrió el resultado útil de que *todo* el exceso de carga en un objeto se puede transferir a un cascarón metálico ya cargado si el objeto toca el *interior* del cascarón. Como verá, este resultado es el principio operativo del generador Van de Graaff.

Faraday concluyó que, dado que la desviación de la aguja en el electrómetro no cambia cuando la bola cargada toca el interior del balde, la carga positiva inducida en la superficie interior del balde era apenas suficiente para neutralizar la carga negativa sobre la bola. Como resultado de sus investigaciones, concluyó que un objeto cargado, suspendido dentro de un contenedor metálico, reordena la carga en el contenedor, de modo que el signo de la carga en su superficie interior era *opuesto* al signo de la carga en el objeto suspendido. Esto produjo una carga en la superficie exterior del contenedor del mismo signo que el objeto suspendido.

Faraday también encontró que, si el electrómetro se conectaba a la superficie interior del balde después de terminar el experimento, la aguja no mostraba desviación. Por ende, el *exceso* de carga adquirido por el balde cuando éste y la bola hicieron contacto, apareció en la superficie exterior del balde.

Si una barra metálica que tiene puntas afiladas se une a una casa, la mayor parte de cualquier carga en la casa pasa a través de estas puntas, lo que elimina la carga inducida en la casa producto de las nubes de tormenta. Además, la descarga de un relámpago que golpee la casa pasa a través de la barra metálica y se transporta con seguridad hacia el suelo a través de alambres que conducen de la barra a la Tierra. Benjamín Franklin desarrolló

por primera vez los pararrayos que usan este principio. Algunos países europeos no podían aceptar el hecho de que una idea tan brillante se hubiera originado en el nuevo mundo, ¡así que “mejoraron” el diseño al eliminar las puntas afiladas!

APLICACIÓN

Pararrayos

FÍSICA APLICADA 15.2 Conductores y líneas de campo

Suponga que una carga puntual $+Q$ está en el espacio vacío. Con guantes de goma, proceda a rodear la carga con un cascarón conductor esférico concéntrico. ¿Qué efecto tendrá sobre las líneas de campo de la carga?

EXPLICACIÓN Cuando el cascarón esférico se coloca alrededor de la carga, las cargas en el cascarón se reordenan para satisfacer las reglas para un conductor en equilibrio. Una carga neta de $-Q$ se mueve hacia la superficie inte-

rior del conductor, de modo que el campo eléctrico dentro del conductor se vuelve cero. Esto significa que las líneas de campo que se originan en la carga $+Q$ ahora terminan en las cargas negativas. El movimiento de las cargas negativas hacia la superficie interior de la esfera deja una carga neta de $+Q$ en la superficie exterior de la esfera. Entonces las líneas de campo afuera de la esfera parecen como antes: el único cambio, global, es la ausencia de líneas de campo dentro del conductor. ■

FÍSICA APLICADA 15.3 Seguridad al conducir durante tormentas eléctricas

¿Por qué es seguro permanecer dentro de un automóvil durante una tormenta eléctrica?

EXPLICACIÓN Muchas personas creen que permanecer adentro del automóvil es seguro debido a las características aislantes de las llantas de caucho, pero de hecho esto no es cierto. Los relámpagos pueden viajar a través de muchos

kilómetros de aire, de modo que ciertamente pueden penetrar un centímetro de caucho. La seguridad de permanecer en el automóvil se debe al hecho de que las cargas en la cubierta metálica del auto residirán en la superficie exterior del auto, como se observó en la propiedad analizada anteriormente. Como resultado, un ocupante en el automóvil que toque las superficies interiores no está en peligro. ■

15.7 El experimento de la gota de aceite de Millikan

De 1909 a 1913, Robert Andrews Millikan (1868–1953) realizó un brillante conjunto de experimentos en la Universidad de Chicago, en los que midió la carga elemental e del electrón y demostró la naturaleza cuantizada de la carga electrónica. El aparato que usó, que se bosqueja en la figura activa 15.21, contiene dos placas metálicas paralelas. A través de un pequeño orificio en la placa superior pasan gotitas de aceite que se cargan por fricción en un atomizador. Se usa un haz de luz para iluminar las gotas, que se observan con un telescopio con eje en ángulo recto con el haz. Entonces las gotas aparecen como estrellas brillantes contra un fondo oscuro y se puede determinar la tasa de caída de gotas individuales.

Suponga que se ve una sola gota, que tiene una masa m y porta una carga q negativa. Si entre las placas no hay campo eléctrico, las dos fuerzas que actúan sobre la carga son la

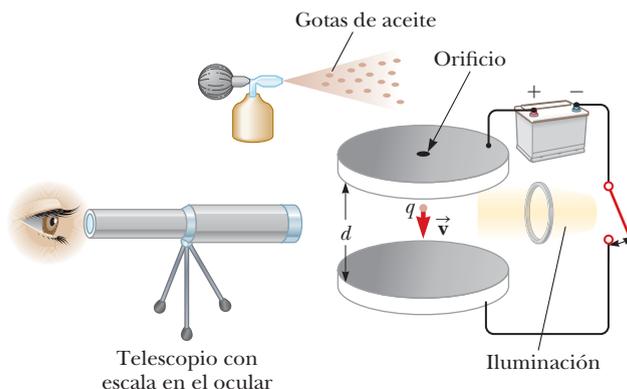
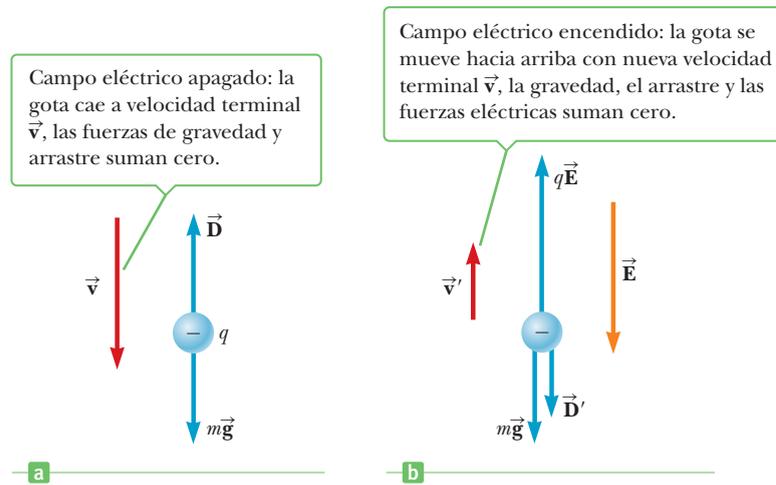


Figura activa 15.21
Vista esquemática del aparato de gota de aceite de Millikan.

Figura 15.22 Fuerzas sobre una gota de aceite con carga negativa en el experimento de Millikan.



fuerza de gravedad, $m\vec{g}$, que actúa hacia abajo y una fuerza de arrastre viscoso hacia arriba \vec{D} (figura 15.22a). La fuerza de arrastre es proporcional a la rapidez de la gota. Cuando la gota alcanza su rapidez terminal, v , las dos fuerzas se equilibran mutuamente ($mg = D$).

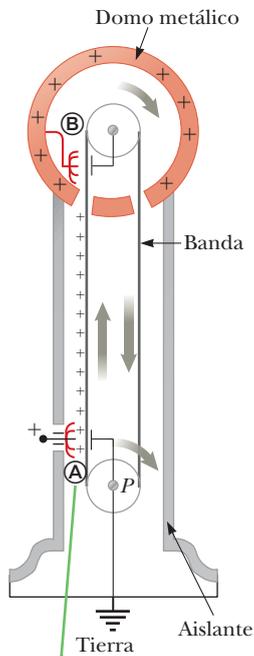
Ahora suponga que un campo eléctrico se establece entre las placas mediante una batería conectada de modo que la placa superior tiene carga positiva. En este caso una tercera fuerza, $q\vec{E}$ actúa sobre la gota cargada. Puesto que q es negativa y \vec{E} es hacia abajo, la fuerza eléctrica es *hacia arriba*, como en la figura 15.22b. Si esta fuerza es suficientemente grande, la gota se mueve hacia arriba y la fuerza de arrastre \vec{D} actúa hacia abajo. Cuando la fuerza eléctrica hacia arriba, $q\vec{E}$, equilibra la suma de las fuerzas de gravedad y de arrastre, que actúan hacia abajo, la gota alcanza una nueva rapidez terminal v' .

Con el campo encendido, una gota se mueve lentamente hacia arriba, por lo general a razón de *centésimas* de centímetro por segundo. La tasa de caída en ausencia de un campo es comparable. Por lo tanto, una sola gota con masa y radio constante puede seguirse durante horas conforme cae y asciende alternadamente, simplemente al encender y apagar el campo eléctrico.

Después de realizar mediciones en miles de gotas, Millikan y sus colaboradores encontraron que, hasta dentro de aproximadamente 1% de precisión, cada gota tenía una carga igual a algún múltiplo entero positivo o negativo de la carga elemental e ,

$$q = ne \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [15.7]$$

donde $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C. Más tarde estableció que los múltiplos enteros positivos de e surgirían cuando una gota de aceite perdiera uno o más electrones. Del mismo modo, múltiplos enteros negativos de e surgirían cuando una gota ganara uno o más electrones. Las ganancias o pérdidas en números enteros proporcionarían evidencia concluyente de que la carga está cuantizada. En 1923, Millikan ganó el Premio Nobel en Física por su trabajo.



La carga se deposita en la banda en el punto A y se transfiere al domo en el punto B.

Figura 15.23 Diagrama de un generador Van de Graaff. La carga se transfiere al domo mediante una banda giratoria.

15.8 El generador Van de Graaff

En 1929, Robert J. Van de Graaff (1901–1967) diseñó y construyó un generador electrostático que se utiliza ampliamente en investigación de física nuclear. Los principios de su operación se pueden entender con el conocimiento de las propiedades de los campos y cargas eléctricos ya presentados en este capítulo. La figura 15.23 muestra la construcción básica de este dispositivo. Una polea P activada por motor mueve una banda a través de agujas metálicas en forma de peine, que tienen carga positiva, colocadas en A . Las cargas negativas se atraen hacia estas agujas desde la banda, lo que deja el lado izquierdo de la banda con una carga positiva neta. Las cargas positivas atraen electrones hacia la banda conforme se puede por un segundo peine de agujas en B , lo que aumenta el exceso de carga positiva en el domo. Puesto que el campo eléctrico dentro del domo metálico es despreciable, la carga positiva sobre él puede aumentar fácilmente sin importar cuánta carga ya esté presente. El resultado es que el domo queda con una gran cantidad de carga positiva.

Esta acumulación de carga en el domo no puede continuar indefinidamente. Conforme más y más carga aparece en la superficie del domo, la magnitud del campo eléctrico en dicha superficie también aumenta. Finalmente, la intensidad del campo se vuelve lo suficiente grande para ionizar parcialmente el aire cerca de la superficie, lo que aumenta la conductividad del aire. Ahora las cargas en el domo tienen una ruta para fugarse hacia el aire, lo que produce algunos espectaculares “relámpagos” conforme ocurre la descarga. Como se observó anteriormente, las cargas encuentran más fácil saltar desde una superficie en puntos donde la curvatura es grande. Como resultado, una forma de inhibir la descarga eléctrica y aumentar la cantidad de carga que se puede almacenar en el domo, es aumentar su radio. Otro método para inhibir la descarga es colocar todo el sistema en un contenedor lleno con un gas a alta presión, que es significativamente más difícil de ionizar que el aire a presión atmosférica.

Si en un tubo unido al domo se introducen protones (u otras partículas cargadas), el gran campo eléctrico del domo ejerce una fuerza repulsiva sobre los protones y hace que se aceleren a energías suficientemente altas como para iniciar reacciones nucleares entre los protones y varios núcleos objetivo.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

La ley de Gauss es en esencia una técnica para calcular el campo eléctrico promedio sobre una superficie cerrada, desarrollada por Karl Friedrich Gauss (1777–1855). Cuando el campo eléctrico, debido a su simetría, es constante en todas partes sobre dicha superficie y perpendicular a ella, se puede encontrar el campo eléctrico exacto. En estos casos especiales, la ley de Gauss es mucho más fácil de aplicar que la ley de Coulomb.

La ley de Gauss relaciona el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga total dentro de dicha superficie. Una *superficie cerrada* tiene un interior y un exterior: un ejemplo es una esfera. El *flujo eléctrico* es una medida de cuántos vectores de campo eléctrico penetran a través de una superficie dada. Si los vectores de campo eléctrico son tangentes a la superficie en todos los puntos, por ejemplo, no penetran la superficie y el flujo eléctrico a través de la superficie es cero. Estos conceptos se estudiarán más ampliamente en las siguientes dos subsecciones. Como verá, la ley de Gauss afirma que el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada es proporcional a la carga contenida *dentro* de la superficie.

Flujo eléctrico

Considere un campo eléctrico que es uniforme tanto en magnitud como en dirección, como en la figura 15.24. Las líneas de campo eléctrico penetran una superficie de área A , que es perpendicular al campo. La técnica empleada para dibujar una figura como la figura 15.24 es que el número de líneas por unidad de área, N/A , es proporcional a la magnitud del campo eléctrico, o $E \propto N/A$. Esta proporción se puede reescribir como $N \propto EA$, la cual indica que el número de líneas de campo es proporcional al *producto* de E y A , llamado **flujo eléctrico** y se representa mediante el símbolo Φ_E :

$$\Phi_E = EA \quad [15.8]$$

Observe que Φ_E tiene unidades SI de $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ y es proporcional al número de líneas de campo que pasan a través de alguna área A orientada perpendicular al campo. (Se llama flujo por analogía con el término *flujo* en el flujo de fluidos, que es el volumen de líquido que fluye a través de un área perpendicular por segundo.) Si la superficie bajo consideración no es perpendicular al campo, como en la figura 15.25, la expresión para el flujo eléctrico es

$$\Phi_E = EA \cos \theta \quad [15.9]$$

donde un vector perpendicular al área A está a un ángulo θ con respecto al campo. Este vector con frecuencia se dice que es *normal* a la superficie y se le referirá como “el vector normal a la superficie”. El número de líneas que cruzan esta área es igual al número de las que cruza el área proyectada A' , que es perpendicular al campo. Observamos que las

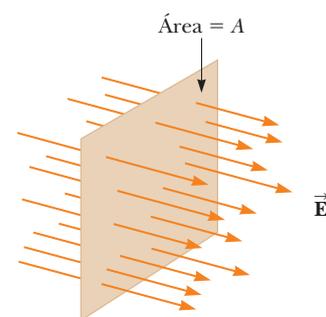


Figura 15.24 Líneas de campo de un campo eléctrico uniforme que penetran un plano de área A perpendicular al campo. El flujo eléctrico Φ_E a través de esta área es igual a EA .

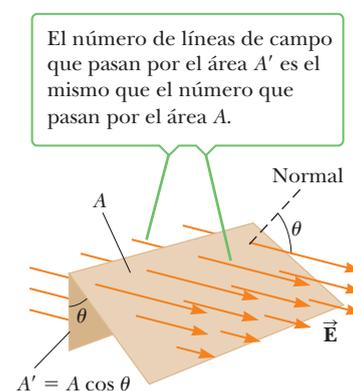


Figura 15.25 Líneas de campo de un campo eléctrico uniforme que penetran un plano de área A que está a un ángulo de $(90^\circ - \theta)$ con el campo.

dos áreas se relacionan mediante $A' = A \cos \theta$. A partir de la ecuación 15.9, vemos que el flujo a través de una superficie de área fija tiene el valor máximo EA cuando la superficie es perpendicular al campo (cuando $\theta = 0^\circ$) y que el flujo es cero cuando la superficie es paralela al campo (cuando $\theta = 90^\circ$). **Por convención, para una superficie cerrada, las líneas de flujo que pasan al interior del volumen son negativas y las que salen del interior del volumen son positivas.** Esta convención es equivalente a pedir que el vector normal de la superficie apunte hacia afuera cuando se calcula el flujo a través de una superficie cerrada.

■ **Examen rápido**

15.7 Calcule la magnitud del flujo de un campo eléctrico constante de 5.00 N/C en la dirección z a través de un rectángulo con área 4.00 m^2 en el plano xy . a) 0 b) $10.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ c) $20.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ d) Se necesita más información

15.8 Suponga que el campo eléctrico de la pregunta rápida 15.7 se inclina 60° alejándose de la posición z positiva. Calcule la magnitud del flujo a través de la misma área. a) 0 b) $10.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ c) $20.0 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ d) Se necesita más información

■ **EJEMPLO 15.6** Flujo a través de un cubo

OBJETIVO Calcular el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada.

PROBLEMA Considere un campo eléctrico uniforme orientado en la dirección x . Determine el flujo eléctrico a través de cada superficie de un cubo con bordes L orientados como se muestra en la figura 15.26 y el flujo neto.

ESTRATEGIA Este problema implica sustituir en la definición de flujo eléctrico dado por la ecuación 15.9. En cada caso, E y $A = L^2$ son los mismos; la única diferencia es el ángulo θ que el campo eléctrico forma con respecto a un vector perpendicular a una superficie dada y que apunta hacia afuera (el vector normal a la superficie). Los ángulos se pueden determinar mediante inspección. El flujo a través de una superficie paralela al plano xy se marcará Φ_{xy} y se designarán por la posición (frente, posterior); otros se marcarán de igual modo: Φ_{xz} arriba o inferior, y Φ_{yz} izquierda o derecha.

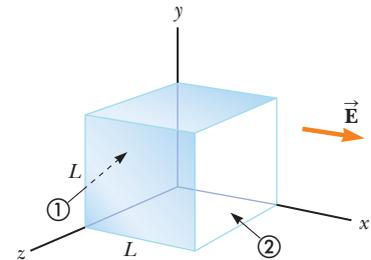


Figura 15.26 (Ejemplo 15.6) Una superficie hipotética con forma de cubo en un campo eléctrico uniforme paralelo al eje x . El flujo neto a través de la superficie es cero cuando la carga entra dentro del cubo es cero.

SOLUCIÓN

El vector normal al plano xy apunta en la dirección z negativa. Ésta, a su vez, es perpendicular a \vec{E} , de modo que $\theta = 90^\circ$. (El lado opuesto funciona de manera similar.)

$$\Phi_{xy} = EA \cos(90^\circ) = 0 \text{ (atrás y enfrente)}$$

El vector normal al plano xz apunta en la dirección y negativa. Ésta, a su vez, es perpendicular a \vec{E} , de modo que de nuevo $\theta = 90^\circ$. (El lado opuesto funciona de manera similar.)

$$\Phi_{xz} = EA \cos(90^\circ) = 0 \text{ (arriba y abajo)}$$

El vector normal a la superficie ① (el plano yz) apunta en la dirección x negativa. Ésta es antiparalela a \vec{E} , de modo que $\theta = 180^\circ$.

$$\Phi_{yz} = EA \cos(180^\circ) = -EL^2 \text{ (superficie ①)}$$

La superficie ② tiene vector normal que apunta en la dirección x positiva, de modo que $\theta = 0^\circ$.

$$\Phi_{yz} = EA \cos(0^\circ) = EL^2 \text{ (superficie ②)}$$

Calcule el flujo neto al sumar:

$$\Phi_{\text{neto}} = 0 + 0 + 0 + 0 - EL^2 + EL^2 = 0$$

COMENTARIOS Al realizar este cálculo, es necesario recordar que el ángulo en la definición de flujo se mide a partir del vector normal a la superficie y que este vector debe apuntar hacia afuera para una superficie cerrada. Como resultado, el vector normal para el plano yz a la izquierda apunta en la dirección x negativa y el vector normal al plano paralelo al plano yz a la derecha apunta en la dirección x positiva. Observe que no hay carga alguna en la caja. El flujo eléctrico neto siempre es cero para superficies cerradas que no contienen carga neta.

PREGUNTA 15.6 Si la superficie en la figura 15.26 fuese esférica, ¿la respuesta sería a) mayor que, b) menor que o c) igual al flujo eléctrico neto que se encontró para la superficie cúbica?

EJERCICIO 15.6 Suponga que el campo eléctrico constante en el ejemplo 15.6 apunta en la dirección y positiva. Calcule el flujo a través del plano xz y la superficie paralela a ella. ¿Cuál es el flujo eléctrico neto a través de la superficie del cubo?

RESPUESTAS $\Phi_{xz} = -EL^2$ (abajo), $\Phi_{xz} = +EL^2$ (arriba). El flujo neto todavía es cero.

Ley de Gauss

Considere una carga puntual q rodeada por una superficie esférica de radio r con centro sobre la carga, como en la figura 15.27a. La magnitud del campo eléctrico en todas partes sobre la superficie de la esfera es

$$E = k_e \frac{q}{r^2}$$

Observe que el campo eléctrico es perpendicular a la superficie esférica en todos los puntos sobre la superficie. Por lo tanto, el flujo eléctrico a través de la superficie es EA , donde $A = 4\pi r^2$ es el área de la esfera:

$$\Phi_E = EA = k_e \frac{q}{r^2} (4\pi r^2) = 4\pi k_e q$$

A veces es conveniente expresar k_e en términos de otra constante, ϵ_0 , como $k_e = 1/(4\pi\epsilon_0)$. La constante ϵ_0 se llama **permitividad del espacio libre** y tiene el valor

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 \quad [15.10]$$

El uso de k_e o ϵ_0 es estrictamente cuestión de gusto. El flujo eléctrico a través de la superficie esférica cerrada que rodea a la carga q ahora se puede expresar como

$$\Phi_E = 4\pi k_e q = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Este resultado dice que el flujo eléctrico a través de una esfera que rodea una carga q es igual a la carga dividida por la constante ϵ_0 . Al usar cálculo, este resultado se puede demostrar para *cualquier* superficie cerrada que rodea la carga q . Por ejemplo, si la superficie que rodea q es irregular, como en la figura 15.27b, el flujo a través de dicha superficie también es q/ϵ_0 . Esto conduce al siguiente resultado general, conocido como ley de Gauss:

El flujo eléctrico Φ_E a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de la superficie, Q_{interior} , dividida entre ϵ_0 :

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.11]$$

Aunque no es obvio, la ley de Gauss describe cómo las cargas crean campos eléctricos. En principio siempre se puede usar para calcular el campo eléctrico de un sistema de cargas o una distribución continua de carga. En la práctica, la técnica es útil sólo en un número limitado de casos en los que hay un alto grado de simetría, como en esferas, cilindros o planos. Con la simetría de estas formas especiales, las cargas se pueden rodear por una superficie imaginaria, llamada superficie gaussiana. Esta superficie imaginaria se usa estrictamente para cálculos matemáticos y no necesita ser una superficie física real. Si la superficie imaginaria se elige de modo que el campo eléctrico sea constante en todas partes sobre ella, el campo eléctrico se puede calcular

$$EA = \Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.12]$$

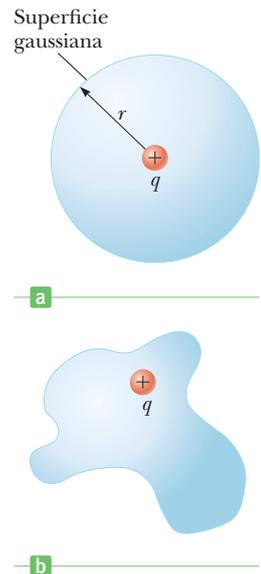


Figura 15.27 a) El flujo a través de una superficie esférica de radio r que rodea una carga puntual q es $\Phi_E = q/\epsilon_0$. b) El flujo a través de cualquier superficie arbitraria que rodea la carga también es igual a q/ϵ_0 .

◀ Ley de Gauss

Tip 15.2 Las superficies gaussianas no son reales

Una superficie gaussiana es una superficie imaginaria, creada exclusivamente para facilitar un cálculo matemático. No necesariamente coincide con la superficie de un objeto físico.

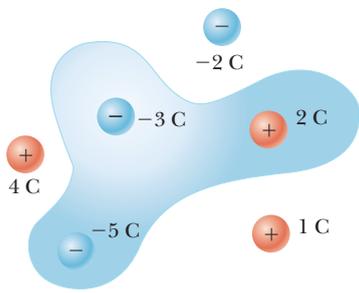


Figura activa 15.28
(Examen rápido 15.9)

como se verá en los ejemplos. Aunque la ley de Gauss en esta forma se puede usar para obtener el campo eléctrico sólo para problemas con mucha simetría, *siempre* se puede usar para obtener el campo eléctrico *promedio* en *cualquier* superficie.

Examen rápido

15.9 Determine el flujo eléctrico a través de la superficie en la figura activa 15.28.

- a) $-(3 \text{ C})/\epsilon_0$ b) $(3 \text{ C})/\epsilon_0$ c) 0 d) $-(6 \text{ C})/\epsilon_0$

15.10 Para una superficie cerrada a través de la cual el flujo neto es cero, cada uno de los siguientes cuatro enunciados *podría* ser verdadero. ¿Cuál de los enunciados *debe* ser verdadero? (Puede haber más de uno.) a) No hay cargas adentro de la superficie. b) La carga neta adentro de la superficie es cero. c) El campo eléctrico es cero en todas partes sobre la superficie. d) El número de líneas de campo eléctrico que entran a la superficie es igual al número de las que salen de la superficie.

EJEMPLO 15.7 El campo eléctrico de un cascarón esférico cargado

OBJETIVO Usar la ley de Gauss para determinar los campos eléctricos cuando la simetría es esférica.

PROBLEMA Un cascarón conductor esférico, con radio interior a y radio exterior b , porta una carga total $+Q$ distribuida sobre la superficie de un cascarón conductor (figura 15.29a). La cantidad Q se toma como positiva. a) Determine el campo eléctrico en el interior del cascarón conductor, para $r < a$, y b) el campo eléctrico afuera del cascarón, para $r > b$. c) Si una carga adicional $-2Q$ se coloca en el centro, determine el campo eléctrico para $r > b$. d) ¿Cuál es la distribución de carga sobre la esfera en el inciso c)?

ESTRATEGIA Para cada inciso, dibuje una superficie gaussiana esférica en la región de interés. Sume la carga adentro de la superficie gaussiana, sustituya el área en la ley de Gauss, y resuelva para el campo eléctrico. Para encontrar la distribución de carga en el inciso c), use la ley de Gauss a la inversa: la distribución de carga debe ser tal que el campo electrostático sea cero adentro de un conductor.

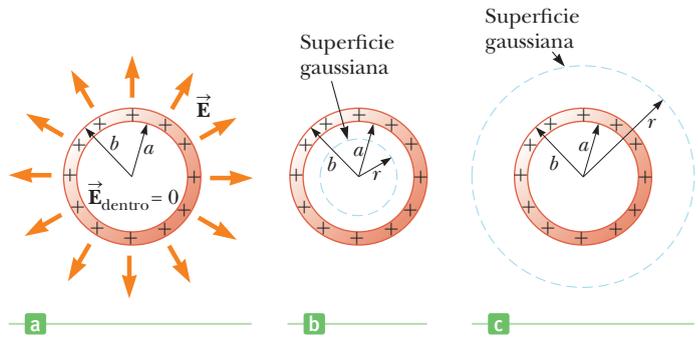


Figura 15.29 (Ejemplo 15.7) a) El campo eléctrico dentro de un cascarón esférico uniformemente cargado es *cero*. También es cero para el material conductor en la región $a < r < b$. El campo exterior es el mismo que el de una carga puntual que tenga una carga total Q ubicada en el centro del cascarón. b) Construcción de una superficie gaussiana para calcular el campo eléctrico *interior* de un cascarón esférico. c) Construcción de una superficie gaussiana para calcular el campo eléctrico *exterior* de un cascarón esférico.

SOLUCIÓN

a) Determine el campo eléctrico para $r < a$.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12, a la superficie ilustrada en la figura 15.29b (observe que no hay carga alguna adentro de esta superficie):

b) Determine el campo eléctrico para $r > b$.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12, a la superficie gaussiana ilustrada en la figura 15.29c:

Divida entre el área:

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = 0 \rightarrow E = 0$$

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

c) Ahora se coloca una carga adicional de $-2Q$ en el centro de la esfera. Calcule el nuevo campo eléctrico afuera de la esfera, para $r > b$.

Aplique la ley de Gauss como en el inciso b), e incluya la nueva carga en Q_{interior} :

$$EA = E(4\pi r^2) = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{+Q - 2Q}{\epsilon_0}$$

Resuelva para el campo eléctrico:

$$E = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

d) Determine la distribución de carga sobre la esfera para el inciso c).

Escriba la ley de Gauss para el interior del cascarón:

$$EA = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} = \frac{Q_{\text{centro}} + Q_{\text{superficie int}}}{\epsilon_0}$$

Determine la carga sobre la superficie interior del cascarón y observe que el campo eléctrico en el conductor es cero:

$$\begin{aligned} Q_{\text{centro}} + Q_{\text{superficie int}} &= 0 \\ Q_{\text{superficie int}} &= -Q_{\text{centro}} = +2Q \end{aligned}$$

Determine la carga sobre la superficie exterior y observe que las cargas en las superficies interior y exterior deben sumar $+Q$:

$$\begin{aligned} Q_{\text{superficie ext}} + Q_{\text{superficie int}} &= Q \\ Q_{\text{superficie ext}} &= -Q_{\text{superficie int}} + Q = -Q \end{aligned}$$

COMENTARIOS Lo importante a notar es que, en cada caso, la carga se dispersa sobre una región con simetría esférica o se ubica en el centro exacto. Esto es lo que permite el cálculo de un valor para el campo eléctrico.

PREGUNTA 15.7 Si la carga en el centro de la esfera se hace positiva, ¿cómo se afecta la carga en la superficie interior de la esfera?

EJERCICIO 15.7 Suponga que la carga en el centro ahora se aumenta a $+2Q$, mientras que la superficie del conductor todavía retiene una cara de $+Q$. a) Determine el campo eléctrico exterior a la esfera, para $r > b$. b) ¿Cuál es el campo eléctrico adentro del conductor, para $a < r < b$? c) Determine la distribución de carga sobre el conductor.

RESPUESTAS a) $E = 3Q/4\pi\epsilon_0 r^2$ b) $E = 0$, que siempre es el caso cuando las cargas no se mueven en un conductor. c) Superficie interior: $-2Q$; superficie exterior: $+3Q$.

En el ejemplo 15.7, no se dijo mucho acerca de la distribución de carga sobre el conductor. Siempre que hay una carga neta distinta a cero, las cargas individuales intentarán alejarse unas de otras tanto como sea posible. Por lo tanto, la carga residirá en la superficie interior o en la superficie exterior. Puesto que el campo eléctrico en el conductor es cero, siempre habrá suficiente carga sobre la superficie interior para cancelar cualquier carga que esté en el centro. En el inciso b) no hay carga en la superficie interior y una carga de $+Q$ en la superficie exterior. En el inciso c), con una carga $-Q$ en el centro, $+Q$ está en la superficie interior y 0 C está en la superficie exterior. Finalmente, en el ejercicio, con $-2Q$ en el centro, debe haber $+2Q$ en la superficie interior y $-Q$ en la superficie exterior. En cada caso, la carga total sobre el conductor permanece igual, $+Q$; sólo se ordena de manera diferente.

Con frecuencia se dice que los problemas como el ejemplo 15.7 tienen “cascarones delgados no conductores” que portan una carga distribuida de manera uniforme. En estos casos no se necesita hacer distinción entre la superficie exterior y la superficie interior del cascarón. El ejemplo siguiente hace dicha suposición implícita.

■ EJEMPLO 15.8 Una hoja de carga plana no conductora

OBJETIVO Aplicar la ley de Gauss a un problema con simetría plana.

PROBLEMA Determine el campo eléctrico arriba y abajo de una hoja de carga plana infinita no conductora con carga positiva uniforme por unidad de área σ (figura 15.30a, página 538).

ESTRATEGIA Por simetría, el campo eléctrico debe ser perpendicular al plano y dirigirse alejándose de él en cualquier lado, como se muestra en la figura 15.30b. Para la superficie gaussiana, elija un pequeño cilindro con eje perpendicular al plano, cada extremo tiene área A_0 . Ninguna línea de campo eléctrico pasa a través de la superficie curva del cilindro, sólo a través de los dos extremos, que tienen área total $2A_0$. Aplique la ley de Gauss y use la figura 15.30b.

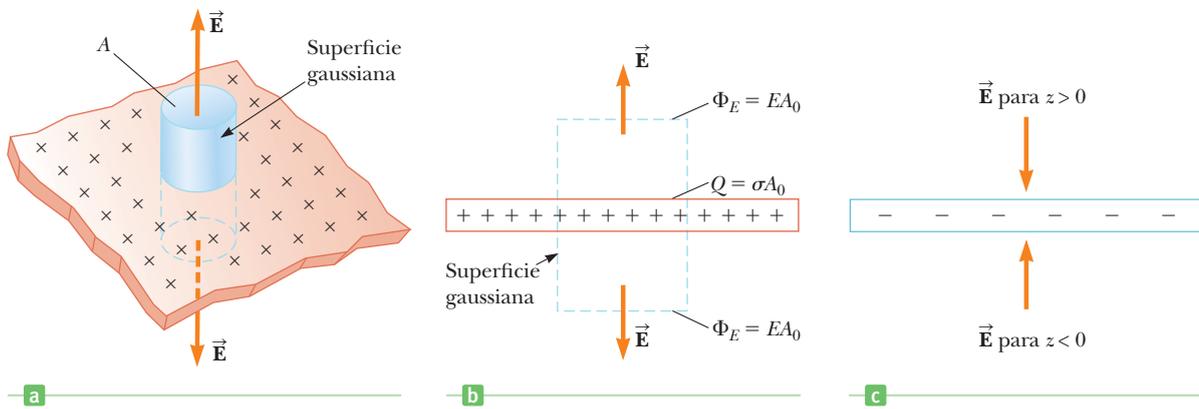


Figura 15.30 (Ejemplo 15.8) a) Una superficie gaussiana cilíndrica que penetra una hoja de carga infinita. b) Una sección transversal del mismo cilindro gaussiano. El flujo a través de cada extremo de la superficie gaussiana es EA_0 . No hay flujo a través de la superficie cilíndrica. c) (Ejercicio 15.8).

SOLUCIÓN

a) Determine el campo eléctrico arriba y abajo de un plano de carga uniforme.

Aplique la ley de Gauss, ecuación 15.12:

La carga total adentro del cilindro gaussiano es la densidad de carga por el área transversal:

$$EA = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0}$$

$$Q_{\text{interior}} = \sigma A_0$$

El flujo eléctrico proviene por completo de los dos extremos, y cada uno tiene área A_0 . Sustituya $A = 2A_0$ y Q_{interior} y resuelva para E .

$$E = \frac{\sigma A_0}{(2A_0)\epsilon_0} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Ésta es la *magnitud* del campo eléctrico. Determine la componente z del campo arriba y abajo del plano. El campo eléctrico apunta alejándose del plano, de modo que es positivo arriba del plano y negativo abajo del plano.

$$E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad z > 0$$

$$E_z = -\frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad z < 0$$

COMENTARIOS Advierta aquí que el plano se tomó como un delgado cascarón no conductor. Desde luego, si está hecho de metal, el campo eléctrico interior es cero, con la mitad de la carga en la superficie superior y la mitad en la superficie inferior.

PREGUNTA 15.8 En realidad, la hoja que porta carga probablemente sería metálica y tendría un grosor pequeño pero no cero. Si porta la misma carga por unidad de área, ¿cuál es el campo eléctrico adentro de la hoja entre las dos superficies?

EJERCICIO 15.8 Suponga que un plano de carga infinito no conductor, como en el ejemplo 15.8, tiene una densidad de carga negativa uniforme de $-\sigma$. Determine el campo eléctrico arriba y abajo de la placa. Bosquee el campo.

RESPUESTAS $E_z = \frac{-\sigma}{2\epsilon_0}, z > 0; E_z = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}, z < 0$. Vea la figura 15.30c para el bosquejo.

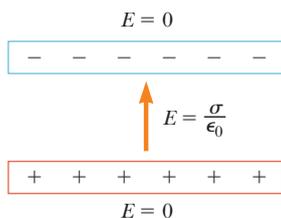


Figura 15.31 Sección transversal de un capacitor de placas paralelas idealizado. Las contribuciones vectoriales del campo eléctrico se suman entre las placas, pero se cancelan afuera.

Un importante elemento de circuito que se estudiará ampliamente en el siguiente capítulo es el capacitor de placas paralelas. El dispositivo consiste de una placa de carga positiva, como en el ejemplo 15.8, con la placa negativa del ejercicio 15.8 colocada sobre ella. En la figura 15.31 se ilustra la suma de estos dos campos. El resultado es un campo eléctrico con el doble de magnitud entre las dos placas:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

[15.13]

Afuera de las placas, el campo eléctrico se cancela.

RESUMEN

15.1 Propiedades de las cargas eléctricas

Las **cargas eléctricas** tienen las siguientes propiedades:

1. Cargas distintas se atraen y cargas iguales se repelen.
2. La carga eléctrica siempre se conserva.
3. La carga eléctrica viene en paquetes discretos que son múltiplos enteros de la carga eléctrica básica $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C.
4. La fuerza entre dos partículas cargadas es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia entre ellas.

15.2 Aislantes y conductores

Los **conductores** son materiales en los que las cargas se mueven libremente en respuesta a un campo eléctrico. Todos los demás materiales se llaman **aislantes**.

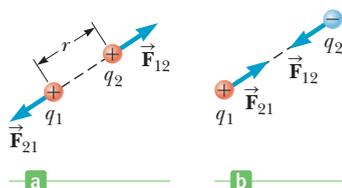
15.3 Ley de Coulomb

La **ley de Coulomb** afirma que la fuerza eléctrica entre dos partículas cargadas estacionarias separadas por una distancia r tiene la magnitud

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad [15.1]$$

donde $|q_1|$ y $|q_2|$ son las magnitudes de las cargas sobre las partículas en coulombs y es la **constante de Coulomb**.

$$k_e \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad [15.2]$$



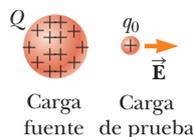
a) La fuerza eléctrica entre dos cargas del mismo signo es repulsiva, y b) es atractiva cuando las cargas tienen signos opuestos.

15.4 El campo eléctrico

En algún punto del espacio existe un campo eléctrico \vec{E} si sobre una pequeña carga de prueba q_0 colocada en dicho punto actúa una fuerza eléctrica \vec{F} . El campo eléctrico se define como

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}}{q_0} \quad [15.3]$$

La **dirección** del campo eléctrico en un punto del espacio se define como la dirección de la fuerza eléctrica que se ejercería sobre una pequeña carga positiva colocada en dicho punto.



La fuerza eléctrica de carga Q sobre una carga de prueba q_0 dividida por q_0 da el campo eléctrico de \vec{E} de Q en ese punto.

La magnitud del campo eléctrico debida a una *carga puntual* q a una distancia r desde la carga puntual es

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad [15.6]$$

15.5 Líneas de campo eléctrico

Las **líneas de campo eléctrico** son útiles para visualizar el campo eléctrico en cualquier región del espacio. El vector de campo eléctrico \vec{E} es tangente a las líneas de campo eléctrico en cada punto. Más aún, el número de líneas de campo eléctrico por unidad de área a través de una superficie perpendicular a las líneas es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en dicha superficie.

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

Un **conductor en equilibrio electrostático** tiene las siguientes propiedades:

1. El campo eléctrico es cero en todas partes dentro del material conductor.
2. Cualquier exceso de carga sobre un conductor aislado debe residir por completo en su superficie.
3. El campo eléctrico justo afuera de un conductor cargado es perpendicular a la superficie del conductor.
4. Sobre un conductor con forma irregular, la carga se acumula donde el radio de curvatura de la superficie es más pequeño, en las puntas afiladas.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

La **ley de Gauss** afirma que el flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta Q dentro de la superficie, dividida por la permitividad del espacio libre, ϵ_0 :

$$EA = \Phi_E = \frac{Q_{\text{interior}}}{\epsilon_0} \quad [15.12]$$

Para distribuciones de carga enormemente simétricas, la ley de Gauss se puede usar para calcular campos eléctricos.



El flujo eléctrico Φ a través de cualquier superficie arbitraria alrededor de una carga q es q/ϵ_0 .

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una bola muy pequeña tiene una masa de 5.0×10^{-3} kg y una carga de $4.0 \mu\text{C}$. ¿Qué magnitud de campo eléctrico dirigido hacia arriba equilibrará el peso de la bola?
 - a) 8.2×10^2 N/C
 - b) 1.2×10^4 N/C
 - c) 2.0×10^{-2} N/C
 - d) 5.1×10^6 N/C
 - e) 3.7×10^3 N/C

- Estime la magnitud de la intensidad del campo eléctrico debido al protón en un átomo de hidrógeno a una distancia de 5.29×10^{-11} m, la posición esperada del electrón en el átomo. a) 10^{-11} N/C b) 10^8 N/C c) 10^{14} N/C d) 10^6 N/C e) 10^{12} N/C
- La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos protones es 2.3×10^{-26} N. ¿Cuán separados están? a) 0.10 m b) 0.022 m c) 3.1 m d) 0.005 7 m e) 0.48 m
- Un campo eléctrico uniforme de 1.0 N/C se establece mediante una distribución de carga uniforme en el plano xy . ¿Cuál es el campo eléctrico en el interior de una bola colocada 0.50 m arriba del plano xy ? a) 1.0 N/C b) -1.0 N/C c) 0 d) 0.25 N/C e) Varía dependiendo de la posición adentro de la bola.
- Dentro de una caja rectangular con 1.0 m de longitud, 2.0 m de ancho y 2.5 m de alto, hay cargas de 3.0 nC, -2.0 nC, -7.0 nC y 1.0 nC. Afuera de la caja hay cargas de 1.0 nC y 4.0 nC. ¿Cuál es el flujo eléctrico a través de la superficie de la caja? a) 0 b) -560 N \cdot m²/C c) -340 N \cdot m²/C d) 260 N \cdot m²/C e) 170 N \cdot m²/C
- Un electrón, con una rapidez de 3.00×10^6 m/s se mueve dentro de un campo eléctrico uniforme de 1.00×10^3 N/C de magnitud. Las líneas de campo son paralelas al movimiento del electrón y apuntan en la misma dirección de la velocidad. ¿Cuánto viaja el electrón antes de llegar al reposo? a) 2.56 cm b) 5.12 cm c) 11.2 cm d) 3.34 m e) 4.24 m
- Una carga de -4.00 nC se ubica en (0, 1.00) m. ¿Cuál es la componente x del campo eléctrico en (4.00, -2.00) m? a) 1.15 N/C b) -2.24 N/C c) 3.91 N/C d) -1.15 N/C e) 0.863 N/C
- Dos cargas puntuales se atraen mutuamente con una fuerza eléctrica de magnitud F . Si una carga se reduce a un tercio de su valor original y la distancia entre las cargas se duplica, ¿cuál es la magnitud resultante de la fuerza eléctrica entre ellas? a) $F/12$ b) $F/3$ c) $F/6$ d) $3F/4$ e) $3F/2$
- ¿En cuál de los siguientes contextos la ley de Gauss *no* puede aplicarse fácilmente para encontrar el campo eléctrico? a) cerca de un largo alambre con carga uniforme, b) arriba de un gran plano cargado de manera uniforme, c) adentro de una bola con carga uniforme, d) afuera de una esfera con carga uniforme, e) la ley de Gauss se puede aplicar fácilmente para encontrar el campo eléctrico en todos estos contextos.
- ¿Qué ocurre cuando un aislante cargado se coloca cerca de un objeto metálico no cargado? a) Se repelen mutuamente. b) Se atraen mutuamente. c) Se atraen o repelen mutuamente, dependiendo de si la carga en el aislante es positiva o negativa. d) No ejercen fuerza electrostática mutua. e) El aislante cargado siempre se descarga de manera espontánea.
- ¿Qué evita que la gravedad te jale a través del suelo hacia el centro de la Tierra? Elige la mejor respuesta. a) La densidad de la materia es muy grande. b) Los núcleos positivos de los átomos de tu cuerpo repelen los núcleos positivos de los átomos del suelo. c) La densidad del suelo es mayor que la densidad de tu cuerpo. d) Los átomos se enlazan juntos mediante enlaces químicos. e) Los electrones en la superficie del suelo y la superficie de tus pies se repelen mutuamente.
- Tres partículas cargadas se colocan en las esquinas de un cuadrado, como se muestra en la figura POM15.12, con carga $-Q$ en las partículas de la esquina superior izquierda y la esquina inferior derecha, y carga $+2Q$ en la partícula en la esquina inferior izquierda. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en la esquina superior derecha, que es un punto en el espacio vacío? a) hacia arriba y a la derecha, b) a la derecha, c) hacia abajo, d) hacia abajo y a la izquierda, e) el campo es exactamente cero en dicho punto.
- Suponga que se quita la carga $+2Q$ en la esquina inferior izquierda de la figura POM15.12. ¿Cuál enunciado es verdadero acerca de la magnitud del campo eléctrico en la esquina superior derecha? a) Se vuelve mayor. b) Se vuelve menor. c) Permanece igual. d) Cambia de manera impredecible. e) Es cero.
- A una moneda metálica se le da una carga eléctrica positiva. ¿Su masa a) aumenta mensurablemente, b) aumenta por una cantidad muy pequeña para medirse directamente, c) permanece invariable, d) disminuye por una cantidad muy pequeña para medirse directamente, e) disminuye mensurablemente?

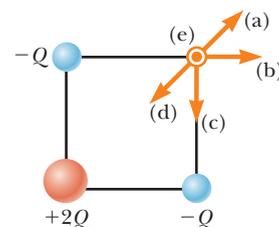


Figura POM15.12 Preguntas de opción múltiple 12 y 13.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un objeto de vidrio se carga a $+3$ nC al frotarlo con un trozo de seda. En el proceso de frotado, ¿se agregaron protones al objeto o se removieron electrones de él?
- Explique, desde un punto de vista atómico, por qué la carga por lo general se transfiere mediante electrones.
- Una persona se coloca en una gran esfera metálica hueca que está aislada de tierra. Si una gran carga se coloca en la esfera, ¿la persona se lastimará al tocar el interior de la esfera?
- ¿Por qué el personal de los hospitales calza zapatos conductores especiales mientras trabaja alrededor del oxígeno?

no en una sala de operaciones? ¿Qué puede ocurrir si el personal usa zapatos con suelas de goma?

5. a) ¿La vida sería diferente si el electrón se carga positivamente y el protón se carga negativamente? b) ¿La elección de los signos tiene alguna relación con las interacciones físicas y químicas? Explique sus respuestas.
6. Si un objeto suspendido A es atraído hacia un objeto cargado B , ¿se puede concluir que A está cargado? Explique.
7. Explique cómo un objeto con carga positiva puede usarse para dejar a otro objeto metálico con una carga negativa neta. Analice el movimiento de las cargas durante el proceso.
8. Considere el punto A en la figura PC15.8 situado a una distancia arbitraria a partir de dos cargas puntuales en un espacio vacío. a) ¿Esto es posible para un campo eléctrico que existe en el punto A en el espacio vacío? b) ¿Existe carga en este punto? c) ¿Existe una fuerza en este punto?
9. Un estudiante está de pie sobre un grueso trozo de material aislante, coloca su mano sobre un generador Van de Graaff y luego enciende el generador. ¿Recibe un choque?

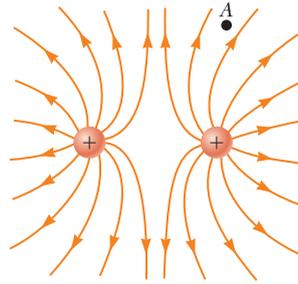


FIGURA PC15.8

10. En buen clima hay un campo eléctrico en la superficie de la Tierra, que apunta hacia abajo en el suelo. ¿Cuál es la carga eléctrica sobre la Tierra en esta situación?
11. Un peine cargado con frecuencia atrae pequeños trozos de papel seco que luego salen disparados cuando tocan el peine. Explique qué es lo que ocurre.
12. ¿Por qué un alambre de tierra se debe conectar a la barra metálica de soporte para una antena de televisión?
13. Entre los campos eléctrico y gravitacional existen grandes similitudes. Una habitación se puede blindar eléctricamente de modo que no haya campos eléctricos en la habitación al rodearla con un conductor. ¿Una habitación se puede blindar gravitacionalmente? Explique.
14. Una superficie esférica rodea una carga puntual q . Describa lo que ocurre al flujo total a través de la superficie si a) la carga se triplica, b) el volumen de la esfera se duplica, c) la superficie cambia a un cubo, d) la carga se mueve hacia otra ubicación dentro de la superficie y e) la carga se mueve hacia afuera de la superficie.
15. Si de una superficie salen más líneas de campo eléctrico de las que entran, ¿qué puede concluir usted acerca de la carga neta encerrada por dicha superficie?
16. Un estudiante que se crió en un país tropical y se encuentra estudiando en Estados Unidos puede no tener experiencia con las chispas de electricidad estática y los choques hasta su primer invierno estadounidense. Explique por qué.

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

15.3 Ley de Coulomb

1. **C|C** Una carga de 7.50 nC se ubica a 1.8 m de una carga de 4.2 nC . a) la magnitud de la fuerza electrostática que una carga ejerce sobre la otra. b) ¿La fuerza es atractiva o repulsiva?
2. Una partícula cargada A ejerce una fuerza de 2.62 N hacia la derecha sobre una partícula cargada B cuando las partículas están separadas 13.7 mm . La partícula B se mueve recto alejándose de A para hacer la distancia entre ellas 17.7 mm . ¿Qué fuerza vectorial ejerce entonces la partícula B sobre A ?
3. **C|C** Dos bolas metálicas A y B de radio despreciable flotan en reposo en la Estación Espacial Libertad entre dos mamparas metálicas, conectadas mediante un hilo no conductor tenso de 2.00 m de longitud. La bola A porta carga q y la bola B porta carga $2q$. Cada bola está a 1.00

m de la mampara. a) Si la tensión en la cuerda es 2.50 N , ¿cuál es la magnitud de q ? b) ¿Qué ocurre con el sistema conforme pasa el tiempo? Explique.

4. Una pequeña esfera de masa $m = 7.50 \text{ g}$ y de carga $q_1 = 32.0 \text{ nC}$ se adjunta al final de una cuerda y cuelga verticalmente como en la figura P15.4. Una segunda carga de la misma masa y carga $q_2 = -58.0 \text{ nC}$ se encuentra por debajo de la primera a una distancia $d = 2.00 \text{ cm}$ por debajo de la primera carga como en la figura P15.4. a) Determine la tensión en la cuerda. b) Si la cuerda puede soportar una tensión máxima de 0.180 N , ¿cuál es el valor más pequeño que d puede tener antes de que la cuerda se rompa?

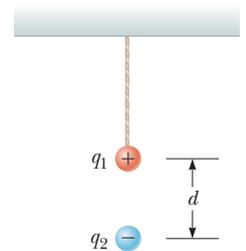


Figura P15.4

5. El núcleo de ${}^8\text{Be}$, que consiste de 4 protones y 4 neutrones, es muy inestable y espontáneamente se rompe en dos partículas alfa (núcleos de helio, cada uno consiste de 2 protones y 2 neutrones). a) ¿Cuál es la fuerza entre las dos partículas alfa cuando están separadas 5.00×10^{-15} m y b) cuál es la magnitud inicial de la aceleración de las partículas alfa debido a esta fuerza? Observe que la masa de una partícula alfa es 4.002 6 u.
6. **BIO** Una molécula de ADN (ácido desoxirribonucleico) tiene $2.17 \mu\text{m}$ de largo. Los extremos de la molécula se ionizan cada uno por separado: negativo en un extremo, positivo en el otro. La molécula helicoidal actúa como un resorte y se comprime 1.00% al cargarse. Determine la constante de resorte efectiva de la molécula.
7. Una pequeña esfera de carga $0.800 \mu\text{C}$ cuelga del extremo de un resorte como en la figura P15.7a. Cuando otra pequeña esfera de carga $-0.600 \mu\text{C}$ se cuelga por debajo de la primera esfera como en la figura P15.7b, el resorte se estira por $d = 3.50$ cm de su longitud original y llega a una nueva posición de equilibrio con una separación entre las cargas de $r = 5.00$ cm. ¿Cuál es la constante de fuerza del resorte?

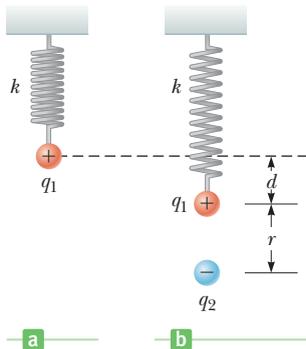


Figura P15.7

8. **S** Cuatro cargas puntuales están en las esquinas de un cuadrado de lado a , como se muestra en la figura P15.8. Determine la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica resultante sobre q , con k_e , q y a en forma simbólica.
9. Dos pequeñas esferas conductoras idénticas se colocan con sus centros separados 0.30 m. A una se le proporciona una carga de 12×10^{-9} C, a la otra una carga de -18×10^{-9} C. a) Encuentre la fuerza electrostática ejercida sobre una esfera por la otra. b) Las esferas se conectan mediante un alambre conductor. Determine la fuerza electrostática entre las dos después de alcanzar el equilibrio cuando ambas esferas tienen la misma carga.
10. Calcule la magnitud y dirección de la fuerza de Coulomb sobre cada una de las tres cargas que se muestran en la figura P15.10.

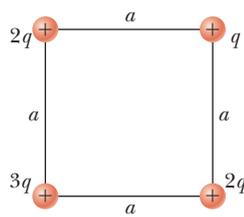


Figura P15.8

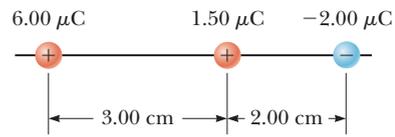


Figura P15.10 Problemas 10 y 18.

11. **M** Tres cargas se ordenan como se muestra en la figura P15.11. Determine la magnitud y dirección de la fuerza electrostática sobre la carga en el origen.

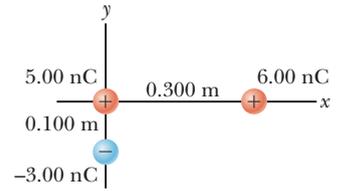


Figura P15.11

12. Una carga positiva $q_1 = 2.70 \mu\text{C}$ sobre una superficie horizontal sin fricción está unida a un resorte de constante de fuerza k como en la figura P15.12. Cuando una carga $q_2 = -8.60 \mu\text{C}$ se coloca a 9.50 cm de distancia de la carga positiva, el resorte se estira 5.00 mm, lo que reduce la distancia entre las cargas a $d = 9.00$ cm. Encuentre el valor de k .

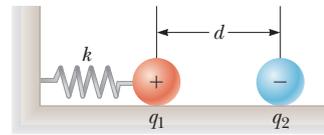


Figura P15.12

13. Tres cargas puntuales se colocan en las esquinas de un triángulo equilátero como en la figura P15.13. Determine la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica neta sobre la carga de $2.00 \mu\text{C}$.

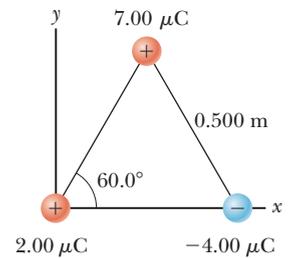


Figura P15.13
(Problemas 13 y 24)

14. Dos bloques de metal idénticos sobre una superficie horizontal sin fricción son conectados por un resorte de metal ligero con constante $k = 100$ N/m y de longitud sin estirar $L_i = 0.400$ m, como en la figura P15.14a. Una carga Q se coloca lentamente en cada bloque lo que causa que el resorte se estire a una longitud de equilibrio $L = 0.500$ m, como en la figura P15.14b. Determine el valor de Q modele los bloques como partículas cargadas.

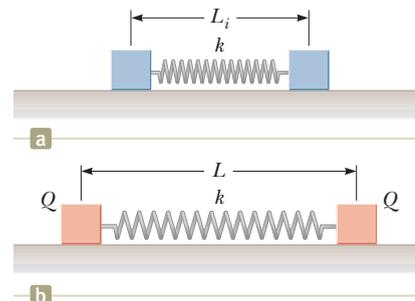


Figura P15.14

15. Dos pequeñas esferas metálicas, cada una de masa $m = 0.20 \text{ g}$, se suspenden como péndulos mediante cuerdas ligeras a partir de un punto común, como se muestra en la figura P15.15. A las esferas se les proporciona la misma carga eléctrica y se encuentra que llegan al equilibrio cuando cada cuerda está a un ángulo $\theta = 5.0^\circ$ con la vertical. Si cada cuerda tiene de largo $L = 30.0 \text{ cm}$, ¿cuál es la magnitud de la carga sobre cada esfera?

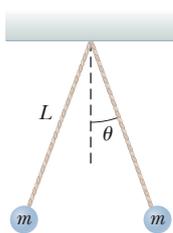


Figura P15.15

16. **PG** La partícula A, con carga $3.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en el origen; la partícula B, con carga $-6.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en $(4.00 \text{ m}, 0)$; y la partícula C, con carga $1.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, está en $(0, 3.00 \text{ m})$. a) ¿Cuál es la componente x de la fuerza eléctrica ejercida por A sobre C? b) ¿Cuál es la componente y de la fuerza ejercida por A sobre C? c) Determine la magnitud de la fuerza ejercida por B sobre C? d) Calcule la componente x de la fuerza ejercida por B sobre C. e) Calcule la componente y de la fuerza ejercida por B sobre C. f) Sume los dos componentes x para obtener la componente x resultante de la fuerza eléctrica que actúa sobre C. g) Repita el inciso f) para la componente y . h) Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza eléctrica resultante que actúa sobre C.

15.4 El campo eléctrico

17. Un pequeño objeto, de 3.80 g de masa y $-18 \mu\text{C}$ de carga, está suspendido sobre el suelo sin moverse cuando es sumergido en un campo eléctrico uniforme perpendicular al suelo. ¿Cuál es la magnitud y dirección del campo eléctrico?
18. a) Determine la intensidad del campo eléctrico en un punto 1.00 cm a la izquierda de la carga media que se muestra en la figura P15.10. b) Si una carga de $-2.00 \mu\text{C}$ se coloca en este punto, ¿cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza sobre ella?
19. Un campo eléctrico de magnitud $5.25 \times 10^5 \text{ N/C}$ apunta al sur en un lugar determinado. Encontrar la magnitud y dirección de la fuerza sobre una carga de $-6.00 \mu\text{C}$ en este lugar.
20. Un electrón se acelera mediante un campo eléctrico constante de 300 N/C de magnitud. a) Determine la aceleración del electrón. b) Use las ecuaciones de movimiento con aceleración constante para encontrar la rapidez del electrón después de $1.00 \times 10^{-8} \text{ s}$, suponiendo que parte desde el reposo.

21. Un pequeño bloque de masa m y carga Q se coloca en un plano aislado, sin fricción, con una inclinación a un ángulo θ como en la figura P15.21. Un campo eléctrico se aplica en paralelo a la pendiente. a) Encontrar una expresión para la magnitud del campo eléctrico que permite al bloque permanecer en reposo. b) Si $m = 5.40 \text{ g}$, $Q = -7.00 \mu\text{C}$ y $\theta = 25.0^\circ$,

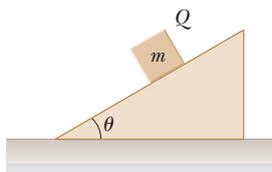


Figura P15.21

determine la magnitud y la dirección del campo eléctrico que permite al bloque permanecer en reposo sobre la pendiente.

22. Una pequeña esfera de carga $q = +68 \mu\text{C}$ y masa $m = 5.8 \text{ g}$ está unida a una cuerda ligera y es colocada en un campo eléctrico uniforme \vec{E} que forma un ángulo $\theta = 37^\circ$ con la horizontal. El extremo opuesto de la cuerda se fija a la pared y la esfera está en equilibrio estático cuando la cuerda está en posición horizontal como en la figura P15.22. a) Construya un diagrama de cuerpo libre para la esfera. Buscar b) la magnitud del campo eléctrico y c) la tensión en la cuerda.

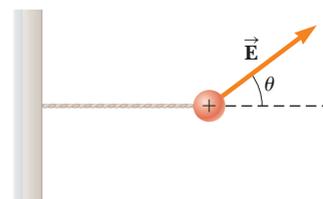


Figura P15.22

23. **M** Un protón acelera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme de 640 N/C . Algún tiempo después, su rapidez es $1.20 \times 10^6 \text{ m/s}$. a) Determine la magnitud de la aceleración del protón. b) ¿Cuánto tarda el protón en alcanzar esta rapidez? c) ¿Cuánto recorre en este intervalo? d) ¿Cuál es su energía cinética en ese tiempo posterior?
24. **CIC** a) Determine la magnitud y dirección del campo eléctrico en la posición de la carga de $2.00 \mu\text{C}$ en la figura P15.13. b) ¿Cómo afectaría el campo eléctrico en dicho punto, si la carga ahí se duplica? ¿Se afectaría la magnitud de la fuerza eléctrica?
25. **S** Dos cargas positivas iguales están en las esquinas opuestas de un trapecio como en la figura P15.25. Encuentre expresiones simbólicas de las componentes del campo eléctrico en el punto P.
26. Tres cargas puntuales están situadas en un arco circular, como se muestra en la figura P15.26. a) ¿Cuál es el campo eléctrico total en P, el centro del arco? b) Halle la fuerza eléctrica que se ejerce sobre una carga de -5.00 nC colocada en P.

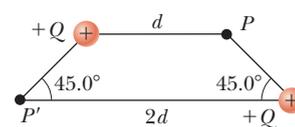


Figura P15.25

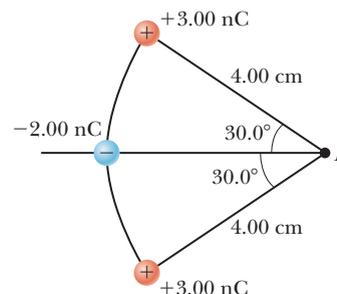


Figura P15.26

27. En la figura P15.27, determine el punto (distinto a infinito) donde el campo eléctrico total es cero.

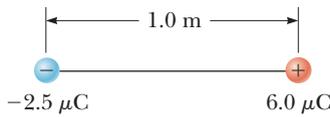


Figura P15.27

28. Tres cargas están en las esquinas de un triángulo equilátero, como se muestra en la figura P15.28. Calcule el campo eléctrico en un punto a la mitad entre las dos cargas sobre el eje x .

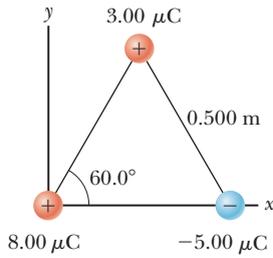


Figura P15.28

29. Tres cargas idénticas ($q = -5.0 \mu\text{C}$) yacen sobre un círculo de 2.0 m de radio en ángulos de 30° , 150° y 270° , como se muestra en la figura P15.29. ¿Cuál es el campo eléctrico resultante en el centro del círculo?

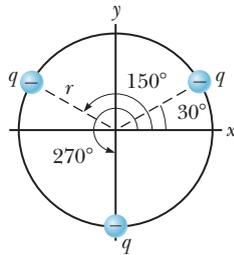


Figura P15.29

15.5 Líneas de campo eléctrico

15.6 Conductores en equilibrio electrostático

30. La figura P15.30 muestra las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales separadas por una pequeña distancia. a) Determine la razón q_1/q_2 . b) ¿Cuáles son los signos de q_1 y q_2 ?
31. a) Bosqueje las líneas de campo eléctrico alrededor de una carga puntual aislada $q > 0$. b) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de una carga puntual negativa aislada de magnitud $-2q$.
32. a) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de dos cargas puntuales positivas de magnitud $1 \mu\text{C}$ colocadas muy juntas. b) Bosqueje el patrón de campo eléctrico alrededor de dos cargas puntuales positivas de $-2 \mu\text{C}$, colocadas muy juntas. c) Bosqueje el patrón alrededor de dos cargas puntuales de $+1 \mu\text{C}$ y $-2 \mu\text{C}$, colocadas muy juntas.
33. Dos cargas puntuales están separadas una pequeña distancia. a) Bosqueje las líneas de campo eléctrico para las dos, si una tiene una carga cuatro veces mayor que la otra y ambas cargas son positivas. b) Repita para el caso cuando ambas cargas son negativas.

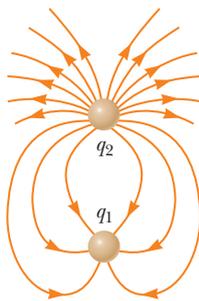


Figura P15.30

34. **S** Tres cargas positivas iguales están en las esquinas de un triángulo equilátero de lado a como en la figura P15.34. Supongamos que las tres cargas juntas crean un campo eléctrico. a) Dibuje las líneas de campo eléctrico en el plano de las cargas. b) Encuentre la ubicación de un punto (que no sea ∞) donde el campo eléctrico es cero. ¿Cuáles son c) la magnitud y d) la dirección del campo eléctrico en P debido a las dos cargas en la base?

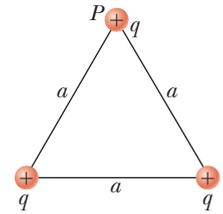


Figura P15.34

35. Consulte la figura 15.20. La carga que baja al centro del conductor hueco tiene una magnitud de $5 \mu\text{C}$. Determine la magnitud y signo de la carga en el interior y el exterior del conductor hueco cuando la carga es como se muestra en a) figura 15.20a, b) figura 15.20b, c) figura 15.20c y d) figura 15.20d.

15.8 El generador Van de Graaff

36. El domo de un generador Van de Graaff recibe una carga de $2.0 \times 10^{-4} \text{ C}$. Determine la intensidad del campo eléctrico a) dentro del domo, b) en la superficie del domo, si supone que tiene un radio de 1.0 m y c) 4.0 m del centro del domo. *Sugerencia:* Véase la sección 15.6 para revisar las propiedades de los conductores en equilibrio electrostático. Además, use el hecho de que los puntos en la superficie están fuera de una distribución de carga con simetría esférica; la carga total puede considerarse como ubicada en el centro de la esfera.
37. Si la intensidad del campo eléctrico en el aire supera $3.0 \times 10^6 \text{ N/C}$, el aire se convierte en conductor. Con este hecho, determine la cantidad máxima de carga que puede portar una esfera metálica de 2.0 m de radio. (Vea la sugerencia del problema 36.)
38. En el experimento de la gota de aceite de Millikan, un atomizador (un rociador con una boquilla fina) se usa para introducir muchas pequeñas gotitas de aceite entre dos placas metálicas paralelas cargadas. Algunas de las gotas recogen uno o más electrones en exceso. La carga sobre las placas se ajusta de modo que la fuerza eléctrica sobre los electrones en exceso equilibra exactamente el peso de la gota. La idea es una gota que tenga la fuerza eléctrica más pequeña y suponer que tiene sólo un electrón en exceso. Esta estrategia permite al observador medir la carga sobre el electrón. Suponga que se usa un campo eléctrico de $3 \times 10^4 \text{ N/C}$. La carga en un electrón es aproximadamente $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Estime el radio de una gota de aceite de 858 kg/m^3 de densidad para la cual su peso se podría equilibrar mediante la fuerza eléctrica de este campo en un electrón. (El problema 38 es cortesía de E. F. Redish. Para más problemas de este tipo, visite www.physics.umd.edu/perg/.)

39. Un generador Van de Graaff se carga de modo que un protón en su superficie acelera radialmente hacia afuera a $1.52 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$. Determine a) la magnitud de la fuerza eléctrica sobre el protón en dicho instante y b) la magnitud y dirección del campo eléctrico en la superficie del generador.

15.9 Flujo eléctrico y ley de Gauss

40. Un campo eléctrico de magnitud $E = 435 \text{ N/C}$ forma un ángulo de $\theta = 65.0^\circ$ con una superficie plana de área $A = 3.50 \text{ m}^2$, como en la figura P15.40. Encuentre el flujo eléctrico a lo largo de esta superficie.

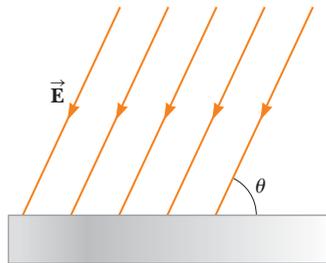


Figura P15.40

41. **M** Un campo eléctrico de 3.50 kN/C de intensidad se aplica a lo largo del eje x . Calcule el flujo eléctrico a través de un plano rectangular de 0.350 m de ancho y 0.700 m de largo si a) el plano es paralelo al plano yz , b) el plano es paralelo al plano xy y c) el plano contiene el eje y y su normal forma un ángulo de 40.0° con el eje x .
42. **CIC** El campo eléctrico en todas partes sobre la superficie de una esfera cargada de 0.230 m de radio tiene una magnitud de 575 N/C y apunta radialmente hacia afuera desde el centro de la esfera. a) ¿Cuál es la carga neta sobre la esfera? b) ¿Qué puede concluir acerca de la naturaleza y distribución de carga dentro de la esfera?

43. **S** En la figura P15.43 se bosquejan cuatro superficies cerradas, de S_1 a S_4 , en conjunto con las cargas $-2Q$, Q y $-Q$. (Las líneas de color son las intersecciones de las superficies con la página.) Determine el flujo eléctrico en cada superficie.

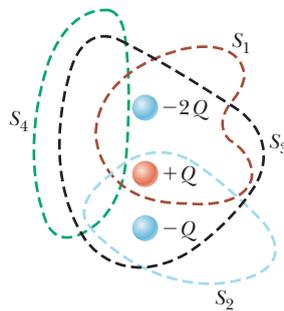


Figura P15.43

44. Una carga $q = +5.80 \mu\text{C}$ está situado en el centro de un tetraedro regular (una superficie de cuatro lados) como en la figura P15.44. Encuentre a) el flujo eléctrico total a través del tetraedro y b) el flujo eléctrico a través de una de las caras del tetraedro.

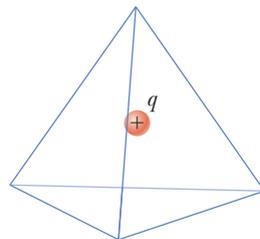


Figura P15.44

45. Una carga puntual q se ubica en el centro de un cascarón esférico de radio a que tiene una carga $-q$ distribuida de manera uniforme sobre su superficie. Determine el campo eléctrico a) para todos los puntos fuera del cascarón esférico y b) para un punto dentro del cascarón a una distancia r del centro.

46. **CIC** Una carga de $1.70 \times 10^2 \mu\text{C}$ está en el centro de un cubo con bordes de 80.0 cm . No hay otras cargas en la vecindad. a) Determine el flujo a través de toda la superficie del cubo. b) Determine el flujo a través de cada cara del cubo. c) ¿Sus respuestas a los incisos a) o b) cambian si la carga no estuviese en el centro? Explique.

47. Suponga que el cascarón esférico conductor de la figura 15.29 porta una carga de 3.00 nC y que una carga de -2.00 nC está en el centro de la esfera. Si $a = 2.00 \text{ m}$ y $b = 2.40 \text{ m}$, determine el campo eléctrico en a) $r = 1.50 \text{ m}$, b) $r = 2.20 \text{ m}$ y c) $r = 2.50 \text{ m}$. d) ¿Cuál es la distribución de carga sobre la esfera?

48. **S** Una placa no conductora muy grande, que yace en el plano xy , porta una carga por unidad de área σ . Una segunda placa similar, ubicada en $z = 2.00 \text{ cm}$ y orientada paralela al plano xy , porta una carga por unidad de área -2σ . Determine el campo eléctrico a) para $z < 0$, b) $0 < z < 2.00 \text{ cm}$ y c) $z > 2.00 \text{ cm}$.

Problemas adicionales

49. En el espacio profundo, dos esferas, cada una con 5.00 m de radio, se conectan mediante un cordón no conductor de $3.00 \times 10^2 \text{ m}$. Si una carga de 35.0 mC se distribuye uniformemente sobre la superficie de cada esfera, calcule la tensión en la cuerda.

50. **CIC** Una delgada hoja de carga plana no conductora porta una carga uniforme por unidad de área de $5.20 \mu\text{C}/\text{m}^2$, como en la figura 15.30. a) Encuentre el campo eléctrico a una distancia de 8.70 cm de la placa. b) Explique si su resultado cambia conforme varía la distancia desde la hoja.

51. Tres cargas puntuales se alinean a lo largo del eje x , como se muestra en la figura P15.51. Encuentre el campo eléctrico en la posición $x = +2.0 \text{ m}$, $y = 0$.

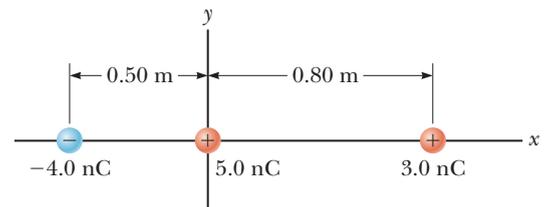


Figura P15.51

52. **M** Una pequeña bola plástica de masa $m = 2.00 \text{ g}$ está suspendida mediante una cuerda de largo $L = 20.0 \text{ cm}$ en un campo eléctrico uniforme, como se muestra en la figura P15.52. Si la bola está en equilibrio cuando la cuerda forma un ángulo $\theta = 15.0^\circ$ con la vertical, como se indica, ¿cuál es la carga neta sobre la bola?

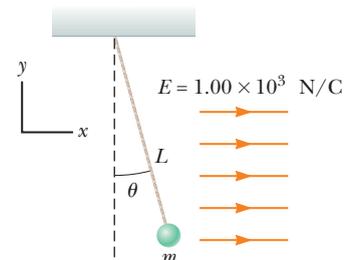


Figura P15.52

53. a) Dos cargas puntuales idénticas $+q$ se ubican sobre el eje y en $y = +a$ y $y = -a$. ¿Cuál es el campo eléctrico a lo largo del eje x en $x = b$? b) Un anillo circular de carga, de radio a , tiene una carga positiva total Q distribuida de manera uniforme alrededor suyo. El anillo está en el plano $x = 0$ con su centro en el origen. ¿Cuál es el campo eléctrico a lo largo del eje x en $x = b$ debido al anillo de carga? *Sugerencia:* Considere que la carga Q consiste de muchos pares de cargas puntuales idénticas colocadas en los extremos de diámetros del anillo.

54. **S** Los electrones en un haz particular tienen cada uno energía cinética K . Determine la magnitud del campo eléctrico que detendrá a estos electrones en una distancia d , y exprese la respuesta simbólicamente en términos de K , e y d . ¿El campo eléctrico debe apuntar en la dirección del movimiento del electrón, o debe apuntar en la dirección opuesta?

55. **S** Una carga puntual $+2Q$ está en el origen y otra carga puntual $-Q$ se encuentra a lo largo del eje x en $x = d$ como en la figura P15.55. Encuentre expresiones simbólicas de las componentes de la fuerza neta sobre una tercera carga puntual $+Q$ situada a lo largo del eje y en $y = d$.

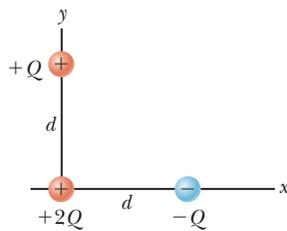


Figura P15.55

56. **C|C** Una bola de corcho de 1.00 g, con una carga de 2.00 mC, está suspendida verticalmente sobre una cuerda ligera de 0.500 m de largo en presencia de un campo eléctrico uniforme dirigido hacia abajo, con magnitud $E = 1.00 \times 10^5$ N/C. Si la bola se desplaza ligeramente de la vertical, oscila como un péndulo simple. a) Determine el periodo de oscilación de la bola. b) ¿En el cálculo para el inciso a) se debe incluir gravedad? Explique.

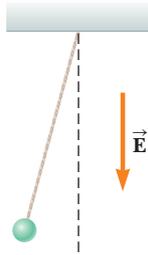


Figura P15.56

57. Dos esferas de 2.0 g están suspendidas mediante cuerdas ligeras de 10.0 cm de largo (figura P15.57). En la dirección x se aplica un campo eléctrico uniforme. Si las esferas tienen cargas de -5.0×10^{-8} C y -5.0×10^{-8} C, determine la intensidad del campo eléctrico que permite a las esferas estar en equilibrio en $\theta = 10^\circ$.

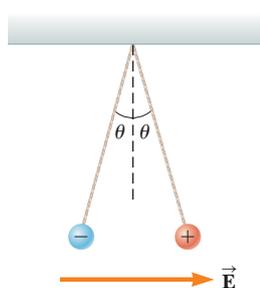


Figura P15.57

58. **C|C** Una carga puntual de $5.00 \mu\text{C}$ de magnitud está en el origen de una sistema coordenado, y una carga de $-4.00 \mu\text{C}$ está en el punto $x = 1.00$ m. Hay un punto sobre el eje x , en x menor que infinito, donde el campo

eléctrico tiende a cero. a) Demuestre mediante argumentos conceptuales que este punto no se puede ubicar entre las cargas. b) Demuestre mediante argumentos conceptuales que el punto no puede estar en alguna ubicación entre $x = 0$ e infinito negativo. c) Demuestre mediante argumentos conceptuales que el punto debe estar entre $x = 100$ m y $x =$ infinito positivo. d) Use los valores dados para encontrar el punto y demuestre que es consistente con su argumento conceptual.

59. Dos esferas de caucho duro, de masa $m = 15.0$ g, se frotan vigorosamente con piel en un día seco y luego se suspenden de una barra con dos cuerdas aislantes de longitud $L = 5.00$ cm, cuyos puentes de soporte están a una distancia $d = 3.00$ cm uno del otro, como se muestra en la figura 15.59. Durante el frotamiento, una esfera recibe el doble de carga que la otra. Se observa que cuelgan en equilibrio, cada una a un ángulo $\theta = 10.0^\circ$ con la vertical. Estime la cantidad de carga que se encuentra sobre cada esfera.

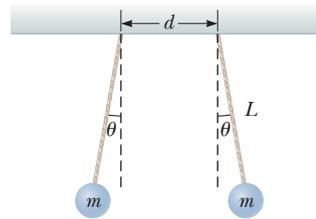


Figura P15.59

60. Dos pequeñas perlas con cargas positivas $q_1 = 3q$ y $q_2 = q$ se fijan en los extremos opuestos de una barra horizontal de aislamiento de longitud $d = 1.50$ m. La perla con carga q_1 está en el origen. Como se muestra en la figura P15.60, una tercera perla cargada está libre para deslizarse sobre la barra. ¿En qué posición x está la tercera perla en equilibrio?

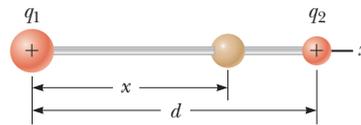


Figura P15.60

61. **M** Una esfera conductora sólida de 2.00 cm de radio tiene una carga de $8.00 \mu\text{C}$. Un cascarón esférico conductor de 4.00 cm de radio interior y radio exterior de 5.00 cm es concéntrico con la esfera sólida y tiene una carga de $-4.00 \mu\text{C}$. Encuentre el campo eléctrico en a) $r = 1.00$ cm, b) $r = 3.00$ cm, c) $r = 4.50$ cm y d) $r = 7.00$ cm desde el centro de esta configuración de carga.

62. Tres cargas puntuales idénticas, cada una con masa $m = 0.100$ kg, cuelgan de tres cuerdas, como se muestra

en la figura P15.62. Si las longitudes de las cuerdas izquierda y derecha son cada una $L = 30.0$ cm y si el ángulo θ es 45.0° , determine el valor de q .

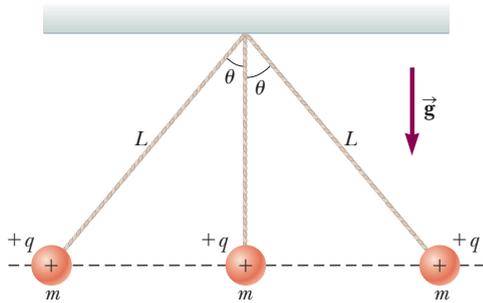


Figura P15.62

63. Cada uno de los electrones en un haz particular tiene una energía cinética de 1.60×10^{-17} J. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico uniforme (que apunta en la dirección de movimiento del electrón) que detendrá a estos electrones en una distancia de 10.0 cm? b) ¿Cuánto tiempo tardarán en detenerse los electrones? c) Después de que los electrones se detienen, ¿qué harán? Explique.

64. Protones se proyectan con una rapidez inicial $v_0 = 9550$ m/s hacia una región donde está presente un campo eléctrico uniforme $E = 720$ N/C (figura P15.64). Los protones van a golpear un blanco que se encuentra a una distancia horizontal de 1.27 mm desde el punto donde se lanzaron los protones. Determine a) los dos ángulos de proyección θ que resultarán en un blanco y b) la duración total de vuelo para cada una de las dos trayectorias.

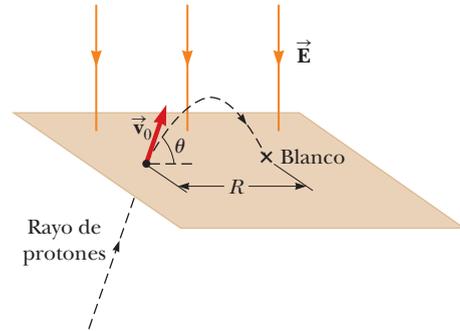
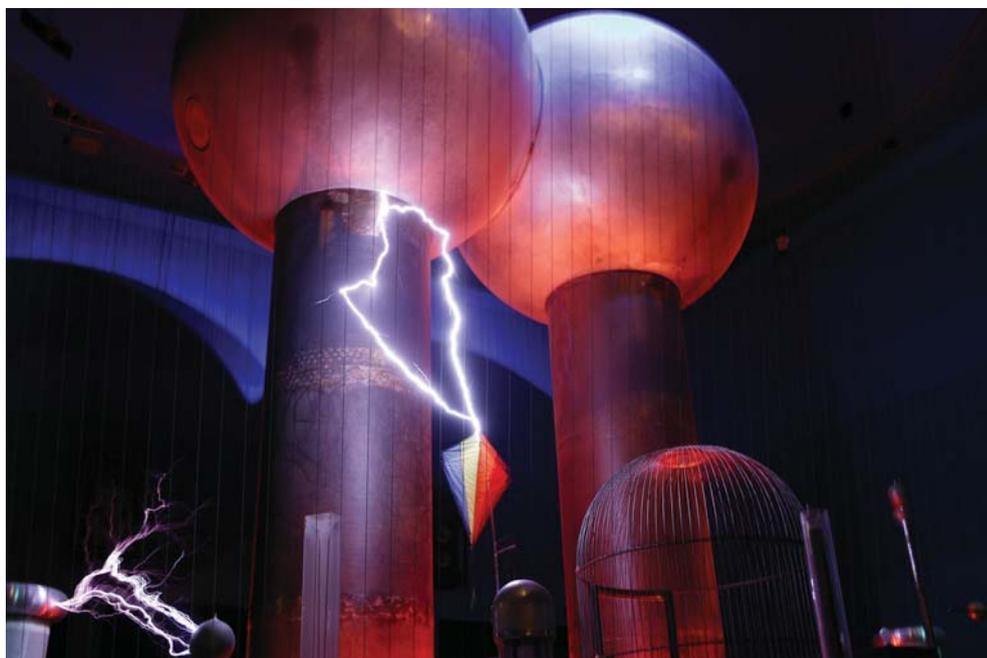


Figura P15.64

El generador Van de Graaff más grande del mundo aislado del aire produce relámpagos en el interior del Museo de Ciencias de Boston. Las descargas ocurren cuando la diferencia de voltaje se vuelve lo suficientemente grande como para ionizar el aire, una instancia de rompimiento dieléctrico.

Yoshiki Hase, Cortesía del Museum of Science, Boston



16

Energía eléctrica y capacitancia

- 16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico
- 16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales
- 16.3 Potenciales y conductores cargados
- 16.4 Superficies equipotenciales
- 16.5 Aplicaciones
- 16.6 Capacitancia
- 16.7 El capacitor de placas paralelas
- 16.8 Combinaciones de capacitores
- 16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado
- 16.10 Capacitores con dieléctricos

El concepto de energía potencial se introdujo en el capítulo 5, en conexión con las fuerzas conservativas de gravedad y resortes. Con el principio de conservación de la energía, a menudo es posible evitar trabajar de manera directa con fuerzas cuando se resuelven problemas. Aquí aprenderá que el concepto de energía potencial también es útil en el estudio de la electricidad. Dado que la fuerza de Coulomb es conservativa, se puede definir una energía potencial eléctrica que corresponda a dicha fuerza. Además, se define un potencial eléctrico —la energía potencial por unidad de carga— que corresponde al campo eléctrico.

Con el concepto de potencial eléctrico a mano, podemos comenzar a entender los circuitos eléctricos, iniciando con una investigación de los elementos de circuito comunes llamados capacitores. Estos dispositivos simples almacenan energía eléctrica y se encuentran virtualmente en todas partes, desde circuitos grabados en un microchip, hasta la creación de enormes estallidos de potencia en experimentos de fusión.

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

La energía potencial eléctrica y el potencial eléctrico son conceptos estrechamente relacionados. El potencial eléctrico evidencia ser sólo la energía potencial eléctrica por unidad de carga. Esta relación es similar a la que existe entre fuerza eléctrica y campo eléctrico, que es la fuerza eléctrica por unidad de carga.

Trabajo y energía potencial eléctrica

Recuerde del capítulo 5 que el trabajo realizado por una fuerza conservativa \vec{F} sobre un objeto depende sólo de las posiciones inicial y final del objeto y no de la trayectoria que

se sigue entre estos dos puntos. Esto, a su vez, significa que existe una función de energía potencial EP . Como se vio, la energía potencial es una cantidad escalar con el cambio en energía potencial igual, por definición, al negativo del trabajo realizado por la fuerza conservativa: $\Delta EP = EP_f - EP_i = -W_f$.

Tanto la ley de fuerza de Coulomb como la ley universal de gravedad son proporcionales a $1/r^2$. Puesto que tienen la misma forma matemática y dado que la fuerza de gravedad es conservativa, asumimos que **la fuerza de Coulomb también es conservativa**. Como con la gravedad, con esta fuerza se puede asociar una función de energía potencial eléctrica.

Para hacer estas ideas más cuantitativas, imagine una pequeña carga positiva colocada en el punto A en un campo eléctrico *uniforme* \vec{E} , como en la figura 16.1. Por simplicidad, considere primero sólo campos eléctricos constantes y cargas que se mueven paralelas a dicho campo en una dimensión (el eje x). El campo eléctrico entre placas paralelas con cargas iguales y opuestas, es un ejemplo de un campo que es aproximadamente constante. (Véase el capítulo 15.) Conforme la carga se mueve del punto A al punto B bajo la influencia del campo eléctrico \vec{E} , el trabajo realizado sobre la carga por el campo eléctrico es igual a la parte de la fuerza eléctrica $q\vec{E}$ que actúa paralela al desplazamiento, por el desplazamiento $\Delta x = x_f - x_i$:

$$W_{AB} = F_x \Delta x = qE_x(x_f - x_i)$$

En esta expresión, q es la carga y E_x es el componente vectorial de \vec{E} en la dirección x (no la magnitud de \vec{E}). A diferencia de la magnitud de \vec{E} , el componente E_x puede ser positivo o negativo, de acuerdo con la dirección de \vec{E} , aunque en la figura 16.1 E_x es positivo. Finalmente, observe que el desplazamiento, como qy y E_x , también puede ser positivo o negativo, de acuerdo con la dirección del desplazamiento.

La expresión anterior para el trabajo realizado por un campo eléctrico sobre una carga que se mueve en una dimensión es válida para cargas positivas y negativas y para campos eléctricos constantes que apuntan en *cualquier* dirección. Cuando se sustituyen números con signos correctos, resulta automáticamente el signo correcto global. En algunos libros se usa la expresión $W = qEd$, donde E es la magnitud del campo eléctrico y d es la distancia que recorre la partícula. ¡La debilidad de esta formulación es que no permite, matemáticamente, trabajo eléctrico negativo sobre cargas positivas, ni trabajo eléctrico positivo sobre cargas negativas! No obstante, la expresión es fácil de recordar y útil para encontrar magnitudes: la magnitud del trabajo realizado por un campo eléctrico constante sobre una carga que se mueve paralela al campo siempre está dada por $|W| = |q|Ed$.

Es posible sustituir la definición de trabajo eléctrico en el teorema trabajo-energía (suponga ausencia de otras fuerzas):

$$W = qE_x \Delta x = \Delta EC$$

La fuerza eléctrica es conservativa, así que el trabajo eléctrico sólo depende de los puntos finales de la trayectoria, A y B , no de la trayectoria tomada. Por lo tanto, conforme la carga acelera hacia la derecha en la figura 16.1, gana energía cinética y pierde una cantidad igual de energía potencial. Recuerde del capítulo 5 que **el trabajo realizado por una fuerza conservativa puede reinterpretarse como el negativo del cambio en una energía potencial asociada con dicha fuerza**. Esta interpretación origina la definición del cambio en energía potencial eléctrica:

El cambio en energía potencial eléctrica, ΔEP , de un sistema que consiste en un objeto con carga q que se mueve a lo largo de un desplazamiento Δx en un campo eléctrico constante \vec{E} está dado por

$$\Delta EP = -W_{AB} = -qE_x \Delta x \quad [16.1]$$

donde E_x es el componente x del campo eléctrico y $\Delta x = x_f - x_i$ es el desplazamiento de la carga a lo largo del eje x .

Unidad SI: joule (J)

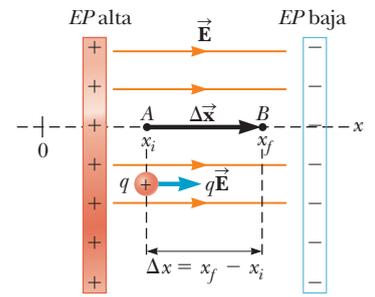
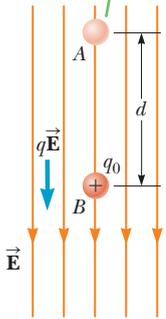


Figura 16.1 Cuando una carga q se mueve en un campo eléctrico uniforme \vec{E} desde el punto A hasta el punto B , el trabajo realizado sobre la carga por la fuerza eléctrica es $qE_x \Delta x$.

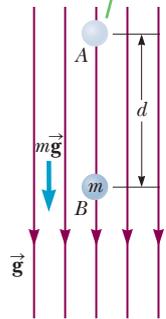
◀ Cambio en energía potencial eléctrica

Conforme una carga de prueba positiva se mueve de A a B, la energía potencial eléctrica disminuye.



a

Conforme un objeto de masa se mueve de A a B, la energía potencial gravitacional disminuye.



b

Figura 16.2 a) Cuando el campo eléctrico \vec{E} se dirige hacia abajo, el punto B está a un menor potencial eléctrico que el punto A. b) Un objeto de masa m se mueve en la dirección del campo gravitacional \vec{g} .

Aunque la energía potencial se puede definir para cualquier campo eléctrico, **la ecuación 16.1 sólo es válida para el caso de un campo eléctrico uniforme (es decir, constante), para una partícula que experimenta un desplazamiento a lo largo de un eje dado (aquí llamado eje x)**. Puesto que el campo eléctrico es conservativo, el cambio en energía potencial no depende de la trayectoria. En consecuencia, no es importante si la carga permanece o no sobre el eje en todo momento durante el desplazamiento: el cambio en energía potencial será el mismo. En secciones posteriores se examinarán situaciones en las que el campo eléctrico no es uniforme.

En la figura 16.2 se pueden comparar las energías potenciales eléctrica y gravitacional. En esta figura, los campos eléctrico y gravitacional se dirigen ambos hacia abajo. Vemos que la carga positiva en un campo eléctrico actúa de forma muy parecida a una masa en un campo de gravedad: una carga positiva en el punto A cae en la dirección del campo eléctrico, tal como una masa positiva cae en la dirección del campo de gravedad. Sea el punto B el punto cero para la energía potencial en las figuras 16.2a y 16.2b. A partir de la conservación de la energía, al caer del punto A al punto B, la carga positiva gana energía cinética igual en magnitud a la pérdida de energía potencial eléctrica:

$$\Delta EC + \Delta EP_{el} = \Delta EC + (0 - |q|Ed) = 0 \rightarrow \Delta EC = |q|Ed$$

Los signos de valor absoluto sobre q están ahí sólo para hacer explícito que la carga es positiva en este caso. De igual modo, el objeto en la figura 16.2b gana energía cinética igual en magnitud a la pérdida de energía potencial gravitacional:

$$\Delta EC + \Delta EP_g = \Delta EC + (0 - mgd) = 0 \rightarrow \Delta EC = mgd$$

Así que, para cargas positivas, la energía potencial eléctrica funciona en forma muy parecida a la energía potencial gravitacional. En ambos casos mover un objeto en dirección opuesta al campo resulta en una ganancia de energía potencial y, al liberarse, la energía potencial se convierte en energía cinética del objeto.

Sin embargo, la energía potencial eléctrica difiere significativamente de la energía potencial gravitacional, en cuanto a que hay dos tipos de carga eléctrica, positiva y negativa, mientras que la gravedad sólo tiene “carga gravitacional” (es decir, masa). Una partícula con carga negativa en reposo en el punto A de la figura 16.2a tendría que *empujarse* al punto B. Para ver por qué, aplique el teorema trabajo-energía a una carga negativa en reposo en el punto A y suponga que tiene cierta rapidez v al llegar al punto B:

$$W = \Delta EC + \Delta EP_{el} = (\frac{1}{2}mv^2 - 0) + [0 - (-|q|Ed)]$$

$$W = \frac{1}{2}mv^2 + |q|Ed$$

Observe que la carga negativa, $-|q|$, a diferencia de la carga positiva, tiene un cambio positivo en la energía potencial eléctrica al moverse del punto A al punto B. Si la carga negativa tiene alguna rapidez en el punto B, la energía cinética que corresponde a dicha rapidez también es positiva. Puesto que ambos términos en el lado derecho de la ecuación trabajo-energía son positivos, no hay forma de llevar la carga negativa del punto A al punto B sin realizar trabajo positivo sobre ella. De hecho, si la carga negativa simplemente se libera en el punto A, ¡“caerá” hacia arriba contra la dirección del campo!

■ **Examen rápido**

16.1 Si un electrón se libera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme, ¿la energía potencial eléctrica del sistema carga-campo a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

■ **EJEMPLO 16.1** Diferencias de energía potencial en un campo eléctrico

OBJETIVO Ilustrar el concepto de energía potencial eléctrica.

PROBLEMA Un protón se libera desde el reposo en $x = -2.00$ cm en un campo eléctrico constante con 1.50×10^3 N/C de magnitud, que apunta en la dirección x positiva. **a)** Calcule el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el protón cuando llega a $x = 5.00$ cm. **b)** Ahora un electrón se dispara en la misma dirección desde la misma posición. ¿Cuál es su cambio en energía potencial eléctrica asociada con el electrón, si llega a $x = 12.0$ cm? **c)** Si la dirección del campo eléctrico se

invierte y un electrón se libera desde el reposo en $x = 3.00$ cm, ¿en cuánto cambió la energía potencial eléctrica cuando el electrón llega a $x = 7.00$ cm?

ESTRATEGIA Este problema requiere una sustitución directa de valores dados en la definición de energía potencial eléctrica, ecuación 16.1.

SOLUCIÓN

a) Calcule el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el protón.

Aplique la ecuación 16.1:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times [0.0500 \text{ m} - (-0.0200 \text{ m})] \\ &= -1.68 \times 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

b) Determine el cambio en la energía potencial eléctrica asociado con un electrón disparado desde $x = -0.0200$ m y que llega a $x = 0.120$ m.

Aplique la ecuación 16.1, pero en este caso observe que la carga eléctrica q es negativa:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times [(0.120 \text{ m} - (-0.0200 \text{ m}))] \\ &= +3.36 \times 10^{-17} \text{ J}\end{aligned}$$

c) Determine el cambio en energía potencial asociado con un electrón que viaja desde $x = 3.00$ cm hasta $x = 7.00$ cm, si la dirección del campo eléctrico se invierte.

Sustituya, pero ahora el campo eléctrico apunta en la dirección x negativa, por lo tanto lleva un signo menos:

$$\begin{aligned}\Delta EP &= -qE_x \Delta x = -qE_x(x_f - x_i) \\ &= -(-1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(-1.50 \times 10^3 \text{ N/C}) \\ &\quad \times (0.070 \text{ m} - 0.030 \text{ m}) \\ &= -9.60 \times 10^{-18} \text{ J}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Observe que el protón (en realidad el sistema protón-campo) pierde energía potencial cuando se mueve en la dirección x positiva, mientras que el electrón gana energía potencial cuando se mueve en la misma dirección. Encontrar los cambios en la energía potencial con el campo invertido fue sólo cuestión de proporcionar un signo menos, ¡lo que en este caso llevó el número total a tres! Es importante no eliminar alguno de los signos.

PREGUNTA 16.1 Verdadero o Falso: Cuando un electrón se libera desde el reposo en un campo eléctrico constante, el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el electrón se vuelve más negativo con el tiempo.

EJERCICIO 16.1 Determine el cambio en energía potencial eléctrica asociado con el electrón del inciso b) cuando va desde $x = 0.120$ m hasta $x = -0.180$ m. (Observe que el electrón debe dar la vuelta y regresar en algún punto. La ubicación del punto de retorno no es importante, porque los cambios en energía potencial sólo dependen de los puntos finales de la trayectoria.)

RESPUESTA $-7.20 \times 10^{-17} \text{ J}$

■ EJEMPLO 16.2 Dinámica de partículas cargadas

OBJETIVO Usar la energía potencial eléctrica en problemas de conservación de energía.

PROBLEMA a) Determine la rapidez del protón en $x = 0.0500$ m en el inciso a) del ejemplo 16.1. b) Determine la rapidez inicial del electrón (en $x = -2.00$ cm) en el inciso b) del ejemplo 16.1, dado que su rapidez disminuye a la mitad cuando llega a $x = 0.120$ m.

ESTRATEGIA Aplique la conservación de la energía y resuelva para las rapidez desconocidas. El inciso b) involucra dos ecuaciones: la ecuación de conservación de la energía y la condición $v_f = \frac{1}{2}v_i$ para las rapidez inicial y final desconocidas. Los cambios en la energía potencial eléctrica ya se calcularon en el ejemplo 16.1.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Calcule la rapidez del protón en $x = 0.050$ m.

Aplique la conservación de la energía, con una rapidez inicial de cero.

Resuelva para v y sustituya el cambio en energía potencial que se encontró en el ejemplo 16.1a:

$$\begin{aligned}\Delta EC + \Delta EP &= 0 \rightarrow \left(\frac{1}{2}m_p v^2 - 0\right) + \Delta EP = 0 \\ v^2 &= -\frac{2}{m_p} \Delta EP \\ v &= \sqrt{-\frac{2}{m_p} \Delta EP} \\ &= \sqrt{-\frac{2}{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})} (-1.68 \times 10^{-17} \text{ J})} \\ &= 1.42 \times 10^5 \text{ m/s}\end{aligned}$$

b) Determine la rapidez inicial del electrón (en $x = -2.00$ cm) dado que su rapidez disminuye a la mitad en $x = 0.120$ m.

Aplique la conservación de la energía una vez más y sustituya las expresiones para las energías cinéticas inicial y final:

Sustituya la condición $v_f = \frac{1}{2}v_i$ y reste el cambio en energía potencial de ambos lados:

Combine términos y resuelva para v_i , la rapidez inicial y sustituya el cambio en energía potencial que encontró en el ejemplo 16.1b:

$$\begin{aligned}\Delta EC + \Delta EP &= 0 \\ \left(\frac{1}{2}m_e v_f^2 - \frac{1}{2}m_e v_i^2\right) + \Delta EP &= 0 \\ \frac{1}{2}m_e \left(\frac{1}{2}v_i\right)^2 - \frac{1}{2}m_e v_i^2 &= -\Delta EP \\ -\frac{3}{8}m_e v_i^2 &= -\Delta EP \\ v_i &= \sqrt{\frac{8\Delta EP}{3m_e}} = \sqrt{\frac{8(3.36 \times 10^{-17} \text{ J})}{3(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})}} \\ &= 9.92 \times 10^6 \text{ m/s}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Aunque los cambios en energía potencial asociados con el protón y el electrón fueron similares en magnitud, el efecto sobre sus rapidezces difiere dramáticamente. El cambio en la energía potencial tuvo un efecto proporcionalmente mucho mayor sobre el electrón, que es mucho más ligero, que sobre el protón.

PREGUNTA 16.2 Verdadero o Falso: Si un protón y un electrón se mueven a través del mismo desplazamiento en un campo eléctrico, el cambio en energía potencial asociado con el protón debe ser igual en magnitud y opuesto en signo al cambio en energía potencial asociado con el electrón.

EJERCICIO 16.2 Consulte el ejercicio 16.1. Determine la rapidez del electrón en $x = -0.180$ m. *Nota:* Utilice la velocidad inicial del inciso b) del ejemplo 16.2.

RESPUESTA 1.35×10^7 m/s La respuesta es 4.5% la rapidez de la luz.

Potencial eléctrico

En el capítulo 15 fue conveniente definir un campo eléctrico \vec{E} relacionado con la fuerza eléctrica $\vec{F} = q\vec{E}$. De esta forma, las propiedades de colecciones fijas de cargas se podían estudiar con facilidad y la fuerza sobre cualquier partícula en el campo eléctrico se podía obtener simplemente al multiplicar por la carga q de la partícula. Por las mismas razones, es útil definir una *diferencia de potencial eléctrico* ΔV relacionada con la energía potencial mediante $\Delta EP = q\Delta V$:

La diferencia de potencial eléctrico ΔV entre los puntos A y B es el cambio en la energía potencial eléctrica conforme la carga q se mueve de A a B , dividida entre la carga q :

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta EP}{q} \quad [16.2]$$

Unidad SI: joule por coulomb, o volt (J/C o V)

Diferencia de potencial entre dos puntos ►

Esta definición es completamente general, aunque en muchos casos se requeriría cálculo para estimar el cambio en energía potencial del sistema. Puesto que la energía potencial eléctrica es una cantidad escalar, **el potencial eléctrico también es una cantidad escalar**. A partir de la ecuación 16.2, vemos que la diferencia de potencial eléctrico es una medida del cambio en la energía potencial eléctrica por unidad de carga. De manera alternativa, la diferencia de potencial eléctrico es el trabajo por unidad de carga que tendría que realizar alguna fuerza para mover una carga del punto *A* al punto *B* en el campo eléctrico. La unidad SI de potencial eléctrico es el joule por coulomb, llamada volt (V). A partir de la definición de dicha unidad, debe realizar 1 J de trabajo para mover una carga de 1 C entre dos puntos que están a una diferencia de potencial de 1 V. En el proceso de mover a través de una diferencia de potencial de 1 V, la carga de 1 C gana 1 J de energía.

Para el caso especial de un campo eléctrico uniforme como el que existe entre placas paralelas cargadas, dividir la ecuación 16.1 por *q* produce

$$\frac{\Delta EP}{q} = -E_x \Delta x$$

Al comparar esta ecuación con la ecuación 16.2 encontramos que

$$\Delta V = -E_x \Delta x \quad [16.3]$$

La ecuación 16.3 muestra que la diferencia de potencial también tiene unidades de campo eléctrico por distancia. Entonces tenemos que la unidad SI del campo eléctrico, el newton por coulomb, también se puede expresar como volts por metro:

$$1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$$

Puesto que la ecuación 16.3 se relaciona directamente con la ecuación 16.1, recuerde que es válida sólo para el sistema que consiste de un campo eléctrico uniforme y una carga que se mueve en una dimensión.

Al liberarse desde el reposo, las cargas positivas aceleran espontáneamente desde regiones de alto potencial a otras de bajo potencial. Si a una carga positiva se le proporciona cierta velocidad inicial en la dirección de alto potencial, se puede mover en dicha dirección, pero frenará y finalmente dará vuelta, tal como una bola lanzada hacia arriba en un campo gravitacional. Las cargas negativas hacen exactamente lo opuesto: liberada desde el reposo, aceleran desde regiones de bajo potencial hacia regiones de alto potencial. Sobre las cargas negativas se realiza trabajo para hacer que vayan en la dirección de menor potencial eléctrico.

Examen rápido

16.2 Si una partícula con carga negativa se coloca en reposo en un campo de potencial eléctrico que aumenta en la dirección *x* positiva, ¿la partícula a) acelerará en la dirección *x* positiva, b) acelerará en la dirección *x* negativa o c) permanecerá en reposo?

16.3 La figura 16.3 es una gráfica de un potencial eléctrico como función de la posición. Si una partícula con carga positiva se coloca en el punto *A*, ¿cuál será su movimiento posterior? ¿a) Irá a la derecha, b) irá a la izquierda, c) permanecerá en el punto *A* o d) oscilará en torno al punto *B*?

16.4 Si una partícula con carga negativa se coloca en el punto *B* en la figura 16.3 y se le da un ligero empujón hacia la derecha, ¿cuál será su movimiento posterior? ¿a) Irá a la derecha y no regresará, b) irá a la izquierda, c) permanecerá en el punto *B* o d) oscilará en torno al punto *B*?

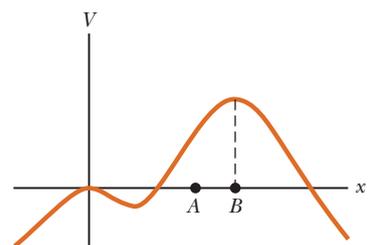


Figura 16.3 (Exámenes rápidos 16.3 y 16.4)

APLICACIÓN

Baterías de automóvil

Una aplicación de la diferencia de potencial es la batería de 12 V que se encuentra en un automóvil. Tal batería mantiene una diferencia de potencial entre sus terminales, con la terminal positiva de 12 V más alta en potencial que la terminal negativa. En la práctica, la terminal negativa por lo general se conecta al cuerpo metálico del automóvil, que se puede considerar está a un potencial de cero volts. La batería proporciona la corriente eléctrica necesaria para operar los faros, un radio, impulsar ventanas, motores, etc. Ahora considere

una carga de +1 C, que se mueve alrededor de un circuito que contiene la batería conectada a alguno de estos dispositivos externos. Conforme la carga se mueve dentro de la batería, de la terminal negativa (a 0 V) a la terminal positiva (a 12 V), el trabajo realizado sobre la carga por la batería es 12 J. Cada coulomb de carga positiva que sale de la terminal positiva de la batería porta una energía de 12 J. Conforme la carga se mueve a través del circuito externo hacia la terminal negativa, entrega sus 12 J de energía eléctrica a los dispositivos externos. Cuando la carga llega a la terminal negativa, su energía eléctrica de nuevo es cero. En este punto, la batería se hace cargo y restaura 12 J de energía a la carga conforme se mueve de la terminal negativa a la positiva, lo que permite hacer otro tránsito del circuito. La cantidad real de carga que sale de la batería cada segundo y atraviesa el circuito depende de las propiedades de los dispositivos externos, como se ve en el siguiente capítulo.

EJEMPLO 16.3 Cinescopios y colisionadores atómicos

OBJETIVO Relacionar el potencial eléctrico con un campo eléctrico y la conservación de la energía.

PROBLEMA En los colisionadores atómicos (también conocidos como ciclotrones y aceleradores lineales), partículas cargadas se aceleran en una forma muy parecida a la de los cinescopios: mediante diferencias de potencial. Suponga que un protón se inyecta con una rapidez de 1.00×10^6 m/s entre dos placas separadas 5.00 cm, como se muestra en la figura 16.4. Posteriormente, el protón se acelera a través de la brecha y sale hacia la abertura. **a)** ¿Cuál debe ser la diferencia de potencial eléctrico si la rapidez de salida es 3.00×10^6 m/s? **b)** ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las placas, si suponemos que es constante?

ESTRATEGIA Utilice la conservación de la energía, escriba el cambio en energía potencial en términos del cambio en potencial eléctrico, ΔV y resuelva para ΔV . Para el inciso a), resuelva la ecuación 16.3 para el campo eléctrico.

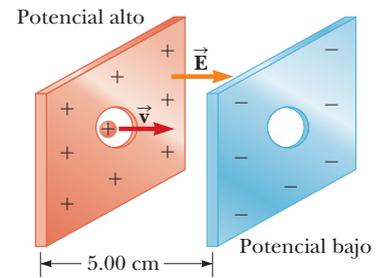


Figura 16.4 (Ejemplo 16.3) Un protón entra a una cavidad y acelera desde una placa cargada hacia la otra en un campo eléctrico \vec{E} .

SOLUCIÓN

a) Determine el potencial eléctrico que produce la rapidez de salida deseada del protón.

Aplique la conservación de la energía, escriba la energía potencial en términos del potencial eléctrico:

Resuelva la ecuación de energía para el cambio en potencial:

Sustituya los valores dados y obtenga la diferencia de potencial necesaria:

b) ¿Qué campo eléctrico debe existir entre las placas?

Resuelva la ecuación 16.3 para el campo eléctrico y sustituya:

$$\Delta EC + \Delta EP = \Delta EC + q\Delta V = 0$$

$$\Delta V = -\frac{\Delta EC}{q} = -\frac{\frac{1}{2}m_p v_f^2 - \frac{1}{2}m_p v_i^2}{q} = -\frac{m_p}{2q}(v_f^2 - v_i^2)$$

$$\Delta V = -\frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{2(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})} [(3.00 \times 10^6 \text{ m/s})^2 - (1.00 \times 10^6 \text{ m/s})^2]$$

$$\Delta V = -4.18 \times 10^4 \text{ V}$$

$$E = -\frac{\Delta V}{\Delta x} = \frac{4.18 \times 10^4 \text{ V}}{0.0500 \text{ m}} = 8.36 \times 10^5 \text{ N/C}$$

COMENTARIOS Los sistemas de tales cavidades, que consisten de placas positivas y negativas alternas, se usan para acelerar a una alta rapidez partículas cargadas antes de chocarlas con los blancos. Para evitar el frenado de, por decir, una partícula con carga positiva, después de pasar a través de la placa negativa de una cavidad y entrar a la siguiente, las cargas sobre las placas se invierten. De otro modo, la partícula viajaría de la placa negativa a una placa positiva en la segunda cavidad, y la energía cinética ganada en la cavidad previa se perdería en la segunda.

PREGUNTA 16.3 Verdadero o Falso: Una partícula con más masa gana menos energía al atravesar una diferencia de potencial dada, que una partícula más ligera.

EJERCICIO 16.3 Suponga que los electrones en un cinescopio se aceleran a través de una diferencia de potencial de 2.00×10^4 V desde el cátodo calentado (electrodo negativo), donde se producen, hacia la pantalla, que también sirve como el

ánodo (electrodo positivo), a 25.0 cm de distancia. a) ¿A qué rapidez impactarían los electrones el fósforo sobre la pantalla? Suponga que aceleran desde el reposo e ignore efectos relativistas (capítulo 26). b) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico, si se supone constante?

RESPUESTAS a) 8.38×10^7 m/s b) 8.00×10^4 V/m

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

En los circuitos eléctricos, un punto de potencial eléctrico cero a menudo se define al aterrizar (conectar a la tierra) algún punto en el circuito. Por ejemplo, si la terminal negativa de una batería de 12 V se conectara a tierra, se consideraría que tiene un potencial de cero, mientras que la terminal positiva tendría un potencial de ± 12 V. Sin embargo, la diferencia de potencial creada por la batería sólo se define localmente. En esta sección describimos el potencial eléctrico de una carga puntual, que se define en todo el espacio.

El campo eléctrico de una carga puntual se extiende a través del espacio, de modo que su potencial eléctrico también lo hace. El punto cero de potencial eléctrico se podría tomar en cualquier parte, pero generalmente se toma a una distancia infinita de la carga, lejos de su influencia y la influencia de cualquiera otra carga. Con esta elección, se pueden usar los métodos del cálculo para demostrar que el potencial eléctrico creado por una carga puntual q a cualquier distancia r de la carga está dado por

$$V = k_e \frac{q}{r} \tag{16.4}$$

La ecuación 16.4 muestra que el potencial eléctrico, o trabajo por unidad de carga, que se requiere para mover una carga puntual desde el infinito hasta una distancia r de una carga puntual positiva q , aumenta conforme la carga de prueba positiva se acerca más a q . La gráfica de ecuación 16.4 en la figura 16.5, muestra que el potencial asociado con una carga puntual disminuye como $1/r$ con r creciente, en contraste con la magnitud del campo eléctrico de la carga, que disminuye como $1/r^2$.

El potencial eléctrico de dos o más cargas se obtiene al aplicar el **principio de superposición: el potencial eléctrico total en algún punto P debido a varias cargas puntuales es la suma algebraica de los potenciales eléctricos debidos a las cargas individuales**. Este método es similar al que se usó en el capítulo 15 para encontrar el campo eléctrico resultante en un punto del espacio. A diferencia de la superposición del campo eléctrico, que involucra una suma de vectores, la superposición de los potenciales eléctricos requiere evaluar una suma de escalares. Como resultado, es mucho más fácil evaluar el potencial eléctrico en algún punto debido a varias cargas, que evaluar el campo eléctrico, que es una cantidad vectorial.

La figura 16.6 es una gráfica generada por computadora del potencial eléctrico asociado con un dipolo eléctrico, que consiste de dos cargas de igual magnitud pero signo opuesto.

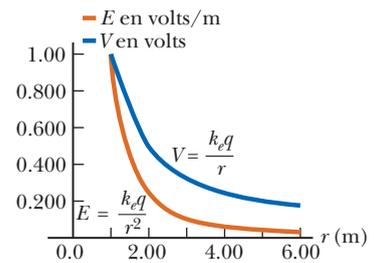


Figura 16.5 Campo eléctrico y potencial eléctrico contra distancia desde una carga puntual de 1.11×10^{-10} C. Observe que V es proporcional a $1/r$, mientras que E es proporcional a $1/r^2$.

◀ Potencial eléctrico creado por una carga puntual

◀ Principio de superposición

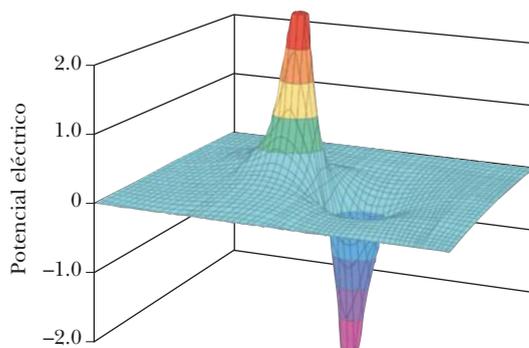


Figura 16.6 Potencial eléctrico (en unidades arbitrarias) en el plano que contiene un dipolo eléctrico. El potencial se grafica en la dimensión vertical.

Las cargas se encuentran en un plano horizontal en el centro de los picos de potencial. El valor del potencial se grafica en la dimensión vertical. El programa de computadora sumó el potencial de cada carga para llegar a valores totales del potencial.

Como en el caso de campos eléctricos constantes, existe una relación entre potencial eléctrico y energía potencial eléctrica. Si V_1 es el potencial eléctrico debido a la carga q_1 en un punto P (figura activa 16.7a), el trabajo requerido para llevar la carga q_2 del infinito a P sin aceleración es $q_2 V_1$. Por definición, este trabajo es igual a la energía potencial EP del sistema de dos partículas cuando éstas se separan una distancia r (figura activa 16.7b).

Por lo tanto, la energía potencial eléctrica del par de cargas se puede expresar como

$$EP = q_2 V_1 = k_e \frac{q_1 q_2}{r} \quad [16.5]$$

Energía potencial de un de par cargas ▶

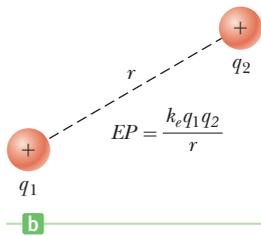
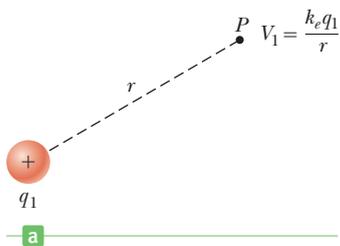


Figura activa 16.7 a) El potencial eléctrico V_1 en P debido a la carga puntual q_1 es $V_1 = k_e q_1 / r$. b) Si una segunda carga, q_2 , se lleva del infinito a P , la energía potencial del par es $EP = k_e q_1 q_2 / r$.

Si las cargas tienen el mismo signo, EP es positiva. Dado que cargas iguales se repelen, se debe realizar trabajo positivo sobre el sistema, mediante un agente externo, para hacer que las dos cargas se acerquen. Por el contrario, si las cargas son de signo opuesto, la fuerza es de atracción y EP es negativa. Esto significa que se debe realizar trabajo negativo para evitar que cargas distintas se aceleren una hacia otra conforme se acercan.

Examen rápido

16.5 Considere una colección de cargas en una región dada y suponga que todas las otras cargas están distantes y tiene un efecto despreciable. Más aún, el potencial eléctrico se considera cero en el infinito. Si el potencial eléctrico en un punto dado en la región es cero, ¿cuál de los siguientes enunciados debe ser cierto? a) El campo eléctrico es cero en dicho punto. b) La energía potencial eléctrica es un mínimo en dicho punto. c) No hay carga neta en la región. d) Algunas cargas en la región son positivas y algunas son negativas. e) Las cargas tienen el mismo signo y están ordenadas simétricamente en torno al punto dado.

16.6 Un globo esférico contiene una partícula con carga positiva en su centro. Conforme el globo se infla a un mayor volumen mientras la partícula cargada permanece en el centro, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? a) Aumenta el potencial eléctrico en la superficie del globo. b) Aumenta la magnitud del campo eléctrico en la superficie del globo. c) El flujo eléctrico a través del globo permanece igual. d) Ninguna de las anteriores.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Potencial eléctrico

1. Dibuje un diagrama de todas las cargas y encierre en un círculo el punto de interés.
2. Calcule la distancia de cada carga al punto de interés y márcalo en el diagrama.
3. Para cada carga q , calcule la cantidad escalar $V = \frac{k_e q}{r}$. ¡Debe incluir el signo de cada carga en sus cálculos!
4. Sume todos los números que encontró en el paso anterior y obtenga el potencial eléctrico en el punto de interés.

EJEMPLO 16.4

Cómo encontrar el potencial eléctrico

OBJETIVO Calcular el potencial eléctrico debido a una colección de cargas puntuales.

PROBLEMA Una carga puntual de $5.00 \mu\text{C}$ está en el origen y una carga puntual $q_2 = -2.00 \mu\text{C}$ está sobre el eje x en $(3.00, 0)$ m, como se muestra en la figura 16.8. a) Si el potencial eléctrico se considera cero en el infinito, determine el

potencial eléctrico total debido a estas cargas en el punto P con coordenadas $(0, 4.00)$ m.
b) ¿Cuánto trabajo se requiere para llevar una tercera carga puntual de $4.00 \mu\text{C}$, desde el infinito hasta P ?

ESTRATEGIA Para el inciso a), el potencial eléctrico en P debido a cada carga se puede calcular a partir de $V = k_e q/r$. El potencial eléctrico total en P es la suma de estos dos números. Para el inciso b), use el teorema trabajo-energía, junto con la ecuación 16.5, y recuerde que el potencial en el infinito se considera cero.

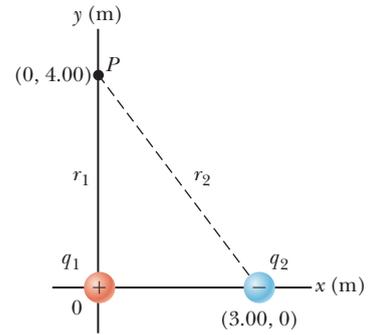


Figura 16.8 (Ejemplo 16.4) El potencial eléctrico en el punto P debido a las cargas puntuales q_1 y q_2 , es la suma algebraica de los potenciales debidos a las cargas individuales.

SOLUCIÓN

a) Determine el potencial eléctrico en el punto P .

Calcule el potencial eléctrico en P debido a la carga de $5.00 \mu\text{C}$:

$$V_1 = k_e \frac{q_1}{r_1} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \left(\frac{5.00 \times 10^{-6} \text{ C}}{4.00 \text{ m}} \right) = 1.12 \times 10^4 \text{ V}$$

Encuentre el potencial eléctrico en P debido a la carga $-2.00 \mu\text{C}$:

$$V_2 = k_e \frac{q_2}{r_2} = \left(8.99 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \left(\frac{-2.00 \times 10^{-6} \text{ C}}{5.00 \text{ m}} \right) = -0.360 \times 10^4 \text{ V}$$

Sume los dos números para encontrar el potencial eléctrico total en P :

$$V_P = V_1 + V_2 = 1.12 \times 10^4 \text{ V} + (-0.360 \times 10^4 \text{ V}) = 7.6 \times 10^3 \text{ V}$$

b) Determine el trabajo necesario para llevar la carga de $4.00 \mu\text{C}$ del infinito a P .

Aplique el teorema trabajo-energía, con la ecuación 16.5:

$$W = \Delta PE = q_3 \Delta V = q_3 (V_P - V_\infty) = (4.00 \times 10^{-6} \text{ C})(7.6 \times 10^3 \text{ V} - 0) = 3.0 \times 10^{-2} \text{ J}$$

COMENTARIOS A diferencia del campo eléctrico, donde se requiere suma vectorial, el potencial eléctrico debido a más de una carga se puede encontrar con una suma ordinaria de escalares. Más aún, observe que el trabajo requerido para mover la carga es igual al cambio en energía potencial eléctrica. La suma del trabajo realizado para mover la partícula más el trabajo realizado por el campo eléctrico es cero ($W_{\text{otro}} + W_{\text{eléctrico}} = 0$) porque la partícula comienza y termina en el reposo. Por tanto, $W_{\text{otro}} = -W_{\text{eléctrico}} = \Delta U_{\text{eléctrico}} = q \Delta V$.

PREGUNTA 16.4 Si q_2 se mueve hacia la derecha, ¿qué ocurriría al potencial eléctrico V_P en el punto P ? a) Aumentaría. b) Disminuiría. c) Permanecería igual.

EJERCICIO 16.4 Suponga que una carga de $-2.00 \mu\text{C}$ está en el origen y una carga de $3.00 \mu\text{C}$ está en el punto $(0, 3.00)$ m. a) Determine el potencial eléctrico en $(4.00, 0)$ m, si supone que el potencial eléctrico es cero en el infinito y b) determine el trabajo necesario para llevar una carga de $4.00 \mu\text{C}$ del infinito al punto $(4.00, 0)$ m.

RESPUESTAS a) $8.99 \times 10^2 \text{ V}$ b) $3.60 \times 10^{-3} \text{ J}$

EJEMPLO 16.5 Energía potencial eléctrica y dinámica

OBJETIVO Aplicar la conservación de la energía y la energía potencial eléctrica a una configuración de cargas.

PROBLEMA Suponga que tres protones están sobre el eje x , en reposo relativo unos con otros en un instante de tiempo dado, como en la figura 16.9. Si el protón q_3 a la derecha se libera mientras los otros se mantienen fijos en su lugar, encuentre una expresión simbólica para la rapidez del protón en el infinito y evalúa esta rapidez cuando $r_0 = 2.00 \text{ fm}$. (Nota: $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$.)

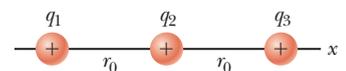


Figura 16.9 (Ejemplo 16.5)

(continúa)

ESTRATEGIA Calcule primero la energía potencial eléctrica inicial asociada con el sistema de tres partículas. Habrá tres términos, uno para cada par que interactúa. Luego calcule la energía potencial eléctrica final asociada con el sistema el protón a la derecha está arbitrariamente lejos. Puesto que la energía potencial eléctrica cae como $1/r$, dos de los términos desaparecerán. Con el uso de conservación de la energía, encuentre entonces la rapidez de la partícula en cuestión.

SOLUCIÓN

Calcule la energía potencial eléctrica asociada con la configuración inicial de cargas:

$$EP_i = \frac{k_e q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{k_e q_1 q_3}{r_{13}} + \frac{k_e q_2 q_3}{r_{23}} = \frac{k_e e^2}{r_0} + \frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0}$$

Calcule la energía potencial eléctrica asociada con la configuración final de cargas:

$$EP_f = \frac{k_e q_1 q_2}{r_{12}} = \frac{k_e e^2}{r_0}$$

Escriba la ecuación de conservación de la energía:

$$\Delta EC + \Delta EP = EC_f - EC_i + EP_f - EP_i = 0$$

Sustituya los términos apropiados:

$$\frac{1}{2} m_3 v_3^2 - 0 + \frac{k_e e^2}{r_0} - \left(\frac{k_e e^2}{r_0} + \frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0} \right) = 0$$

$$\frac{1}{2} m_3 v_3^2 - \left(\frac{k_e e^2}{2r_0} + \frac{k_e e^2}{r_0} \right) = 0$$

Resuelva para v_3 después de combinar los dos términos restantes de energía potencial:

$$v_3 = \sqrt{\frac{3k_e e^2}{m_3 r_0}}$$

Evalúe al considerar $r_0 = 2.00$ fm:

$$v_3 = \sqrt{\frac{3(8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(2.00 \times 10^{-15} \text{ m})}} = 1.44 \times 10^7 \text{ m/s}$$

COMENTARIOS La diferencia en las energías cinéticas inicial y final produce la energía disponible para el movimiento. Este cálculo es un poco artificioso porque sería difícil, aunque no imposible, ordenar tal configuración de protones; posiblemente podría ocurrir por casualidad dentro de una estrella.

PREGUNTA 16.5 Si un cuarto protón se coloca a la derecha de q_3 , ¿cuántos términos adicionales de energía potencial tendría que calcular en la configuración inicial?

EJERCICIO 16.5 A partir de la configuración inicial de tres protones, suponga que las dos partículas en los extremos se liberan simultáneamente y la partícula de en medio está fija. Obtenga una respuesta numérica para la rapidez de las dos partículas en el infinito. (Observe que sus rapidezces, por simetría, deben ser iguales.)

RESPUESTA 1.31×10^7 m/s

16.3 Potenciales y conductores cargados

El potencial eléctrico en todos los puntos sobre un conductor cargado se puede determinar al combinar las ecuaciones 16.1 y 16.2. A partir de la ecuación 16.1, vemos que el trabajo realizado por fuerzas eléctricas sobre una carga, se relaciona con el cambio en energía potencial eléctrica de la carga mediante

$$W = -\Delta EP$$

A partir de la ecuación 16.2, observamos que el cambio en energía potencial eléctrica entre dos puntos A y B se relaciona con la diferencia de potencial entre dichos puntos mediante

$$\Delta EP = q(V_B - V_A)$$

Al combinar estas dos ecuaciones, tenemos que

$$W = -q(V_B - V_A)$$

[16.6]

Con esta ecuación, obtenemos el siguiente resultado general: **no se requiere trabajo neto para mover una carga entre dos puntos que están al mismo potencial eléctrico**. En términos matemáticos, este resultado dice que $W = 0$ siempre que $V_B = V_A$.

En el capítulo 15 encontramos que, cuando un conductor está en equilibrio electrostático, una carga neta colocada sobre él reside por completo sobre su superficie. Más aún, demostramos que el campo eléctrico justo afuera de la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático es perpendicular a la superficie y que el campo dentro del conductor es cero. Ahora mostramos que **todos los puntos sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático están al mismo potencial**.

Considere una trayectoria superficial que conecta cualesquier puntos A y B sobre un conductor cargado, como en la figura 16.10. Se supone que las cargas sobre el conductor están en equilibrio mutuo, así que ninguna se mueve. En este caso, el campo eléctrico \vec{E} siempre es perpendicular al desplazamiento a lo largo de esta trayectoria. Esto debe ser así, pues de otro modo la parte del campo eléctrico tangente a la superficie movería las cargas. Puesto que \vec{E} es perpendicular a la trayectoria, el campo eléctrico no realiza trabajo si una carga se mueve entre los dos puntos dados. A partir de la ecuación 16.6 vemos que, si el trabajo realizado es cero, la diferencia en potencial eléctrico, $V_B - V_A$, también es cero. Luego, **el potencial eléctrico es una constante en todas partes sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio**. Más aún, dado que el campo eléctrico dentro de un conductor es cero, no se requiere trabajo para mover una carga entre dos puntos dentro del conductor. Nuevamente, la ecuación 16.6 muestra que, si el trabajo realizado es cero, la diferencia en potencial eléctrico entre cualesquier dos puntos dentro de un conductor también debe ser cero. Concluyendo, el potencial eléctrico es constante en todas partes dentro de un conductor.

Finalmente, puesto que uno de los puntos dentro del conductor podrían estar arbitrariamente cerca de la superficie del conductor, concluimos que **el potencial eléctrico es constante en cualquier parte dentro de un conductor, e igual a dicho mismo valor en la superficie**. Como consecuencia, no se requiere trabajo para mover una carga desde el interior de un conductor cargado a su superficie. (Es importante darse cuenta de que el potencial dentro de un conductor no necesariamente es cero, aun cuando el campo eléctrico interior sea cero.)

El electrón-volt

Una unidad de energía de tamaño adecuado, de uso común en física atómica y nuclear, es el electrón-volt (eV). Por ejemplo, los electrones en los átomos normales por lo general tienen energías de decenas de eV, los electrones excitados en los átomos que emiten rayos X tienen energías de miles de eV y los rayos gamma de alta energía (ondas electromagnéticas) emitidos por el núcleo tienen energías de millones de eV.

El **electrón-volt** se define como la energía cinética que gana un electrón cuando acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V.

Puesto que $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$, y dado que la magnitud de la carga en el electrón es $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, se ve que el electrón-volt se relaciona con el joule mediante

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad [16.7]$$

Examen rápido

16.7 Un electrón inicialmente en reposo, acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V y gana energía cinética EC_e , mientras un protón, también inicialmente en reposo, acelera a través de una diferencia de potencial de -1 V y gana energía cinética EC_p . ¿Cuál de las siguientes relaciones se sostiene? a) $EC_e = EC_p$, b) $EC_e < EC_p$, c) $EC_e > EC_p$, d) La respuesta no se puede determinar a partir de la información dada.

Observe a partir de la separación de los signos positivos que la densidad de carga en la superficie no es uniforme.

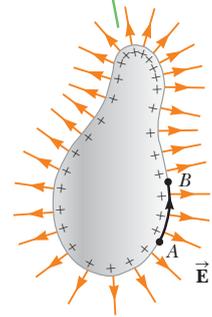


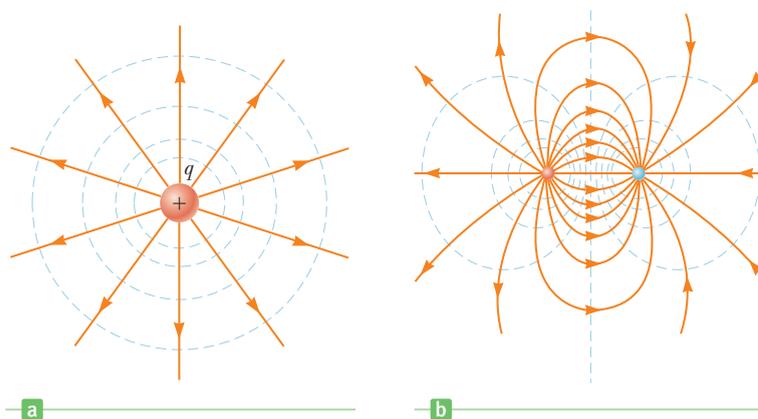
Figura 16.10 Un conductor de forma arbitraria con un exceso de carga positiva. Cuando el conductor está en equilibrio electrostático, toda la carga reside en la superficie, $\vec{E} = 0$, dentro del conductor y el campo eléctrico justo afuera del conductor es perpendicular a la superficie. El potencial es constante dentro del conductor y es igual al potencial en la superficie.

◀ Definición de electrón-volt

16.4 Superficies equipotenciales

Una superficie sobre la cual todos los puntos están al mismo potencial se llama **superficie equipotencial**. La diferencia de potencial entre cualesquier dos puntos sobre una superficie equipotencial es cero. Por lo tanto, **no se requiere trabajo para mover una carga con rapidez constante sobre una superficie equipotencial**.

Figura 16.11 Equipotenciales (líneas azules punteadas) y líneas de campo eléctrico (líneas anaranjadas) para a) una carga puntual positiva y b) dos cargas puntuales de igual magnitud y signo opuesto. En todos los casos, las equipotenciales son *perpendiculares* a las líneas de campo eléctrico en cada punto.



Las superficies equipotenciales tienen una relación simple con el campo eléctrico: **el campo eléctrico en cada punto de una superficie equipotencial es perpendicular a la superficie.** Si el campo eléctrico \vec{E} tiene un componente paralelo a la superficie, dicho componente produciría una fuerza eléctrica sobre una carga colocada sobre la superficie. Esta fuerza haría trabajo sobre la carga conforme se mueve de un punto a otro, en contradicción con la definición de una superficie equipotencial.

Las superficies equipotenciales se pueden representar como un diagrama al dibujar contornos equipotenciales, que son vistas bidimensionales de las intersecciones de las superficies equipotenciales con el plano del dibujo. Estos contornos por lo general se conocen simplemente como **equipotenciales**. La figura 16.11a muestra las éstas (en azul) asociadas con una carga puntual positiva. Observe que las equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico (en naranja) en todos los puntos. Recuerde que el potencial eléctrico creado por una carga puntual q está dado por $V = k_e q/r$. Esta relación muestra que, para una sola carga puntual, el potencial es constante en cualquier superficie sobre la cual r es constante. Así que los potenciales de una carga puntual son una familia de esferas con centro sobre la carga puntual. La figura 16.11b muestra las equipotenciales asociadas con dos cargas de igual magnitud y signo opuesto.

16.5 Aplicaciones

El precipitador electrostático

APLICACIÓN

El precipitador electrostático

Una importante aplicación de la descarga eléctrica en los gases es un dispositivo llamado *precipitador electrostático*. Este dispositivo remueve partículas de materia de los gases de combustión, lo que reduce la contaminación del aire. Es especialmente útil en las plantas eléctricas que queman carbón y en operaciones industriales que generan grandes cantidades de humo. Los sistemas actualmente en uso pueden eliminar aproximadamente 90% por masa de la ceniza y polvo del humo. Por desgracia, un porcentaje muy alto de las partículas más ligeras todavía escapan y ellas contribuyen significativamente al smog y la bruma.

La figura 16.12 ilustra la idea básica del precipitador electrostático. Un alto voltaje (por lo general de 40 a 100 kV) se mantiene entre un alambre que corre por el centro de un ducto y la pared exterior, que está aterrizada. El alambre se mantiene a un potencial eléctrico negativo con respecto a la pared, de modo que el campo eléctrico se dirige hacia el alambre. El campo eléctrico cerca del alambre llega a un valor lo suficientemente alto como para causar una descarga alrededor del alambre y la formación de iones positivos, electrones y iones negativos, como O_2^- . Conforme los electrones y iones negativos se aceleran hacia la pared exterior mediante el campo eléctrico no uniforme, las partículas de polvo en la corriente de gas se cargan mediante colisiones y captura de iones. Dado que la mayoría de las partículas de polvo cargadas son negativas, también son arrastradas hacia la pared exterior por el campo eléctrico. Cuando el ducto se sacude, las partículas caen y se recolectan en el fondo.



Figura 16.12 a) Diagrama de un precipitador electrostático. Compare la contaminación del aire cuando el precipitador b) opera y c) se apaga.

Además de reducir las cantidades de gases dañinos y partículas de materia en la atmósfera, el precipitador electrostático recupera valiosos óxidos metálicos de la chimenea.

Un dispositivo similar, llamado *limpiador electrostático de aire*, se usa en los hogares para aliviar la incomodidad de los pacientes alérgicos. Aire cargado con polvo y polen se lleva al dispositivo a través de una pantalla con malla cargada positivamente. Las partículas transportadas en el aire se cargan de manera positiva cuando hacen contacto con la pantalla, y luego pasan a través de una segunda malla con carga negativa. La fuerza de atracción electrostática entre las partículas con carga positiva en el aire y la pantalla con carga negativa hace que las partículas se precipiten fuera de la superficie de la pantalla, lo que remueve un porcentaje muy alto de contaminantes de la corriente de aire.

Xerografía e impresoras láser

La xerografía se usa ampliamente para hacer fotocopias de materiales impresos. La idea básica detrás del proceso la desarrolló Chester Carlson, quien recibió una patente por su invención en 1940. En 1947, la Xerox Corporation lanzó un programa de gran escala para desarrollar máquinas copadoras automáticas usando el proceso de Carlson. El enorme éxito de este desarrollo es evidente: en la actualidad, prácticamente todas las oficinas y bibliotecas tienen una o más máquinas copadoras y las capacidades de estas máquinas siguen evolucionando.

Algunas características del proceso xerográfico involucran conceptos simples de electrostática y óptica. Sin embargo, la idea que hace único al proceso es el uso de material fotoconductor para formar una imagen. Un fotoconductor es un material que es pobre conductor de electricidad en la oscuridad, pero un conductor razonablemente bueno cuando se expone a la luz.

La figura 16.13 (página 562) ilustra los pasos en el proceso xerográfico. Primero, la superficie de una placa o tambor se recubre con una delgada película del material fotoconductor (por lo general selenio o algún compuesto de selenio) y la superficie fotoconductora recibe una carga electrostática positiva en la oscuridad (figura 16.13a). Entonces la página a copiar se proyecta sobre la superficie cargada (figura 16.13b). La superficie fotoconductora se vuelve conductora sólo en las áreas donde incide la luz; ahí la luz produce portadores de carga en el fotoconductor que neutralizan la superficie con carga positiva.

APLICACIÓN

Limpiador electrostático de aire

APLICACIÓN

Fotocopiadoras xerográficas

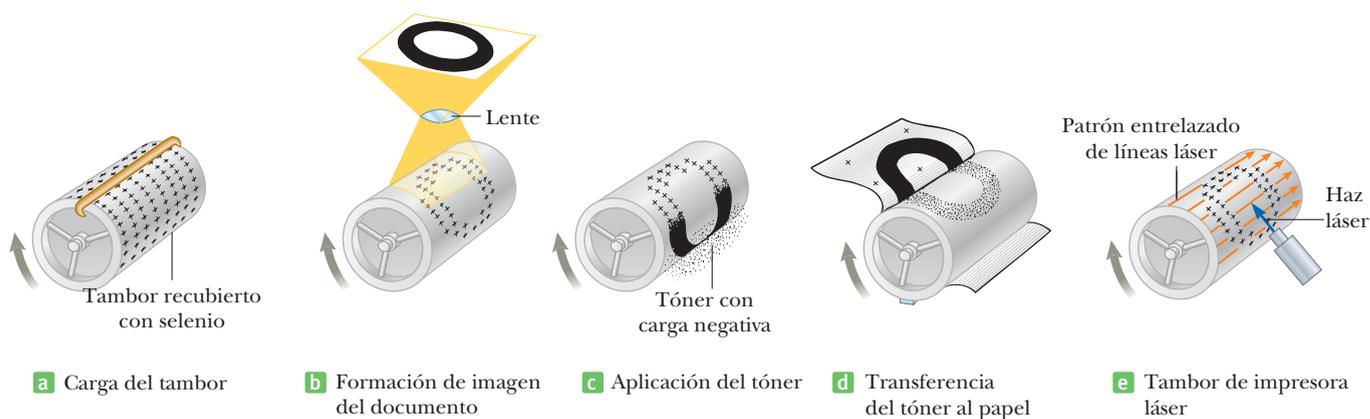


Figura 16.13 El proceso xerográfico. a) La superficie fotoconductora se carga positivamente. b) Con el uso de una fuente de luz y una lente, se forma una imagen oculta sobre la superficie cargada en forma de cargas positivas. c) La superficie que contiene la imagen se cubre con un polvo con carga positiva. d) Esto transfiere la imagen al papel, que luego se calienta para “fijar” el polvo al papel. e) La imagen sobre el tambor de una impresora láser se produce al encender y apagar un haz láser conforme barra a través del tambor cubierto con selenio.

Sin embargo, las cargas permanecen sobre aquellas áreas del fotoconductor no expuestas a la luz, lo que deja una imagen oculta del objeto en la forma de una distribución positiva de carga superficial.

A continuación, un polvo con carga negativa llamado *tóner* se espolvorea sobre la superficie fotoconductora (figura 16.13c). El polvo cargado se adhiere sólo a las áreas que contienen la imagen con carga positiva. En este punto, la imagen se vuelve visible. Entonces se transfiere a la superficie de una hoja de papel con carga positiva. Finalmente, el tóner se “fija” a la superficie del papel mediante calor (figura 16.13d), lo que resulta en una copia permanente del original.

Los pasos para producir un documento en una impresora láser son similares a los utilizados en una máquina fotocopidora en que las partes a), c) y d) de la figura 16.13 permanecen esencialmente iguales. La diferencia entre las dos técnicas se encuentra en la forma como la imagen se forma sobre el tambor recubierto con selenio. En una impresora láser, el comando para imprimir la letra *O*, por ejemplo, se envía a un láser desde la memoria de una computadora. Un espejo giratorio dentro de la impresora hace que el haz del láser barra a través del tambor recubierto con selenio en un patrón entrelazado (figura 16.13e). Señales eléctricas generadas por la impresora encienden y apagan el haz láser en un patrón que traza la letra *O* en la forma de cargas positivas sobre el selenio. Luego se aplica el tóner al tambor y la transferencia al papel se logra como en una máquina fotocopidora.

APLICACIÓN

Impresoras láser

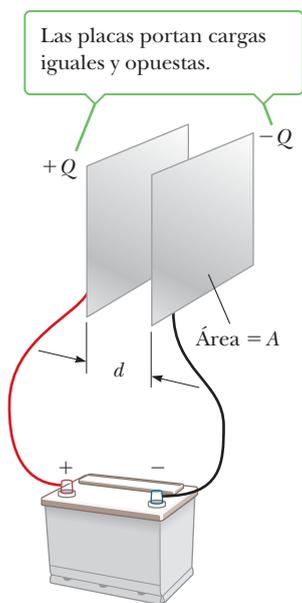


Figura 16.14 Un capacitor de placas paralelas consiste de dos placas paralelas, cada una con área A , separadas por una distancia d .

16.6 Capacitancia

Un **capacitor** es un dispositivo que se utiliza en varios circuitos eléctricos, como los que se usan para sintonizar la frecuencia de los receptores de radio, eliminar las chispas en los sistemas de encendido de los automóviles o almacenar energía por corto tiempo para liberación rápida en unidades de flash electrónico. La figura 16.14 muestra un diseño típico para un capacitor. Consiste de dos placas metálicas paralelas separadas a una distancia d . Cuando se usan en un circuito eléctrico, las placas se conectan a las terminales positiva y negativa de una batería o alguna otra fuente de voltaje. Cuando se hace esta conexión, los electrones se quitan de una de las placas, lo que la deja con una carga $+Q$, y se transfieren a través de la batería a la otra placa, lo que la deja con una carga $-Q$, como se muestra en la figura. La transferencia de carga se detiene cuando la diferencia de potencial a través de las placas es igual a la diferencia de potencial de la batería. Un capacitor cargado es un dispositivo que almacena energía que se puede reclamar cuando se necesita para una aplicación específica.

La capacitancia C de un capacitor es la razón de la magnitud de la carga sobre cualquier conductor (placa), a la magnitud de la diferencia de potencial entre los conductores (placas):

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V} \quad [16.8]$$

Unidad SI: farad (F) = coulomb por volt (C/V)

◀ Capacitancia de un par de conductores

Las cantidades Q y ΔV siempre se consideran como positivas cuando se usa en la ecuación 16.8. Por ejemplo, si un capacitor de $3.0 \mu\text{F}$ se conecta a una batería de 12 V , la magnitud de la carga sobre cada placa del capacitor es

$$Q = C\Delta V = (3.0 \times 10^{-6} \text{ F})(12 \text{ V}) = 36 \mu\text{C}$$

A partir de la ecuación 16.8 vemos que es necesaria una gran capacitancia para almacenar una gran cantidad de carga para un voltaje aplicado dado. El farad es una unidad de capacitancia muy grande. En la práctica, los capacitores más comunes tienen capacitancias que varían de microfarads ($1 \mu\text{F} = 1 \times 10^{-6} \text{ F}$) a picofarads ($1 \text{ pF} = 1 \times 10^{-12} \text{ F}$).

Tip 16.2 La diferencia de potencial es ΔV , no V

Use el símbolo ΔV para la diferencia de potencial a través de un elemento de circuito o un dispositivo (otros libros usan simplemente V para diferencia de potencial). El uso dual de V para representar potencial en un lugar y una diferencia de potencial en otro puede conducir a una confusión innecesaria.

16.7 El capacitor de placas paralelas

La capacitancia de un dispositivo depende del arreglo geométrico de los conductores. La capacitancia de un capacitor de placas paralelas con placas separadas por aire (véase la figura 16.14) se puede calcular fácilmente a partir de tres hechos. Primero, recuerde del capítulo 15 que la magnitud del campo eléctrico entre dos placas está dada por $E = \sigma/\epsilon_0$, donde σ es la magnitud de la carga por unidad de área sobre cada placa. Segundo, anteriormente se encontró en este capítulo que la diferencia de potencial entre dos placas es $\Delta V = Ed$, donde d es la distancia entre las placas. Tercero, la carga sobre una placa está dada por $Q = \sigma A$, donde A es el área de la placa. Al sustituir estos tres hechos en la definición de capacitancia se obtiene el resultado deseado:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} = \frac{\sigma A}{Ed} = \frac{\sigma A}{(\sigma/\epsilon_0)d}$$

Cancelar la carga por unidad de área, σ , produce

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.9]$$

◀ Capacitancia de un capacitor de placas paralelas

donde A es el área de una de las placas, d es la distancia entre las placas y ϵ_0 es la permitividad del espacio libre.

A partir de la ecuación 16.9 vemos que las placas con área más grande pueden almacenar más carga. Lo mismo es cierto para una pequeña separación de placa d porque entonces las cargas positivas sobre una placa ejercen mayor fuerza sobre las cargas negativas de la otra placa, lo que permite que más carga se mantenga en las placas.

La figura 16.15 muestra las líneas de campo eléctrico de un capacitor de placas paralelas más realista. El campo eléctrico casi es constante en el centro entre las placas, mas se

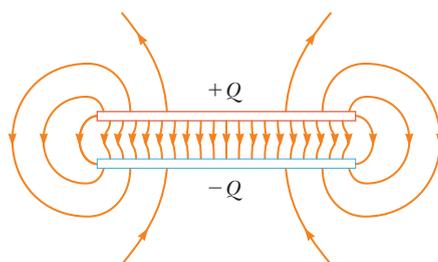
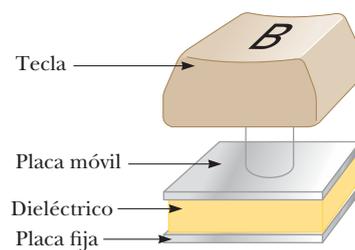


Figura 16.15 El campo eléctrico entre las placas de un capacitor de placas paralelas es uniforme cerca del centro, mas no es así cerca de los bordes.

Figura 16.16 Cuando se presiona la tecla de una letra en el teclado, la capacitancia de un capacitor de placas paralelas aumenta conforme el espaciado de la placa se reduce. La sustancia marcada como “dieléctrico” es un materia aislante, como se describe en la sección 16.10.



APLICACIÓN

Receptáculos de flash de cámara

APLICACIÓN

Teclados de computadora

APLICACIÓN

Confinamiento electrostático

vuelve menor conforme se aproxima a los bordes. No obstante, para la mayoría de los propósitos, el campo se puede considerar como constante en toda la región entre las placas.

Un dispositivo práctico que usa un capacitor es el receptáculo del flash de una cámara. Se usa una batería para cargar el capacitor y luego la carga almacenada se libera al presionar el botón del obturador y tomar una fotografía. La carga almacenada se entrega a un tubo de flash muy rápidamente, lo que ilumina al sujeto en el instante cuando se necesita más luz.

Las computadoras utilizan los capacitores en muchas formas. Por ejemplo, un tipo de teclado de computadora tiene capacitores en las bases de sus teclas, como en la figura 16.16. Cada tecla se conecta a una placa móvil, que representa un lado del capacitor; la placa fija sobre el fondo del teclado representa el otro lado del capacitor. Cuando se presiona una tecla, el espaciamiento del capacitor disminuye, lo que causa un aumento en capacitancia. Los circuitos electrónicos externos reconocen cada tecla por el *cambio* en su capacitancia cuando se oprime.

Los capacitores son útiles para almacenar una gran cantidad de carga que necesita entregarse rápidamente. Un buen ejemplo en la vanguardia de la investigación sobre la fusión es el confinamiento electrostático. En este papel, los capacitores descargan sus electrones a través de una rejilla. Los electrones con carga negativa en la rejilla extraen partículas con carga positiva hacia ellos y por lo tanto de manera mutua, lo que hace que algunas partículas se fusionen y liberen energía en el proceso.

■ EJEMPLO 16.6 Un capacitor de placas paralelas

OBJETIVO Calcular las propiedades físicas fundamentales de un capacitor de placas paralelas.

PROBLEMA Un capacitor con placas paralelas tiene una área $A = 2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una separación de placa $d = 1.00 \times 10^{-3} \text{ m}$. **a)** Encuentre su capacitancia. **b)** ¿Cuánta carga hay en la placa positiva si el capacitor se conecta a una batería de 3.00 V? Calcule **c)** la densidad de carga sobre la placa positiva, si supone que la densidad es uniforme y **d)** la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

ESTRATEGIA Los incisos a) y b) se pueden resolver al sustituir en las ecuaciones básicas para capacitancia. En el inciso c) utilice la definición de densidad de carga y en el inciso d) use el hecho de que la diferencia de voltaje es igual al campo eléctrico por la distancia.

SOLUCIÓN

a) Determine la capacitancia.

Sustituya en la ecuación 16.9:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = (8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1.00 \times 10^{-3} \text{ m}} \right)$$

$$C = 1.77 \times 10^{-12} \text{ F} = 1.77 \text{ pF}$$

b) Determine la carga sobre la placa positiva después de que el capacitor se conecta a una batería de 3.00 V.

Sustituya en la ecuación 16.8:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C \Delta V = (1.77 \times 10^{-12} \text{ F})(3.00 \text{ V})$$

$$= 5.31 \times 10^{-12} \text{ C}$$

e) Calcule la densidad de carga sobre la placa positiva.

La densidad de carga es carga dividida por área:

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \frac{5.31 \times 10^{-12} \text{ C}}{2.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 2.66 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$$

d) Calcule la magnitud del campo eléctrico entre las placas.

Aplique $\Delta V = Ed$:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{3.00 \text{ V}}{1.00 \times 10^{-3} \text{ m}} = 3.00 \times 10^3 \text{ V/m}$$

COMENTARIOS La respuesta al inciso d) también se podría obtener a partir del campo eléctrico derivado para un capacitor de placas paralelas, ecuación 15.13, $E = \sigma/\epsilon_0$.

PREGUNTA 16.6 ¿Cómo cambian las respuestas si se duplica la distancia entre las placas?

EJERCICIO 16.6 Dos placas, cada una con $3.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de área, se usan para construir un capacitor de placas paralelas con capacitancia de 1.00 pF. a) Encuentre la distancia de separación necesaria. b) Si la placa positiva debe contener una carga de $5.00 \times 10^{-12} \text{ C}$, determine la densidad de carga. c) Encuentre el campo eléctrico entre las placas. d) ¿Qué voltaje de batería se debe unir a la placa para obtener los resultados anteriores?

RESPUESTAS a) $2.66 \times 10^{-3} \text{ m}$ b) $1.67 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ c) $1.89 \times 10^3 \text{ N/C}$ d) 5.00 V

Símbolos para elementos de circuito y circuitos

El símbolo que se usa comúnmente para representar un capacitor en un circuito es

—||— o a veces —|(|— . No confunda alguno de estos símbolos con el símbolo de circuito

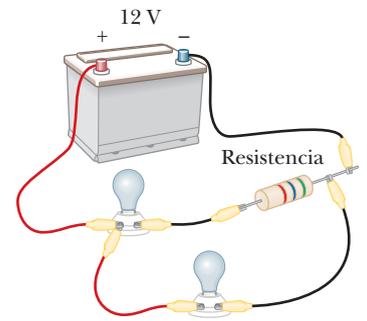
—|—, que se usa para designar una batería (o cualquier otra fuente de corriente directa).

La terminal positiva de la batería está al potencial más alto y se representa mediante la línea vertical más larga en el símbolo de batería. En el siguiente capítulo se estudia otro elemento de circuito, llamado resistor, que se representa mediante el símbolo — W —. Cuando los alambres en un circuito no tienen resistencia apreciable en comparación con la resistencia de otros elementos en el circuito, los alambres se representan mediante líneas rectas.

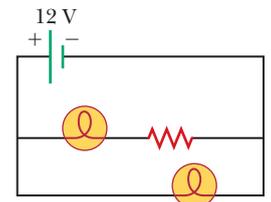
Es importante darse cuenta de que un circuito es una colección de objetos reales y por lo general contienen una fuente de energía eléctrica (como una batería) conectada a elementos que convierten energía eléctrica a otras formas (luz, calor, sonido) o almacenan la energía en campos eléctricos o magnéticos para su recuperación posterior. En la figura 16.17 se bosqueja lado a lado un circuito real y su diagrama. El símbolo de circuito para la bombilla que se muestra en la figura 16.17b es



Si usted no está familiarizado con los diagramas de circuito, trace la trayectoria del circuito real con su dedo para que vea que es equivalente al diagrama geoméricamente regular.



a



b

Figura 16.17 a) Un circuito real y b) su diagrama de circuito equivalente.

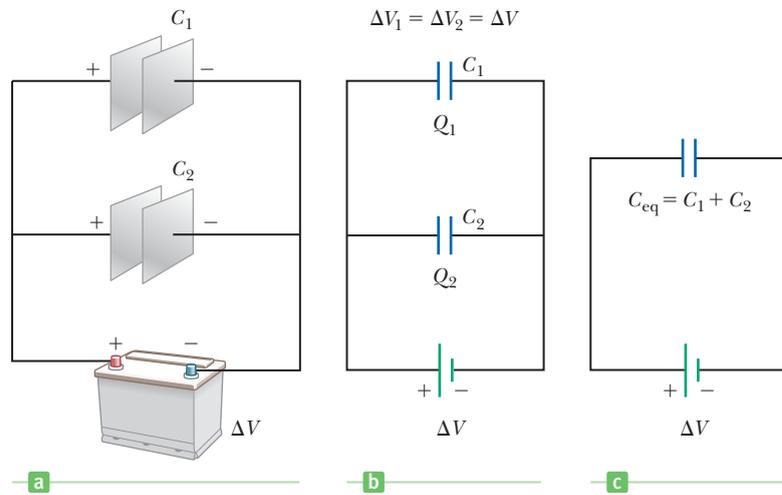
16.8 Combinaciones de capacitores

Dos o más capacitores se pueden combinar en circuitos en varias formas, pero la mayoría se reduce a dos configuraciones simples, llamadas *paralelo* y *serie*. Entonces, la idea es encontrar la capacitancia equivalente única debida a una combinación de muchos capacitores diferentes que están en paralelo o en serie unos con otros. Los capacitores se fabrican con capacitancias estándar diferentes y al combinarlos en distintas formas, se puede obtener cualquier valor deseado de la capacitancia.

Capacitores en paralelo

Dos capacitores conectados como se muestra en la figura activa 16.18a (página 566) se dice que están en *paralelo*. La placa izquierda de cada capacitor se conecta a la terminal positiva de la batería mediante un alambre conductor, de modo que las placas izquierdas

Figura activa 16.18 a) Una conexión en paralelo de dos capacitores. b) Diagrama de circuito para la combinación en paralelo. c) Las diferencias de potencial a través de los capacitores son las mismas y la capacitancia equivalente es $C_{\text{eq}} = C_1 + C_2$.



están al mismo potencial. En la misma forma, las placas derechas, conectadas a la terminal negativa de la batería, también están al mismo potencial. Esto significa que **los capacitores en paralelo tienen la misma diferencia de potencial ΔV a través de ellos**. En la figura activa 16.18b se ilustran los capacitores en paralelo.

Cuando los capacitores se conectan en el circuito por primera vez, los electrones se transfieren desde las placas izquierdas a través de la batería hasta las placas derechas, lo que deja a las placas izquierdas con carga positiva y a las placas derechas con carga negativa. La fuente de energía para esta transferencia de carga es la energía química interna almacenada en la batería, que se convierte en energía eléctrica. El flujo de carga se detiene cuando el voltaje a través de los capacitores iguala al voltaje de la batería, momento en el cual los capacitores tienen sus cargas máximas. Si las cargas máximas en los dos capacitores son Q_1 y Q_2 , respectivamente, la *carga total*, Q , almacenada por los dos capacitores es

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad [16.10]$$

Estos dos capacitores se pueden sustituir con un capacitor equivalente que tenga una capacitancia C_{eq} . Este capacitor equivalente debe tener exactamente el mismo efecto externo sobre el circuito que los dos originales, así que debe almacenar Q unidades de carga y tiene la misma diferencia de potencial a través de él. Las cargas respectivas sobre cada capacitor son

$$Q_1 = C_1 \Delta V \quad \text{y} \quad Q_2 = C_2 \Delta V$$

La carga sobre el capacitor equivalente es

$$Q = C_{\text{eq}} \Delta V$$

Al sustituir estas relaciones en la ecuación 16.10 se obtiene

$$C_{\text{eq}} \Delta V = C_1 \Delta V + C_2 \Delta V$$

o

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en paralelo} \end{array} \right) \quad [16.11]$$

Si este tratamiento se extiende a tres o más capacitores conectados en paralelo, se encuentra que la capacitancia equivalente es

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en paralelo} \end{array} \right) \quad [16.12]$$

Vemos que **la capacitancia equivalente de una combinación de capacitores en paralelo es mayor que cualquiera de las capacitancias individuales**.

Tip 16.3 Voltaje es lo mismo que diferencia de potencial

Un voltaje *a través* de un dispositivo, como un capacitor, tiene el mismo significado que la diferencia de potencial a través del dispositivo. Por ejemplo, si decimos que el voltaje en un capacitor es de 12 V, queremos decir que la diferencia de potencial entre sus placas es de 12 V.

■ EJEMPLO 16.7 Cuatro capacitores conectados en paralelo

OBJETIVO Analizar un circuito con muchos capacitores en paralelo.

PROBLEMA a) Determine la capacitancia del capacitor solo que es equivalente a la combinación en paralelo de capacitores que se muestra en la figura 16.19. Encuentre b) la carga sobre el capacitor de $12.0 \mu\text{F}$ y c) la carga total contenida en la configuración. d) Derive una expresión simbólica para la fracción de la carga total contenida en uno de los capacitores.

ESTRATEGIA Para el inciso a), sume las capacitancias individuales. Para el inciso b), aplique la fórmula $C = Q/\Delta V$ al capacitor de $12.0 \mu\text{F}$. La diferencia de voltaje es la misma que la diferencia a través de la batería. Para encontrar la carga total contenida en los cuatro capacitores, use la capacitancia equivalente en la misma fórmula.

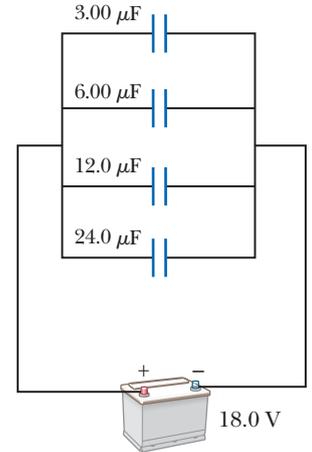


Figura 16.19 (Ejemplo 16.7) Cuatro capacitores conectados en paralelo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia equivalente.

Aplique la ecuación 16.12:

$$\begin{aligned} C_{\text{eq}} &= C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \\ &= 3.00 \mu\text{F} + 6.00 \mu\text{F} + 12.0 \mu\text{F} + 24.0 \mu\text{F} \\ &= 45.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

b) Encuentre la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$ (designado C_3).

Resuelva la ecuación de capacitancia para Q y sustituya:

$$\begin{aligned} Q &= C_3 \Delta V = (12.0 \times 10^{-6} \text{ F})(18.0 \text{ V}) = 216 \times 10^{-6} \text{ C} \\ &= 216 \mu\text{C} \end{aligned}$$

c) Encuentre la carga total contenida en la configuración.

Use la capacitancia equivalente:

$$C_{\text{eq}} = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C_{\text{eq}} \Delta V = (45.0 \mu\text{F})(18.0 \text{ V}) = 8.10 \times 10^2 \mu\text{C}$$

d) Deduzca una expresión simbólica para la fracción de la carga total contenida en uno de los capacitores.

Escriba una expresión simbólica para la carga fraccional en el i -ésimo capacitor y use la definición de capacitor:

$$\frac{Q_i}{Q_{\text{total}}} = \frac{C_i \Delta V}{C_{\text{eq}} \Delta V} = \frac{C_i}{C_{\text{eq}}}$$

COMENTARIOS La carga sobre cualquiera de los capacitores paralelos se puede encontrar como en el inciso b), porque la diferencia de potencial es la misma. Observe que encontrar la carga total no requiere encontrar la carga sobre cada capacitor individual y sumar. Es más fácil usar la capacitancia equivalente en la definición de capacitancia.

PREGUNTA 16.7 Si los cuatro capacitores tienen la misma capacitancia, ¿qué fracción de la carga total tendría cada uno?

EJERCICIO 16.7 Encuentre la carga sobre el capacitor de $24.0 \mu\text{F}$.

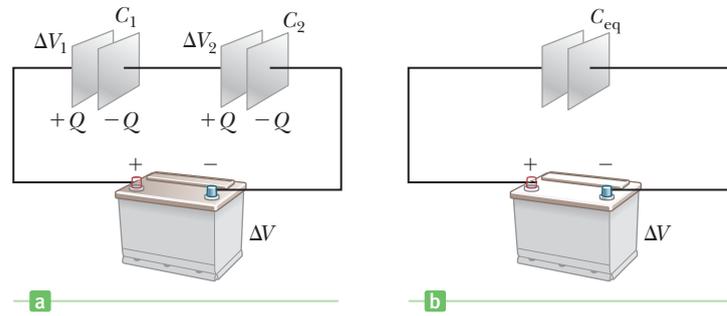
RESPUESTA $432 \mu\text{C}$

Capacitores en serie

Ahora considere dos capacitores conectados en *serie*, como se ilustra en la figura 16.20a. **Para una combinación de capacitores en serie, la magnitud de la carga debe ser la misma sobre todas las placas.** Para comprender este principio, considere el proceso de transferencia de carga con algo de detalle. Cuando una batería se conecta al circuito, los electrones

◀ Q es la misma para todos los capacitores conectados en serie

Figura activa 16.20 Una combinación en serie de dos capacitores. Las cargas sobre los capacitores son iguales y la capacitancia equivalente se puede calcular a partir de la relación recíproca $1/C_{eq} = (1/C_1) + (1/C_2)$.



con carga total $-Q$ se transfieren de la placa izquierda de C_1 a la placa derecha de C_2 a través de la batería, lo que deja la placa izquierda de C_1 con una carga de $+Q$. Como consecuencia, las magnitudes de las cargas sobre la placa izquierda de C_1 y la placa derecha de C_2 deben ser iguales. Ahora considera la placa derecha de C_1 y la placa izquierda de C_2 , en medio. Estas placas no se conectan a la batería (debido a la brecha a través de las placas) y, en conjunto, son eléctricamente neutras. Sin embargo, la carga de $+Q$ sobre la placa izquierda de C_1 atrae cargas negativas a la placa derecha de C_1 . Estas cargas continuarán acumulándose hasta que las placas izquierda y derecha de C_1 , en conjunto, se vuelvan eléctricamente neutras, lo cual significa que la carga sobre la placa derecha de C_1 es $-Q$. Esta carga negativa sólo podría provenir de la placa izquierda de C_2 , de modo que C_2 tiene una carga de $+Q$.

Por lo tanto, sin importar cuántos capacitores estén en serie o cuáles sean sus capacitancias, **todas las placas derechas ganan cargas de $-Q$ y todas las placas izquierdas tienen cargas de $+Q$** (una consecuencia de la conservación de la carga).

Después que un capacitor equivalente para una serie de capacitores está completamente cargado, **el capacitor equivalente debe terminar con una carga de $-Q$ sobre su placa derecha y una carga de $+Q$ sobre su placa izquierda**. Al aplicar la definición de capacitancia al circuito de la figura 16.20b, se tiene

$$\Delta V = \frac{Q}{C_{eq}}$$

donde ΔV es la diferencia de potencial entre las terminales de la batería y C_{eq} es la capacitancia equivalente. Como $Q = C\Delta V$ se puede aplicar a cada capacitor, las diferencias de potencial a través de ellos está dada por

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2}$$

A partir de la figura activa 16.20a, vemos que

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 \quad [16.13]$$

donde ΔV_1 y ΔV_2 son las diferencias de potencial a través de los capacitores C_1 y C_2 (una consecuencia de la conservación de la energía).

La diferencia de potencial a través de cualquier número de capacitores (u otros elementos de circuito) en serie, es igual a la suma de las diferencias de potencial a través de los capacitores individuales. Al sustituir estas expresiones en la ecuación 16.13 y observar que $\Delta V = Q/C_{eq}$, tenemos

$$\frac{Q}{C_{eq}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$$

Al cancelar Q , llegamos a la siguiente relación:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en serie} \end{array} \right) \quad [16.14]$$

Si este análisis se aplica a tres o más capacitores conectados en serie, encontramos que la capacitancia equivalente es

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad \left(\begin{array}{l} \text{combinación} \\ \text{en serie} \end{array} \right) \quad [16.15]$$

Como se mostrará en el ejemplo 16.8, la ecuación 16.15 implica que **la capacitancia equivalente de una combinación en serie siempre es menor que cualquier capacitancia individual en la combinación.**

Examen rápido

16.8 Un capacitor se diseña de modo que una placa es grande y la otra es pequeña. Si las placas se conectan a una batería, a) la placa grande tiene una carga mayor que la placa pequeña, b) la placa grande tiene menos carga que la placa pequeña o c) las placas tienen carga igual pero opuesta.

EJEMPLO 16.8 Cuatro capacitores conectados en serie

OBJETIVO Encontrar una capacitancia equivalente de capacitores en serie, y la carga y voltaje sobre cada capacitor.

PROBLEMA Cuatro capacitores se conectan en serie con una batería, como en la figura 16.21. a) Calcule la capacitancia del capacitor equivalente. b) Calcule la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$. c) Encuentre la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

ESTRATEGIA Combine todos los capacitores en un solo capacitor equivalente con la ecuación 16.15. Encuentre la carga sobre este capacitor equivalente con la fórmula $C = Q/\Delta V$. Esta carga es la misma que sobre los capacitores individuales. Use de nuevo esta ecuación para encontrar la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

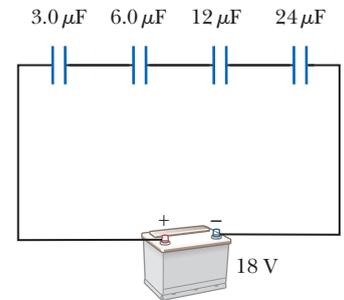


Figura 16.21 (Ejemplo 16.8) Cuatro capacitores conectados en serie.

SOLUCIÓN

a) Calcule la capacitancia equivalente de la serie.

Aplique la ecuación 16.15:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{3.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{6.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{12 \mu\text{F}} + \frac{1}{24 \mu\text{F}}$$

$$C_{\text{eq}} = 1.6 \mu\text{F}$$

b) Calcule la carga sobre el capacitor de $12 \mu\text{F}$.

La carga deseada es igual a la carga sobre el capacitor equivalente:

$$Q = C_{\text{eq}} \Delta V = (1.6 \times 10^{-6} \text{ F})(18 \text{ V}) = 29 \mu\text{C}$$

c) Encuentre la caída de voltaje a través del capacitor de $12 \mu\text{F}$.

Aplique la ecuación básica de capacitancia:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{C} = \frac{29 \mu\text{C}}{12 \mu\text{F}} = 2.4 \text{ V}$$

COMENTARIOS Observe que la capacitancia equivalente es menor que la de cualquiera de los capacitores individuales. La relación $C = Q/\Delta V$ se puede usar para encontrar las caídas de voltaje sobre los otros capacitores, tal como en el inciso c).

PREGUNTA 16.8 ¿Sobre cuál capacitor la caída de voltaje es menor? ¿Sobre cuál es mayor?

EJERCICIO 16.8 El capacitor de $24 \mu\text{F}$ se quita del circuito, lo que sólo deja tres capacitores en serie. Encuentre a) la capacitancia equivalente, b) la carga sobre el capacitor de $6 \mu\text{F}$ y c) la caída de voltaje a través del capacitor de $6 \mu\text{F}$.

RESPUESTAS a) $1.7 \mu\text{F}$ b) $31 \mu\text{C}$ c) 5.2 V

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Combinaciones complejas de capacitores

1. **Combine** capacitores que están en serie o en paralelo y siga las fórmulas derivadas.

2. **Vuelva a dibujar** el circuito después de cada combinación.
3. **Repita** los primeros dos pasos hasta que sólo haya un solo capacitor equivalente.
4. **Encuentre la carga** sobre el capacitor equivalente único, con la fórmula $C = Q/\Delta V$.
5. **Trabaje hacia atrás** a través de los diagramas hasta el original y encuentre la carga y la caída de voltaje a través de cada capacitor a lo largo del camino. Para hacer esto, use la siguiente colección de hechos:
 - A. La ecuación del capacitor: $C = Q/\Delta V$
 - B. Capacitores en paralelo: $C_{eq} = C_1 + C_2$
 - C. Los capacitores en paralelo tienen todos la misma diferencia de voltaje, ΔV , que su capacitor equivalente.
 - D. Capacitores en serie: $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$
 - E. Los capacitores en serie tienen todos la misma carga, Q , que su capacitor equivalente.

EJEMPLO 16.9 Capacitancia equivalente

OBJETIVO Resolver una combinación compleja de capacitores en serie y paralelo.

PROBLEMA a) Calcule la capacitancia equivalente entre a y b para la combinación de capacitores que se muestra en la figura 16.22a. Todas las capacitancias están en microfarads. b) Si una batería de 12 V se conecta a través del sistema entre los puntos a y b , encuentre la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en el primer diagrama y la caída de voltaje a través de él.

ESTRATEGIA Para el inciso a), use las ecuaciones 16.12 y 16.15 para reducir la combinación paso a paso, como se indica en la figura. En el inciso b), para encontrar la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$, comience con la figura 16.22c y encuentre la carga sobre el capacitor de $2.0 \mu\text{F}$. Esta misma carga está sobre cada uno de los capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en el segundo diagrama, por el hecho 5E de la Estrategia para resolver problemas. Uno de estos capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en el segundo diagrama es simplemente el capacitor original de $4.0 \mu\text{F}$ en el primer diagrama.

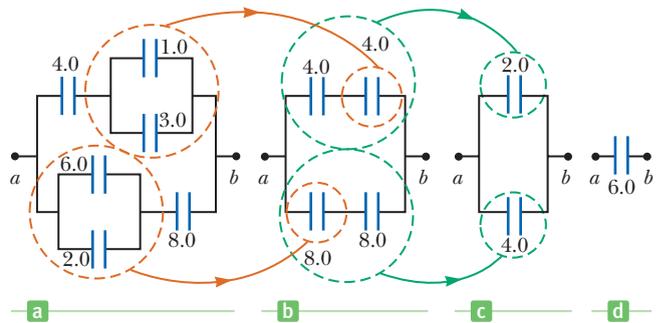


Figura 16.22 (Ejemplo 16.9) Para encontrar la capacitancia equivalente del circuito en a), utilice las reglas de serie y paralelo descritas en el texto para reducir exitosamente el circuito, como se indica en b), c) y d). Todos los capacitores están en microfarads.

SOLUCIÓN

a) Calcule la capacitancia equivalente.

Determine la capacitancia equivalente de los capacitores de $1.0 \mu\text{F}$ y $3.0 \mu\text{F}$ en paralelo en la figura 16.22a:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 1.0 \mu\text{F} + 3.0 \mu\text{F} = 4.0 \mu\text{F}$$

Determine la capacitancia equivalente de los capacitores de $2.0 \mu\text{F}$ y $6.0 \mu\text{F}$ en paralelo en la figura 16.22a:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2.0 \mu\text{F} + 6.0 \mu\text{F} = 8.0 \mu\text{F}$$

Combine los dos capacitores de $4.0 \mu\text{F}$ en serie en la figura 16.22b:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{eq}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} \\ &= \frac{1}{2.0 \mu\text{F}} \rightarrow C_{eq} = 2.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Combine los dos capacitores de $8.0 \mu\text{F}$ en serie en la figura 16.22b:

$$\begin{aligned} \frac{1}{C_{eq}} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{8.0 \mu\text{F}} + \frac{1}{8.0 \mu\text{F}} \\ &= \frac{1}{4.0 \mu\text{F}} \rightarrow C_{eq} = 4.0 \mu\text{F} \end{aligned}$$

Finalmente, combine los dos capacitores en paralelo en la figura 16.22c para determinar la capacitancia equivalente entre a y b :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 2.0 \mu\text{F} + 4.0 \mu\text{F} = 6.0 \mu\text{F}$$

b) Determine la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ y la caída de voltaje a través de él.

Calcule la carga sobre el capacitor de $2.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22c, que es la misma que la carga sobre el capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C\Delta V = (2.0 \mu\text{F})(12 \text{ V}) = 24 \mu\text{C}$$

Use la ecuación básica de capacitancia para encontrar la caída de voltaje a través del capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow \Delta V = \frac{Q}{C} = \frac{24 \mu\text{C}}{4.0 \mu\text{F}} = 6.0 \text{ V}$$

COMENTARIOS Para encontrar el resto de las cargas y caídas de voltaje, sólo es cuestión de usar $C = Q/\Delta V$ repetidamente, junto con los hechos 5C y 5E en la Estrategia para resolver problemas. La caída de voltaje a través del capacitor de $4.0 \mu\text{F}$ también se podría encontrar al notar, en la figura 16.22b, que ambos capacitores tienen el mismo valor y por lo tanto, por simetría, dividirían la caída total de 12 volts entre ellos.

PREGUNTA 16.9 ¿Cuál capacitor tiene más carga, el capacitor de $1.0 \mu\text{F}$ o el capacitor de $3.0 \mu\text{F}$?

EJERCICIO 16.9 a) En el ejemplo 16.9, determine la carga sobre el capacitor de $8.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a y la caída de voltaje a través de él. b) Haga lo mismo para el capacitor de $6.0 \mu\text{F}$ en la figura 16.22a.

RESPUESTAS a) $48 \mu\text{C}$, 6.0 V b) $36 \mu\text{C}$, 6.0 V

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

Casi todos quienes trabajan con equipo electrónico en algún momento han comprobado que un capacitor puede almacenar energía. Si las placas de un capacitor cargado se conectan mediante un conductor como un alambre, la carga se transfiere de una placa a la otra hasta que las dos están descargadas. Con frecuencia, la descarga puede observarse como una chispa visible. Si por accidente toca las placas opuestas de un capacitor cargado, sus dedos actuarían como una vía por la cual el capacitor podría descargarse, lo que le infligiría un choque eléctrico. El grado de choque dependería de la capacitancia y el voltaje aplicado al capacitor. *Donde se presentan altos voltajes y grandes cantidades de carga, como en la fuente de poder de un televisor, tal choque puede ser mortal.*

Los capacitores almacenan energía eléctrica y dicha energía es la misma que el trabajo requerido para mover carga hacia las placas. Si un capacitor inicialmente no tiene carga (ambas placas son neutras), de modo que las placas están al mismo potencial, se requiere muy poco trabajo para transferir una pequeña cantidad de carga ΔQ de una placa a la otra. Sin embargo, una vez que la carga se transfiere, entre las placas aparece una pequeña diferencia de potencial $\Delta V = \Delta Q/C$, de modo que se debe realizar trabajo para transferir carga adicional contra esta diferencia de potencial. A partir de la ecuación 16.6, si la diferencia de potencial en cualquier instante durante el proceso de carga es ΔV , el trabajo ΔW que se requiere para mover carga ΔQ a través de esta diferencia de potencial está dada por

$$\Delta W = \Delta V \Delta Q$$

Sabemos que $\Delta V = Q/C$ para un capacitor que tiene una carga total Q . Por lo tanto, una gráfica de voltaje contra carga total produce una línea recta con una pendiente de $1/C$, como se muestra en la figura 16.23. El trabajo ΔW , para una ΔV particular, es el área del rectángulo azul. Sumar todos los rectángulos produce una aproximación del trabajo total necesario para llenar el capacitor. En el límite cuando ΔQ se considera infinitesimalmente pequeño, el trabajo total necesario para cargar el capacitor a una carga final Q y voltaje ΔV es el área bajo la línea. Ésta es sólo el área de un triángulo, la mitad de la base por la altura, por ende tenemos que

$$W = \frac{1}{2} Q \Delta V \quad [16.16]$$

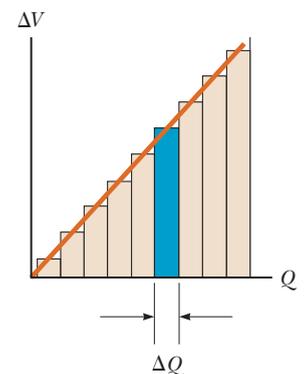


Figura 16.23 Una gráfica de voltaje contra carga para un capacitor es una línea recta con pendiente $1/C$. El trabajo requerido para mover una carga de ΔQ a través de una diferencia de potencial de ΔV atravesando las placas del capacitor es $\Delta W = \Delta V \Delta Q$, que es igual al área del rectángulo azul. El trabajo total requerido para cargar el capacitor a una carga total de Q es el área bajo la línea recta, que es igual a $Q\Delta V/2$.

Como se afirmó anteriormente, W también es la energía almacenada en el capacitor. A partir de la definición de capacitancia, se tiene $Q = C\Delta V$; por lo tanto, la energía almacenada se puede expresar de tres formas distintas:

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}Q\Delta V = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad [16.17]$$

Por ejemplo, la cantidad de energía almacenada en un capacitor de $5.0 \mu\text{F}$ cuando se conecta a una batería de 120 V es

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2 = \frac{1}{2}(5.0 \times 10^{-6} \text{ F})(120 \text{ V})^2 = 3.6 \times 10^{-2} \text{ J}$$

En la práctica, hay un límite a la energía máxima (o carga) que se puede almacenar en un capacitor. En algún punto, las fuerzas de Coulomb entre las cargas sobre las placas se vuelven tan fuertes que los electrones saltan a través de la brecha, lo que descarga al capacitor. Por esta razón, usualmente los capacitores se marcan con un voltaje operativo máximo. (Este hecho físico en realidad se puede explotar para producir un circuito con una luz que parpadea de manera regular.)

Los grandes capacitores pueden almacenar suficiente energía eléctrica como para causar quemaduras severas o incluso la muerte si se descargan de modo que el flujo de carga pasa a través del corazón. Sin embargo, bajo las condiciones apropiadas, se pueden usar para *sostener* la vida al detener la fibrilación cardíaca en las víctimas de ataque cardíaco. Cuando ocurre fibrilación, el corazón produce un rápido patrón irregular de latidos. Una descarga rápida de energía eléctrica a través del corazón puede regresar el órgano a su patrón de latido normal. Los equipos médicos de urgencias usan desfibriladores portátiles que contienen baterías capaces de cargar un capacitor a un alto voltaje. (En realidad, el circuito permite que el capacitor se cargue a un voltaje mucho más alto que la batería.) En este caso y otros (unidades de flash de cámara y láseres usados para experimentos de fusión), los capacitores funcionan como depósitos de energía que se pueden cargar lentamente y luego descargarse rápidamente para proporcionar grandes cantidades de energía en un pulso corto. La energía eléctrica almacenada se libera a través del corazón mediante electrodos conductores, llamados paletas, que se colocan a ambos lados del pecho de la víctima. Los paramédicos deben esperar entre aplicaciones de energía eléctrica debido al tiempo que tardan los capacitores en cargarse por completo. El alto voltaje en el capacitor se puede obtener a partir de una batería de bajo voltaje en una máquina portátil a través del fenómeno de *inducción electromagnética*, que se estudiará en el capítulo 20.

BIO APLICACIÓN

Desfibriladores

■ EJEMPLO 16.10 Voltaje típico, energía y tiempo de descarga para un desfibrilador

OBJETIVO Aplicar los conceptos de energía y potencia a un capacitor.

PROBLEMA Un desfibrilador completamente cargado contiene 1.20 kJ de energía almacenada en un capacitor de $1.10 \times 10^{-4} \text{ F}$. En una descarga a través de un paciente, en 2.50 ms se entregan $6.00 \times 10^2 \text{ J}$ de energía eléctrica. **a)** Determine el voltaje necesario para almacenar 1.20 kJ en la unidad. **b)** ¿Qué potencia promedio se entrega al paciente?

ESTRATEGIA Puesto que se conoce la energía almacenada y la capacitancia, se puede usar la ecuación 16.17 para encontrar el voltaje requerido en el inciso a). Para el inciso b), dividir la energía entregada entre el tiempo dada la potencia promedio.

SOLUCIÓN

a) Determine el voltaje necesario para almacenar 1.20 kJ en la unidad.

Resuelva la ecuación 16.17 para ΔV :

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2}C\Delta V^2$$

$$\begin{aligned} \Delta V &= \sqrt{\frac{2 \times (\text{energía almacenada})}{C}} \\ &= \sqrt{\frac{2(1.20 \times 10^3 \text{ J})}{1.10 \times 10^{-4} \text{ F}}} \\ &= 4.67 \times 10^3 \text{ V} \end{aligned}$$

b) ¿Qué potencia promedio se entrega al paciente?

Divida la energía entregada entre el tiempo:

$$P_{\text{prom}} = \frac{\text{energía entregada}}{\Delta t} = \frac{6.00 \times 10^2 \text{ J}}{2.50 \times 10^{-3} \text{ s}} \\ = 2.40 \times 10^5 \text{ W}$$

COMENTARIOS La potencia entregada por un capacitor que se drena no es constante, como descubrirá en el estudio de los circuitos RC en el capítulo 18. Por esta razón, sólo es posible encontrar la potencia promedio. Los capacitores son necesarios en los desfibriladores porque pueden entregar energía mucho más rápido que las baterías. Las baterías proporcionan corriente a través de reacciones químicas relativamente lentas, mientras que los capacitores pueden liberar rápidamente carga que ya se produjo y almacenó.

PREGUNTA 16.10 Si el voltaje a través del capacitor se duplica, ¿la energía almacenada se a) reduciría a la mitad, b) duplicaría o c) cuadruplicaría?

EJERCICIO 16.10 a) Determine la energía contenida en un capacitor de placas paralelas de $2.50 \times 10^{-5} \text{ F}$ si tiene $1.75 \times 10^{-3} \text{ C}$ de carga. b) ¿Cuál es el voltaje entre las placas? c) ¿Qué nuevo voltaje resultará en una duplicación de la energía almacenada?

RESPUESTAS a) $6.13 \times 10^{-2} \text{ J}$ b) 70.0 V c) 99.0 V

■ FÍSICA APLICADA 16.1 Diseño de máxima energía

¿Cómo se deben conectar tres capacitores y dos baterías para que los capacitores almacenen la máxima energía posible?

de potencial, así que se quiere maximizar cada una de estas cantidades. Si los tres capacitores se conectan en paralelo, sus capacitancias se suman y si las baterías están en serie, sus diferencias de potencial, de igual modo, también se suman. ■

EXPLICACIÓN La energía almacenada en el capacitor es proporcional a la capacitancia y al cuadrado de la diferencia

■ Examen rápido

16.9 Un capacitor de placas paralelas se desconecta de una batería y las placas se separan un poco más. ¿Las siguientes cantidades aumentan, disminuyen o permanecen igual?

a) C b) Q c) E entre las placas d) ΔV e) la energía almacenada en el capacitor

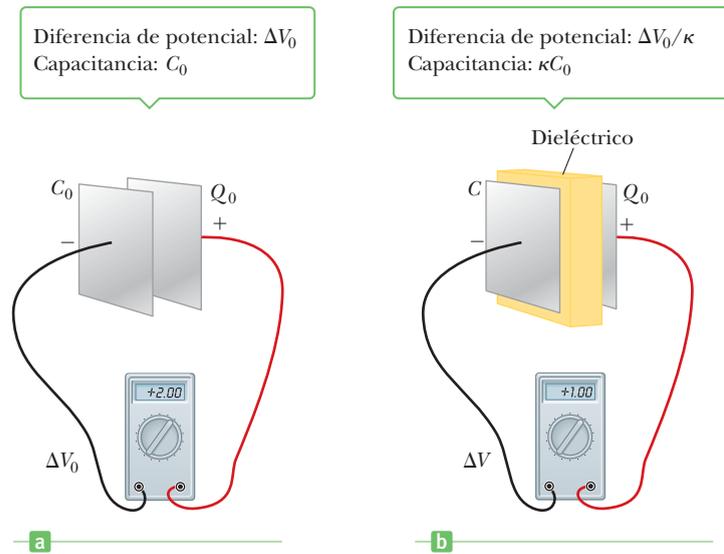
16.10 Capacitores con dieléctricos

Un **dieléctrico** es un material aislante, como caucho, plástico o papel encerado. Cuando un dieléctrico se inserta entre las placas de un capacitor, la capacitancia aumenta. Si el dieléctrico llena por completo el espacio entre las placas, la capacitancia se multiplica por el factor κ , llamado **constante dieléctrica**.

El siguiente experimento ilustra el efecto de un dieléctrico en un capacitor. Considere un capacitor de placas paralelas con carga Q_0 y capacitancia C_0 en ausencia de un dieléctrico. La diferencia de potencial a través de las placas del capacitor se puede medir y está dada por $\Delta V_0 = Q_0/C_0$ (figura 16.24a en la página 574). Puesto que el capacitor no está conectado a un circuito externo, no hay vía para que la carga salga o se agregue a las placas. Si ahora se inserta un dieléctrico entre las placas, como en la figura 16.24b, el voltaje a través de las placas se *reduce* por el factor κ al valor

$$\Delta V = \frac{\Delta V_0}{\kappa}$$

Figura 16.24 Cuando un dieléctrico con constante dieléctrica κ se inserta en un capacitor cargado que no está conectado a una batería, la diferencia de potencial se reduce a $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$ y la capacitancia aumenta a $C = \kappa C_0$.



Puesto que $\kappa > 1$, ΔV es menor que ΔV_0 . Dado que la carga Q_0 sobre el capacitor no cambia, concluimos que la capacitancia en presencia del dieléctrico debe cambiar al valor:

$$C = \frac{Q_0}{\Delta V} = \frac{Q_0}{\Delta V_0/\kappa} = \frac{\kappa Q_0}{\Delta V_0}$$

o

$$C = \kappa C_0 \quad [16.18]$$

De acuerdo con este resultado, la capacitancia se *multiplica* por el factor κ cuando el dieléctrico llena la región entre las placas. Para un capacitor de placas paralelas, donde la capacitancia en ausencia de un dieléctrico es $C_0 = \epsilon_0 A/d$, se puede expresar la capacitancia en presencia de un dieléctrico como

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.19]$$

A partir de este resultado, parece que la capacitancia se podría hacer muy grande al disminuir d , la separación entre las placas. En la práctica, el valor más bajo de d está limitado por la descarga eléctrica que puede ocurrir a través del material dieléctrico que separa las placas. Para cualquier separación de placas dada, existe un campo eléctrico máximo que se puede producir en el dieléctrico antes de que se rompa y comience a conducir. Este campo eléctrico máximo se llama **rigidez dieléctrica** y para el aire su valor es aproximadamente 3×10^6 V/m. La mayoría de los materiales aislantes tienen rigideces dieléctricas mayores que la del aire, como se indica por los valores que se mencionan en la tabla 16.1. La figura 16.25 muestra un ejemplo de rompimiento dieléctrico en aire.

Los capacitores comerciales con frecuencia se hacen con el uso de una hoja metálica entrelazada con hojas delgadas de papel impregnado con parafina o Mylar[®], que funciona como el material dieléctrico. Estas capas alternas de hoja metálica y dieléctrico se enrollan en un pequeño cilindro (figura 16.26a). Un tipo de capacitor de alto voltaje consiste de algunas placas metálicas entrelazadas sumergidas en aceite de silicón (figura 16.26b). Los capacitores pequeños con frecuencia se construyen a partir de materiales cerámicos. Los capacitores variables (por lo general de 10 a 500 pF) usualmente consisten de dos conjuntos entrelazados de placas metálicas, una fija y la otra móvil, con aire como dieléctrico.

Un capacitor electrolítico (figura 16.26c) se usa con frecuencia para almacenar grandes cantidades de carga a voltajes relativamente bajos. Consiste de una hoja metálica en contacto con un electrolito, una solución que conduce carga en virtud del movimiento de los iones que contiene. Cuando se aplica un voltaje entre la hoja y el electrolito, en la hoja se forma una delgada capa de óxido metálico (un aislante) y esta capa sirve como el dieléctrico. Se pueden lograr enormes capacitancias porque la capa de dieléctrico es muy delgada.

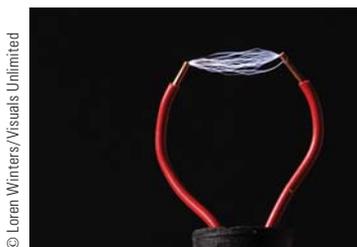


Figura 16.25 Rompimiento dieléctrico en aire. Las chispas se producen cuando un gran voltaje alterno se aplica a través de los alambres mediante una fuente de poder con bobina de inducción de alto voltaje.

Tabla 16.1 Constantes dieléctricas y rigideces dieléctricas de varios materiales a temperatura ambiente

Material	Constante dieléctrica κ	Rigidez dieléctrica (V/m)
Aire	1.000 59	3×10^6
Baquelita®	4.9	24×10^6
Cuarzo fundido	3.78	8×10^6
Neopreno	6.7	12×10^6
Nylon	3.4	14×10^6
Papel	3.7	16×10^6
Poliestireno	2.56	24×10^6
Vidrio Pyrex®	5.6	14×10^6
Aceite de silicona	2.5	15×10^6
Titanato de estroncio	233	8×10^6
Teflón®	2.1	60×10^6
Vacío	1.000 00	—
Agua	80	—

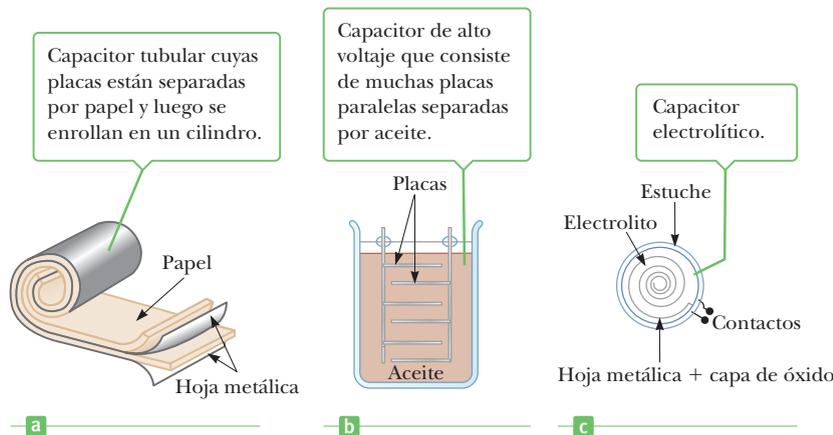


Figura 16.26 Tres diseños de capacitores comerciales.

La figura 16.27 muestra varios capacitores disponibles en el comercio. Los capacitores variables se usan en los radios para ajustar la frecuencia.

Cuando los capacitores electrolíticos se usan en circuitos, debe observarse la polaridad (los signos más y menos en el dispositivo). Si la polaridad del voltaje aplicado es opuesta a la pretendida, la capa de óxido se removerá y el capacitor conducirá en lugar de almacenar carga. Más aún, invertir la polaridad puede resultar en una corriente tan grande que el capacitor puede quemarse o producir vapor y explotar.



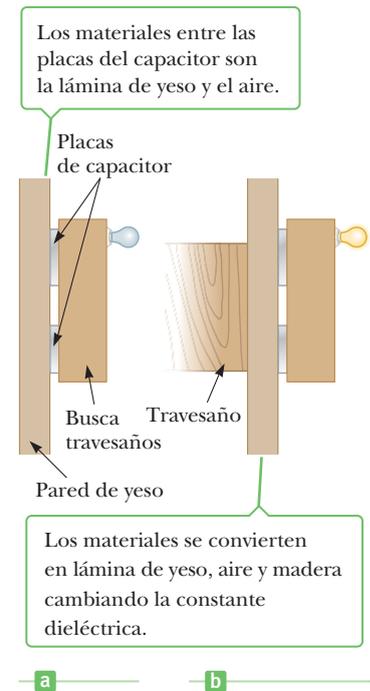
Figura 16.27 a) Una colección de capacitores utilizados en varias aplicaciones. b) Capacitor variable. Cuando un conjunto de placas metálicas gira de modo que se encuentra entre un conjunto fijo de placas, la capacitancia del dispositivo cambia.

■ FÍSICA APLICADA 16.2 Busca travesaños

Si alguna vez intentó colgar un cuadro en la pared con seguridad, sabe que puede ser difícil localizar un travesaño donde colocar su clavo o tornillo. Los principios discutidos en esta sección se pueden usar para detectar electrónicamente un travesaño. El elemento principal de un busca travesaños electrónico es un capacitor con sus placas ordenadas lado a lado en lugar de una frente a otra, como en la figura 16.28. ¿Cómo funciona este dispositivo?

EXPLICACIÓN Conforme el detector se mueve a lo largo de una pared, su capacitancia cambia cuando pasa a través de un travesaño porque cambia la constante dieléctrica del material “entre” las placas. El cambio en capacitancia se puede usar para hacer que una luz se encienda, lo que señala la presencia del travesaño. ■

Figura 16.28 (Física aplicada 16.2) Un busca travesaños produce un campo eléctrico que es afectado por la constante dieléctrica de los materiales colocados en este campo. Cuando el dispositivo se mueve por el travesaño, el cambio en la constante dieléctrica hace que se encienda una señal luminosa.



■ Examen rápido

16.10 Un capacitor de placas paralelas completamente cargado permanece conectado a una batería mientras un dieléctrico se desliza entre las placas. ¿Las siguientes cantidades aumentan, disminuyen o permanecen iguales? a) C b) Q c) E entre las placas d) ΔV e) la energía almacenada en el capacitor

■ EJEMPLO 16.11 Un capacitor lleno con papel

OBJETIVO Calcular las propiedades físicas fundamentales de un capacitor de placas paralelas con un dieléctrico.

PROBLEMA Un capacitor de placas paralelas tiene placas de 2.0 por 3.0 cm. Las placas están separadas por un papel de 1.0 mm de grosor. Determine **a)** la capacitancia de este dispositivo y **b)** la carga máxima que se puede colocar en el capacitor. **c)** Después de que el capacitor con carga completa se desconecta de la batería, el dieléctrico se remueve posteriormente. Encuentre el nuevo campo eléctrico a través del capacitor. ¿El capacitor se descarga?

ESTRATEGIA Para el inciso a), obtenga la constante dieléctrica para el papel a partir de la tabla 16.1 y sustituya, con las otras cantidades dadas, en la ecuación 16.19. Para el inciso b), observe que la tabla 16.1 también proporciona la rigidez dieléctrica del papel, que es el máximo campo eléctrico que se puede aplicar antes que ocurra rompimiento eléctrico. Use la ecuación 16.3, $\Delta V = Ed$, para obtener el voltaje máximo y sustituye en la ecuación básica de capacitancia. Para el inciso c), recuerde que desconectar la batería atrapa la carga adicional en las placas, que debe permanecer incluso después de remover el dieléctrico. Determine la densidad de carga sobre las placas y use la ley de Gauss para encontrar el nuevo campo eléctrico entre las placas.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia de este dispositivo.

Sustituya en la ecuación 16.19:

$$\begin{aligned}
 C &= \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \\
 &= 3.7 \left(8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right) \left(\frac{6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{1.0 \times 10^{-3} \text{ m}} \right) \\
 &= 2.0 \times 10^{-11} \text{ F}
 \end{aligned}$$

b) Encuentre la carga máxima que se puede colocar sobre el capacitor.

Calcule el máximo voltaje aplicado, con la rigidez dieléctrica del papel, $E_{\text{máx}}$:

Resuelva la ecuación básica de capacitancia para $Q_{\text{máx}}$ y sustituya $\Delta V_{\text{máx}}$ y C :

c) Suponga que el capacitor completamente cargado se desconecta de la batería y que el dieléctrico se remueve posteriormente. Encuentre el nuevo campo eléctrico entre las placas del capacitor. ¿El capacitor se descarga?

Calcule la densidad de carga sobre las placas:

Calcule el campo eléctrico de la densidad de carga:

Puesto que el campo eléctrico sin el dieléctrico supera el valor de la rigidez dieléctrica del aire, el capacitor se descarga a través de la brecha.

COMENTARIOS Los dieléctricos permiten que κ veces más carga se almacene en un capacitor para un voltaje dado. También permiten un aumento en el voltaje aplicado al aumentar el umbral de rompimiento eléctrico.

PREGUNTA 16.11 Posterior al inciso c), el capacitor se vuelve a conectar a la batería. ¿La carga sobre las placas es a) mayor que, b) menor que o c) igual que la que se encontró en el inciso b)?

EJERCICIO 16.11 Un capacitor de placas paralelas tiene área de $2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ y distancia entre placas de 2.00 mm. a) Encuentre la máxima carga que se puede colocar en el capacitor si hay aire entre las placas. b) Encuentre la máxima carga si el aire se sustituye con poliestireno.

RESPUESTAS a) $7 \times 10^{-8} \text{ C}$ b) $1.4 \times 10^{-6} \text{ C}$

$$\Delta V_{\text{máx}} = E_{\text{máx}}d = (16 \times 10^6 \text{ V/m})(1.0 \times 10^{-3} \text{ m}) = 1.6 \times 10^4 \text{ V}$$

$$Q_{\text{máx}} = C \Delta V_{\text{máx}} = (2.0 \times 10^{-11} \text{ F})(1.6 \times 10^4 \text{ V}) = 0.32 \mu\text{C}$$

$$\sigma = \frac{Q_{\text{máx}}}{A} = \frac{3.2 \times 10^{-7} \text{ C}}{6.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 5.3 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{5.3 \times 10^{-4} \text{ C/m}^2}{8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{m}^2 \cdot \text{N}} = 6.0 \times 10^7 \text{ N/C}$$

EJEMPLO 16.12 Capacitores con dos dieléctricos

OBJETIVO Derivar una expresión simbólica de un capacitor de placas paralelas con dos dieléctricos.

PROBLEMA Un capacitor de placas paralelas tiene dieléctricos con constantes κ_1 y κ_2 entre las dos placas, como se muestra en la figura 16.29. Cada dieléctrico llena exactamente la mitad del volumen entre las placas. Deducir expresiones para a) la diferencia de potencial entre las dos placas y b) la capacidad resultante del sistema.

ESTRATEGIA La magnitud de la diferencia de potencial entre las dos placas de un capacitor es igual a la del campo eléctrico multiplicado por la distancia entre las placas. El campo eléctrico en una región se reduce en un factor de $1/\kappa$ cuando un dieléctrico se introduce, por lo que $E = \sigma/\epsilon = \sigma/\kappa\epsilon_0$. Suma la diferencia de potencial a través de cada dieléctrico para encontrar la diferencia de potencial total de ΔV entre las placas. La diferencia de voltaje en cada dieléctrico está dada por $\Delta V = Ed$, donde E es el campo eléctrico y d el desplazamiento. Obtener la capacidad de la relación $C = Q/\Delta V$.

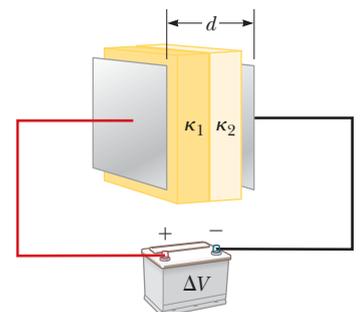


Figura 16.29 (Ejercicio 16.12)

SOLUCIÓN

a) Deduzca una ecuación para la diferencia de potencial entre las dos placas.

Escribir una ecuación general para la diferencia de potencial a través de ambos bloques:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = E_1d_1 + E_2d_2$$

(continúa)

Sustituya las ecuaciones para los campos eléctricos y los espesores de los dieléctricos, $d_1 = d_2 = d/2$:

$$\Delta V = \frac{\sigma}{\kappa_1 \epsilon_0} \frac{d}{2} + \frac{\sigma}{\kappa_2 \epsilon_0} \frac{d}{2} = \frac{\sigma d}{2\epsilon_0} \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)$$

b) Deduzca una ecuación para la capacitancia resultante del sistema.

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

Escriba la ecuación general de la capacitancia:

$$C = \frac{\sigma A}{\frac{\sigma d}{2\epsilon_0} \left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2} \right)} = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2}$$

Sustituya $Q = \sigma A$ y la ecuación para la diferencia de potencial del inciso a):

COMENTARIOS La respuesta es la misma que si hubiera habido dos capacitores en serie con los dieléctricos respectivos. Cuando un capacitor consta de dos dieléctricos como se muestra en la figura 16.30, sin embargo, es equivalente a dos capacitores diferentes en paralelo.

PREGUNTA 16.12 ¿Qué respuesta se obtiene cuando los dos dieléctricos se eliminan para que no haya vacío entre las placas?

EJERCICIO 16.12 Supongamos que un capacitor tiene dos dieléctricos dispuestos como se muestra en la figura 16.30, cada dieléctrico rellena exactamente la mitad del volumen entre las dos placas. Deduzca una ecuación para la capacitancia si cada dieléctrico llena exactamente la mitad del volumen entre las placas.

RESPUESTA $C = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d}$

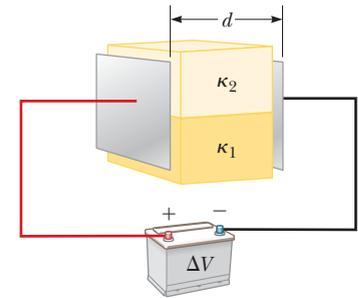


Figura 16.30 (Ejercicio 16.12)

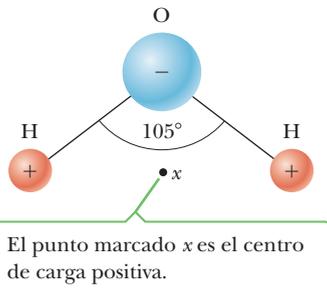


Figura 16.31 La molécula de agua, H_2O , tiene una polarización permanente que resulta de su geometría angular.

Descripción atómica de los dieléctricos

La explicación de por qué un dieléctrico aumenta la capacitancia de un capacitor se basa en una descripción atómica del material, que a su vez involucra una propiedad de algunas moléculas llamada **polarización**. Se dice que una molécula está polarizada cuando hay una separación entre las posiciones promedio de su carga negativa y su carga positiva. En algunas moléculas, como el agua, esta condición siempre está presente. Para ver por qué, considere la geometría de una molécula de agua (figura 16.31).

La molécula está ordenada de modo que el átomo negativo de oxígeno se dobla hacia los átomos de hidrógeno con carga positiva en un ángulo de 105° entre los dos enlaces. El centro de carga negativa está en el átomo de oxígeno y el centro de carga positiva se encuentra en un punto a la mitad de la línea que une los átomos de hidrógeno (punto x en el diagrama). Los materiales compuestos de moléculas que están permanentemente polarizados de esta forma tienen constantes dieléctricas grandes y, de hecho, la tabla 16.1 muestra que la constante dieléctrica del agua es grande ($\kappa = 80$) en comparación con otras sustancias comunes.

Una molécula simétrica (figura 16.32a) puede no tener polarización permanente, pero se le puede inducir una polarización mediante un campo eléctrico externo. Un campo dirigido hacia la izquierda, como en la figura 16.32b, haría que el centro de carga positiva se corra hacia la izquierda de su posición inicial y que el centro de carga negativa se corra hacia la derecha. Esta **polarización inducida** es el efecto que predomina en la mayoría de los materiales utilizados como dieléctricos en los capacitores.

Para entender por qué la polarización de un dieléctrico puede afectar la capacitancia, considere la losa de dieléctrico que se muestra en la figura 16.33. Antes de colocar la losa entre las placas del capacitor, las moléculas polares se orientan al azar (figura 16.33a). Las moléculas polares son dipolos y cada uno crea un campo eléctrico de dipolo, pero, debido a su orientación aleatoria, este campo promedia cero.

Después de insertar la losa de dieléctrico en el campo eléctrico \vec{E}_0 entre las placas (figura 16.33b), la placa positiva atrae los extremos negativos de los dipolos y la placa negativa atrae los extremos positivos de los dipolos. Estas fuerzas ejercen un torque sobre las moléculas

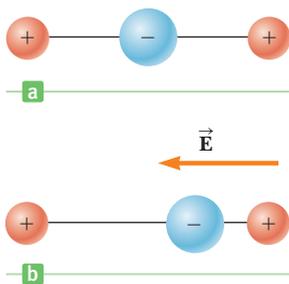


Figura 16.32 a) Una molécula simétrica no tiene polarización permanente. b) Un campo eléctrico externo induce una polarización en la molécula.

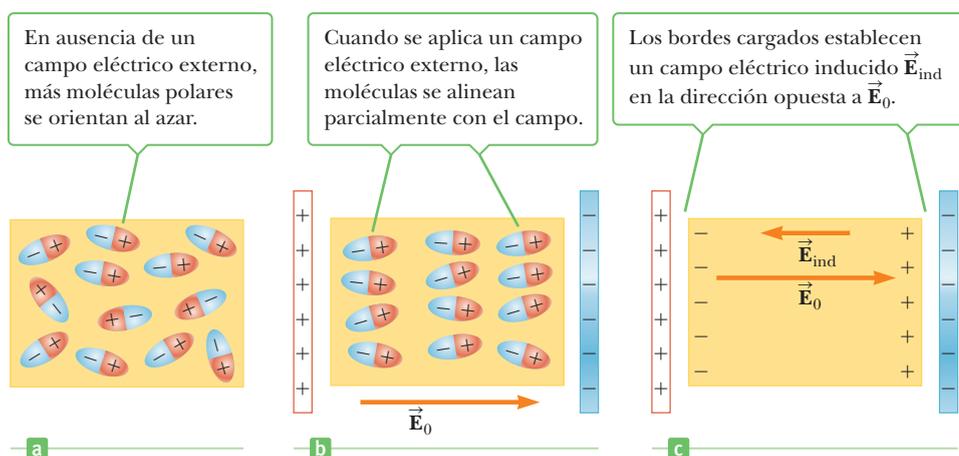


Figura 16.33 a) Moléculas polares se orientan al azar. b) Un campo eléctrico es aplicado al dieléctrico. c) Los bordes cargados del dieléctrico se pueden modelar como un par adicional de placas paralelas reduciendo el campo total entre las placas reales. El interior del dieléctrico permanece neutral.

que constituyen el dieléctrico, que los reorienta de modo que, en promedio, el polo negativo está más inclinado hacia la placa positiva y el polo positivo está más alineado hacia la placa negativa. Las cargas positiva y negativa en medio todavía se cancelan mutuamente, pero hay una acumulación neta de carga negativa en el dieléctrico junto a la placa positiva y una acumulación neta de carga positiva junto a la placa negativa. Esta configuración se puede modelar como un par adicional de placas cargadas, como en la figura 16.33c, lo que crea un campo eléctrico inducido \vec{E}_{ind} que parcialmente cancela el campo eléctrico original \vec{E}_0 . Si la batería no está conectada cuando se inserta el dieléctrico, la diferencia de potencial ΔV_0 a través de las placas se reduce a $\Delta V_0/\kappa$.

Sin embargo, si el capacitor todavía está conectado a la batería, los polos negativos jalan más electrones de la placa positiva, lo que la hace más positiva. Mientras tanto, los polos positivos atraen más electrones hacia la placa negativa. Esta situación continúa hasta que la diferencia de potencial a través de la batería llega a su magnitud original, igual a la ganancia de potencial a través de la batería. El efecto neto es un aumento en la cantidad de carga almacenada en el capacitor. Puesto que las placas pueden almacenar más carga para un voltaje dado, tenemos a partir de $C = Q/\Delta V$ que la capacitancia debe aumentar.

Examen rápido

16.11 Considere un capacitor de placas paralelas con un material dieléctrico entre las placas. Si la temperatura del dieléctrico aumenta, ¿la capacitancia a) disminuye, b) aumenta o c) permanece igual?

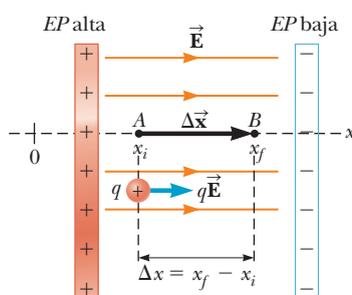
RESUMEN

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

El cambio en energía potencial eléctrico de un sistema que consiste de un objeto con carga q que se mueve a través de un desplazamiento Δx en un campo eléctrico constante \vec{E} está dado por

$$\Delta EP = W_{AB} = -qE_x \Delta x \quad [16.1]$$

Cuando una carga q se mueve en un campo eléctrico uniforme \vec{E} del punto A al punto B , el trabajo realizado en la carga por la fuerza del campo eléctrico es $qE_x \Delta x$.



donde E_x es el componente del campo eléctrico en la dirección x y $\Delta x = x_f - x_i$. La **diferencia en potencial eléctrico** entre dos puntos A y B es

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta EP}{q} \quad [16.2]$$

donde ΔEP es el *cambio* en energía potencial eléctrica conforme una carga q se mueve entre A y B . Las unidades de diferencia de potencial son joules por coulomb, o **volts**; $1 \text{ J/C} = 1 \text{ V}$.

La **diferencia de potencial eléctrico** entre dos puntos A y B en un campo eléctrico *uniforme* \vec{E} es

$$\Delta V = -E_x \Delta x \quad [16.3]$$

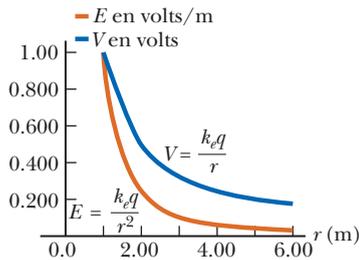
donde $\Delta x = x_f - x_i$ es el desplazamiento entre A y B y E_x es el componente x del campo eléctrico en dicha región.

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

El **potencial eléctrico** debido a una carga puntual q a una distancia r de la carga puntual es

$$V = k_e \frac{q}{r} \quad [16.4]$$

El campo eléctrico y potencial eléctrico contra la distancia de una carga puntual de 1.11×10^{-10} C. Tenga en cuenta que V es proporcional a $1/r$, mientras que E es proporcional a $1/r^2$.



La **energía potencial eléctrica** de un par de cargas puntuales separadas a una distancia r es

$$EP = k_e \frac{q_1 q_2}{r} \quad [16.5]$$

Estas ecuaciones se pueden usar en la solución de problemas de conservación de la energía y en el teorema trabajo-energía.

16.3 Potenciales y conductores cargados

16.4 Superficies equipotenciales

Todo punto sobre la superficie de un conductor cargado en equilibrio electrostático está al mismo potencial. Más aún, el potencial es constante en todas partes dentro del conductor y es igual al valor sobre la superficie.

El **electrón-volt** se define como la energía que un electrón (o protón) gana cuando se acelera a través de una diferencia de potencial de 1 V. La conversión entre electrón-volt y joules es

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot \text{V} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \quad [16.7]$$

Cualquier superficie sobre la cual el potencial es el mismo en cualquier punto se llama superficie equipotencial. El campo eléctrico siempre se orienta perpendicular a una superficie equipotencial.

16.6 Capacitancia

Un capacitor consiste de dos placas metálicas con cargas que son iguales en magnitud pero opuestas en signo. La capacitancia C de cualquier capacitor es la razón de la magnitud de la carga Q sobre cualquier placa a la magnitud de la diferencia de potencial ΔV entre ellas:

$$C \equiv \frac{Q}{\Delta V} \quad [16.8]$$

La capacitancia tiene unidades de coulombs por volt, o farads; $1 \text{ C/V} = 1 \text{ F}$.

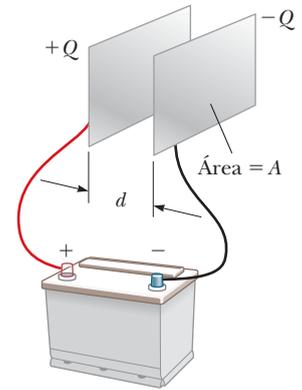
16.7 El capacitor de placas paralelas

La capacitancia de dos placas metálicas paralelas con área A separadas una distancia d es

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.9]$$

donde $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ es una constante llamada **permitividad del espacio libre**.

Un capacitor de placas paralelas se compone de dos placas paralelas, cada una de área A , separadas por una distancia d .



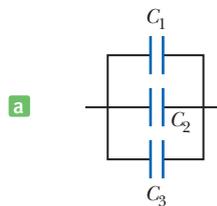
16.8 Combinaciones de capacitores

La **capacitancia equivalente de una combinación en paralelo** de capacitores es

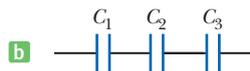
$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad [16.12]$$

Si dos o más capacitores se conectan en serie, la **capacitancia equivalente de la combinación en serie** es

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad [16.15]$$



$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3$$



$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Los capacitores a) en paralelo o b) en serie pueden escribirse como un solo capacitor equivalente.

Los problemas que involucran una combinación de capacitores se pueden resolver al aplicar las ecuaciones 16.12 y 16.15 repetidamente a un diagrama de circuito, lo que lo simplifica tanto como es posible. Este paso se sigue con la resolución hacia atrás al diagrama original y aplicar $C = Q/\Delta V$, ya que los capacitores en paralelo tienen la misma caída de voltaje y que los capacitores en serie tienen la misma carga.

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

Tres expresiones equivalentes para calcular la **energía almacenada** en un capacitor cargado son

$$\text{Energía almacenada} = \frac{1}{2} Q \Delta V = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad [16.17]$$

16.10 Capacitores con dieléctricos

Cuando un material no conductor, llamado **dieléctrico**, se coloca entre las placas de un capacitor, la capacitancia se multiplica por el factor κ , que se llama **constante dieléctrica**,

una propiedad del material dieléctrico. La capacitancia de un capacitor de placas paralelas lleno con un dieléctrico es

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad [16.19]$$

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un protón se libera en el origen en un campo eléctrico constante de 850 N/C, que actúa en la dirección x positiva. Encuentre el cambio en la energía potencial eléctrica asociado con el protón después de que viaja a $x = 2.5$ m. a) 3.4×10^{-16} J b) -3.4×10^{-16} J c) 2.5×10^{-16} J d) -2.5×10^{-16} J e) -1.6×10^{-19} J
- Un electrón en una máquina de rayos X se acelera a través de una diferencia de potencial de 1.00×10^4 V antes de golpear la pantalla. ¿Cuál es la energía cinética del electrón, en electrón-volts? a) 1.00×10^4 eV b) 1.6×10^{-15} eV c) 1.60×10^{-22} eV d) 6.25×10^{22} eV e) 1.6×10^{-19} eV
- El potencial eléctrico en $x = 3.0$ m es 120 V y el potencial eléctrico en $x = 5.0$ m es 190 V. ¿Cuál es el campo eléctrico en esta región, si supones que es constante? a) 140 N/C b) -140 N/C c) 35 N/C d) -35 N/C e) 75 N/C
- Un núcleo de helio (carga = $2e$, masa = 6.63×10^{-27} kg), que viaja con una rapidez de 6.20×10^5 m/s, entra a un campo eléctrico, que va del punto A, a un potencial de 1.50×10^3 V, al punto B, a 4.00×10^3 V. ¿Cuál es su rapidez en el punto B? a) 7.91×10^5 m/s b) 3.78×10^5 m/s c) 2.13×10^5 m/s d) 2.52×10^6 m/s e) 3.01×10^8 m/s
- Si tres capacitores distintos, inicialmente sin carga, se conectan en serie a través de una batería, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) La capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de las capacitancias individuales. b) El mayor voltaje aparece a través del capacitor con la capacitancia más baja. c) El mayor voltaje aparece a través del capacitor con la mayor capacitancia. d) El capacitor con la mayor capacitancia tiene la mayor carga. e) El capacitor con la menor capacitancia tiene la menor carga.
- Cuatro cargas puntuales se colocan en el borde de un círculo. La carga en cada una de las cuatro es $+5.0 \mu\text{C}$, $+1.5 \mu\text{C}$, $-1.0 \mu\text{C}$ y $-0.5 \mu\text{C}$. Si el potencial eléctrico en el centro del círculo debido a la carga sola de $+0.5 \mu\text{C}$ es 4.5×10^4 V, ¿cuál es el potencial eléctrico total en el centro debido a las cuatro cargas? a) 18.0×10^4 V b) 4.5×10^4 V c) 0 d) -4.5×10^4 V e) 9.0×10^4 V
- Un técnico en electrónica quiere construir un capacitor de placas paralelas con rutilo ($\kappa = 1.00 \times 10^2$) como el dieléctrico. Si el área transversal de las placas es 1.0 cm^2 , ¿cuál es la capacitancia si el grosor del rutilo es 1.0 mm? a) 88.5 pF b) 177.0 pF c) $8.85 \mu\text{F}$ d) $100.0 \mu\text{F}$ e) $354 \mu\text{F}$
- Un capacitor de placas paralelas se conecta a una batería. ¿Qué ocurre si la separación de placa se duplica mientras el capacitor permanece conectado a la batería? a) La energía almacenada permanece igual. b) La energía almacenada se duplica. c) La energía almacenada disminuye por un factor de 2. d) La energía almacenada disminuye por un factor de 4. e) La energía almacenada aumenta por un factor de 4.
- Un capacitor de placas paralelas, lleno con aire, porta una carga Q . La batería se desconecta y una losa de material, con constante dieléctrica $\kappa = 2$, se inserta entre las placas. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? a) El voltaje a través del capacitor disminuye por un factor de 2. b) El voltaje a través del capacitor se duplica. c) La carga sobre las placas se duplica. d) La carga sobre las placas disminuye por un factor de 2. e) El campo eléctrico se duplica.
- Después de que un capacitor de placas paralelas se carga mediante una batería, se desconecta de la batería y su separación de placas aumenta. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? a) La energía almacenada en el capacitor disminuye. b) La energía almacenada en el capacitor aumenta. c) El campo eléctrico entre las placas disminuye. d) La diferencia de potencial entre las placas disminuye. e) La carga sobre las placas disminuye.
- Una batería se une a varios capacitores diferentes conectados en paralelo. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es mayor que la capacitancia de cualquiera de los capacitores en el grupo. b) El capacitor con la mayor capacitancia porta la menor carga. c) La diferencia de potencial a través de cada capacitor es la misma y la capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de los capacitores en el grupo. d) El capacitor con la menor capacitancia porta la mayor carga. e) Las diferencias de potencial a través de los capacitores son iguales sólo si las capacitancias son iguales.
- Una batería se une a varios capacitores diferentes conectados en serie. ¿Cuál de los siguientes enunciados es

cierto? a) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es menor que la capacitancia de cualquiera de los capacitores individuales en el grupo. b) Todos los capacitores tienen la misma carga y la capacitancia equivalente es mayor que cualquiera de los capacitores individuales en el grupo. c) El capacitor con

la mayor capacitancia porta la mayor carga. d) La diferencia de potencial a través de cada capacitor debe ser la misma. e) La mayor diferencia de potencial aparece a través del capacitor que tiene la mayor capacitancia. f) La mayor diferencia de potencial aparece a través del capacitor con la capacitancia más baja.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. a) Describa el movimiento de un protón después de que se libera desde el reposo en un campo eléctrico uniforme. b) Describa los cambios (si hay alguno) en su energía cinética y la energía potencial eléctrica asociada con el protón.
2. Clasifique las energías potenciales de los cuatro sistemas de partículas mostrados en la figura PC16.2 de mayor a menor. Incluya igualdades si lo considera apropiado.

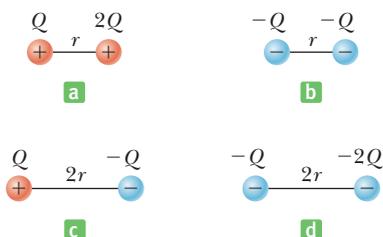


Figura PC16.2

3. Un capacitor de placas paralelas se carga mediante una batería y luego la batería se desconecta del capacitor. Puesto que las cargas sobre las placas del capacitor tienen signo opuesto, se atraen mutuamente. Por lo tanto, se requiere trabajo positivo para aumentar la separación de placas. Demuestre que el trabajo externo realizado cuando la separación de placas aumenta, conduce a un aumento en la energía almacenada en el capacitor.
4. Cuando partículas cargadas están separadas por una distancia infinita, la energía potencial eléctrica del par es cero. Cuando las partículas se aproximan, la energía potencial eléctrica de un par con el mismo signo es positiva, mientras que la energía potencial eléctrica de un par de signo contrario es negativa. Explique.
5. Suponga que está sentado dentro de un automóvil y que una línea eléctrica de 20 kV cae sobre el vehículo. ¿Debe permanecer en el auto o salir? El potencial de la línea eléctrica es 20 kV en comparación con el potencial del suelo.
6. ¿Por qué es importante evitar los bordes o puntos afilados en los conductores que se usan en el equipo de alto voltaje?
7. Explique por qué, bajo condiciones estáticas, todos los puntos en un conductor deben estar al mismo potencial eléctrico.

8. Si se le proporcionan a usted tres capacitores diferentes, C_1 , C_2 y C_3 , ¿cuántas combinaciones diferentes de capacitancia puede producir, si usa todos los capacitores en sus circuitos?
9. a) ¿Por qué es peligroso tocar las terminales de un capacitor de alto voltaje incluso después de que la fuente de voltaje que cargó la batería se desconecta del capacitor? b) ¿Qué se puede hacer para que el capacitor sea seguro de manipular después de remover la fuente de voltaje?
10. Las placas de un capacitor se conectan a una batería. ¿Qué ocurre con la carga sobre las placas si los alambres conectores se remueven de la batería? ¿Qué ocurre con la carga si los alambres se remueven de la batería y se conectan entre ellos?
11. Clasifique los potenciales eléctricos de los cuatro puntos mostrados en la figura PC16.11 de mayor a menor.

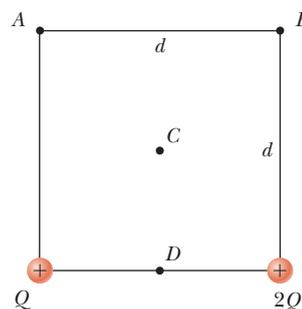


Figura PC16.11

12. Si se le pide diseñar un capacitor para el cual se requiera un tamaño pequeño y gran capacitancia, ¿qué factores serían importantes en su diseño?
13. ¿Siempre es posible reducir una combinación de capacitores a un capacitor equivalente con las reglas desarrolladas en este capítulo? Explique.
14. Explique por qué un dieléctrico aumenta el máximo voltaje operativo de un capacitor, aun cuando el tamaño físico del capacitor no cambia.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos; 2. denota problema intermedio,
- 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

16.1 Diferencia de potencial y potencial eléctrico

- 1. Un campo eléctrico uniforme, de 375 N/C de magnitud, que apunta en la dirección x positiva, actúa sobre un electrón, que inicialmente está en reposo. Después de que el electrón se mueve 3.20 cm, ¿cuál es a) el trabajo realizado por el campo sobre el electrón, b) el cambio en energía potencial asociado con el electrón y c) la velocidad del electrón?
- 2. Un protón es liberado del reposo en un campo eléctrico uniforme de magnitud 385 N/C. Encuentre a) la fuerza eléctrica del protón, b) la aceleración del protón, y c) la distancia que viaja en 2.00 μ s.
- 3. BIO Entre las superficies interior y exterior de una membrana celular existe una diferencia de potencial de 90 mV. La superficie interior es negativa en relación con la superficie exterior. ¿Cuánto trabajo se requiere para expulsar un ion sodio positivo (Na^+) del interior de la célula?
- 4. Una esfera metálica de radio de 5.00 cm está inicialmente descargada. ¿Cuántos electrones tendrían que ser colocados en la esfera de producir un campo eléctrico de magnitud 1.50×10^5 N para/C en un punto de 8.00 cm desde el centro de la esfera?
- 5. La diferencia de potencial entre las placas aceleradoras de un televisor es de aproximadamente 25 kV. Si la distancia entre las placas es 1.5 cm, encuentre la magnitud del campo eléctrico uniforme en la región entre las placas.
- 6. Una carga puntual $q = +40.0 \mu\text{C}$ se mueve de A a B separados por una distancia $d = 0.180$ m en presencia de un campo eléctrico externo \vec{E} de magnitud 275 N/C dirigido hacia la derecha como se muestra en la figura P16.6. Encuentre a) la fuerza eléctrica ejercida sobre la carga, b) el trabajo realizado por la fuerza eléctrica, c) el cambio en la energía potencial eléctrica de la carga y d) la diferencia de potencial entre A y B.

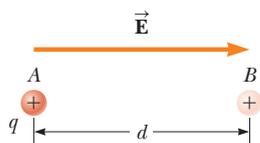


Figura PC16.6

- 7. M Placas paralelas con carga opuesta se separan 5.33 mm. Entre las placas existe una diferencia de potencial de 600 V. a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico entre las

placas? b) ¿Cuál es la magnitud de la fuerza sobre un electrón entre las placas? c) ¿Cuánto trabajo se debe realizar sobre un electrón para moverlo a la placa negativa, si inicialmente se ubica a 2.90 mm de la placa positiva?

- 8. C/C S a) Encuentre la diferencia de potencial ΔV_e que se requiere para detener a un electrón (llamado "potencial de frenado") que se mueve con una rapidez inicial de 2.85×10^7 m/s. b) Un protón que viaje a la misma rapidez requeriría una diferencia de potencial, ¿de mayor o menor magnitud? Explique. c) Encuentre una expresión simbólica para la razón del potencial de frenado del protón y el potencial de frenado del electrón, $\Delta V_p/\Delta V_e$. La respuesta debe estar en términos de la masa del protón m_p y la masa del electrón m_e .
- 9. C/C Un bloque de 74.0 g, que porta una carga $Q = 35.0 \mu\text{C}$, se conecta a un resorte para el cual $k = 78.0$ N/m. El bloque se encuentra sobre una superficie horizontal sin fricción y se sumerge en un campo eléctrico uniforme de magnitud $E = 4.86 \times 10^4$ N/C que se dirige como se muestra en la figura P16.9. Si el bloque se libera desde el reposo cuando el resorte no está estirado ($x = 0$), a) ¿a qué distancia máxima se mueve el bloque desde su posición inicial? b) Encuentre la posición de equilibrio posterior del bloque y la amplitud de su movimiento. c) Con la conservación de la energía, encuentre una relación simbólica que proporcione la diferencia de potencial entre su posición inicial y el punto de máxima extensión, en términos de la constante del resorte k , la amplitud A y la carga Q .

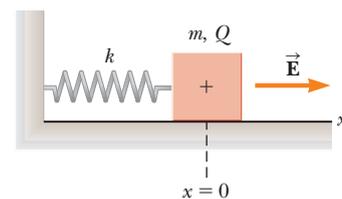


Figura PC16.9

- 10. En el planeta Tehar, la aceleración de caída libre es la misma que la de la Tierra, pero también hay un intenso campo eléctrico hacia abajo que es uniforme cerca de la superficie del planeta. Una bola de 2.00 kg, que tiene una carga de $5.00 \mu\text{C}$, se lanza hacia arriba con una rapidez de 20.1 m/s. La bola golpea el suelo después de un intervalo de 4.10 s. ¿Cuál es la diferencia de potencial entre el punto de partida y el punto superior de la trayectoria?

16.2 Potencial eléctrico y energía potencial debida a cargas puntuales

16.3 Potenciales y conductores cargados

16.4 Superficies equipotenciales

11. **CIC** Un electrón está en el origen. a) Calcule el potencial eléctrico V_A en el punto A , $x = 0.250$ cm. b) Calcule el potencial eléctrico V_B en el punto B , $x = 0.750$ cm. ¿Cuál es la diferencia de potencial $V_B - V_A$? c) ¿Una partícula con carga negativa colocada en el punto A necesariamente pasaría por esta misma diferencia de potencial al llegar al punto B ? Explique.

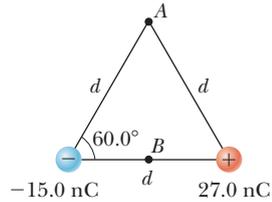


Figura P16.12

12. Las dos cargas en la figura P16.12 están separadas por $d = 2.00$ cm. Encuentre el potencial eléctrico en a) el punto A y b) el punto B , que está a medio camino entre las cargas.

13. a) Encuentre el potencial eléctrico, considerado cero en el infinito, en la esquina superior derecha (la esquina sin carga) del rectángulo de la figura P16.13. b) Repita si la carga de $2.00 \mu\text{C}$ se sustituye con una carga de $-2.00 \mu\text{C}$.

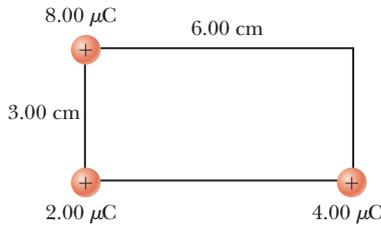


Figura P16.13 Problemas 13 y 14.

14. Tres cargas se colocan en las esquinas de un rectángulo, como en la figura P16.13. ¿Cuánta energía se gastaría para mover la carga de $8.00 \mu\text{C}$ al infinito?
15. **M CIC** Dos cargas puntuales, $Q_1 = +5.00$ nC y $Q_2 = -3.00$ nC, están separadas 35.0 cm. a) ¿Cuál es el potencial eléctrico en un punto a medio camino entre las cargas? b) ¿Cuál es la energía potencial del par de cargas? ¿Cuál es el significado del signo algebraico de su respuesta?

16. **CIC S** Tres cargas puntuales idénticas cada una de carga q se encuentran en los vértices de un triángulo equilátero como en la figura P16.16. La distancia desde el centro del triángulo a cada vértice es a . (a) Demostrar que el campo eléctrico en el centro del triángulo es igual a cero. b) Encontrar una expresión simbólica para el potencial eléctrico en el centro del triángulo. c) Dar una explicación física del hecho de que el potencial eléctrico no es cero, sin embargo, el campo eléctrico es cero en el centro.

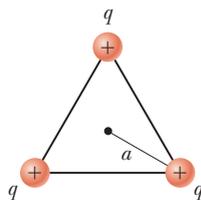


Figura P16.16

17. Las tres cargas de la figura P16.17 están en los vértices de un triángulo isósceles. Sea $q = 7.00$ nC y calcule el potencial eléctrico en el punto medio de la base.

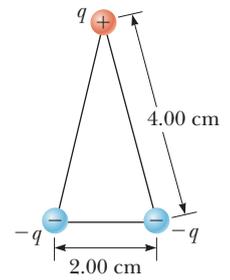


Figura P16.17

18. **S** Una carga puntual positiva $q = +2.50$ nC se encuentra a $x = 1.20$ m y una carga negativa de $-2q = -5.00$ nC se encuentra en el origen como en la figura P16.18. a) Dibuje el potencial eléctrico en función de x para los puntos a lo largo del eje x en el rango de $-1.50 \text{ m} < x < 1.50$ m. b) Encontrar una expresión simbólica para el potencial en el eje x en un punto arbitrario P entre las dos cargas. c) Hallar el potencial eléctrico en $x = 0.600$ m d) Encuentre el punto a lo largo del eje x entre las dos cargas en donde el potencial eléctrico es cero.

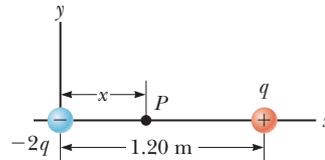


Figura P16.18

19. **PG** Un protón se ubica en el origen, y un segundo protón se ubica sobre el eje x en $x = 6.00$ fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15}$ m). a) Calcule la energía potencial eléctrica asociada con esta configuración. b) Una partícula alfa (carga $= 2e$, masa $= 6.64 \times 10^{-27}$ kg) se coloca ahora en $(x, y) = (3.00, 3.00)$ fm. Calcule la energía potencial eléctrica asociada con esta configuración. c) A partir del sistema de tres partículas, encuentre el cambio en energía potencial eléctrica si la partícula alfa puede escapar al infinito mientras que los dos protones permanecen fijos en su lugar. (Durante todo el proceso, ignore cualquier efecto de radiación.) d) Use la conservación de la energía para calcular la rapidez de la partícula alfa en el infinito. e) Si los dos protones se liberan desde el reposo y la partícula alfa permanece fija, calcule la rapidez de los protones en el infinito.

20. **CIC** Un protón y una partícula alfa (carga $= 2e$, masa $= 6.64 \times 10^{-27}$ kg) inicialmente están en reposo, separados por 4.00×10^{-15} m. a) Si ambos se liberan simultáneamente, explique por qué no puede encontrar sus velocidades en el infinito sólo con la conservación de la energía. b) ¿Qué otra ley de conservación de puede aplicar en este caso? c) Encuentre las rapidez del protón y la partícula alfa, respectivamente, en el infinito.

21. Una esfera pequeña de masa $8.00 \mu\text{g}$ y una carga de -2.80 nC está inicialmente a una distancia de $1.60 \mu\text{m}$ desde una carga fija de $+8.50$ nC. Si la esfera de $8.00 \mu\text{g}$ es liberada desde el reposo, determine a) su energía cinética cuando se encuentra a $0.500 \mu\text{m}$ de la carga fija y b) su rapidez cuando está a $0.500 \mu\text{m}$ de la carga fija.

22. La esfera metálica de un pequeño generador Van de Graaff que se ilustra en la figura 15.23 tiene un radio de 18 cm. Cuando el campo eléctrico en la superficie de la esfera llega a $3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$, el aire se degrada y el generador se descarga. ¿Cuál es el potencial máximo que la esfera puede tener antes de que se produzca la descomposición?
23. En el famoso experimento de dispersión de Rutherford, que condujo al modelo planetario del átomo, se dispararon partículas alfa (con cargas de $+2e$ y masas de $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) hacia un núcleo de oro con carga $+79e$. Una partícula alfa, inicialmente muy lejos del núcleo de oro, se disparó a $2.00 \times 10^7 \text{ m/s}$ directamente hacia el núcleo, como en la figura P16.23. ¿Cuánto se acerca la partícula alfa al núcleo de oro antes de dar la vuelta? Suponga que el núcleo de oro permanece estacionario.

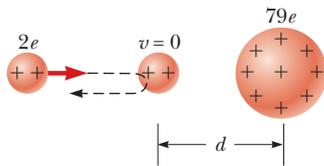


Figura P16.23

24. **S** Cuatro cargas puntuales, cada una con carga Q , se ubican en las esquinas de un cuadrado que tiene lados de longitud a . Encuentre expresiones simbólicas para a) el potencial eléctrico total en el centro del cuadrado debido a las cuatro cargas y b) el trabajo requerido para llevar una quinta carga q del infinito al centro del cuadrado.

16.6 Capacitancia

16.7 El capacitor de placas paralelas

25. Considere la Tierra y una capa de nubes 800 m arriba del planeta como las placas de un capacitor de placas paralelas. a) Si la capa de nubes tiene una área de $1.0 \text{ km}^2 = 1.0 \times 10^6 \text{ m}^2$, ¿cuál es la capacitancia? b) Si la intensidad de un campo eléctrico mayor que $3.0 \times 10^6 \text{ N/C}$ hace que el aire se “rompa” y conduzca carga (un relámpago), ¿cuál es la carga máxima que puede tener la nube?
26. a) Cuando una batería de 9.00 V se conecta a las placas de un capacitor, almacena una carga de $27.0 \mu\text{C}$. ¿Cuál es el valor de la capacitancia? b) Si el mismo capacitor se conecta a una batería de 12.0 V, ¿qué carga se almacena?
27. Un capacitor de placas paralelas lleno con aire tiene placas de 2.30 cm^2 de área, separadas por 1.50 mm. El capacitor se conecta a una batería de 12.0 V. a) Determine el valor de su capacitancia. b) ¿Cuál es la carga sobre el capacitor? c) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico uniforme entre las placas?
28. Dos conductores con cargas netas de $+10.0 \mu\text{C}$ y $-10.0 \mu\text{C}$ tienen un diferencia de potencial de 10.0 V entre ellos. a) Determinar la capacitancia del sistema. b) ¿Cuál es la diferencia de potencial entre los dos conductores

si los cargas en cada uno se aumentó a $+100 \mu\text{C}$ y $-100 \mu\text{C}$?

29. **M** Un capacitor lleno con aire consiste de dos placas paralelas, cada una con área de 7.60 cm^2 y separadas una distancia de 1.80 mm. Si a estas placas se aplica una diferencia de potencial de 20.0 V, calcule a) el campo eléctrico entre las placas, b) la capacitancia y c) la carga sobre cada placa.
30. Un chip de memoria de computadora de 1 megabit contiene muchos capacitores de $60.0 \times 10^{-15} \text{ F}$. Cada capacitor tiene $21.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ de área de placa. Determine la separación de placas de tal capacitor. (Suponga una configuración de placas paralelas.) El diámetro de un átomo está en el orden de $10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA}$. Expresar la separación de placa en ångstroms.
31. **C/C** Un capacitor de placas paralelas, con área 0.200 m^2 y separación de placas de 3.0 mm, se conecta a una batería de 6.00 V. a) ¿Cuál es la capacitancia? b) ¿Cuánta carga se almacena en las placas? c) ¿Cuál es el campo eléctrico entre las placas? d) Encuentre la magnitud de la densidad de carga sobre cada placa. e) Sin desconectar la batería, las placas se separan más. Cualitativamente, ¿qué ocurre con cada una de las respuestas previas?
32. Un pequeño objeto con una masa de $350 \mu\text{g}$ porta una carga de 30.0 nC y está suspendido mediante un hilo entre las placas verticales de un capacitor de placas paralelas. Las placas están separadas 4.00 cm. Si el hilo forma un ángulo de 15.0° con la vertical, ¿cuál es la diferencia de potencial entre las placas?

16.8 Combinaciones de capacitores

33. Dado un capacitor de $2.50 \mu\text{F}$, un capacitor de $6.25 \mu\text{F}$ y una batería de 6.00 V, encuentre la carga sobre cada capacitor si los conecta a) en serie a través de la batería y b) en paralelo a través de la batería.
34. Dos capacitores, $C_1 = 5.00 \mu\text{F}$ y $C_2 = 12.0 \mu\text{F}$, se conectan en paralelo y la combinación resultante se conecta a una batería de 9.00 V. Encuentre a) la capacitancia equivalente de la combinación, b) la diferencia de potencial en cada capacitor y c) la carga almacenada en cada capacitor.
35. Encuentre a) la capacitancia equivalente de los capacitores en la figura P16.35, b) la carga sobre cada capacitor y c) la diferencia de potencial a través de cada capacitor.

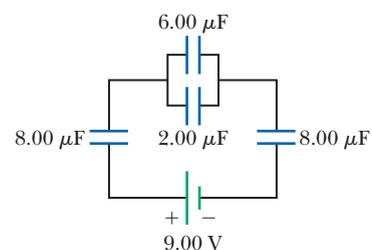


Figura P16.35

36. Dos capacitores dan una capacitancia equivalente de 9.00 pF cuando se conectan en paralelo y una capacitancia equivalente de 2.00 pF cuando se conectan en serie. ¿Cuál es la capacitancia de cada capacitor?
37. Para el sistema de capacitores que se muestra en la figura P16.37, encuentre a) la capacitancia equivalente del sistema, b) la carga sobre cada capacitor y c) la diferencia de potencial a través de cada capacitor.

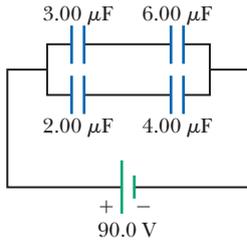


Figura P16.37 Problemas 37 y 56.

38. **PG** Considere la combinación de capacitores en la figura P16.38. a) Encuentre la capacitancia única equivalente de los dos capacitores en serie y vuelva a dibujar el diagrama (llamado diagrama 1) con esta capacitancia equivalente. b) En el diagrama 1, encuentre la capacitancia equivalente de los tres capacitores en paralelo y vuelva a dibujar el diagrama como una sola batería y un solo capacitor en una malla. c) Calcule la carga sobre el capacitor equivalente solo. d) Regrese al diagrama 1, calcule la carga sobre cada capacitor individual. ¿La suma concuerda con el valor que encontró en el inciso c)? e) ¿Cuál es la carga sobre el capacitor de 24.0 μF y sobre el capacitor de 8.00 μF ? f) Calcule la caída de voltaje a través del capacitor de 24.0 μF y g) el capacitor de 8.00 μF .

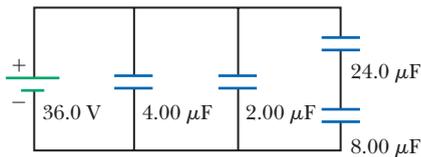


Figura P16.38

39. Encuentre la carga sobre cada uno de los capacitores de la figura P16.39

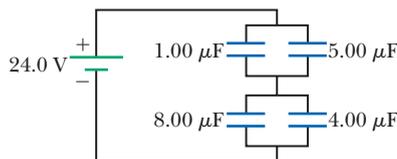


Figura P16.39

40. **CIC S** Tres capacitores están conectados a una batería como se muestra en la figura P16.40. Sus capacitancias son $C_1 = 3C$, $C_2 = C$ y $C_3 = 5C$.

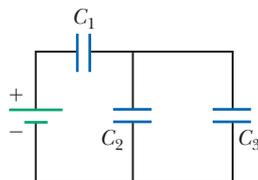


Figura P16.40

- a) ¿Cuál es la capacitancia equivalente de este conjunto de capacitores? b) Establezca la clasificación de los capacitores de acuerdo con la carga que almacenan de mayor a menor. c) Ordene los capacitores de acuerdo con las diferencias de potencial a través de ellos de mayor a menor. d) Suponga que C_3 es mayor. Explique lo que sucede con la carga almacenada en cada capacitor.

41. Un capacitor de 25.0 μF y un capacitor de 40.0 μF se cargan al conectarse a través de baterías separadas de 50.0 V . a) Determine la carga resultante sobre cada capacitor. b) Luego los capacitores se desconectan de sus baterías y se conectan uno con otro, con cada placa negativa conectada a la placa positiva del otro. ¿Cuál es la carga final de cada capacitor y cuál es la diferencia de potencial final a través del capacitor de 40.0 μF ?

42. a) Encuentre la capacitancia equivalente entre los puntos a y b para el grupo de capacitores conectados como se muestra en la figura P16.42, si $C_1 = 5.00 \text{ μF}$, $C_2 = 10.00 \text{ μF}$ y $C_3 = 2.00 \text{ μF}$. b) Si el potencial entre los puntos a y b es 60.0 V , ¿qué carga se almacena en C_3 ?

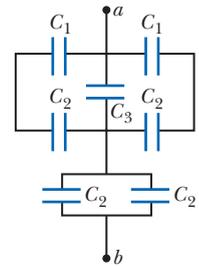


Figura P16.42

43. Un capacitor de 1.00 μF se carga al conectarse a través de una batería de 10.0 V . Luego se desconecta de la batería y se conecta a través de un capacitor sin carga de 2.00 μF . Determine la carga resultante sobre cada capacitor.

44. **M** Cuatro capacitores se conectan como se muestra en la figura P16.44. a) Determine la capacitancia equivalente entre los puntos a y b . b) Calcule la carga de cada capacitor, teniendo $\Delta V_{ab} = 15.0 \text{ V}$.

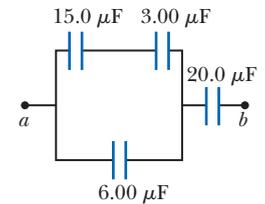


Figura P16.44

16.9 Energía almacenada en un capacitor cargado

45. Una batería de 12.0 V se conecta a un capacitor de 4.50 μF . ¿Cuánta energía se almacena en el capacitor?
46. **CIC** Dos capacitores, $C_1 = 18.0 \text{ μF}$ y $C_2 = 36.0 \text{ μF}$, se conectan en serie, y una batería de 12.0 V se conecta a través de ellos. a) Encuentre la capacitancia equivalente y la energía contenida en este capacitor equivalente. b) Encuentre la energía almacenada en cada capacitor individual. Demuestre que la suma de estas dos energías es la misma que la energía que se encontró en el inciso a). ¿Esta igualdad siempre será cierta, o depende del número de capacitores y sus capacitancias? c) Si los mismos capacitores se conectaran en paralelo, ¿qué diferencia de potencial se requeriría a través de ellos de modo que la combinación almacene la misma energía que en el inciso a)? ¿Cuál capacitor almacena más energía en esta situación, C_1 o C_2 ?

47. Un capacitor de placas paralelas tiene capacitancia de $3.00 \mu\text{F}$. a) ¿Cuánta energía se almacena en el capacitor si se conecta a una batería de 6.00 V ? b) Si la batería se desconecta y la distancia entre las placas cargadas se duplica, ¿cuál es la energía almacenada? c) Posteriormente la batería se vuelve a unir al capacitor, pero la separación de placas permanece como en la parte b). ¿Cuánta energía se almacena? (Responda cada inciso en microjoules.)
48. Cierta nube de tormenta tiene una diferencia de potencial de $1.00 \times 10^8 \text{ V}$ en relación con un árbol. Si, durante una tormenta eléctrica, 50.0 C de carga se transfieren a través de esta diferencia de potencial y el árbol absorbe 1.00% de la energía, ¿cuánta agua (savia en el árbol), inicialmente a 30.0°C , puede hervir? El agua tiene un calor específico de $4186 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, un punto de ebullición de 100°C y un calor de vaporización de $2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}$.

16.10 Capacitores con dieléctricos

49. **CIC** El voltaje a través de un capacitor de placas paralelas lleno con aire se mide en 85.0 V . Cuando se inserta un dieléctrico y llena por completo el espacio entre las placas, como en la figura 16.49, el voltaje cae a 25.0 V . a) ¿Cuál es la constante dieléctrica del material insertado? ¿Puede usted identificar el dieléctrico? b) Si el dieléctrico no llena por completo el espacio entre las placas, ¿qué podría concluir acerca del voltaje a través de las placas?

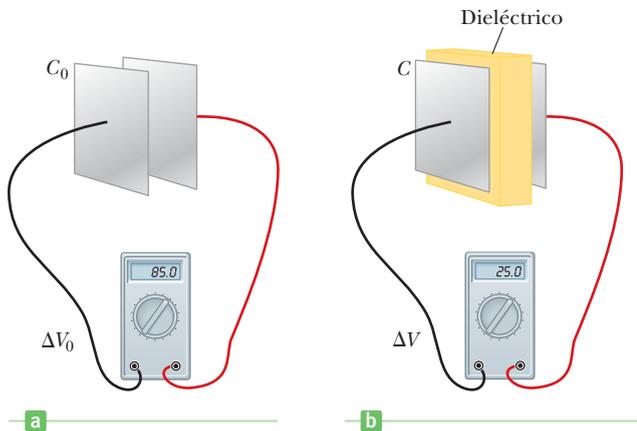


Figura P16.49

50. a) ¿Cuánta carga puede ser colocada en un capacitor con aire entre las placas antes de que se rompa si el área de cada placa es de 5.00 cm^2 ? b) Determinar la carga máxima en caso de utilizar poliestireno entre las placas en lugar de aire. Suponga que la rigidez dieléctrica del aire es $3.00 \times 10^6 \text{ V/m}$, y que la del poliestireno es $24.0 \times 10^6 \text{ V/m}$.

51. Determine a) la capacitancia y b) el máximo voltaje que se puede aplicar a un capacitor de placas paralelas lleno con teflón, que tiene una área de placa de 175 cm^2 y un grosor de aislante de 0.0400 mm .
52. Considere un de placas planas paralelas que está hecho de dos tiras de hoja de aluminio separadas por una tira de papel recubierto con parafina. Cada tira de hoja y papel mide 7.00 cm de ancho. La hoja mide 0.00400 mm de grosor, y el papel mide 0.0250 mm de grueso y tiene una constante dieléctrica de 3.70 . ¿Qué longitud deben tener las tiras si se desea una capacitancia de $9.50 \times 10^{-8} \text{ F}$? (Si después de que se forma este capacitor se agrega una segunda tira de papel debajo de la capa hoja-papel-hoja y el ensamble resultante se enrolla en una forma cilíndrica, similar a la que se muestra en la figura 16.26, la capacitancia puede ser duplicada, debido a que ambas superficies de cada tira de hoja pueden almacenar carga. Sin la segunda tira de papel, sin embargo, el enrollar las capas resultaría en un corto circuito.)

53. **BIO** Un modelo de un eritrocito representa a la célula como un capacitor esférico, una esfera líquida con carga positiva y área superficial A , separada del fluido circundante con carga negativa mediante una membrana de grosor t . Pequeños electrodos introducidos en el interior de la célula muestran una diferencia de potencial de 100 mV a través de la membrana. El grosor de la membrana se estima en 100 nm y tiene una constante dieléctrica de 5.00 . a) Si un eritrocito promedio tiene una masa de $1.00 \times 10^{-12} \text{ kg}$, estime el volumen de la célula y en consecuencia encuentre su área superficial. La densidad de la sangre es 1100 kg/m^3 . b) Estime la capacitancia de la célula al suponer que las superficies de la membrana actúan como placas paralelas. c) Calcule la carga sobre la superficie de la membrana. ¿Cuántas cargas electrónicas representa la carga superficial?

Problemas adicionales

54. Cuando una diferencia de potencial de 150 V se aplica a las placas llenas de aire de un capacitor de placas paralelas, las placas tienen una densidad superficial de carga de $3.00 \times 10^{-10} \text{ C/cm}^2$. ¿Cuál es la distancia entre las placas?
55. **S** Tres capacitores de placas paralelas se construyen, cada uno con la misma área de placa A y con C_1 con espaciamiento de placa d_1 , C_2 con espaciamiento de placa d_2 y C_3 con espaciamiento de placa d_3 . Demuestre que la capacitancia total C de los tres capacitores conectados en serie es la misma que un capacitor con área de placa A y espaciamiento de placa $d = d_1 + d_2 + d_3$.
56. **CIC** Para el sistema de cuatro capacitores que se muestra en la figura P16.37, encuentre a) la energía total almacenada en el sistema y b) la energía almacenada por cada capacitor. c) Compare la suma de las respuestas en el inciso b) con su resultado para el inciso a) y explique sus observaciones.
57. **S** Un capacitor de placas paralelas, con una separación de placa d , tiene una capacitancia C_0 en ausencia de die-

léctrico. Una losa de material dieléctrico, con constante dieléctrica κ y grosor $d/3$, se inserta entre las placas, como en la figura P16.57a. Demuestre que la capacitancia de esta capacitor parcialmente lleno está dada por

$$C = \left(\frac{3\kappa}{2\kappa + 1} \right) C_0$$

Sugerencia: Trate el sistema como dos capacitores conectados en serie, como en la figura 16.57b, uno con dieléctrico y otro vacío.

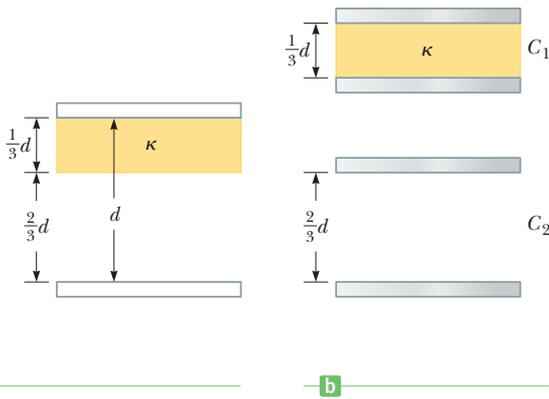


Figura P16.57

58. **S** Dos capacitores dan una capacitancia equivalente de C_p cuando se conectan en paralelo y una capacitancia equivalente de C_s cuando se conectan en serie. ¿Cuál es la capacitancia de cada capacitor?
59. **M** Un capacitor de placas paralelas se construye con un material dieléctrico cuya constante dieléctrica es 3.00 y cuya rigidez dieléctrica es 2.00×10^8 V/m. La capacidad deseada es $0.250 \mu\text{F}$, y el capacitor debe soportar una diferencia de potencial máxima de 4.00 kV. Encuentre el área mínima de las placas del capacitor.

60. Dos cargas, de $1.0 \mu\text{C}$ y $-2.0 \mu\text{C}$, están separadas 0.50 m en dos vértices de un triángulo equilátero, como en la figura P16.60. a) ¿Cuál es el potencial eléctrico debido a la carga de $1.0 \mu\text{C}$ en el tercer vértice, punto P? b) ¿Cuál es el potencial eléctrico debido a la carga de $-2.0 \mu\text{C}$ en P? c) Encuentre el potencial eléctrico total en P. d) ¿Cuál es el trabajo requerido para mover una carga de $3.0 \mu\text{C}$ del infinito a P?

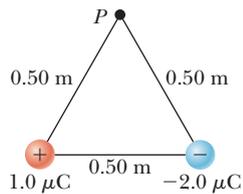


Figura P16.60

61. Encuentre la capacitancia equivalente del grupo de capacitores que se muestra en la figura P16.61.

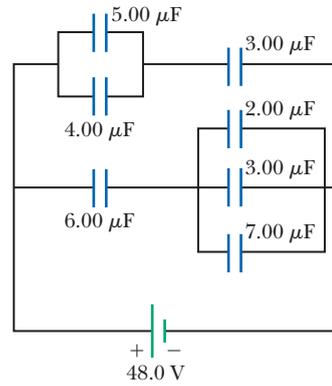


Figura P16.61

62. Un capacitor esférico consiste de un cascarón esférico conductor, de radio b y carga $-Q$ concéntrico con una esfera conductora más pequeña, con radio a y carga Q . a) Encuentre la capacitancia de este dispositivo. b) Demuestre que, conforme el radio b de la esfera exterior tiende a infinito, la capacitancia tiende al valor $a/k_e = 4\pi\epsilon_0 a$.
63. **BIO** La causa inmediata de muchas muertes es la fibrilación ventricular, un temblor descoordinado del corazón, en oposición a un latir adecuado. Un choque eléctrico en el pecho puede causar parálisis momentánea del músculo cardíaco, después del cual el corazón en ocasiones comenzará a latir nuevamente de manera organizada. Un *desfibrilador* es un dispositivo que aplica un fuerte choque eléctrico al pecho durante un tiempo de algunos milisegundos. El dispositivo contiene un capacitor de pocos microfarads, que se carga a muchos miles de volts. Electrodo llamado paletas, de aproximadamente 8 cm de ancho y recubiertos con pasta conductora, se mantienen contra el pecho a ambos lados del corazón. Sus manijas se aíslan para evitar lesiones al operador, que grita “¡Fuera!” y presiona un botón en una paleta para descargar el capacitor a través del pecho del paciente. Suponga que se entregará una energía de $300 \text{ W} \cdot \text{s}$ desde un capacitor de $30.0 \mu\text{F}$. ¿A qué diferencia de potencial se debe cargar?
64. Cuando cierto capacitor de placas paralelas lleno con aire se conecta a través de una batería, adquiere una carga de $150 \mu\text{C}$ en cada placa. Mientras se mantiene la conexión con la batería, se inserta una losa de dieléctrico y llena la región entre las placas. Esto resulta en la acumulación de una carga adicional de $200 \mu\text{C}$ sobre cada placa. ¿Cuál es la constante dieléctrica de la losa?
65. Los capacitores $C_1 = 6.0 \mu\text{F}$ y $C_2 = 2.0 \mu\text{F}$ se cargan como una combinación en paralelo a través de una batería de 250 V. Los capacitores se desconectan de la batería y uno de otro. Luego se conectan placa positiva con placa negativa, y placa negativa con placa positiva. Calcule la carga resultante sobre cada capacitor.

66. **S** Dos cargas positivas cada una de carga q se fijan en el eje y , una en $y = d$ y la otra en $y = -d$ como en la figura P16.66. Una tercera carga positiva $2q$ se encuentra en el eje x en $x = 2d$ que se libera desde el reposo. Encuentre expresiones simbólicas para a) el potencial eléctrico total debido a las dos primeras cargas en la posición de la carga $2q$, b)

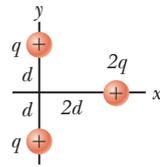


Figura P16.66

la energía potencial eléctrica de la carga $2q$, c) la energía cinética de la carga $2q$ después de que se haya trasladado infinitamente lejos de las otras cargas y d) la velocidad de la carga $2q$ después de que se ha movido infinitamente lejos de las otras cargas, si su masa es m .

67. La esfera metálica A, de 12.0 cm de radio, porta una carga de $6.00 \mu\text{C}$, y la esfera metálica B, de 18.0 cm de radio, porta una carga de $-4.00 \mu\text{C}$. Si las dos esferas se unen mediante un hilo conductor muy largo, ¿cuál es la distribución de carga final sobre las dos esferas?

68. Un electrón se dispara con una rapidez $v_0 = 5.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ y a un ángulo $\theta_0 = -45^\circ$ entre dos placas paralelas conductoras que están separadas $D = 2.0 \text{ mm}$, como en la figura P16.68. Si la diferencia de voltaje entre las placas es $\Delta V = 100 \text{ V}$, determine a) cuán cerca, d , estará el electrón de la placa superior y b) dónde golpeará el electrón la placa superior.

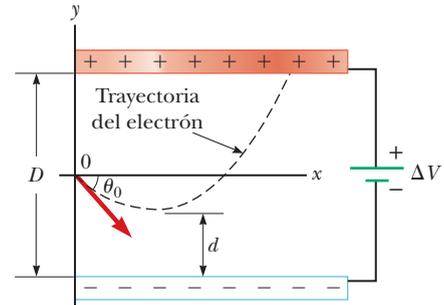
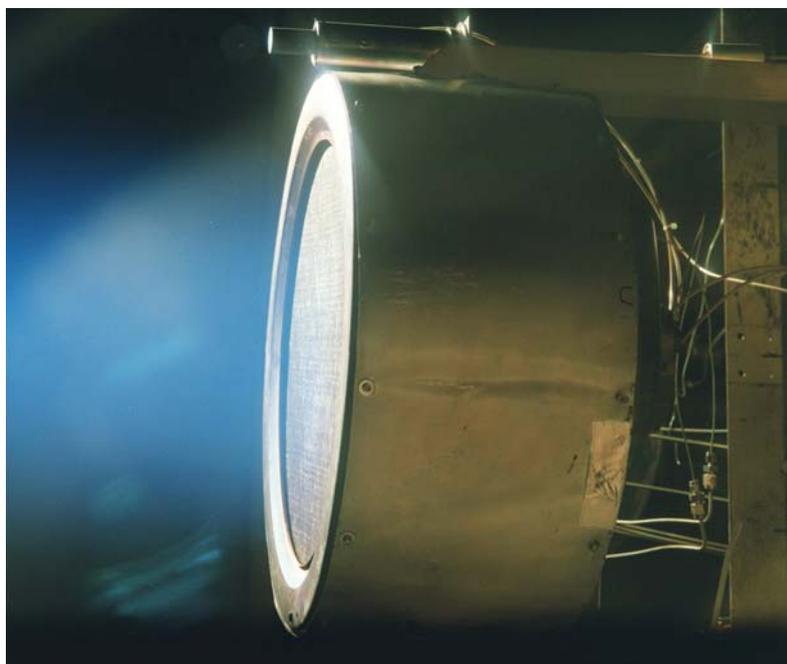


Figura P16.68

La luz azul proviene de la carga positiva de los átomos de xenón que son electrostáticamente acelerados y luego expulsados de un prototipo de un motor de iones. La corriente de iones produce 90 milinewtons de empuje de forma continua durante meses a la vez. Los electrones deben ser alimentados de nuevo en el tubo de escape para prevenir la acumulación de carga negativa. Estos motores son muy eficientes y adecuados para extender las misiones al espacio profundo.

Cortesía de la NASA Jet Propulsion Laboratory/PIA04238



17

Corriente y resistencia

- 17.1 Corriente eléctrica
- 17.2 Visión microscópica: corriente y rapidez de deriva
- 17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos
- 17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm
- 17.5 Variación de la resistencia con la temperatura
- 17.6 Energía eléctrica y potencia
- 17.7 Superconductores
- 17.8 Actividad eléctrica en el corazón

Muchas aplicaciones y dispositivos prácticos están basados en los principios de la electricidad estática, pero la electricidad estuvo destinada a convertirse en una parte inseparable de la vida cuando los científicos aprendieron cómo producir un flujo continuo de carga durante periodos de tiempo relativamente largos, mediante baterías. La batería o celda voltaica la inventó en 1800 el físico italiano Alessandro Volta. Las baterías proporcionan un flujo continuo de carga a bajo potencial, en contraste con los anteriores dispositivos electrostáticos que producían un pequeño flujo de carga a alto potencial durante breves periodos. Esta fuente estable de corriente eléctrica permitió a los científicos realizar experimentos para aprender cómo controlar el flujo de cargas eléctricas en los circuitos. En la actualidad, las corrientes eléctricas impulsan luces, radios, televisores, acondicionadores de aire, computadoras y refrigeradores. Encienden la gasolina en los motores de los automóviles, viajan a través de componentes miniatura que constituyen los chips de las microcomputadoras y proporcionan la potencia para otras incontables tareas invaluable.

En este capítulo definimos la corriente y analizamos algunos de los factores que contribuyen a la resistencia al flujo de carga en los conductores. También analizamos las transformaciones de energía en los circuitos eléctricos. Estos temas serán el fundamento para el trabajo adicional con circuitos en capítulos posteriores.

17.1 Corriente eléctrica

En la figura 17.1, las cargas se mueven en una dirección perpendicular a una superficie de área A . (El área podría ser el área de la sección transversal de un alambre, por ejemplo.) **La corriente es la tasa a la que fluye carga a través de esta superficie.**

Suponga que ΔQ es la cantidad de carga que fluye a través de un área A en un intervalo de tiempo Δt y que la dirección del flujo es perpendicular al área. Entonces, la **corriente promedio** I_{prom} es igual a la cantidad de carga dividida por el intervalo de tiempo:

$$I_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1a]$$

Unidad SI: coulomb/segundo (C/s) o ampere (A)

La corriente está compuesta de cargas individuales en movimiento, de modo que, para una corriente extremadamente baja, es concebible que una sola carga pueda pasar a través de un área A en un instante y que no pase carga en el instante siguiente. Entonces, todas las corrientes en esencia son promedios sobre el tiempo. Sin embargo, dado el enorme número de cargas involucradas, tiene sentido definir una corriente instantánea.

La **corriente instantánea** I es el límite de la corriente promedio conforme el intervalo de tiempo tiende a cero:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_{\text{prom}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1b]$$

Unidad SI: coulomb/segundo (C/s) o ampere (A)

Cuando la corriente es estable, las corrientes promedio e instantánea son iguales. Observe que un ampere de corriente es equivalente a un coulomb de carga que pasa a través del área transversal en un intervalo de tiempo de 1 s.

Cuando las cargas fluyen a través de una superficie, como en la figura 17.1, pueden ser positivas, negativas o ambas. **La dirección de la corriente convencional que se usa en este libro es la dirección en que fluyen las cargas positivas.** (Esta convención histórica se originó hace aproximadamente 200 años, cuando se introdujeron las ideas de las cargas positiva y negativa.) En un conductor común como el cobre, la corriente se debe al movimiento de electrones con carga negativa, de modo que la dirección de la corriente es opuesta a la dirección de movimiento de los electrones. Por otra parte, para un haz de protones con carga positiva en un acelerador, la corriente es en la misma dirección que el movimiento de los protones. En algunos casos (gases y electrolitos, por ejemplo) la corriente es el resultado de los flujos de cargas tanto positivas como negativas. Las cargas en movimiento, ya sean positivas o negativas, se conocen como *portadores de carga*. En un metal, por ejemplo, los portadores de carga son electrones.

En electrostática, donde las cargas son estacionarias, el potencial eléctrico es el mismo en toda parte del conductor. Esto ya no es cierto para conductores que portan corriente: conforme las cargas se mueven a lo largo de un alambre, el potencial eléctrico disminuye de manera continua (excepto en el caso especial de superconductores). La disminución del potencial eléctrico significa que las cargas móviles pierden energía de acuerdo con la relación $\Delta U_{\text{cargas}} = q\Delta V$, mientras que una energía $\Delta U_{\text{cable}} = -q\Delta V$ se deposita en el alambre de conducción de corriente. (Esas expresiones se derivan de la ecuación 16.2.) Si q se toma como positivo, que corresponde a la convención de la corriente positiva, entonces $\Delta V = V_f - V_i$ es negativa ya que, en un circuito, las cargas positivas se mueven de regiones de alto potencial para las regiones de bajo potencial. Que a su vez significa $\Delta U_{\text{cargas}} = q\Delta V$ es negativo, como debe ser, porque las cargas móviles pierden energía. A menudo, sólo la magnitud que se desea, sin embargo, en cuyo caso los valores absolutos se sustituyen en q y ΔV . Si la corriente es constante, entonces dividiendo la energía por el tiempo transcurrido se obtiene la potencia suministrada a este elemento de circuito, como el filamento de un foco.

Tip 17.1 Flujo de corriente es redundante

La frase *flujo de corriente* es de uso común, pero aquí la palabra *flujo* es redundante porque corriente ya se define como un flujo (de carga). ¡Evita esta construcción!

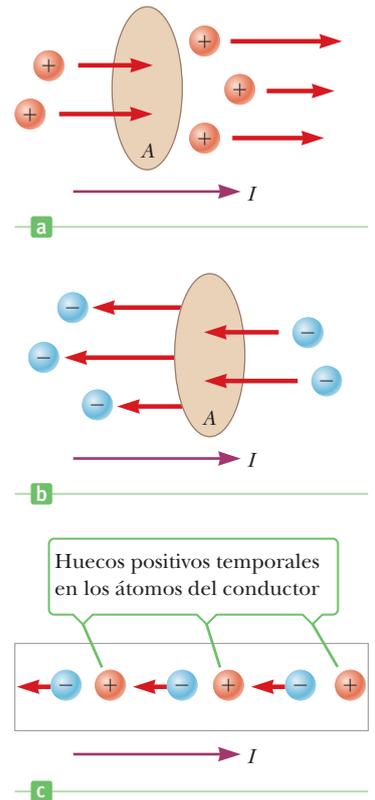


Figura 17.1 La tasa de tiempo de flujo de carga a través de la zona A es la corriente I . a) La dirección de la corriente es la misma que la del flujo de la carga positiva. b) Las cargas negativas que fluyen hacia la izquierda son equivalentes a una cantidad igual de cargas positivas que fluyen hacia la derecha. c) En un conductor, los electrones se mueven por los agujeros positivos abiertos en la red de átomos del conductor como respuesta a un potencial. Los electrones negativos que se mueven activamente a la izquierda son equivalentes a los huecos positivos que migran a la derecha.

EJEMPLO 17.1 Encender la luz**OBJETIVO** Aplicar el concepto de corriente.**PROBLEMA** La cantidad de carga que pasa a través del filamento de cierto foco en 2.00 s es 1.67 C. Determine **a)** la corriente promedio en el foco y **b)** el número de electrones que pasan a través del filamento en 5.00 s. **c)** Si la corriente es suministrada por una batería de 12.0 V, ¿cuál es la energía total entregada a los filamentos del foco? ¿Cuál es la potencia promedio?**ESTRATEGIA** Sustituya en la ecuación 17.1a para el inciso a), luego multiplique la respuesta por el tiempo dado en el inciso b) para obtener la carga total que pasa en dicho tiempo. La carga total es igual al número N de electrones que pasan a través del circuito multiplicado por la carga por electrón. Para obtener la energía entregada al foco, se multiplica la diferencia de potencial, ΔV , por la carga total. Divida la energía entre el tiempo para obtener la potencia media.**SOLUCIÓN****a)** Calcule la corriente promedio en el foco.

Sustituya la carga y el tiempo en la ecuación 17.1a:

$$I_{\text{prom}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1.67 \text{ C}}{2.00 \text{ s}} = 0.835 \text{ A}$$

b) Determine el número de electrones que pasan a través del filamento en 5.00 s.El número total N de electrones por la carga por electrón es igual a la carga total, $I_{\text{prom}} \Delta t$:

$$(1) \quad Nq = I_{\text{prom}} \Delta t$$

Sustituya y resuelva para N :

$$N(1.60 \times 10^{-19} \text{ C/electrón}) = (0.835 \text{ A})(5.00 \text{ s})$$

$$N = 2.61 \times 10^{19} \text{ electrones}$$

c) ¿Cuál es la energía total entregada a los filamentos del foco? ¿Cuál es la potencia promedio?

Multiplique la diferencia de potencial por la carga total para obtener la energía transferida al filamento:

$$(2) \quad \Delta U = q\Delta V = (1.67 \text{ C})(12.0 \text{ V}) = 20.0 \text{ J}$$

Divida la energía por el tiempo transcurrido para el cálculo de la potencia media:

$$P_{\text{prom}} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{20.0 \text{ J}}{2.00 \text{ s}} = 10.0 \text{ W}$$

COMENTARIOS Al desarrollar la solución, fue importante usar unidades que garantizaran la certeza de las ecuaciones, como la ecuación (1). Observe el enorme número de electrones que pasan a través de un punto dado en un circuito típico. Se utilizaron magnitudes en el cálculo de las energías en la ecuación (2). Técnicamente, los portadores de carga son electrones con carga negativa pasando de un menor potencial a un mayor potencial, por lo que el cambio en su energía es $\Delta U_{\text{carga}} = q\Delta V = (-1.67 \text{ C})(+12.0 \text{ V}) = -20.0 \text{ J}$, una pérdida de energía que se entrega al filamento, $\Delta U_{\text{fil}} = -\Delta U_{\text{carga}} = +20.0 \text{ J}$. La energía y la potencia, calculadas aquí usando las definiciones del capítulo 16, se abordarán en la sección 17.6.**PREGUNTA 17.1** ¿Es posible tener una corriente instantánea de $e/2$ por segundo? Explique. ¿La corriente promedio puede tomar este valor?**EJERCICIO 17.1** Una batería de 9.00 V suministra una corriente de 1.34 A al filamento del foco de una linterna de bolsillo. **a)** ¿Cuánta carga pasa por el filamento en 2.00 min? **b)** ¿Cuántos electrones pasan por el filamento? Calcule **c)** la energía entregada a la lámpara durante ese tiempo y **d)** la potencia suministrada por la batería.**RESPUESTAS** a) 161 C b) 1.01×10^{21} electrones c) $1.45 \times 10^3 \text{ J}$ d) 12.1 W**Examen rápido****17.1** Considere cargas positivas y negativas que se mueven horizontalmente a través de cuatro regiones en la figura 17.2. Clasifique las magnitudes de las corrientes en estas cuatro regiones, de menor a mayor. (I_a es la corriente en la figura 17.2a, I_b la corriente en la figura 17.2b, etcétera.) **a)** I_b, I_a, I_c, I_d **b)** I_a, I_c, I_b, I_d **c)** I_c, I_a, I_d, I_b **d)** I_d, I_b, I_c, I_a **e)** I_a, I_b, I_c, I_d **f)** Ninguna de éstas

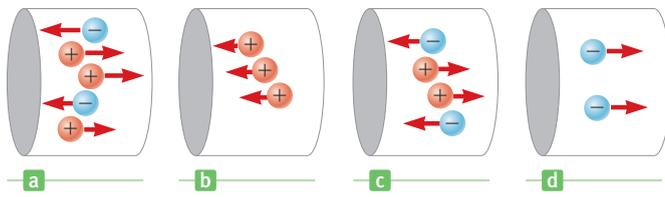


Figura 17.2
(Examen rápido 17.1)

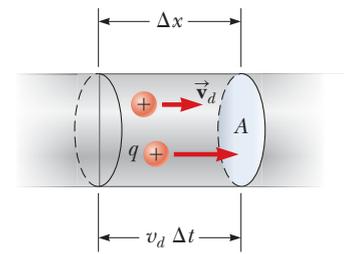


Figura 17.3 Una sección de un conductor uniforme con área transversal A . Los portadores de carga se mueven con una velocidad v_d y la distancia que recorren en el tiempo Δt está dada por $\Delta x = v_d \Delta t$. El número de portadores de carga móviles en la sección de longitud Δx está dado por $nAv_d \Delta t$, donde n es el número de portadores móviles por unidad de volumen.

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

Las corrientes macroscópicas se pueden relacionar con el movimiento de los portadores de carga microscópicos que constituyen la corriente. Es evidente que la corriente depende de la rapidez promedio de los portadores de carga en la dirección de la corriente, el número de portadores de carga por unidad de volumen y el tamaño de la carga portada por cada uno.

Considere partículas con carga idéntica que se mueven en un conductor con área transversal A (figura 17.3). El volumen de un elemento de longitud Δx del conductor es $A \Delta x$. Si n representa el número de portadores de carga móviles por unidad de volumen, el número de portadores en el elemento de volumen es $nA \Delta x$. Por lo tanto, la carga móvil ΔQ en este elemento es

$$\Delta Q = \text{número de portadores} \times \text{carga por portador} = (nA \Delta x)q$$

donde q es la carga sobre cada portador. Si los portadores se mueven con una rapidez promedio constante llamada **velocidad de deriva** v_d , la distancia que recorren en el intervalo de tiempo Δt es $\Delta x = v_d \Delta t$. Entonces, podemos escribir

$$\Delta Q = (nAv_d \Delta t)q$$

Si ambos lados de esta ecuación se dividen por Δt y se toma el límite conforme Δt tiende a cero, vemos que la corriente en el conductor es

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = nqv_d A \quad [17.2]$$

Para comprender el significado de la velocidad de deriva, considere un conductor en el cual los portadores de carga son electrones libres. Si el conductor está aislado, estos electrones experimentan movimiento aleatorio similar al movimiento de las moléculas de un gas. La rapidez de deriva normalmente es mucho menor que la rapidez promedio de los electrones libres entre colisiones con los átomos fijos del conductor. Cuando entre las terminales del conductor se aplica una diferencia de potencial (por decir, con una batería), se establece un campo eléctrico en el conductor, lo que crea una fuerza eléctrica sobre los electrones y por lo tanto una corriente. En realidad, los electrones no simplemente se mueven en líneas rectas a lo largo del conductor. En vez de ello, experimentan colisiones repetidas con los átomos del metal y el resultado es un complicado movimiento en zigzag con sólo una pequeña rapidez de deriva promedio a lo largo del alambre (figura activa 17.4). La energía transferida de los electrones a los átomos metálicos durante una colisión aumenta la energía vibratoria de los átomos y causa un aumento correspondiente en la temperatura del conductor. Sin embargo, a pesar de las colisiones, los electrones se mueven lentamente a lo largo del conductor en una dirección opuesta a \vec{E} con la rapidez de deriva \vec{v}_d .

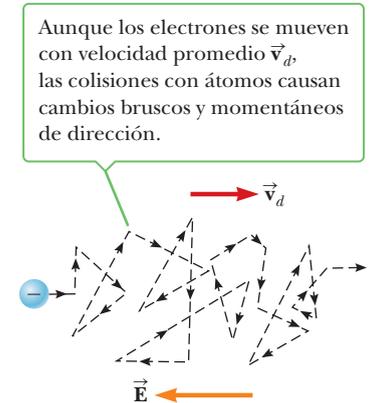


Figura activa 17.4 Representación esquemática del movimiento en zigzag de un portador de carga en un conductor. Los cambios agudos en dirección se deben a colisiones con átomos en el conductor. Observe que la velocidad de deriva \vec{v}_d es opuesta a la dirección del campo eléctrico.

EJEMPLO 17.2 Velocidad de deriva de electrones

OBJETIVO Calcular una velocidad de deriva y compárela con la rapidez rms de un gas de electrones.

PROBLEMA Un alambre de cobre, con área transversal de $3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, porta una corriente de 10.0 A. **a)** Si supone que cada átomo de cobre contribuye con un electrón libre al metal, determine la velocidad de deriva de los electrones en este alambre. **b)** Use el modelo de gas ideal para comparar la velocidad de deriva con la rapidez rms aleatoria que tendría un electrón a 20.0°C . La densidad del cobre es 8.92 g/cm^3 y su masa atómica es 63.5 u.

(continúa)

ESTRATEGIA Todas las variables en la ecuación 17.2 se conocen, excepto n , el número de portadores de carga libres por unidad de volumen. Puede determinar n al recordar que un mol de cobre contiene un número de Avogadro (6.02×10^{23}) de átomos y cada átomo continúa con un portador de carga al metal. El volumen de un mol se puede encontrar a partir de la densidad conocida del cobre y su masa atómica. La masa atómica es la misma, numéricamente, que el número de gramos en un mol de la sustancia.

SOLUCIÓN

a) Determine la velocidad de deriva de los electrones.

Calcule el volumen de un mol de cobre a partir de su densidad y su masa atómica:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{63.5 \text{ g}}{8.92 \text{ g/cm}^3} = 7.12 \text{ cm}^3$$

Convierta el volumen de cm^3 a m^3 :

$$7.12 \text{ cm}^3 \left(\frac{1 \text{ m}}{10^2 \text{ cm}} \right)^3 = 7.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Divida el número de Avogadro (el número de electrones en un mol) entre el volumen por mol para obtener la densidad de número:

$$\begin{aligned} n &= \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ electrones/mol}}{7.12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}} \\ &= 8.46 \times 10^{28} \text{ electrones/m}^3 \end{aligned}$$

Resuelva la ecuación 17.2 para la velocidad de deriva y sustituya:

$$\begin{aligned} v_d &= \frac{I}{nqA} \\ &= \frac{10.0 \text{ C/s}}{(8.46 \times 10^{28} \text{ electrones/m}^3)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(3.00 \times 10^{-6} \text{ m}^2)} \\ v_d &= 2.46 \times 10^{-4} \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Encuentre la velocidad rms de un gas de electrones a 20.0°C .

Aplique la ecuación 10.18:

Convierta la temperatura a la escala Kelvin y sustituya valores:

$$\begin{aligned} v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3k_B T}{m_e}} \\ v_{\text{rms}} &= \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ &= 1.15 \times 10^5 \text{ m/s} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La velocidad de deriva de un electrón en un alambre es muy pequeña, sólo de aproximadamente un mil millonésimo de su rapidez térmica aleatoria.

PREGUNTA 17.2 Verdadero o Falso: La velocidad de deriva en un alambre de una composición dada es inversamente proporcional a la densidad de número de portadores de carga.

EJERCICIO 17.2 ¿Qué corriente en un alambre de cobre, con área transversal de $7.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, resultaría en una rapidez de deriva igual a $5.00 \times 10^{-4} \text{ m/s}$?

RESPUESTA 5.08 A

Tip 17.2 Los electrones están en todas partes en el circuito

Los electrones no tienen que viajar del interruptor de luz al foco para que éste opere. Los electrones que ya están en el filamento del foco se mueven en respuesta al campo eléctrico que establece la batería. Además, la batería *no* proporciona electrones al circuito; proporciona *energía* a los electrones existentes.

El ejemplo 17.2 muestra que las rapidezces de deriva por lo general son muy pequeñas. De hecho, la velocidad de deriva es mucho menor que la velocidad promedio entre colisiones. Los electrones que viajen a $2.46 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, como en el ejemplo, ¡tardarían aproximadamente 68 minutos en recorrer 1 m! En vista de esta baja rapidez, ¿por qué un foco se enciende casi de inmediato cuando se activa un interruptor? Piense en el flujo de agua a través de una tubería. Si una gota de agua se fuerza en un extremo de una tubería que ya está llena con agua, una gota debe empujarse afuera por el otro extremo de la tubería. Aunque a una gota individual puede tomarle mucho tiempo en pasar por la tubería, un flujo iniciado en un extremo produce un flujo similar en el otro extremo muy rápidamente. Otra analogía familiar es el movimiento de una cadena de bicicleta. Cuando la estrella mueve un eslabón, los otros eslabones se mueven todos más o menos de manera inmediata, aun cuando a un eslabón dado le tome algo de tiempo dar una vuelta completa. En un conductor, el campo eléctrico impulsa a los electrones libres a viajar con una velocidad

cercana a la de la luz, de modo que, cuando activa un interruptor de luz, ¡el mensaje para que los electrones comiencen a moverse a través del alambre (el campo eléctrico) llega a ellos con una rapidez del orden de 10^8 m/s!

Examen rápido

- 17.2** Suponga que un alambre portador de corriente tiene un área transversal que gradualmente se vuelve más pequeña a lo largo del alambre, de modo que el alambre tiene la forma de un cono truncado muy largo. ¿Cómo varía la velocidad de deriva a lo largo del alambre? a) Baja conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor. b) Aumenta conforme la sección transversal se vuelve cada vez menor. c) No cambia. d) Se necesita más información.

17.3 Medición de corriente y voltaje en circuitos

Para estudiar la corriente eléctrica en los circuitos, es necesario entender cómo medir corrientes y voltajes.

El circuito que se muestra en la figura 17.5a es un dibujo del circuito real necesario para medir la corriente en el ejemplo 17.1. La figura 17.5b muestra una figura estilizada llamada diagrama de circuito que representa el circuito real de la figura 17.5a. Este circuito sólo consiste en una batería y un foco. La palabra *circuito* significa “malla cerrada de algún tipo alrededor de la cual circula corriente”. La batería bombea carga a través del foco y alrededor de la malla. No fluiría carga sin una trayectoria conductora completa, desde la terminal positiva de la batería hacia un lado del foco, con salida del otro lado y a través del alambre conductor de cobre de vuelta a la terminal negativa de la batería. Las cantidades más importantes que caracterizan cómo funciona el foco en diferentes situaciones son la corriente I en el foco y la diferencia de potencial ΔV a través del foco. Para medir la corriente en éste, coloque un amperímetro, el dispositivo para medir corriente, en la línea con el foco, de modo que no haya trayectoria para que la corriente evite al medidor; toda la carga que pasa a través del foco también pasa a través del amperímetro. El voltímetro mide la diferencia de potencial, o voltaje, entre las dos terminales del filamento del foco. Si se usan dos medidores simultáneamente, como en la figura 17.5a, podemos remover el voltímetro y ver si su presencia afecta la lectura de corriente. La figura 17.5c muestra un multímetro digital, un dispositivo conveniente, con una lectura digital, que se puede usar para medir voltaje, corriente o resistencia. Una ventaja de usar un multímetro digital como voltímetro es que por lo general no afectará la corriente porque un medidor digital tiene una enorme resistencia al flujo de carga en el modo voltímetro.

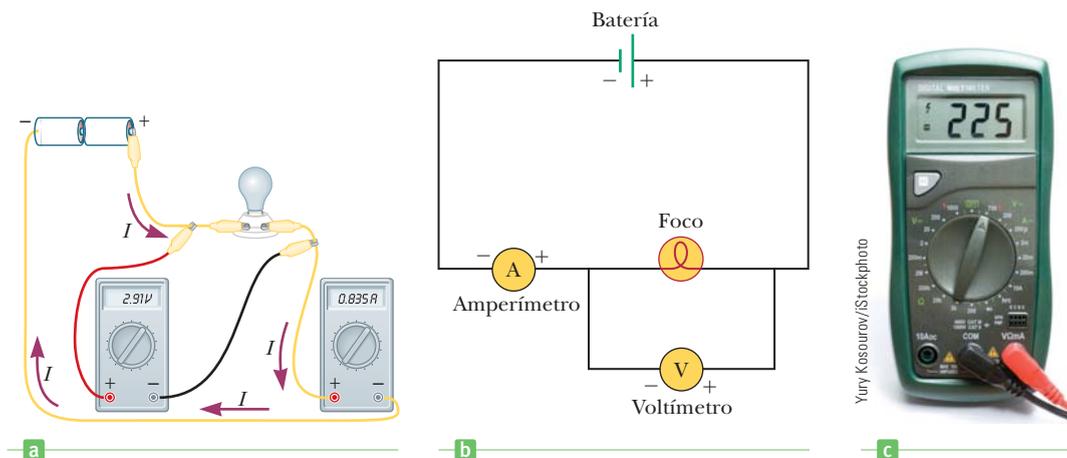


Figura 17.5 a) Bosquejo de un circuito real que se utiliza para medir la corriente en el foco de una linterna y la diferencia de potencial a través de él. b) Diagrama esquemático del circuito que se muestra en a). c) Se puede usar un multímetro digital para medir tanto corriente como diferencia de potencial.

En este punto, usted puede medir la corriente como función del voltaje (una curva $I - \Delta V$) de varios dispositivos en el laboratorio. Todo lo que necesita es una fuente de voltaje variable (una batería ajustable) capaz de suministrar diferencias de potencial de aproximadamente -5 V a $+5 \text{ V}$, un foco, un resistor, algunos alambres y mordazas de cocodrilo y un par de multímetros. Asegúrese de comenzar siempre sus mediciones en las escalas más altas del multímetro (por decir, 10 A y 1000 V) y aumentar la sensibilidad una escala a la vez para obtener la máxima precisión sin sobrecargar los medidores. (Aumentar la sensibilidad significa bajar la corriente o voltaje máximos que lee la escala.) Observe que el medidor se debe conectar con la polaridad adecuada con respecto a la fuente de voltaje, como se muestra en la figura 17.5b. Finalmente, siga cuidadosamente las instrucciones de su profesor para evitar dañar los medidores e incurrir en una elevada multa de laboratorio.

Examen rápido

17.3 Observe los cuatro “circuitos” que se muestran en la figura 17.6 y seleccione aquel que encenderá el foco.

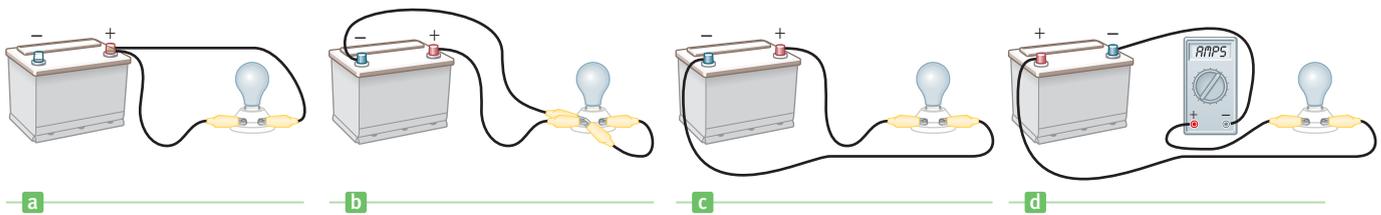


Figura 17.6 (Examen rápido 17.3)

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

Resistencia y ley de Ohm

Cuando un voltaje (diferencia de potencial) ΔV se aplica a través de las terminales de un conductor metálico, como en la figura 17.7, tenemos que la corriente en el conductor es proporcional al voltaje aplicado; $I \propto \Delta V$. Si la proporcionalidad se sostiene, puede escribir $\Delta V = IR$, donde la constante de proporcionalidad R se llama *resistencia* del conductor. De hecho, la **resistencia** se define como la razón del voltaje a través del conductor, a la corriente que porta:

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad [17.3]$$

La resistencia tiene unidades SI de volts por amperio, llamada **ohm** (Ω). Si una diferencia de potencial de 1 V a través de un conductor produce una corriente de 1 A , la resistencia del conductor es 1Ω . Por ejemplo, si un aparato electrodoméstico conectado a una fuente de 120 V porta una corriente de 6 A , su resistencia es 20Ω .

Los conceptos de corriente eléctrica, voltaje y resistencia se pueden comparar con el flujo de agua en un río. Conforme el agua fluye colina abajo en un río de ancho y profundidad constantes, la tasa de flujo (corriente de agua) depende de lo inclinado de la pendiente del río y de los efectos de rocas, el banco del río y otros obstáculos. La diferencia de voltaje es análoga a la inclinación y la resistencia a las obstrucciones. Con base en esta analogía, parece razonable que aumentar el voltaje aplicado a un circuito debe aumentar la corriente en el circuito, tal como aumentar la inclinación de la pendiente aumenta la corriente de agua. Además, aumentar las obstrucciones en la trayectoria del río reducirá la corriente de agua, tal como aumentar la resistencia en un circuito bajará la corriente eléctrica. La resistencia en un circuito surge debido a colisiones entre los electrones que portan la corriente con átomos fijos dentro del conductor. Estas colisiones inhiben el movimiento de las cargas en forma muy parecida a una fuerza de fricción. Para muchos mate-

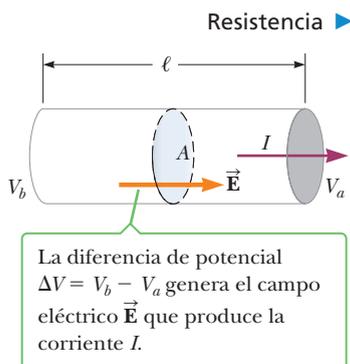


Figura 17.7 Conductor uniforme de longitud ℓ y área de sección transversal A . La corriente I en el conductor es proporcional a la diferencia de potencial o de manera equivalente al campo eléctrico y la longitud.

riales, incluidos la mayoría de los metales, los experimentos demuestran que **la resistencia permanece constante sobre un amplio rango de voltajes o corrientes aplicados**. Este enunciado se conoce como **ley de Ohm**, en honor de Georg Simon Ohm (1789-1854), quien fue el primero en realizar un estudio sistemático de la resistencia eléctrica.

La ley de Ohm está dada por

$$\Delta V = IR \quad [17.4]$$

donde R se entiende es independiente de ΔV , la caída de potencial a través del resistor, e I , la corriente en el resistor. Continuaremos con el uso de esta forma tradicional de la ley de Ohm cuando analicemos circuitos eléctricos. Un **resistor** es un conductor que proporciona una resistencia específica en un circuito eléctrico. El símbolo para un resistor en diagramas de circuito es una línea en zigzag: .

La ley de Ohm es una relación empírica válida sólo para algunos materiales. Los materiales que obedecen la ley de Ohm y por lo tanto tienen una resistencia constante sobre un amplio rango de voltajes, se dice que son **óhmicos**. Los materiales que tienen resistencia que cambia con el voltaje o corriente son **no óhmicos**. Los materiales óhmicos tienen una relación corriente-voltaje lineal sobre un gran rango de voltajes aplicados (figura 17.8a). Los materiales no óhmicos tienen una relación corriente-voltaje no lineal (figura 17.8b). El **diodo**, un elemento de circuito que actúa como una válvula de una vía para la corriente, es un dispositivo semiconductor común que es no óhmico. Su resistencia es pequeña para corrientes en una dirección (ΔV positiva) y grande para corrientes en la dirección inversa (ΔV negativa). La mayoría de los dispositivos electrónicos modernos, como los transistores, tienen relaciones corriente-voltaje no lineales; su operación depende de las formas particulares en que violan la ley de Ohm.

Examen rápido

17.4 En la figura 17.8b, ¿la resistencia del diodo a) aumenta o b) disminuye conforme aumenta el voltaje positivo ΔV ?

17.5 Se requiere que todos los dispositivos eléctricos tengan placas de identificación que especifiquen sus características eléctricas. La placa en cierta plancha de vapor afirma que la plancha porta una corriente de 6.00 A cuando se conecta a una fuente de 1.20×10^2 V. ¿Cuál es la resistencia de la plancha de vapor? a) 0.050 Ω b) 20.0 Ω c) 36.0 Ω

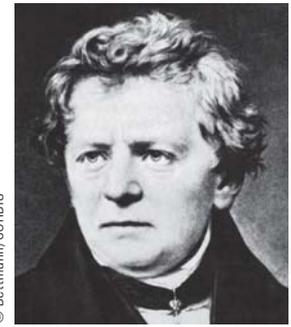
Resistividad

Los electrones no se mueven en trayectorias en línea recta a través de un conductor. En vez de ello, experimentan repetidas colisiones con los átomos del metal. Considere un conductor con un voltaje aplicado a través de sus extremos. Un electrón gana rapidez conforme lo acelera la fuerza eléctrica asociada con el campo eléctrico interno, lo que le proporciona una velocidad en la dirección opuesta a la del campo eléctrico. Una colisión con un átomo “aleatoriza” la velocidad del electrón y la reduce en la dirección opuesta al campo. Entonces el proceso se repite a sí mismo. En conjunto, estas colisiones afectan un poco el electrón, conforme lo haría una fuerza de fricción interna. Este paso es el origen de la resistencia de un material.

La resistencia de un conductor óhmico aumenta con la longitud, lo cual tiene sentido porque los electrones que pasan a través deben experimentar más colisiones en un conductor más largo. Un área transversal menor también aumenta la resistencia de un conductor, tal como una tubería más pequeña frena el fluido que se mueve a través suyo. La resistencia, entonces, es proporcional a la longitud del conductor ℓ e inversamente proporcional a su área transversal A ,

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [17.5]$$

donde la constante de proporcionalidad, ρ , se llama **resistividad** del material. Todo material tiene una resistividad característica que depende de su estructura electrónica y su temperatura. Los buenos conductores eléctricos tienen resistividades muy bajas y los buenos



© Bettmann/COBIS

Georg Simon Ohm (1789-1854)

Profesor de bachillerato en Colonia y más tarde profesor en Munich, Ohm formuló el concepto de resistencia y descubrió las proporcionalidades que se expresan en la ecuación 17.5.



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Varios tipos de resistores utilizados para muchas aplicaciones en circuitos electrónicos.

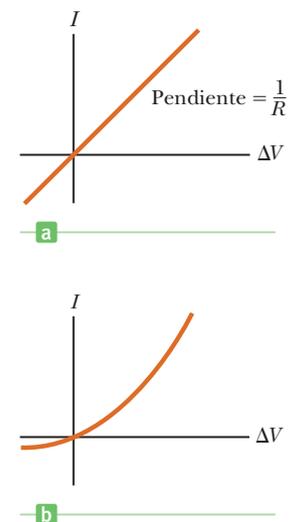


Figura 17.8 a) Curva corriente-voltaje para un material óhmico. La curva es lineal y la pendiente proporciona la resistencia del conductor. b) Curva corriente-voltaje no lineal para un diodo semiconductor. Este dispositivo no obedece la ley de Ohm.

Tabla 17.1 Resistividades y coeficientes de temperatura de la resistividad para varios materiales (a 20 °C)

Material	Resistividad ($\Omega \cdot \text{m}$)	Coefficiente de temperatura de la resistividad [(°C) ⁻¹]
Plata	1.59×10^{-8}	3.8×10^{-3}
Cobre	1.7×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Oro	2.44×10^{-8}	3.4×10^{-3}
Aluminio	2.82×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Tungsteno	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}
Hierro	10.0×10^{-8}	5.0×10^{-3}
Platino	11×10^{-8}	3.92×10^{-3}
Plomo	22×10^{-8}	3.9×10^{-3}
Nicromo ^a	150×10^{-8}	0.4×10^{-3}
Carbono	3.5×10^{-5}	-0.5×10^{-3}
Germanio	0.46	-48×10^{-3}
Silicio	640	-75×10^{-3}
Vidrio	10^{10} – 10^{14}	
Caucho duro	$\approx 10^{13}$	
Azufre	10^{15}	
Cuarzo (fundido)	75×10^{16}	

^aAleación de níquel-cromo de uso común en elementos calefactores.

aislantes tienen resistividades muy altas. La tabla 17.1 menciona las resistividades de varios materiales a 20 °C. Puesto que los valores de la resistencia están en ohms, los valores de resistividad deben estar en ohm-metros ($\Omega \cdot \text{m}$).

■ FÍSICA APLICADA 17.1 Poca iluminación de los focos viejos

Conforme un foco envejece, ¿por qué brinda menos luz que cuando está nuevo?

EXPLICACIÓN Existen dos razones para el comportamiento de los focos, una eléctrica y una óptica, pero ambas se relacionan con el mismo fenómeno que ocurre dentro del foco. El filamento de foco viejo está hecho de un alambre de tungsteno que se mantuvo a una alta temperatura durante muchas horas. Las altas temperaturas evaporan el tungsteno del filamento, lo que disminuye su radio. A partir de $R = \rho\ell/A$ vemos que un área transversal disminuida conduce a un aumento en la resistencia del filamento. Este aumento en

la resistencia con la edad significa que el filamento portará menos corriente para el mismo voltaje aplicado. Con menos corriente en el filamento, hay menos salida de luz y el filamento brilla con menos intensidad.

A la alta temperatura operativa del filamento, los átomos de tungsteno salen de su superficie, en gran medida como las moléculas de agua se evaporan de un charco de agua. Los átomos se alejan por corrientes de convección en el gas del foco y se depositan en la superficie interior del vidrio. Con el tiempo, el vidrio se vuelve menos transparente debido al recubrimiento de tungsteno, que disminuye la cantidad de luz que pasa a través del vidrio. ■

■ EJEMPLO 17.3 La resistencia del alambre de nicromo

OBJETIVO Combinar el concepto de resistividad con la ley de Ohm.

PROBLEMA a) Calcule la resistencia por unidad de longitud de un alambre de nicromo calibre 22 de 0.321 mm de radio. b) Si una diferencia de potencial de 10.0 V se mantiene a través de una longitud de 1.00 m de alambre de nicromo, ¿cuál es la corriente en el alambre? c) El alambre se funde y vuelve a formar con el doble de su longitud original. Encuentre la nueva resistencia R_N como múltiplo de la anterior resistencia R_O .

ESTRATEGIA El inciso a) requiere sustitución en la ecuación 17.5, después de calcular el área transversal, mientras que el inciso b) es cuestión de sustituir en la ley de Ohm. El inciso c) requiere algo de álgebra. La idea es tomar la expresión para la nueva resistencia y sustituir expresiones para ℓ_N y A_N , las nuevas longitud y área transversal, en términos de las antiguas longitud y sección transversal. Para la sustitución del área, recuerde que los volúmenes de los alambres anterior y nuevo son iguales.

SOLUCIÓN

a) Calcule la resistencia por unidad de longitud.

Encuentre el área de sección transversal del alambre:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.321 \times 10^{-3} \text{ m})^2 = 3.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

Obtenga la resistividad del nicromo en la tabla 17.1, resuelva la ecuación 17.5 para R/ℓ y sustituya:

$$\frac{R}{\ell} = \frac{\rho}{A} = \frac{1.5 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}}{3.24 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 4.6 \Omega/\text{m}$$

b) Encuentre la corriente en un segmento de 1.00 m del alambre, si la diferencia de potencial de él es 10.0 V.

Sustituya los valores dados en la ley de Ohm:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{10.0 \text{ V}}{4.6 \Omega} = 2.2 \text{ A}$$

c) Si el alambre se funde y vuelve a formarse de nuevo con el doble de su longitud original, encuentre la nueva resistencia como múltiplo de la anterior.

Encuentre el área nueva A_N en términos del área anterior A_O y use el hecho de que el volumen no cambia y $\ell_N = 2\ell_O$:

$$V_N = V_O \rightarrow A_N \ell_N = A_O \ell_O \rightarrow A_N = A_O(\ell_O/\ell_N)$$

$$A_N = A_O(\ell_O/2\ell_O) = A_O/2$$

Sustituya en la ecuación 17.5:

$$R_N = \frac{\rho \ell_N}{A_N} = \frac{\rho(2\ell_O)}{(A_O/2)} = 4 \frac{\rho \ell_O}{A_O} = 4R_O$$

COMENTARIOS A partir de la tabla 17.1, la resistividad del nicromo es de aproximadamente 100 veces la del cobre, un buen conductor típico. Por lo tanto, un alambre de cobre del mismo radio tendría una resistencia por unidad de longitud de sólo $0.052 \Omega/\text{m}$, y una longitud de 1.00 m de alambre de cobre del mismo radio portaría la misma corriente (2.2 A) con un voltaje aplicado de sólo 0.115 V.

Debido a su resistencia a la oxidación, el nicromo se usa con frecuencia para elementos calefactores en tostadores, planchas y calentadores eléctricos.

PREGUNTA 17.3 ¿Sustituir el nicromo con cobre resultaría en mayor o menor corriente?

EJERCICIO 17.3 ¿Cuál es la resistencia de una longitud de 6.0 m de alambre de nicromo que tenga un radio de 0.321 mm? ¿Cuánta corriente porta cuando se conecta a una fuente de 120 V?

RESPUESTAS 28 Ω ; 4.3 A

■ Examen rápido

17.6 Suponga que un alambre eléctrico se sustituye con uno que tiene cada dimensión lineal duplicada (es decir, la longitud y el radio tienen el doble de sus valores originales). ¿El alambre ahora tiene a) más resistencia que antes, b) menos resistencia o c) la misma resistencia?

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

La resistividad ρ , y por lo tanto la resistencia, de un conductor depende de algunos factores. Uno de los más importantes es la temperatura del metal. Para la mayoría de los metales, la resistividad aumenta con el incremento de temperatura. Esta correlación se puede entender del siguiente modo: conforme la temperatura del material aumenta, sus átomos constituyentes vibran con amplitudes mayores. Como resultado, los electrones encuentran más difícil llegar a dichos átomos, tal como es más difícil avanzar a través de una sala abarrotada cuando la gente se mueve que cuando está quieta de pie. La creciente dispersión de electrones con la temperatura creciente resulta en aumento de resistividad. Técnicamente, la expansión térmica también afecta la resistencia; sin embargo, éste es un efecto muy pequeño.

Sobre un rango limitado de temperaturas, la resistividad de la mayoría de los metales aumenta de manera lineal con el incremento de temperatura, de acuerdo con la expresión

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.6]$$



En una antigua lámpara incandescente con filamento de carbono, la resistencia eléctrica por lo general es de 10Ω , pero cambia con la temperatura.

donde ρ es la resistividad a alguna temperatura T (en grados Celsius), ρ_0 es la resistividad a alguna temperatura de referencia T_0 (por lo general se considera como 20°C) y α es un parámetro llamado **coeficiente de temperatura de la resistividad**. En la tabla 17.1 se proporcionan los coeficientes de temperatura para varios materiales. Los valores negativos interesantes de α para semiconductores surgen porque dichos materiales poseen portadores de carga enlazados débilmente, que se liberan para moverse y contribuir a la corriente conforme se eleva la temperatura.

Debido a que la resistencia de un conductor con una sección transversal uniforme es proporcional a la resistividad, de acuerdo con la ecuación 17.5 ($R = \rho l/A$), la variación de resistencia con la temperatura se puede escribir

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \tag{17.7}$$

Mediciones precisas de temperatura a menudo se realizan usando esta propiedad, como se muestra mediante el siguiente ejemplo.

EJEMPLO 17.4 Un termómetro con resistencia de platino

OBJETIVO Aplicar la dependencia de la resistencia a la temperatura.

PROBLEMA Un termómetro de resistencia, que mide temperatura al medir el cambio en resistencia de un conductor, está hecho de platino y tiene una resistencia de 50.0Ω a 20.0°C . **a)** Cuando el dispositivo se sumerge en un recipiente que contiene indio fundido, su resistencia aumenta a 76.8Ω . A partir de esta información, encuentre el punto de fusión del indio. **b)** El indio se calienta todavía más hasta que alcanza una temperatura de 235°C . ¿Cuál es la razón de la nueva corriente en el platino con la corriente I_{pf} en el punto de fusión?

ESTRATEGIA Para el inciso a), resuelva la ecuación 17.7 para $T - T_0$, obtenga α para el platino en la tabla 17.1 y sustituya las cantidades conocidas. Para el inciso b), use la ley de Ohm en la ecuación 17.7.

SOLUCIÓN

a) Determine el punto de fusión del indio.

Resuelva la ecuación 17.7 para $T - T_0$:

$$T - T_0 = \frac{R - R_0}{\alpha R_0} = \frac{76.8 \Omega - 50.0 \Omega}{[3.92 \times 10^{-3} (\text{C}^{-1})][50.0 \Omega]}$$

Sustituya $T_0 = 20.0^\circ\text{C}$ y obtenga el punto de fusión del indio:

$$T = 157^\circ\text{C}$$

b) Determine la razón de la nueva corriente con la anterior cuando la temperatura se eleva de 157°C a 235°C .

Escriba la ecuación 17.7, con R_{pf} y T_{pf} , la resistencia y temperatura en el punto de fusión, en sustitución de R_0 y T_0 .

$$R = R_{\text{pf}}[1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})]$$

De acuerdo con la ley de Ohm, $R = \Delta V/I$ y $R_{\text{pf}} = \Delta V/I_{\text{pf}}$. Sustituya estas expresiones en la ecuación 17.7:

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{\Delta V}{I_{\text{pf}}} [1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})]$$

Cancele las diferencias de voltaje, invierta las dos expresiones y luego divida ambos lados por I_{pf} :

$$\frac{I}{I_{\text{pf}}} = \frac{1}{1 + \alpha(T - T_{\text{pf}})}$$

Sustituya $T = 235^\circ\text{C}$, $T_{\text{pf}} = 157^\circ\text{C}$ y el valor para α , y obtenga la razón deseada:

$$\frac{I}{I_{\text{pf}}} = 0.766$$

COMENTARIOS Conforme la temperatura se eleva, aumentan tanto la rapidez rms de los electrones en el metal y la resistencia.

PREGUNTA 17.4 ¿Qué ocurre con la rapidez de deriva de los electrones conforme la temperatura se eleva? **a)** Se vuelve mayor. **b)** Se vuelve menor. **c)** Permanece invariable.

EJERCICIO 17.4 Suponga que un alambre hecho de una aleación desconocida y que tiene una temperatura de 20.0°C, porta una corriente de 0.450 A. A 52.0°C la corriente es 0.370 A para la misma diferencia de potencial. Encuentre el coeficiente de temperatura de la resistividad de la aleación.

RESPUESTA $6.76 \times 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$

17.6 Energía eléctrica y potencia

Si se usa una batería para establecer una corriente eléctrica en un conductor, la energía química almacenada en la batería se transforma continuamente en energía cinética de los portadores de carga. Esta energía cinética se pierde rápidamente como resultado de colisiones entre los portadores de carga y átomos fijos en el conductor, lo que causa un aumento en la temperatura del conductor. De esta forma la energía química almacenada en la batería se transforma continuamente en energía térmica.

Para entender el proceso de transferencia de energía en un circuito simple, considere una batería con terminales conectadas a un resistor (figura activa 17.9; recuerde que la terminal positiva de la batería siempre está a mayor potencial). Ahora imagine seguir una cantidad de carga positiva ΔQ alrededor del circuito, desde el punto A, a través de la batería y el resistor, y de vuelta a A. El punto A es un punto de referencia que está aterrizado (el símbolo de tierra es $\text{---}\equiv$) y su potencial se considera como cero. Conforme la carga ΔQ se mueve de A a B a través de la batería, la energía potencial eléctrica del sistema aumenta por la cantidad $\Delta Q \Delta V$ y la energía potencial química en la batería disminuye por la misma cantidad. (Recuerde del capítulo 16 que $\Delta EP = q \Delta V$.) Sin embargo, conforme la carga se mueve de C a D a través del resistor, pierde esta energía potencial eléctrica durante colisiones con átomos en el resistor. En el proceso, la energía se transforma a energía interna correspondiente a movimiento vibratorio creciente de dichos átomos. Puesto que se puede ignorar la resistencia muy pequeña de los alambres conectores, no ocurre transformación de energía para las trayectorias BC y DA. Cuando la carga regresa al punto A, el resultado neto es que parte de la energía química en la batería se entregó al resistor y provocó su aumento de temperatura.

La carga ΔQ pierde energía $\Delta Q \Delta V$ mientras pasa a través del resistor. Si Δt es el tiempo que tarda la carga en pasar a través del resistor, la tasa instantánea a la que pierde energía potencial eléctrica es

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Delta V = I \Delta V$$

donde I es la corriente en el resistor y ΔV es la diferencia de potencial a través de él. Desde luego, la carga vuelve a recuperar esta energía cuando pasa a través de la batería, a costa de la energía química en la misma. La tasa a la que el sistema pierde energía potencial conforme la carga pasa a través del resistor es igual a la tasa a la que el sistema gana energía interna en el resistor. Por lo tanto, la potencia P , que representa la tasa a la que se entrega energía al resistor, es

$$P = I \Delta V$$

[17.8] ◀ Potencia

Aunque este resultado se desarrolló al considerar una batería que entrega energía a un resistor, la ecuación 17.8 se puede usar para determinar la potencia transferida de una fuente de voltaje a cualquier dispositivo que porte una corriente I y tenga una diferencia de potencial ΔV entre sus terminales.

Con la ecuación 17.8 y el hecho de que $\Delta V = IR$ para un resistor, la potencia entregada al resistor se puede expresar en las formas alternativas

$$P = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{R}$$

[17.9] ◀ Potencia entregada a un resistor

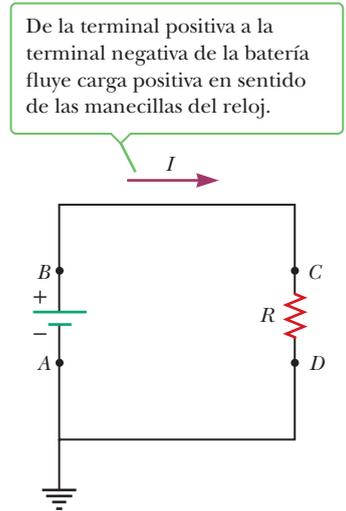


Figura activa 17.9
Un circuito que consiste en una batería y una resistencia R . El punto A está aterrizado.

Tip 17.3 **Concepciones erróneas acerca de la corriente**

La corriente *no* “se usa” en un resistor. En vez de ello, parte de la energía que las cargas reciben de la fuente de voltaje se entrega al resistor, con lo que se calienta y hace que radie. Además, la corriente no baja cuando pasa a través del resistor: es la misma a través del circuito.

Cuando I está en amperes, ΔV en volts y R en ohms, la unidad SI de potencia es el watt (que se introdujo en el capítulo 5). La potencia entregada a un conductor de resistencia R con frecuencia se le conoce como una *pérdida* I^2R . Observe que la ecuación 17.9 sólo se aplica a resistores y no a dispositivos no óhmicos como focos y diodos.

Sin importar las formas en que use la energía eléctrica en su casa, a final de cuentas usted paga por ella o se arriesga a quedarse sin electricidad. La unidad de energía que usan las compañías eléctricas para calcular el consumo, el **kilowatt-hora**, se define en términos de la unidad de potencia y la cantidad de tiempo que se suministra. Un kilowatt-hora (kWh) es la energía convertida o consumida en 1 h a la tasa constante de 1 kW. Tiene el valor numérico

$$1 \text{ kWh} = (10^3 \text{ W})(3\,600 \text{ s}) = 3.60 \times 10^6 \text{ J} \quad [17.10]$$

En un recibo eléctrico, la cantidad de electricidad utilizada en un periodo dado por lo general se menciona en múltiplos de kilowatt-horas.

FÍSICA APLICADA 17.2 **Falla de focos**

¿Por qué los focos fallan con tanta frecuencia inmediatamente después de que se encienden?

EXPLICACIÓN Una vez que el interruptor se cierra, a través del foco se aplica la línea de voltaje. Conforme el voltaje se aplica a través del filamento frío, cuando el foco se enciende por primera vez, la resistencia del filamento es baja, la corriente es alta y una cantidad relativamente

grande de potencia se entrega al foco. Este pico de corriente al comienzo de la operación es la razón por la que los focos fallan con frecuencia inmediatamente después que se encienden. Conforme el filamento se calienta, su resistencia se eleva y la corriente disminuye. Como resultado, la potencia entregada al foco disminuye y éste tiene menos probabilidad de quemarse. ■

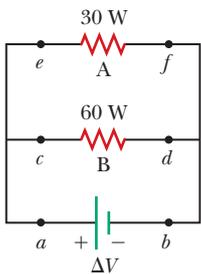


Figura 17.10 (Examen rápido 17.8)

Examen rápido

17.7 Un voltaje ΔV se aplica a través de las terminales de un alambre calefactor de nicromo que tiene un área transversal A y longitud L . El mismo voltaje se aplica a través de las terminales de un segundo alambre calefactor de nicromo que tiene un área transversal A y longitud $2L$. ¿Cuál alambre se calienta más? a) El alambre más corto. b) El alambre más largo. c) Se necesita más información.

17.8 Para los dos resistores que se muestran en la figura 17.10, clasifique las corrientes en los puntos del a al f , de mayor a menor. a) $I_a = I_b > I_e = I_f > I_c = I_d$
b) $I_a = I_b > I_c = I_d > I_e = I_f$ c) $I_e = I_f > I_c = I_d > I_a = I_b$

17.9 Dos resistores, A y B, se conectan en un circuito en serie con una batería. La resistencia de A es el doble que la de B. ¿Cuál resistor disipa más potencia? a) El resistor A. b) El resistor B. c) Se necesita más información.

17.10 El diámetro del alambre A es mayor que el diámetro del alambre B, pero sus longitudes y resistividades son idénticas. Para una diferencia de voltaje dada a través de las terminales, ¿cuál es la relación entre P_A y P_B , la potencia disipada para los alambres A y B, respectivamente? a) $P_A = P_B$ b) $P_A < P_B$ c) $P_A > P_B$

EJEMPLO 17.5 **El costo de iluminar su vida**

OBJETIVO Aplicar el concepto de potencia eléctrica y calcular el costo del consumo de potencia usando kilowatt-horas.

PROBLEMA Un circuito proporciona una corriente máxima de 20.0 A a un voltaje operativo de 1.20×10^2 V. a) ¿Cuántos focos de 75 W pueden operar con esta fuente de voltaje? b) A \$0.120 por kilowatt-hora, ¿cuánto cuesta operar estos focos durante 8.00 h?

ESTRATEGIA Encuentre la potencia necesaria con $P = I\Delta V$, luego divida por 75.0 W por foco para obtener el número total de focos. Para encontrar el costo, convierta la potencia a kilowatts y multiplique por el número de horas, luego multiplique por el costo por kilowatt-hora.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el número de focos que pueden iluminarse.

Sustituya en la ecuación 17.8 para obtener la potencia total:

$$P_{\text{total}} = I \Delta V = (20.0 \text{ A})(1.20 \times 10^2 \text{ V}) = 2.40 \times 10^3 \text{ W}$$

Divida la potencia total por la potencia por foco para obtener el número de focos:

$$\text{Número de focos} = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{foco}}} = \frac{2.40 \times 10^3 \text{ W}}{75.0 \text{ W}} = 32.0$$

b) Calcule el costo de esta electricidad para un día de 8.00 h.

Encuentre la energía en kilowatt-horas:

$$\begin{aligned} \text{Energía} &= Pt = (2.40 \times 10^3 \text{ W}) \left(\frac{1.00 \text{ kW}}{1.00 \times 10^3 \text{ W}} \right) (8.00 \text{ h}) \\ &= 19.2 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Multiplique la energía por el costo por kilowatt-hora:

$$\text{Costo} = (19.2 \text{ kWh})(\$0.12/\text{kWh}) = \$2.30$$

COMENTARIOS Esta cantidad de energía puede corresponder a lo que consume una pequeña oficina en un día de trabajo, si toma en cuenta todos los requerimientos de potencia (no sólo la iluminación). En general, los dispositivos resistivos pueden tener salida de potencia variable, dependiendo de cómo se alambre el circuito. Aquí se especificaron las salidas de potencia, por lo que tales consideraciones fueron innecesarias.

PREGUNTA 17.5 Si considera cuán calientes se ponen las partes de un foco incandescente durante su operación, adivine qué fracción de la energía emitida por un foco incandescente está en la forma de luz visible. a) 10% b) 50% c) 80%

EJERCICIO 17.5 a) ¿Cuántas luces de árbol de Navidad, que extraen 5.00 W de potencia cada una, se podrían encender en un circuito que opera a $1.20 \times 10^2 \text{ V}$ y proporciona 15.0 A de corriente? b) Encuentre el costo de operar una de tales series 24.0 h al día durante la época navideña (dos semanas), a la tasa de $\$0.12/\text{kWh}$.

RESPUESTAS a) 3.60×10^2 focos b) $\$72.60$

■ EJEMPLO 17.6 Potencia convertida por un calentador eléctrico

OBJETIVO Calcular una salida de potencia eléctrica y vincularla con su efecto sobre el ambiente, a través de la primera ley de la termodinámica.

PROBLEMA Un calentador eléctrico se opera al aplicar una diferencia de potencial de 50.0 V a un alambre de nicromo con resistencia total de 8.00 Ω . a) Encuentre la corriente transportada por el alambre y la clasificación de potencia del calentador. b) Con este calentador, ¿cuánto tardaría calentar 2.50×10^3 moles de gas diatómico (por ejemplo, una mezcla de oxígeno y nitrógeno, o aire) de unos helados 10.0°C a 25.0°C ? Considere que el calor específico molar a volumen constante del aire es $\frac{5}{2}R$. c) ¿Cuántos kilowatts-hora de electricidad se utilizan durante el tiempo calculado en b) y a qué precio, si el costo es $\$0.12$ por kilowatt-hora?

ESTRATEGIA Para el inciso a), encuentre la corriente con la ley de Ohm y sustituya en la expresión para potencia. El inciso b) es un proceso isovolumétrico, de modo que la energía térmica proporcionada por el calentador va toda al cambio en energía térmica, ΔU . Calcule esta cantidad con la primera ley de la termodinámica y divida entre la potencia para obtener el tiempo. Encontrar el número de kilowatts-hora utilizados, requiere de una simple técnica de conversión de unidades. Multiplicando por el costo por kilowatt se obtiene el costo total de operar el calentador por un tiempo dado.

SOLUCIÓN

a) Calcule la corriente y la salida de potencia.

Aplique la ley de Ohm para obtener la corriente:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{50.0 \text{ V}}{8.00 \Omega} = 6.25 \text{ A}$$

Sustituya en la ecuación 17.9 para encontrar la potencia:

$$P = I^2 R = (6.25 \text{ A})^2 (8.00 \Omega) = 313 \text{ W}$$

b) ¿Cuánto tarda en calentar el gas?

Calcule la transferencia de energía térmica a partir de la primera ley. Observe que $W = 0$ porque el volumen no cambia.

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U = nC_v \Delta T \\ &= (2.50 \times 10^3 \text{ mol}) \left(\frac{5}{2} \cdot 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \right) (298 \text{ K} - 283 \text{ K}) \\ &= 7.79 \times 10^5 \text{ J} \end{aligned}$$

Divida la energía térmica entre la potencia para obtener el tiempo:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{7.79 \times 10^5 \text{ J}}{313 \text{ W}} = 2.49 \times 10^3 \text{ s}$$

(continúa)

c) Calcule los kilowatt-hora utilizados y el costo.

Convierta la energía a kilowatt-hora, advirtiendo que $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$:

$$U = (7.79 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{s}) \left(\frac{1.00 \text{ kW}}{1.00 \times 10^3 \text{ W}} \right) \left(\frac{1.00 \text{ h}}{3.60 \times 10^3 \text{ s}} \right) = 0.216 \text{ kWh}$$

Multiplique el costo por $\$0.12/\text{kWh}$ para obtener el costo total de operación:

$$\text{Costo} = (0.216 \text{ kWh})(\$0.12/\text{kWh}) = \$0.026$$

COMENTARIOS El número de moles de gas que se proporciona aquí es aproximadamente lo que se encontraría en una recámara. Calentar el aire con este calentador de espacio requiere de aproximadamente 40 minutos. Sin embargo, el cálculo no toma en cuenta pérdidas por conducción. Recuerde que una pared de concreto de 20 cm de grueso, como se calculó en el capítulo 11, permite la pérdida de más de 2 megajoules por hora mediante conducción!

PREGUNTA 17.6 Si el alambre del calentador se sustituye con un alambre de resistencia más baja, ¿el tiempo requerido para calentar el gas a) no cambia, b) aumenta o c) disminuye?

EJERCICIO 17.6 Un calentador de agua caliente se clasifica a $4.50 \times 10^3 \text{ W}$ y opera a $2.40 \times 10^2 \text{ V}$. a) Encuentre la resistencia en el elemento calefactor y la corriente. b) ¿Cuánto tarda en calentar 125 L de agua, de 20.0 a 50.0°C , si desprecia la conducción y otras pérdidas? c) ¿Cuál es el costo a razón de $\$0.12/\text{kWh}$?

RESPUESTAS a) 12.8 Ω , 18.8 A b) $3.49 \times 10^3 \text{ s}$ c) $\$0.52$

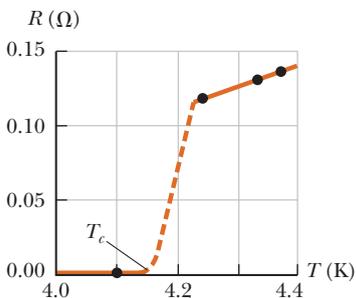


Figura 17.11 Resistencia frente a temperatura para una muestra de mercurio (Hg). La gráfica sigue la de un metal normal por encima de la temperatura crítica T_c . La resistencia cae a cero a la temperatura crítica, que es 4.2 K para el mercurio y permanece en cero para temperaturas más bajas.

Tabla 17.2 Temperaturas críticas para varios superconductores

Material	T_c (K)
Zn	0.88
Al	1.19
Sn	3.72
Hg	4.15
Pb	7.18
Nb	9.46
Nb ₃ Sn	18.05
Nb ₃ Ge	23.2
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92
Bi-Sr-Ca-Cu-O	105
Tl-Ba-Ca-Cu-O	125
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	134

17.7 Superconductores

Hay una clase de metales y compuestos con resistencias que caen virtualmente a *cero* abajo de cierta temperatura T_c llamada *temperatura crítica*. Estos materiales se conocen como **superconductores**. La gráfica de resistencia frente a temperatura para un superconductor sigue la de un metal normal a temperaturas por encima de T_c (figura 17.11). Sin embargo, cuando la temperatura está en o por debajo de T_c , la resistencia súbitamente cae a cero. Este fenómeno lo descubrió en 1911 el físico danés H. Kamerlingh Onnes cuando él y un estudiante graduado trabajaban con mercurio, que es un superconductor por abajo de 4.1 K. Mediciones recientes demostraron que las resistividades de los superconductores por debajo de T_c son menores que $4 \times 10^{-25} \Omega \cdot \text{m}$, alrededor de 10^{17} veces menor que la resistividad del cobre y en la práctica considerado como cero.

En la actualidad se conocen miles de superconductores, incluidos metales comunes como aluminio, estaño, plomo, zinc e indio. La tabla 17.2 menciona las temperaturas críticas de varios superconductores. El valor de T_c es sensible a la composición química, presión y estructura cristalina. De manera muy interesante el cobre, la plata y el oro, que son excelentes conductores, no muestran superconductividad.

Una característica verdaderamente notable de los superconductores es que, una vez que la corriente se establece en ellos, persiste *sin algún voltaje aplicado* (porque $R = 0$). De hecho, ¡se observó que corrientes estacionarias en rizados superconductores persistieron durante años sin decaimiento aparente!

Un importante desarrollo en física, que creó mucha excitación en la comunidad científica, fue el descubrimiento de superconductores de alta temperatura con base de óxido de cobre. La excitación comenzó con una publicación en 1986 por parte de J. Georg Bednorz y K. Alex Müller, científicos del IBM Zurich Research Laboratory en Suiza, en la que reportaron evidencia para superconductividad a una temperatura cercana a 30 K en un óxido de bario, lantano y cobre. Bednorz y Müller recibieron el Premio Nobel de física en 1987 por su importante descubrimiento. El descubrimiento fue notable porque la temperatura crítica era significativamente mayor que la de cualquier superconductor anteriormente conocido. Poco después, se investigó una nueva familia de compuestos y la actividad investigadora en el campo de la superconductividad avanzó vigorosamente. A principios de 1987, grupos en la Universidad de Alabama en Huntsville y la Universidad de Houston anunciaron el descubrimiento de superconductividad a aproximadamente 92 K en un óxido de itrio, bario y cobre (YBa₂Cu₃O₇). A finales de 1987, equipos de científicos de Japón y Estados Unidos reportaron superconductividad a 105 K en un óxido de bismuto,

estroncio, calcio y cobre. Más recientemente, científicos reportaron superconductividad a temperaturas tan altas como 150 K en un óxido que contiene mercurio. La búsqueda de novedosos materiales superconductores continúa, con la esperanza de algún día obtener un material superconductor a temperatura ambiente. Esta investigación es importante tanto por razones científicas como por aplicaciones prácticas. Un superconductor cerámico que levita un imán permanente se muestra en la figura 17.12.

Una importante y útil aplicación es la construcción de imanes superconductores en los cuales la intensidad de los campos magnéticos sean aproximadamente 10 veces mayor que la de los mejores electroimanes normales. Tales imanes se consideran como un medio para almacenar energía. La idea de usar líneas eléctricas superconductoras para transmitir electricidad de manera eficiente también recibe seria consideración. Se han construido modernos dispositivos electrónicos superconductores que consisten en dos delgadas películas superconductoras, separadas por un delgado aislante. Entre estos dispositivos están los magnetómetros (dispositivos medidores de campo magnético) y varios dispositivos microondas.

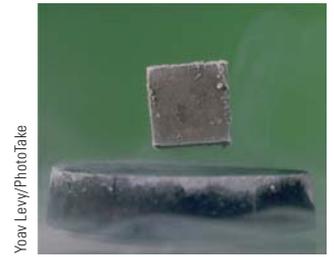


Figura 17.12 Un pequeño imán permanente flota libremente sobre un disco cerámico hecho de un superconductor enfriado con nitrógeno líquido. El superconductor tiene resistencia eléctrica cero y expulsa cualquier campo magnético aplicado desde el interior del superconductor creando una imagen especular de los polos magnéticos del imán permanente. Este “efecto Meissner” resulta en la levitación magnética del imán permanente.

17.8 Actividad eléctrica en el corazón **BIO**

Electrocardiogramas

Toda acción que involucra los músculos del cuerpo se inicia mediante actividad eléctrica. Los voltajes producidos por la acción muscular en el corazón son particularmente importantes para los médicos. Pulsos de voltaje hacen que el corazón lata y las ondas de excitación eléctrica que recorren el corazón, asociadas con el latido cardiaco, se conducen a través del cuerpo vía los fluidos corporales. Estos pulsos de voltaje son lo suficientemente grandes como para detectarse mediante un equipo de monitoreo adecuado unido a la piel. Un voltímetro sensible, que hace buen contacto eléctrico con la piel mediante contactos unidos con pasta conductora, se puede usar para medir los pulsos cardiacos, que por lo general son del orden de 1 mV en la superficie del cuerpo. Los pulsos de voltaje se pueden registrar en un instrumento llamado **electrocardiógrafo** y el patrón que se registra con este instrumento se llama **electrocardiograma** (ECG). Para entender la información contenida en un patrón ECG, es necesario describir primero los principios subyacentes concernientes a la actividad eléctrica en el corazón.

La aurícula derecha del corazón contiene un conjunto especializado de fibras musculares llamadas nodo SA (sinoauricular) que inician el latido cardiaco (figura 17.13). Los impulsos eléctricos que se originan en estas fibras gradualmente se dispersan de célula a célula a lo largo de los músculos auriculares derecho e izquierdo, lo que causa su contracción. El pulso que pasa a través de las células musculares con frecuencia se llama *onda de despolarización* debido a su efecto sobre células individuales. Si una célula muscular individual se examina en su estado de reposo, sobre su superficie se encontraría una distribución de carga eléctrica de doble capa, como se muestra en la figura 17.14a. El impulso generado por el nodo SA momentánea y localmente permite que la carga positiva en el exterior de la célula fluya hacia adentro y neutralice la carga negativa en la capa interior. Este efecto cambia la distribución de carga de la célula con la que se muestra en la figura 17.14b. Una vez que la onda de despolarización pasa a través de una célula muscular cardiaca individual, la célula recupera la distribución de carga de estado en reposo (positivo afuera, negativo adentro)

APLICACIÓN

Electrocardiogramas

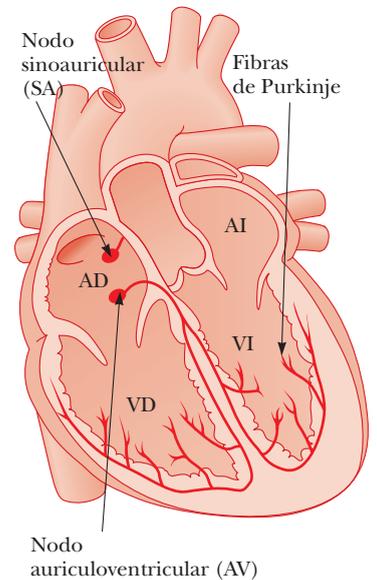


Figura 17.13 Sistema de conducción eléctrica del corazón humano. (AD: aurícula derecha; AI: aurícula izquierda; VD: ventrículo derecho; VI: ventrículo izquierdo.)

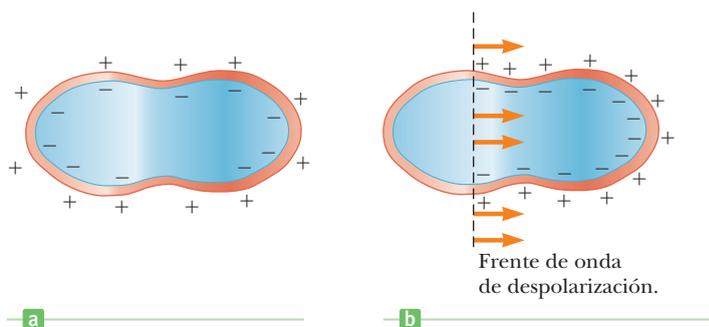


Figura 17.14 a) Distribución de carga de una célula muscular en la aurícula antes de que una onda de despolarización pase a través de la célula. b) Distribución de carga conforme pasa la onda.

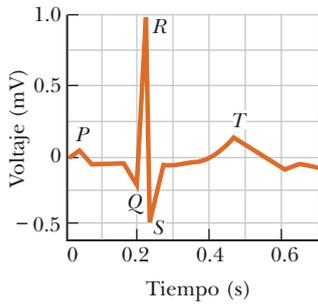


Figura 17.15 Un ECG de respuesta para un corazón normal.

BIO APLICACIÓN

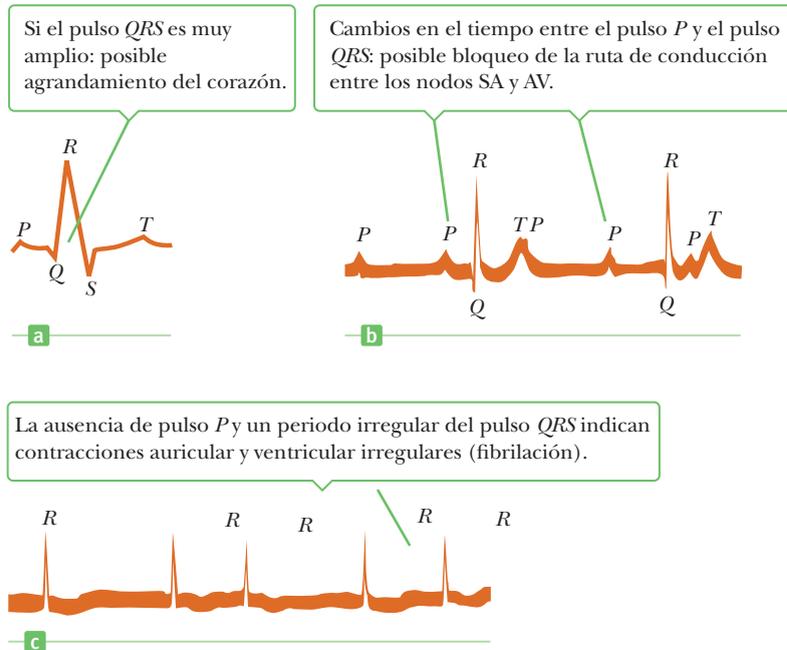
Marcapasos cardiacos

que se muestra en la figura 17.14a aproximadamente en 250 ms. Cuando el impulso llega al nodo auriculoventricular (AV) (figura 17.13), los músculos de la aurícula comienzan a relajarse y el pulso se dirige hacia los músculos ventriculares mediante el nodo AV. Los músculos de los ventrículos se contraen conforme la onda de despolarización se dispersa a través de los ventrículos a lo largo de un grupo de fibras llamadas *fibras de Purkinje*. Entonces los ventrículos se relajan después que el pulso pasa a través de ellos. En este punto, el nodo SA de nuevo se dispara y el ciclo se repite.

En la figura 17.15 se muestra un bosquejo de la actividad eléctrica registrada en un ECG para un latido de un corazón normal. El pulso que se indica con *P* ocurre justo antes que la aurícula comience a contraerse. El pulso *QRS* ocurre en el ventrículo justo antes que se contraiga y el pulso *T* ocurre cuando las células en los ventrículos comienzan a recuperarse. En la figura 17.16 se muestran los ECG para un corazón anormal. La porción *QRS* del patrón que se muestra en la figura 17.16a es más ancha que lo normal, lo que indica que el paciente puede tener un corazón agrandado. (¿Por qué?) La figura 17.16b indica que no hay una relación constante entre el pulso *P* y el pulso *QRS*. Esto sugiere un bloqueo en la ruta de conducción eléctrica entre los nodos SA y AV que resulta en que aurículas y ventrículos laten de manera independiente e ineficiente bombeo del corazón. Finalmente, la figura 17.16c muestra una situación donde no hay pulso *P* y un espaciamiento irregular entre los pulsos *QRS*. Esto es sintomático de contracción auricular irregular, que se llama *fibrilación*. En esta condición, las contracciones auriculares y ventriculares son irregulares.

Como se mencionó anteriormente, el nodo sinoauricular dirige el corazón a latir al ritmo adecuado, por lo general aproximadamente 72 latidos por minuto. Sin embargo, enfermedades o el proceso de envejecimiento pueden dañar el corazón y lentificar su latido, y tal vez sea necesario un auxiliar médico en forma de *marcapasos cardiaco* unido al corazón. Este dispositivo eléctrico del tamaño de una caja de cerillos, implantado bajo la piel, tiene una terminal que se conecta a la pared del ventrículo derecho. Los pulsos de esta terminal estimulan al corazón para que mantenga su propio ritmo. En general, un marcapasos se diseña para producir pulsos a una tasa de aproximadamente 60 por minuto, ligeramente menor que el número normal de latidos por minuto, pero suficientes para mantener la vida. Los circuitos consisten en un capacitor que se carga hasta cierto voltaje a partir de una batería

Figura 17.16 ECG anormales.



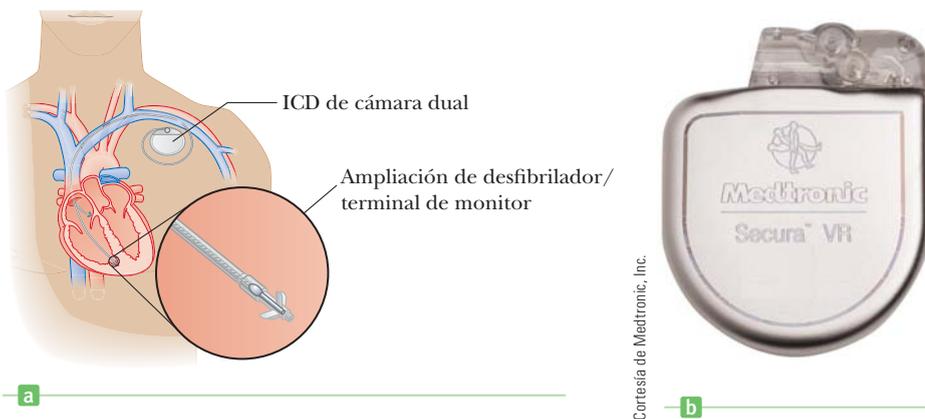


Figura 17.17 a) ICD de cámara dual con terminales en el corazón. Una terminal monitorea y estimula la aurícula derecha y la otra monitorea y estimula el ventrículo derecho. b) ICD Medtronic de cámara dual.

de litio y luego se descarga. El diseño del circuito es tal que, si el corazón late de manera normal, el capacitor no carga completamente y no envía pulsos al corazón.

Una sala de emergencias en el pecho

En junio de 2001, una operación al vicepresidente estadounidense Dick Cheney enfocó la atención en el progreso para el tratamiento de los problemas cardiacos con pequeños dispositivos eléctricos implantados. Llamado adecuadamente “una sala de emergencias en el pecho” por el médico que atendió a Cheney, los dispositivos llamados desfibriladores cardioversores implantables (**ICD**, por sus siglas en inglés) pueden monitorear, registrar y procesar lógicamente las señales cardiacas y luego suministrar diferentes señales correctivas a corazones que laten muy lentamente, muy rápidamente o de manera irregular. ¡Los ICD incluso pueden monitorear y enviar señales a aurículas y ventrículos de manera independiente! La figura 17.17a muestra un bosquejo de un ICD con terminales conductoras que se implantan en el corazón. La figura 17.17b muestra un ICD real con cámara dual encapsulado en titanio.

Los ICD más recientes son sofisticados dispositivos capaces de muchas funciones:

1. monitorear las cámaras auriculares y ventriculares para diferenciar entre arritmias auriculares y ventriculares potencialmente mortales, que requieren una regulación provocada
2. almacenamiento aproximado de media hora de señales cardiacas que un médico puede leer fácilmente
3. reprogramarse con facilidad mediante una vara magnética externa
4. realizar complicados análisis y comparaciones de señales
5. suministrar señales rítmicas repetitivas de 0.25 a 10 V para acelerar o frenar un corazón que funciona mal o un pulso de alto voltaje de aproximadamente 800 V para detener la condición potencialmente mortal de fibrilación ventricular, en la que el corazón se agita rápidamente en lugar de latir (las personas que experimentaron tal sacudida de alto voltaje dicen que se siente como una patada o una bomba que estalla en el pecho)
6. ajustar automáticamente el número de pulsos rítmicos por minuto para coincidir con la actividad del paciente

Los ICD se impulsan mediante baterías de litio y tienen tiempos de vida implantados de cuatro a seis años. En la tabla 17.3 se proporcionan algunas propiedades básicas de estos ICD ajustables. En la tabla, *taquicardia* significa “latido cardiaco rápido” y *bradicardia* significa “latido cardiaco lento”. Un factor clave para el desarrollo de pequeños implantes eléctricos que funcionan como desfibriladores es el desarrollo de capacitores con capacitancia relativamente grande ($125 \mu\text{F}$) y pequeño tamaño físico.

BIO APLICACIÓN

Desfibriladores cardioversores implantables

Tabla 17.3 Propiedades de los desfibriladores cardioversores implantables

Especificaciones físicas	
Masa (g)	85
Tamaño (cm)	$7.3 \times 6.2 \times 1.3$ (aproximadamente cinco monedas de dólar de plata apiladas)
Ritmo antitaquicardia	
	ICD entrega un estallido de pulsos de baja energía críticamente cronometrados
Número de estallidos	1–15
Longitud de ciclo de estallido (ms)	200–552
Número de pulsos por estallido	2–20
Amplitud de pulso (V)	7.5 o 10
Ancho de pulso (ms)	1.0 o 1.9
Desfibrilación de alto voltaje	
Energía de pulso (J)	37 almacenados/33 entregados
Amplitud de pulso (V)	801
Ritmo de bradicardia	
	Un ICD de cámara dual puede entregar de manera estable pulsos repetitivos tanto a la aurícula como al ventrículo
Frecuencia base (latidos/minuto)	40–100
Amplitud de pulso (V)	0.25–7.5
Ancho de pulso (ms)	0.05, 0.1–1.5, 1.9

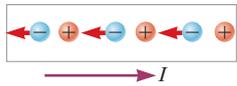
Nota: Para más información, visita www.photoncd.com/specs.html.

■ **RESUMEN**

17.1 Corriente eléctrica

La **corriente eléctrica promedio** I en un conductor se define como

$$I_{\text{prom}} \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1a]$$



Corriente es la tasa de flujo de carga a través de una superficie.

donde ΔQ es la carga que pasa a través de una sección transversal del conductor en el tiempo Δt . La unidad SI de corriente es el **ampere** (A); $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$. Por convención, la dirección de la corriente es la dirección de flujo de la carga positiva.

La **corriente instantánea** I es el límite de la corriente promedio conforme el intervalo de tiempo tiende a cero:

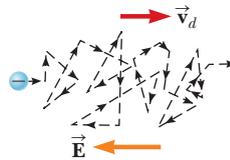
$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} I_{\text{prom}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [17.1b]$$

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

La corriente en un conductor se relaciona con el movimiento de los portadores de carga mediante

$$I = nqv_d A \quad [17.2]$$

donde n es el número de portadores de carga móviles por unidad de volumen, q es la carga de cada portador, v_d es la velocidad de deriva de las cargas y A es el área transversal del conductor.

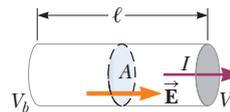


La corriente I en un conductor está relacionada con el número de densidad n de los conductores de carga, la carga q por conductor, la velocidad de deriva \vec{v}_d y el área de sección transversal A del conductor.

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

La **resistencia** R de un conductor se define como la razón de la diferencia de potencial a través del conductor, a la corriente en él:

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad [17.3]$$



La diferencia de potencial ΔV es proporcional a la corriente, I .

Las unidades SI de resistencia son volts por ampere, u **ohms** (Ω); $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$.

La **ley de Ohm** describe muchos conductores para los cuales el voltaje aplicado es directamente proporcional a la corriente que causa. La constante de proporcionalidad es la resistencia:

$$\Delta V = IR \quad [17.4]$$

Si un conductor tiene longitud ℓ y área transversal A , su **resistencia** es

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad [17.5]$$

donde ρ es una propiedad intrínseca del conductor llamada **resistividad eléctrica**. La unidad SI de resistividad es el **ohmetro** ($\Omega \cdot \text{m}$).

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

Sobre un rango limitado de temperaturas, la resistividad de un conductor varía con la temperatura de acuerdo con la expresión

$$\rho = \rho_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.6]$$

donde α es el **coeficiente de temperatura de la resistividad** y ρ_0 es la resistividad a alguna temperatura de referencia T_0 (que por lo general se considera como 20 °C).

La resistencia de un conductor varía con la temperatura de acuerdo con la expresión

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad [17.7]$$

17.6 Energía eléctrica y potencia

Si a través de un dispositivo eléctrico se mantiene una diferencia de potencial ΔV , la **potencia**, o tasa a la que se suministra energía al dispositivo, es

$$P = I\Delta V \quad [17.8]$$

Puesto que la diferencia de potencial a través de un resistor es $\Delta V = IR$, la **potencia entregada a un resistor** se puede expresar como

$$P = I^2R = \frac{\Delta V^2}{R} \quad [17.9]$$

Un **kilowatt-hora** es la cantidad de energía convertida o consumida en una hora por un dispositivo suministrado con potencia a la tasa de 1 kW. Es equivalente a

$$1 \text{ kWh} = 3.60 \times 10^6 \text{ J} \quad [17.10]$$

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un alambre conduce una corriente de 1.6 A. ¿Cuántos electrones por segundo pasan por un punto dado en el alambre? Elija la mejor estimación. a) 10^{17} b) 10^{18} c) 10^{19} d) 10^{20} e) 10^{21}
- El alambre A tiene la misma longitud y el doble del radio del alambre B. Ambos alambres están hechos del mismo material y portan la misma corriente. ¿Cuál de las siguientes ecuaciones es verdadera en cuanto a las velocidades de deriva v_A y v_B de los electrones en los alambres? a) $v_A = 2v_B$ b) $v_A = v_B$ c) $v_A = v_B/2$ d) $v_A = 4v_B$ e) $v_A = v_B/4$
- Un alambre de metal de la resistencia R se corta en tres partes iguales que se colocan una junto a la otra para formar un nuevo cable con una longitud igual a un tercio de la longitud original. ¿Cuál es la resistencia de este nuevo cable? a) $\frac{1}{3}R$ b) $\frac{1}{9}R$ c) R d) $3R$ e) $9R$
- Tres alambres están hechos de cobre y tienen secciones transversales circulares. El alambre 1 tiene una longitud L y radio r . El alambre 2 tiene una longitud L y radio $2r$. El alambre 3 tiene una longitud $2L$ y radio $3r$. ¿Cuál alambre tiene la menor resistencia? a) alambre 1 b) alambre 2 c) alambre 3 d) Los tres alambres tienen la misma resistencia. e) No se proporciona suficiente información para responder la pregunta.
- Las baterías de automóviles son a menudo clasificadas en amperes-hora. ¿Esta información designa la cantidad de a) corriente, b) potencia, c) energía, d) carga, o e) del potencial que la batería puede suministrar?
- En la figura POM17.6 se muestra el comportamiento corriente frente a voltaje de cierto dispositivo eléctrico. Cuando la diferencia de potencial a través del dispositivo

es 2 V, ¿cuál es la resistencia? a) 1Ω b) $\frac{3}{4}\Omega$ c) $\frac{4}{3}\Omega$ d) indefinido e) ninguno de éstos

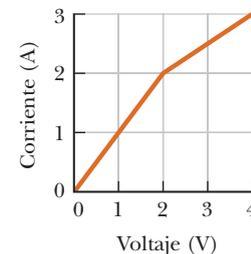


Figura POM17.6 Preguntas de opción múltiple 6 y 9.

- Un televisor a color extrae aproximadamente 2.5 A cuando se conecta a una fuente de 120 V. ¿Cuál es el costo (con energía eléctrica a 8 centavos/kWh) de hacer funcionar el aparato durante 8.0 horas? a) 2.0 centavos b) 4.0 centavos c) 19 centavos d) 40 centavos e) 62 centavos
- Un alambre metálico tiene una resistencia de 10.00Ω a una temperatura de 20.0°C . Si el mismo alambre tiene una resistencia de 10.55Ω a 90.0°C , ¿cuál es la resistencia de este mismo alambre cuando su temperatura es -20°C ? a) 0.700Ω b) 9.69Ω c) 10.3Ω d) 13.8Ω e) 6.59Ω
- En la figura POM17.6 se muestra el comportamiento corriente frente a voltaje de cierto dispositivo eléctrico. Cuando la diferencia de potencial a través del dispositivo es 3 V, ¿cuál es la resistencia? a) 0.83Ω b) 1.2Ω c) 3.0Ω d) 1.33Ω e) 2.3Ω

10. Tres resistores, A, B y C, se conectan en paralelo y unen una batería; la resistencia de A es la menor y la resistencia de C es la mayor. ¿Cuál resistor porta más corriente? a) A b) B c) C d) Todos los alambres portan la misma corriente. e) Se necesita más información para responder la pregunta.
11. Una diferencia de potencial de 1.0 V se mantiene a través de un resistor de 10.0Ω durante un periodo de 20 s. ¿Qué carga total pasa a través del alambre en este intervalo de tiempo? a) 200 C b) 20 C c) 2 C d) 0.005 C e) 0.05 C
12. Tres resistores, A, B y C, se conectan en serie en un lazo cerrado con una batería; la resistencia de A es la menor y la resistencia de C es la mayor. ¿A través de cuál resistor la caída de voltaje es mayor? a) A b) B c) C d) Las caídas de voltaje son iguales para cada uno. e) Se necesita más información para responder la pregunta.
13. Dos conductores hechos del mismo material se conectan a través de la misma diferencia de potencial. El conductor A tiene el doble de diámetro y dos veces la longitud del conductor B. ¿Cuál es la relación de la potencia suministrada a A a la potencia suministrada a B? a) 8 b) 4 c) 2 d) 1 e) $\frac{1}{2}$
14. Dos cables A y B con secciones circulares están hechos del mismo metal y tienen la misma longitud, pero la resistencia del cable A es tres veces mayor que la del cable B. ¿Cuál es la proporción del área de sección transversal de A a la de B? a) 3 b) $\sqrt{3}$ c) 1 d) $1/\sqrt{3}$ e) $\frac{1}{3}$

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Hemos visto que un campo eléctrico debe existir dentro de un conductor que porta una corriente. ¿Cómo es posible esto, en vista del hecho de que, en electrostática, concluimos que el campo eléctrico debe ser cero dentro de un conductor?
- Use la teoría atómica de la materia para explicar por qué la resistencia de un material debe aumentar conforme su temperatura se incrementa.
- Si las cargas fluyen muy lentamente a través de un metal, ¿por qué no se requieren varias horas cuando una luz se enciende o cuando se mueve un switch?
- En una analogía entre flujo de tráfico y corriente eléctrica, a) ¿a qué correspondería la carga Q ? b) ¿A qué correspondería la corriente I ?
- Cuando el voltaje a través de cierto conductor se duplica, la corriente se triplica. ¿Qué puede concluir acerca del conductor?
- Dos focos se conectan uno con otro a un voltaje de 120 V. Uno tiene una potencia de 25 W, b) el otro de 100 W. ¿Cuál foco tiene la mayor resistencia? a) ¿Cuál foco porta más corriente?
- Con frecuencia, los artículos periodísticos contienen enunciados tales como “10000 volts de electricidad pasaron a través del cuerpo de la víctima”. ¿Qué está mal en este enunciado?
- Hay un antiguo consejo que se da a los experimentadores de “poner la mano en el bolsillo” cuando se trabaje alrededor de altos voltajes. ¿Por qué esta advertencia es buena idea?
- ¿Qué pasaría con la velocidad de desplazamiento de los electrones en un alambre y con la corriente en el mismo, si los electrones se mueven libremente sin resistencia a través del alambre?
- Algunos hogares tienen reductores de intensidad que se operan al girar una perilla. ¿Qué cambia en el circuito eléctrico cuando se gira la perilla?
- ¿Cuándo se entrega más potencia a un foco, inmediatamente después de encenderlo, el brillo aumenta o después de estar encendido durante algunos segundos, el brillo es estable?

■ PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

I. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign

C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

17.1 Corriente eléctrica

17.2 Visión microscópica: corriente y velocidad de deriva

1. Si una corriente de 80.0 mA existe en un alambre metálico, a) ¿cuántos electrones fluyen por una sección transversal dada del alambre en 10.0 min? b) ¿En qué dirección viajan los electrones con respecto a la corriente?
2. **C|C** Un alambre de cobre tiene una sección transversal circular con un radio de 1.25 mm. a) Si el alambre porta

una corriente de 3.70 A, determine la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. (Véase el ejemplo 17.2 para datos relevantes acerca del cobre.) b) Si todo lo demás se mantiene igual, ¿qué ocurre con la velocidad de deriva en los alambres hechos de metal que tienen mayor número de electrones de conducción por átomo que el cobre? Explique.

3. En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, un electrón en el estado de energía más bajo, se mueve con una velocidad de 2.19×10^6 m/s en una trayectoria circular que tiene un radio de 5.29×10^{-11} m. ¿Cuál es la corriente efectiva asociada con este electrón en órbita?
4. La corriente suministrada por una batería en un dispositivo portátil normalmente es 0.15 A. Encuentre el número de electrones que pasan a través del dispositivo en una hora.
5. Un experimento de un determinado laboratorio requiere de un cable de aluminio de longitud de 32.0 m y una resistencia de 2.50Ω a 20.0°C . ¿Qué diámetro de cable debe ser utilizado?
6. Si 3.25×10^{-3} kg de oro se depositan en el electrodo negativo de una celda electrolítica en un periodo de 2.78 h, ¿cuál es la corriente en la celda durante este periodo? Suponga que los iones de oro portan una unidad elemental de carga positiva.
7. **M** Una línea de transmisión de alto voltaje de 200 km de largo y 2.0 cm de diámetro porta una corriente estacionaria de 1000 A. Si el conductor es cobre con una densidad de carga libre de 8.5×10^{28} electrones por metro cúbico, ¿cuántos años tarda un electrón en recorrer toda la longitud del cable?
8. Un alambre de aluminio que porta una corriente de 5.0 A tiene un área transversal de 4.00×10^{-6} m². Determine la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. La densidad del aluminio es 2.70 g/cm³. Suponga que cada átomo proporciona tres electrones.
9. **PG** Un alambre de hierro tiene un área transversal de 5.00×10^{-6} m². Realice los pasos del a) al e) para calcular la velocidad de deriva de los electrones de conducción en el alambre. a) ¿Cuántos kilogramos hay en 1 mol de hierro? b) A partir de la densidad del hierro y el resultado del inciso a), calcule la densidad molar del hierro (el número de moles de hierro por metro cúbico). c) Use el número de Avogadro para calcular la densidad de número de los átomos de hierro. d) Obtenga la densidad de número de electrones de conducción, dado que hay dos electrones de conducción por átomo de hierro. e) Si el alambre porta una corriente de 30.0 A, calcule la velocidad de deriva de los electrones de conducción.

17.4 Resistencia, resistividad y ley de Ohm

10. Un calentador eléctrico porta una corriente de 13.5 A cuando opera a un voltaje de 1.20×10^2 V. ¿Cuál es la resistencia del calentador?

11. **BIO** Una persona siente un ligero choque si la corriente a lo largo de una trayectoria a través de sus dedos pulgar e índice supera $80 \mu\text{A}$. Compare el máximo voltaje posible sin choque a través de los dedos pulgar e índice con una resistencia de piel seca de $4.0 \times 10^5 \Omega$ y una resistencia de piel húmeda de 2000Ω .
12. Suponga que quiere fabricar un alambre uniforme a partir de 1.00 g de cobre. Si el alambre debe tener una resistencia $R = 0.500 \Omega$ y si todo el cobre se utiliza, ¿cuál será a) la longitud y b) el diámetro del alambre?
13. Para devanar una bobina calefactora se usará alambre de nicromo con radio transversal de 0.791 mm. Si la bobina debe transportar una corriente de 9.25 A cuando a través de sus extremos se aplique un voltaje de 1.20×10^2 V, determine a) la resistencia requerida de la bobina y b) la longitud de alambre que debe usar para devanar la bobina.
14. Un alambre de diámetro 0.800 mm y longitud 25.0 m tiene una medida de resistencia de 1.60Ω . ¿Cuál es la resistividad del alambre?
15. Se descubre que una diferencia de potencial de 12 V produce una corriente de 0.40 A en una longitud de 3.2 m de alambre, con un radio uniforme de 0.40 cm. ¿Cuál es a) la resistencia del alambre? b) ¿La resistividad del alambre?
16. **S** Se descubre que alambres de aluminio y cobre de igual longitud tienen la misma resistencia. ¿Cuál es la proporción entre sus radios?
17. **M** Un alambre de 50.0 m de largo y 2.00 mm de diámetro se conecta a una fuente con una diferencia de potencial de 9.11 V y la corriente es de 36.0 A. Suponga una temperatura de 20°C y, a partir de la tabla 17.1, identifique el metal del cual se hizo el alambre.
18. Un bloque rectangular de cobre tiene lados de 10, 20 y 40 cm de longitud. Si el bloque se conecta a una fuente de 6.0 V a través de dos de sus caras opuestas, ¿cuáles son a) la máxima corriente y b) la mínima corriente que puede transportar el bloque?
19. Un alambre con longitud inicial L_0 y radio r_0 tiene una resistencia medida de 1.0Ω . El alambre se lleva bajo esfuerzo de tensión a un nuevo radio uniforme $r = 0.25r_0$. ¿Cuál es la nueva resistencia del alambre?
20. **BIO C|C** El cuerpo humano puede exhibir un amplio rango de resistencia a la corriente, dependiendo de la trayectoria de la corriente, área de contacto y sudoración de la piel. Suponga que la resistencia a través del pecho, desde la mano izquierda hasta la mano derecha, es $1.0 \times 10^6 \Omega$. a) ¿Cuánto voltaje se requiere para causar posible fibrilación cardíaca en un hombre, que corresponde a 500 mA de corriente directa? b) ¿Por qué cuando se trabaja con electricidad alrededor se deben usar zapatos con suela de goma y guantes de hule?
21. **S** A partir de la ley de Ohm, demuestre que $E = J\rho$, donde E es la magnitud del campo eléctrico (supuesto constante) y $J = I/A$ se llama densidad de corriente. De hecho, el resultado es verdadero en general.

17.5 Variación de la resistencia con la temperatura

22. Si cierto alambre de plata tiene una resistencia de 6.00Ω a 20.0°C , ¿qué resistencia tendrá a 34.0°C ?
23. Mientras toma fotografías en Death Valley en un día cuando la temperatura es de 58.0°C , Bill Hiker encuentra que cierto voltaje aplicado a un alambre de cobre produce una corriente de 1.000 A . Entonces Bill viaja hacia la Antártida y aplica el mismo voltaje al mismo alambre. ¿Qué corriente registra ahí si la temperatura es -88.0°C ? Suponga que no ocurren cambios a la forma y tamaño del alambre.
24. **C/C** Una longitud de alambre de aluminio tiene una resistencia de 30.0Ω a 20.0°C . Cuando el alambre se calienta en un horno y alcanza equilibrio térmico, la resistencia del alambre aumenta a 46.2Ω . a) Desprecie la expansión térmica y determine la temperatura del horno. b) Cualitativamente, ¿cómo esperaría usted que la expansión térmica afecte la respuesta?
25. El oro es el más dúctil de todos los metales. Por ejemplo, un gramo de oro se puede atraer a un cable de 2.40 kilómetros de largo. La densidad del oro es de $19.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ y su resistividad es de $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$? ¿Cuál es la resistencia de un alambre a 20.0°C ?
26. ¿A qué temperatura el aluminio tendrá una resistividad que sea tres veces la resistividad del cobre a temperatura ambiente?
27. A 20°C , el resistor de carbono en un circuito eléctrico conectado a una batería de 5.0 V tiene una resistencia de $2.0 \times 10^2 \Omega$. ¿Cuál es la corriente en el circuito cuando la temperatura del carbono se eleva a 80°C ?
28. Un alambre de 3.00 m de longitud y 0.450 mm^2 de área transversal tiene una resistencia de 41.0Ω a 20°C . Si su resistencia aumenta a 41.4Ω a 29.0°C , ¿cuál es el coeficiente de temperatura de la resistividad?
29. **M** a) Un alambre de cobre de 34.5 m de longitud a 20.0°C tiene un radio de 0.25 mm . Si a través de la longitud del alambre se aplica una diferencia de potencial de 9.0 V , determine la corriente en el alambre. b) Si el alambre se calienta a 30.0°C mientras se mantiene la diferencia de potencial de 9.0 V , ¿cuál es la corriente resultante en el alambre?
30. Una ingeniera necesita una resistencia con temperatura de cero global y un coeficiente de resistencia a 20.0°C . Ella diseña un par de cilindros circulares, uno de carbón y uno de nicromo como se muestra en la figura P17.30. El dispositivo debe tener una resistencia total de $R_1 + R_2 = 10.0 \Omega$ independiente de la temperatura y un radio uniforme $r = 1.50 \text{ mm}$. No haga caso de la expansión térmica de los cilindros y suponga que ambos están siempre a la misma temperatura. a) ¿Puede cumplir con el objetivo de diseño con este método? b) En caso afirmativo, indicar lo que usted puede determinar acerca de la longitud L_1 y L_2 de cada segmento. Si no es así, explique.



Figura P17.30

31. **BIO** En una forma de pletismógrafo (un dispositivo para medir volumen), un tubo capilar de caucho, con diámetro interior de 1.00 mm , se llena con mercurio a 20°C . La resistencia del mercurio se mide con la ayuda de electrodos sellados en los extremos del tubo. Si 100.00 cm del tubo se enrollan en espiral alrededor del brazo de un paciente, el flujo sanguíneo durante un latido cardíaco hace que el brazo se expanda, lo que estira el tubo a una longitud de 100.04 cm . A partir de esta observación y si supone simetría cilíndrica, puede encontrar el cambio en volumen del brazo, lo que da un indicio del flujo sanguíneo. a) Calcule la resistencia del mercurio. b) Calcule el cambio fraccional en resistencia durante el latido cardíaco. Considere $\rho_{\text{Hg}} = 9.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. *Sugerencia:* Debido a que el volumen cilíndrico es constante, $V = A_i L_i = A_f L_f$ y $A_f = A_i (L_i / L_f)$.
32. Un termómetro con resistencia de platino tiene resistencias de 200.0Ω cuando se coloca en un baño de hielo a 0°C y 253.8Ω cuando se sumerge en un crisol que contiene potasio fundido. ¿Cuál es el punto de fusión del potasio? (*Sugerencia:* Determine primero la resistencia del termómetro con resistencia de platino a temperatura ambiente, 20°C .)

17.6 Energía eléctrica y potencia

33. Suponga que su wafflera se clasifica a 1.00 kW cuando se conecta a una fuente de $1.20 \times 10^2 \text{ V}$. a) ¿Qué corriente transporta la wafflera? b) ¿Cuál es su resistencia?
34. Si la energía eléctrica cuesta 12 centavos, o $\$0.12$, por kilowatt-hora, ¿cuánto cuesta a) tener encendida un foco de 100 W durante 24 horas? b) Operar un horno eléctrico durante 5.0 h , si porta una corriente de 20.0 A a 220 V ?
35. **C/C** Los códigos de construcción residencial por lo general requieren el uso de alambre de cobre de calibre 12 (diámetro de 0.205 cm) para los recipientes de cableado. Tales circuitos transportan corrientes tan grandes como 20.0 A . Si un cable de menor diámetro (con un número de calibre superior) lleva una gran cantidad de corriente, el cable podría llegar a una temperatura elevada y causar un incendio. a) Calcule la velocidad a la que se produce energía interna en 1.00 m de alambre de cobre de calibre 12 que lleva 20.0 A . b) Repita el cálculo para un alambre de aluminio de calibre 12. c) Explique si un alambre de aluminio de calibre 12 sería tan seguro como un alambre de cobre.
36. Una línea de transmisión de alto voltaje, con una resistencia de $0.31 \Omega/\text{km}$ porta una corriente de 1000 A . La línea está a un potencial de 700 kV en la estación eléctrica y porta la corriente a una ciudad ubicada a 160 km de

- la estación. a) ¿Cuál es la pérdida de potencia debida a resistencia en la línea? b) ¿Qué fracción de la potencia transmitida representa esta pérdida?
37. **M** El elemento calefactor de una cafetera opera a 120 V y porta una corriente de 2.00 A. Si supone que el agua absorbe toda la energía convertida por el resistor, calcule cuánto tardará en calentar 0.500 kg de agua, de temperatura ambiente (23.0 °C) al punto de ebullición.
38. La potencia suministrada a un televisor típico blanco y negro es de 90 W cuando el aparato se conecta a 120 V. a) ¿Cuánta energía eléctrica consume este aparato en 1 hora? b) Un televisor a color extrae aproximadamente 2.5 A cuando se conecta a 120 V. ¿Cuánto tiempo se requiere para que consuma la misma energía eléctrica que consume el modelo de blanco y negro en 1 hora?
39. **C|C** El foco A está marcado como “25.0 W 120 V”, y el foco B está marcado “100 W 120 V”. Estas etiquetas significan que cada foco tiene su respectiva potencia entregada cuando se conectan a una fuente constante de 120 V. a) Encuentre la resistencia de cada foco. b) ¿En qué intervalo de tiempo pasa 1.00 C por un foco? c) ¿Es diferente la carga a su salida comparada con su entrada en el foco? Explique. d) ¿En qué intervalo de tiempo pasa 1.00 J por un foco? e) ¿Mediante qué mecanismos la energía entra y sale del foco? Explique. f) Halle el costo de funcionamiento de un foco de forma continua durante 30.0 días, suponiendo que la compañía eléctrica vende su producto a \$0.110 por kWh.
40. Cierta tostador tiene un elemento calefactor hecho de alambre de nicromo. Cuando el tostador se conecta por primera vez a una fuente de diferencia de potencial de 120 V (y el alambre está a una temperatura de 20.0 °C), la corriente inicial es 1.80 A, pero la corriente comienza a disminuir conforme el elemento resistivo se calienta. Cuando el tostador alcanza su temperatura operativa final, la corriente cae a 1.53 A. a) Determine la potencia que convierte el tostador cuando alcanza su temperatura operativa. b) ¿Cuál es la temperatura final del elemento calefactor?
41. Un cable de cobre se diseña para portar una corriente de 300 A con una pérdida de potencia de 2.00 W/m. ¿Cuál es el radio requerido de este cable?
42. Las baterías se clasifican en términos de ampere-horas ($A \cdot h$). Por ejemplo, una batería que puede entregar una corriente de 3.0 A durante 5.0 h se clasifica a 15 $A \cdot h$. a) ¿Cuál es la energía total, en kilowatt-horas, que se almacena en una batería de 12 V clasificada a 55 $A \cdot h$? b) A \$0.12 por kilowatt-hora, ¿cuál es el valor de la electricidad que se puede producir por esta batería?
43. **BIO** La diferencia de potencial a través de una neurona en reposo es de aproximadamente 75.0 mV y porta una corriente de más o menos 0.200 mA. ¿Cuánta potencia libera la neurona?
44. El costo de la electricidad varía ampliamente a lo largo de Estados Unidos; \$0.120/kWh es un valor típico. A este precio unitario, calcule el costo de a) dejar encendida durante 2 semanas la luz del pórtico, de 40.0 W, mientras usted está de vacaciones, b) hacer una tostada durante 3.00 min con una tostadora de 970 W y c) secar una carga de ropa en 40.0 min en una secadora de 5 200 W.
45. Una compañía eléctrica suministra desde las líneas de alimentación principal (120 V) la casa de un cliente con dos hilos de cobre, cada uno de ellos es de 50.0 m de largo y tiene una resistencia de 0.108 Ω por cada 300 m. a) Halle la diferencia de potencial en la casa del cliente para una corriente de carga de 110 A. Para esta corriente de carga, determine b) la potencia suministrada al cliente.
46. **C|C** Un oficinista usa un calentador de inmersión para calentar 250 g de agua en una taza ligera, cubierta, aislada, de 20 a 100 °C en 4.00 minutos. El calentador es un alambre resistencia de nicromo que se conecta a una fuente de poder de 120 V. Suponga que el alambre está a 100 °C a lo largo del intervalo de tiempo de 4.00 min. a) Calcule la potencia promedio requerida para calentar el agua a 100 °C en 4.00 min. b) Calcule la resistencia requerida en el elemento de calentamiento a 100 °C. c) Calcule la resistencia del elemento calefactor a 20.0 °C. d) Establezca una relación entre el diámetro del alambre, la resistividad a 20.0 °C, ρ_0 , la resistencia a 20.0 °C, R_0 , y la longitud L . e) Si $L = 3.00$ m, ¿cuál es el diámetro del alambre?
47. **S** Dos cables A y B que están hechos del mismo material y tienen la misma longitud, están conectados a través de la misma fuente de voltaje. Si la potencia suministrada al cable A es tres veces la potencia suministrada al cable B, ¿cuál es la relación de sus diámetros?
48. **C|C** Un alambre de tungsteno en un vacío tiene 15.0 cm de longitud y 1.00 mm de radio. A través de él se aplica una diferencia de potencial. a) ¿Cuál es la resistencia del alambre a 293 K? b) Suponga que el alambre alcanza una temperatura de equilibrio tal que emite 75.0 W en la forma de radiación. Si se desprecia la absorción de cualquier radiación desde su entorno, ¿cuál es la temperatura del alambre? (Nota: $e = 0.320$ para tungsteno.) c) ¿Cuál es la resistencia del alambre a la temperatura que se encontró en el inciso b)? Suponga que la temperatura cambia linealmente sobre este rango de temperatura. d) ¿Qué caída de voltaje se requiere a través del alambre? e) ¿Por qué los focos de tungsteno son energéticamente ineficientes como fuentes de luz?

Problemas adicionales

49. Si una batería se clasifica a 60.0 $A \cdot h$, ¿cuánta carga total puede entregar antes de “morir”?
50. Un automovilista olvidó apagar los faros de su auto mientras se estaciona en su garaje. Si la batería de 12 V en su auto se clasifica a 90.0 $A \cdot h$ y cada faro requiere 36 W de

potencia, ¿cuánto tardará la batería en descargarse por completo?

51. Considere un alambre de aluminio de diámetro 0.600 mm y longitud 15.0 m. La resistividad del aluminio a 20.0 °C es $2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$. a) Determine la resistencia de este cable a 20.0 °C. b) Si una batería de 9.00 V se conecta a los extremos del cable, encuentre la corriente en el cable.
52. Un alambre de cobre dado tiene una resistencia de 5.00 Ω a 20.0 °C, mientras que un alambre de tungsteno del mismo diámetro tiene una resistencia de 4.75 Ω a 20.0 °C. ¿A qué temperatura los dos cables tienen la misma resistencia?
53. **M** Un alambre particular tiene una resistividad de $3.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ y un área transversal de $4.0 \times 10^{-6} m^2$. Una longitud de este alambre se usará como un resistor que desarrollará 48 W de potencia cuando se conecte a través de una batería de 20 V. ¿Qué longitud de alambre se requiere?
54. Las aves que descansan sobre las líneas de transmisión de alto voltaje son una imagen común. El alambre de cobre sobre el cual se posan mide 2.2 cm de diámetro y porta una corriente de 50 A. Si las patas del ave están separadas 4.0 cm, calcule la diferencia de potencial a través de su cuerpo.
55. Se realiza un experimento para medir la resistividad eléctrica del nicromo en la forma de alambres con diferentes longitudes y áreas transversales. Para un conjunto de mediciones, un estudiante usa alambre calibre 30, que tiene una área transversal de $7.30 \times 10^{-8} m^2$. El estudiante mide la diferencia de potencial a través del alambre y la corriente en el alambre con un voltímetro y un amperímetro, respectivamente. Para cada una de las mediciones proporcionadas en la siguiente tabla, tomadas sobre alambres de tres longitudes diferentes, calcule la resistencia de los alambres y el correspondiente valor de la resistividad.

L (m)	ΔV (V)	I (A)	R (Ω)	ρ ($\Omega \cdot m$)
0.540		5.22		0.500
1.028		5.82		0.276
1.543		5.94		0.187

¿Cuál es el valor promedio de la resistividad y cómo se compara este valor con el valor dado en la tabla 17.1?

56. Una muestra de 50.0 g de un material conductor es todo lo que está disponible. La resistencia del material medida es $11 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, y la densidad es 7.86 g/cm³. Con el material se puede formar un alambre cilíndrico sólido que tiene una resistencia total de 1.5 Ω . a) ¿Qué longitud de alambre se requiere? b) ¿Cuál debe ser el diámetro del alambre?
57. Usted prepara el desayuno para sí mismo y un amigo con una wafflera de 1200 W y una cafetera de 500 W. Por lo general, usted opera estos aparatos desde un tomacorriente de 110 V durante 0.500 h cada día. a) A 12 centavos por kWh, ¿cuánto gasta en cocinar el desayuno durante un periodo de 30.0 días? b) Descubre que es adicto a los

waffles y le gustaría acceder a una wafflera de 2400 W que le permitirá cocinar el doble de waffles durante un periodo de media hora, pero usted sabe que el disyuntor de su cocina es un interruptor de 20 A. ¿Puede hacer la mejora?

58. La corriente en un conductor varía en el tiempo como se muestra en la figura P17.58. a) ¿Cuántos coulombs de carga pasan a través de una sección transversal del conductor en el intervalo de $t = 0$ a $t = 5.0$ s? b) ¿Qué corriente constante transportaría la misma carga total durante el intervalo de 5.0 s como hace la corriente real?

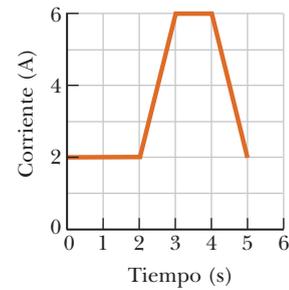


Figura P17.58

59. Un motor de 120 V tiene una salida de energía mecánica de 2.50 caballos de fuerza. Éste es 90.0% eficiente al convertir la energía eléctrica de la transmisión en energía mecánica. a) Encuentre la corriente en el motor. b) Determine la energía entregada al motor por la transmisión eléctrica en 3.00 h de operación. c) Si la compañía eléctrica cobra \$0.110/kWh, ¿cuál es el costo de hacer funcionar el motor por 3.00 h?
60. **C/C** Un elemento calefactor de nicromo en un horno tiene una resistencia de 8.0 Ω a 20 °C. a) ¿Cuál es su resistencia a 350 °C? b) ¿Qué hipótesis tiene que hacer para obtener su respuesta al inciso a)?
61. Un tramo de alambre metálico tiene un radio de $5.00 \times 10^{-3} m$ y una resistencia de 0.100 Ω . Cuando la diferencia de potencial a través del alambre es 15.0 V, se observa que la rapidez de deriva de los electrones es de $3.17 \times 10^{-4} m/s$. Sobre la base de estos datos, calcule la densidad de electrones libres en el alambre.
62. En cierto sistema estéreo, cada bocina tiene una resistencia de 4.00 Ω . El sistema se clasifica en 60.0 W por cada canal. Cada circuito de bocina incluye un fusible clasificado a una corriente máxima de 4.00 A. ¿Este sistema está protegido de manera adecuada contra sobrecarga?
63. Un resistor se construye con un material de $3.5 \times 10^5 \Omega \cdot m$ al que se le da forma de cilindro hueco de 4.0 cm de longitud y radios interior y exterior de 0.50 y 1.2 cm, respectivamente. Cuando está en uso, se aplica una diferencia de potencial entre los extremos del cilindro, lo que produce una corriente paralela a la longitud del cilindro. Determine la resistencia del cilindro.

64. **S** Cuando un alambre recto se calienta, su resistencia cambia de acuerdo con la ecuación

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

(ecuación 17.7), donde α es el coeficiente de temperatura de la resistividad. a) Demuestre que un resultado más preciso, que incluye el cambio en longitud y área de un alambre cuando se calienta, es

$$R = \frac{R_0[1 + \alpha(T - T_0)][1 + \alpha'(T - T_0)]}{[1 + 2\alpha'(T - T_0)]}$$

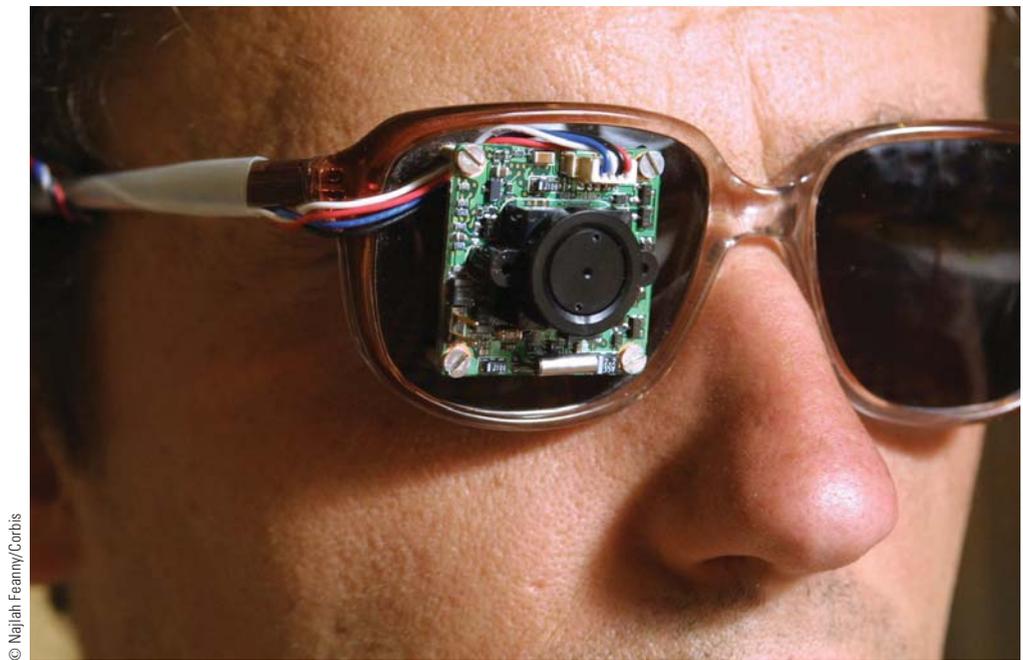
donde α' es el coeficiente de expansión lineal. (Véase el capítulo 10.) b) Compare los dos resultados para un alambre de cobre de 2.00 m de largo y 0.100 mm de radio, a partir de 20.0 °C y que se calienta a 100.0 °C.

65. **BIO** Un tubo de rayos X que se usa para terapia contra el cáncer opera a 4.0 MV, con un haz de 25 mA de corriente que golpea el blanco metálico. Casi toda la potencia

en el haz se transfiere a una corriente de agua que fluye a través de orificios perforados en el blanco. ¿Qué tasa de flujo, en kilogramos por segundo, se necesita si el aumento de temperatura (ΔT) del agua no debe superar 50 °C?

66. Un hombre quiere aspirar su automóvil con una aspiradora de bote clasificada en 535 W a 120 V. El automóvil está estacionado lejos del edificio, así que usa una extensión de 15.0 m de largo para conectar la aspiradora a una fuente de 120 V. Suponga que la aspiradora tiene resistencia constante. a) Si la resistencia de cada uno de los dos conductores de la extensión es 0.900 Ω , ¿cuál es la potencia real que se entrega a la aspiradora? b) Si, en vez de ello, la potencia es de al menos 525 W, ¿cuál debe ser el diámetro de cada uno de los dos conductores de cobre idénticos en el cable que compra el hombre? c) Repita el inciso b) si la potencia debe ser al menos de 532 W. (*Sugerencia:* Una solución simbólica puede simplificar los cálculos.)

Este paciente con deterioro visual usa un dispositivo de visión artificial. Una cámara en la lente envía video a una computadora portátil. Entonces, la computadora convierte el video en señales que estimulan implantes en la corteza visual del paciente, lo que le da suficiente visión para deambular por su cuenta.



© Najjah Feanny/Corbis

18

Circuitos de corriente directa

- 18.1 Fuentes de fem
- 18.2 Resistores en serie
- 18.3 Resistores en paralelo
- 18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos
- 18.5 Circuitos RC
- 18.6 Circuitos domésticos
- 18.7 Seguridad eléctrica
- 18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas

Baterías, resistores y capacitores se pueden usar en varias combinaciones para construir circuitos eléctricos, que dirigen y controlan el flujo de electricidad y la energía que portan. Tales circuitos posibilitan todas las comodidades modernas en una casa: luz eléctrica, quemadores de estufa y hornos eléctricos, máquinas lavadoras y un cúmulo de otros electrodomésticos y herramientas. Los circuitos eléctricos también se encuentran en los automóviles, en tractores que aumentan la productividad en las granjas y en todos los tipos de equipo médico que salvan tantas vidas cada día.

En este capítulo estudiará y analizará algunos circuitos simples de corriente directa. El análisis se simplifica con el uso de dos reglas conocidas como reglas de Kirchhoff, que se siguen del principio de conservación de la energía y de la ley de conservación de la carga. Se supone que la mayoría de los circuitos están en *estado estacionario*, lo cual significa que las corrientes son constantes en magnitud y dirección. El capítulo termina con un análisis de los circuitos que contienen resistores y capacitores, en los cuales la corriente varía con el tiempo.

18.1 Fuentes de fem

Una corriente se mantiene en un circuito cerrado mediante una fuente de fem.¹ Entre tales fuentes está cualquier dispositivo (por ejemplo, baterías y generadores) que aumentan la energía potencial de las cargas en circulación. Una fuente de fem se puede considerar como una “bomba de carga” que fuerza a los electrones a moverse en una dirección opuesta al campo electrostático dentro de la fuente. La fem \mathcal{E} de una fuente es el trabajo realizado por unidad de carga; por lo tanto, la unidad SI de fem es el volt.

¹El término originalmente fue una abreviatura para *fuerza electromotriz*, pero la fem en realidad no es una fuerza, así que se desalentó la forma larga.

Considere el circuito de la figura 18.1a, que consiste en una batería conectada a un resistor. Suponga que los alambres de conexión no tienen resistencia. Si desprecia la resistencia interna de la batería, la caída de potencial a través de la batería (el voltaje en terminales) es igual a la fem de la batería. Sin embargo, puesto que una batería real siempre tiene alguna resistencia interna r , el voltaje en terminales no es igual a la fem. El circuito de la figura 18.1a se puede describir esquemáticamente mediante el diagrama de la figura 18.1b. La batería, representada por el rectángulo rayado, consiste en una fuente de fem \mathcal{E} en serie con una resistencia interna r . Ahora imagine una carga positiva que se mueve a través de la batería desde a hasta b en la figura. Conforme la carga pasa de la terminal negativa a la positiva de la batería, el potencial de la carga aumenta por \mathcal{E} . Sin embargo, conforme la carga se mueve a través de la resistencia r , su potencial disminuye por la cantidad Ir , donde I es la corriente en el circuito. Por lo tanto, el voltaje en las terminales de la batería, $\Delta V = V_b - V_a$, está dado por

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir \quad [18.1]$$

A partir de esta expresión, vemos que \mathcal{E} es igual al voltaje en terminales cuando la corriente es cero, llamado **voltaje de circuito abierto**. Al inspeccionar la figura 18.1b, encontramos que el voltaje en las terminales ΔV también debe ser igual a la diferencia de potencial a través de la resistencia externa R , que con frecuencia se llama **resistencia de carga**; esto es, $\Delta V = IR$. Al combinar esta relación con la ecuación 18.1, se llega a

$$\mathcal{E} = IR + Ir \quad [18.2]$$

Al resolver para la corriente da como resultado

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

La ecuación anterior muestra que la corriente en este circuito simple depende tanto de la resistencia externa como de la batería y de la resistencia interna de la batería. Si R es mucho mayor que r , se puede despreciar r en el análisis (una opción que usualmente se selecciona).

Si la ecuación 18.2 se multiplica por la corriente I , obtenemos

$$I\mathcal{E} = I^2R + I^2r$$

Esta ecuación dice que la salida de potencia total $I\mathcal{E}$ de la fuente de fem se convierte a la tasa I^2R a la que se entrega energía a la resistencia de carga, más la tasa I^2r a la que se entrega energía a la resistencia interna. De nuevo, si $r \ll R$, la mayor parte de la potencia entregada por la batería se transfiere a la resistencia de carga.

A menos que se establezca de otro modo, en los ejemplos y problemas de fin de capítulo supondremos que la resistencia interna de una batería en un circuito es despreciable.

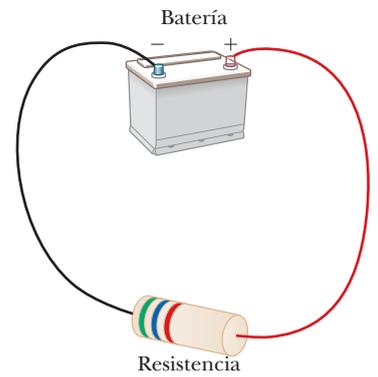
Examen rápido

18.1 Verdadero o Falso: Mientras se descarga, el voltaje en las terminales de una batería nunca puede ser mayor que la fem de la batería.

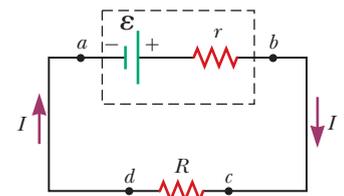
18.2 ¿Por qué una batería se calienta mientras está en uso?

18.2 Resistores en serie

Cuando dos o más resistores se conectan extremo con extremo como en la figura 18.2 (página 618), se dice que están en *serie*. Los resistores podrían ser dispositivos simples, como focos o elementos calefactores. Cuando dos resistores R_1 y R_2 se conectan a una batería como en la figura 18.2, **la corriente es la misma en los dos resistores porque cualquier carga que fluya a través de R_1 también debe fluir a través de R_2** . Esto es análogo al agua que fluye a través de una tubería con dos restricciones, que corresponden a R_1 y R_2 . Cualquier volumen de flujo de agua en un extremo en un intervalo dado, debe salir por el extremo opuesto.



a



b

Figura activa 18.1

a) Un circuito que consiste en un resistor conectado a las terminales de una batería. b) Diagrama de circuito de una fuente de fem \mathcal{E} que tiene resistencia interna r conectada a un resistor externo R .



Una variedad de baterías

Tip 18.1 ¿Qué es constante en una batería?

La ecuación 18.2 muestra que la corriente en un circuito depende de la resistencia de la batería, de modo que una batería no se puede considerar como fuente de corriente constante. Incluso el voltaje en las terminales de una batería, dado por la ecuación 18.1, no se puede considerar constante porque la resistencia interna puede cambiar (debido a calentamiento, por ejemplo, durante la operación de la batería). Sin embargo, una batería es una fuente de fem constante.

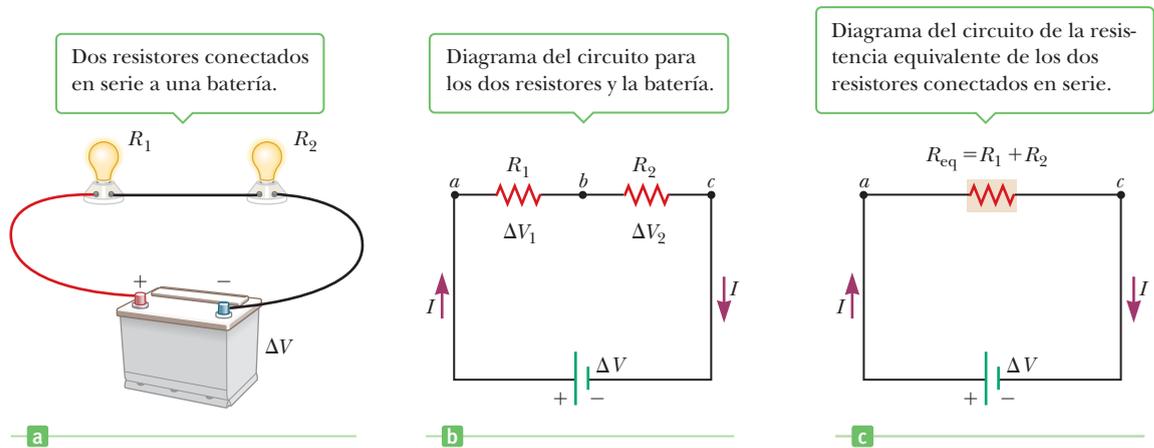


Figura activa 18.2

Conexión en serie a una batería, de dos resistores en forma de foco, R_1 y R_2 . Las corrientes en los resistores son las mismas y la resistencia equivalente de la combinación está dada por $R_{eq} = R_1 + R_2$.

Puesto que la diferencia de potencial entre a y b en la figura 18.2b es igual a IR_1 y la diferencia de potencial entre b y c es igual a IR_2 , la diferencia de potencial entre a y c es

$$\Delta V = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2)$$

Sin importar cuántos resistores se tengan en serie, la suma de las diferencias de potencial a través de los resistores es igual a la diferencia de potencial total a través de la combinación. Como veremos después, este resultado es una consecuencia de la conservación de la energía. La figura 18.2c muestra un resistor equivalente R_{eq} que puede sustituir los dos resistores del circuito original. El resistor equivalente tiene el mismo efecto sobre el circuito, debido a que resulta la misma corriente en el circuito que con los dos resistores. Al aplicar la ley de Ohm a esta ecuación, se tiene

$$\Delta V = IR_{eq}$$

Al igualar las dos expresiones anteriores, se tiene

$$IR_{eq} = I(R_1 + R_2)$$

o

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \text{ (combinación en serie)} \quad [18.3]$$

Una extensión del análisis anterior muestra que la resistencia equivalente de tres o más resistores conectados en serie es

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad [18.4]$$

Por lo tanto, **la resistencia equivalente de una combinación de resistores en serie es la suma algebraica de las resistencias individuales y siempre es mayor que cualquier resistencia individual.**

Note que, si falla el filamento de un foco en la figura activa 18.2a el circuito ya no estaría completo (existiría una condición de circuito abierto) y el segundo foco también se apagaría.

Resistencia equivalente de una combinación de resistores en serie

■ FÍSICA APLICADA 18.1 Luces de Navidad en serie

Un nuevo diseño de luces de Navidad les permite conectarse en serie. Un foco que falla en tal serie resultaría en un circui-

to abierto y todos los focos se apagarían. ¿Cómo se pueden rediseñar los focos para evitar que esto ocurra?

EXPLICACIÓN Si la serie de luces contiene el tipo usual de focos, un foco que falla sería difícil de ubicar. Cada foco tendría que sustituirse con un foco bueno, uno por uno, hasta encontrar el que falló. Si sucede que dos o más focos fallan en la serie de luces, encontrarla sería una labor tardada y pesada.

Las luces de Navidad usan focos especiales que tienen un lazo de alambre aislante (un puente o “jumper”) a través de los soportes conductores hacia los filamentos del foco (figura 18.3). Si el filamento se rompe y el foco falla, la resistencia del foco aumenta dramáticamente. Como resultado, la mayor parte del voltaje aplicado aparece a través del lazo de alambre. Este voltaje hace que el aislante alrededor del lazo de alambre se queme, lo que hace que el alambre metálico haga contacto eléctrico con los soportes. Esto produce una trayectoria conductora a través del foco, de modo que los otros focos permanecen encendidos. ■

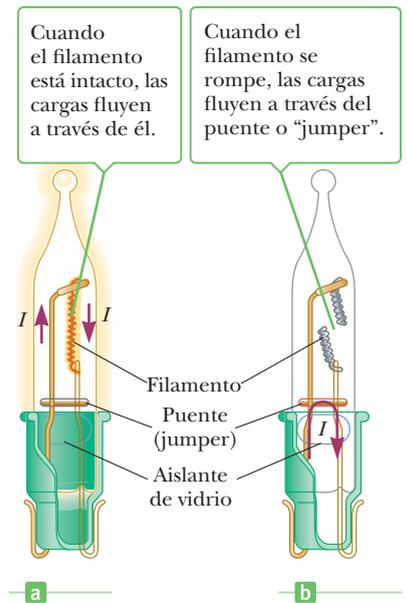


Figura 18.3 (Física aplicada 18.1) a) Diagrama esquemático de un moderno foco “miniatura” de fiesta, con una conexión puente para proporcionar una trayectoria de corriente si el filamento se rompe. Cuando el filamento está intacto, fluyen cargas en él. b) Foco con filamento roto. En este caso, fluyen cargas en la conexión puente.

■ Examen rápido

18.3 En la figura 18.4 la corriente se mide con el amperímetro en el fondo del circuito. Cuando se abre el interruptor, ¿la lectura en el amperímetro a) aumenta, b) disminuye o c) no cambia?

18.4 El circuito en la figura 18.4 consiste en dos resistores, un interruptor, un amperímetro y una batería. Cuando se cierra el interruptor, al resistor R_1 se entrega la potencia P_c . Cuando se abre el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es verdadero acerca de la potencia P_o que se entrega a R_1 ? a) $P_o < P_c$ b) $P_o = P_c$ c) $P_o > P_c$

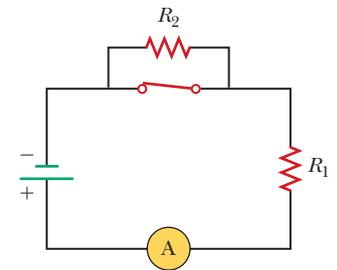


Figura 18.4 (Exámenes rápidos 18.3 y 18.4)

■ EJEMPLO 18.1 Cuatro resistores en serie

OBJETIVO Analizar varios resistores conectados en serie.

PROBLEMA Cuatro resistores se ordenan como se muestra en la figura 18.5a. Determine a) la resistencia equivalente del circuito y b) la corriente en el circuito si la fem de la batería es de 6.0 V. c) Calcule el potencial eléctrico en el punto A, si el potencial en la terminal positiva es de 6.0 V. d) Suponga que el voltaje en circuito abierto, o \mathcal{E} -fem, es de 6.2 V. Calcule la resistencia interna de la batería. e) ¿Qué fracción f de la energía de la batería es entregada a las resistencias de carga?

ESTRATEGIA Puesto que los resistores se conectan en serie, sume sus resistencias, lo que produce la resistencia equivalente. Entonces puede usar la ley de Ohm para encontrar la corriente. Para encontrar el potencial eléctrico en el punto A, calcule la caída de voltaje ΔV a través de la resistencia de 2.0- Ω y reste el resultado de 6.0 V. En el inciso d), utilice la ecuación 18.1 para encontrar la resistencia interna de la batería. La fracción de la potencia entregada a la resistencia de carga, es solamente la potencia entregada a la carga, ΔV , dividida por la potencia total $I\mathcal{E}$.

SOLUCIÓN

a) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Aplice la ecuación 18.4 y sume las resistencias:

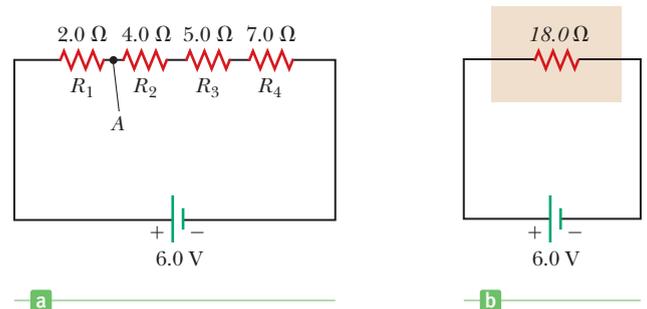


Figura 18.5 (Ejemplo 18.1) a) Cuatro resistores conectados en serie. b) Resistencia equivalente del circuito en a).

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 2.0 \, \Omega + 4.0 \, \Omega + 5.0 \, \Omega + 7.0 \, \Omega = 18.0 \, \Omega$$

(continúa)

b) Determine la corriente en el circuito.

Aplique la ley de Ohm al resistor equivalente en la figura 18.5b y resuelva para la corriente:

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{eq}}} = \frac{6.0 \text{ V}}{18.0 \Omega} = 0.33 \text{ A}$$

c) Calcule el potencial eléctrico en el punto A.

Aplique la ley de Ohm al resistor de 2.0Ω para encontrar la caída de voltaje a través de él:

$$\Delta V = IR = (0.33 \text{ A})(2.0 \Omega) = 0.66 \text{ V}$$

Para encontrar el potencial en A, reste la caída de voltaje del potencial en el terminal positivo:

$$V_A = 6.0 \text{ V} - 0.66 \text{ V} = 5.3 \text{ V}$$

d) Calcule la resistencia interna de la batería si el fem de la batería es 6.2 V.

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir$$

Escriba la ecuación 18.1:

Resuelva para la resistencia interna r y sustituya valores:

$$r = \frac{\mathcal{E} - \Delta V}{I} = \frac{6.2 \text{ V} - 6.0 \text{ V}}{0.33 \text{ A}} = 0.6 \Omega$$

e) ¿Qué fracción f de la potencia de la batería es entregada a los resistores de carga?

Divida la potencia entregada a la carga por la potencia total de salida:

$$f = \frac{I\Delta V}{I\mathcal{E}} = \frac{\Delta V}{\mathcal{E}} = \frac{6.0 \text{ V}}{6.2 \text{ V}} = 0.97$$

COMENTARIOS Un error común es que la corriente se “agota” y declina de manera estable conforme avanza a través de una serie de resistores. Ésta sería una violación de la conservación de la carga. ¿en la energía potencial eléctrica de los portadores de carga, algunos de los cuales se entrega a cada resistencia? ¿Cuál es la energía potencial eléctrica utilizada en realidad en los portadores de carga, parte de la cual se entrega a cada resistencia?

PREGUNTA 18.1 Explique por qué la corriente en un circuito real disminuye muy lentamente con el tiempo en comparación con su valor inicial.

EJERCICIO 18.1 Un circuito consta de una batería con un circuito cerrado, un voltaje terminal de 12.0 V y resistencias conectadas en serie de 3.0Ω , 6.0Ω , 8.0Ω y 9.0Ω , orientado como en la figura 18.5a, con la batería en la parte inferior de la malla, la terminal positiva a la izquierda y las resistencias en orden ascendente, de izquierda a derecha, en la parte superior de la malla. Calcule a) la resistencia equivalente del circuito, b) la corriente y c) la potencia total disipada por las resistencias de carga. d) ¿Cuál es el potencial eléctrico en un punto entre las resistencias de 6.0Ω y 8.0Ω , si el potencial eléctrico en la terminal positiva es de 12.0 V? e) Si la batería tiene una fem de 12.1 V, encuentre la resistencia interna de la batería.

RESPUESTAS a) 26.0Ω b) 0.462 A c) 5.54 W d) 7.84 V e) 0.2Ω

18.3 Resistores en paralelo

Ahora considere dos resistores conectados en paralelo, como en la figura activa 18.6. En este caso, **la diferencia de potencial a través de los resistores es la misma porque cada uno se conecta directamente a través de las terminales de la batería.** Las corrientes por lo general no son iguales. Cuando las cargas llegan al punto a (llamada unión o nodo) en la figura activa 18.6b, la corriente se divide en dos partes: I_1 , que fluye a través de R_1 ; e I_2 , que fluye a través de R_2 . Si R_1 es mayor que R_2 , entonces I_1 es menor que I_2 . En general, más carga viaja a través de la trayectoria con menos resistencia. **Puesto que la carga se conserva, la corriente I que entra al punto a debe ser igual a la corriente total $I_1 + I_2$ que sale de dicho punto.** Matemáticamente, esto se escribe

$$I = I_1 + I_2$$

La caída de potencial debe ser la misma para los dos resistores y también debe ser igual a la caída de potencial a través de la batería. La ley de Ohm aplicada a cada resistor produce

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} \quad I_2 = \frac{\Delta V}{R_2}$$

La ley de Ohm aplicada al resistor equivalente en la figura 18.6c produce

$$I = \frac{\Delta V}{R_{\text{eq}}}$$

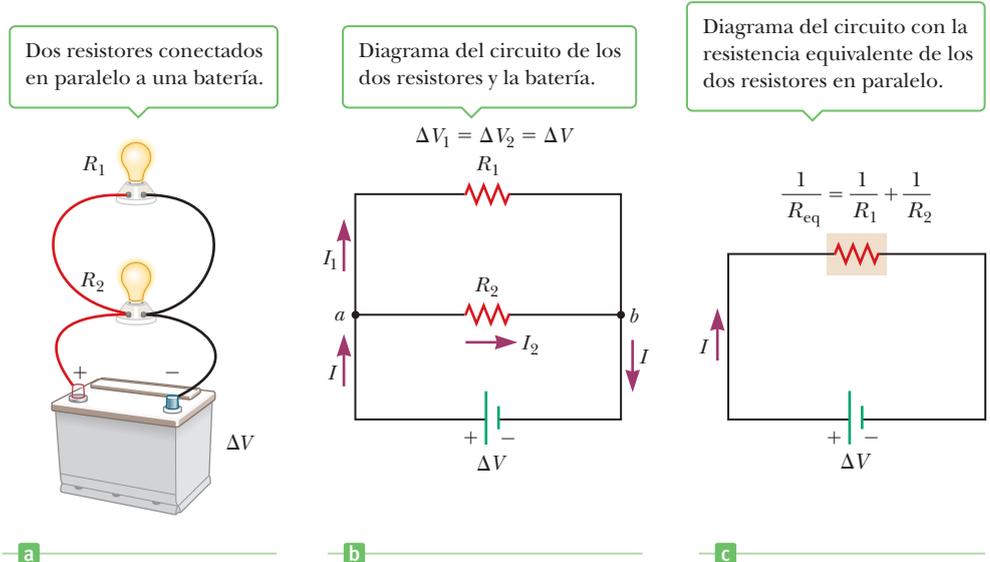


Figura activa 18.6 Conexión en paralelo de dos resistores R_1 y R_2 en la forma de dos focos, con una batería. Las diferencias de potencial a través de R_1 y R_2 son iguales. Las corrientes en los resistores son iguales y la resistencia equivalente de la combinación es $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$.

Cuando estas expresiones para las corrientes se sustituyen en la ecuación $I = I_1 + I_2$ y las ΔV se cancelan, obtenemos

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ (combinación en paralelo)} \quad [18.5]$$

Una extensión de este análisis a tres o más resistores en paralelo produce la siguiente expresión general para la resistencia equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad [18.6]$$

A partir de esta expresión, vemos que **el inverso de la resistencia equivalente de dos o más resistores conectados en paralelo es la suma de los inversos de las resistencias individuales y siempre es menor que la más pequeña resistencia en el grupo.**

◀ Resistencia equivalente de una combinación de resistores en paralelo

■ Examen rápido

18.5 En la figura 18.7, la corriente se mide con el amperímetro en el lado derecho del diagrama de circuito. Cuando se cierra el interruptor, ¿la lectura en el amperímetro a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

18.6 Cuando se abre el interruptor en la figura 18.7, al resistor R_1 se entrega potencia P_o . Cuando se cierra el interruptor, ¿cuál de los siguientes es verdadero para la potencia P_c que se entrega a R_1 ? (Desprecie la resistencia interna de la batería.) a) $P_c < P_o$ b) $P_c = P_o$ c) $P_c > P_o$

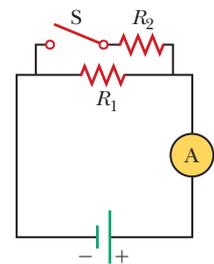


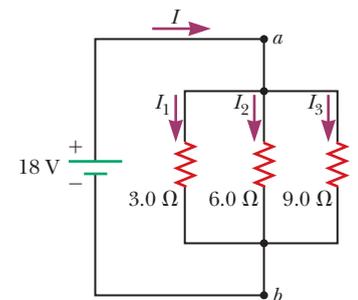
Figura 18.7 (Exámenes rápidos 18.5 y 18.6)

■ EJEMPLO 18.2 Tres resistores en paralelo

OBJETIVO Analizar un circuito que tiene resistores conectados en paralelo.

PROBLEMA Tres resistores se conectan en paralelo, como en la figura 18.8. Entre los puntos a y b se mantiene una diferencia de potencial de 18 V. **a)** Determine la corriente en cada resistor. **b)** Calcule la potencia que se entrega a cada resistor y la potencia total. **c)** Determine la resistencia equivalente del circuito. **d)** Determine la potencia total que se entrega a la resistencia equivalente.

Figura 18.8 (Ejemplo 18.2) Tres resistores conectados en paralelo. El voltaje a través de cada resistor es 18 V.



(continúa)

ESTRATEGIA Para obtener la corriente en cada resistor use la ley de Ohm y el hecho de que las caídas de voltaje a través de los resistores en paralelo son las mismas. El resto del problema sólo requiere sustitución en la ecuación para potencia entregada a un resistor, $P = I^2R$, y la ley de suma de recíprocos para resistores en paralelo.

SOLUCIÓN

a) Determine la corriente en cada resistor.

Aplique la ley de Ohm y resuelva para la corriente I que entrega la batería para encontrar la corriente en cada resistor:

$$I_1 = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{18 \text{ V}}{3.0 \ \Omega} = 6.0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{18 \text{ V}}{6.0 \ \Omega} = 3.0 \text{ A}$$

$$I_3 = \frac{\Delta V}{R_3} = \frac{18 \text{ V}}{9.0 \ \Omega} = 2.0 \text{ A}$$

b) Calcule la potencia que se entrega a cada resistor y la potencia total.

Aplique $P = I^2R$ a cada resistor y sustituya los resultados del inciso a):

$$3 \ \Omega: P_1 = I_1^2 R_1 = (6.0 \text{ A})^2 (3.0 \ \Omega) = 110 \text{ W}$$

$$6 \ \Omega: P_2 = I_2^2 R_2 = (3.0 \text{ A})^2 (6.0 \ \Omega) = 54 \text{ W}$$

$$9 \ \Omega: P_3 = I_3^2 R_3 = (2.0 \text{ A})^2 (9.0 \ \Omega) = 36 \text{ W}$$

Sume para obtener la potencia total:

$$P_{\text{total}} = 110 \text{ W} + 54 \text{ W} + 36 \text{ W} = 2.0 \times 10^2 \text{ W}$$

c) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Aplique la regla de la suma de recíprocos, ecuación 18.6:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{3.0 \ \Omega} + \frac{1}{6.0 \ \Omega} + \frac{1}{9.0 \ \Omega} = \frac{11}{18 \ \Omega}$$

$$R_{\text{eq}} = \frac{18}{11} \ \Omega = 1.6 \ \Omega$$

d) Calcule la potencia disipada por la resistencia equivalente.

Use la ecuación de potencia alterna:

$$P = \frac{(\Delta V)^2}{R_{\text{eq}}} = \frac{(18 \text{ V})^2}{1.6 \ \Omega} = 2.0 \times 10^2 \text{ W}$$

COMENTARIOS Hay algo importante que advertir en el inciso a): el resistor más pequeño de $3.0 \ \Omega$ porta la mayor corriente, mientras que los otros resistores más grandes, de 6.0 y $9.0 \ \Omega$, portan corrientes más pequeñas. La corriente más grande siempre se encuentra en la trayectoria de menor resistencia. En el inciso b), la potencia también podrá obtenerse con $P = (\Delta V)^2/R$. Note que $P_1 = 108 \text{ W}$, pero se redondea a 110 W porque sólo hay dos cifras significativas. Finalmente, observe que la potencia total disipada en el resistor equivalente es la misma que la suma de la potencia disipada en los resistores individuales, como debe ser.

Tip 18.2 ¡No olvide voltear!

El error más común al calcular la resistencia equivalente para resistores en paralelo, es olvidar invertir la respuesta después de sumar los recíprocos. ¡No olvide voltearlo!

PREGUNTA 18.2 Si se agrega un cuarto resistor en paralelo a los otros tres, ¿cómo cambiaría la resistencia equivalente? a) Sería mayor. b) Sería menor. c) Se requiere más información para determinar el efecto.

EJERCICIO 18.2 Suponga que las resistencias en el ejemplo son 1.0 , 2.0 y $3.0 \ \Omega$, respectivamente y se proporciona una nueva fuente de voltaje. Si la corriente que se mide en el resistor de $3.0 \ \Omega$ es de 2.0 A , determine a) la diferencia de potencial que proporciona la nueva batería y las corrientes en cada uno de los resistores restantes, b) la potencia entregada a cada resistor y la potencia total, c) la resistencia equivalente y d) la corriente total y la potencia disipada por el resistor equivalente.

RESPUESTAS a) $\mathcal{E} = 6.0 \text{ V}$, $I_1 = 6.0 \text{ A}$, $I_2 = 3.0 \text{ A}$ b) $P_1 = 36 \text{ W}$, $P_2 = 18 \text{ W}$, $P_3 = 12 \text{ W}$, $P_{\text{total}} = 66 \text{ W}$ c) $\frac{6}{11} \ \Omega$ d) $I = 11 \text{ A}$, $P_{\text{eq}} = 66 \text{ W}$

Examen rápido

18.7 Suponga que tiene tres focos idénticos, algo de alambre y una batería. Conecte un foco a la batería y tome nota de su brillo. Agregue un foco, conéctelo en paralelo con el foco anterior y de nuevo tome nota del brillo. Repita el proceso con el tercer foco y conéctelo en paralelo con los otros dos. Conforme se agregan focos, ¿qué ocurre con a) el brillo de los focos? b) ¿Las corrientes individuales en los focos? c) ¿La potencia que entrega la batería? d) ¿La vida de la batería? (Desprecie la resistencia interna de la batería.)

18.8 Si los focos en la pregunta rápida 18.7 se conectan uno por uno en serie en lugar de en paralelo, ¿qué ocurre con a) el brillo de los focos? b) ¿Las corrientes individuales en los focos? c) ¿La potencia que entrega la batería? d) ¿La vida de la batería? (De nuevo, desprecie la resistencia interna de la batería.)

Los circuitos domésticos siempre están alambrados de modo que los dispositivos eléctricos se conecten en paralelo, como en la figura activa 18.6a. De esta forma, cada dispositivo opera de manera independiente de los otros, de modo que si uno se apaga, los otros permanecen encendidos. Por ejemplo, si uno de los focos en la figura 18.6 se remueve de su portafoco, el otro continuaría funcionando. Igualmente importante es que cada dispositivo opera al mismo voltaje. Si los dispositivos se conectan en serie, el voltaje a través de cualquier dispositivo dependería de cuántos dispositivos hay en la combinación y sobre sus resistencias individuales.

En muchos circuitos domésticos se usan interruptores en serie con otros elementos de circuito para propósitos de seguridad. Un interruptor se diseña para apagar y abrir el circuito a cierto valor máximo de la corriente (por lo general 15 o 20 A) que depende de la naturaleza del circuito. Si no se usa un interruptor, las corrientes excesivas causadas por la operación simultánea de varios dispositivos podría resultar en temperaturas excesivas de los alambres, que tal vez provoquen un incendio. En casas de construcción más antigua, en lugar de interruptores se usaban fusibles. Cuando la corriente en un circuito superaba cierto valor, el conductor en un fusible se funde y abre el circuito. La desventaja de los fusibles es que se destruyen en el proceso de abrir el circuito, mientras que los interruptores se pueden restablecer.

APLICACIÓN

Interruptores

FÍSICA APLICADA 18.2 Combinaciones de focos

Compare el brillo de los cuatro focos idénticos que se muestran en la figura 18.9. ¿Qué sucede si el foco A falla y por lo tanto no puede conducir corriente? ¿Y si falla C? ¿Y si falla D?

EXPLICACIÓN Los focos A y B se conectan en serie a través de la fem de la batería, mientras que el foco C se conecta a través de la batería. Esto significa que la caída de voltaje a través de C tiene la misma magnitud que la fem de la batería, mientras que esta misma fem se divide entre los focos A y B. Como resultado, el foco C brillará más intensamente que cualquiera de los focos A y B, que tendrán igual brillo. El foco D tiene un alambre a través de él —un cortocircuito— de modo que la diferencia de potencial a través del foco D es cero y no brilla. Si el foco A falla, B se apaga, pero C permanece encendido. Si C falla, no hay efecto sobre los otros focos. Si D falla, el evento es indetectable porque D no brillaba al inicio. ■

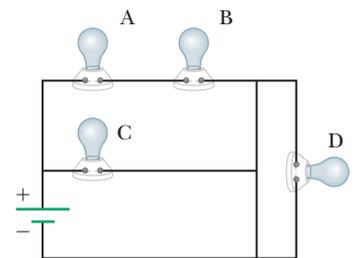


Figura 18.9 (Física aplicada 18.2)

FÍSICA APLICADA 18.3 Focos de tres vías

La figura 18.10 (página 624) ilustra cómo se construye un foco de tres vías para proporcionar tres niveles de intensidad luminosa. El portafoco está equipado con un mando de tres vías para seleccionar diferentes intensidades de luz. El foco contiene dos filamentos. ¿Por qué los filamentos se conectan

en paralelo? Explique cómo se usan los dos filamentos para proporcionar las tres diferentes intensidades luminosas.

EXPLICACIÓN Si los filamentos se conectan en serie y uno de ellos falla, no habrá corriente en el foco y no brillará, sin

importar la posición del mando. Sin embargo, cuando los filamentos se conectan en paralelo y uno de ellos (por decir, el filamento de 75 W) falla, el foco todavía opera en una de las posiciones del mando, porque hay corriente en el otro filamento (100 W). Las tres intensidades de luz son posibles al seleccionar uno de los tres valores de la resistencia del filamento, con un solo valor de 120 V para el voltaje aplicado. El filamento de 75 W ofrece un valor de resistencia, el filamento de 100 W ofrece un segundo valor y la tercera resistencia se obtiene al combinar los dos filamentos en paralelo. Cuando el mando S_1 se cierra y el mando S_2 se abre, sólo el filamento de 75 W porta corriente. Cuando el mando S_1 se abre y el mando S_2 se cierra, sólo el filamento de 100 W porta corriente. Cuando ambos mandos se cierran, los dos filamentos portan corriente y se obtiene una iluminación total que corresponde a 175 W. ■

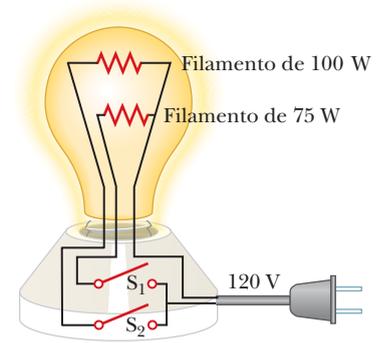


Figura 18.10 (Física aplicada 18.3)

■ **ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS**

Simplificación de circuitos con resistores

1. **Combine todos los resistores en serie** al sumar las resistencias individuales y dibuje el nuevo diagrama de circuito simplificado.

Hechos útiles: $R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

La corriente en cada resistor es la misma.

2. **Combine todos los resistores en paralelo** al sumar los recíprocos de las resistencias y luego tomar el recíproco del resultado. Dibuje el nuevo diagrama de circuito simplificado.

Hechos útiles: $\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

La diferencia de potencial a través de cada resistor es la misma.

3. **Repita** los primeros dos pasos según requieras, hasta que ya no se puedan hacer más combinaciones. Si sólo hay una batería en el circuito, el resultado por lo general será un solo resistor equivalente en serie con la batería.
4. **Use la ley de Ohm**, $\Delta V = IR$, para determinar la corriente en el resistor equivalente. Luego trabaje hacia atrás a través de los diagramas y aplique los hechos útiles que se mencionan en los pasos 1 o 2 para encontrar las corrientes en los otros resistores. (En circuitos más complejos, necesitará las reglas de Kirchhoff, como se describe en la siguiente sección.)

■ **EJEMPLO 18.3** Resistencia equivalente

OBJETIVO Resolver un problema que involucra resistores en serie y en paralelo.

PROBLEMA Cuatro resistores se conectan como se muestra en la figura 18.11a. **a)** Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos a y c . **b)** ¿Cuál es la corriente en cada resistor, si entre a y c se conecta una batería de 42 V?

ESTRATEGIA Reduzca el circuito en pasos, como se muestra en las figuras 18.11b y 18.11c, y use la regla de suma para resistores en serie y la regla de suma de recíprocos para resistores en paralelo. Determine las corrientes es cuestión de aplicar la ley de Ohm mientras trabaja hacia atrás a través de los diagramas.

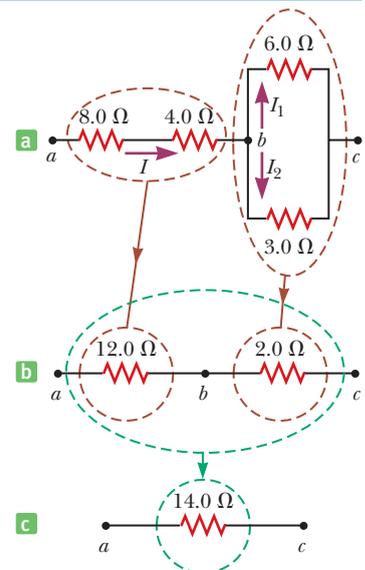


Figura 18.11 (Ejemplo 18.3) Los cuatro resistores que se muestran en a) pueden reducirse en pasos a un resistor equivalente de $14\ \Omega$.

SOLUCIÓN

a) Determine la resistencia equivalente del circuito.

Los resistores de 8.0Ω y 4.0Ω están en serie, así que use la regla de la suma para encontrar la resistencia equivalente entre a y b :

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 = 8.0 \Omega + 4.0 \Omega = 12.0 \Omega$$

Los resistores de 6.0Ω y 3.0Ω están en paralelo, así que use la regla de suma de recíprocos para encontrar la resistencia equivalente entre b y c (¡no olvide invertir!):

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{6.0 \Omega} + \frac{1}{3.0 \Omega} = \frac{1}{2.0 \Omega}$$

$$R_{\text{eq}} = 2.0 \Omega$$

En el nuevo diagrama, 18.11b, ahora hay dos resistores en serie. Combínelos con la regla de la suma para encontrar la resistencia equivalente del circuito:

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 = 12.0 \Omega + 2.0 \Omega = 14.0 \Omega$$

b) Encuentre la corriente en cada resistor, si una batería de 42 V se conecta entre los puntos a y c .

Encuentre la corriente en el resistor equivalente de la figura 18.11c, que es la corriente total. Los resistores en serie portan todos la misma corriente, de modo que el valor es la corriente en el resistor de 12Ω de la figura 18.11b y también en los resistores de 8.0Ω y 4.0Ω en la figura 18.11a.

$$I = \frac{\Delta V_{ac}}{R_{\text{eq}}} = \frac{42 \text{ V}}{14 \Omega} = 3.0 \text{ A}$$

Calcule la caída de voltaje ΔV_{para} a través del circuito en paralelo, que tiene una resistencia equivalente de 2Ω :

$$\Delta V_{\text{para}} = IR = (3.0 \text{ A})(2.0 \Omega) = 6.0 \text{ V}$$

Aplique otra vez la ley de Ohm para encontrar las corrientes en cada resistor del circuito paralelo:

$$I_1 = \frac{\Delta V_{\text{para}}}{R_{6.0 \Omega}} = \frac{6.0 \text{ V}}{6.0 \Omega} = 1.0 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{\Delta V_{\text{para}}}{R_{3.0 \Omega}} = \frac{6.0 \text{ V}}{3.0 \Omega} = 2.0 \text{ A}$$

COMENTARIOS Como comprobación final, advierta que $\Delta V_{bc} = (6.0 \Omega)I_1 = (3.0 \Omega)I_2 = 6.0 \text{ V}$ y $\Delta V_{ab} = (12 \Omega)I_1 = 36 \text{ V}$; por lo tanto, $\Delta V_{ac} = \Delta V_{ab} + V_{bc} = 42 \text{ V}$, como se esperaba.

PREGUNTA 18.3 ¿Cuál de los resistores originales disipa energía a la mayor razón?

EJERCICIO 18.3 Suponga que los resistores en serie en el ejemplo 18.3 ahora son de 6.00Ω y 3.00Ω , mientras que los resistores en paralelo son 8.00Ω (arriba) y 4.00Ω (abajo), y la batería proporciona una fem de 27.0 V . Encuentre a) la resistencia equivalente y b) las corrientes I , I_1 e I_2 .

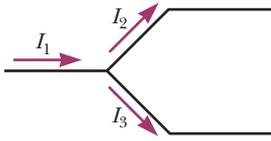
RESPUESTAS a) 11.7Ω b) $I = 2.31 \text{ A}$, $I_1 = 0.770 \text{ A}$, $I_2 = 1.54 \text{ A}$

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Como se demostró en la sección anterior, los circuitos simples se pueden analizar con la ley de Ohm y las reglas para combinaciones de resistores en serie y en paralelo. Sin embargo, existen muchas formas en las que los resistores se pueden conectar de modo que los circuitos formados se puedan reducir a un solo resistor equivalente. El procedimiento para analizar circuitos más complejos se puede facilitar mediante el uso de dos reglas simples llamadas **reglas de Kirchhoff**:

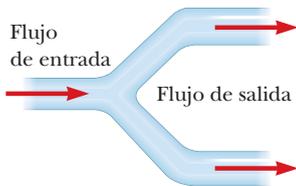
1. La suma de las corrientes que entran a cualquier unión debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de dicha unión. (A esta regla con frecuencia se le llama **regla del nodo**.)
2. La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier lazo de circuito cerrado debe ser cero. (Esta regla usualmente se llama **regla de la malla**.)

La corriente I_1 que entra al nodo debe ser igual a la suma de las corrientes I_2 y I_3 que salen de él.



a

El flujo neto de entrada debe ser igual al flujo neto de salida.



b

Figura 18.12 a) Regla del nodo de Kirchhoff. b) Analogía mecánica de la regla del nodo.

En cada diagrama, $\Delta V = V_b - V_a$ y el elemento de circuito es atravesado de a a b , de izquierda a derecha.

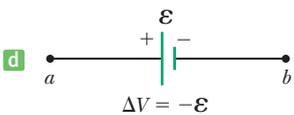
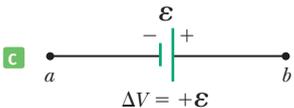
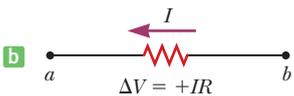
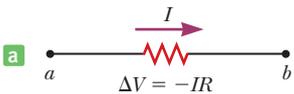


Figura 18.13 Reglas para determinar las diferencias de potencial a través de un resistor y una batería, si supone que la batería no tiene resistencia interna.

La regla del nodo es un enunciado de *conservación de carga*. Cualquier corriente que entra a un punto dado en un circuito debe salir de dicho punto, porque la carga no se puede crear o desaparecer en un punto. Si esta regla del nodo se aplica en la figura 18.12a, obtenemos

$$I_1 = I_2 + I_3$$

La figura 18.12b representa una analogía mecánica del circuito que se muestra en la figura 18.12a. En esta analogía, el agua fluye a través de una tubería ramificada sin fugas. La tasa de flujo en la tubería es igual a la tasa de flujo total fuera de las dos ramas.

La regla de la malla es equivalente al principio de *conservación de la energía*. Cualquier carga que se mueva alrededor de cualquier malla cerrada en un circuito (que comience y termine en el mismo punto) debe ganar tanta energía como la que pierde. Gana energía mientras se bombea a través de una fuente de fem. Su energía puede disminuir en la forma de una caída de potencial $-IR$ a través de un resistor o como resultado de fluir hacia atrás a través de una fuente de fem, desde la terminal positiva hasta la negativa, dentro de la batería. En el último caso, la energía eléctrica se convierte en energía química conforme la batería se carga.

Cuando aplique las reglas de Kirchhoff, debe tomar dos decisiones al principio del problema:

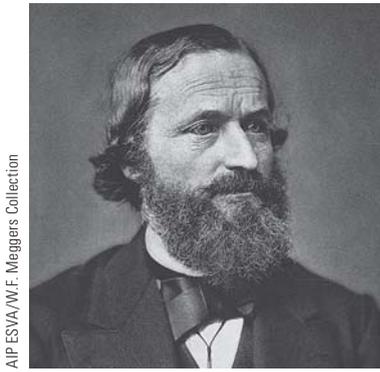
1. Asigne símbolos y direcciones a las corrientes en todas las ramas del circuito. No se preocupe si supone de manera incorrecta la dirección de una corriente, la respuesta será negativa, pero *su magnitud será correcta*. (Puesto que las ecuaciones son *lineales* en las corrientes, todas las corrientes están a la primera potencia.)
2. Cuando aplique la regla de la malla, debe elegir una dirección para recorrer la malla y ser consistente en ir en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario. Conforme recorra la malla, registre las caídas y subidas de voltaje de acuerdo con las siguientes reglas (que se resumen en la figura 18.13, donde se supuso que el movimiento se da del punto a hacia el punto b):
 - a) Si un resistor se recorre en la dirección de la corriente, el cambio en potencial eléctrico a través del resistor es $-IR$ (figura 18.13a).
 - b) Si un resistor se recorre en la dirección opuesta a la corriente, el cambio en potencial eléctrico a través del resistor es $+IR$ (figura 18.13b).
 - c) Si una fuente de fem se recorre en la dirección de la fem (de $-$ a $+$ en las terminales), el cambio en potencial eléctrico es $+\mathcal{E}$ (figura 18.13c).
 - d) Si una fuente de fem se recorre en la dirección opuesta a la fem (de $+$ a $-$ en las terminales), el cambio en potencial eléctrico es $-\mathcal{E}$ (figura 18.13d).

Existen límites al número de veces que se pueden usar las reglas del nodo y de la malla. La regla del nodo la puede usar con tanta frecuencia como la necesite, en tanto que, cada vez que escriba la ecuación, incluya una corriente que no haya utilizado en una ecuación de regla del nodo anterior. (Si no sigue el procedimiento, la nueva ecuación sólo será una combinación de otras dos ecuaciones que ya tiene.) En general, el número de veces que puede usar la regla del nodo es uno menos que el número de puntos de unión en el circuito. La regla de la malla también se puede usar tanto como requiera, en tanto un nuevo elemento de circuito (resistor o batería) o una nueva corriente aparezca en cada nueva ecuación. **Para resolver un problema de circuito particular, usted necesita tantas ecuaciones independientes como incógnitas tenga.**

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Aplicación de las reglas de Kirchhoff a un circuito

1. **Asigne marcas y símbolos** a todas las cantidades conocidas y desconocidas.
2. **Asigne direcciones a las corrientes** en cada parte del circuito. Aunque la asignación de direcciones de corriente es arbitraria, debe apegarse a sus elecciones originales a lo largo del problema conforme aplica las reglas de Kirchhoff.
3. **Aplique la regla del nodo** a cualquier unión en el circuito. La regla se puede aplicar tantas veces como una nueva corriente (una no utilizada en una ecuación anterior) aparezca en la ecuación resultante.



Gustav Kirchhoff
Físico alemán (1824-1887)

Junto con el químico alemán Robert Bunsen, Kirchhoff, profesor en Heidelberg, inventó el espectroscopio que se estudia en el capítulo 28. También formuló otra regla que afirma: “una sustancia fría absorberá luz de las mismas longitudes de onda que emite cuando está caliente”.

4. **Aplique la regla de la malla de Kirchhoff** a tantas mallas en el circuito como necesite para resolver las incógnitas. Para aplicar esta regla, debe identificar correctamente el cambio en potencial eléctrico conforme cruza cada elemento al recorrer la malla cerrada. ¡Cuidado con los signos!
5. **Resuelva las ecuaciones** simultáneamente para las cantidades desconocidas y use sustitución o cualquier otro método familiar para usted.
6. **Compruebe sus respuestas** al sustituirlas en las ecuaciones originales.

EJEMPLO 18.4 Aplicación de las reglas de Kirchhoff

OBJETIVO Usar las reglas de Kirchhoff para encontrar corrientes en un circuito con tres corrientes y una batería.

PROBLEMA Encuentre las corrientes en el circuito que se muestra en la figura 18.14, con el uso de las reglas de Kirchhoff.

ESTRATEGIA Existen tres corrientes incógnitas en este circuito, así que debe obtener tres ecuaciones independientes, que luego se pueden resolver por sustitución. Puede determinar las ecuaciones con una aplicación de la regla del nodo y dos aplicaciones de la regla de la malla. Elija la unión *c*. (La unión *d* proporciona la misma ecuación.) Para las mallas, elija la malla inferior y la malla superior, ambas se muestran mediante flechas azules, que indican la dirección en la que se recorrerá el circuito matemáticamente (no necesariamente la dirección de la corriente). La tercera malla da una ecuación que se puede obtener mediante una combinación lineal de las otras dos, así que no proporciona información adicional y no se usa.

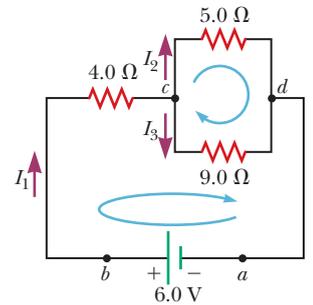


Figura 18.14 (Ejemplo 18.4)

SOLUCIÓN

Aplique la regla del nodo al punto *c*. I_1 se dirige hacia la unión, I_2 e I_3 se dirigen afuera de la unión.

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Seleccione la malla inferior y recórrela en sentido de las manecillas del reloj, a partir del punto *a*, y genere una ecuación con la regla de la malla:

$$\sum \Delta V = \Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_{4.0\Omega} + \Delta V_{9.0\Omega} = 0$$

$$6.0 \text{ V} - (4.0 \Omega)I_1 - (9.0 \Omega)I_3 = 0$$

Seleccione la malla superior y recórrela en sentido de las manecillas del reloj desde el punto *c*. ¡Observe la ganancia a través del resistor de 9.0Ω porque se recorre *contra* la dirección de la corriente!

$$\sum \Delta V = \Delta V_{5.0\Omega} + \Delta V_{9.0\Omega} = 0$$

$$-(5.0 \Omega)I_2 + (9.0 \Omega)I_3 = 0$$

Reescriba las tres ecuaciones, reordene términos y elimine unidades por el momento, por conveniencia:

- (1) $I_1 = I_2 + I_3$
- (2) $4.0I_1 + 9.0I_3 = 6.0$
- (3) $-5.0I_2 + 9.0I_3 = 0$

Resuelva la ecuación (3) para I_2 y sustituya en la ecuación (1):

$$I_2 = 1.8I_3$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = 1.8I_3 + I_3 = 2.8I_3$$

(continúa)

Sustituya la última expresión en la ecuación (2) y resuelva para I_3 :

$$4.0(2.8I_3) + 9.0I_3 = 6.0 \rightarrow I_3 = 0.30 \text{ A}$$

Sustituya I_3 de vuelta en la ecuación (3) para obtener I_2 :

$$-5.0I_2 + 9.0(0.30 \text{ A}) = 0 \rightarrow I_2 = 0.54 \text{ A}$$

Sustituya I_3 en la ecuación (2) para obtener I_1 :

$$4.0I_1 + 9.0(0.30 \text{ A}) = 6.0 \rightarrow I_1 = 0.83 \text{ A}$$

COMENTARIOS Al sustituir estos valores de vuelta en las ecuaciones originales verifique que sean correctos, con cualquier pequeña discrepancia debida a redondeo. El problema también se puede resolver al combinar primero los resistores.

PREGUNTA 18.4 ¿Cómo cambiarían las respuestas si en la figura 18.14 se invierten las direcciones indicadas de las corrientes?

EJERCICIO 18.4 Suponga que la batería de 6.0 V se sustituye con una batería de fem desconocida y un amperímetro mide $I_1 = 1.5 \text{ A}$. Encuentre las otras dos corrientes y la fem de la batería.

RESPUESTAS $I_2 = 0.96 \text{ A}$, $I_3 = 0.54 \text{ A}$, $\mathcal{E} = 11 \text{ V}$

Tip 18.3 Más corriente pasa en la trayectoria de menor resistencia

Tal vez usted haya escuchado la afirmación: “la corriente sigue la trayectoria de menor resistencia”. Para una combinación de resistores en paralelo, esta afirmación es imprecisa porque la corriente en realidad sigue todas las trayectorias. Sin embargo, la mayor parte de la corriente viaja en la trayectoria de la menor resistencia.

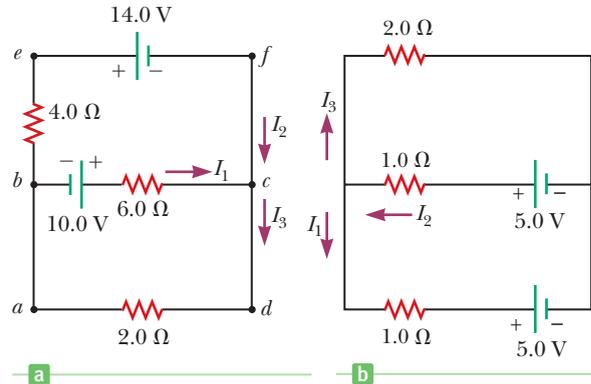
EJEMPLO 18.5 Otra aplicación de las reglas de Kirchhoff

OBJETIVO Determinar las corrientes en un circuito con tres corrientes y dos baterías, cuando algunas de las direcciones de corriente se eligen de manera equivocada.

PROBLEMA Encuentre I_1 , I_2 e I_3 en la figura 18.15a.

ESTRATEGIA Use las dos reglas de Kirchhoff, la regla del nodo una vez y la regla de la malla dos veces, para desarrollar tres ecuaciones para las tres corrientes incógnitas. Resuelva simultáneamente las ecuaciones.

Figura 18.15
a) (Ejemplo 18.5)
b) (Ejercicio 18.5)



SOLUCIÓN

Aplique la regla del nodo de Kirchhoff al nodo c . Debido a las direcciones de corriente elegidas, I_1 e I_2 se dirigen hacia el nodo, e I_3 se dirige afuera del nodo.

Aplique la regla de la malla de Kirchhoff a las mallas $abcd$ y $befc$. (La malla $afda$ no aporta nueva información.) En la malla $befc$ se obtiene un signo positivo cuando se recorre el resistor de 6.0Ω , porque la dirección de la trayectoria es opuesta a la dirección de la corriente I_1 .

Con la ecuación (1), elimine I_3 de la ecuación (2) (ignore unidades por el momento):

(1) $I_3 = I_1 + I_2$

(2) Malla $abcd$: $10 \text{ V} - (6.0 \Omega)I_1 - (2.0 \Omega)I_3 = 0$

(3) Malla $befc$: $-(4.0 \Omega)I_2 - 14 \text{ V} + (6.0 \Omega)I_1 - 10 \text{ V} = 0$

$$10 - 6.0I_1 - 2.0(I_1 + I_2) = 0$$

(4) $10 = 8.0I_1 + 2.0I_2$

(5) $-12 = -3.0I_1 + 2.0I_2$

Divida cada término en la ecuación (3) entre 2 y reordene la ecuación de modo que las corrientes estén en el lado correcto:

Al restar la ecuación (5) de la ecuación (4) elimina I_2 y se obtiene I_1 :

$$22 = 11I_1 \rightarrow I_1 = 2.0 \text{ A}$$

Al sustituir este valor de I_1 en la ecuación (5) se obtiene I_2 :

$$2.0I_2 = 3.0I_1 - 12 = 3.0(2.0) - 12 = -6.0 \text{ A}$$

$$I_2 = -3.0 \text{ A}$$

Finalmente, sustituya en la ecuación (1) los valores que encontró para I_1 e I_2 para obtener I_3 :

$$I_3 = I_1 + I_2 = 2.0 \text{ A} - 3.0 \text{ A} = -1.0 \text{ A}$$

COMENTARIOS El hecho de que I_2 e I_3 sean ambos negativos indica que se eligieron las direcciones equivocadas para estas corrientes. No obstante, las magnitudes son correctas. Elegir las direcciones correctas de las corrientes al comienzo no es importante porque las ecuaciones son lineales, y las elecciones equivocadas sólo resultan en un signo menos en la respuesta.

PREGUNTA 18.5 ¿Es posible que la corriente en una batería se dirija desde la terminal positiva hacia la terminal negativa?

EJERCICIO 18.5 Encuentre las tres corrientes en la figura 18.15b. (¡Observe que la dirección de una corriente deliberadamente se eligió de manera errónea!)

RESPUESTAS $I_1 = -1.0 \text{ A}$, $I_2 = 1.0 \text{ A}$, $I_3 = 2.0 \text{ A}$

18.5 Circuitos RC

Hasta el momento, usted estudió circuitos con corrientes constantes. Ahora considerará circuitos de corriente directa que contienen capacitores, en los cuales las corrientes varían con el tiempo. Considere el circuito en serie de la figura activa 18.16. Suponga que el capacitor inicialmente no tiene carga y el interruptor está abierto. Después de cerrar el interruptor, la batería comienza a cargar las placas del capacitor y la carga pasa a través del resistor. Conforme el capacitor se carga, el circuito porta una corriente variable. El proceso de carga continúa hasta que el capacitor se carga a su máximo valor de equilibrio, $Q = C\mathcal{E}$, donde \mathcal{E} es el voltaje máximo a través del capacitor. Una vez que el capacitor está cargado por completo, la corriente en el circuito es cero. Si supone que el capacitor no tiene carga antes de cerrar el interruptor y si el interruptor se cierra en $t = 0$, encontramos que la carga sobre el capacitor varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$q = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad [18.7]$$

donde $e = 2.718 \dots$ es la constante de Euler, la base de los logaritmos naturales. La figura activa 18.16b es una gráfica de esta ecuación. La carga es cero en $t = 0$ y tiende a su valor máximo, Q conforme t tiende a infinito. El voltaje ΔV a través del capacitor en cualquier tiempo se obtiene al dividir la carga entre la capacitancia: $\Delta V = q/C$.

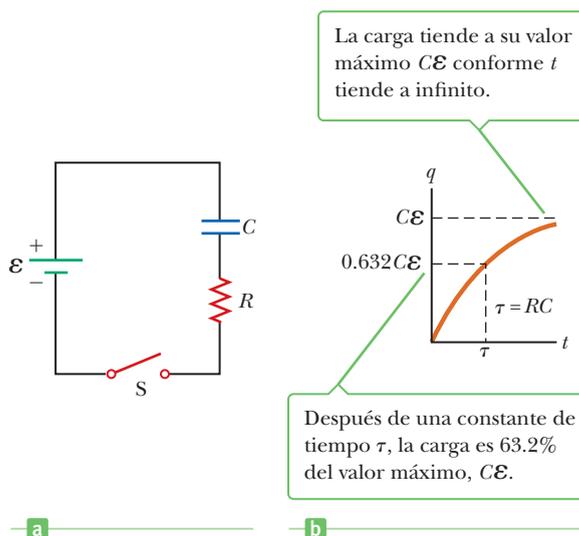
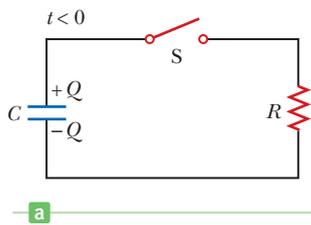


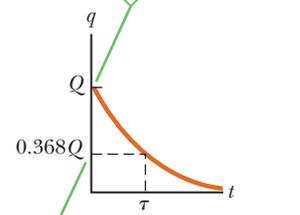
Figura activa 18.16

a) Un capacitor en serie con un resistor, una batería y un interruptor. b) Gráfica de carga en el capacitor frente al tiempo, después que se cierra el interruptor en el circuito.



a

La carga tiene su máximo valor Q en $t = 0$ y decae a cero exponencialmente cuando t tiende al infinito.



La carga cae a 36.8% de su valor inicial cuando ha transcurrido una constante de tiempo.

b

Figura activa 18.17

- a) Un capacitor cargado se conecta a un resistor y un interruptor.
- b) Gráfica de la carga sobre el capacitor frente al tiempo, después de cerrar el interruptor.

Como puede ver de la ecuación 18.7, en este modelo, tomaría una cantidad infinita de tiempo cargar por completo el capacitor. La razón es matemática: al obtener esta ecuación, las cargas se supusieron infinitamente pequeñas, mientras que en realidad la carga más pequeña es la de un electrón, con una magnitud de 1.60×10^{-19} C. Para todo propósito práctico, el capacitor se carga por completo después de una cantidad finita de tiempo. El término RC que aparece en la ecuación 18.7 se llama **constante de tiempo** τ (letra griega tau), de modo que

$$\tau = RC \quad [18.8]$$

La constante de tiempo representa el tiempo requerido para que la carga aumente desde cero hasta 63.2% de su valor de equilibrio máximo. Esto significa que, en un periodo de tiempo igual a una constante de tiempo, la carga en el capacitor aumenta desde cero hasta $0.632Q$. Esto se puede ver al sustituir $t = \tau = RC$ en la ecuación 18.7 y resolver para q . (Note que $1 - e^{-1} = 0.632$.) Es importante observar que un capacitor se carga muy lentamente en un circuito con una constante de tiempo larga, mientras que se carga muy rápido en un circuito con una constante de tiempo corta. Después de un tiempo igual a 10 constantes de tiempo, el capacitor está más que 99.99% cargado.

Ahora considere el circuito de la figura activa 18.17a, que consiste en un capacitor con una carga inicial Q , un resistor y un interruptor. Antes de cerrar el interruptor, la diferencia de potencial a través del capacitor cargado es Q/C . Una vez cerrado el interruptor, la carga comienza a fluir a través del resistor, desde una placa del capacitor hacia la otra, hasta que el capacitor se descarga por completo. Si el interruptor se cierra en $t = 0$, se puede demostrar que la carga q sobre el capacitor varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$q = Qe^{-t/RC} \quad [18.9]$$

La carga disminuye exponencialmente con el tiempo, como se muestra en la figura activa 18.17b. En el intervalo $t = \tau = RC$, la carga disminuye desde su valor inicial Q a $0.368Q$. En otras palabras, en un tiempo igual a una constante de tiempo, el capacitor pierde 63.2% de su carga inicial. Puesto que $\Delta V = q/C$, el voltaje a través del capacitor también disminuye exponencialmente con el tiempo, de acuerdo con la ecuación $\Delta V = \mathcal{E}e^{-t/RC}$, donde \mathcal{E} (que es igual a Q/C) es el voltaje inicial a través del capacitor cargado por completo.

■ FÍSICA APLICADA 18.4 **Limpiaparabrisas intermitentes**

Muchos automóviles están equipados con limpiaparabrisas que se pueden usar de manera intermitente durante una tormenta. ¿Cómo es que la operación de esta característica depende de la carga y descarga de un capacitor?

EXPLICACIÓN Los limpiadores son parte de un circuito RC con una constante de tiempo que puede variar al seleccionar diferentes valores de R a través de un interruptor de muchas posiciones. El breve tiempo que los limpiadores permanecen encendidos y el tiempo que están apagados se determina mediante el valor de la constante de tiempo del circuito. ■

■ FÍSICA APLICADA 18.5 **Crecimiento bacterial**

En aplicaciones biológicas que se preocupan por el crecimiento poblacional, se usa una ecuación que es similar a las ecuaciones exponenciales que se encuentran en el análisis de los circuitos RC . Aplicada a algunas bacterias, esta ecuación es

$$N_f = N_i 2^n$$

donde N_f es el número de bacterias presente después de n tiempos de duplicación, N_i es el número presente en un inicio y n es el número de ciclos de crecimiento o tiempos de duplicación. Los tiempos de duplicación varían de acuerdo con el organismo. El tiempo de duplicación para la bacteria responsable de la lepra es de aproximadamente 30 días y el de la salmonella responsable del envenenamiento de los

alimentos es de cerca de 20 minutos. Suponga que sólo 10 bacterias de salmonella llegan a la pata de un pavo después de su cena de Navidad. Cuatro horas después regresa por un bocadillo. ¿Cuántas bacterias hay ahora?

EXPLICACIÓN El número de veces de duplicación es de $240 \text{ min} / 20 \text{ min} = 12$. Por lo tanto,

$$N_f = N_i 2^n = (10 \text{ bacterias})(2^{12}) = 40960 \text{ bacterias}$$

Así que su sistema tendrá que lidiar con una invasión de aproximadamente 41 000 bacterias, que continuarán duplicándose en un ambiente muy prometedor. ■

■ FÍSICA APLICADA 18.6 Destelladores en la autopista

Muchos sitios de construcción en las autopistas tienen luces amarillas que destellan para advertir a los conductores de posibles peligros. ¿Qué hace que la luz destelle?

EXPLICACIÓN En la figura 18.18 se muestra un circuito típico para tal destellador. La lámpara L es una lámpara llena con gas que actúa como un circuito abierto hasta que una gran diferencia de potencial provoca una descarga, que despide una luz brillante. Durante esta descarga, la carga fluye a través del gas entre los electrodos de la lámpara. Cuando el interruptor se cierra, la batería carga al capacitor. Al principio, la corriente es alta y la carga sobre el capacitor es baja, así que la mayoría de la diferencia de potencial aparece a través de la resistencia R. Conforme el capacitor se carga, más diferencia de potencial aparece a través de él, lo que refleja la menor corriente y menor diferencia de potencial a través del resistor. Eventualmente, la diferencia de potencial a través del capacitor alcanza un valor al cual la lámpara conducirá y provocará un destello. Este destello descarga al capacitor a través de la lámpara y el proceso de carga comienza de nuevo. El periodo entre destellos se puede ajustar al cambiar la constante de tiempo del circuito RC. ■

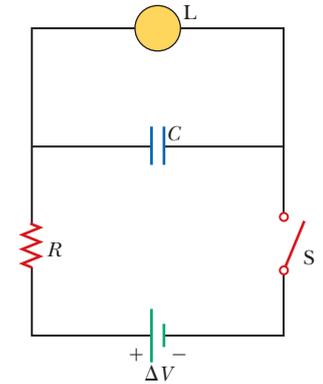


Figura 18.18 (Física aplicada 18.6)

■ Examen rápido

18.9 En la figura 18.19 se cierra el interruptor. Después de un largo tiempo, en comparación con la constante de tiempo del circuito, ¿cuál será la corriente en el resistor de 2 Ω? a) 4 A b) 3 A c) 2 A d) 1 A e) Se necesita más información.

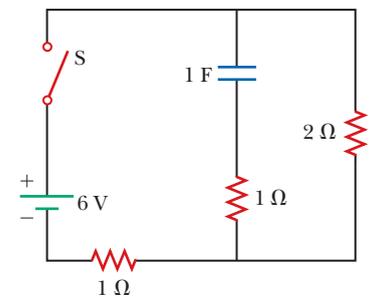


Figura 18.19 (Examen rápido 18.9)

■ EJEMPLO 18.6 Carga de un capacitor en un circuito RC

OBJETIVO Calcular las propiedades elementales de un circuito RC simple.

PROBLEMA Un capacitor sin carga y un resistor se conectan en serie a una batería, como en la figura 18.16a. Si $\mathcal{E} = 12.0 \text{ V}$, $C = 5.00 \mu\text{F}$ y $R = 8.00 \times 10^5 \Omega$, determine **a)** la constante de tiempo del circuito, **b)** la máxima carga sobre el capacitor, **c)** la carga sobre el capacitor después de 6.00 s, **d)** la diferencia de potencial a través del resistor después de 6.00 s y **e)** la corriente en el resistor en dicho tiempo.

ESTRATEGIA Encontrar la constante de tiempo en el inciso a) requiere sustitución en la ecuación 18.8. Para el inciso b), la

máxima carga ocurre después de un largo tiempo, cuando la corriente cae a cero. Por la ley de Ohm, $\Delta V = IR$, la diferencia de potencial a través del resistor también es cero en dicho tiempo y la regla de la malla de Kirchhoff proporciona entonces la carga máxima. Determinar la carga en algún tiempo particular, como en el inciso c), es cuestión de sustituir en la ecuación 18.7. Puede usar la regla de la malla de Kirchhoff y la ecuación de capacitancia para encontrar indirectamente la caída de potencial a través del resistor en el inciso d) y luego la ley de Ohm produce la corriente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la constante de tiempo del circuito.

Use la definición de la constante de tiempo, ecuación 18.8:

b) Calcule la carga máxima sobre el capacitor.

Aplique la regla de la malla de Kirchhoff al circuito RC, en sentido de las manecillas del reloj, lo cual significa que la diferencia de voltaje a través de la batería es positiva y las diferencias a través del capacitor y resistor son negativas:

A partir de la definición de capacitancia (ecuación 16.8) y de la ley de Ohm, se tiene $\Delta V_C = -q/C$ y $\Delta V_R = -IR$. Éstas son caídas de voltaje, así que son negativas. Además, $\Delta V_{\text{bat}} = +\mathcal{E}$.

$$\tau = RC = (8.00 \times 10^5 \Omega)(5.00 \times 10^{-6} \text{ F}) = 4.00 \text{ s}$$

$$(1) \quad \Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_C + \Delta V_R = 0$$

$$(2) \quad \mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0$$

(continúa)

Cuando se alcanza la carga máxima $q = Q$, $I = 0$. Resuelva la ecuación (2) para la carga máxima:

$$\mathcal{E} - \frac{Q}{C} = 0 \rightarrow Q = C\mathcal{E}$$

Sustituya para encontrar la carga máxima:

$$Q = (5.00 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 60.0 \mu\text{C}$$

c) Encuentre la carga sobre el capacitor después de 6.00 s.

Sustituya en la ecuación 18.7:

$$q = Q(1 - e^{-t/\tau}) = (60.0 \mu\text{C})(1 - e^{-6.00 \text{ s}/4.00 \text{ s}}) = 46.6 \mu\text{C}$$

d) Calcule la diferencia de potencial a través del resistor después de 6.00 s.

Calcule la caída de voltaje ΔV_C a través del capacitor en dicho tiempo:

$$\Delta V_C = -\frac{q}{C} = -\frac{46.6 \mu\text{C}}{5.00 \mu\text{F}} = -9.32 \text{ V}$$

Resuelva la ecuación (1) para ΔV_R y sustituya:

$$\Delta V_R = -\Delta V_{\text{bat}} - \Delta V_C = -12.0 \text{ V} - (-9.32 \text{ V}) = -2.68 \text{ V}$$

e) Encuentre la corriente en el resistor después de 6.00 s.

Aplique la ley de Ohm y use los resultados del inciso

d) (recuerde que, aquí, $\Delta V_R = -IR$):

$$I = \frac{-\Delta V_R}{R} = \frac{-(-2.68 \text{ V})}{(8.00 \times 10^5 \Omega)} = 3.35 \times 10^{-6} \text{ A}$$

COMENTARIOS Al resolver este problema, ponga mucha atención a los signos. Estos signos siempre se deben elegir cuando se aplica la regla de la malla de Kirchhoff y deben permanecer consistentes a lo largo del problema. De manera alternativa, puede usar magnitudes y elegir los signos mediante intuición física. Por ejemplo, la magnitud de la diferencia de potencial a través del resistor debe ser igual a la magnitud de la diferencia de potencial a través de la batería, menos la magnitud de la diferencia de potencial a través del capacitor.

PREGUNTA 18.6 En un circuito RC , como se muestra en la figura 18.16a, ¿qué ocurre con el tiempo requerido para que el capacitor se cargue a la mitad de su valor máximo, si

aumenta la resistencia o la capacitancia? a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece igual.

EJERCICIO 18.6 Determine a) la carga sobre el capacitor después de transcurridos 2.00 s, b) la magnitud de la diferencia de potencial a través del capacitor después de 2.00 s y c) la magnitud de la diferencia de potencial a través del resistor en ese mismo tiempo.

RESPUESTAS a) $23.6 \mu\text{C}$ b) 4.72 V c) 7.28 V

■ EJEMPLO 18.7 Descarga de un capacitor en un circuito RC

OBJETIVO Calcular algunas propiedades elementales de un capacitor que se descarga en un circuito RC .

PROBLEMA Considere un capacitor C que se descarga a través de un resistor R , como en la figura 18.17a (página 630). a) ¿Cuánto tarda la carga en el capacitor en caer a un cuarto de su valor inicial? Responda como un múltiplo de τ . b) Calcule la carga inicial y la constante de tiempo. c) ¿Cuánto tarda en descargarse hasta que queda el último cuanto de carga, $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, si la diferencia de potencial inicial a través del capacitor es 12.0 V , la capacitancia es igual a $3.50 \times 10^{-6} \text{ F}$ y la resistencia es 2.00Ω ? (Suponga una disminución exponencial durante todo el proceso de descarga.)

ESTRATEGIA Este problema requiere sustituir valores dados en varias ecuaciones, así como algunas manipulaciones algebraicas que involucran al logaritmo natural. En el inciso a), establezca $q = \frac{1}{4}Q$ en la ecuación 18.9 para un capacitor que se descarga, donde Q es la carga inicial y resuelva para el tiempo t . En el inciso b), sustituya en las ecuaciones 16.8 y 18.8 para encontrar la carga inicial del capacitor y la constante de tiempo, respectivamente. En el inciso c), sustituya los resultados del inciso b) y $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ en la ecuación de descarga de capacitor, y de nuevo resuelva para el tiempo.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuánto tarda la carga en el capacitor para reducirse a un cuarto de su valor inicial?

Aplique la ecuación 18.9:

$$q(t) = Qe^{-t/RC}$$

Sustituya $q(t) = Q/4$ en la ecuación anterior y cancele Q :

$$\frac{1}{4}Q = Qe^{-t/RC} \rightarrow \frac{1}{4} = e^{-t/RC}$$

Tome logaritmos naturales a ambos lados y resuelva para el tiempo t :

$$\ln\left(\frac{1}{4}\right) = -t/RC$$

$$t = -RC \ln\left(\frac{1}{4}\right) = 1.39RC = 1.39\tau$$

b) Calcule la carga inicial y la constante de tiempo a partir de los datos dados.

Use la ecuación de capacitancia para encontrar la carga inicial:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \rightarrow Q = C \Delta V = (3.50 \times 10^{-6} \text{ F})(12.0 \text{ V})$$

$$Q = 4.20 \times 10^{-5} \text{ C}$$

Ahora calcule la constante de tiempo:

$$\tau = RC = (2.00 \Omega)(3.50 \times 10^{-6} \text{ F}) = 7.00 \times 10^{-6} \text{ s}$$

c) ¿Cuánto tarda en drenarse todo, menos el último cuanto de carga?

Aplique la ecuación 18.9, divida entre Q y tome logaritmos naturales de ambos lados:

$$q(t) = Qe^{-t/\tau} \rightarrow e^{-t/\tau} = \frac{q}{Q}$$

$$-t/\tau = \ln\left(\frac{q}{Q}\right) \rightarrow t = -\tau \ln\left(\frac{q}{Q}\right)$$

Tome logaritmos naturales de ambos lados:

Sustituya $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ y los valores para Q y τ que encontró en el inciso b):

$$t = -(7.00 \times 10^{-6} \text{ s}) \ln\left(\frac{1.60 \times 10^{-19} \text{ C}}{4.20 \times 10^{-5} \text{ C}}\right) \\ = 2.32 \times 10^{-4} \text{ s}$$

COMENTARIOS El inciso a) muestra cómo a menudo se puede obtener información útil aun cuando no se conozcan detalles concernientes a capacitancias, resistencias o voltajes. El inciso c) demuestra que los capacitores se pueden descargar (o, por el contrario, cargarse) rápidamente, a pesar de la forma matemática de las ecuaciones 18.7 y 18.9, que indican que se requeriría un tiempo infinito.

PREGUNTA 18.7 Suponga que se duplica el voltaje inicial que se utilizó para cargar al capacitor. ¿El tiempo requerido para descargar todo, menos el último cuanto de carga, a) aumenta, b) disminuye, c) permanece igual?

EJERCICIO 18.7 Suponga que el mismo tipo de circuito en serie tiene $R = 8.00 \times 10^4 \Omega$, $C = 5.00 \mu\text{F}$ y un voltaje inicial a través del capacitor de 6.00 V. a) ¿Cuánto tarda el capacitor en perder la mitad de su carga inicial? b) ¿Cuánto tarda en perder todo, menos los últimos 10 electrones en la placa negativa?

RESPUESTAS a) 0.277 s b) 12.2 s

18.6 Circuitos domésticos

Los circuitos domésticos son una aplicación práctica de algunas de las ideas que se presentan en este capítulo. En una instalación típica, la compañía eléctrica distribuye la electricidad a hogares individuales con un par de alambres o líneas de transmisión. Los dispositivos eléctricos en un hogar se conectan entonces en paralelo a estas líneas, como se muestra en la figura 18.20. La diferencia de potencial entre los dos alambres es de aproximadamente 120 V. (Estas corrientes y voltajes en realidad son corrientes y voltajes alternos, pero para el análisis actual se supondrá que son corrientes y voltajes directos.) Uno de los alambres se conecta a tierra y el otro alambre, a veces llamado alambre “vivo”, está a un potencial de 120 V. Un medidor y un interruptor (o un fusible) se conectan en serie con el alambre que entra a la casa, como se indica en la figura.

En los hogares modernos, en lugar de fusibles se usan interruptores. Cuando la corriente en un circuito excede cierto valor (por lo general 15 o 20 A), el interruptor entra en acción y abre el circuito. La figura 18.21 (página 634) muestra un diseño para un

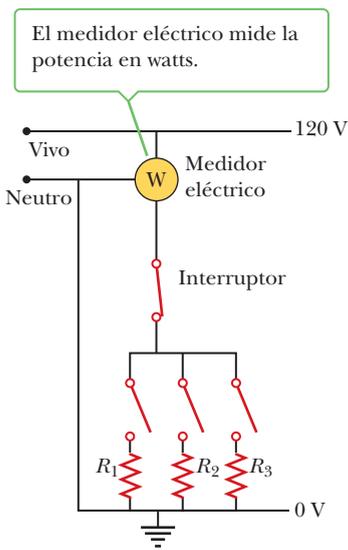


Figura 18.20 Diagrama de alambreado para un circuito doméstico. Las resistencias R_1 , R_2 y R_3 representan aparatos u otros dispositivos eléctricos que operan a un voltaje aplicado de 120 V.

APLICACIÓN

Fusibles e interruptores

interruptor. La corriente pasa a través de una tira bimetálica, cuya parte superior se dobla hacia la izquierda cuando corriente en exceso la calienta. Si la tira se dobla lo suficiente hacia la izquierda, se asienta en un surco en la barra metálica cargada con un resorte. Cuando ocurre este asentamiento, la barra cae lo suficiente para abrir el circuito en el punto de contacto. La barra también voltea una palanca que indica que el interruptor no está en operación. (Después de remover la sobrecarga, la palanca se puede voltear nuevamente.) Los interruptores basados en este diseño tienen la desventaja de que se requiere cierto tiempo para el calentamiento de la tira, de modo que el circuito puede no abrirse con suficiente rapidez cuando se sobrecarga. Por lo tanto, muchos interruptores ahora se diseñan para usar electroimanes (que se estudian en el capítulo 19).

El alambre y el interruptor se seleccionan cuidadosamente para satisfacer las demandas de corriente de un circuito. Si el circuito debe transportar corrientes tan grandes como 30 A, se deben usar un alambre de uso pesado y un interruptor apropiado. Los circuitos domésticos por lo general usan focos de potencia y pequeños electrodomésticos que a menudo requieren sólo 20 A. Cada circuito tiene su propio interruptor para acomodar su máxima carga segura.

Como ejemplo, considere un circuito que alimenta a un tostador, un horno de microondas y un calentador (que en la figura 18.20 se representan mediante R_1 , R_2 y R_3). Con la ecuación $P = I\Delta V$, puede calcular la corriente que transporta cada aparato. El tostador, de 1 000 W, extrae una corriente de $1\,000/120 = 8.33$ A. El horno de microondas, que se clasifica a 800 W, extrae una corriente de 6.67 A, y el calentador, clasificado de 1 300 W, extrae una corriente de 10.8 A. Si los tres aparatos se operan simultáneamente, extraen una corriente total de 25.8 A. Por lo tanto, el interruptor debe poder manejar al menos toda esta corriente, o de otro modo presentará fallas. Como alternativa, el tostador y el horno de microondas podrían operar en un circuito de 20 A y el calentador en un circuito separado de 20 A.

Muchos aparatos de uso pesado, como las estufas eléctricas y las secadoras de ropa, requieren 240 V para operar. La compañía eléctrica suministra este voltaje al proporcionar, además de un alambre vivo que está 120 V arriba del potencial de tierra, otro alambre, también considerado vivo, que está 120 V bajo el potencial de tierra (figura 18.22). Por lo tanto, la caída de potencial a través de los dos alambres vivos es de 240 V. Un aparato que opera a partir de una línea de 240 V requiere la mitad de corriente de uno que opera en una línea de 120 V; en consecuencia, se pueden usar alambres más pequeños en el circuito de voltaje más alto sin que se sobrecaliente.

18.7 Seguridad eléctrica

Una persona puede electrocutarse al tocar un alambre vivo mientras está en contacto con tierra. Tal peligro casi siempre se debe a un aislamiento raído que expone al alambre conductor. El contacto a tierra puede hacerse al tocar una tubería (que por lo general está a un potencial de tierra) o al estar de pie sobre tierra con los pies húmedos, porque el agua impura es un buen conductor. Obviamente, tales situaciones se deben evitar a toda costa.

Los choques eléctricos pueden resultar en quemaduras fatales o pueden causar mal funcionamiento de los músculos de órganos vitales, como el corazón. El grado de daño al cuerpo depende de la magnitud de la corriente, el tiempo durante el que actúa y la parte del cuerpo por donde pasa. Corrientes de 5 mA o menos pueden causar una sensación de choque, pero por lo regular causan poco o ningún daño. Si la corriente es más grande que aproximadamente 10 mA, los músculos de la mano se contraen y la persona puede ser incapaz de soltar el alambre vivo. Si una corriente de más o menos 100 mA pasa a través del cuerpo sólo durante algunos segundos, puede ser mortal. Tan grandes corrientes paralizan los músculos respiratorios. En algunos casos, corrientes cercanas a 1 A a través del cuerpo producen serias (y en ocasiones mortales) quemaduras.

Como característica de seguridad adicional para los consumidores, los fabricantes de equipo eléctrico ahora usan cordones eléctricos que tienen un tercer alambre, llamado *toma de tierra* (*case ground*). Para entender cómo funciona, considere el taladro que se usa en la figura 18.23. Un dispositivo de dos alambres tiene uno llamado alambre “vivo”, conectado al lado de alto potencial (120 V) de la línea eléctrica de entrada y el segundo alambre se conecta a tierra (0 V). Si el alambre de alto voltaje entra en contacto con el cuerpo del taladro (figura 18.23a), ocurre un corto circuito. En esta circunstancia inestable,

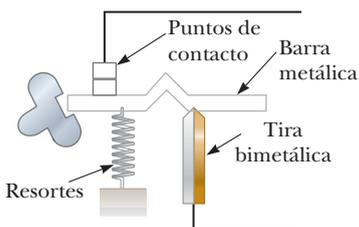


Figura 18.21 Interruptor que utiliza una tira bimetálica para su operación.

APLICACIÓN

Tercer alambre en aparatos al consumidor

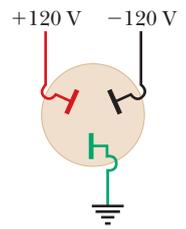
la trayectoria para la corriente es del alambre de alto voltaje, a través de la persona que sostiene el taladro y hacia tierra, una ruta que puede ser mortal. Un tercer alambre proporciona protección, conectado al cuerpo del taladro (figura 18.23b). En este caso, si ocurre un corto, la trayectoria de menor resistencia para la corriente es desde el alambre de alto voltaje, a través del taladro y de vuelta a tierra a través del tercer alambre. La alta corriente resultante que se produce quemará un fusible o activará un interruptor antes que el consumidor se lesione.

En cocinas, baños, sótanos y otras áreas peligrosas de las nuevas casas, ahora se usan tomacorrientes especiales llamados interruptores de fallo a tierra (GFI). Estos interruptores están diseñados para proteger a las personas de los choques eléctricos al “sentir” pequeñas corrientes, de aproximadamente 5 mA y más, que fuguen a tierra. Cuando se detecta corriente por arriba de este nivel, el dispositivo apaga (interrumpe) la corriente en menos de un milisegundo. (Los interruptores de fallo a tierra se estudiarán en el capítulo 20.)

18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas² **BIO**

El uso más notable de los fenómenos eléctricos en los organismos vivos se encuentra en el sistema nervioso de los animales. Células especializadas en el cuerpo llamadas **neuronas** forman una compleja red que recibe, procesa y transmite información desde una parte del cuerpo a otra. El centro de esta red se ubica en el cerebro, que tiene la habilidad de almacenar y analizar información. Sobre la base de esta información, el sistema nervioso controla la parte del cuerpo.

El sistema nervioso es enormemente complejo y consiste en aproximadamente 10^{10} neuronas interconectadas. Algunos aspectos del sistema nervioso son bien conocidos. Durante las décadas pasadas se estableció el método de propagación de señal a través del sis-



© Cengage Learning/George Sample

b

Figura 18.22 a) Las conexiones para cada una de las aberturas en una toma de 240 V. b) Una salida para conexión a una fuente de 240 V.

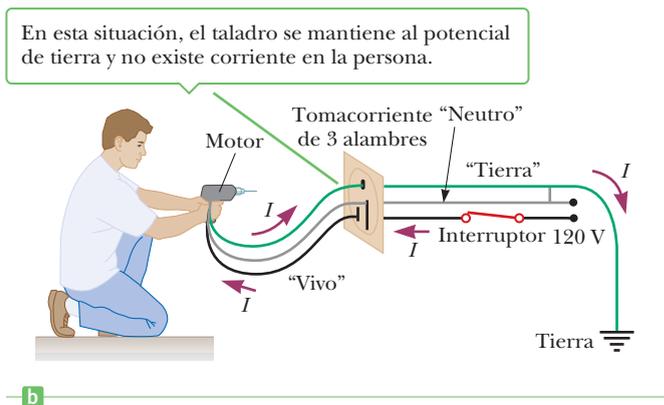
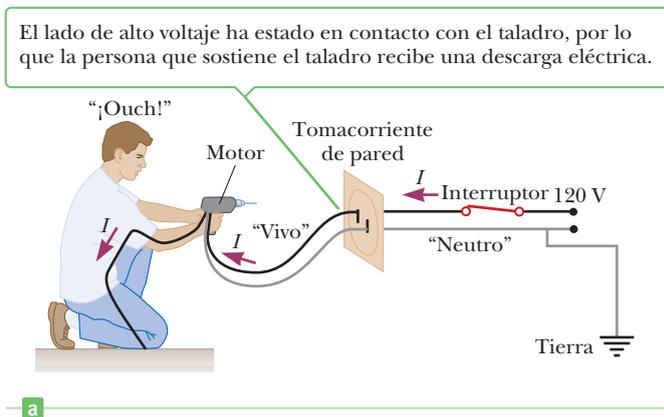


Figura 18.23 El alambre “caliente” (o “vivo”), a 120 V, siempre incluye un interruptor por seguridad. a) Cuando el taladro opera con dos alambres, la trayectoria de corriente normal es del alambre “caliente”, a través de las conexiones del motor y de vuelta a tierra a través del alambre “neutro”. Sin embargo, aquí el lado de alto voltaje entra en contacto con el cuerpo del taladro, de modo que la persona que sostiene el taladro recibe un choque eléctrico. b) El choque se puede evitar mediante un tercer alambre que va del cuerpo del taladro a tierra. Los colores de los cables eléctricos representan las normas: el cable “vivo” es de color negro, el cable de tierra es verde y el cable neutro es de color gris (de color gris en la figura).

²Esta sección se basa en un ensayo de Paul Davidovitz, del Boston College.

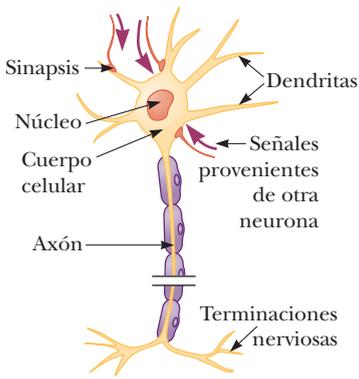


Figura 18.24 Diagrama de una neurona.

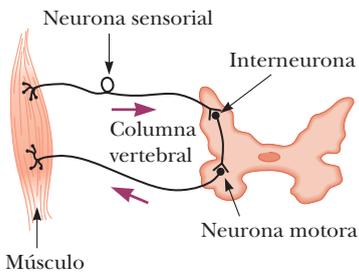


Figura 18.25 Circuito neuronal simple.

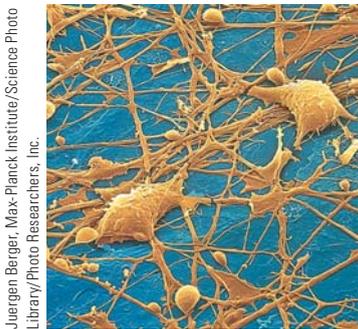
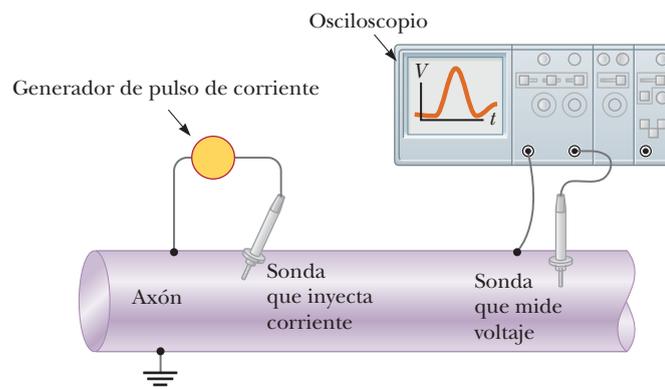


Figura 18.26 Neurona estrella de corteza humana.

Figura 18.27 Un axón estimulado eléctricamente. La sonda izquierda inyecta un corto pulso de corriente y la sonda derecha mide el potencial de acción resultante como función.



tema nervioso. Los mensajes transmitidos por las neuronas son pulsos de voltaje llamados *potenciales de acción*. Cuando una neurona recibe un estímulo muy fuerte, produce pulsos de voltaje idénticos que se propagan de manera activa a lo largo de su estructura. La intensidad del estímulo se transporta mediante el número de pulsos producidos. Cuando los pulsos llegan al extremo de la neurona, activan células musculares u otras neuronas. Existe un “umbral de disparo” para las neuronas: los potenciales de acción se propagan a lo largo de una neurona sólo si el estímulo es suficientemente fuerte.

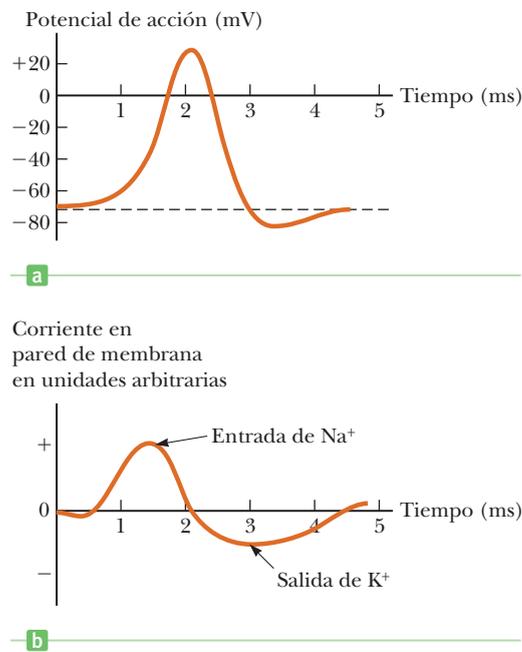
Las neuronas pueden dividirse en tres clases: neuronas sensoriales, neuronas motoras e interneuronas. Las neuronas sensoriales reciben estímulos de los órganos sensoriales que monitorean el ambiente externo e interno del cuerpo. Dependiendo de sus funciones especializadas, las neuronas sensoriales transmiten mensajes acerca de factores como luz, temperatura, presión, tensión muscular y olor a centros superiores en el sistema nervioso. Las neuronas motoras transportan mensajes que controlan a las células musculares. Los mensajes se basan en la información proporcionada por las neuronas sensoriales y por el cerebro. Las interneuronas transmiten información de una neurona a otra.

Cada neurona consiste en un cuerpo celular al cual se unen terminaciones de entrada llamadas **dendritas** y un largo tallo llamado **axón**, que transmite la señal desde la célula (figura 18.24). El extremo lejano del axón se ramifica en terminaciones nerviosas que transmiten la señal a través de pequeñas brechas hacia otras neuronas o a células musculares. En la figura 18.25 se muestra un circuito sensorio motriz simple. Un estímulo de un músculo produce impulsos nerviosos que viajan hacia la columna vertebral. Ahí la señal se transmite hacia una neurona motora, que a su vez envía impulsos para controlar el músculo. La figura 18.26 muestra una imagen de microscopio electrónico de neuronas en el cerebro.

El axón, que es una extensión de la neurona, conduce impulsos eléctricos desde el cuerpo celular. Algunos axones son extremadamente largos. En los humanos, por ejemplo, los axones que conectan la columna vertebral con los dedos de manos y pies miden más de 1 m de largo. La neurona puede transmitir mensajes debido a las activas características eléctricas especiales del axón. (El axón actúa como una fuente **activa** de energía, como una batería, en lugar de como una extensión **pasiva** de alambre resistivo.) Mucha de la información acerca de las propiedades eléctricas y químicas del axón se obtuvieron al insertar pequeñas sondas con forma de aguja en ellas. La figura 18.27 muestra una configuración experimental.

Observe que el exterior del axón está aterrizado, de modo que todos los voltajes son medidos con respecto a un potencial cero en el exterior. Con estas sondas es posible inyectar corriente en el axón, medir el potencial de acción resultante como función del tiempo en un punto fijo y tomar muestras de la composición química de la célula. Tales experimentos usualmente son difíciles de realizar porque el diámetro de la mayoría de los axones es muy pequeño. Incluso los axones más largos en el sistema nervioso humano tienen un diámetro de cerca de 20×10^{-4} cm. Sin embargo, el calamar gigante tiene un axón con un diámetro de aproximadamente 0.5 mm, que es lo suficiente grande para la conveniente inserción de sondas. Mucha de la información acerca de la transmisión de señales en el sistema nervioso proviene de experimentos con axón de calamar.

En el ambiente acuoso del cuerpo, sales y otras moléculas se disocian en iones positivos y negativos. Como resultado, los fluidos corporales son relativamente buenos conductores de electricidad. El interior del axón está lleno con un fluido iónico que se separa del fluido corporal circundante mediante una delgada membrana que tiene sólo alrededor de 5 a 10 nm



de grueso. Las resistividades de los fluidos interno y externo son casi las mismas, pero sus composiciones químicas son sustancialmente diferentes. El fluido externo es similar al agua de mar: sus solutos iónicos son principalmente iones sodio positivos y iones cloro negativos. Dentro del axón, los iones positivos son por lo regular iones potasio y los iones negativos son principalmente grandes iones orgánicos.

Normalmente, las concentraciones de iones sodio y potasio dentro y fuera del axón se igualarían mediante difusión. Sin embargo, el axón es una célula viva con un suministro de energía y puede cambiar la permeabilidad de sus membranas en una escala de tiempo de milisegundos.

Cuando el axón no conduce un pulso eléctrico, la membrana de éste es enormemente permeable a iones potasio, ligeramente permeable a iones sodio e impermeable a grandes iones orgánicos. En consecuencia, aunque los iones sodio no pueden entrar en forma fácil al axón, los iones potasio pueden salir. Sin embargo, conforme los iones potasio salen del axón, dejan detrás grandes iones orgánicos negativos, que no pueden seguirlos a través de la membrana. Como resultado, dentro del axón se acumula un potencial negativo con respecto al exterior. El potencial negativo final que se alcanza, que se midió en aproximadamente -70 mV, contiene la salida de iones potasio de modo que, en equilibrio, la concentración de iones es como se estableció.

El mecanismo para la producción de una señal eléctrica mediante la neurona es conceptualmente simple, pero fue difícil de sortear de manera experimental. Cuando una neurona cambia su potencial de reposo debido a un estímulo apropiado, las propiedades de su membrana cambian en forma local. Como resultado, hay un súbito flujo de iones sodio hacia la célula que dura cerca de 2 ms. Este flujo produce el pico de $+30$ mV en el potencial de acción que se muestra en la figura 18.28a. En seguida, hay un aumento en el flujo de iones potasio hacia afuera de la célula, que restaura el potencial de acción de reposo de -70 mV en un adicional 3 ms. Los flujos de iones Na^+ y K^+ se midieron con trazadores radiactivos Na y K. La señal nerviosa que se midió viaja a lo largo del axón con rapidez de 50 m/s a aproximadamente 150 m/s. Este flujo de partículas cargadas (o transmisión de señal) en un axón nervioso es *diferente* a la transmisión de señal en un alambre metálico. En un axón, las cargas se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de viaje de la señal nerviosa y la señal nerviosa se mueve en forma más lenta que un pulso de voltaje que viaja a lo largo de un alambre metálico.

Aunque el axón es una estructura muy compleja y se desconoce mucho acerca de cómo se abren y cierran los canales iónicos Na^+ y K^+ , para analizar los axones se pueden usar los conceptos estándar de corriente y capacitancia en los circuitos eléctricos. Se deja como problema (problema 41) demostrar que el axón, que tiene cargas iguales y opuestas separadas por una delgada membrana dieléctrica, actúa como un capacitor.

RESUMEN**18.1 Fuentes de fem**

Cualquier dispositivo, como una batería o generador, que aumenta la energía potencial eléctrica de las cargas en un circuito eléctrico se llama **fuentes de fem**. Las baterías convierten energía química en energía potencial eléctrica y los generadores convierten energía mecánica en energía potencial eléctrica.

El voltaje ΔV en las terminales de una batería está dado por

$$\Delta V = \mathcal{E} - Ir \quad [18.1]$$

donde \mathcal{E} es la fem de la batería, I es la corriente y r es la resistencia interna de la batería. Por lo general, la resistencia interna es suficientemente pequeña para despreciarse.

18.2 Resistores en serie

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en **serie** es

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad [18.4]$$



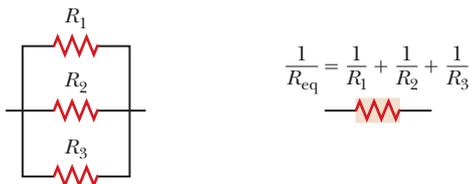
Varios resistores en serie pueden ser reemplazados con un solo resistor equivalente.

La corriente permanece a un valor constante conforme pasa a través de una serie de resistores. La diferencia de potencial a través de cualesquiera dos resistores en serie es diferente, a menos que los resistores tengan la misma resistencia.

18.3 Resistores en paralelo

La **resistencia equivalente** de un conjunto de resistores conectados en **paralelo** es

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad [18.6]$$



Varios resistores en paralelo pueden ser reemplazados con un solo resistor equivalente.

La diferencia de potencial a través de cualesquiera dos resistores en paralelo es la misma; sin embargo, la corriente en cada resistor será diferente a menos que las dos resistencias sean iguales.

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Los circuitos complejos se pueden analizar con las **reglas de Kirchhoff**:

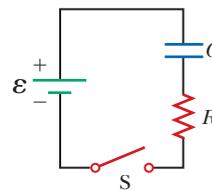
1. La suma de las corrientes que entran a cualquier nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo.
2. La suma de las diferencias de potencial a través de todos los elementos alrededor de cualquier malla de circuito cerrada debe ser cero.

La primera regla, llamada regla del nodo, es un enunciado de **conservación de carga**. La segunda regla, llamada regla de la malla, es un enunciado de la **conservación de la energía**. Resolver problemas involucra el uso de estas reglas para generar tantas ecuaciones como incógnitas existan. Entonces las ecuaciones se pueden resolver de manera simultánea.

18.5 Circuitos RC

En un circuito RC simple, con una batería, un resistor y un capacitor en serie, la carga sobre el capacitor aumenta de acuerdo con la ecuación

$$q = Q(1 - e^{-t/RC}) \quad [18.7]$$



Circuito RC con una batería y una resistencia carga un condensador cuando el interruptor está cerrado.

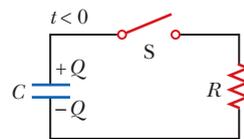
El término RC en la ecuación 18.7 se llama **constante de tiempo** τ (letra griega tau), de modo que

$$\tau = RC \quad [18.8]$$

La constante de tiempo representa el tiempo requerido para que la carga aumente de cero a 63.2% de su valor de equilibrio máximo.

Un circuito RC simple que consiste en un capacitor cargado en serie con un resistor se descarga de acuerdo con la expresión

$$q = Qe^{-t/RC} \quad [18.9]$$



Circuito RC con carga condensador se descarga a través de una resistencia cuando el interruptor está cerrado.

Los problemas se pueden resolver al sustituir en estas ecuaciones. El voltaje ΔV a través del capacitor en cualquier tiempo se obtiene al dividir la carga entre la capacitancia: $\Delta V = q/C$. El uso de la regla de Kirchhoff produce la diferencia de potencial a través del resistor. La ley de Ohm aplicada al resistor produce entonces la corriente.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Las terminales de una batería se conectan en paralelo a través de dos resistores diferentes. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El resistor más grande porta más corriente que el resistor más pequeño. b) El resistor más grande porta menos corriente que el resistor más pequeño. c) La diferencia de voltaje a través de cada resistor es la misma. d) La diferencia de voltaje a través del resistor más grande es mayor que la diferencia de voltaje a través del resistor más pequeño. e) La diferencia de voltaje es mayor a través del resistor más cercano a la batería.
- Las terminales de una batería se conectan en serie a través de dos resistores diferentes. ¿Cuál de los siguientes enunciados es correcto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El resistor más pequeño porta más corriente. b) El resistor más grande porta menos corriente. c) La corriente en cada resistor es la misma. d) La diferencia de voltaje a través de cada resistor es la misma. e) La diferencia de voltaje es mayor a través del resistor más cercano a la terminal positiva.
- Resistores de 1.00 y 2.00Ω se conectan en paralelo. ¿Cuál es la resistencia individual equivalente? a) 1.50Ω b) 3.00Ω c) 0.667Ω d) 0.333Ω e) 1.33Ω
- Dos focos están conectados en serie, uno opera a 120 W y el otro a 60.0 W. Si la caída de voltaje a través de la combinación en serie es 120 V, ¿cuál es la corriente en el circuito? a) 1.0 A b) 1.5 A c) 2.0 A d) 2.5 A e) 3.0 A
- ¿Cuál de las siguientes ecuaciones no es consecuencia de las leyes de Kirchhoff, cuando se aplica a la figura POM18.5? a) $9 - I_1 - 2I_2 = 0$ b) $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ c) $4 - 2I_2 - 3I_3 = 0$ d) $5 - I_1 - 3I_3 = 0$ e) Todas estas ecuaciones son correctas.
- ¿Cuál es la corriente en la resistencia de 10Ω en el circuito que se muestra en la figura POM18.6? a) 0.59 A b) 1.0 A c) 11 A d) 16 A e) 5.3 A

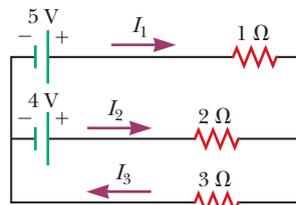


Figura POM18.5

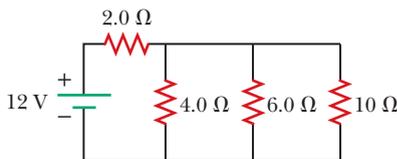


Figura POM18.6

de 120 V, ¿qué corriente total se entrega mediante una fuente externa? a) 12 A b) 24 A c) 32 A d) 8.0 A e) 15 A

- Si las terminales de una batería se conectan en serie a través de dos resistores idénticos, la potencia total entregada por la batería es 8.0 W. Si la misma batería se conecta en paralelo a través de los resistores, ¿cuál es la potencia total entregada por la batería? a) 16 W b) 32 W c) 2.0 W d) 4.0 W e) 8.0 W
- ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito que se muestra en la figura POM18.9? Cada uno de los cinco resistores tiene resistencia R , y cada uno de los cinco capacitores tiene capacitancia C . La resistencia interna de la batería es despreciable. a) RC b) $5RC$ c) $10RC$ d) $25RC$ e) Ninguna de estas respuestas es correcta.

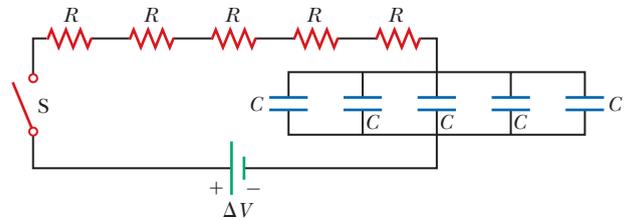


Figura POM18.9

- El capacitor en la figura POM18.10 tiene una gran capacitancia e inicialmente no tiene carga. Después de cerrar el interruptor, ¿qué ocurre con el foco? a) Nunca enciende porque el capacitor representa un circuito abierto. b) Brilla sólo después que el capacitor está cargado por completo. c) Brilla durante un tiempo muy corto conforme el capacitor se carga. d) Brilla de manera continua. e) Brilla de manera intermitente.
- Varios resistores se conectan en paralelo. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto acerca de la resistencia equivalente correspondiente? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Es mayor que la resistencia de cualquiera de los resistores individuales. b) Es menor que la resistencia de cualquiera de los resistores individuales. c) Depende del voltaje aplicado a través de la serie. d) Es igual a la suma de las resistencias de todos los resistores en la serie. e) Es igual al recíproco de la suma de los inversos de las resistencias de todos los resistores.

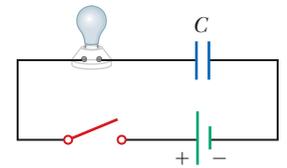


Figura POM18.10

- Cuando se conecta a una fuente de 120 V, un calentador eléctrico se clasifica a 1200 W y un tostador a 6.0×10^2 W. Si ambos aparatos se operan en paralelo en un circuito

- Cuando resistores con diferentes resistencias están conectados en serie, ¿cuál de las siguientes opciones debe ser la misma para cada resistencia? Elija todas las respuestas correctas. a) la diferencia de potencial b) la corriente c) la potencia suministrada d) la carga que entra en cada

resistencia en un intervalo dado e) ninguna de las respuestas.

13. El capacitor en la figura POM18.13 inicialmente no tiene carga. Cuando se cierra el interruptor en $t = 0$, ¿cuál es la caída de voltaje a través del capacitor después de transcurrida una constante de tiempo?
- a) 2.05 V b) 3.25 V c) 6.63 V
d) 3.79 V e) 4.43 V

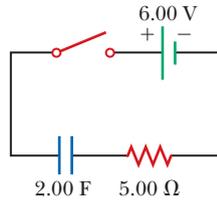


Figura POM18.13

14. El interruptor de un circuito cableado está a) en serie con el dispositivo está protegiendo, b) en paralelo, o c) ni en serie o en paralelo, o d) ¿es imposible decir?

15. Varios resistores están conectados en serie. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones son verdaderas para la resistencia equivalente correspondiente? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Es mayor que cualquiera de las resistencias individuales. b) Es menor que cualquiera de las resistencias individuales. c) Depende del voltaje aplicado a través de la serie. d) Es igual a la suma de las resistencias de todas las individuales. e) Es igual al recíproco de la suma de los recíprocos de las resistencias de todas las resistencias.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿La dirección de la corriente en una batería siempre va de la terminal negativa a la positiva? Explique.
- Dados tres focos y una batería, bosqueje tantos circuitos diferentes como pueda.
- Suponga que la energía transferida a una batería muerta durante la carga es W . Entonces la batería recargada se utiliza hasta que se descarga por completo nuevamente. ¿También es W la energía total transferida desde la batería durante su uso?
- Un cortocircuito es un circuito que contiene una trayectoria de muy baja resistencia en paralelo con alguna otra parte del circuito. Analice el efecto de un cortocircuito sobre la porción del circuito con la que es paralelo. Use como ejemplo una lámpara con un alambre raído.
- Conectar baterías en serie aumenta la fem aplicada a un circuito. ¿Qué ventaja puede haber al conectarlas en paralelo?
- Si la energía eléctrica se transmite a través de largas distancias, la resistencia de los alambres se vuelve significativa. ¿Por qué? ¿Qué modo de transmisión resultaría en menos pérdida de energía, alta corriente y bajo voltaje o baja corriente y alto voltaje? Discútalos.
- Si tiene los faros de su auto encendidos mientras lo arranca, ¿por qué se apagan mientras el coche enciende?
- Dos series de luces de Navidad están disponibles. Para la serie A, cuando un foco se remueve, los focos restantes permanecen iluminados. Para la serie B, cuando un foco se remueve, los focos restantes no operan. Explique la diferencia en alambrado para las dos series.
- ¿Por qué es posible que un ave se pose sobre un cable de alto voltaje sin electrocutarse? (Vea la figura POM18.9.)
- a) Dos resistores se conectan en serie a través de una batería. ¿La potencia entregada a cada resistor i) es la misma o ii) no necesariamente es la misma? b) Dos resis-



Figura POM18.9

tores se conectan en paralelo a través de una batería. ¿La potencia entregada a cada resistor i) es la misma o ii) no necesariamente es la misma?

- Suponga que un paracaidista aterriza sobre una línea de alto voltaje y agarra el alambre mientras se prepara para su rescate. ¿Se electrocutará? Si entonces se rompe el cable, ¿debe continuar agarrándose del alambre mientras cae a tierra?
- Una estación de deportes de invierno consiste en algunos telesquíes y muchas pistas interconectadas colina abajo en las laderas de una montaña, con una cabaña en el fondo. Los telesquíes son análogos a baterías, y las pistas son análogas a resistores. Describa cómo dos pistas pueden estar en serie. Describa cómo tres pistas pueden estar en paralelo. Bosqueje un nodo de un telesquí y dos pistas. Uno de los esquiadores lleva un altímetro. Establezca las reglas del nodo y de la malla de Kirchhoff para la estación de esquí.
- En las reglas de Kirchhoff se representan dos leyes de conservación. ¿Cuáles son?
- ¿Por qué es peligroso encender una luz cuando está usted en una bañera?

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto

1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

18.1 Fuentes de fem

18.2 Resistores en serie

18.3 Resistores en paralelo

- 1. Una batería, que tiene una fem de 9.00 V, entrega 117 mA cuando se conecta a una carga de 72.0 Ω. Determine la resistencia interna de la batería.
- 2. Tres resistores de 9.0 Ω se conectan en serie con una batería de 12 V. Encuentre a) la resistencia equivalente del circuito y b) la corriente en cada resistor. c) Repita para el caso en el que los tres resistores se conectan en paralelo a través de la batería.
- 3. Un foco marcado “75 W [a] 120 V” se atornilla en un portafocos que está en un extremo de una larga extensión en la que cada uno de los conductores tiene una resistencia de 0.800 Ω. El otro extremo de la extensión se conecta a un tomacorriente de 120 V. Dibuje un diagrama de circuito y encuentre la potencia real del foco en el circuito descrito.
- 4. a) Encuentre la corriente en un resistor de 8.00 Ω conectado a una batería que tiene una resistencia interna de 0.15 Ω, si el voltaje a través de la batería (el voltaje en terminales) es 9.00 V. b) ¿Cuál es la fem de la batería?

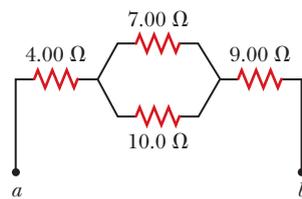


Figura P18.5

- 5. M a) Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos *a* y *b* de la figura P18.5. b) Calcule la corriente en cada resistor si se aplica una diferencia de potencial de 34.0 V entre los puntos *a* y *b*.

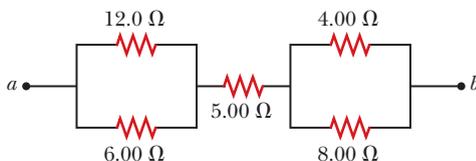


Figura P18.6

- 6. Considere la combinación de resistores que se muestra en la figura P18.6. a) Encuentre la resistencia equivalente entre los puntos *a* y *b*. b) Si se aplica un voltaje de 35.0 V entre los puntos *a* y *b*, encuentre la corriente en cada resistor.

paralelo, la resistencia equivalente es de 150 Ω. Determine la resistencia de cada resistor.

- 8. PG Considere el circuito que se muestra en la figura P18.8. a) Calcule la resistencia equivalente de los resistores de 10.0 y 5.00 Ω conectados en paralelo. b) Con el resultado del inciso a), calcule la resistencia combinada de los resistores de 10.0, 5.00 y 4.00 Ω. c) Calcule la resistencia equivalente de la resistencia combinada que encontró en el inciso b) y el resistor de 3.00 Ω en paralelo. d) Combine la resistencia equivalente que encontró en el inciso c) con el resistor de 2.00 Ω. e) Calcule la corriente total en el circuito. f) ¿Cuál es la caída de voltaje a través del resistor de 2.00 Ω? g) Reste el resultado del inciso f) del voltaje de la batería y encuentre el voltaje a través del resistor de 3.00 Ω. h) Calcule la corriente en el resistor de 3.00 Ω.

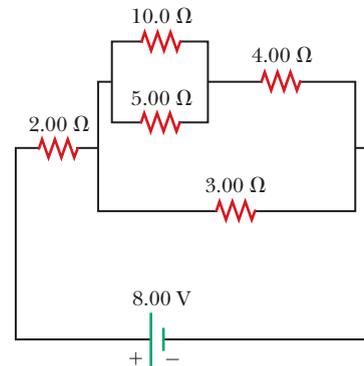


Figura P18.8

- 9. Considere el circuito que se muestra en la figura P18.9. Encuentre a) la diferencia de potencial entre los puntos *a* y *b* y b) la corriente en el resistor de 20.0 Ω.

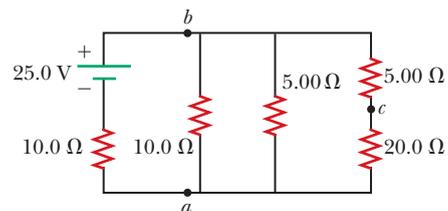


Figura P18.9

- 7. Dos resistores conectados en serie tienen una resistencia equivalente de 690 Ω. Cuando están conectados en

- 10. S Cuatro resistores están conectados a una batería como se muestra en la figura P18.10 (página 642). a) Determine

la diferencia de potencial en cada resistor en términos de \mathcal{E} . b) Determine la corriente en cada resistencia en términos de I .

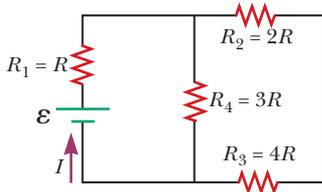


Figura P18.10

11. La resistencia entre las terminales a y b en la figura P18.11 es 75Ω . Si los resistores marcados R tienen el mismo valor, determine R .

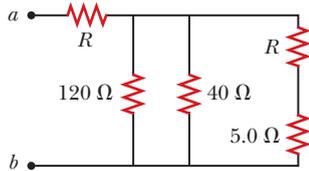


Figura P18.11

12. Una batería con $\mathcal{E} = 6.00 \text{ V}$ y sin resistencia interna suministra corriente al circuito de la figura P18.12. Cuando el interruptor S de doble tiro está abierto como se muestra en la figura, la corriente en la batería es de 1.00 mA . Cuando se cierra el interruptor en la posición a , la corriente en la batería es de 1.20 mA . Cuando se cierra el interruptor en la posición b , la corriente en la batería es de 2.00 mA . Encuentre las resistencias a) R_1 , b) R_2 y c) R_3 .

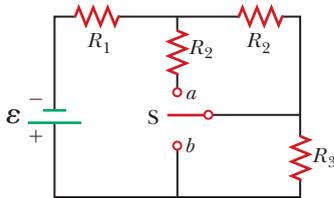


Figura P18.12

13. Determine la corriente en el resistor de 12Ω de la figura P18.13.

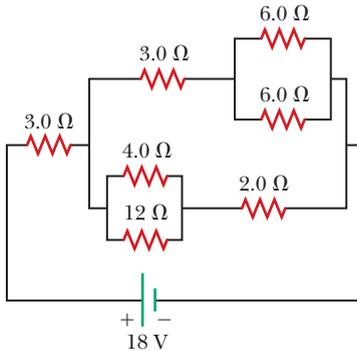


Figura P18.13

14. **CIC** a) ¿Es posible reducir el circuito que se muestra en la figura P18.14 a un solo resistor equivalente conectado a través de la batería? Explique. b) Determine la corriente en el resistor de 2.00Ω . c) Calcule la potencia que la batería entrega al circuito.

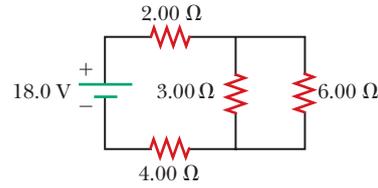


Figura P18.14

15. a) Usted necesita un resistor de 45Ω , pero el almacén sólo tiene resistores de 20 y 50Ω . ¿Cómo puede lograr la resistencia deseada bajo estas circunstancias? b) ¿Qué puede hacer si necesita un resistor de 35Ω ?

18.4 Reglas de Kirchhoff y circuitos CD complejos

Nota: Para algunos circuitos, las corrientes no necesariamente están en la dirección que se muestra.

16. **S** a) Determine la corriente en cada resistor de la figura P18.16 con el uso de las reglas para resistores en serie y en paralelo. b) Escriba tres ecuaciones independientes para las tres corrientes con las leyes de Kirchhoff: una con la regla del nodo; una segunda con la regla de la malla a través de la batería, el resistor de 6.0Ω y el resistor de 24.0Ω ; y la tercera con la regla de la malla a través de los resistores de 12.0 y 24.0Ω . Resuelva para comprobar las respuestas que encontró en el inciso a).

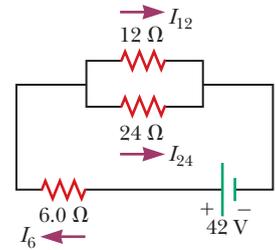


Figura P18.16

17. El amperímetro que se muestra en la figura P18.17 lee 2.00 A . Encuentre I_1 , I_2 y \mathcal{E} .

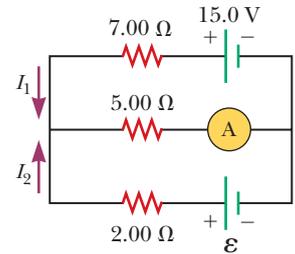


Figura P18.17

18. Para el circuito de la figura P18.18, calcular a) la corriente en la resistencia de 2.00Ω y b) la diferencia de potencial entre los puntos a y b , $\Delta V = V_b - V_a$.

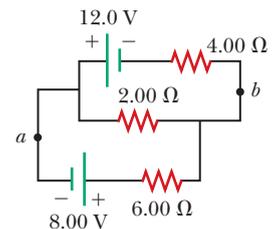


Figura P18.18

19. Tomando $R = 1.00 \text{ k}\Omega$ y $\mathcal{E} = 250 \text{ V}$ en la figura P18.19, determine la dirección y la magnitud de la corriente en el alambre horizontal entre a y e .

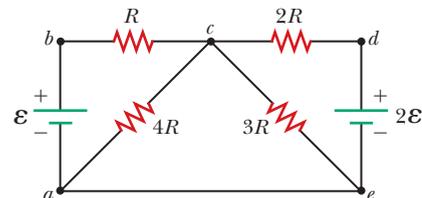


Figura P18.19

20. En el circuito de la figura P18.20, la corriente I_1 es 3.0 A y se desconocen los valores de \mathcal{E} y R . ¿Cuáles son las corrientes I_2 e I_3 ?

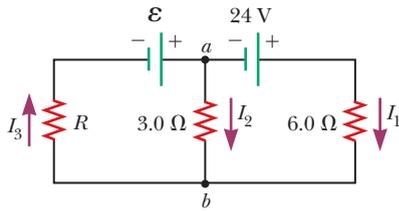


Figura P18.20

21. En el circuito de la figura P18.21, encuentre a) la corriente en cada resistor y b) la diferencia de potencial a través del resistor de 200 Ω .

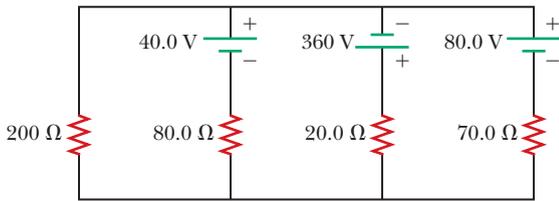


Figura P18.21

22. **CIC** Cuatro resistores se conectan a una batería con un voltaje en terminales de 12 V, como se muestra en la figura P18.22. a) ¿Cómo reduciría usted el circuito a un solo resistor equivalente conectado a la batería? Use este procedimiento para encontrar la resistencia equivalente del circuito. b) Encuentre la corriente entregada por la batería a esta resistencia equivalente. c) Determine la potencia entregada por la batería. d) Determine la potencia entregada al resistor de 50.0 Ω .

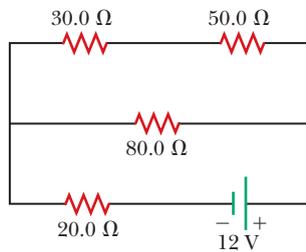


Figura P18.22

23. **M** Con las reglas de Kirchhoff, a) encuentre la corriente en cada resistor que se muestra en la figura P18.23 y b) encuentre la diferencia de potencial entre los puntos c y f .

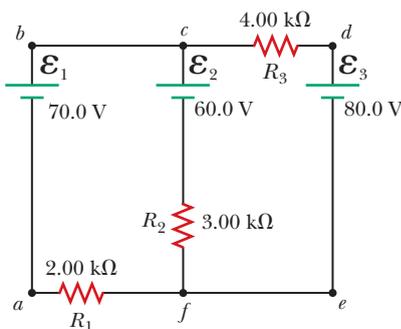


Figura P18.23

24. Dos baterías de 1.50 V, con sus terminales positivas en la misma dirección, se insertan en serie en el barril de una linterna. Una batería tiene una resistencia interna de 0.255 Ω , la otra una resistencia interna de 0.153 Ω . Cuando se cierra el interruptor, una corriente de 0.600 A pasa a través de la lámpara. a) ¿Cuál es la resistencia de la lámpara? b) ¿Qué fracción de la potencia se disipa en las baterías?

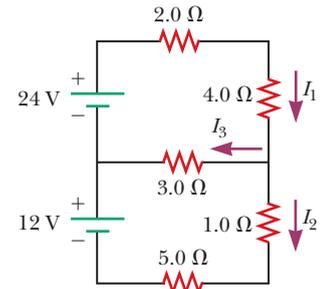


Figura P18.25

25. **CIC** a) ¿El circuito que se muestra en la figura P18.25 se puede reducir a un solo resistor conectado a las baterías? Explique. b) Calcule cada una de las corrientes desconocidas I_1 , I_2 e I_3 para el circuito.

26. Una batería muerta se carga al conectarla a la batería viva de otro automóvil mediante cables pasacorrente (figura P18.26). Determine la corriente a) en el arranque y b) en la batería muerta.

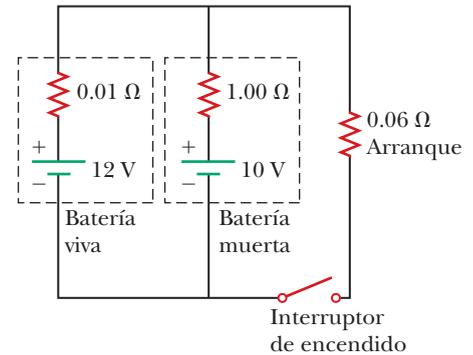


Figura P18.26

27. **CIC** a) ¿El circuito que se muestra en la figura P18.27 se puede reducir a un solo resistor conectado a las baterías? Explique. b) Encuentre la magnitud de la corriente y su dirección en cada resistor.

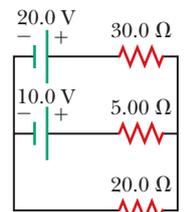


Figura P18.27

28. **PG S** Para el circuito que se muestra en la figura P18.28, use las reglas de Kirchhoff para obtener ecuaciones para a) la malla superior, b) la malla

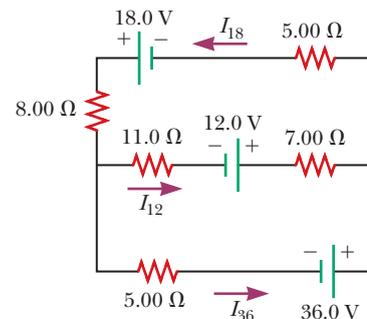


Figura P18.28

inferior y c) el nodo en el lado izquierdo. En cada caso suprima unidades para claridad y simplifique, al combinar términos iguales. d) Resuelva la ecuación del nodo para I_{36} . e) Con la ecuación que encontró en el inciso d), elimine I_{36} de la ecuación que encontró en el inciso b). f) Resuelva en forma simultánea las ecuaciones que encontró en los incisos a) y e) para las dos incógnitas I_{18} e I_{12} , respectivamente. g) Sustituya las respuestas que encontró en el inciso f) en la ecuación del nodo que encontró en el inciso d) y resuelva para I_{36} . h) ¿Cuál es el significado de la respuesta negativa para I_{12} ?

29. **M** Encuentre la diferencia de potencial a través de cada resistor en la figura P18.29.

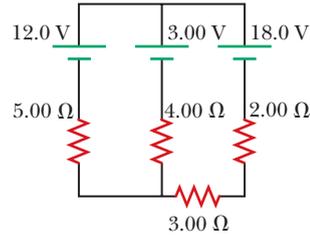


Figura P18.29

18.5 Circuitos RC

30. Demuestre que $\tau = RC$ tiene unidades de tiempo.
31. Considere el circuito RC en serie que se muestra en la figura 18.16 para la cual $R = 75.0 \text{ k}\Omega$, $C = 25.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 12.0 \text{ V}$. Encuentre a) la constante de tiempo del circuito y b) la carga sobre el capacitor una constante de tiempo después de cerrar el interruptor.
32. Un capacitor sin carga y un resistor se conectan en serie a una fuente de fem. Si $\mathcal{E} = 9.00 \text{ V}$, $C = 20.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $R = 100 \text{ }\Omega$, encuentre a) la constante de tiempo del circuito, b) la carga máxima sobre el capacitor y c) la carga sobre el capacitor después de una constante de tiempo.
33. Considere un circuito RC en serie como el de la figura 18.33 para el cual $R = 1.00 \text{ M}\Omega$, $C = 5.00 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 30.0 \text{ V}$. Encuentre a) la constante de tiempo del circuito b) la máxima carga en el capacitor después de que se cierra el interruptor y c) la carga en el capacitor 10.0 s después de cerrar el interruptor.

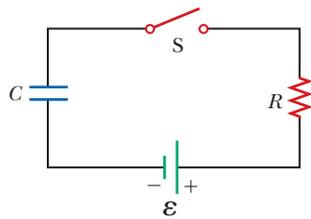


Figura P18.33
Problemas 33 y 34

34. Considere un circuito RC en serie como el de la figura 18.33 para el cual $R = 1.0 \text{ M}\Omega$, $C = 5.0 \text{ }\mu\text{F}$ y $\mathcal{E} = 30 \text{ V}$. Encuentre la carga sobre el capacitor 10 s después de cerrar el interruptor.

35. Un capacitor cargado se conecta a un resistor y a un interruptor como en la figura 18.35. El circuito tiene una constante de tiempo de 1.50 s. Después de cerrar el interruptor, la carga sobre el capacitor es 75.0% de su carga inicial. a) Encuentre el tiempo que tarda en alcanzar esta carga. b) Si $R = 250 \text{ k}\Omega$, ¿cuál es el valor de C ?

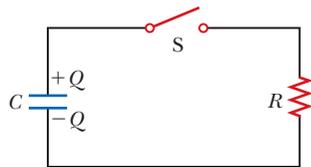


Figura P18.35

36. Un capacitor de $10.0 \text{ }\mu\text{F}$ se carga con una batería de 10.0 V a través de una resistencia R . El capacitor alcanza una diferencia de potencial de 4.00 V en un intervalo de 3.00 s después de que la carga comienza. Encuentre R .

18.6 Circuitos domésticos

37. ¿Qué número mínimo de focos de 75 W se deben conectar en paralelo a un solo circuito doméstico de 120 V para activar un interruptor de 30.0 A ?
38. Una lámpara ($R = 150 \text{ }\Omega$), un calentador eléctrico ($R = 25 \text{ }\Omega$) y un ventilador ($R = 50 \text{ }\Omega$) se conectan en paralelo a través de una línea de 120 V . a) ¿Qué corriente total se suministra al circuito? b) ¿Cuál es el voltaje a través del ventilador? c) ¿Cuál es la corriente en la lámpara? d) ¿Qué potencia se gasta en el calentador?
39. **M** Un elemento calefactor en una estufa se diseña para disipar 3000 W cuando se conecta a 240 V . a) Suponiendo que la resistencia es constante, calcule la corriente en el elemento calefactor si se conecta a 120 V . b) Calcule la potencia que disipa a dicho voltaje.

40. **C/C** Se tienen una cafetera a 1200 W , un tostador a 1100 W y una wafflera a 1400 W . Los tres aparatos se conectan en paralelo a un circuito doméstico común de 120 V . a) ¿Cuál es la corriente en cada electrodoméstico cuando operan de manera independiente? b) ¿Qué corriente total se entrega a los electrodomésticos cuando todos operan simultáneamente? c) ¿Un interruptor de 15 A es suficiente en esta situación? Explique.

18.8 Conducción de señales eléctricas por las neuronas

41. **BIO** Suponga que un tramo de membrana de axón de cerca de 0.10 m de longitud se excita mediante un potencial de acción (longitud excitada = rapidez nerviosa \times duración de pulso = $50.0 \text{ m/s} \times 2.0 \times 10^{-3} \text{ s} = 0.10 \text{ m}$). En el estado de reposo, la superficie exterior de la pared del axón se carga positivamente con iones K^+ y la pared interior tiene una carga igual y opuesta de iones orgánicos negativos, como se muestra en la figura P18.41. Modele al axón como un capacitor de placas paralelas y considere $C = \kappa\epsilon_0 A/d$ y $Q = C\Delta V$ para investigar la carga del modo siguiente. Use valores típicos para un axón cilíndrico con grosor de pared celular $d = 1.0 \times 10^{-8} \text{ m}$, radio de axón $r = 1.0 \times 10^1 \text{ }\mu\text{m}$ y constante dieléctrica de pared celular $\kappa = 3.0$. a) Calcule la carga positiva sobre el exterior del tramo de 0.10 m de axón cuando no conduce un pulso eléctrico. ¿Cuántos iones K^+ hay en el exterior del axón, si se supone una diferencia de potencial inicial de $7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$? ¿Esto es una gran carga por unidad de área? [Sugerencia: Calcule la carga por unidad de área en términos del número de angstroms (Å^2) por carga electrónica. Un átomo tiene una sección transversal de aproximadamente 1 Å^2 ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$).] b) ¿Cuánta carga positiva debe fluir a través de la membrana celular para llegar al estado excitado de $+3.0 \times 10^{-2} \text{ V}$ desde el estado de reposo de $-7.0 \times 10^{-2} \text{ V}$? ¿Cuántos iones sodio (Na^+) es esto? c) Si se requieren 2.0 ms para que los iones Na^+ entren al axón, ¿cuál es la corriente promedio en la pared del axón en este proceso? d) ¿Cuánta energía se necesita para elevar el potencial de la pared interior del

axón a $+3.0 \times 10^{-2}$ V, partiendo desde el potencial de reposo de -7.0×10^{-2} V?

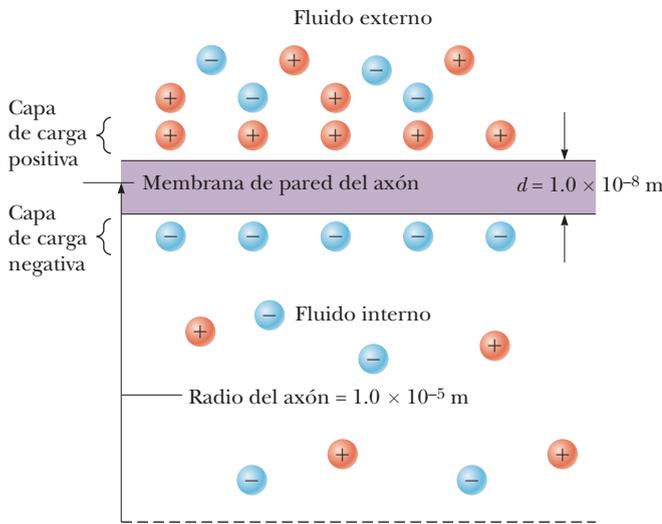


Figura P18.41 Problemas 41 y 42.

42. **BIO** Considere el modelo del axón como capacitor del problema 41 y la figura P18.41. a) ¿Cuánta energía se requiere para restaurar la pared interior del axón a -7.0×10^{-2} V, a partir de $+3.0 \times 10^{-2}$ V? b) Encuentre la corriente promedio en la pared del axón durante este proceso.
43. **BIO** Con base en la figura 18.28b y los resultados de los problemas 18.41d y 18.42a, encuentre la potencia suministrada por el axón por potencial de acción.

Problemas adicionales

44. ¿Cuántos valores de resistencia equivalente diferentes se pueden construir a partir de resistores de 2.0, 4.0 y 6.0 Ω ? Demuestre cómo obtendría cada valor de resistencia ya sea individualmente o al combinarlos.
45. a) Encuentre la diferencia de potencial entre los puntos *a* y *b* en la figura P18.45 y b) identifique cuál es el punto con mayor potencial.

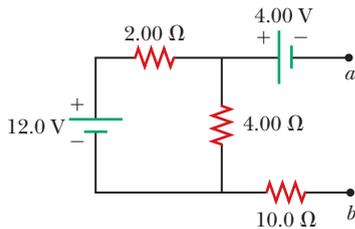


Figura P18.45

46. **CIC** Para el circuito que se muestra en la figura P18.46, el voltímetro lee 6.0 V y el amperímetro lee 3.0 mA. Encuentre a) el valor de *R*, b) la fem de la batería y c) el voltaje a través del resistor

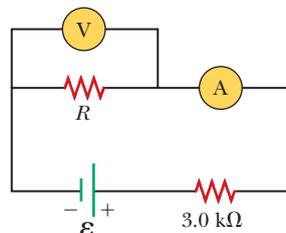


Figura P18.46

de 3.0 k Ω . d) ¿Qué suposiciones tuvo que hacer para resolver este problema?

47. Encuentre a) la resistencia equivalente del circuito en la figura P18.47, b) cada corriente en el circuito, c) la diferencia de potencial a través de cada resistor y d) la potencia disipada por cada resistor.

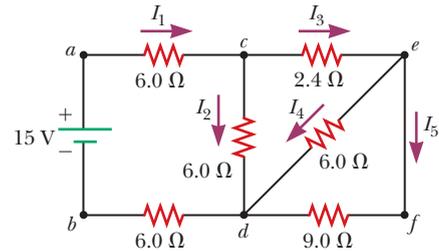


Figura P18.47

48. Tres focos de 60.0 W a 120 V se conectan a través de una fuente de potencia de 120 V, como se muestra en la figura P18.48. Encuentre a) la potencia total entregada a los tres focos y b) la diferencia de potencial a través de cada uno. Suponga que la resistencia de cada foco es constante (aun cuando, en realidad, la resistencia aumenta de manera notoria con la corriente).
49. Cuando dos resistores desconocidos están conectados en serie con una batería, la batería suministra 225 W y conduce un total de corriente de 5.00 A. Por la misma corriente total, 50.0 W son entregados cuando las resistencias están conectadas en paralelo. Determinar el valor de cada resistor.

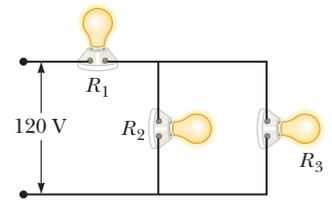


Figura P18.48

50. **CIC** El circuito de la figura P18.50a consta de tres resistores y una batería sin resistencia interna. a) Encontrar la corriente en la resistencia de 5.00 Ω . b) Hallar la potencia suministrada a la resistencia de 5.00 Ω . c) En cada uno de los circuitos de las figuras P18.50b, P18.50c y

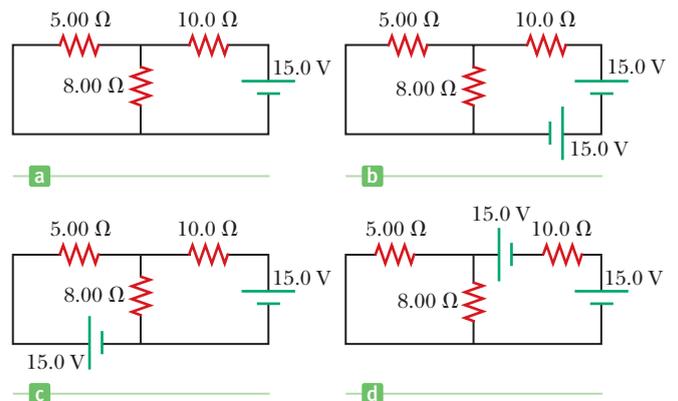


Figura P18.50

P18.50d, una batería adicional de 15.0 V se ha insertado en el circuito. ¿Cuál diagrama o diagramas representan un circuito que requiere el uso de reglas de Kirchhoff para encontrar las corrientes? Explique por qué. d) ¿En cuál de estos tres nuevos circuitos es menor la cantidad de energía entregada a la resistencia de 10.0 Ω? (No es necesario calcular la potencia en cada circuito si usted explica su respuesta.)

51. **CIC S** Un circuito consiste en tres lámparas idénticas, cada una con resistencia R , conectadas a una batería como en la figura P18.51. a) Calcule una expresión para la resistencia equivalente del circuito cuando se abre el interruptor. Repita el cálculo cuando se cierra el interruptor. b) Escriba una expresión para la potencia suministrada por la batería cuando se abre el interruptor. Repita el cálculo cuando se cierra el interruptor. c) Con los resultados ya obtenidos, explique qué ocurre con el brillo de las lámparas cuando se cierra el interruptor.

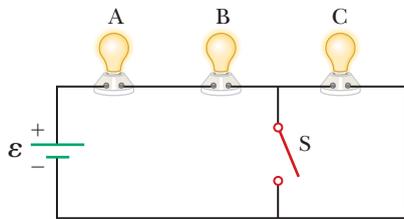


Figura P18.51

52. La resistencia entre los puntos a y b en la figura P18.52 cae a la mitad de su valor original cuando se cierra el interruptor S . Determine el valor de R .

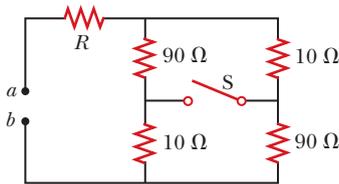


Figura P18.52

53. El circuito de la figura P18.53 se ha conectado durante varios segundos. Encuentre la corriente a) en la batería de 4.00 V, b) en el resistor de 3.00 Ω, c) en la batería de 8.00 V y d) en la batería de 3.00 V. e) Determinar la carga en el capacitor.

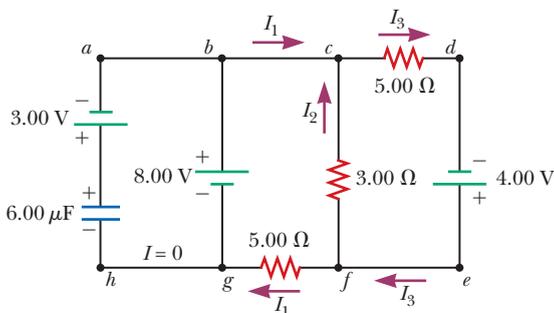


Figura P18.53

54. Una fem de 10 V se conecta a un circuito RC en serie que consiste en un resistor de $2.0 \times 10^6 \Omega$ y un capacitor de $3.0 \mu\text{F}$. Encuentre el tiempo requerido para que la carga sobre el capacitor llegue a 90% de su valor final.

55. El estudiante de ingeniería de una estación de radio universitaria quiere verificar la efectividad de la barra de iluminación en el mástil de la antena (figura P18.55). La resistencia desconocida R_x está entre los puntos C y E . El punto E es una “tierra verdadera”, pero es inaccesible para medición directa porque el estrato donde se ubica está varios metros bajo la superficie de la Tierra. Dos barras idénticas se clavan en el terreno en A y B , e introducen una resistencia desconocida R_y . El procedimiento para encontrar la resistencia desconocida R_x es el siguiente. Mida la resistencia R_1 entre los puntos A y B . Luego conecte A y B con un pesado alambre conductor y mida la resistencia R_2 entre los puntos A y C . a) Deduzca una fórmula para R_x en términos de las resistencias observables R_1 y R_2 . b) Una resistencia de tierra satisfactoria sería $R_x < 2.0 \Omega$. ¿El aterrizaje de la estación es adecuado si las mediciones dan $R_1 = 13 \Omega$ y $R_2 = 6.0 \Omega$?

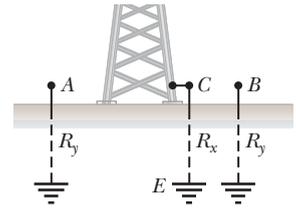


Figura P18.55

56. El resistor R en la figura P18.56 disipa 20 W de potencia. Determine el valor de R .

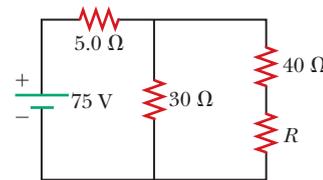


Figura P18.56

57. Un voltaje ΔV se aplica a una configuración en serie de n resistores, cada uno con resistencia R . Los componentes del circuito se vuelven a conectar en una configuración en paralelo y de nuevo se aplica el voltaje ΔV . Demuestre que la potencia consumida por la configuración en serie es $1/n^2$ veces la potencia consumida por la configuración en paralelo.

58. Para la red de la figura P18.58, demuestre que la resistencia entre los puntos a y b es $R_{ab} = \frac{27}{17} \Omega$. (Sugerencia: Conecte una batería con fem \mathcal{E} a través de los puntos a y b y determine \mathcal{E}/I , donde I es la corriente en la batería.)

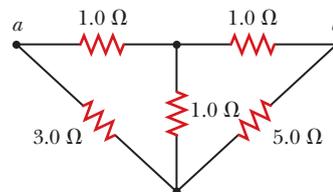


Figura P18.58

59. Una batería con una resistencia interna de 10.0Ω produce un voltaje de circuito abierto de 12.0 V . A través de la batería se conecta una resistencia de carga variable con un rango de 0 a 30.0Ω . (Nota: Una batería tiene una resistencia que depende de la condición de sus químicos y que aumenta conforme la batería envejece. Esta resistencia interna se puede representar mediante un simple diagrama de circuito como un resistor en serie con la batería.) a) Grafique la potencia disipada en el resistor de carga como función de la resistencia de carga. b) Con su gráfica, demuestre el siguiente e importante teorema: *La potencia que se entrega a una carga es un máximo si la resistencia de carga es igual a la resistencia interna de la fuente.*

60. El circuito de la figura P18.60 contiene dos resistores, $R_1 = 2.0 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 3.0 \text{ k}\Omega$, y dos capacitores, $C_1 = 2.0 \mu\text{F}$ y $C_2 = 3.0 \mu\text{F}$, conectados a una batería con fem $\mathcal{E} = 120 \text{ V}$. Si no hay cargas en los capacitores antes de cerrar el interruptor S, determine las cargas q_1 y q_2 en los capacitores C_1 y C_2 , respectivamente, como funciones del tiempo, después de cerrar el interruptor. *Sugerencia:* Primero reconstruya el circuito, de modo que se convierta en un circuito RC simple que contenga un resistor solo y un capacitor solo en serie, conectados a la batería, y luego determine la carga total q almacenada en el circuito.

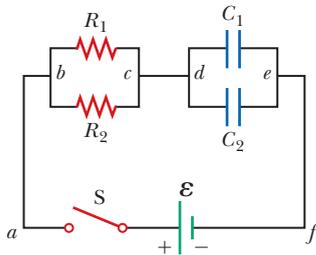


Figura P18.60

61. **BIO** Una anguila eléctrica genera corrientes eléctricas a través de su órgano de Hunter enormemente especializado, donde miles de células con forma de disco, llamadas electrocitos, se alinean en serie, en forma muy parecida a como las baterías se alinean en el interior de una linterna. Cuando se activa, cada electrocito puede mantener una diferencia de potencial cercano a 150 mV a una corriente de 1 A durante más o menos 2.0 ms . Suponga que una anguila eléctrica madura tiene 4.0×10^3 electrocitos y puede entregar hasta 300 choques en rápida sucesión durante aproximadamente 1 s . a) ¿Qué potencia eléctrica máxima puede generar una anguila eléctrica? b) ¿Aproximadamente cuánta energía libera en un choque? c) ¿Cuán alto tendría que elevarse una masa de 1 kg para que su energía potencial gravitacional sea igual a la energía liberada en 300 de tales choques?

62. En la figura P18.62, $R_1 = 0.100 \Omega$, $R_2 = 1.00 \Omega$ y $R_3 = 10.0 \Omega$. Encuentre la resistencia equivalente del circuito y la corriente

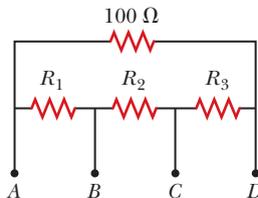


Figura P18.62

en cada resistor cuando una fuente de poder de 5.00 V se conecta entre a) los puntos A y B, b) los puntos A y C y c) los puntos A y D.

63. **M** ¿Cuáles son las lecturas esperadas del amperímetro y el voltímetro para el circuito en la figura P18.63?

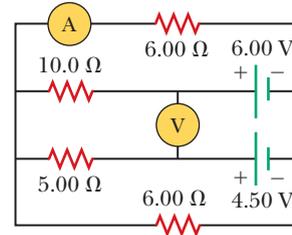


Figura P18.63

64. Considere los dos arreglos de baterías y focos que se muestran en la figura P18.64. Los dos focos son idénticos y tienen resistencia R , y las dos baterías son idénticas con voltaje de salida ΔV . a) En el caso 1, con los dos focos conectados en serie, compare el brillo de cada foco, la corriente en cada foco y la potencia que se entrega a cada foco. b) En el caso 2, con los dos focos conectados en paralelo, compare el brillo de cada foco, la corriente en cada foco y la potencia que se entrega a cada foco. c) ¿Cuáles focos son más brillantes, los del caso 1 o los del caso 2? d) En cada caso, si un foco falla, ¿el otro fallará también? Si el otro foco no falla, ¿será más brillante o permanecerá igual? (El problema 64 es cortesía de E. F. Redish. Para otros problemas de este tipo, visite <http://www.physics.umd.edu/perg/>.)

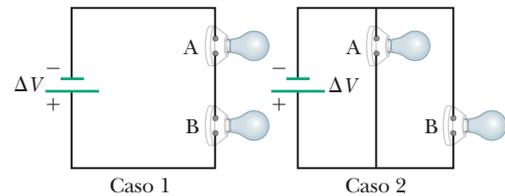


Figura P18.64

65. El par de capacitores dado en la figura P18.65 está completamente cargado por una batería de 12.0 V . La batería se desconecta y el circuito se cierra. Después de 1.00 ms , ¿cuánta carga permanece en a) el capacitor de $3.00 \mu\text{F}$? b) El capacitor de $2.00 \mu\text{F}$? c) ¿Cuál es la corriente en el resistor?

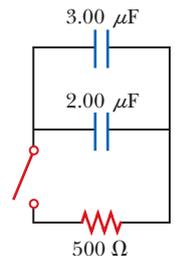


Figura P18.65

66. Un capacitor de 2.00 nF con una carga inicial de $5.10 \mu\text{C}$ se descarga a través de una resistencia de $1.30 \text{ k}\Omega$. a) Calcule la magnitud de la corriente en la resistencia de $9.00 \mu\text{s}$ después de que la resistencia se conecta a través de las terminales del capacitor. b) ¿Qué carga se mantiene en el capacitor después de $8.00 \mu\text{s}$? c) ¿Cuál es la corriente máxima en el resistor?

Aurora boreal, las luces del norte. Despliegues como éste son provocados por partículas de rayos cósmicos atrapadas en el campo magnético de la Tierra. Cuando las partículas chocan con los átomos en la atmósfera, hacen que los átomos emitan luz visible.

Constance McGuire/StockPhoto



19

Magnetismo

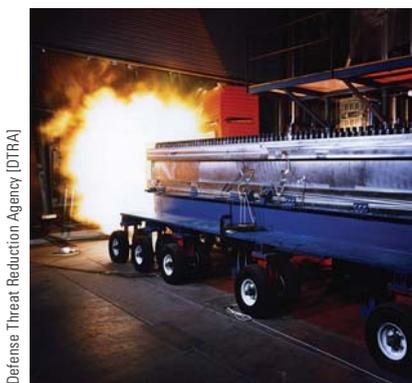
- 19.1 Imanes
- 19.2 Campo magnético de la Tierra
- 19.3 Campos magnéticos
- 19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente
- 19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos
- 19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético
- 19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère
- 19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos
- 19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides
- 19.10 Dominios magnéticos

En términos de aplicaciones, el magnetismo es uno de los campos más importantes en la física. Para levantar cargas pesadas se usan grandes electroimanes. Los imanes se usan en dispositivos como medidores, motores y bocinas. Las cintas y discos magnéticos se usan rutinariamente en equipos de grabación de sonido y video, y para almacenar datos de computadora. Los campos magnéticos intensos se usan en aparatos para la formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) para explorar el cuerpo humano con mejor resolución y mayor seguridad que la que pueden proporcionar los rayos X. Imanes superconductores gigantes se usan en los ciclotrones que guían partículas hacia blancos casi a la velocidad de la luz. Los cañones de riel (figura 19.1) usan fuerzas magnéticas para disparar proyectiles a gran velocidad y las botellas magnéticas contienen antimateria, una posible clave para futuros sistemas de propulsión espacial.

El magnetismo está cercanamente relacionado con la electricidad. Los campos magnéticos afectan las cargas en movimiento y las cargas en movimiento producen campos magnéticos. Los campos magnéticos variables incluso pueden crear campos eléctricos. Estos fenómenos significan una unidad subyacente de electricidad y magnetismo, que James Clerk Maxwell describió por primera vez en siglo XIX. La fuente última de cualquier campo magnético es la corriente eléctrica.

19.1 Imanes

La mayoría de las personas han experimentado con alguna forma de imán. Es posible que usted esté más familiarizado con el imán de hierro común con forma de herradura que levanta objetos que contienen hierro, como sujetapapeles y clavos. En el análisis siguiente, suponemos que el imán tiene la forma de una barra. Los objetos de hierro son atraídos con más intensidad hacia cualquier extremo de uno de tales imanes de barra, extremos a los que se llama **polos**. Un extremo se llama **polo norte** y el otro **polo sur**. Los nombres provienen del comportamiento de un imán en presencia del campo magnético de la Tierra. Si un imán de barra se suspende de su punto medio mediante un trozo de cuerda, de modo que puede balancearse libremente en un plano horizontal, girará hasta que su polo norte apunte hacia el norte y su polo sur apunte hacia el sur. La misma idea se usa para



Defense Threat Reduction Agency (DTRA)

Figura 19.1 Los cañones de riel lanzan proyectiles con gran velocidad mediante fuerza magnética. Las versiones más grandes podrían enviar cargas hacia el espacio o usarse como propulsores para mover asteroides ricos en metal desde el espacio profundo hacia la órbita de la Tierra. En esta fotografía, un cañón de riel en Sandia National Laboratories en Albuquerque, Nuevo México, dispara un proyectil a más de tres kilómetros por segundo. (Para más información acerca de esto, consulte Física aplicada 20.2 en las páginas 698-699.)

construir una brújula simple. Los polos magnéticos también ejercen fuerzas atractivas o repulsivas uno sobre otro similar a las fuerzas eléctricas entre objetos cargados. De hecho, experimentos simples con dos imanes de barra muestran que **polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen mutuamente**.

Aunque la fuerza entre polos magnéticos opuestos es similar a la fuerza entre cargas eléctricas positivas y negativas, existe una diferencia importante: las cargas eléctricas positiva y negativa pueden existir aisladas una de otra; los polos norte y sur no pueden hacerlo. Sin importar cuántas veces se corte un imán permanente, cada pieza siempre tendrá un polo norte y un polo sur. Sin embargo, existe cierta base teórica para la especulación de que los monopolos magnéticos (polos norte o sur aislados) existen en la naturaleza y el intento por detectarlos es en la actualidad un activo campo de investigación experimental.

Un trozo de hierro sin magnetizar, al golpearlo con un imán se puede magnetizar. El magnetismo también se puede inducir en el hierro (y otros materiales) por otros medios. Por ejemplo, si una pieza de hierro sin magnetizar se coloca cerca de un fuerte imán permanente, el trozo de hierro eventualmente queda magnetizado. El proceso se puede acelerar al calentar y luego enfriar el hierro.

Los materiales magnéticos que se encuentran en la naturaleza, como la magnetita, se magnetizan de esta forma, porque están sujetas al campo magnético de la Tierra durante largos periodos. La medida en la que un trozo de material retiene su magnetismo depende de si se clasifica como magnéticamente duro o blando. Los materiales magnéticos **blandos**, como el hierro, se magnetizan fácilmente, pero también tienden a perder su magnetismo con facilidad. Estos materiales se utilizan en los núcleos de transformadores, generadores y motores. El hierro es la opción más común porque es barato. Otros materiales magnéticamente blandos incluyen el níquel, aleaciones de níquel-hierro y ferritas. Las ferritas son combinaciones de un óxido de metal divalente de níquel o de magnesio con óxido de hierro. Las ferritas son utilizadas en aplicaciones de alta frecuencia, como el radar.

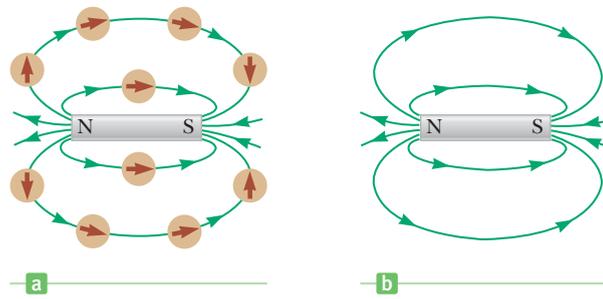
Los materiales magnéticos **duros** se utilizan en los imanes permanentes. Tales imanes proporcionan campos magnéticos sin el uso de la electricidad. Los imanes permanentes se utilizan en muchos dispositivos, incluyendo altavoces, motores de imán permanente y la lectura/escritura de las cabezas de escritura de los discos duros de computadora. Hay un gran número de diferentes materiales utilizados en imanes permanentes. Alnico es un nombre genérico para varias aleaciones de hierro, cobalto y níquel, junto con pequeñas cantidades de aluminio, cobre u otros elementos. Tierras raras, como el samario y neodimio se usan también en combinación con otros elementos para hacer fuertes imanes permanentes.

En capítulos anteriores se describió la interacción entre objetos cargados en términos de campos eléctricos. Recuerde que un campo eléctrico rodea a cualquier carga eléctrica estacionaria. La región del espacio que rodea a una carga *en movimiento* incluye también un campo magnético. Un campo magnético también rodea a un material magnetizado de manera adecuada.

Para describir cualquier tipo de campo vectorial, usted debe definir su magnitud o intensidad y su dirección. La dirección de un campo magnético \vec{B} en cualquier ubicación es la dirección en la que el polo norte de una brújula de aguja apunta en dicha ubicación. La figura activa 19.2a muestra cómo se puede trazar, con la ayuda de una brújula, el cam-

Figura activa 19.2

- a) Trazado del campo magnético de un imán de barra con brújula.
 b) Muchas líneas de campo magnético de un imán de barra.



po magnético de un imán de barra, lo que define una **línea de campo magnético**. Muchas líneas de campo magnético de un imán de barra trazadas de esta forma aparecen en la representación bidimensional de la figura activa 19.2b. Los patrones de campo magnético se pueden mostrar al colocar pequeñas limaduras de hierro en la vecindad de un imán, como en la figura 19.3.

APLICACIÓN

Polvos para huellas digitales

Los científicos forenses usan una técnica similar a la que se muestra en la figura 19.3 para encontrar huellas digitales en una escena criminal. Una forma de encontrar impresiones latentes o invisibles, es al rociar un polvo de hierro sobre una superficie. El hierro se adhiere a cualquier aceite de transpiración o corporal que esté presente y se puede esparcir sobre la superficie con un cepillo magnético que nunca entra en contacto con el polvo o la superficie.

19.2 Campo magnético de la Tierra

Se dice que un pequeño imán de barra tiene polos norte y sur, pero es más preciso decir que tiene un polo “que busca el norte” y un polo “que busca el sur”. Mediante estas expresiones, se entiende que, si tal imán se usa como brújula, un extremo apuntará o “buscará”, el polo norte geográfico de la Tierra y el otro extremo apuntará o “buscará”, el polo sur geográfico de la Tierra. Concluimos que **el polo norte geográfico de la Tierra corresponde a un polo sur magnético y que el polo sur geográfico de la Tierra corresponde a un polo norte magnético**. De hecho, la configuración del campo magnético de la Tierra, que se bosqueja en la figura 19.4, se parece mucho a lo que se observaría si un enorme imán de barra se enterrara profundamente en el interior de la Tierra.

Si la aguja de una brújula se suspende en cojinetes que le permitan girar en el plano vertical, así como en el plano horizontal, la aguja está horizontal con respecto a la superficie de la Tierra sólo cerca del ecuador. Conforme el dispositivo se mueve hacia el norte, la aguja gira de modo que apunta cada vez más hacia la superficie de la Tierra. El ángulo entre la dirección del campo magnético y la horizontal se llama **inclinación**. Finalmente, en un punto justo al norte de la bahía Hudson en Canadá, el polo norte de la aguja apunta directamente hacia abajo, con una inclinación de 90° . Este sitio, que se encontró por primera vez en 1832, se considera la ubicación del polo magnético sur de la Tierra. Está

Tip 19.1 El polo norte geográfico es el polo sur magnético

El polo norte de un imán en una brújula apunta al norte porque lo atrae el polo *magnético* sur de la Tierra, que se ubica cerca del polo norte *geográfico* de la Tierra.

Figura 19.3 a) Patrón de campo magnético de un imán de barra, como se muestra mediante limaduras de hierro sobre una hoja de papel. b) Patrón de campo magnético entre polos *opuestos* de dos imanes de barra, que se muestra con limaduras de hierro. c) Patrón de campo magnético entre dos polos *iguales*.



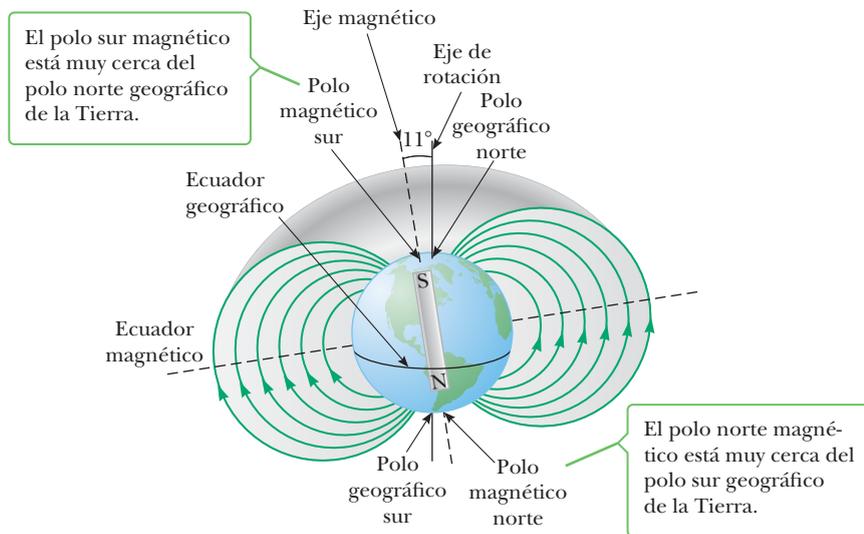


Figura 19.4 Líneas de campo magnético de la Tierra. Observe que el sur magnético está en el polo geográfico norte y el norte magnético está en el polo geográfico sur.

aproximadamente a 2100 km del polo norte geográfico de la Tierra y varía con el tiempo. De igual modo, el polo norte magnético de la Tierra está aproximadamente a 1900 km de su polo sur geográfico. Esto significa que las agujas de las brújulas apuntan sólo aproximadamente al norte. La diferencia entre el norte verdadero, que se define como el polo norte geográfico y el norte que indica una brújula varía de punto a punto sobre la Tierra, esta diferencia se conoce como *declinación magnética*. Por ejemplo, a lo largo de una línea que pasa a través de Carolina del Sur y los grandes lagos, una brújula indica el norte verdadero, mientras que en el estado de Washington se alinea 25° al este del norte verdadero (figura 19.5).

Aunque el patrón de campo magnético de la Tierra es similar al patrón que se establecería mediante un imán de barra colocado en su centro, la fuente del campo de la Tierra no puede consistir de grandes masas de material permanentemente magnetizado. La Tierra tiene grandes depósitos profundos de mineral de hierro bajo su superficie, pero las altas temperaturas en el núcleo evitan que el hierro retenga cualquier magnetización permanente. Se considera más probable que la fuente verdadera del campo magnético de la Tierra es la corriente eléctrica en la parte líquida de su núcleo. Esta corriente, que no está bien comprendida, acaso puede darse mediante una interacción entre la rotación del planeta y la convección en el núcleo líquido caliente. Existe cierta evidencia de que la intensidad del campo magnético de un planeta se relaciona con la tasa de rotación del planeta. Por ejemplo, Júpiter gira más rápido que la Tierra y sondas espaciales recientes indican que el campo magnético de Júpiter es más intenso que el de la Tierra, aun cuando Júpiter carezca de un núcleo de hierro. Venus, por otra parte, gira más lentamente que la Tierra y su campo magnético es más débil. La investigación de la causa del magnetismo de la Tierra continúa.

Un hecho interesante en cuanto al campo magnético de la Tierra es que su dirección se invierte cada cierto número de millones de años. La evidencia de este fenómeno la proporciona el basalto (una roca que contiene hierro) que en ocasiones es vertida en el suelo marino por la actividad volcánica. Conforme la lava se enfría, se solidifica y conserva una imagen de la dirección del campo magnético de la Tierra. Cuando los depósitos de basalto se datan, proporcionan evidencia de inversiones periódicas del campo magnético. La causa de estas inversiones de campo todavía no se comprende.

Desde hace mucho se especula que algunos animales, como las aves, usan el campo magnético de la Tierra para guiar sus migraciones. Los estudios demuestran que un tipo de bacteria anaeróbica que vive en los pantanos tiene una cadena magnetizada de magnetita como parte de su estructura interna. (El término *anaeróbica* significa que estas bacterias viven y crecen sin oxígeno; de hecho, el oxígeno es tóxico para ellas.) La cadena magnetizada actúa como una brújula que permite a las bacterias alinearse con el campo magnético de la Tierra. Cuando se encuentran fuera del lodo en el fondo del pantano, regresan a su ambiente libre de oxígeno al seguir las líneas de campo magnético de la Tierra. La mayor evidencia de su habilidad de percepción magnética es que las bacterias que se encuentran

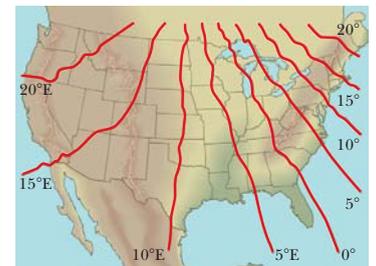


Figura 19.5 Mapa de Estados Unidos continental que muestra la declinación de una brújula del norte verdadero.

BIO APLICACIÓN

Bacterias magnéticas

en el hemisferio norte tienen cadenas internas de magnetita que son opuestas en polaridad a las de bacterias similares en el hemisferio sur. De igual modo, en el hemisferio norte, el campo de la Tierra tiene una componente descendente, mientras que en el hemisferio sur tiene una componente ascendente. Recientemente, se descubrió que un meteorito que se originó en Marte contiene una cadena de magnetita. Los científicos de la NASA creen que puede ser el fósil de una antigua vida bacterial marciana.

El campo magnético de la Tierra se usa para marcar las pistas de aterrizaje en los aeropuertos de acuerdo con su dirección. En el extremo de la pista se pinta un gran número, de modo que lo pueda leer el piloto de un avión que se aproxima. Este número describe la dirección en la que viaja el avión, expresada como dirección magnética, en grados medidos en sentido de las manecillas del reloj desde el norte magnético, dividido por 10. Una pista marcada 9 se dirigiría hacia el este (90° dividido por 10), mientras que una pista marcada 18 se dirigiría hacia el sur magnético.

APLICACIÓN

Marcaje de las pistas de aterrizaje en los aeropuertos

■ FÍSICA APLICADA 19.1 Brújulas en Australia

En un viaje de negocios a Australia, usted lleva su brújula hecha en Estados Unidos, la que tal vez usó en un campamento. ¿Esta brújula funciona correctamente en Australia?

EXPLICACIÓN No hay problema con usar la brújula en Australia. Al polo norte del imán en la brújula lo atraerá el polo magnético sur cerca del polo norte geográfico, tal

como si estuviera en Estados Unidos. La única diferencia en las líneas de campo magnético es que tienen una componente ascendente en Australia, mientras que tienen una componente descendente en Estados Unidos. Sin embargo, si usted la sostiene en un plano horizontal, su brújula no puede detectar esta diferencia; sólo muestra la dirección de la componente horizontal del campo magnético. ■

19.3 Campos magnéticos

Los experimentos demuestran que una partícula cargada estacionaria no interactúa con un campo magnético estático. **Sin embargo, cuando una partícula cargada se mueve a través de un campo magnético, sobre ella actúa una fuerza magnética.** Esta fuerza tiene su valor máximo cuando la carga se mueve en una dirección perpendicular a las líneas del campo magnético y disminuye en valor a otros ángulos, y se vuelve cero cuando la partícula se mueve a lo largo de las líneas de campo. Esto es diferente de la fuerza eléctrica, que ejerce una fuerza sobre una partícula cargada si se mueve o está en reposo. Más aún, la fuerza eléctrica se dirige paralela al campo eléctrico, mientras que la fuerza magnética sobre una carga en movimiento se dirige perpendicular al campo magnético.

En el estudio de la electricidad, el campo eléctrico en algún punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga que actúa sobre alguna carga de prueba colocada en dicho punto. De forma similar, se pueden describir las propiedades del campo magnético \vec{B} en algún punto en términos de la fuerza magnética que se ejerce sobre una carga de prueba en dicho punto. El objeto de prueba es una carga q que se mueve con velocidad \vec{v} . Experimentalmente se descubre que la intensidad de la fuerza magnética sobre la partícula es proporcional a la magnitud de la carga q , la magnitud de la velocidad \vec{v} , la intensidad del campo magnético externo \vec{B} y el seno del ángulo θ entre la dirección de \vec{v} y la dirección de \vec{B} . Estas observaciones se pueden resumir al escribir la magnitud de la fuerza magnética como

$$F = qvB \sin \theta \quad [19.1]$$

Esta expresión se usa para definir la magnitud del campo magnético como

$$B \equiv \frac{F}{qv \sin \theta} \quad [19.2]$$

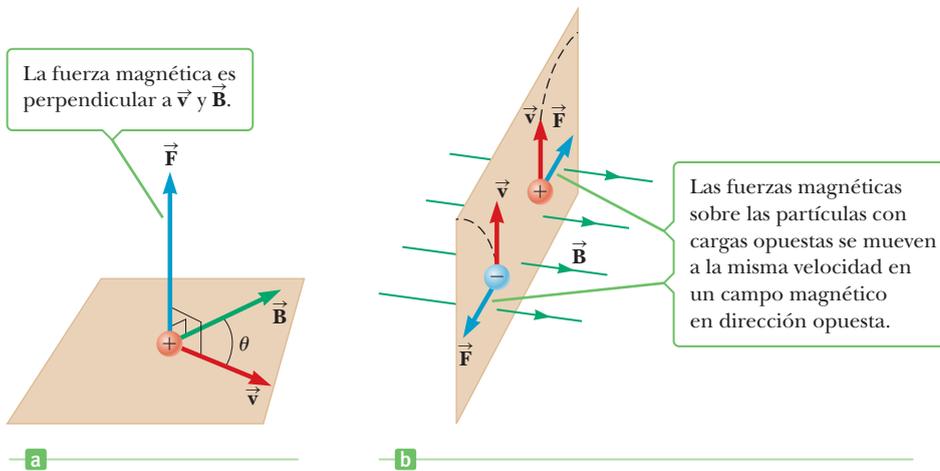


Figura 19.6 a) Dirección de la fuerza magnética \vec{F} sobre una partícula con carga positiva que se mueve con una velocidad \vec{v} en la presencia de un campo magnético \vec{B} . b) Fuerzas magnéticas sobre cargas positivas y negativas. Las líneas punteadas muestran las trayectorias de las partículas, que se investigarán en la sección 19.6.

Si F está en newtons, q en coulombs y v en metros por segundo, la unidad SI del campo magnético es el **tesla** (T), también llamado **weber** (Wb) **por metro cuadrado** ($1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$). Si una carga de 1 C se mueve en una dirección perpendicular a un campo magnético de 1 T de magnitud con una rapidez de 1 m/s, la fuerza magnética que se ejerce sobre la carga es 1 N. Las unidades de \vec{B} se pueden expresar como

$$[B] = \text{T} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad [19.3]$$

En la práctica, a menudo se usa la unidad cgs para campo magnético, el **gauss** (G). El gauss se relaciona con el tesla mediante la conversión

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Los imanes convencionales de laboratorio pueden producir campos magnéticos tan grandes como aproximadamente 25000 G, o 2.5 T. Se han construido imanes superconductores que pueden generar campos magnéticos tan grandes como $3 \times 10^5 \text{ G}$, o 30 T. Estos valores se pueden comparar con el valor del campo magnético de la Tierra cerca de su superficie, que es de más o menos 0.5 G, o $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$.

A partir de la ecuación 19.1, vemos que la fuerza sobre una partícula cargada que se mueve en un campo magnético tiene su valor máximo cuando el movimiento de la partícula es *perpendicular* al campo magnético, que corresponde a $\theta = 90^\circ$, de modo que $\sin \theta = 1$. La magnitud de esta fuerza magnética tiene el valor

$$F_{\text{máx}} = qvB \quad [19.4]$$

También a partir de la ecuación 19.1, F es cero cuando \vec{v} es paralela a \vec{B} (lo que corresponde a $\theta = 0^\circ$ o 180°), de modo que ninguna fuerza magnética se ejerce sobre una partícula cargada cuando se mueve en la dirección del campo magnético u opuesta al campo.

Los experimentos demuestran que la dirección de la fuerza magnética siempre es perpendicular tanto a \vec{v} como a \vec{B} , como se muestra en la figura 19.6 para una partícula con carga positiva. Para determinar la dirección de la fuerza, se emplea la **regla de la mano derecha 1**:

1. Apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la velocidad \vec{v} .
2. Enrolle los dedos en la dirección del campo magnético \vec{B} , que se mueve a través de ángulos más pequeños (como en la figura 19.7).
3. Su pulgar ahora apunta en la dirección de la fuerza magnética \vec{F} que se ejerce sobre una carga positiva.

Si la carga es negativa en lugar de positiva, la fuerza \vec{F} se dirige *opuesta* a la que se muestra en las figuras 19.6a y 19.7. De modo que, si q es negativa, simplemente use la regla de la mano derecha para encontrar la dirección para q positiva y luego invertir dicha dirección para la carga negativa. La figura 19.6b muestra el efecto de un campo magnético sobre partículas cargadas con signos opuestos.

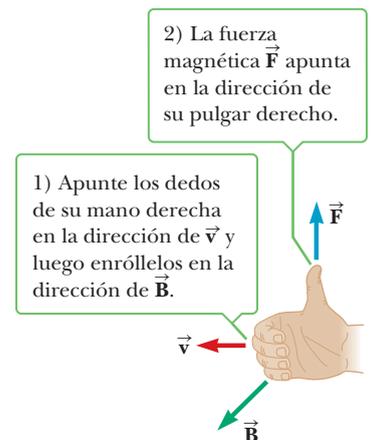


Figura 19.7 Regla de la mano derecha número 1 para determinar la dirección de la fuerza magnética sobre una carga positiva que se mueve con una velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} .

Examen rápido

19.1 Una partícula cargada se mueve en una línea recta a través de una región del espacio. ¿Cuál de las siguientes respuestas *debe* ser verdadera? (Suponga que cualquier otro campo es despreciable.) El campo magnético a) tiene una magnitud de cero, b) tiene una componente perpendicular cero a la velocidad de la partícula, c) tiene una componente cero paralela a la velocidad de la partícula en dicha región.

19.2 El polo norte de un imán de barra se sostiene cerca de una pieza de plástico con carga positiva estacionaria. El imán, ¿a) atrae, b) repele o c) no afecta al plástico?

EJEMPLO 19.1 Un protón que viaja en el campo magnético de la Tierra

OBJETIVO Calcular la magnitud y dirección de una fuerza magnética.

PROBLEMA Un protón se mueve con una velocidad de 1.00×10^5 m/s a través del campo magnético de la Tierra, que tiene un valor de $55.0 \mu\text{T}$ en una ubicación particular. Cuando el protón se mueve hacia el este, la fuerza magnética que actúa sobre él se dirige en línea recta hacia arriba y cuando se mueve hacia el norte, ninguna fuerza magnética actúa sobre él. a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético y b) cuál es la intensidad de la fuerza magnética cuando el protón se mueve hacia el este? c) Calcule la fuerza gravitacional sobre el protón y compárela con la fuerza magnética. Com-

párela también con la fuerza eléctrica si hubiera un campo eléctrico con una magnitud igual a $E = 1.50 \times 10^2$ N/C en dicha ubicación, un valor común en la superficie de la Tierra. Observe que la masa del protón es 1.67×10^{-27} kg.

ESTRATEGIA La dirección del campo magnético se puede encontrar a partir de una aplicación de la regla de la mano derecha, junto con el hecho de que ninguna fuerza se ejerce sobre el protón cuando viaja hacia el norte. Al sustituir en la ecuación 19.1 se obtiene la magnitud del campo magnético.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la dirección del campo magnético.

Ninguna fuerza magnética actúa sobre el protón cuando se dirige hacia el norte, así que el ángulo que tal protón forma con la dirección del campo magnético debe ser 0° o 180° . Por lo tanto, el campo magnético \vec{B} debe apuntar al

norte o al sur. Ahora aplique la regla de la mano derecha. Cuando la partícula viaja hacia el este, la fuerza magnética se dirige hacia arriba. Apunte su pulgar en la dirección de la fuerza y sus dedos en la dirección de la velocidad hacia el este. Cuando enrolla sus dedos, apuntan al norte, que por lo tanto debe ser la dirección del campo magnético.

b) Determine la magnitud de la fuerza magnética.

Sustituya los valores dados y la carga de un protón en la ecuación 19.1. Del inciso a), el ángulo entre la velocidad \vec{v} del protón y el campo magnético \vec{B} es 90.0° .

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin \theta \\ &= (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.00 \times 10^5 \text{ m/s}) \times (55.0 \times 10^{-6} \text{ T}) \sin (90.0^\circ) \\ &= 8.80 \times 10^{-19} \text{ N} \end{aligned}$$

c) Calcule la fuerza gravitacional sobre el protón y compárela con la fuerza magnética y también con la fuerza eléctrica si $E = 1.50 \times 10^2$ N/C.

$$\begin{aligned} F_{\text{grav}} &= mg = (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &= 1.64 \times 10^{-26} \text{ N} \\ F_{\text{elec}} &= qE = (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(1.50 \times 10^{-19} \text{ N/C}) \\ &= 2.40 \times 10^{-17} \text{ N} \end{aligned}$$

COMENTARIOS En la información concerniente a un protón que se mueve hacia el norte fue necesario ajustar la dirección del campo magnético. De otro modo, un campo magnético que apunta a alguna parte al noreste o noroeste podría causar una fuerza magnética hacia arriba sobre un protón que se mueve hacia el este. Observe en el inciso c) las intensidades relativas de las fuerzas, con la fuerza eléctrica más grande que la fuerza magnética y ambas mucho más grandes que la fuerza gravitacional, todo para valores de campo típicos que se encuentran en la naturaleza.

PREGUNTA 19.1 Un electrón y un protón que se mueven con la misma velocidad entran a un campo magnético uniforme. ¿En qué par de formas el campo magnético afecta al electrón de manera diferente al protón?

EJERCICIO 19.1 Suponga que un electrón se mueve hacia el oeste en el mismo campo magnético que en el ejemplo 19.1, con una rapidez de 2.50×10^9 m/s. Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el electrón.

RESPUESTA 2.20×10^{-18} N, recto hacia arriba. (No olvide: ¡el electrón tiene carga negativa!)

■ EJEMPLO 19.2 Un protón que se mueve en un campo magnético

OBJETIVO Calcular la fuerza magnética y la aceleración cuando una partícula se mueve en un ángulo distinto a 90° en el campo.

PROBLEMA Un protón se mueve a 8.00×10^6 m/s a lo largo del eje x . Entra a una región donde hay un campo magnético de 2.50 T de magnitud, dirigido a un ángulo de 60.0° con el eje x y yace en el plano xy (figura 19.8). **a)** Encuentre la magnitud y dirección iniciales de la fuerza magnética sobre el protón. **b)** Calcule la aceleración inicial del protón.

ESTRATEGIA Para encontrar la magnitud y dirección de la fuerza magnética necesita sustituir valores en la ecuación para fuerza magnética, ecuación 19.1, y use la regla de la mano derecha. Al aplicar la segunda ley de Newton resuelve el inciso b).

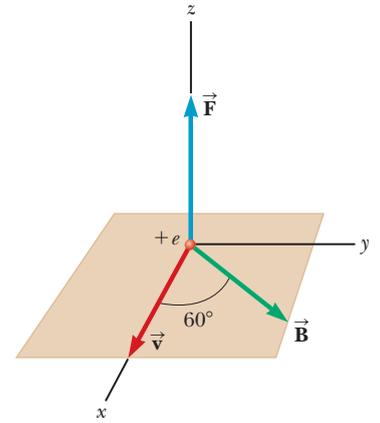


Figura 19.8 (Ejemplo 19.2) La fuerza magnética \vec{F} sobre un protón está en la dirección z positiva cuando \vec{v} y \vec{B} se encuentran en el plano xy .

SOLUCIÓN

a) Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el protón.

Sustituya $v = 8.00 \times 10^6$ m/s, la intensidad del campo magnético $B = 2.50$ T, el ángulo y la carga de un protón en la ecuación 19.1:

Aplique la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección inicial de la fuerza magnética:

b) Calcule la aceleración inicial del protón.

Sustituya la fuerza y la masa de un protón en la segunda ley de Newton:

$$F = qvB \sin \theta = (1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(8.00 \times 10^6 \text{ m/s})(2.50 \text{ T})(\sin 60^\circ)$$

$$F = 2.77 \times 10^{-12} \text{ N}$$

Apunte los dedos de la mano derecha en la dirección x (la dirección de \vec{v}) y luego enróllelos hacia \vec{B} . El pulgar apunta hacia arriba, en la dirección z positiva.

$$ma = F \rightarrow (1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})a = 2.77 \times 10^{-12} \text{ N}$$

$$a = 1.66 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$$

COMENTARIOS La aceleración inicial también está en la dirección z positiva. Sin embargo, puesto que la dirección de \vec{v} cambia, la dirección posterior de la fuerza magnética también cambia. Al aplicar la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección, fue importante tomar en consideración la carga. Una partícula con carga negativa acelera en la dirección opuesta.

PREGUNTA 19.2 ¿Un campo magnético constante puede cambiar la velocidad de una partícula cargada? Explique.

EJERCICIO 19.2 Calcule la aceleración de un electrón que se mueve a través del mismo campo magnético del ejemplo 19.2, a la misma rapidez que el protón. La masa de un electrón es 9.11×10^{-31} kg.

RESPUESTA 3.04×10^{18} m/s² en la dirección z negativa.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

Si un campo magnético ejerce una fuerza sobre una sola partícula cargada cuando se mueve a través de un campo magnético, no debe sorprenderle que también se ejerzan fuerzas magnéticas sobre un alambre portador de corriente (véase la figura 19.9 en la página 656). Puesto que la corriente es una colección de muchas partículas cargadas en movimiento, la fuerza resultante sobre el alambre se debe a la suma de las fuerzas individuales sobre

Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman



Figura 19.9 Este aparato demuestra la fuerza sobre un conductor portador de corriente en un campo magnético externo. ¿Por qué la barra se balancea alejándose del imán después de cerrar el interruptor?

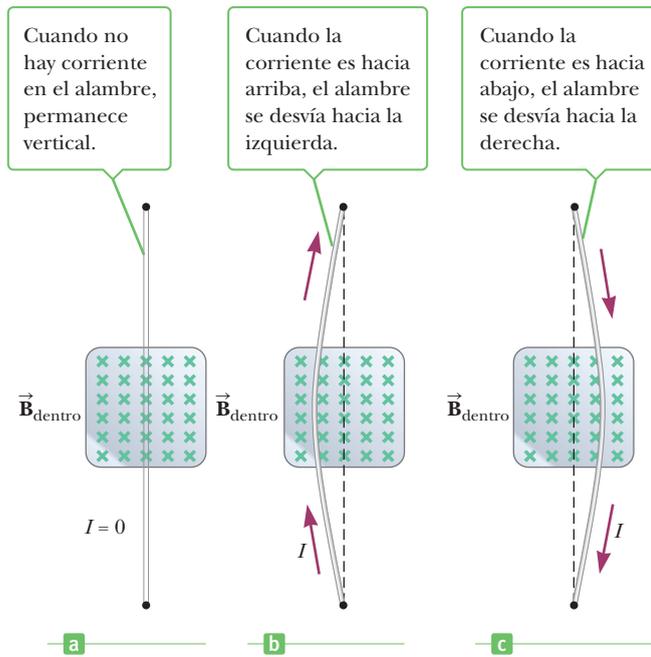


Figura 19.10 Segmento de un alambre vertical flexible parcialmente estirado entre los polos de un imán, con el campo (cruces verdes) dirigido hacia la página.

las partículas cargadas. La fuerza sobre las partículas se transmite hacia el “volumen” del alambre mediante colisiones con los átomos que constituyen al alambre.

Es necesaria cierta explicación en cuanto a la notación en muchas de las figuras. Para indicar la dirección de \vec{B} , se usan las siguientes convenciones:

Si \vec{B} se dirige hacia la página, como en la figura 19.10, se usa una serie de cruces verdes, que representan las colas de las flechas. Si \vec{B} se dirige afuera de la página, se usa una serie de puntos verdes, que representan las puntas de las flechas. Si \vec{B} yace en el plano de la página, se usa una serie de líneas de campo verde con puntas de flecha.

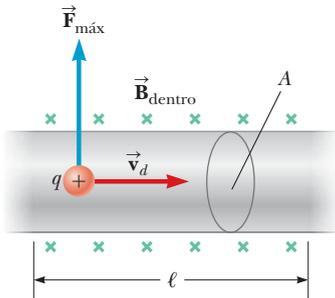


Figura 19.11 Sección de un alambre que contiene cargas en movimiento en un campo magnético externo \vec{B} .

Tip 19.2 El origen de la fuerza magnética sobre un alambre

Cuando un campo magnético se aplica en cierto ángulo a un alambre que porta una corriente, se ejerce una fuerza magnética sobre cada carga en movimiento en el alambre. La fuerza magnética total sobre el alambre es la suma de todas las fuerzas magnéticas sobre las cargas individuales, lo que produce la corriente.

La fuerza sobre un conductor portador de corriente se puede demostrar al colgar un alambre entre los polos de un imán, como en la figura 19.10. En esta figura, el campo magnético se dirige hacia la página y cubre la región dentro del área sombreada. El alambre se desvía hacia la derecha o izquierda cuando porta una corriente.

Este análisis se puede cuantificar al considerar un segmento recto de alambre de longitud ℓ y área transversal A que porta corriente I en un campo magnético uniforme externo \vec{B} , como en la figura 19.11. Suponga que el campo magnético es perpendicular al alambre y se dirige hacia la página. Una fuerza de magnitud $F_{\text{máx}} = qv_d B$ se ejerce sobre cada portador de carga en el alambre, donde v_d es la velocidad de deriva de la carga. Para encontrar la fuerza total sobre el alambre, multiplique la fuerza sobre un portador de carga por el número de portadores en el segmento. Puesto que el volumen del segmento es $A\ell$, el número de portadores es $nA\ell$, donde n es el número de portadores por unidad de volumen. En consecuencia, la magnitud de la fuerza magnética total sobre el alambre de longitud ℓ es la siguiente:

Fuerza total = fuerza sobre cada portador de carga \times número total de portadores

$$F_{\text{máx}} = (qv_d B)(nA\ell)$$

Sin embargo, del capítulo 17 sabemos que la corriente en el alambre está dada por la expresión $I = nqv_d A$, de modo que

$$F_{\text{máx}} = B I \ell \quad [19.5]$$

Esta ecuación se puede usar sólo cuando la corriente y el campo magnético forman un ángulo recto entre sí.

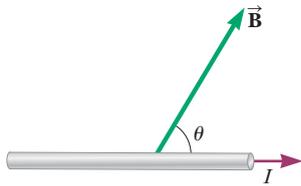


Figura 19.12 Un alambre portador de corriente I en presencia de un campo magnético externo \vec{B} que forma un ángulo θ con el alambre. El vector de la fuerza magnética sale de la página.

Si el alambre no es perpendicular al campo sino que está formando algún ángulo arbitrario, como en la figura 19.12, la magnitud de la fuerza magnética sobre el alambre es

$$F = BIl \sin \theta \quad [19.6]$$

donde θ es el ángulo entre \vec{B} y la dirección de la corriente. La dirección de esta fuerza se puede obtener con el uso de la regla de la mano derecha número 1. Sin embargo, en este caso, debe colocar sus dedos en la dirección de la corriente positiva I , en lugar de \vec{v} en la dirección de \vec{B} . La corriente, naturalmente, se constituye con cargas que se mueven con cierta velocidad, de modo que ésta en realidad no es una regla separada. En la figura 19.12 la dirección de la fuerza magnética sobre el alambre es hacia afuera de la página.

Finalmente, cuando la corriente está ya sea en la dirección del campo u opuesta a la dirección del campo, la fuerza magnética sobre el alambre es cero.

Una fuerza magnética que actúa sobre un alambre portador de corriente en un campo magnético es el principio operativo de la mayoría de las bocinas en los sistemas de sonido. El diseño de una bocina, que se muestra en la figura 19.13, consiste en una bobina de alambre llamada bobina de altavoz, un cono de papel flexible que actúa como la bocina y un imán permanente. A la bobina de alambre que rodea el polo norte del imán se le da una forma tal que las líneas de campo magnético se dirigen radialmente hacia afuera desde el eje de la bobina. Cuando una señal eléctrica se envía a la bobina, lo que produce una corriente en ésta como en la figura 19.13, una fuerza magnética hacia la izquierda actúa sobre la misma. (Esto se puede observar al aplicar la regla de la mano derecha número 1 a cada vuelta de alambre.) Cuando la corriente invierte su dirección, como sería para una corriente que varía sinusoidalmente, la fuerza magnética sobre la bobina también invierte su dirección y el cono, que se une a la bobina, acelera hacia la derecha. Una corriente alterna a través de la bobina causa una fuerza alterna sobre ella, que resulta en vibraciones del cono. El cono que vibra crea ondas sonoras conforme empuja y jala el aire enfrente de él. De esta forma, una señal eléctrica de 1 kHz se convierte en una onda sonora de 1 kHz.

Una aplicación de la fuerza sobre un conductor portador de corriente se ilustra mediante la bomba electromagnética que se muestra en la figura 19.14. Los corazones artificiales requieren una bomba para mantener el flujo de sangre y las máquinas de diálisis renal también requieren una bomba para auxiliar al corazón a bombear la sangre que se debe limpiar. Las bombas mecánicas ordinarias crean problemas porque dañan las células sanguíneas conforme se mueven a través de la bomba. El mecanismo que se muestra en la figura ha mostrado ser prometedor en tales aplicaciones. A través de un segmento del tubo que contiene la sangre, que fluye en la dirección de la velocidad \vec{v} , se establece un campo magnético. Una corriente eléctrica que pasa a través del fluido en la dirección que se muestra tiene una fuerza magnética que actúa sobre él en la dirección de \vec{v} , como se muestra al aplicar la regla de la mano derecha. Esta fuerza ayuda a mantener la sangre en movimiento.

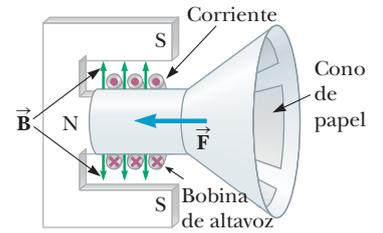


Figura 19.13 Diagrama de una bocina.

APLICACIÓN

Operación de bocina

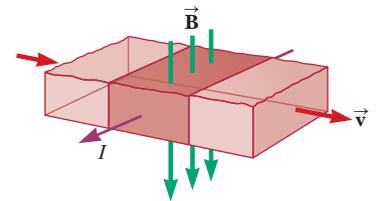


Figura 19.14 Una bomba electromagnética simple no tiene partes móviles que pueden dañar un fluido conductor, como la sangre que pasa por él. Aplicación de la regla número uno de la derecha (los dedos justo en la dirección de la corriente I , girados en la dirección de \vec{B} , el pulgar apunta en la dirección de la fuerza) muestra que la fuerza en el segmento de transporte de corriente del fluido se encuentra en el dirección de la velocidad.

BIO APLICACIÓN

Bombas electromagnéticas para corazones y riñones artificiales

■ FÍSICA APLICADA 19.2 Relámpagos

En un relámpago existe un rápido movimiento de carga negativa desde una nube hasta el suelo. ¿En qué dirección se desvía un relámpago por el campo magnético de la Tierra?

EXPLICACIÓN El flujo descendente de carga negativa en un relámpago es equivalente a una corriente que se mueve

hacia arriba. En consecuencia, se tiene una corriente que se mueve hacia arriba en un campo magnético que se dirige hacia el norte. De acuerdo con la regla de la mano derecha número 1, el relámpago se desviaría hacia el oeste. ■

■ EJEMPLO 19.3 Un alambre que porta corriente en el campo magnético de la Tierra

OBJETIVO Comparar la fuerza magnética sobre un alambre portador de corriente con la fuerza gravitacional que se ejerce sobre el alambre.

PROBLEMA Un alambre porta una corriente de 22.0 A de oeste a este. Suponga que el campo magnético de la Tierra en esta ubicación es horizontal y se dirige de sur a norte y tiene una magnitud de 0.500×10^{-4} T. **a)** Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre una longitud de alambre de 36.0 m. **b)** Calcule la fuerza gravitacional sobre la misma longitud de alambre si está hecho de cobre y tiene un área transversal de 2.50×10^{-6} m².

SOLUCIÓN

a) Calcule la fuerza magnética sobre el alambre.

$$F = BIl \sin \theta = (0.500 \times 10^{-4} \text{ T})(22.0 \text{ A})(36.0 \text{ m}) \sin 90.0^\circ \\ = 3.96 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Sustituya en la ecuación 19.6 y use el hecho de que el campo magnético y la corriente forman un ángulo recto entre sí:

Aplique la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección de la fuerza magnética:

Con los dedos de su mano derecha apuntando de oeste a este en la dirección de la corriente, enróllelos al norte en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta **hacia arriba**.

b) Calcule la fuerza gravitacional sobre el segmento de alambre.

Primero, obtenga la masa del alambre a partir de la densidad del cobre, la longitud y el área transversal del alambre:

$$m = \rho V = \rho(A\ell) \\ = (8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(2.50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot 36.0 \text{ m}) \\ = 0.803 \text{ kg}$$

Para obtener la fuerza gravitacional, multiplique la masa por la aceleración de la gravedad:

$$F_{\text{grav}} = mg = 7.87 \text{ N}$$

COMENTARIOS Este cálculo demuestra que, bajo circunstancias normales, la fuerza gravitacional sobre un conductor portador de corriente es mucho mayor que la fuerza magnética debida al campo magnético de la Tierra.

PREGUNTA 19.3 ¿Qué fuerza magnética se ejerce sobre un alambre portador de corriente paralelo a la dirección del campo magnético?

EJERCICIO 19.3 ¿Qué corriente haría que la fuerza magnética en el ejemplo sea igual en magnitud a la fuerza gravitatoria?

RESPUESTA 4.37×10^3 A, una gran corriente que muy rápidamente calentaría y fundiría el alambre.

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

En la sección anterior mostramos cómo se ejerce una fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente cuando el conductor se coloca en un campo magnético externo. Con este punto de partida, ahora mostraremos que, sobre una espira de corriente colocado en un campo magnético, se ejerce un torque. Los resultados de este análisis serán de gran valor práctico cuando estudie los generadores y motores en el capítulo 20.

Considere una espira rectangular que porta corriente I en presencia de un campo magnético uniforme externo en el plano de la espira, como se muestra en la figura 19.15a. Las fuerzas sobre los lados de longitud a son cero porque dichos alambres son paralelos al campo. Sin embargo, las magnitudes de las fuerzas magnéticas sobre los lados de longitud b son

$$F_1 = F_2 = BIl$$

La dirección de \vec{F}_1 , la fuerza sobre el lado izquierdo del lazo, es hacia afuera de la página y que \vec{F}_2 , la fuerza en el lado derecho de la espira, es hacia adentro de la página. Si ve el lazo desde el lado, como en la figura 19.15b, las fuerzas se dirigen como se muestran. Si

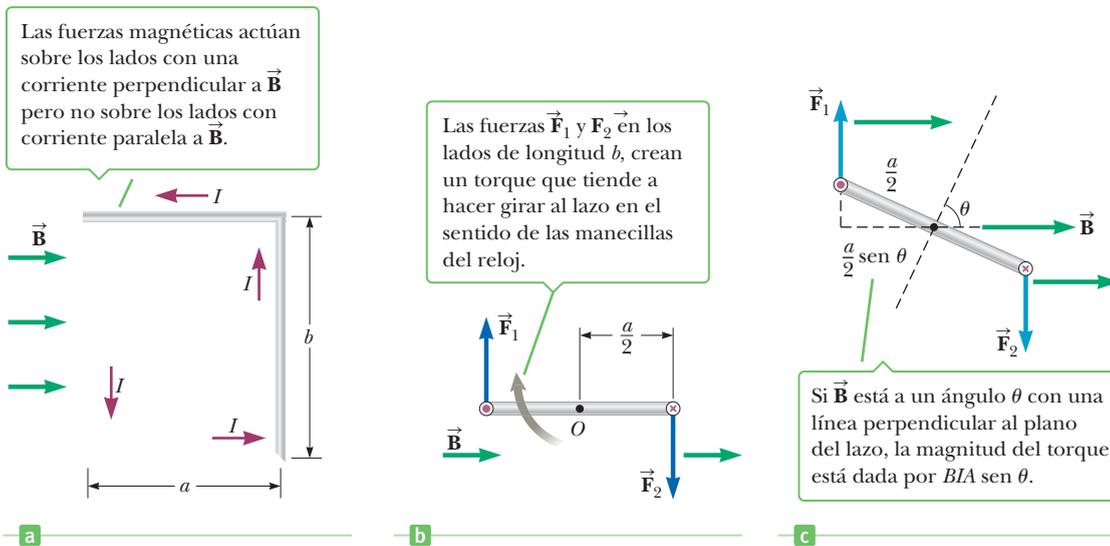


Figura 19.15 a) Vista superior de un lazo rectangular en un campo magnético uniforme. b) Una vista lateral del lazo rectangular del inciso a). c) Una vista lateral del lazo el inciso a) con la perpendicular al lazo que está a un ángulo θ con respecto al campo magnético.

supone que la espira tiene pivote de modo que puede girar en torno al punto O , vemos que estas dos fuerzas producen un torque en torno a O , que gira a la espira en sentido de las manecillas del reloj. La magnitud de este torque, $\tau_{\text{máx}}$, es

$$\tau_{\text{máx}} = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2} = (Bib) \frac{a}{2} + (Bib) \frac{a}{2} = BIab$$

donde el brazo de momento en torno a O es $a/2$ para ambas fuerzas. Puesto que el área del lazo es $A = ab$, el torque se puede expresar como

$$\tau_{\text{máx}} = BIA \tag{19.7}$$

Este resultado sólo es válido cuando el campo magnético es *paralelo* al plano del lazo, como en la figura 19.15b. Si el campo forma un ángulo θ con una línea perpendicular al plano de la espira, como en la figura 19.15c, el brazo de momento para cada fuerza está dada por $(a/2) \text{ sen } \theta$. Un análisis similar al anterior produce, para la magnitud del torque,

$$\tau = BIA \text{ sen } \theta \tag{19.8}$$

Este resultado muestra que el torque tiene el *máximo* valor BIA cuando el campo es *paralelo* al plano de la espira ($\theta = 90^\circ$) y es *cero* cuando el campo es *perpendicular* al plano de la espira ($\theta = 0$). Como se ve en la figura 19.15c, el lado tiende a girar a valores más pequeños de θ (de modo que la normal al plano de la espira gira hacia la dirección del campo magnético).

Aunque el análisis anterior fue para una espira rectangular, una derivación más general muestra que la ecuación 19.8 se aplica sin importar la forma de la espira. Más aún, el torque sobre una bobina con N vueltas es

$$\tau = BIAN \text{ sen } \theta \tag{19.9a}$$

La cantidad $\mu = IAN$ se define como la magnitud del vector $\vec{\mu}$ llamado *momento magnético* de la bobina. El vector $\vec{\mu}$ siempre apunta perpendicular al plano de la espira y es tal que si el pulgar de la mano derecha apunta en la dirección de $\vec{\mu}$, los dedos de la mano apuntan en la dirección de la corriente. El ángulo θ en las ecuaciones 19.8 y 19.9 yace entre las direcciones del momento magnético $\vec{\mu}$ y el campo magnético \vec{B} . El torque magnético se puede escribir entonces

$$\tau = \mu B \text{ sen } \theta \tag{19.9b}$$

Observe que el torque $\vec{\tau}$ es siempre perpendicular al momento magnético $\vec{\mu}$ y el campo magnético \vec{B} .

Examen rápido

19.3 Una espira cuadrada y una circular con la misma área yacen en el plano xy , donde hay un campo magnético uniforme \vec{B} que apunta en cierto ángulo θ con respecto a la dirección z positiva. Cada espira porta la misma corriente, en la misma dirección. ¿Cuál torque magnético es más grande? a) el torque sobre la espira cuadrada, b) el torque sobre la espira circular, c) los torques son iguales, d) se necesita más información.

EJEMPLO 19.4 El torque sobre una espira circular en un campo magnético

OBJETIVO Calcular un torque magnético sobre una espira de corriente.

PROBLEMA Una espira de alambre circular, de 1.00 m de radio, se coloca en un campo magnético de 0.500 T de magnitud. La normal al plano de la espira forma un ángulo de 30.0° con el campo magnético (figura 19.16a). La corriente en la espira es 2.00 A en la dirección que se muestra. **a)** Encuentre el momento magnético de la espira y la magnitud del torque en este instante. **b)** La misma corriente la porta una bobina rectangular de 2.00 por 3.00 m con tres espiras que se muestra en la figura 19.16b. Encuentre el momento magnético de la bobina y la magnitud del torque que actúa sobre la bobina en dicho instante.

ESTRATEGIA Para cada inciso, sólo tiene que calcular el área, usarla en el cálculo del momento magnético y multiplicar el resultado por $B \sin \theta$. En conjunto, este proceso equivale a sustituir valores en la ecuación 19.9b.

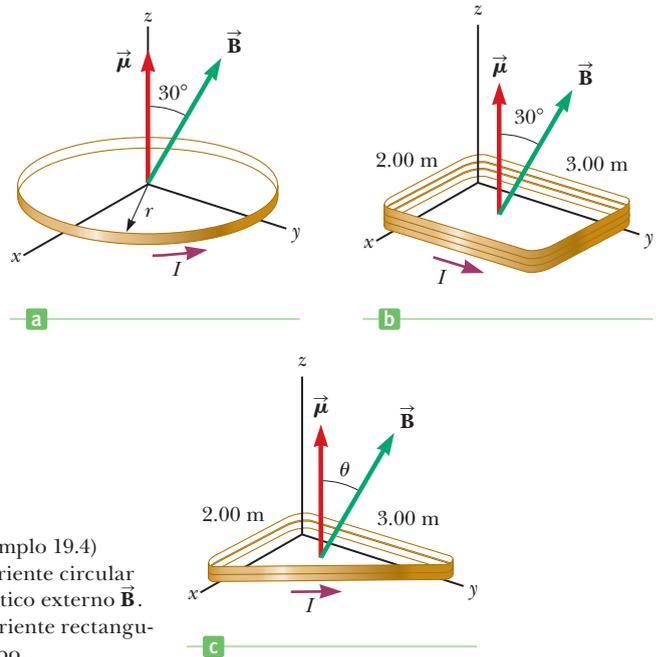


Figura 19.16 (Ejemplo 19.4) a) Una espira de corriente circular en un campo magnético externo \vec{B} . b) Una espira de corriente rectangular en el mismo campo. c) (Ejercicio 19.4).

SOLUCIÓN

a) Encuentre el momento magnético de la espira circular y el torque magnético que se ejerce sobre él.

Primero, calcule el área encerrada de la espira circular:
 Calcule el momento magnético de la espira:

$$A = \pi r^2 = \pi(1.00 \text{ m})^2 = 3.14 \text{ m}^2$$

$$\mu = IAN = (2.00 \text{ A})(3.14 \text{ m}^2)(1) = 6.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Ahora sustituya valores para el momento magnético, campo magnético y θ en la ecuación 19.9b:

$$\tau = \mu B \sin \theta = (6.28 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(0.500 \text{ T})(\sin 30.0^\circ)$$

$$= 1.57 \text{ N} \cdot \text{m}$$

b) Encuentre el momento magnético de la bobina rectangular y el torque magnético que se ejerce sobre ella.

Calcule el área de la bobina:

$$A = L \times H = (2.00 \text{ m})(3.00 \text{ m}) = 6.00 \text{ m}^2$$

Calcule el momento magnético de la bobina:

$$\mu = IAN = (2.00 \text{ A})(6.00 \text{ m}^2)(3) = 36.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Sustituya valores en la ecuación 19.9b:

$$\tau = \mu B \sin \theta = (0.500 \text{ T})(36.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(\sin 30.0^\circ)$$

$$= 9.00 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS Al calcular un torque magnético, no es estrictamente necesario calcular el momento magnético. En vez de ello, puede usar directamente la ecuación 19.9a.

PREGUNTA 19.4 ¿Qué ocurre con la magnitud del torque si el ángulo aumenta hacia 90°? ¿Va más allá de 90°?

EJERCICIO 19.4 Suponga que una bobina triangular recta, con 2.00 m de base y 3.00 m de alto, tiene dos espiras que portan una corriente de 2.00 A, como se muestra en la figura 19.16c. Encuentre el momento magnético y el torque sobre la bobina. El campo magnético de nuevo es 0.500 T y forma un ángulo de 30.0° con respecto a la dirección normal.

RESPUESTAS $\mu = 12.0 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, $\tau = 3.00 \text{ N} \cdot \text{m}$

Motores eléctricos

Es difícil imaginar la vida en el siglo XXI sin motores eléctricos. Algunas aplicaciones que contienen motores incluyen las unidades de disco de las computadoras, los reproductores de CD y DVD, los procesadores de alimentos y licuadoras, los arranques de los autos, hornos y acondicionadores de aire. Los motores convierten la energía eléctrica en energía cinética de rotación y consisten en una espira rígida portadora de corriente que gira cuando se coloca en el campo de un imán.

Como acaba de ver (figura 19.15), el torque sobre la espira lo hace girar a valores más pequeños de θ hasta que el torque se vuelve cero, cuando el campo magnético es perpendicular al plano de la espira y $\theta = 0$. Si el giro de la espira pasa por este ángulo y la corriente permanece en la dirección que se muestra en la figura, el torque invierte la dirección y hace girar la espira en la dirección opuesta, esto es, contra las manecillas del reloj. Para superar esta dificultad y proporcionar rotación continua en una dirección, la corriente en la espira debe invertir su dirección periódicamente. En los motores de corriente alterna (CA), tal inversión ocurre de manera natural 120 veces cada segundo. En los motores de corriente directa (CD), la inversión se logra mecánicamente con contactos de collar partido (conmutadores) y escobillas, como se muestra en la figura activa 19.17.

Aunque los motores reales contienen muchas espiras de corriente y conmutadores, por simplicidad la figura activa 19.17 sólo muestra una sola espira y un solo conjunto de contactos de collar partido (conmutadores) rígidamente unidos a, y que giran con, la espira. Los contactos eléctricos estacionarios llamados *escobillas* se mantienen en contacto eléctrico con los conmutadores giratorios. Estas escobillas por lo general están hechas de grafito porque es un buen conductor eléctrico, así como un buen lubricante. Justo cuando la espira queda perpendicular al campo magnético y el torque es cero, la inercia lleva la espira hacia adelante, en la dirección de las manecillas del reloj y las escobillas cruzan las brechas en los anillos conmutadores, lo que hace que la corriente en la espira invierta su dirección. Esta inversión proporciona otro pulso de torque en la dirección de las manecillas del reloj durante otros 180°, la corriente se invierte y el proceso se repite a sí mismo. La figura 19.18 muestra un motor moderno que se usa para impulsar un automóvil híbrido gasolina-eléctrico.

APLICACIÓN

Motores eléctricos

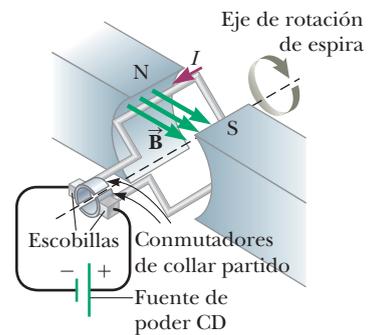
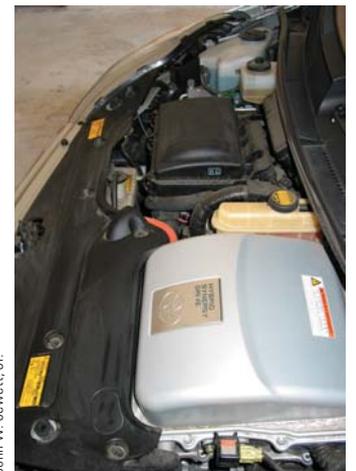


Figura activa 19.17

Bosquejo simplificado de un motor eléctrico CD.



John W. Jewett, Jr.

Figura 19.18 Compartimento del motor del Toyota Prius, un vehículo híbrido.

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

Considere el caso de una partícula con carga positiva que se mueve en un campo magnético uniforme, de modo que la dirección de la velocidad de la partícula es *perpendicular al campo*, como en la figura activa 19.19 (página 662). La marca $\mathbf{B}_{\text{adentro}}$ y las cruces indican que \mathbf{B} se dirige hacia la página. La aplicación de la regla de la mano derecha en el punto P muestra que la dirección de la fuerza magnética \mathbf{F} en la posición es hacia arriba. La fuerza hace que la partícula altere su dirección de viaje y siga una trayectoria curva. La aplicación de la regla de la mano derecha a cualquier punto muestra que **la fuerza magnética siempre se dirige hacia el centro de la trayectoria circular**; por lo tanto, la fuerza magnética causa una aceleración centrípeta, que cambia sólo la dirección de \vec{v} y no su magnitud. Puesto

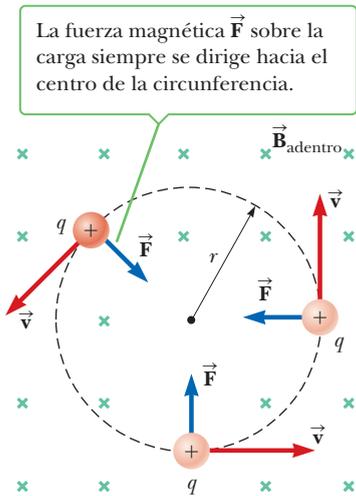
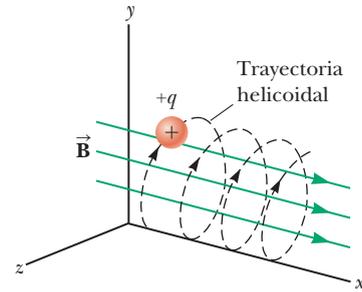


Figura activa 19.19

Cuando la velocidad de una partícula cargada es perpendicular a un campo magnético uniforme, la partícula se mueve en una circunferencia cuyo plano es perpendicular a \vec{B} , que se dirige hacia la página. (Las cruces representan las colas de los vectores de campo magnético.)

Figura activa 19.20

Una partícula cargada que tiene una velocidad dirigida en un ángulo con un campo magnético uniforme se mueve en una trayectoria helicoidal.



que \vec{F} produce la aceleración centrípeta, es posible igualar su magnitud, qvB en este caso, con la masa de la partícula multiplicada por la aceleración centrípeta v^2/r . A partir de la segunda ley de Newton, se encuentra que

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r}$$

lo que produce

$$r = \frac{mv}{qB}$$

[19.10]

Esta ecuación dice que el radio de la trayectoria es proporcional a la cantidad de movimiento mv de la partícula y es inversamente proporcional a la carga y el campo magnético. La ecuación 19.10 con frecuencia se llama *ecuación de ciclotrón*, porque se usa en el diseño de estos instrumentos (popularmente conocidos como destrozadores de átomos).

Si la dirección inicial de la velocidad de la partícula cargada no es perpendicular al campo magnético, como se muestra en la figura activa 19.20, la trayectoria que sigue la partícula es una espiral (llamada hélice) a lo largo de las líneas del campo magnético.

FÍSICA APLICADA 19.3 | Captura de cargas

Almacenar partículas cargadas es importante para varias aplicaciones. Suponga que en una región finita del espacio existe un campo magnético uniforme. ¿Es posible inyectar desde el exterior una partícula cargada en esta región y que quede atrapada en la región sólo mediante fuerza magnética?

EXPLICACIÓN Es mejor considerar por separado las componentes de velocidad de la partícula paralela y perpendicular a las líneas de campo en la región. No existe fuerza magnética sobre la partícula asociada con la componente de velocidad paralela a las líneas de campo, de modo que la componente de velocidad permanece invariable.

Ahora considere la componente de velocidad perpendicular a las líneas de campo. Esta componente resultará en una fuerza magnética que es perpendicular tanto a las líneas de campo como a la componente de velocidad en sí. La trayectoria de una partícula para la cual la fuerza siempre es perpendicular a la velocidad es una circunferencia. Por lo tanto, la partícula sigue un arco circular y sale del campo en el otro lado de la circunferencia, como se muestra en la figura 19.21 para una partícula con energía cinética constante. Por otra parte, una partícula puede quedar atrapada si pierde algo de energía cinética en una colisión después de entrar al campo.

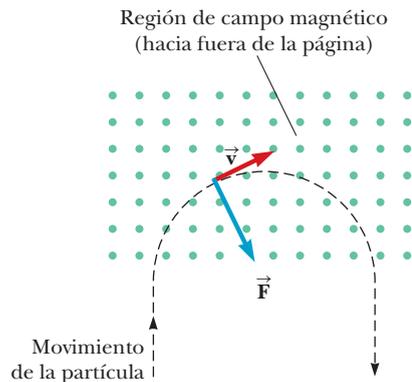


Figura 19.21 (Física aplicada 19.3)

Las partículas *pueden* inyectarse y quedar contenidas si, además del campo magnético, se involucran campos electrostáticos. Estos campos se usan en la *trampa de Penning*. Con estos dispositivos, es posible almacenar partículas cargadas durante largos periodos. Tales trampas son útiles, por ejemplo, en el almacenamiento de antimateria, que se desintegran por completo en contacto con la materia ordinaria. ■

■ Examen rápido

19.4 Conforme una partícula cargada se mueve libremente en una trayectoria circular en presencia de un campo magnético constante aplicado perpendicular a la velocidad de la partícula, la energía de la partícula a) permanece constante, b) aumenta o c) disminuye.

■ EJEMPLO 19.5 El espectrómetro de masas: identificación de partículas

OBJETIVO Usar la ecuación del ciclotrón para identificar una partícula.

PROBLEMA Una partícula cargada entra al campo magnético de un espectrómetro de masas con una velocidad de 1.79×10^6 m/s. Posteriormente se mueve en una órbita circular con un radio de 16.0 cm en un campo magnético uniforme de 0.350 T de magnitud que tiene una dirección perpendicular a la velocidad de la partícula. Encuentre la razón masa a carga de la partícula e identifíquela con base en la tabla de abajo.

ESTRATEGIA Después de encontrar la razón masa a carga con la ecuación 19.10, compárela con los valores en la tabla e identifique la partícula.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación del ciclotrón:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

Resuelva esta ecuación para la masa dividida por la carga, m/q , y sustituya valores:

$$\frac{m}{q} = \frac{rB}{v} = \frac{(0.160 \text{ m})(0.350 \text{ T})}{1.79 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3.13 \times 10^{-8} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$$

Identifique la partícula en la tabla. Todas las partículas están completamente ionizadas.

Núcleo	m (kg)	q (C)	m/q (kg/C)
Hidrógeno	1.67×10^{-27}	1.60×10^{-19}	1.04×10^{-8}
Deuterio	3.35×10^{-27}	1.60×10^{-19}	2.09×10^{-8}
Tritio	5.01×10^{-27}	1.60×10^{-19}	3.13×10^{-8}
Helio-3	5.01×10^{-27}	3.20×10^{-19}	1.57×10^{-8}

La partícula es **tritio**.

COMENTARIOS El espectrómetro de masas es una importante herramienta tanto en química como en física. Los químicos desconocidos se pueden calentar y ionizar y las partículas resultantes pasan a través del espectrómetro de masas y posteriormente se identifican.

PREGUNTA 19.5 ¿Qué ocurre con la cantidad de movimiento de una partícula cargada en un campo magnético uniforme?

EJERCICIO 19.5 Suponga que una segunda partícula cargada entra al espectrómetro de masas con la misma rapidez que la partícula del ejemplo 19.5. Si viaja en una circunferencia de 10.7 cm de radio, encuentre la razón masa a carga e identifique la partícula en la tabla anterior.

RESPUESTAS 2.09×10^{-8} kg/C; deuterio

■ EJEMPLO 19.6 El espectrómetro de masas: separación de isótopos

OBJETIVO Aplicar la ecuación del ciclotrón al proceso de separación de isótopos.

PROBLEMA Dos átomos individualmente ionizados se mueven afuera de una rendija en el punto S de la figura 19.22 y hacia un campo magnético de 0.100 T de magnitud que apunta hacia la página. Cada uno tiene una velocidad de 1.00×10^6 m/s. El núcleo del primer átomo contiene un protón y tiene una masa de 1.67×10^{-27} kg, mientras que el núcleo del segundo átomo contiene un protón y un neutrón y tiene una masa de 3.34×10^{-27} kg. Los átomos con el mismo número de protones en el núcleo pero diferentes masas se llaman isótopos. Los dos isótopos aquí son hidrógeno y deuterio. Encuentre su distancia de separación cuando golpean una placa fotográfica en P.

APLICACIÓN

Espectrómetros de masas

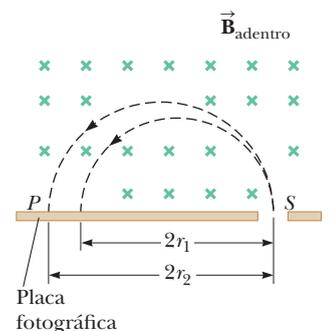


Figura 19.22 (Ejemplo 19.6) Dos isótopos dejan la rendija en el punto S y viajan en diferentes trayectorias circulares antes de golpear una placa fotográfica en P.

(continúa)

ESTRATEGIA Aplique la ecuación del ciclotrón a cada átomo y encuentre el radio de la trayectoria de cada uno. Duplique los radios para determinar los diámetros de trayectoria y luego encuentre su diferencia.

SOLUCIÓN

Use la ecuación 19.10 para encontrar el radio de la trayectoria circular que sigue el isótopo más ligero, hidrógeno:

$$r_1 = \frac{m_1 v}{qB} = \frac{(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.00 \times 10^6 \text{ m/s})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.100 \text{ T})} = 0.104 \text{ m}$$

Use la misma ecuación para calcular el radio de la trayectoria de deuterio, el isótopo más pesado:

$$r_2 = \frac{m_2 v}{qB} = \frac{(3.34 \times 10^{-27} \text{ kg})(1.00 \times 10^6 \text{ m/s})}{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(0.100 \text{ T})} = 0.209 \text{ m}$$

Multiplique los radios por 2 para encontrar los diámetros y tomar la diferencia, con lo que se obtiene la separación x entre los isótopos:

$$x = 2r_2 - 2r_1 = 0.210 \text{ m}$$

COMENTARIOS Durante la Segunda Guerra Mundial, los espectrómetros de masas se usaron para separar el isótopo radiactivo del uranio U-235 de su isótopo mucho más común, U-238.

PREGUNTA 19.6 Estime el radio de la circunferencia que traza un átomo de plomo individualmente ionizado que se mueve con la misma velocidad.

EJERCICIO 19.6 Use el mismo espectrómetro de masas del ejemplo 19.6 para encontrar la separación entre dos isótopos de helio: el helio-4 normal, que tiene un núcleo que consiste en dos protones y dos neutrones, y el helio-3, que tiene dos protones y un solo neutrón. Suponga que ambos núcleos, doblemente ionizados (con carga de $2e = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$), entran al campo en $1.00 \times 10^6 \text{ m/s}$. El núcleo de helio-4 tiene una masa de $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$, y el núcleo de helio-3 tiene una masa de $5.01 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

RESPUESTA 0.102 m

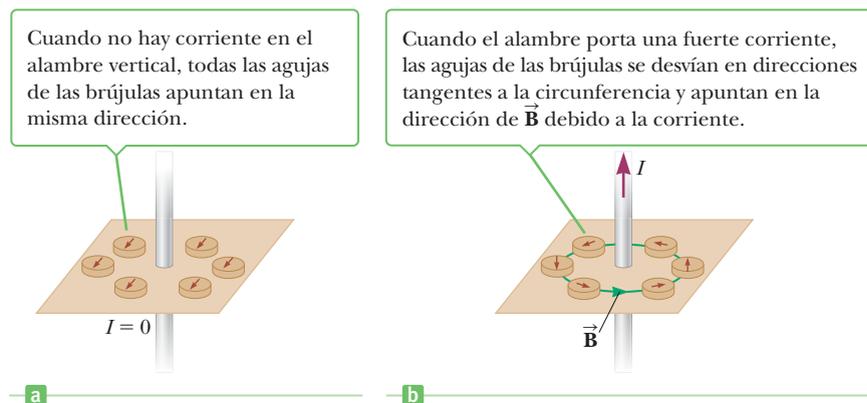
19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

Durante una conferencia de demostración en 1819, el científico danés Hans Oersted (1777-1851) descubrió que una corriente eléctrica en un alambre desviaba la aguja de una brújula cercana. Este descubrimiento momentáneo, que ligaba un campo magnético con una corriente eléctrica por primera vez, fue el comienzo de la comprensión del origen del magnetismo.

Un experimento simple que realizó por primera vez Oersted en 1820 demuestra claramente que un conductor portador de corriente produce un campo magnético. En este experimento, muchas brújulas se colocaron en un plano horizontal cerca de un largo alambre vertical, como en la figura activa 19.23a. Cuando no había corriente en el alambre, todas

Figura activa 19.23

a), b) Brújulas que muestran los efectos de la corriente en la cercanía de un alambre.



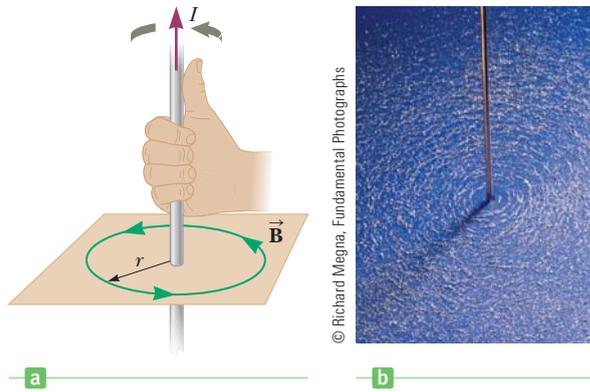


Figura 19.24 a) Regla de la mano derecha número 2 para determinar la dirección del campo magnético debido a un alambre largo recto que porta una corriente. Observe que las líneas del campo magnético forman circunferencias alrededor del alambre. b) Líneas de campo magnético circular que rodean un alambre portador de corriente, que se muestran mediante las limaduras de hierro.

las agujas apuntaban en la misma dirección (la del campo de la Tierra), como uno esperaría. Sin embargo, cuando el alambre porta una fuerte corriente estacionaria, las agujas se desvían en direcciones tangentes a la circunferencia, como en la figura activa 19.23b. Estas observaciones muestran que la dirección de \vec{B} es consistente con la siguiente regla conveniente, la **regla de la mano derecha número 2**:

Apunte el pulgar de su mano derecha a lo largo del alambre en la dirección de corriente positiva, como en la figura 19.24a. Entonces sus dedos se enrollan de manera natural en la dirección del campo magnético \vec{B} .

Cuando la corriente se invierte, las limaduras en la figura 19.24b también se invierten.

Puesto que las limaduras apuntan en la dirección de \vec{B} , concluimos que las líneas de \vec{B} forman circunferencias en torno al alambre. Por simetría, la magnitud de \vec{B} es la misma en todas partes sobre una trayectoria circular con centro en el alambre y que yace en un plano perpendicular al alambre. Al variar la corriente y la distancia desde el alambre, se puede determinar experimentalmente que \vec{B} es proporcional a la corriente e inversamente proporcional a la distancia desde el alambre. Estas observaciones condujeron a una expresión matemática para la intensidad del campo magnético debido a la corriente I en un largo alambre recto:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [19.11]$$

La constante de proporcionalidad μ_0 , llamada **permeabilidad del espacio libre**, tiene el valor

$$\mu_0 \equiv 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A} \quad [19.12]$$

Ley de Ampère y un alambre largo recto

La ecuación 19.11 le permite calcular el campo magnético debido a un alambre largo recto que porta una corriente. Un procedimiento general para deducir tales ecuaciones lo propuso el científico francés André-Marie Ampère (1775-1836); proporciona una relación entre la corriente en un alambre con forma arbitraria y el campo magnético producido por el alambre.

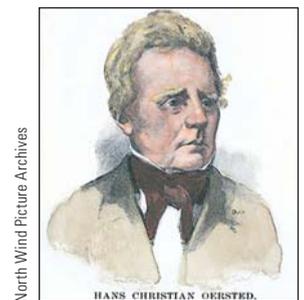
Considere una trayectoria cerrada arbitraria que rodea una corriente, como en la figura 19.25 (página 666). La trayectoria consiste en muchos segmentos cortos, cada uno de longitud $\Delta\ell$. Multiplique una de dichas longitudes por el componente del campo magnético paralelo a dicho segmento, donde el producto se marca $B_{\parallel} \Delta\ell$. De acuerdo con Ampère, la suma de todos esos productos sobre la trayectoria cerrada es igual a μ_0 por la corriente neta I que pasa a través de la superficie acotada por la trayectoria cerrada. Este enunciado, conocido como **ley de circuito de Ampère**, se puede escribir

$$\sum B_{\parallel} \Delta\ell = \mu_0 I \quad [19.13]$$

Tip 19.3 ¡Levante su mano derecha!

En este capítulo se introdujeron dos reglas de la mano derecha. Asegúrese de usar *sólo* su mano derecha cuando aplique estas reglas.

◀ Campo magnético debido a un largo alambre recto



Hans Christian Ørsted Físico y químico danés (1777-1851)

Ørsted es reconocido por observar que la aguja de una brújula se desvía cuando se coloca cerca de un alambre que porta una corriente. Este importante descubrimiento fue la primera evidencia de la conexión entre fenómenos eléctricos y magnéticos. Ørsted también fue el primero en preparar aluminio puro.

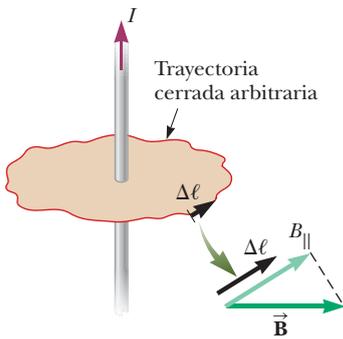
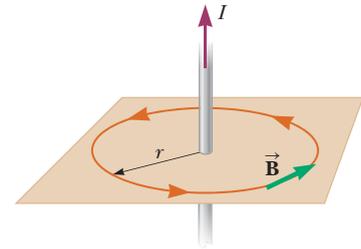


Figura 19.25 Para calcular el campo magnético de la corriente con la regla de Ampère, se usa una trayectoria cerrada arbitraria alrededor de una corriente.

Figura 19.26 Para calcular el campo magnético que establece un alambre se usa una trayectoria circular cerrada, de radio r , en torno a un largo alambre recto portador de corriente.



donde B_{\parallel} es la componente de \vec{B} paralela al segmento de longitud $\Delta\ell$ y $\sum B_{\parallel} \Delta\ell$, significa que se toma la suma sobre todos los productos $B_{\parallel} \Delta\ell$, alrededor de la trayectoria cerrada. La ley de Ampère es la ley fundamental que describe cómo las corrientes eléctricas crean campos magnéticos en el espacio vacío circundante.

Podemos usar la ley de circuito de Ampère para deducir el campo magnético debido a un largo alambre recto que porta una corriente I . Como se analizó anteriormente, cada una de las líneas de campo magnético de esta configuración forma una circunferencia con el alambre en su centro. El campo magnético es tangente a esta circunferencia en todo punto y su magnitud tiene el mismo valor B sobre toda la circunferencia de un círculo de radio r , de modo que $B_{\parallel} = B$, como se muestra en la figura 19.26. Al calcular la suma $\sum B_{\parallel} \Delta\ell$, sobre la trayectoria circular, observe que B_{\parallel} se puede quitar de la suma (porque tiene el mismo valor B para cada elemento en la circunferencia). La ecuación 19.13 produce entonces

$$\sum B_{\parallel} \Delta\ell = B_{\parallel} \sum \Delta\ell = B(2\pi r) = \mu_0 I$$

Al dividir ambos lados entre la circunferencia $2\pi r$, se obtiene

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Este resultado es idéntico a la ecuación 19.11, que es el campo magnético debido a la corriente I en un alambre largo recto.

La ley del circuito de Ampère proporciona un método elegante y simple para calcular los campos magnéticos de configuraciones de corriente enormemente simétricas, pero no se puede usar fácilmente para calcular campos magnéticos para configuraciones de corriente complejas que carecen de simetría. Además, la ley del circuito de Ampère en esta forma sólo es válida cuando las corrientes y campos no cambian con el tiempo.



Leonard de Selva/CORBIS

André-Marie Ampère (1775-1836)

Ampère, francés, se le acredita el descubrimiento del electromagnetismo, la relación entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.

EJEMPLO 19.7 Campo magnético de un cable coaxial

OBJETIVO Usar la ley de Ampère para calcular el campo magnético para corrientes cilíndricas y simétricas.

PROBLEMA Un cable coaxial consta de un cable aislado de conducción de corriente $I_1 = 3.00$ A rodeado por un conductor cilíndrico de conducción de corriente $I_2 = 1.00$ A en la dirección opuesta, como en la figura 19.27. **a)** Calcule el campo magnético en el interior del conductor cilíndrico en $r_{\text{int}} = 0.500$ cm. **b)** Calcule el campo magnético fuera del conductor cilíndrico en $r_{\text{ext}} = 1.50$ cm.

ESTRATEGIA Construya una trayectoria circular alrededor del alambre interior, como en la figura 19.27. Sólo la corriente dentro de esa circunferencia contribuye al campo magnético B_{int} en puntos de la circunferencia. Para calcular el campo magnético exterior B_{ext} en el cilindro, construya una trayectoria circular fuera del cilindro. Ahora ambas corrientes deben ser incluidas en el cálculo, pero la corriente que va hacia abajo de la página se debe restar de la corriente en el cable.

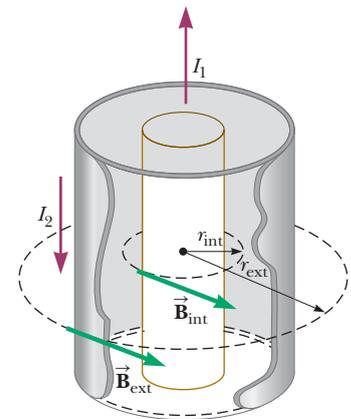


Figura 19.27 (Ejemplo 19.7)

SOLUCIÓN

a) Calcule el campo magnético B_{int} dentro del conductor cilíndrico en $r_{\text{int}} = 0.500$ cm.

Escriba la ley de Ampère:

El campo magnético es constante en la trayectoria dada y la longitud total de esta es $2\pi r_{\text{int}}$:

Despeje B_{int} y sustituya valores:

$$\begin{aligned} \sum B_{\parallel} \Delta \ell &= \mu_0 I \\ B_{\text{int}}(2\pi r_{\text{int}}) &= \mu_0 I_1 \\ B_{\text{int}} &= \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_{\text{int}}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(3.00 \text{ A})}{2\pi(0.005 \text{ m})} \\ &= 1.20 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

b) Calcule el campo magnético B_{ext} fuera del conductor cilíndrico en $r_{\text{ext}} = 1.50$ cm.

Escriba la ley de Ampère:

El campo magnético de nuevo es constante en la trayectoria dada y la longitud total de esta es $2\pi r_{\text{ext}}$:

Despeje B_{ext} y sustituya valores:

$$\begin{aligned} \sum B_{\parallel} \Delta \ell &= \mu_0 I \\ B_{\text{ext}}(2\pi r_{\text{ext}}) &= \mu_0(I_1 - I_2) \\ B_{\text{ext}} &= \frac{\mu_0(I_1 - I_2)}{2\pi r_{\text{ext}}} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(3.00 \text{ A} - 1.00 \text{ A})}{2\pi(0.015 \text{ m})} \\ &= 2.67 \times 10^{-5} \text{ T} \end{aligned}$$

COMENTARIOS La dirección del campo, tanto dentro como fuera del cilindro está dado por la regla de la mano derecha o en sentido contrario a las manecillas del reloj en la perspectiva de la figura 19.27. Los cables coaxiales se pueden utilizar para minimizar los efectos magnéticos de la corriente, siempre que las corrientes en el interior del alambre y el cilindro sean iguales en magnitud y opuestas en dirección.

PREGUNTA 19.7 ¿En qué dirección está la fuerza magnética sobre un protón viajando hacia arriba de la página a) a la derecha del cable? b) ¿En el lado izquierdo?

EJERCICIO 19.7 Supongamos que la corriente en el cable es de 4.00 A hacia abajo y la corriente en el conductor cilíndrico es de 5.00 A hacia arriba. Encuentre la magnitud del campo magnético a) en el interior del cable en $r_{\text{int}} = 0.25$ cm y b) fuera del cable en $r_{\text{ext}} = 1.25$ cm.

RESPUESTAS a) 3.20×10^{24} T b) 1.60×10^{25} T

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

Como hemos visto, una fuerza magnética actúa sobre un conductor portador de corriente cuando el conductor se coloca en un campo magnético externo. Puesto que un conductor que porta corriente crea un campo magnético alrededor suyo, es fácil comprender que dos alambres portadores de corriente colocados juntos ejercen fuerzas magnéticas uno sobre otro. Considera dos alambres largos paralelos rectos separados por la distancia d y que portan las corrientes I_1 e I_2 en la misma dirección, como se muestra en la figura activa 19.28. El alambre 1 está directamente arriba del alambre 2. ¿Cuál es la fuerza magnética sobre un alambre a causa de un campo magnético que establece el otro alambre?

En este cálculo se encuentra la fuerza sobre el alambre 1 debida al campo magnético del alambre 2. La corriente I_2 establece el campo magnético \vec{B}_2 en el alambre 1. La dirección de \vec{B}_2 es perpendicular al alambre, como se muestra en la figura. Al usar la ecuación 19.11, se encuentra que la magnitud de este campo magnético es

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

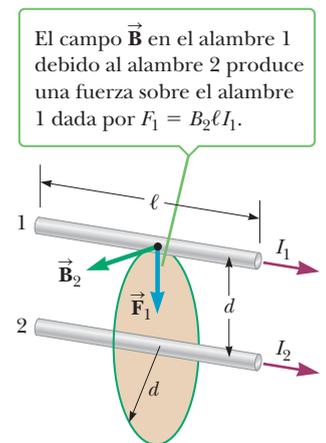


Figura activa 19.28

Dos alambres paralelos, orientados verticalmente, portan corrientes estacionarias y ejercen fuerzas uno sobre el otro. La fuerza es atractiva si las corrientes tienen la misma dirección, como se muestra y repulsiva si las dos corrientes tienen direcciones opuestas.

De acuerdo con la ecuación 19.5, la magnitud de la fuerza magnética sobre el alambre 1 en presencia del campo \vec{B}_2 debido a I_2 es

$$F_1 = B_2 I_1 \ell = \left(\frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} \right) I_1 \ell = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi d}$$

Esta relación se puede reescribir en términos de la fuerza por unidad de longitud:

$$\frac{F_1}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad [19.14]$$

La dirección de \vec{F}_1 es hacia abajo, hacia el alambre 2, como se indica mediante la regla de la mano derecha número 1. Este cálculo es completamente simétrico, lo que significa que la fuerza \vec{F}_2 sobre el alambre 2 es igual y opuesta a \vec{F}_1 , como se espera a partir de la tercera ley de Newton, de acción-reacción.

Demostramos que los conductores paralelos que portan corrientes en la misma dirección *se atraen* mutuamente. Debe usar el planteamiento que se indica en la figura activa 19.28 y los pasos que condujeron a la ecuación 19.14 para demostrar que los conductores paralelos portadores de corriente en direcciones opuestas *se repelen* mutuamente.

La fuerza entre dos alambres paralelos que portan corriente se usa para definir la unidad SI de corriente, el **ampere** (A), del modo siguiente:

Definición de ampere ▶

Si dos alambres largos paralelos, separados 1 m, portan la misma corriente y la fuerza magnética por unidad de longitud sobre cada alambre es 2×10^{-7} N/m, la corriente se define como 1 A.

La unidad SI de carga, el **coulomb** (C), ahora se puede definir en términos del ampere del modo siguiente:

Definición de coulomb ▶

Si un conductor porta una corriente estacionaria de 1 A, la cantidad de carga que fluye a través de cualquier sección transversal en 1 s es 1 C.

■ **Examen rápido**

19.5 ¿Cuál de las siguientes acciones duplicaría la magnitud de la fuerza magnética por unidad de longitud entre dos alambres paralelos portadores de corriente? Elija todas las respuestas correctas. a) Duplicar una de las corrientes. b) Duplicar la distancia entre ellos. c) Reducir a la mitad la distancia entre ellos. d) Duplicar ambas corrientes.

19.6 Si, en la figura 19.28, $I_1 = 2$ A e $I_2 = 6$ A, ¿cuál de las siguientes es cierta? a) $F_1 = 3F_2$ b) $F_1 = F_2$ c) $F_1 = F_2/3$

■ **EJEMPLO 19.8** Levitación de un alambre

OBJETIVO Calcular la fuerza magnética de un alambre portador de corriente sobre un alambre paralelo portador de corriente.

PROBLEMA Dos alambres, cada uno con un peso por unidad de longitud de 1.00×10^{-4} N/m, son paralelos con uno directamente sobre el otro. Suponga que los alambres portan corrientes que son iguales en magnitud y opuestas en dirección. Los alambres están separados 0.10 m y la suma de la fuerza magnética y la fuerza gravitacional sobre el alambre superior es cero. Determine la corriente en los alambres. (Desprecie el campo magnético de la Tierra.)

ESTRATEGIA El alambre superior debe estar en equilibrio bajo las fuerzas de repulsión magnética y gravedad. Iguale a cero la suma de las fuerzas y resuelva para la corriente desconocida, I .

SOLUCIÓN

Igualé a cero la suma de las fuerzas y sustituya las expresiones apropiadas. Observe que la fuerza magnética entre los alambres es repulsiva.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{grav}} + \vec{F}_{\text{mag}} &= 0 \\ -mg + \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \ell &= 0 \end{aligned}$$

Las corrientes son iguales, de modo que $I_1 = I_2 = I$. Realice estas sustituciones y resuelva para I^2 :

$$\frac{\mu_0 I^2}{2\pi d} \ell = mg \rightarrow I^2 = \frac{(2\pi d)(mg/\ell)}{\mu_0}$$

Sustituya los valores dados, encuentre I^2 , luego obtenga la raíz cuadrada. Observe que el peso por unidad de longitud, mg/ℓ , está dado.

$$I^2 = \frac{(2\pi \cdot 0.100 \text{ m})(1.00 \times 10^{-4} \text{ N/m})}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m})} = 50.0 \text{ A}^2$$

$$I = 7.07 \text{ A}$$

COMENTARIOS El ejercicio 19.3 demostró que usar el campo magnético de la Tierra para levantar un alambre requería corrientes extremadamente grandes. Las corrientes en los alambres pueden crear campos magnéticos mucho más intensos que el campo magnético de la Tierra en regiones cercanas al alambre.

PREGUNTA 19.8 ¿Por qué no se pueden construir automóviles que puedan levantar magnéticamente en el campo magnético de la Tierra?

EJERCICIO 19.8 Si se duplica la corriente en cada alambre, ¿cuán separados se deben colocar los alambres si las magnitudes de las fuerzas gravitacional y magnética sobre el alambre superior deben ser iguales?

RESPUESTA 0.400 m

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

La intensidad del campo magnético que establece un trozo de alambre que porta una corriente se puede mejorar en una ubicación específica si al alambre se le da forma de espira. Puede comprender esto al considerar el efecto de muchos pequeños segmentos de la espira de corriente, como en la figura 19.29. El pequeño segmento en la parte superior de la espira, marcado Δx_1 , produce un campo magnético de magnitud B_1 en el centro de la espira, dirigido afuera de la página. La dirección de \vec{B} se puede verificar usando la regla de la mano derecha número 2 para un alambre largo recto. Imagine sostener el alambre con su mano derecha, con su pulgar apuntando en la dirección de la corriente. Entonces sus dedos se enrollan en torno a la dirección de \vec{B} .

Un segmento de longitud Δx_2 en el fondo de la espira también contribuye al campo en el centro, lo que aumenta su intensidad. El campo producido en el centro por el segmento Δx_2 tiene la misma magnitud que B_1 y también se dirige afuera de la página. De igual modo, todos los demás segmentos de la espira de corriente contribuyen al campo. El efecto neto es un campo magnético para la espira de corriente como se muestra en la figura 19.30a.

Observe en la figura 19.30a que las líneas del campo magnético entran en el fondo de la espira de corriente y salen en la parte superior. Compare esa figura con la figura 19.30b, que ilustra el campo de un imán de barra. Los dos campos son similares. Un lado de la espira actúa como si estuviera en el polo norte de un imán y el otro actúa como un polo sur. La similitud de estos dos campos se usará para estudiar el magnetismo en la materia en una sección posterior.

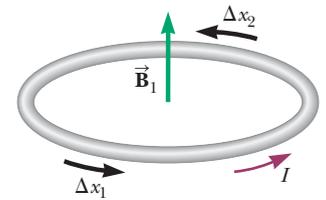


Figura 19.29 Todos los segmentos de la espira de corriente producen un campo magnético en el centro de la espira, dirigido afuera de la página.

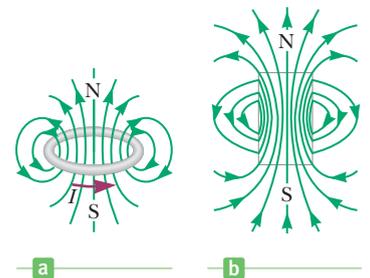


Figura 19.30 a) Líneas de campo magnético para una espira de corriente. Observe que las líneas se parecen a las de un imán de barra. b) El campo magnético de un imán de barra es similar al de una espira de corriente. c) Líneas de campo de una espira de corriente, que se muestran mediante limaduras de hierro.

■ FÍSICA APLICADA 19.4 Alambres trenzados

En los circuitos eléctricos con frecuencia se da el caso de que alambres aislados portadores de corriente en direcciones opuestas se enrollan entre ellos. ¿Cuál es la ventaja de hacer esto?

EXPLICACIÓN Si los alambres no se trenzan juntos, la combinación de los dos alambres forma una espira de corriente,

que produce un campo magnético relativamente fuerte. Este campo magnético generado por la espira podría ser suficientemente intenso para afectar a circuitos o componentes adyacentes. Cuando los alambres se trenzan juntos, sus campos magnéticos tienden a cancelarse. ■

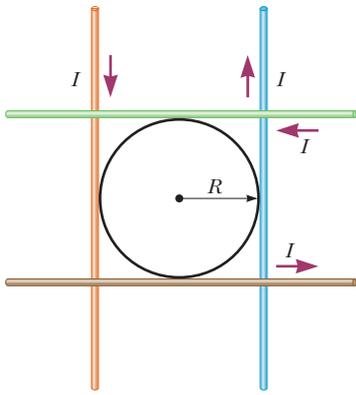


Figura 19.31 El campo de una espira circular portadora de corriente I se puede aproximar mediante el campo debido a cuatro alambres rectos, donde cada uno porta corriente I .

La magnitud del campo magnético en el centro de una espira circular que porta corriente I como en la figura 19.30a está dada por

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Esta ecuación se debe deducir con cálculo. Sin embargo, se puede demostrar que es razonable al calcular el campo en el centro de cuatro alambres largos portadores cada uno de corriente I y que forman un cuadrado, como en la figura 19.31, con una circunferencia de radio R inscrito dentro de él. Intuitivamente, este arreglo debe proporcionar un campo magnético en el centro que es similar en magnitud al campo producido por la espira circular. La corriente en el alambre circular está más cerca del centro, de modo que el alambre tendría un campo magnético un poco más intenso que sólo los cuatro lados del rectángulo, pero las longitudes de los alambres rectos más allá del rectángulo lo compensan. Cada alambre contribuye al mismo campo magnético en el centro exacto, de modo que el campo total está dado por

$$B = 4 \times \frac{\mu_0 I}{2\pi R} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\mu_0 I}{2R} \right) = (1.27) \left(\frac{\mu_0 I}{2R} \right)$$

Este resultado es *aproximadamente* el mismo que el campo producido por la espira circular de corriente.

Cuando la bobina tiene N espiras, y cada una porta corriente I , el campo magnético en el centro está dado por

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R} \quad [19.15]$$

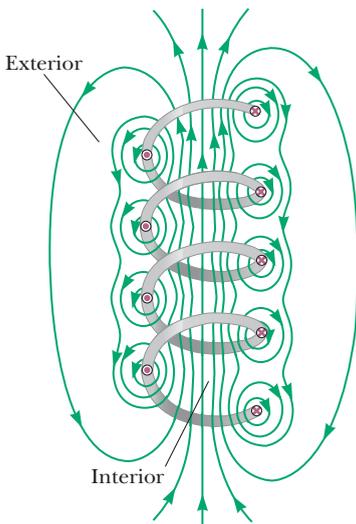


Figura 19.32 Líneas de campo magnético para un solenoide devanado con holgura.

Campo magnético de un solenoide

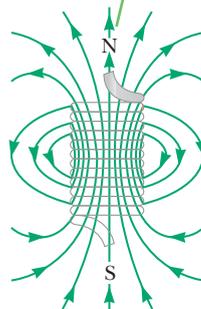
Si un alambre largo recto se dobla en una bobina de varias espiras cercanamente espaciadas, el dispositivo resultante es un **solenoid**, con frecuencia llamado **electroimán**. Este dispositivo es importante en muchas aplicaciones porque actúa como un imán sólo cuando porta una corriente. El campo magnético dentro de un solenoide aumenta con la corriente y es proporcional al número de espiras por unidad de longitud.

La figura 19.32 muestra las líneas de campo magnético de un solenoide devanado con holgura, de longitud ℓ y número total de vueltas N . Observe que las líneas de campo dentro del solenoide son casi paralelas, uniformemente espaciadas y muy juntas. Como resultado, el campo dentro del solenoide es fuerte y aproximadamente uniforme. El campo exterior a los lados del solenoide no es uniforme, mucho más débil que el campo interior y *opuesto en dirección* al campo dentro del solenoide.

Si las vueltas están muy juntas, las líneas de campo son como se muestra en la figura 19.33a, y entran en un extremo del solenoide y salen por el otro. Un extremo del solenoide

Figura 19.33 a) Líneas de campo magnético para un solenoide firmemente devanado de longitud finita que porta una corriente estacionaria. El campo dentro del solenoide es casi uniforme y fuerte. b) Patrón de campo magnético de un imán de barra, que se muestra mediante pequeñas limaduras de hierro sobre una hoja de papel.

Las líneas de campo recuerdan a las de un imán de barra, de modo que el solenoide efectivamente tiene polos norte y sur.



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

de actúa como polo norte y el otro extremo como polo sur. Si la longitud del solenoide es mucho mayor que su radio, las líneas que salen del extremo norte del solenoide se dispersan sobre una amplia región antes de regresar para entrar en el extremo sur. Mientras más separadas estén las líneas del campo, más débil será el campo. Esto contrasta con un campo mucho más intenso *dentro* del solenoide, donde las líneas están juntas. Además, el campo adentro de éste tiene una magnitud constante en todos los puntos lejos de sus extremos. Como se mostrará posteriormente, estas consideraciones permiten la aplicación de la ley de Ampère al solenoide, lo que da un resultado de

$$B = \mu_0 n I \quad [19.16]$$

para el campo dentro del solenoide, donde $n = N/\ell$ es el número de vueltas por unidad de longitud del solenoide.

Numerosos dispositivos crean haces de partículas cargadas con diferentes propósitos, y esas partículas son generalmente controladas y dirigidas por los campos electromagnéticos. Los antiguos televisores de rayos catódicos utilizaban imanes de dirección rápida y precisa, dirigen un haz de electrones a través de una pantalla de fósforo en un movimiento de barrido, creando la ilusión de una imagen en movimiento de una serie de puntos brillantes. (Ver figura 19.34.) Los microscopios electrónicos (ver figura 27.17b, página 924) usan un arma similar y lentes electrostáticas y electromagnéticas para enfocar el haz. Los aceleradores de partículas requieren electroimanes muy grandes para girar partículas moviéndose a casi la velocidad de la luz. Tokamaks, dispositivos experimentales utilizados en la investigación de energía de fusión, usan campos magnéticos para contener plasma caliente. La figura 19.35 es una fotografía de uno de esos dispositivos.

◀ Campo magnético dentro de un solenoide

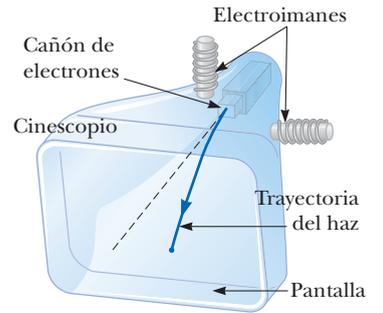


Figura 19.34 Los electroimanes se usan para desviar electrones hacia las posiciones deseadas sobre la pantalla de un cinescopio.

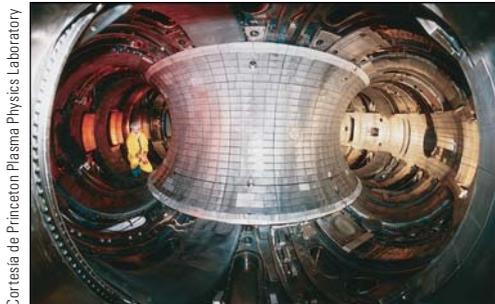


Figura 19.35 Vista interior del reactor experimental de fusión en Tokamak cerrado (TFTR) en el Princeton Plasma Physics Laboratory.

■ EJEMPLO 19.9 Campo magnético dentro de un solenoide

OBJETIVO Calcular el campo magnético de un solenoide a partir de los datos y la cantidad de movimiento de una partícula cargada en este campo.

PROBLEMA Cierta solenoide consiste en 100 vueltas de alambre y tiene una longitud de 10.0 cm. **a)** Determine la magnitud del campo magnético dentro del solenoide cuando porta una corriente de 0.500 A. **b)** ¿Cuál es la cantidad de movimiento de un protón que orbita dentro del solenoide en una circunferencia con un radio de 0.020 m? El eje del solenoide es perpendicular al plano de la órbita. **c)** ¿Aproximadamente cuánto alambre se necesitaría para construir este solenoide? Suponga que el radio del solenoide es de 5.00 cm.

ESTRATEGIA En el inciso a) calcule el número de vueltas por metro y sustituya esto y la información dada en la ecuación 19.16, lo que produce la magnitud del campo magnético. El inciso b) es una aplicación de la segunda ley de Newton.

SOLUCIÓN

a) Determine la magnitud del campo magnético dentro del solenoide cuando porta una corriente de 0.500 A.

Calcule el número de vueltas por unidad de longitud:

$$n = \frac{N}{\ell} = \frac{100 \text{ vueltas}}{0.100 \text{ m}} = 1.00 \times 10^3 \text{ vueltas/m}$$

(continúa)

Sustituya n e I en la ecuación 19.16 para encontrar la magnitud del campo magnético:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 n I \\ &= (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A})(1.00 \times 10^3 \text{ vueltas/m})(0.500 \text{ A}) \\ &= 6.28 \times 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

b) Determine la cantidad de movimiento de un protón que orbita en un círculo de radio 0.020 m cerca del centro del solenoide.

Escriba la segunda ley de Newton para el protón:

$$ma = F = qvB$$

Sustituya la aceleración centrípeta $a = v^2/r$:

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

Cancele un factor de v en ambos lados y multiplique por r , lo que produce la cantidad de movimiento mv :

$$\begin{aligned} mv &= r q B = (0.020 \text{ m})(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(6.28 \times 10^{-4} \text{ T}) \\ p &= mv = 2.01 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

c) ¿Aproximadamente cuánto alambre se necesitaría para construir este solenoide?

Multiplique el número de vueltas por la circunferencia de una espira:

$$\begin{aligned} \text{Longitud de alambre} &\approx (\text{número de vueltas})(2\pi r) \\ &= (1.00 \times 10^2 \text{ vueltas})(2\pi \cdot 0.050 \text{ m}) \\ &= 31.4 \text{ m} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Un electrón en el inciso b) tendría la misma cantidad de movimiento que el protón, pero una velocidad mucho mayor. También orbitaría en la dirección opuesta. La longitud de alambre en el inciso c) sólo es una estimación porque el alambre tiene cierto grosor, lo que aumenta ligeramente el tamaño de cada espira. Además, las espiras de alambre no son circunferencias perfectas porque se devanan lentamente a lo largo del solenoide.

PREGUNTA 19.9 ¿Qué ocurriría al protón en órbita si el solenoide se orientara verticalmente?

EJERCICIO 19.9 Suponga que tiene un tramo de 32.0 m de alambre de cobre. Si el alambre se enrolla en un solenoide de 0.240 m de largo y tiene un radio de 0.040 m, ¿cuán fuerte es el campo magnético resultante en su centro, cuando la corriente es 12.0 A?

RESPUESTA $8.00 \times 10^{-3} \text{ T}$

Ley de Ampère aplicada a un solenoide

Puede usar la ley de Ampère para obtener la expresión para el campo magnético dentro de un solenoide que porta una corriente I . En la figura 19.36 se muestra una sección transversal tomada a lo largo de la longitud de parte del solenoide. \vec{B} dentro del solenoide es uniforme y paralelo al eje, y \vec{B} afuera es aproximadamente cero. Considere una trayectoria rectangular de longitud L y ancho w , como se muestra en la figura. Puede aplicar la ley de Ampère a esta trayectoria al evaluar la suma de $B_{\parallel} \Delta\ell$, sobre cada lado del rectángulo. La contribución a lo largo del lado 3 claramente es cero porque $\vec{B} = 0$ en esta región. Las aportaciones de los lados 2 y 4 son ambas cero porque \vec{B} es perpendicular a $\Delta\ell$ a lo largo de estas trayectorias. El lado 1 de la longitud L dan una aportación BL a la suma porque \vec{B} es uniforme a lo largo de esta trayectoria y paralelo a $\Delta\ell$. Por lo tanto, la suma sobre la trayectoria rectangular cerrada tiene el valor

$$\sum B_{\parallel} \Delta\ell = BL$$

El lado derecho de la ley de Ampère involucra la corriente total que pasa a través del área acotada por la trayectoria elegida. En este caso, la corriente total a través de la trayectoria

rectangular es igual a la corriente a través de cada vuelta del solenoide, multiplicada por el número de vueltas. Si N es el número de vueltas en la longitud L , entonces la corriente total a través de la trayectoria rectangular es igual a NI . En consecuencia, la ley de Ampère aplicada a esta trayectoria produce

$$\sum B_{\parallel} \Delta \ell = BL = \mu_0 NI$$

o

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I = \mu_0 n I$$

donde $n = N/L$ es el número de vueltas por unidad de longitud.

19.10 Dominios magnéticos

El campo magnético producido por una corriente en una bobina de alambre da una pista acerca de qué puede provocar que ciertos materiales muestren fuertes propiedades magnéticas. Una sola bobina como la de la figura 19.30a tiene un polo norte y un polo sur, pero si esto es cierto para una bobina de alambre, debe también ser cierto para cualquier corriente confinada a una trayectoria circular. En particular, *un átomo individual debe actuar como un imán debido al movimiento de los electrones en torno al núcleo*. Cada electrón, con su carga de 1.6×10^{-19} C, da vueltas al átomo una vez en más o menos 10^{-16} s. Si dividimos la carga eléctrica entre este intervalo vemos que el electrón en órbita es equivalente a una corriente de 1.6×10^{-3} A. Tal corriente produce un campo magnético en el orden de 20 T en el centro de la trayectoria circular. A partir de esto observamos que se produciría un campo magnético muy intenso si muchos de estos imanes atómicos se pudieran alinear dentro de un material. Sin embargo, esto no ocurre porque el modelo simple que se describió no es toda la historia. Un análisis completo de la estructura atómica muestra que el campo magnético producido por un electrón en un átomo con frecuencia se cancela mediante un electrón que da vueltas en sentido opuesto en el mismo átomo. El resultado neto es que **el efecto magnético producido por los electrones que orbitan el núcleo es o cero o muy pequeño para la mayoría de los materiales**.

Las propiedades magnéticas de muchos materiales se pueden explicar por el hecho de que un electrón no sólo da vueltas en una órbita, sino que también gira sobre su eje como un trompo, con momento magnético de espín como se muestra (figura 19.37). (Esta descripción clásica no se debe tomar de manera literal. La propiedad de *espín* del electrón sólo se puede comprender en el contexto de la mecánica cuántica, que no se analizará aquí.) El electrón que gira sobre su eje representa una carga en movimiento que produce un campo magnético. El campo debido al giro sobre su eje por lo general es más intenso que el campo debido al movimiento orbital. En los átomos que contienen muchos electrones, éstos por lo general se acoplan con su espín mutuamente opuesto, de modo que sus campos se cancelan uno con otro. Es por esto que la mayoría de las sustancias no son imanes. Sin embargo, en ciertos materiales fuertemente magnéticos, como hierro, cobalto y níquel, los campos magnéticos producidos por el espín de los electrones no se cancelan por completo. Se dice que tales materiales son **ferromagnéticos**. En los materiales ferromagnéticos ocurre fuerte acoplamiento entre átomos vecinos, lo que forma grandes grupos de átomos con espines que se alinean. El tamaño de estos grupos, llamados **dominios**, por lo general varía de aproximadamente 10^{-4} a 0.1 cm. En una sustancia no magnetizada los dominios se orientan al azar, como se muestra en la figura 19.38a (página 674). Cuando se aplica un campo externo, como en las figuras 19.38b y 19.38c, el campo magnético de cada dominio tiende a un alineamiento más cercano con el campo externo, lo que resulta en magnetización.

En los que se llaman materiales magnéticos duros, los dominios permanecen alineados incluso después que se remueve el campo externo; el resultado es un **imán permanente**. En los materiales magnéticos blandos, como el hierro, una vez que se remueve el campo

La ley de Ampère aplicada a la trayectoria rectangular de rayas azules se puede usar entonces para calcular el campo dentro del solenoide.

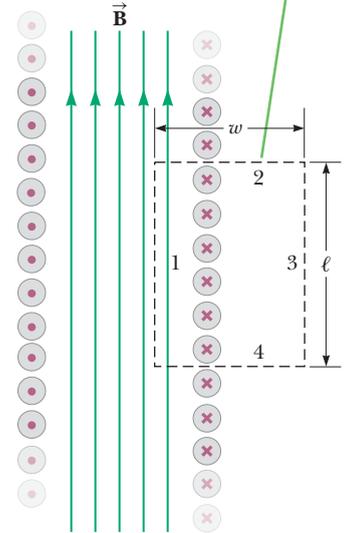


Figura 19.36 Sección transversal de un solenoide firmemente devanado. Si el solenoide es largo en relación con su radio, se puede suponer que el campo magnético interior es uniforme y que el campo afuera es cero.

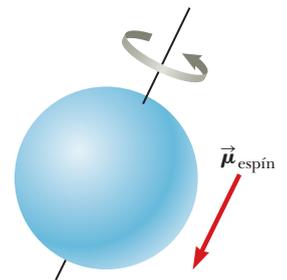


Figura 19.37 Modelo clásico del giro de un electrón.

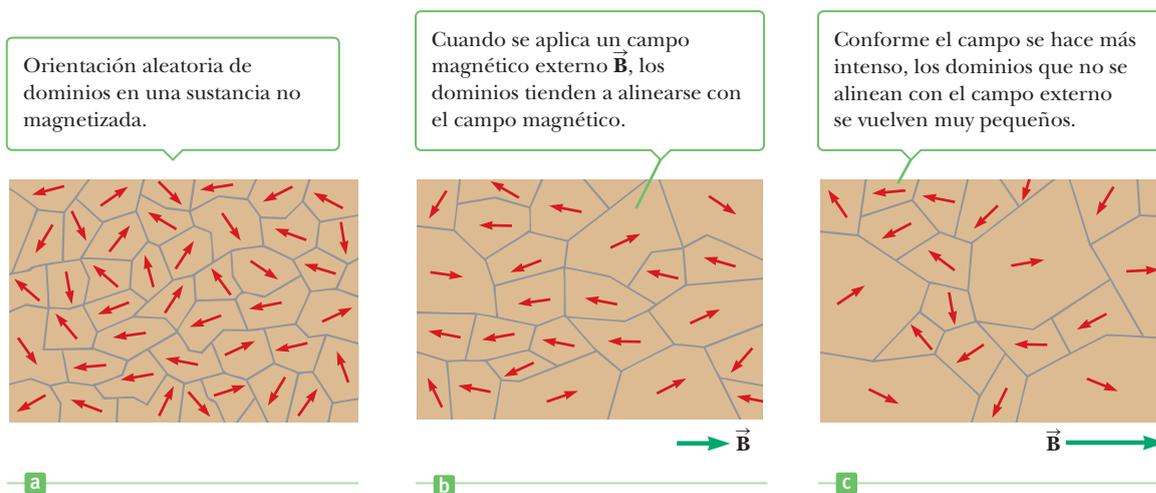


Figura 19.38 Orientación de los dipolos magnéticos antes y después de que se aplica un campo magnético a una sustancia ferromagnética.



Figura 19.39 El imán permanente (rojo) magnetiza temporalmente algunos sujetapapeles, que entonces escalan uno sobre otro mediante fuerzas magnéticas.

Tip 19.4 El electrón gira sobre su eje, ¡pero no lo hace!

Aun cuando se use la palabra *espín* (girar sobre su eje), el electrón, a diferencia con el trompo de un niño, físicamente no gira sobre su eje en este sentido. El electrón tiene una cantidad de movimiento angular intrínseca que hace que actúe como si girase sobre su eje pero el concepto de cantidad de movimiento angular de espín en realidad es un efecto cuántico relativista.

externo, la agitación térmica produce movimiento de los dominios y el material rápidamente regresa a un estado no magnetizado.

La alineación de dominios explica por qué la intensidad de un electroimán aumenta dramáticamente por la inserción de un núcleo de hierro en el centro del imán. El campo magnético producido por la corriente en las espiras hace que los dominios se alineen, lo que por ende produce un gran campo externo neto. El uso de hierro como núcleo también es ventajoso porque es un material magnético blando que pierde su magnetismo casi instantáneamente después que la corriente en las bobinas se apaga.

La formación de dominios en las sustancias ferromagnéticas también explica por qué tales sustancias son atraídas por los imanes permanentes. El campo magnético de un imán permanente realinea los dominios en un objeto ferromagnético de modo que el objeto queda temporalmente magnetizado. Entonces los polos del objeto son atraídos hacia los polos opuestos correspondientes del imán permanente. El objeto puede atraer de igual modo otros objetos ferromagnéticos, como se ilustra en la figura 19.39.

Tipos de materiales magnéticos

Los materiales magnéticos se pueden clasificar de acuerdo con su reacción a la aplicación de un campo magnético. En los materiales **ferromagnéticos** los átomos tienen momentos magnéticos permanentes que se alinean fácilmente con un campo magnético externo aplicado. Ejemplos de estos materiales son hierro, cobalto y níquel. Tales sustancias pueden retener algo de su magnetización incluso después que se remueve el campo magnético aplicado.

Los materiales **paramagnéticos** también tienen momentos magnéticos que tienden a alinearse con un campo magnético aplicado externo, pero la respuesta es extremadamente débil en comparación con la de los materiales ferromagnéticos. Ejemplos de sustancias paramagnéticas son aluminio, calcio y platino. Un material ferromagnético puede volverse paramagnético cuando se calienta a cierta temperatura crítica, la temperatura de Curie, que depende del material.

En los materiales **diamagnéticos**, un campo magnético externo aplicado induce una magnetización muy débil que es opuesta al campo aplicado. Usualmente el diamagnetismo no se observa porque los efectos paramagnéticos y ferromagnéticos son más intensos. Sin embargo, en la figura 19.40 un campo magnético muy alto ejerce una fuerza de levitación sobre las moléculas de agua diamagnéticas en una rana.

High Field Magnet Laboratory, University of Nijmegen, The Netherlands



Figura 19.40 Diamagnetismo. Una rana levita en un campo magnético de 16 T en el Nijmegen High Field Magnet Laboratory en Holanda. La fuerza de levitación se ejerce sobre las moléculas de agua diamagnéticas en el cuerpo de la rana. La rana no sufrió efectos dañinos por la experiencia de levitación.

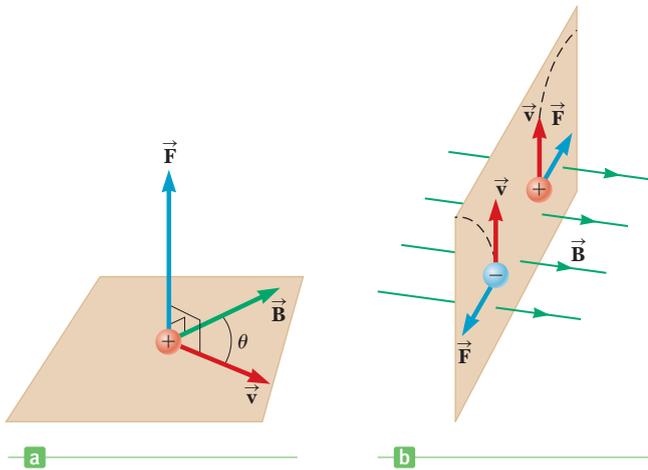
RESUMEN

19.3 Campos magnéticos

La **fuerza magnética** que actúa sobre una carga q que se mueve con velocidad \vec{v} en un campo magnético \vec{B} tiene magnitud

$$F = qvB \sin \theta \quad [19.1]$$

donde θ es el ángulo entre \vec{v} y \vec{B} .



a) La dirección de la fuerza magnética \vec{F} sobre una partícula cargada que se mueve con una velocidad \vec{v} en presencia de un campo magnético \vec{B} . La fuerza magnética es perpendicular a \vec{v} y \vec{B} . b) Las fuerzas magnéticas sobre cargas positivas y negativas. Las líneas punteadas muestran las trayectorias de las partículas, que se investigan en la sección 19.6. Las fuerzas magnéticas sobre las partículas con cargas opuestas se mueven a la misma velocidad en un campo magnético en direcciones opuestas.

Para encontrar la dirección de esta fuerza, use la **regla de la mano derecha número 1**: apunte los dedos de su mano derecha abierta en la dirección de \vec{v} y luego enróllelos en la dirección de \vec{B} . Entonces su pulgar apunta en la dirección de la fuerza magnética \vec{F} .

Si la carga es *negativa* en lugar de positiva, la fuerza se dirige de modo opuesto a la fuerza dada por la regla de la mano de derecha.

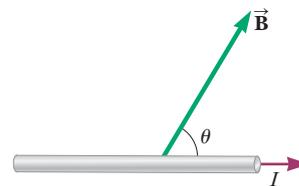
La unidad SI del campo magnético es el **tesla** (T), o weber por metro cuadrado (Wb/m^2). Una unidad adicional de uso común para el campo magnético es el **gauss** (G); $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

Si un conductor recto de longitud ℓ porta corriente I , la fuerza magnética sobre dicho conductor cuando se coloca en un campo magnético externo uniforme \vec{B} es

$$F = B\ell \sin \theta \quad [19.6]$$

donde θ es el ángulo entre la dirección de la corriente y la dirección del campo magnético.



La fuerza magnética sobre este conductor con corriente se dirige hacia arriba fuera de la página.

La regla de la mano derecha número 1 también proporciona la dirección de la fuerza magnética sobre el conductor. Sin embargo, en este caso, usted debe apuntar sus dedos en la dirección de la corriente en lugar de en la dirección de \vec{v} .

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

El torque τ sobre una espira de alambre portadora de corriente en un campo magnético \vec{B} tiene magnitud

$$\tau = BIA \sin \theta \quad [19.8]$$

donde I es la corriente en la espira y A es su área de sección transversal. La magnitud del momento magnético de una bobina portadora de corriente se define mediante $\mu = IAN$, donde N es el número de espiras. El momento magnético se considera un vector, $\vec{\mu}$, que es perpendicular al plano de la espira. El ángulo entre \vec{B} y $\vec{\mu}$ es θ .

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

Si una partícula cargada se mueve en un campo magnético uniforme de modo que su velocidad inicial es perpendicular

al campo, se moverá en una trayectoria circular en un plano perpendicular al campo magnético. El radio r de la trayectoria circular se puede encontrar a partir de la segunda ley de Newton y la aceleración centrípeta, y está dado por

$$r = \frac{mv}{qB} \quad [19.10]$$

donde m es la masa de la partícula y q su carga.

19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

El campo magnético a una distancia r desde un **alambre largo recto** que porta corriente I tiene la magnitud

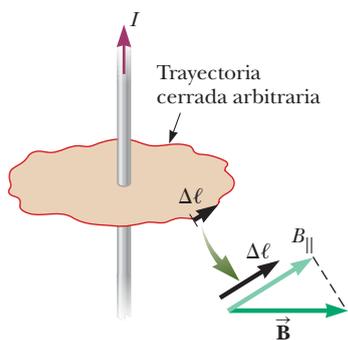
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [19.11]$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ es la **permeabilidad del espacio libre**. Las líneas de campo magnético alrededor de un alambre largo recto son circunferencias concéntricas con el alambre.

La **ley de Ampère** se puede usar para encontrar el campo magnético alrededor de ciertos conductores simples portadores de corriente. Se puede escribir

$$\sum B_{\parallel} \Delta \ell = \mu_0 I \quad [19.13]$$

donde B_{\parallel} es la componente de \vec{B} tangente a un pequeño elemento de corriente de longitud $\Delta \ell$ que es parte de una trayectoria cerrada e I es la corriente total que penetra la trayectoria cerrada.



Una trayectoria cerrada arbitraria alrededor de una corriente se utiliza para calcular el campo magnético de la corriente por el uso de la regla de Ampère.

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

La fuerza por unidad de longitud sobre cada uno de dos alambres paralelos separados por la distancia d y que portan las corrientes I_1 e I_2 tiene la magnitud

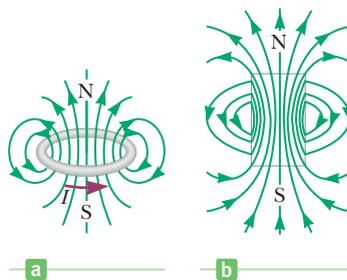
$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \quad [19.14]$$

Las fuerzas son atractivas si las corrientes están en la misma dirección y repulsiva si están en direcciones opuestas.

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

El campo magnético en el centro de una bobina de N espiras circulares de radio R , donde cada una porta corriente I , está dado por

$$B = N \frac{\mu_0 I}{2R} \quad [19.15]$$

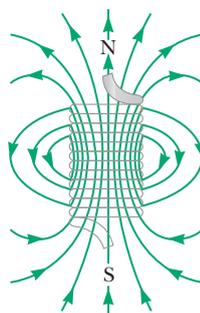


a) Las líneas del campo magnético de una espira de corriente. Tenga en cuenta que las líneas se asemejan a las de un imán de barra. b) El campo magnético de un imán de barra es similar al de una espira de corriente.

El campo magnético dentro de un solenoide tiene la magnitud

$$B = \mu_0 n I \quad [19.16]$$

donde $n = N/\ell$ es el número de vueltas de alambre por unidad de longitud.



Líneas del campo magnético de un solenoide de longitud finita por el que circula una corriente constante. El campo en el interior del solenoide es casi uniforme y fuerte. Observe que las líneas de campo se asemejan a las de un imán de barra, por lo que el solenoide efectivamente tiene polos norte y sur.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un alambre de 0.50 m de longitud porta una corriente de 0.10 A en la dirección x positiva, paralelo al suelo. Si el alambre tiene un peso de 1.0×10^{-2} N, ¿cuál es la magnitud mínima del campo magnético que ejerce una fuerza magnética sobre el alambre igual al peso del alambre? a) 0.20 T b) 0.30 T c) 0.40 T d) 0.50 T e) 0.60 T
- Un electrón se mueve a través del ecuador con una velocidad de 2.5×10^6 m/s y en una dirección 35° N de E.

En este punto, el campo magnético de la Tierra tiene una dirección hacia el norte, es paralelo a la superficie y tiene una magnitud de 0.10×10^{-4} T. ¿Cuál es la fuerza que actúa sobre el electrón debida a su interacción con el campo magnético de la Tierra? a) 5.1×10^{-18} N hacia el oeste b) 4.0×10^{-18} N hacia la superficie de la Tierra c) 2.4×10^{-18} N alejándose de la superficie de la Tierra d) 3.3×10^{-18} N hacia la superficie de la Tierra e) 4.0×10^{-18} N alejándose de la superficie de la Tierra.

3. Una bobina rectangular de alambre que consiste en 10 espiras, cada una con 0.20 m de longitud y 0.30 m de ancho, yace en el plano xy . Si la bobina porta una corriente de 2.0 A, ¿cuál es el torque que ejerce un campo magnético de 0.010 T de magnitud que se dirige a un ángulo de 30.0° con respecto al eje z positivo? a) $1.2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ b) $2.4 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ c) $6.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ d) $4.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$ e) $3.0 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}$
4. Un largo alambre porta una corriente de 1 A. Determine la magnitud del campo magnético a 2 m de distancia del alambre. a) $1 \times 10^{-3} \text{ T}$ b) $1 \times 10^{-4} \text{ T}$ c) $1 \times 10^{-6} \text{ T}$ d) $1 \times 10^{-7} \text{ T}$ e) $1 \times 10^{-10} \text{ T}$
5. Un protón entra a un campo magnético constante de 0.050 T de magnitud y atraviesa un semicírculo de 1.0 mm de radio antes de salir del campo. ¿Cuál es la velocidad del protón? a) $1.6 \times 10^3 \text{ m/s}$ b) $2.3 \times 10^3 \text{ m/s}$ c) $2.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ d) $1.8 \times 10^2 \text{ m/s}$ e) $4.8 \times 10^3 \text{ m/s}$
6. Estime la magnitud de la fuerza magnética por unidad de longitud entre un par de alambres paralelos separados por 2 m si cada uno porta una corriente de 3 A. a) $1 \times 10^{-1} \text{ N/m}$ b) $1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ c) $1 \times 10^{-4} \text{ N/m}$ d) $1 \times 10^{-6} \text{ N/m}$ e) $1 \times 10^{-8} \text{ N/m}$
7. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético en el núcleo de un solenoide de 120 vueltas, de 0.50 m de longitud, que porta una corriente de 2.0 A? a) $2.4 \times 10^{-4} \text{ T}$ b) $4.8 \times 10^{-5} \text{ T}$ c) $1.2 \times 10^{-6} \text{ T}$ d) $3.6 \times 10^{-5} \text{ T}$ e) $6.0 \times 10^{-4} \text{ T}$
8. Una partícula cargada viaja a través de un campo magnético uniforme. ¿Cuál de los siguientes enunciados del campo magnético son ciertos? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) Ejerce una fuerza sobre la partícula que es paralela al campo. b) Ejerce una fuerza sobre la partícula a lo largo de la dirección de su movimiento. c) Aumenta la energía cinética de la partícula. d) Ejerce una fuerza que es perpendicular a la dirección de movimiento. e) No cambia la magnitud de la cantidad de movimiento de la partícula.
9. ¿En cuál de las siguientes circunstancias un campo magnético espacialmente uniforme no puede ejercer una fuerza magnética sobre una partícula? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) La partícula está cargada. b) La partícula se mueve perpendicular al campo. c) La partícula se mueve paralela al campo. d) La magnitud del campo magnético cambia con el tiempo. e) La partícula está en reposo.
10. Un protón que se mueve horizontalmente entra a una región donde un campo magnético uniforme se dirige perpendicular a la velocidad del protón, como se muestra en la figura POM19.10. Después que el protón entra



Figura POM19.10

al campo, ¿a) se desvía hacia abajo, manteniendo su velocidad constante; b) continúa moviéndose en la dirección horizontal con velocidad constante; c) se mueve en una órbita circular y queda atrapado por el campo; d) se desvía hacia arriba, se mueve en una trayectoria semicircular con velocidad constante y sale del campo con movimiento hacia la izquierda, o e) se desvía afuera del plano del papel?

11. Dos alambres largos paralelos portan cada uno la misma corriente como en la figura POM19.11. ¿El campo magnético total en el punto P a la mitad entre los alambres a) es cero, b) se dirige hacia la página, c) se dirige afuera de la página, d) se dirige hacia la izquierda o e) se dirige a la derecha?
12. Dos alambres largos rectos se cruzan mutuamente en ángulo recto y cada uno porta la misma corriente, como en la figura POM19.12. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos en cuanto al campo magnético total en los varios puntos debidos a los dos alambres? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El campo es más intenso en los puntos B y D. b) El campo es más intenso en los puntos A y C. c) El campo es hacia afuera de la página en el punto B y hacia adentro de la página en el punto D. d) El campo es hacia afuera de la página en el punto C y hacia afuera de la página en el punto D. e) El campo tiene la misma magnitud en los cuatro puntos.

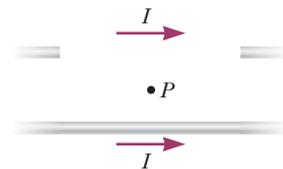


Figura POM19.11

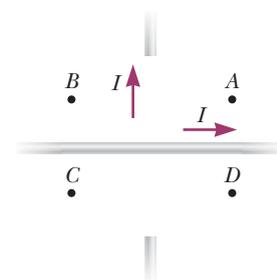


Figura POM19.12

13. Un campo magnético ejerce un torque sobre cada una de las espiras de alambre individuales portadoras de corriente que se muestran en la figura POM19.13. Las

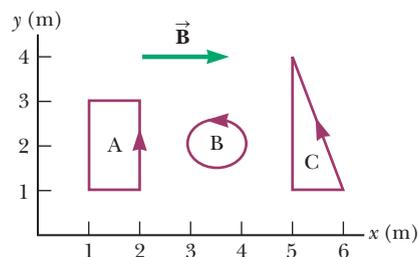


Figura POM19.13

espiras se encuentran en el plano xy y cada uno porta la misma magnitud de corriente y el campo magnético uniforme apunta en la dirección x positiva. Clasifique las espiras por la magnitud del torque que el campo ejerce sobre ellos, de mayor a menor. a) A, B, C, b) A, C, B, c) B, A, C, d) B, C, A y e) C, A, B

14. Dos largos alambres paralelos portan corrientes de 20 A y 10 A en direcciones opuestas, como en la figura POM19.14. ¿Cuál de los siguientes enunciados debe ser cierto? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) En la región I el campo magnético es hacia la página y nunca es cero. b) En la región II el campo es hacia la página y puede ser cero. c) En la región III es posible que el campo sea cero. d) En la región I el campo magnético es hacia afuera de la página y nunca es cero. e) No hay puntos donde el campo sea cero.

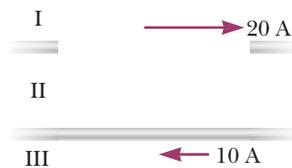


Figura POM19.14

15. Un alambre largo recto porta una corriente I como en la figura POM19.15. ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos en cuanto al

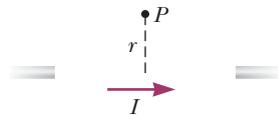


Figura POM19.15

campo magnético debido al alambre? (Puede haber más de un enunciado correcto.) a) El campo es proporcional a I/r y hacia afuera de la página en P . b) El campo es proporcional a I/r^2 y es hacia afuera de la página en P . c) El campo es proporcional a I/r y es hacia la página en P . d) La intensidad del campo es proporcional a I , pero no depende de r . e) El campo es proporcional a I/r^2 y es hacia la página en P .

16. El solenoide A tiene longitud L y N vueltas; el solenoide B tiene longitud $2L$ y N vueltas, y el solenoide C tiene longitud $L/2$ y $2N$ vueltas. Si cada solenoide porta la misma corriente, clasifique por la intensidad del campo magnético en el centro de cada solenoide, de mayor a menor. a) A, B, C, b) A, C, B, c) B, C, A, d) C, A, B y e) C, B, A
17. En un cierto instante, un protón se está moviendo en la dirección x positiva a través de un campo magnético en la dirección z negativa. ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre el protón? a) dirección z positiva b) negativo dirección z c) dirección y positiva d) y negativo de dirección e) La fuerza es igual a cero.
18. Responda a cada pregunta sí o no. Suponga que los movimientos y las corrientes mencionadas están a lo largo del eje x y campos se encuentran en la dirección y . a) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un objeto inmóvil cargado? b) ¿Un campo magnético puede hacerlo? c) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un objeto que se mueve cargado? d) ¿Un campo magnético puede hacerlo? e) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un cable recto conductor de corriente? f) ¿Un campo magnético puede hacerlo? g) ¿Un campo eléctrico ejerce una fuerza sobre un haz de electrones que se mueven? h) ¿Un campo magnético puede hacerlo?

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En televisor antiguo, un haz de electrones se mueve desde la parte trasera del cinescopio hacia la pantalla, donde golpea un punto fluorescente que brilla con un color particular cuando golpea. El campo magnético de la Tierra en la posición del televisor es horizontal y hacia el norte. ¿En cuál(es) dirección(es) se debe orientar el televisor de modo que el haz experimente la mayor desviación?
- ¿En cuál dirección apuntaría una brújula si usted estuviera en el polo norte magnético de la Tierra?
- ¿Cómo puede usarse el movimiento de una partícula cargada para distinguir entre un campo magnético y un campo eléctrico en cierta región?
- ¿Un campo magnético constante puede poner en movimiento a un protón en reposo? Explique su respuesta.
- Explique por qué dos alambres paralelos que transportan corrientes en direcciones opuestas se repelen entre sí.
- ¿Un clavo se atraerá a cualquier polo de un imán? Explique que es lo que ocurre dentro del clavo cuando se coloca cerca del imán.
- Un gobernante hindú alguna vez sugirió que fuera enterrado en un ataúd magnético con la polaridad arreglada de modo que pudiera estar suspendido por siempre entre el cielo y la Tierra. ¿Tal levitación magnética es posible? Analice.
- Un imán atrae un trozo de hierro. Entonces el hierro puede atraer a otra pieza de hierro. Sobre la base del alineamiento de dominios, explique lo que ocurre en cada trozo de hierro.
- ¿Puede usted usar una brújula para detectar las corrientes en los alambres en las paredes cerca de los interruptores de luz en su casa?
- ¿El campo magnético que crea una espira de corriente es uniforme? Explique.
- Suponga que se mueve a lo largo de un alambre con la misma velocidad que la velocidad de deriva de los electrones en el alambre. ¿Ahora mide un campo magnético cero?
- ¿Por qué las partículas cargadas del espacio exterior, llamadas rayos cósmicos, golpean la Tierra con más frecuencia en los polos que en el ecuador?

13. Un Slinky® colgante se une a una poderosa batería y un interruptor. Cuando el interruptor se cierra de modo que el juguete ahora porta corriente, ¿el Slinky se comprime o estira?
14. ¿Cómo se puede usar una espira de corriente para determinar la presencia de un campo magnético en una región dada del espacio?
15. Alambres paralelos ejercen fuerzas magnéticas uno sobre el otro. ¿Y qué hay de los alambres perpendiculares? Imagine dos alambres orientados mutuamente perpendiculares y casi en contacto. Cada alambre porta una corriente. ¿Existe una fuerza entre los alambres?
16. La figura PC19.16 muestra cuatro imanes permanentes, cada uno con un orificio en su centro. Observe que

los imanes azul y amarillo levitan sobre los rojos. a) ¿Cómo ocurre esta levitación? b) ¿Qué propósito tienen las barras? c) ¿Qué puede decir acerca de los polos de los imanes a partir de esta observación? d) Si el imán superior se invierte, ¿qué supone que sucederá?



Figura PC19.16

17. Dos partículas cargadas se proyectan en la misma dirección en un campo magnético perpendicular a sus velocidades. Si las dos partículas son desviadas en direcciones opuestas, ¿qué se puede decir de ellas?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- 1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

19.3 Campos magnéticos

1. Considere un electrón cerca del ecuador de la Tierra. ¿En qué dirección tiende a desviarse, si su velocidad es a) dirigida hacia abajo, b) dirigida hacia el norte, c) dirigida hacia el oeste, d) dirigida hacia el sureste?
2. a) Determine la dirección de la fuerza sobre un protón (una partícula con carga positiva) que se mueve a través de los campos magnéticos en la figura P19.2, como se muestra. b) Repita el inciso a), si supone que la partícula en movimiento es un electrón.

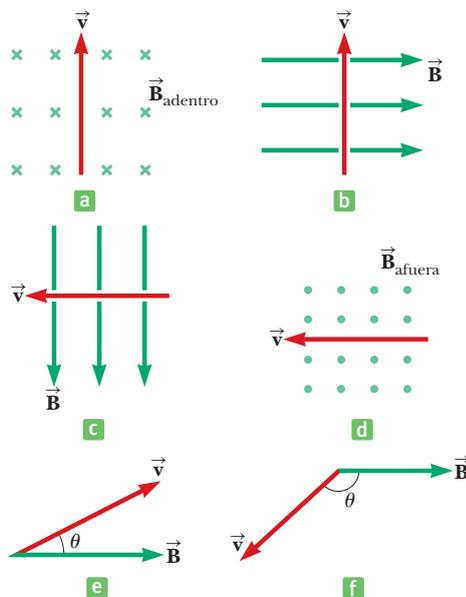


Figura P19.2 (Problemas 2 y 12)

3. Determine la dirección del campo magnético que actúa sobre la partícula con carga positiva que se mueve en las varias situaciones que se muestran en la figura P19.3, si la dirección de la fuerza que actúa sobre ella es como se indica.

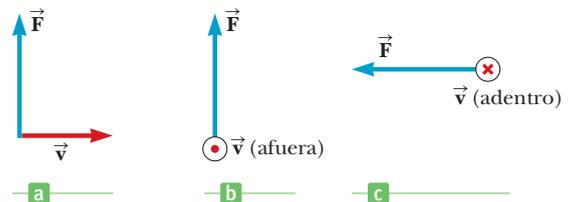


Figura P19.3 (Problemas 3 y 15) Para el problema 15, sustituya el vector velocidad con una corriente en dicha dirección.

4. Determine la dirección inicial de la desviación de las partículas cargadas conforme entran a los campos magnéticos, como se muestra en la figura P19.4.

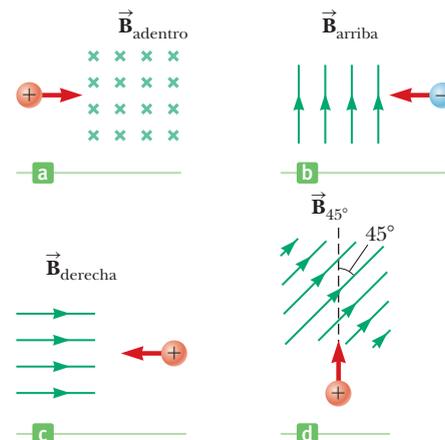


Figura P19.4

5. **CIC** Un electroimán de laboratorio produce un campo magnético de 1.50 T de magnitud. Un protón se mueve a través de este campo con una velocidad de 6.00×10^6 m/s. a) Encuentre la magnitud de la fuerza magnética máxima que se podría ejercer sobre el protón. b) ¿Cuál es la magnitud de la máxima aceleración del protón? c) ¿El campo ejercería la misma fuerza magnética sobre un electrón que se mueve a través del campo con la misma velocidad? ¿El electrón experimentaría la misma aceleración? Explique.
6. **M** Un protón se mueve perpendicularmente a un campo magnético uniforme \vec{B} a una velocidad de 1.00×10^7 m/s y experimenta una aceleración de 2.00×10^{13} m/s² en el sentido positivo de las x cuando su velocidad se encuentra en la dirección z positiva. Determinar la magnitud y dirección del campo.
7. ¿Qué velocidad necesitaría un protón para dar vueltas a la Tierra a 1000 km sobre el ecuador magnético, donde el campo magnético de la Tierra se dirige horizontalmente al norte y tiene una magnitud de 4.00×10^{-8} T?
8. Un electrón se acelera a través de 2400 V desde el reposo y luego entra a una región donde hay un campo magnético uniforme de 1.70 T. ¿Cuáles son las magnitudes a) máxima y b) mínima de la fuerza magnética que actúa sobre este electrón?
9. **M** Un protón se mueve a 4.00×10^6 m/s a través de un campo magnético de magnitud 1.70 T experimenta una fuerza magnética de magnitud 8.20×10^{-13} N. ¿Cuál es el ángulo entre la velocidad del protón y el campo?
10. **BIO** Los iones sodio (Na^+) se mueven a 0.851 m/s a través del torrente sanguíneo en el brazo de una persona que está de pie cerca de un gran imán. El campo magnético tiene una intensidad de 0.254 T y forma un ángulo de 51.0° con el movimiento de los iones sodio. El brazo contiene 100 cm^3 de sangre con una concentración de 3.00×10^{20} de iones Na^+ por centímetro cúbico. Si ningún otro ion está presente en el brazo, ¿cuál sería la fuerza magnética sobre el brazo?
11. En el ecuador, cerca de la superficie de la Tierra, el campo magnético es aproximadamente de $50.0 \mu\text{T}$ hacia el norte y el campo eléctrico es aproximadamente 100 N/C hacia abajo en buen clima. Encuentre las fuerzas gravitacional, eléctrica y magnética sobre un electrón con una velocidad instantánea de 6.00×10^6 m/s dirigida hacia el este en este ambiente.

19.4 Fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente

12. En la figura P19.2, suponga en cada caso que el vector velocidad que se muestra se sustituye con un alambre que porta una corriente en la dirección del vector velocidad. Para cada caso, encuentre la dirección de la fuerza magnética que actúa sobre el alambre.
13. Una corriente $I = 15$ A se dirige a lo largo del eje positivo x y perpendicular a un campo magnético. Una fuerza magnética por unidad de longitud de 0.12 N/m actúa sobre el conductor en la dirección y negativa. Calcule la

magnitud y dirección del campo magnético en la región a través de la cual pasa la corriente.

14. **CIC** Un alambre recto que porta una corriente de 3.0 A se coloca en un campo magnético uniforme de 0.28 T de magnitud que se dirige perpendicular al alambre. a) Encuentre la magnitud de la fuerza magnética sobre una sección del alambre que tiene una longitud de 14 cm. b) Explique por qué no puede determinar la dirección de la fuerza magnética a partir de la información dada en el problema.
15. En la figura P19.3, suponga en cada caso que el vector velocidad que se muestra se sustituye con un alambre que porta una corriente en la dirección del vector velocidad. Para cada caso, encuentre la dirección del campo magnético que producirá la fuerza magnética que se muestra.
16. Un alambre, que tiene una masa por unidad de longitud de 0.500 g/cm, porta una corriente de 2.00 A horizontalmente hacia el sur. ¿Cuáles son la dirección y magnitud del campo magnético mínimo necesario para levantar este alambre verticalmente hacia arriba?
17. Un alambre porta una corriente de 10.0 A en una dirección que forma un ángulo de 30.0° con la dirección de un campo magnético de 0.300 T de intensidad. Encuentre la fuerza magnética sobre una longitud de 5.00 m del alambre.
18. En cierta ubicación, la Tierra tiene un campo magnético de 0.60×10^{-4} T, que apunta 75° bajo de la horizontal en un plano norte-sur. Un alambre recto de 10.0 m porta una corriente de 15 A. a) Si la corriente se dirige horizontalmente hacia el este, ¿cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre el alambre? b) ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza si la corriente se dirige verticalmente hacia arriba?
19. Un alambre con una masa de 1.00 g/cm se coloca sobre una superficie horizontal con un coeficiente de fricción de 0.200. El alambre porta una corriente de 1.50 A hacia el este y se mueve horizontalmente hacia el norte. ¿Cuáles son la magnitud y la dirección del campo magnético vertical *más pequeño* que permite al alambre moverse de esta forma?
20. Un conductor suspendido mediante dos alambres flexibles, como se muestra en la figura P19.20, tiene una masa por unidad de longitud de 0.040 0 kg/m. ¿Qué corriente debe existir en el conductor para que la tensión en los alambres de soporte sea cero cuando el campo magnético es de 3.60 T hacia la página? ¿Cuál es la dirección requerida para la corriente?

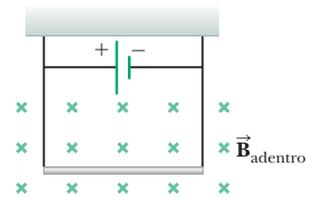


Figura P19.20

21. **CIC** Considere el sistema que se muestra en la figura P19.21. Una longitud de 15 cm de un conductor de 15 g de masa, libre para moverse verticalmente, se coloca entre dos delgados conductores verticales y un campo magnético uniforme actúa perpendicular a la página. Cuando

una corriente de 5.0 A se dirige como se muestra en la figura, el alambre horizontal se mueve hacia arriba con velocidad constante en presencia de la gravedad. a) ¿Qué fuerzas actúan sobre el alambre horizontal y bajo qué condición el alambre puede moverse hacia arriba con velocidad constante? b) Encuentre la magnitud y dirección del campo magnético mínimo que se requiere para mover el alambre con velocidad constante. c) ¿Qué ocurre si el campo magnético supera este valor mínimo? (El alambre se desliza sin fricción sobre los dos conductores verticales.)

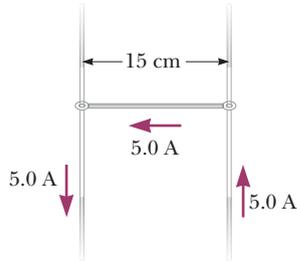


Figura P19.21

22. **S** Una barra de metal de masa m que lleva una corriente que se desliza sobre dos rieles horizontales separados por una distancia d . Si el coeficiente de rozamiento cinético entre la barra y los rieles es μ_k , ¿qué campo magnético vertical es necesario para mantener la barra en movimiento a una velocidad constante?
23. En la figura P19.23 el cubo tiene 40.0 cm por lado. Cuatro segmentos rectos de alambre (ab , bc , cd y da) forman una espira cerrada que porta una corriente $I = 5.00$ A en la dirección que se muestra. Un campo magnético uniforme de magnitud $B = 0.020$ T está en la dirección y positiva. Determine la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre cada segmento.
24. Una línea de transmisión horizontal, de 58 m de largo, porta una corriente de 2.2 kA, como se muestra en la figura P19.24. El campo magnético de la Tierra en esta ubicación tiene una magnitud de 5.0×10^{-5} T y forma un ángulo de 65° con la línea de transmisión. Encuentre la magnitud y la dirección de la fuerza magnética sobre la línea de transmisión.

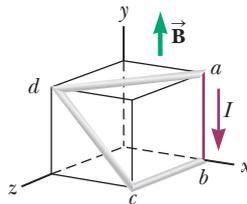


Figura P19.23

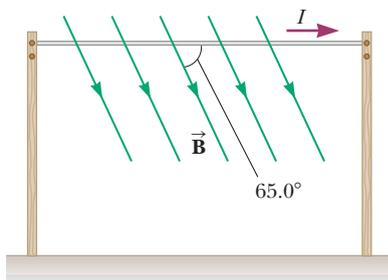


Figura P19.24

19.5 Torque sobre una espira de corriente y motores eléctricos

25. Un cable forma una circunferencia con un diámetro de 10.0 cm y se coloca en un campo magnético uniforme de 3.00 mT. El cable lleva una corriente de 5.00 A. Encuentre el torque máximo en el cable.
26. Una corriente de 17.0 mA se mantiene en una sola espira circular con una circunferencia de 2.00 m. Un campo magnético de 0.800 T se dirige paralelo al plano de la espira. ¿Cuál es la magnitud del torque que ejerce el campo magnético sobre la espira?
27. **M** Una bobina de 8 espiras encierra un área elíptica que tiene un eje mayor de 40.0 cm y un eje menor de 30.0 cm (figura P19.27). La bobina se encuentra en el plano de la página y tiene una corriente de 6.00 A que fluye en sentido de las manecillas del reloj en torno a ella. Si la bobina está en un campo magnético uniforme de 2.00×10^{-4} T dirigido hacia la izquierda de la página, ¿cuál es la magnitud del torque sobre la bobina? (Sugerencia: El área de una elipse es $A = \pi ab$, donde a y b son, respectivamente, los ejes mayor y menor de la elipse.)

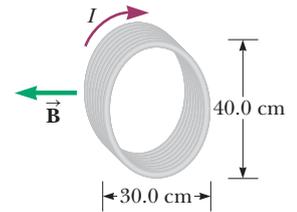


Figura P19.27

28. Una espira rectangular consiste en 100 vueltas cercanamente enrolladas y tiene dimensiones de 0.40 por 0.30 m. La espira puede girar a lo largo del eje y y el plano de la bobina forma un ángulo de 30.0° con el eje x (figura P19.28). ¿Cuál es la magnitud del torque que ejerce sobre la espira un campo magnético uniforme de 0.800 T que se dirige a lo largo del eje x , cuando la corriente en los devanados tiene un valor de 1.20 A en la dirección que se muestra? ¿Cuál es la dirección de rotación esperada de la espira?

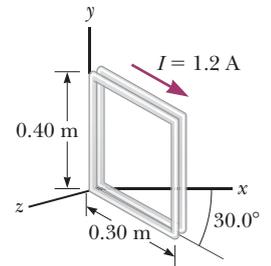


Figura P19.28

29. Una bobina rectangular de 200 espiras, que tiene dimensiones de 3.0 por 5.0 cm, se coloca en un campo magnético uniforme de 0.90 T de magnitud. a) Encuentre la corriente en la bobina si el torque máximo que ejerce sobre ella el campo magnético es de 0.15 N · m. b) Encuentre la magnitud del torque sobre la bobina cuando el campo magnético forma un ángulo de 25° con la normal al plano de la bobina.
30. Un alambre de cobre tiene 8.00 m de largo y un área transversal de 1.00×10^{-4} m². El alambre forma una espira de una vuelta en la forma de cuadrado y luego se conecta a una batería que aplica una diferencia de potencial de 0.100 V. Si la espira se coloca en un campo magnético uniforme de 0.400 T de magnitud, ¿cuál es el torque máximo que puede actuar sobre él? La resistividad del cobre es 1.70×10^{-8} Ω · m.

31. Un largo trozo de alambre, con una masa de 0.100 kg y una longitud total de 4.00 m, se usa para hacer una bobina cuadrada con un lado de 0.100 m. La bobina puede girar a lo largo del lado horizontal, porta una corriente de 3.40 A y se coloca en un campo magnético de 0.010 0 T de magnitud. a) Determine el ángulo que el plano de la bobina forma con la vertical cuando la bobina está en equilibrio. b) Encuentre el torque que actúa sobre la bobina debido a la fuerza magnética en equilibrio.

32. **PG** Una espira rectangular tiene dimensiones de 0.500 por 0.300 m. La espira puede girar a lo largo del eje x y yace en el plano xy (figura P19.32). Un campo magnético uniforme de 1.50 T se dirige en un ángulo de 40.0° con respecto al eje y positivo y se encuentra paralelo en todas partes al plano yz . La espira porta una corriente de 0.900 A en la dirección que se muestra. (Ignore la gravitación.) a) ¿En qué dirección se ejerce la fuerza magnética sobre el segmento de alambre ab ? ¿Cuál es la dirección del torque magnético asociado con esta fuerza, como se calcula con respecto al eje x ? b) ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética que se ejerce sobre el segmento cd ? ¿Cuál es la dirección del torque magnético asociado con esta fuerza, de nuevo calculada con respecto al eje x ? c) ¿Las fuerzas que se examinan en los incisos a) y b) se pueden combinar para hacer que la espira gire en torno al eje x ? ¿Pueden afectar el movimiento de la espira en alguna forma? Explique. d) ¿Cuál es la dirección (en el plano yz) de la fuerza magnética que se ejerce sobre el segmento bc ? Al medir los torques con respecto al eje x , ¿cuál es la dirección del torque que ejerce la fuerza sobre el segmento bc ? e) Al mirar hacia el origen a lo largo del eje x positivo, ¿la espira girará en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario? f) Calcule la magnitud del momento magnético de la espira. g) ¿Cuál es el ángulo entre el vector de momento magnético y el campo magnético? h) Calcule el torque sobre la espira con los valores que se encuentran para el momento magnético y el campo magnético.

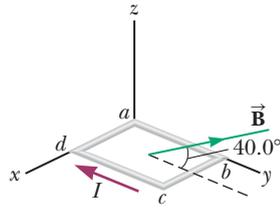


Figura P19.32

19.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético

33. Un electrón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético uniforme con una magnitud de 0.235 T. Si la energía cinética del electrón es 3.30×10^{-19} J, determine a) la velocidad del electrón y b) el radio de la trayectoria circular.
34. Un protón viaja con una velocidad de 5.02×10^6 m/s a un ángulo de 60° con la dirección de un campo magnético de 0.180 T de magnitud en la dirección x positiva. ¿Cuáles son a) la magnitud de la fuerza magnética sobre el protón y b) la aceleración del protón?
35. La figura P19.35a es un diagrama de un dispositivo llamado selector de velocidad, en el que las partículas de una velocidad específica pasan a través sin desviarse mientras

que las que tienen mayor o menor velocidad se desvían hacia arriba o hacia abajo. Un campo eléctrico se dirige perpendicular a un campo magnético, lo que produce una fuerza eléctrica y una fuerza magnética sobre la partícula cargada que puede ser igual en magnitud y opuesta en dirección (figura P19.35b) y por lo tanto se cancela. Demuestre que las partículas con una velocidad de $v = E/B$ pasarán a través del selector de velocidad sin desviarse.

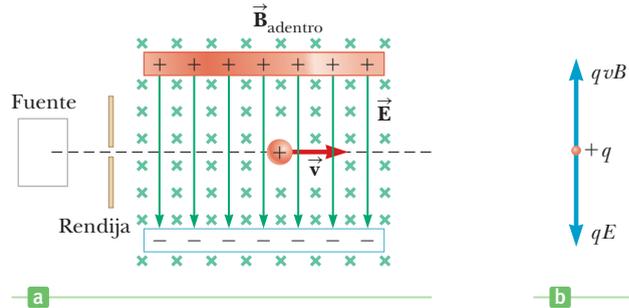


Figura P19.35

36. Considere el espectrómetro de masas que se muestra esquemáticamente en la figura P19.36. El campo eléctrico entre las placas del selector de velocidad es 950 V/m y los campos magnéticos tanto en el selector de velocidad como en la cámara de desviación tienen magnitudes de 0.930 T. Calcule el radio de la trayectoria en el sistema para un solo ion cargado con masa $m = 1.28 \times 10^{-26}$ kg. (Sugerencia: Véase el problema 35.)

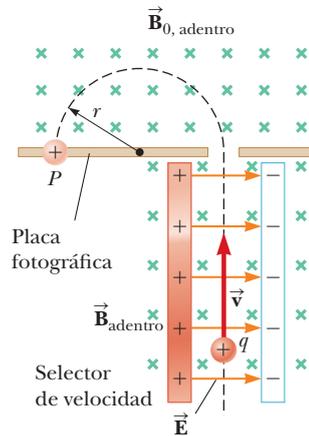


Figura P19.36 (Problemas 36 y 41) Un espectrómetro de masas. Las partículas cargadas primero se envían a través de un selector de velocidad. Luego entran a una región donde un campo magnético \vec{B}_0 (que se dirige hacia adentro) hace que los iones positivos se muevan en una trayectoria semicircular y golpeen una película fotográfica en P .

37. Un solo ion con carga positiva tiene una masa de 2.50×10^{-26} kg. Después de acelerar a través de una diferencia de potencial de 250 V, el ion entra a un campo magnético de 0.500 T, en una dirección perpendicular al campo. Calcule el radio de la trayectoria del ion en el campo.
38. Un espectrómetro de masas se usa para examinar los isótopos de uranio. Los iones en el haz salen del selector de velocidad con una velocidad de 3.00×10^5 m/s y entran

a un campo magnético uniforme de 0.600 T dirigido perpendicularmente a la velocidad de los iones. ¿Cuál es la distancia entre los puntos de impacto que se forman en la placa fotográfica por iones con carga única de ^{235}U y ^{238}U ?

39. Un protón está en reposo en la frontera vertical plana de una región que contiene un campo magnético vertical uniforme B . Una partícula alfa que se mueve horizontalmente tiene una colisión frontal elástica con el protón. Inmediatamente después del choque, ambas partículas entran al campo magnético y se mueven perpendiculares a la dirección del campo. El radio de la trayectoria del protón es R . Encuentre el radio de la trayectoria de la partícula alfa. La masa de la partícula alfa es cuatro veces la del protón y su carga es el doble que la del protón.

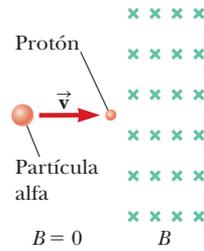


Figura P19.39

40. **S** Una partícula con carga q y energía cinética E_0 viaja en un campo magnético uniforme de magnitud B . Si la partícula se mueve en una trayectoria circular de radio R , encuentre una expresión a) para su velocidad y b) su masa.
41. Una partícula pasa a través de un espectrómetro de masas como se ilustra en la figura P19.36. El campo eléctrico entre las placas del selector de velocidad tiene una magnitud de 8 250 V/m y los campos magnéticos tanto en el selector de velocidad como en la cámara de desviación tienen magnitudes de 0.093 T. En la cámara de desviación la partícula golpea una placa fotográfica recorrida 39.6 cm de su punto de salida después de viajar en un semicírculo. a) ¿Cuál es la razón masa a carga de la partícula? b) ¿Cuál es la masa de la partícula si es doblemente ionizada? c) ¿Cuál es su identidad, si supone que es un elemento?
42. **S** Un protón (carga $+e$, masa de m_p), un deuterón (carga $+e$, masa de $2m_p$) y una partícula alfa (carga $+2e$, masa de $4m_p$) se aceleran desde el reposo a través de una diferencia de potencial ΔV común. Cada una de las partículas entra a un campo magnético uniforme \vec{B} , con su velocidad en una dirección perpendicular a \vec{B} . El protón se mueve en una trayectoria circular de radio de r_p . En términos de r_p , determine a) el radio r_d de la órbita circular para el deuterón y b) el radio r_a de la partícula alfa.

19.7 Campo magnético de un alambre largo recto y ley de Ampère

43. Un relámpago puede transportar una corriente de 1.00×10^4 A durante corto tiempo. ¿Cuál es el campo magnético resultante a 100 m del relámpago? Suponga que el relámpago se extiende muy arriba y abajo del punto de observación.

44. En cada uno de los incisos a), b) y c) de la figura P19.44, encuentre la dirección de la corriente en el alambre que produciría un campo magnético dirigido como se muestra.

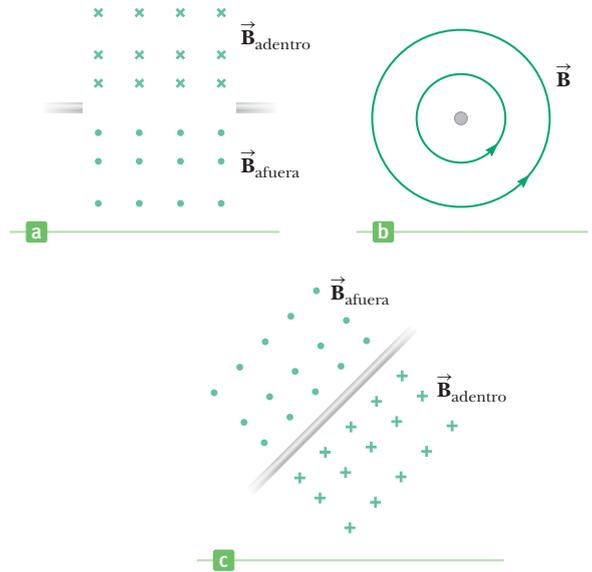


Figura P19.44

45. **BIO** Las neuronas en su cuerpo portan corrientes débiles que producen campos magnéticos detectables. Para estudiar la actividad eléctrica en el cerebro con este concepto se usa una técnica llamada *magnetoencefalografía*, o MEG. Esta técnica es capaz de detectar campos magnéticos tan débiles como 1.0×10^{-15} T. Modele la neurona como un largo alambre portador de corriente y encuentre la corriente que debe portar para producir un campo de esta magnitud a una distancia de 4.0 cm de la neurona.
46. En 1962, en el Observatorio Geofísico de Tulsa, Oklahoma, se realizaron mediciones del campo magnético de un gran tornado. Si la magnitud del campo del tornado fue $B = 1.50 \times 10^{-8}$ T y apuntaba al norte cuando el tornado estaba a 9.00 km al este del observatorio, ¿qué corriente llevaba arriba o abajo el embudo del tornado? Modele el vórtice como un largo alambre recto que porta una corriente.
47. **BIO** Un campo magnético estático tan pequeño como 1.7 mT puede afectar un marcapasos cardíaco. ¿Cuán cerca de un largo alambre recto portador de 20 A puede aproximarse el usuario de un marcapasos?
48. Los dos alambres que se muestran en la figura P19.48 portan corrientes de 5.00 A en direcciones opuestas y

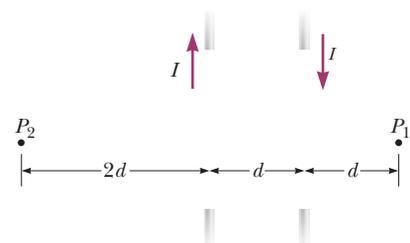


Figura P19.48

están separados por 10.0 cm. Encuentre la dirección y magnitud del campo magnético neto a) en un punto a la mitad entre los alambres; b) un punto P_1 , 10.0 cm a la derecha del alambre a la derecha, y c) en el punto P_2 , 20.0 cm a la izquierda del alambre a la izquierda.

49. Cuatro conductores paralelos largos portan igual corriente $I = 5.00$ A. La figura P19.49 es una vista transversal de los conductores. La dirección de la corriente es hacia la página en los puntos A y B (que se indica mediante las cruces) y hacia afuera de la página en C y D (que se indica mediante los puntos). Calcule la magnitud y dirección del campo magnético en el punto P , ubicado en el centro del cuadrado con lado de longitud 0.200 m.

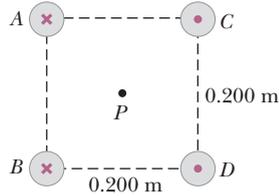


Figura P19.49

50. Dos alambres largos y paralelos portan corrientes $I_1 = 3.00$ A y $I_2 = 5.00$ A en la dirección que se indica en la figura 19.50. a) Encuentre la dirección y magnitud del campo magnético en un punto a la mitad entre los alambres ($d = 20.0$ cm). b) Encuentre la magnitud y dirección del campo magnético en el punto P , ubicado $d = 20.0$ cm arriba del alambre que porta 5.00 A de corriente.

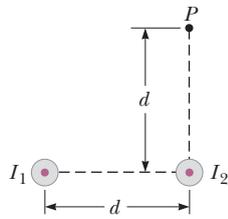


Figura P19.50

51. **M** Un alambre porta una corriente de 7.00 A a lo largo del eje x y otro alambre porta una corriente de 6.00 A a lo largo del eje y , como se muestra en la figura P19.51. ¿Cuál es el campo magnético en el punto P , ubicado en $x = 4.00$ m, $y = 3.00$ m?

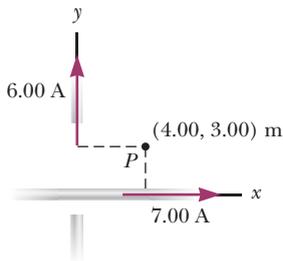


Figura P19.51

52. **PG** Un alambre largo recto yace sobre una mesa horizontal en el plano xy y porta una corriente de $1.20 \mu\text{A}$ en la dirección x positiva a lo largo del eje x . Un protón recorre, en la dirección x negativa, con velocidad de 2.30×10^4 m/s, una distancia d arriba del alambre (es decir: $z = d$). a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético del alambre en la posición del protón? b) ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética que actúa sobre el protón? c) Explique por qué la dirección de movimiento del protón no cambia. d) Con la segunda ley de Newton, encuentre una

expresión simbólica para d en términos de la aceleración de la gravedad g , la masa del protón m , su velocidad v , la carga q y la corriente I . e) Encuentre la respuesta numérica para la distancia d usando los resultados del inciso d).

53. El campo magnético a 40.0 cm de un largo alambre recto, que porta una corriente de 2.00 A, es $1.00 \mu\text{T}$. a) ¿A qué distancia es de $0.100 \mu\text{T}$? b) En un instante, los dos conductores en una larga extensión doméstica portan iguales corrientes de 2.00 A en direcciones opuestas. Los dos alambres están separados 3.00 mm. Encuentre el campo magnético a 40.0 cm de la mitad del cordón recto, en el plano de los dos alambres. c) ¿A qué distancia es un décimo de su valor? d) El alambre central en un cable coaxial porta corriente de 2.00 A en una dirección y la envoltura alrededor suyo porta corriente de 2.00 A en la dirección opuesta. ¿Qué campo magnético crea el cable en puntos exteriores?

54. **CIC S** Dos alambres largos paralelos, separados por una distancia $2d$, portan iguales corrientes en la misma dirección. En la figura P19.54 se muestra una vista lateral de los dos alambres, donde las corrientes están afuera de la página. a) ¿Cuál es la dirección del campo magnético en P sobre el eje x , que establecen los dos alambres? b) Encuentre una expresión para la magnitud del campo en P . c) A partir de su resultado para el inciso b), determine el campo en un punto a la mitad entre los dos alambres. ¿El resultado coincide con sus expectativas? Explique.

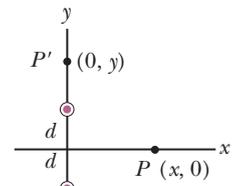


Figura P19.54

19.8 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos

55. Dos alambres largos y paralelos separados por 2.50 cm transportan corrientes en direcciones opuestas. La corriente en un cable es de 1.25 A y la corriente en el otro es de 3.50 A. a) Hallar la magnitud de la fuerza por unidad de longitud que ejerce un alambre sobre el otro. b) ¿La fuerza es atractiva o repulsiva?
56. **CIC** Dos alambres paralelos, separados por 4.0 cm, se repelen mutuamente con una fuerza por unidad de longitud de 2.0×10^{-4} N/m. La corriente en un alambre es 5.0 A. a) Encuentre la corriente en el otro alambre. b) ¿Las corrientes están en la misma dirección o en direcciones opuestas? c) ¿Qué sucedería si la dirección de una corriente se invirtiera y duplicara?

57. Un alambre, con un peso por unidad de longitud de 0.080 N/m, se suspende directamente sobre un segundo alambre. El alambre superior porta una corriente de 30.0 A y el alambre inferior porta una corriente de 60.0 A. Encuentre la distancia de separación entre los alambres, de modo que el alambre superior todavía se mantenga en su lugar por repulsión magnética.

58. En la figura P19.58, la corriente en el alambre largo recto es $I_1 = 5.00$ A, y el alambre se encuentra en el plano de la espira rectangular, que porta 10.0 A. Las dimensiones

que se muestran son $c = 0.100$ m, $a = 0.150$ m y $\ell = 0.450$ m. Encuentre la magnitud y dirección de la fuerza neta que ejerce sobre el lazo el campo magnético debido al alambre recto.

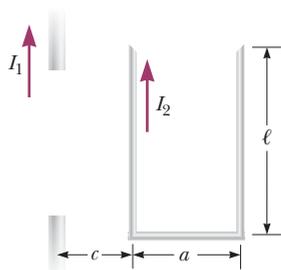


Figura P19.58

19.9 Campos magnéticos de espiras de corriente y solenoides

- 59. **M** Un solenoide largo que tiene 1 000 vueltas distribuidas de manera uniforme en una longitud de 0.400 m produce un campo magnético de magnitud 1.00×10^{-24} T en su centro. ¿Qué corriente es necesaria en las bobinas para que eso ocurra?
- 60. Cierta imán superconductor, en forma de solenoide de 0.50 cm de longitud, puede generar un campo magnético de 9.0 T en su núcleo cuando sus bobinas portan una corriente de 75 A. Los devanados, hechos de una aleación de niobio-titanio, deben enfriarse a 4.2 K. Encuentre el número de espiras en el solenoide.
- 61. Se quiere construir un solenoide que tenga una resistencia de 5.00Ω (a 20°C) y produzca un campo magnético de 4.00×10^{-2} T en su centro cuando porte una corriente de 4.00 A. El solenoide se construirá a partir de alambre de cobre que tiene un diámetro de 0.500 mm. Si el radio del solenoide será de 1.00 cm, determine a) el número de espiras de alambre necesarias y b) la longitud que debe tener el solenoide.
- 62. Un solenoide de 10.0 cm de diámetro y 75.0 cm de largo está hecho de alambre de cobre de diámetro 0.100 cm, con un aislamiento muy delgado. El cable se enrolla en un tubo de cartón en una sola capa, con vueltas adyacentes que se tocan. ¿Qué potencia tiene que ser entregada al solenoide para producir un campo de 8.00 mT en su centro?
- 63. Un electrón se mueve con una velocidad de 1.0×10^4 m/s en una trayectoria circular de 2.0 cm de radio dentro de un solenoide. El campo magnético del solenoide es perpendicular al plano de la trayectoria del electrón. Encuentre a) la intensidad del campo magnético dentro del solenoide y b) la corriente en el solenoide si tiene 25 vueltas por centímetro.

Problemas adicionales

- 64. **CIC** La figura P19.64 es una configuración que se puede usar para medir campos magnéticos. Una bobina rectangular de alambre que contiene N vueltas tiene ancho w . La bobina está unida a un brazo de una balanza y está suspendida entre los polos de un imán. El campo es uniforme y perpendicular al plano de la bobina. El sistema

se equilibra primero cuando la corriente en la bobina es cero. Cuando se cierra el interruptor y la bobina porta una corriente I , se debe agregar una masa m al lado derecho para equilibrar el sistema. a) Encuentre una expresión para la magnitud del campo magnético y determine su dirección. b) ¿Por qué el resultado es independiente de la dimensión vertical de la bobina? c) Suponga que la bobina tiene 50 vueltas y ancho de 5.0 cm. Cuando se cierra el interruptor, la bobina porta una corriente de 0.30 A, y se debe agregar una masa de 20.0 g en el lado derecho para equilibrar el sistema. ¿Cuál es la magnitud del campo magnético?

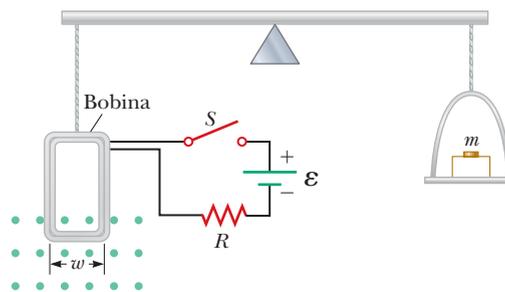


Figura P19.64

- 65. Dos espiras circulares coplanares concéntricas de alambre portan corrientes $I_1 = 5.00$ A e $I_2 = 3.00$ A en direcciones opuestas, como en la figura P19.65. Si $r_1 = 12.0$ cm y $r_2 = 9.00$ cm, ¿cuál es la magnitud y b) dirección del campo magnético neto en el centro de las dos espiras? c) Si r_1 permanece fijo en 12.0 cm y r_2 es una variable. Determine el valor de r_2 tal que el campo neto en el centro del lazo es cero.
- 66. Un electrón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético constante de magnitud 1.00 mT. El momento angular del electrón alrededor del centro de la circunferencia es de 4.00×10^{-25} kg · m²/s. Determine a) el radio de la trayectoria circular y b) la velocidad del electrón.
- 67. Dos largos alambres rectos se cruzan mutuamente en ángulo recto, como se muestra en la figura P19.67. a) Encuentre

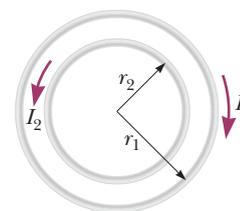


Figura P19.65

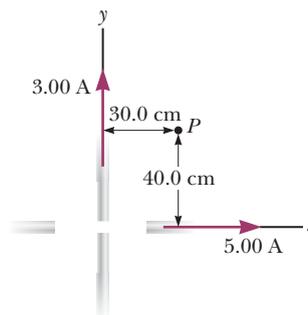


Figura P19.67

la dirección y magnitud del campo magnético en el punto P , que está en el mismo plano que los dos alambres. b) Encuentre el campo magnético en un punto a 30.0 cm arriba del punto de intersección (30.0 cm afuera de la página, hacia usted).

68. Una barra metálica de 0.200 kg, que porta una corriente de 10.0 A, se desliza sobre dos rieles horizontales separados 0.500 m. ¿Qué campo magnético vertical se requiere para mantener la barra en movimiento con velocidad constante, si el coeficiente de fricción cinética entre la barra y los rieles es 0.100?

69. **BIO** Usando un flujómetro electromagnético (figura P19.69), un cirujano del corazón monitorea la tasa de flujo de sangre a través de una arteria. Los electrodos A y B hacen contacto con la superficie exterior del vaso sanguíneo, que tiene diámetro interior de 3.00 mm. a) Para un campo magnético de 0.040 T de magnitud, entre los electrodos aparece una diferencia de potencial de 160 μ V. Calcule la velocidad de la sangre. b) Verifique que el electrodo A es positivo, como se muestra. ¿El signo de la fem depende de si los iones móviles en la sangre tienen carga predominantemente positiva o negativa?

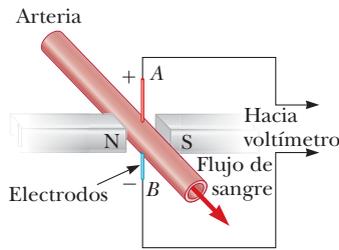


Figura P19.69

70. Un alambre horizontal uniforme, con una densidad de masa lineal de 0.50 g/m, porta una corriente de 2.0 A. Se le coloca en un campo magnético constante con una intensidad de 4.0×10^{-3} T. El campo es horizontal y perpendicular al alambre. Conforme el alambre se mueve hacia arriba, partiendo del reposo, a) ¿cuál es su aceleración y b) cuánto tarda en elevarse 50 cm? Desprecie el campo magnético de la Tierra.

71. Tres conductores paralelos largos portan corrientes de $I = 2.0$ A. La figura P19.71 es una vista transversal de los conductores, donde cada corriente viene desde afuera de la página. Dado que $a = 1.0$ cm, determine la magnitud y dirección del campo magnético en los puntos A , B y C .

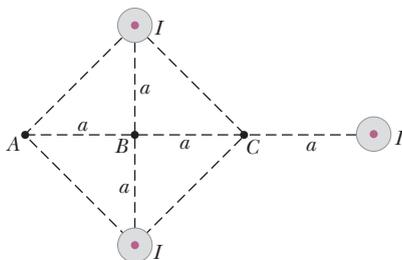


Figura P19.71

72. Dos alambres paralelos largos, cada uno con una masa por unidad de longitud de 40 g/m, se sostienen en un plano horizontal mediante cuerdas de 6.0 cm de largo, como se muestra en la figura P19.72. Cada alambre porta la misma corriente I , lo que hace que los alambres se repelan mutuamente de modo que el ángulo θ entre las cuerdas de soporte es 16° . a) ¿Las corrientes están en direcciones iguales u opuestas? b) Determine la magnitud de cada corriente.

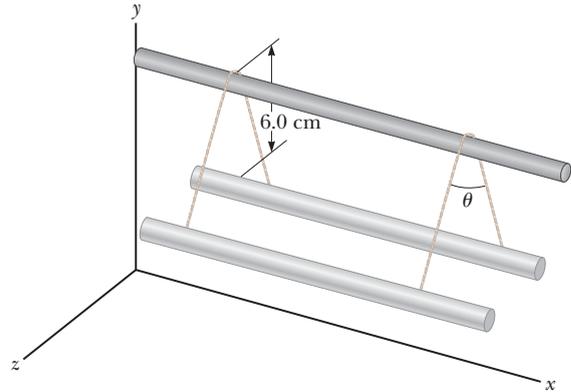


Figura P19.72

73. Protones que tienen una energía cinética de 5.00 MeV se mueven en la dirección x positiva y entran a un campo magnético de 0.050 T en la dirección z , afuera del plano de la página y se extienden desde $x = 0$ hasta $x = 1.00$ m, como en la figura P19.73. a) Calcule el componente y de la cantidad de movimiento de los protones conforme salen del campo magnético. b) Encuentre el ángulo α entre el vector velocidad inicial del haz de protones y el vector velocidad después que el haz sale del campo. (Sugerencia: Ignore efectos relativistas y tenga en cuenta que $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$.)

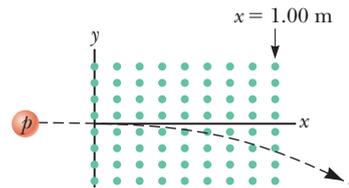


Figura P19.73

74. Un alambre recto, de 10.0 g de masa y 5.0 cm de longitud, está suspendido de dos resortes idénticos que, a su vez, forman un circuito cerrado (figura P19.74). Los resortes se estiran una distancia de 0.50 cm bajo el peso del alambre. El circuito tiene una resistencia total de 12 Ω . Cuando se activa un campo magnético dirigido afuera de la página (que se indica mediante los puntos en la figura), se observa que los resortes se estiran 0.30 cm adicionales. ¿Cuál es la intensidad del campo magnético? (La porción superior del circuito está fija.)

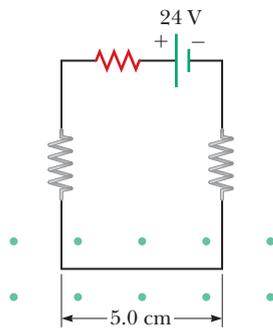


Figura P19.74

75. Una bola de 1.00 kg, que tiene carga neta $Q = 5.00 \mu\text{C}$, se lanza por una ventana horizontalmente, con una velocidad

$v = 20.0 \text{ m/s}$. La ventana está a una altura $h = 20.0 \text{ m}$ sobre el nivel del suelo. Un campo magnético horizontal uniforme de magnitud $B = 0.010 \text{ T}$ es perpendicular al plano de la trayectoria de la bola. Encuentre la magnitud de la fuerza magnética que actúa sobre la bola justo antes de golpear el suelo. *Sugerencia:* Ignore las fuerzas magnéticas al encontrar la velocidad final de la bola.

76. Dos largos conductores paralelos, separados por 10.0 cm, portan corrientes en la misma dirección. El primer alambre porta una corriente $I_1 = 5.00 \text{ A}$, y el segundo porta $I_2 = 8.00 \text{ A}$. a) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético que crea I_1 en la posición de I_2 ? b) ¿Cuál es la fuerza por unidad de longitud que ejerce I_1 sobre I_2 ? c) ¿Cuál es la magnitud del campo magnético que crea I_2 en la posición de I_1 ? d) ¿Cuál es la fuerza por unidad de longitud que ejerce I_2 sobre I_1 ?

Un bosque de luces fluorescentes, no conectados a fuente de poder alguna, encienden mediante inducción electromagnética. Las corrientes variables en las líneas de transmisión sobre ellos crean flujo magnético dependiente del tiempo en la vecindad de los tubos, lo que induce un voltaje a través de ellos.

South West News Service



20

Voltajes inducidos e inductancia

- 20.1 Fem inducida y flujo magnético
- 20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz
- 20.3 Fem de movimiento
- 20.4 Generadores
- 20.5 Autoinductancia
- 20.6 Circuitos RL
- 20.7 Energía almacenada en un campo magnético

En 1819, Hans Christian Oersted descubrió que una corriente eléctrica ejercía una fuerza sobre una brújula. Aunque durante mucho tiempo hubo especulaciones acerca de que tal relación existía, el descubrimiento de Oersted fue la primera evidencia de un vínculo entre electricidad y magnetismo. Puesto que la naturaleza con frecuencia es simétrica, el descubrimiento de que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos condujo a los científicos a sospechar que los campos magnéticos podían producir corrientes eléctricas. De hecho, los experimentos realizados por Michael Faraday en Inglaterra y de manera independiente por Joseph Henry en Estados Unidos en 1831, demostraron que un campo magnético variable podía inducir una corriente eléctrica en un circuito. Los resultados de estos experimentos condujeron a una ley básica e importante conocida como ley de Faraday. En este capítulo se estudian la ley de Faraday y muchas aplicaciones prácticas, una de las cuales es la producción de energía eléctrica en las plantas de generación de electricidad a lo largo del mundo.

20.1 Fem inducida y flujo magnético

Un experimento realizado por primera vez por Faraday demostró que un campo magnético variable puede producir una corriente. El aparato que se muestra en la figura 20.1 consiste en una bobina conectada a un interruptor y una batería. A esta bobina se le llama *bobina primaria* y al circuito correspondiente, circuito primario. La bobina se enrolla en torno a un anillo de hierro para intensificar el campo magnético producido por la corriente en la bobina. Una segunda bobina, llamada *bobina secundaria*, a la derecha, se enrolla en torno al anillo de hierro y se conecta a un amperímetro. El circuito correspondiente se llama circuito secundario. Es importante notar que **no hay batería en el circuito secundario.**

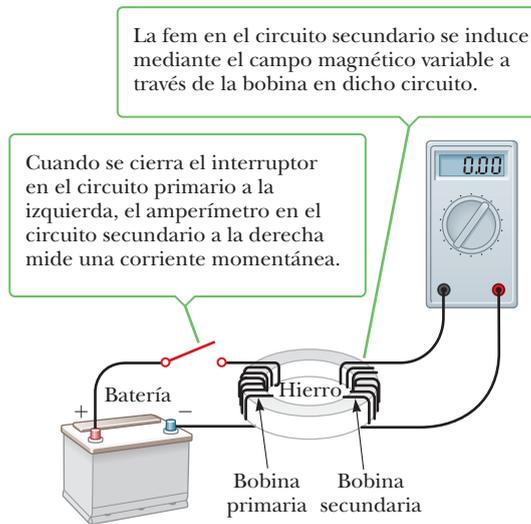


Figura 20.1 Experimento de Faraday.

A primera vista, puede suponer que nunca se detectaría corriente alguna en el circuito secundario. Sin embargo, cuando súbitamente se cierra el interruptor en el circuito primario de la figura 20.1, algo sorprendente sucede: ¡el amperímetro mide una corriente en el circuito secundario y luego regresa a cero! Cuando el interruptor se abre de nuevo, el amperímetro lee una corriente en la dirección opuesta y otra vez regresa a cero. Finalmente, siempre que haya una corriente estable en el circuito primario, el amperímetro lee cero.

A partir de tales observaciones, Faraday concluyó que se podía producir una corriente eléctrica mediante un campo magnético *variable*. (Un campo magnético estacionario no produce una corriente a menos que la bobina se mueva, como se explica más adelante.) La corriente producida en el circuito secundario ocurre sólo durante un instante mientras el campo magnético a través de la bobina secundaria es variable. En efecto, el circuito secundario se comporta como si una fuente de fem se conectara a él durante un corto tiempo. Es obligado decir que **en el circuito secundario un campo magnético variable produce una fem inducida**.

Flujo magnético

Para evaluar cuantitativamente las fem inducidas, es necesario entender qué factores afectan el fenómeno. Aunque los campos magnéticos variables siempre inducen campos eléctricos, en otras situaciones el campo magnético permanece constante, aunque todavía se produce un campo eléctrico inducido. El mejor ejemplo de esto es un generador eléctrico: una espira de conductor que gira en un campo magnético constante produce corriente eléctrica.

La cantidad física asociada con el magnetismo que genera un campo eléctrico es un **flujo magnético variable**. El flujo magnético se define en la misma forma que el flujo eléctrico (sección 15.9) y es proporcional tanto a la intensidad del campo magnético que pasa a través del plano de una espira de alambre, como al área de la espira.

El **flujo magnético** Φ_B a través de una espira de alambre con área A se define mediante

$$\Phi_B \equiv B_{\perp} A = BA \cos \theta \quad [20.1]$$

donde B_{\perp} es la componente de \vec{B} perpendicular al plano de la espira, como en la figura 20.2a, y θ es el ángulo entre \vec{B} y la normal (perpendicular) al plano de la espira.

Unidad SI: weber (Wb)

Observe que siempre hay dos direcciones normales a una superficie plana dada. En la figura 20.2, por ejemplo, que la dirección podría ser elegida para estar a la derecha, lo que resulta en un flujo positivo. La dirección normal también puede ser elegida para apuntar



Con el permiso del Presidente y Consejo de la Real Sociedad

Michael Faraday Físico y químico inglés (1791-1867)

A menudo Faraday es considerado como el mayor científico experimental del siglo XIX. Sus aportaciones al estudio de la electricidad incluyen la invención del motor eléctrico, el generador eléctrico y el transformador, así como el descubrimiento de la inducción electromagnética y las leyes de la electrólisis. Enormemente influido por la religión, rechazó trabajar en gas venenoso militar para el gobierno británico.

◀ Flujo magnético

Figura 20.2 a) Un campo magnético uniforme \vec{B} que forma un ángulo θ con una dirección normal al plano de una espira de alambre de área A . b) Vista lateral del lazo.

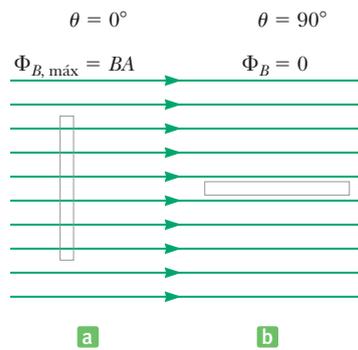
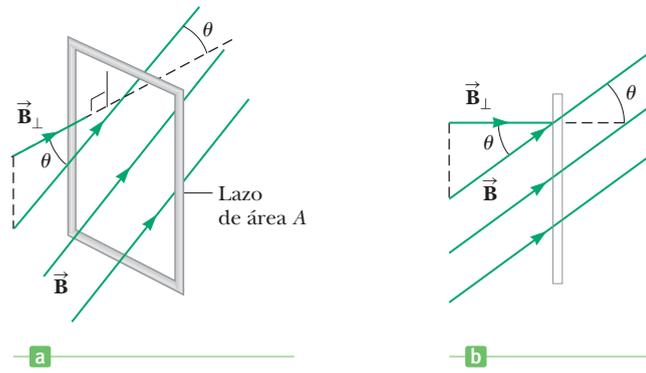


Figura 20.3 Vista lateral de una espira en un campo magnético uniforme. a) Cuando las líneas de campo son perpendiculares al plano de la espira, el flujo magnético a través de la espira es un máximo e igual a $\Phi_B = BA$. b) Cuando las líneas de campo son paralelas al plano de la espira, el flujo magnético a través de la espira es cero.

a la izquierda, lo que resultaría en un flujo negativo de la misma magnitud. La elección de la dirección normal se llama la orientación de la superficie. Una vez elegida en un determinado problema, la dirección normal se mantiene fija. Una buena opción predeterminada es elegir la dirección normal de modo que el ángulo inicial entre el campo magnético y la dirección normal sea menor de 90° .

A partir de la ecuación 20.1, tenemos que $B_\perp = B \cos \theta$. El flujo magnético, en otras palabras, es la magnitud de la parte de \vec{B} , que es perpendicular al plano de la espira por el área de la espira. La figura 20.2b es una vista lateral de la espira y de las líneas de campo magnético que penetran. Cuando el campo es perpendicular al plano de la espira, como en la figura 20.3a, $\theta = 0$ y Φ_B tiene un valor máximo, $\Phi_{B,\text{máx}} = BA$. Cuando el plano de la espira es paralelo a \vec{B} , como en la figura 20.3b, $\theta = 90^\circ$ y $\Phi_B = 0$. El flujo también puede ser negativo. Por ejemplo, cuando $\theta = 180^\circ$, el flujo es igual a $-BA$. Puesto que la unidad SI de B es el tesla o weber por metro cuadrado, la unidad de flujo es $\text{T} \cdot \text{m}^2$, o weber (Wb).

Es posible enfatizar el significado cualitativo de la ecuación 20.1 al dibujar primero las líneas de campo magnético, como en la figura 20.3. El número de líneas por unidad de área aumenta conforme aumenta la intensidad del campo. **El valor del flujo magnético es proporcional al número total de líneas que pasan a través de la espira.** Vemos que pasan más líneas a través de la espira cuando su plano es perpendicular al campo, como en la figura 20.3a, de modo que el flujo tiene su valor máximo en dicha posición. Como muestra la figura 20.3b, ninguna línea pasa a través de la espira cuando su plano es paralelo al campo, de modo que en ese caso $\Phi_B = 0$.

FÍSICA APLICADA 20.1 Comparación de flujo

Argentina tiene más área de terreno ($2.8 \times 10^6 \text{ km}^2$) que Groenlandia ($2.2 \times 10^6 \text{ km}^2$). ¿Por qué el flujo magnético del campo magnético de la Tierra es más grande a través de Groenlandia que a través de Argentina?

EXPLICACIÓN Groenlandia (latitud 60° norte a 80° norte) está más cerca de un polo magnético que Argentina (latitud 20° sur a 50° sur), de modo que el campo magné-

tico es más intenso ahí. Esto en sí mismo no es suficiente para concluir que el flujo magnético es mayor, pero la proximidad de Groenlandia a un polo también significa que el ángulo que las líneas de campo magnético forman con la vertical es menor que en Argentina. Como resultado, más líneas de campo penetran la superficie en Groenlandia, a pesar del área ligeramente mayor de Argentina. ■

EJEMPLO 20.1 Flujo magnético

OBJETIVO Calcular el flujo magnético y un cambio en flujo.

PROBLEMA Una espira circular conductora, de 0.250 m de radio, se coloca en el plano xy en un campo magnético uniforme de 0.360 T que apunta en la dirección z positiva, la misma dirección que la normal al plano. **a)** Calcule el flujo magnético a través de la espira. **b)** Suponga que la espira gira en sentido de las manecillas del reloj alrededor del eje x , de modo que la dirección normal ahora apunta en un ángulo de 45.0° con respecto al eje z . Vuelva a calcular el flujo magnético a través de la espira. **c)** ¿Cuál es el cambio en flujo debido a la rotación de la espira?

ESTRATEGIA Después de encontrar el área, sustituya valores en la ecuación para flujo magnético para cada inciso. Debido a que la dirección normal fue elegida para ser la misma dirección que la del campo magnético, el ángulo entre el campo magnético y la normal es inicialmente 0° . Después de la rotación, se convierte en un ángulo de 45° .

SOLUCIÓN

a) Calcule el flujo magnético inicial a través de la espira.

Primero, calcule el área de la espira:

$$A = \pi r^2 = \pi(0.250 \text{ m})^2 = 0.196 \text{ m}^2$$

Sustituya A , B y $\theta = 0^\circ$ en la ecuación 20.1 para encontrar el flujo magnético inicial:

$$\begin{aligned}\Phi_B &= AB \cos \theta = (0.196 \text{ m}^2)(0.360 \text{ T}) \cos(0^\circ) \\ &= 0.0706 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 0.0706 \text{ Wb}\end{aligned}$$

b) Calcule el flujo magnético a través de la espira después de que gira 45.0° en torno al eje x .

Realice las mismas sustituciones como en el inciso a), excepto que el ángulo entre \vec{B} y la normal ahora es $\theta = 45.0^\circ$:

$$\begin{aligned}\Phi_B &= AB \cos \theta = (0.196 \text{ m}^2)(0.360 \text{ T}) \cos(45.0^\circ) \\ &= 0.0499 \text{ T} \cdot \text{m}^2 = 0.0499 \text{ Wb}\end{aligned}$$

c) Encuentre el cambio en el flujo magnético debido a la rotación de la espira.

Reste el resultado del inciso a) del resultado del inciso b):

$$\Delta \Phi_B = 0.0499 \text{ Wb} - 0.0706 \text{ Wb} = -0.0207 \text{ Wb}$$

COMENTARIOS Observe que la rotación de la espira, es responsable por el cambio en el flujo, no cualquier cambio en el campo magnético. Este flujo magnético variable es esencial en el funcionamiento de los motores y generadores eléctricos.

PREGUNTA 20.1 Verdadero o Falso: Si la espira gira en la dirección opuesta por la misma cantidad, el cambio en flujo magnético tiene la misma magnitud pero signo opuesto.

EJERCICIO 20.1 La espira, que giró 45° , gira en sentido de las manecillas del reloj otros 30° , de modo que la normal al plano apunta en un ángulo de 75° con respecto a la dirección del campo magnético. Encuentre a) el flujo magnético a través de la espira cuando $\theta = 75^\circ$ y b) el cambio en flujo magnético durante la rotación de 45° a 75° .

RESPUESTAS a) 0.0183 Wb b) -0.0316 Wb

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

La utilidad del concepto de flujo magnético se puede hacer obvia mediante otro experimento simple que demuestra la idea básica de la inducción electromagnética. Considere una espira de alambre conectado a un amperímetro, como en la figura activa 20.4, (página 692). Si un imán se mueve hacia la espira, el amperímetro lee una corriente en una dirección, como en la figura activa 20.4a. Cuando el imán se sostiene estacionario, como en la figura activa 20.4b, el amperímetro lee una corriente en la dirección opuesta, como en la figura activa 20.4c. Si el imán se mantiene estacionario y la espira se mueve hacia o desde el imán, el amperímetro también lee una corriente. A partir de estas observaciones, se puede concluir que **en el circuito se establece una corriente en tanto haya un movimiento relativo entre el imán y la espira**. Los mismos resultados experimentales se encuentran si la espira se mueve o si el imán se mueve. A la corriente se le llama **corriente inducida** porque se produce mediante una **fem inducida**.

Este experimento es similar al experimento de Faraday que se estudió en la sección 20.1. En cada caso se induce una fem en un circuito cuando el flujo magnético a través del circuito cambia con el tiempo. Se hace evidente que la fem inducida instantánea en un circuito es igual al negativo de la razón de cambio del flujo magnético con respecto al tiempo a través del circuito. Ésta es la **ley de inducción magnética de Faraday**.

Tip 20.1 La corriente inducida requiere un cambio en flujo magnético

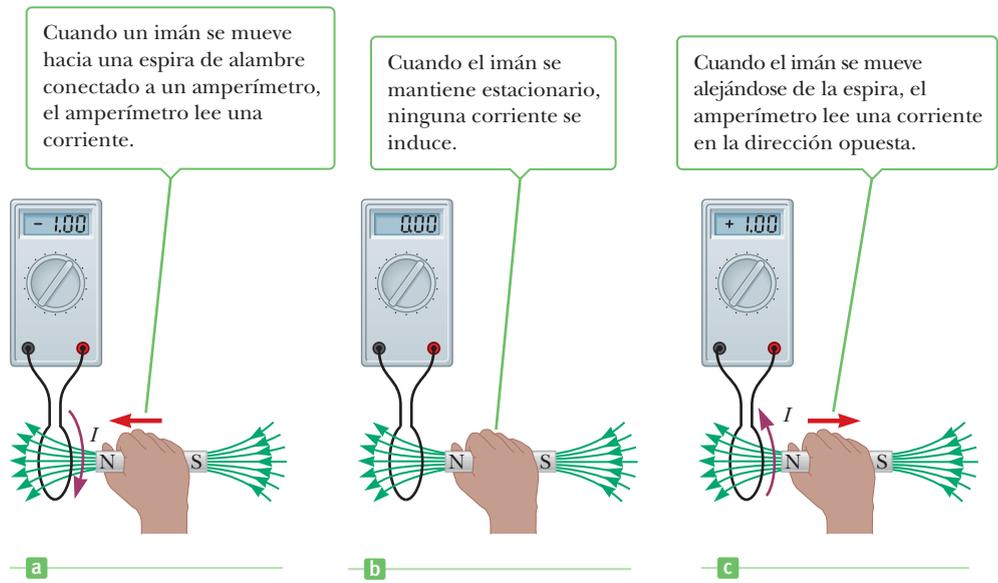
La existencia de flujo magnético a través de un área no es suficiente para crear una fem inducida. Debe ocurrir un *cambio* en el flujo magnético a través de cierto intervalo Δt para inducir una fem.

Figura activa 20.4

Un simple experimento que muestra que se induce una corriente en un circuito cuando el imán se mueve hacia o desde la espira.

Tip 20.2 Hay dos campos magnéticos a considerar

Al aplicar la ley de Lenz se consideran *dos* campos magnéticos. El primero es el campo magnético externo que induce la corriente en el lazo conductor. El segundo es el campo magnético producido por la corriente inducida en el lazo.



Ley de Faraday ▶

Si un circuito contiene N espiras firmemente devanadas y el flujo magnético a través de cada espira cambia por la cantidad $\Delta\Phi_B$ durante el intervalo Δt , la fem inducida promedio en el circuito durante el tiempo Δt es

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} \quad [20.2]$$

Puesto que $\Phi_B = BA \cos \theta$, un cambio de alguno de los factores B , A o θ con el tiempo produce una fem. En las siguientes secciones se explora el efecto de un cambio en cada uno de estos factores. El signo menos en la ecuación 20.2 se incluye para indicar la polaridad de la fem inducida. Esta polaridad determina en cuál de las dos direcciones fluirá la corriente en una espira, una dirección dada por la **ley de Lenz**:

La corriente causada por la fem inducida viaja en la dirección que crea un campo magnético con el flujo que se opone al cambio en el flujo original a través del circuito.

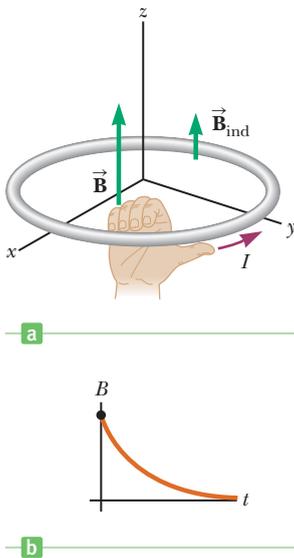


Figura 20.5 a) El campo magnético \vec{B} se vuelve menor con el tiempo, lo que reduce el flujo, de modo que se induce corriente en una dirección que crea un campo magnético inducido \vec{B}_{ind} que se opone al cambio en flujo magnético. b) Gráfica de la magnitud del campo magnético como función del tiempo.

La ley de Lenz dice que si el flujo magnético a través de una espira se hace más positivo, por decir, entonces la fem inducida crea una corriente y campo magnético asociado que produce flujo magnético negativo. Algunos creen que este “contracampo magnético” creado por la corriente inducida, llamado \vec{B}_{ind} (“ind” por inducido), siempre apuntará en una dirección opuesta al campo magnético aplicado \vec{B} , ¡pero que sólo es cierto la mitad del tiempo! La figura 20.5a muestra un campo que penetra una espira. La gráfica en la figura 20.5b muestra que la magnitud del campo magnético \vec{B} se reduce con el tiempo, lo que significa que el flujo de \vec{B} se reduce con el tiempo, de modo que el campo inducido \vec{B}_{ind} en realidad estará en la misma dirección que \vec{B} . En efecto, \vec{B}_{ind} “apuntala” al campo \vec{B} , lo que frena la pérdida de flujo a través de la espira.

La dirección de la corriente en la figura 20.5a se puede determinar mediante la regla de la mano derecha número 2: apunte su pulgar derecho en la dirección que hará que los dedos de su mano derecha se enrollen en la dirección del campo inducido \vec{B}_{ind} . En este caso, dicha dirección es contra las manecillas del reloj; con su pulgar derecho apuntando en la dirección de la corriente, sus dedos se enrollan afuera de la espira y en torno y **arriba a través del interior de la espira**. Recuerde: dentro de la espira es donde es importante que apunte el campo magnético inducido.

■ Examen rápido

20.1 La figura 20.6 es una gráfica de la magnitud B frente al tiempo para un campo magnético que pasa a través de una espira fija y se orienta perpendicular al plano de la espira. Clasifique, de mayor a menor, las magnitudes de la fem que se genera en la espira en los tres instantes que se indican.

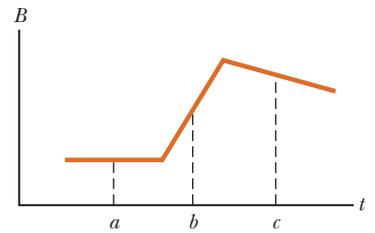


Figura 20.6 (Examen rápido 20.1)

■ EJEMPLO 20.2 Faraday y Lenz al rescate

OBJETIVO Calcular una fem inducida y la corriente con la ley de Faraday y aplicar la ley de Lenz cuando el campo magnético cambia con el tiempo.

PROBLEMA Una bobina con 25 espiras de alambre se enrolla sobre un marco con una sección transversal cuadrada de 1.80 cm de lado. Cada espira tiene la misma área, igual a la del marco y la resistencia total de la bobina es 0.350Ω . Un campo magnético uniforme aplicado es perpendicular al plano de la bobina, como en la figura 20.7. a) Si el campo cambia de manera uniforme desde 0.00 T hasta 0.500 T en 0.800 s, ¿cuál es la fem inducida en la bobina mientras cambia en campo? Encuentre b) la magnitud y c) la dirección de la corriente inducida en la bobina mientras cambia el campo.

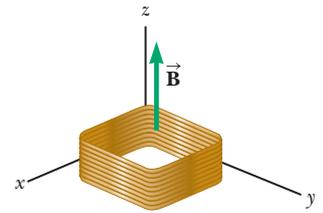


Figura 20.7 (Ejemplo 20.2)

ESTRATEGIA El inciso a) requiere la sustitución en la ley de Faraday, ecuación 20.2. Se proporciona la información necesaria, excepto $\Delta\Phi_B$, el cambio en el flujo magnético durante el tiempo transcurrido. Utilice la dirección normal para coincidir con el eje z positivo, calcule los flujos magnéticos inicial y final con la ecuación 20.1, encuentre la diferencia y junte todos los términos en la ley de Faraday. Entonces, la corriente se puede encontrar con la ley de Ohm y su dirección con la ley de Lenz.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fem inducida en la bobina.

Para calcular el flujo, usted necesita el área de la bobina:

$$A = L^2 = (0.0180 \text{ m})^2 = 3.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

El flujo magnético $\Phi_{B,i}$ a través de la bobina en $t = 0$ es cero porque $B = 0$. Calcule el flujo en $t = 0.800$ s:

$$\Phi_{B,f} = BA \cos \theta = (0.500 \text{ T})(3.24 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \cos (0^\circ) = 1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Calcule el cambio en el flujo magnético a través de la sección transversal de la bobina durante el intervalo de 0.800 s:

$$\Delta\Phi_B = \Phi_{B,f} - \Phi_{B,i} = 1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Sustituya en la ley de inducción de Faraday para encontrar la fem inducida en la bobina:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = -(25 \text{ vueltas}) \left(\frac{1.62 \times 10^{-4} \text{ Wb}}{0.800 \text{ s}} \right) = -5.06 \times 10^{-3} \text{ V}$$

b) Encuentre la magnitud de la corriente inducida en la bobina.

Sustituya la diferencia de voltaje y la resistencia en la ley de Ohm, donde $\Delta V = \mathcal{E}$:

$$I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{5.06 \times 10^{-3} \text{ V}}{0.350 \Omega} = 1.45 \times 10^{-2} \text{ A}$$

c) Encuentre la dirección de la corriente inducida en la bobina.

El campo magnético aumenta a través de la espira, en la misma dirección que la normal al plano; por lo tanto, el flujo es positivo y también aumenta. Un campo magnético inducido que apunta hacia abajo creará flujo negativo, que se opone al cambio. Si apunta su pulgar derecho en la dirección

de las manecillas del reloj a lo largo de la espira, sus dedos se enrollan a través de la espira, que es la dirección correcta para el contracampo magnético. En consecuencia, la corriente debe proceder en una dirección en sentido de las manecillas del reloj.

COMENTARIOS La ley de Lenz se puede manejar mejor al bosquejar primero un diagrama.

PREGUNTA 20.2 ¿Qué fem promedio se induce en la espira si, en vez de ello, el campo magnético cambia uniformemente desde 0.500 T hasta 0? ¿Cómo afectaría esto la corriente inducida?

(continúa)

EJERCICIO 20.2 Suponga que el campo magnético cambia uniformemente desde 0.500 T hasta 0.200 T en los siguientes 0.600 s. Calcule a) la fem inducida en la bobina y b) la magnitud y dirección de la corriente inducida.

RESPUESTAS a) 4.05×10^{-3} V b) 1.16×10^{-2} A, contra las manecillas del reloj

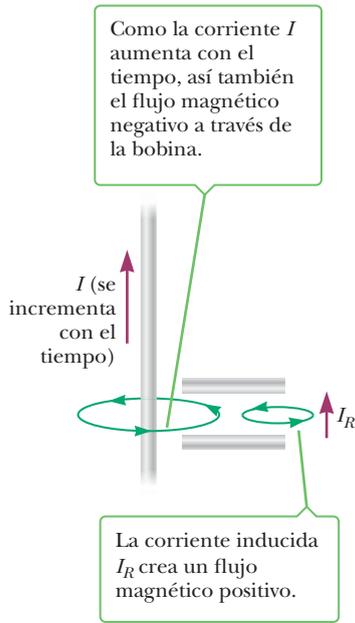


Figura 20.8 (Ejemplo 1 de la ley de Lenz) La corriente I aumenta en magnitud con el tiempo, fortaleciendo el campo magnético que circula alrededor del cable.

Encontrar la dirección de la corriente inducida

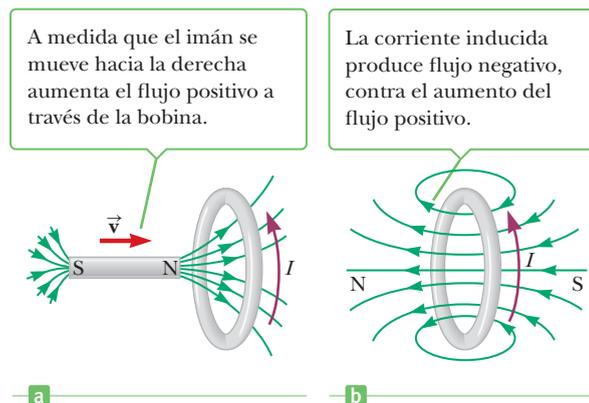
Encontrar la dirección de la corriente inducida puede ser complicado. Los siguientes tres ejemplos ilustran cómo se encuentra la dirección utilizando la ley de Lenz.

Ejemplo 1 de la ley de Lenz La corriente en el cable de la figura 20.8 es cada vez mayor en la dirección indicada. Vamos a escoger la dirección normal hacia afuera de la página para que los vectores de campo magnético que salen de la página produzcan un flujo magnético positivo. El campo magnético creado por la corriente I que circula por el alambre, entra en la página por el lado derecho del cable largo en la región de la bobina rectangular y sale de la página por el lado izquierdo del alambre recto largo. Por lo tanto, el flujo magnético a través de la bobina rectangular debido a la corriente I es negativo. A causa de que la corriente aumenta hacia arriba de la página, el campo magnético es cada vez más fuerte, incrementando la magnitud del flujo negativo a través de la bobina rectangular. Por la ley de Lenz, la corriente inducida en la bobina produce flujo positivo, contra el aumento del flujo negativo. Se requiere un campo magnético inducido apuntando hacia afuera de la página a través de la bobina. Mentalmente enrolle los dedos de la mano derecha alrededor de la rama derecha de la bobina rectangular, y observe que los dedos apuntan hacia arriba de la página a través de la bobina, como se requiere. El pulgar derecho, por su parte, señala la página, indicando la dirección de la corriente en esa parte de la bobina. Por lo tanto, la corriente inducida en la bobina está en sentido contrario.

Ejemplo 2 de la ley de Lenz En la figura 20.9a, el polo norte del imán se mueve hacia la bobina. Si la dirección normal se elige a la derecha, entonces el flujo magnético es a través de la bobina, debido a que el imán es positivo y aumenta con el tiempo. Un flujo negativo a la izquierda, por lo tanto, debe ser creado por la corriente inducida en la bobina, por lo que el campo magnético inducido también debe apuntar a la izquierda como se indica en la figura 20.9b. Imagine que enrolla los dedos de la mano derecha alrededor de la bobina para que apunten a través de ésta a la izquierda. El pulgar derecho apunta hacia arriba, lo que indica que la corriente inducida es contraria al giro de las manecillas del reloj, vista desde el extremo izquierdo de la espira.

Ejemplo 3 de la ley de Lenz Considere la posibilidad de una bobina de alambre colocada cerca de un solenoide en la figura 20.10a. El cable se enrolla de tal manera como para crear un polo sur magnético en el extremo derecho cuando el interruptor se cierra en la figura 20.10b. Elija la dirección normal a la izquierda. Cuando el interruptor está cerrado, la corriente en el solenoide comienza a aumentar y el flujo magnético a través de la bobina es positivo y creciente con el tiempo. Por lo tanto, la corriente inducida en la

Figura 20.9 (Ejemplo 2 de la ley de Lenz) a) El polo norte del imán se acerca a la bobina de la izquierda, con la dirección normal hacia la derecha. b) Se induce una corriente en la bobina.



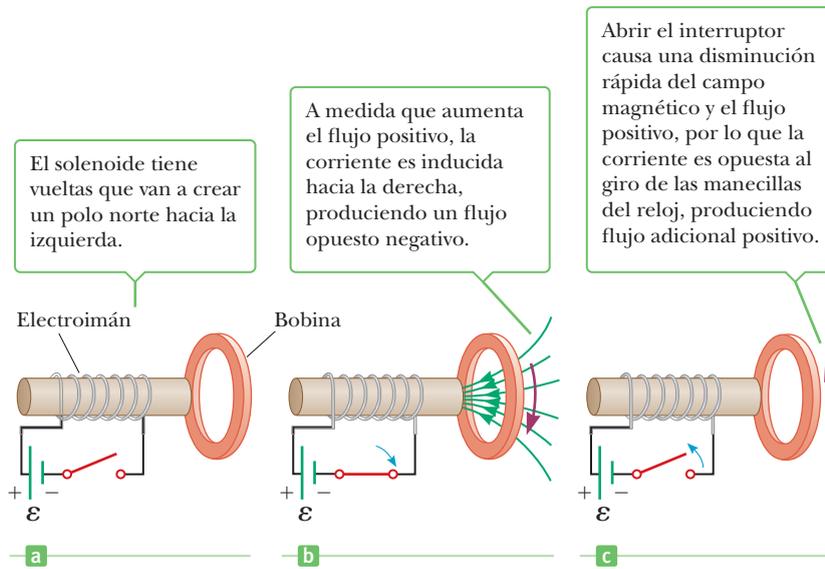


Figura 20.10 (Ejemplo 3 de la ley de Lenz) a) Las vueltas del solenoide crean un campo magnético con el polo norte apuntando a la izquierda, que también se toma como la dirección normal. b) Cuando el interruptor está cerrado, el flujo positivo comienza a incrementarse a través de la bobina y las líneas de campo convergen en el polo sur del solenoide. c) Abrir el interruptor causa que el campo del solenoide disminuya rápidamente.

bobina debe crear flujo magnético negativo para contrarrestar el aumento del flujo positivo creado por la corriente en el solenoide. Esto requiere un campo magnético inducido dirigido hacia la derecha a través de la bobina. Gire la mano derecha para que el pulgar apunte hacia abajo, así los dedos se pueden enroscar alrededor de la bobina y hacia la derecha. La corriente inducida en la bobina sigue la dirección del pulgar derecho, que es horario visto desde el extremo izquierdo de la bobina. Cuando el interruptor se abre de nuevo en la figura 20.10c la corriente en el solenoide cambia de dirección, porque el campo magnético y el flujo positivo comienzan a disminuir. En sentido contrario a las manecillas del reloj, la corriente inducida crea flujo positivo a través de la bobina, opuesto a la disminución del flujo positivo.

En estos tres ejemplos, la idea fundamental es que un flujo cambiante provoca una corriente inducida, y el correspondiente campo magnético inducido produce flujo opuesto al cambio en el flujo de acuerdo con la ley de Lenz. Cuando el flujo deja de cambiar, se detiene la corriente inducida. Aunque en cada caso el flujo magnético cambia a causa de un campo magnético variable, las corrientes inducidas pueden resultar incluso cuando el campo magnético es constante, siempre que el flujo cambie a través de las espiras. Este hecho se pondrá de manifiesto cuando se hable de fem de movimiento en la sección 20.3 y generadores en la sección 20.4.

■ Examen rápido

20.2 Un imán de barra cae hacia el centro de una espira de alambre, con el polo norte orientado hacia abajo. Visto desde el mismo lado de la espira que el imán, conforme el polo norte se aproxima a la espira, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida? a) en sentido de las manecillas del reloj, b) cero, c) contra las manecillas del reloj, d) a lo largo de la longitud del imán.

20.3 Dos espiras circulares están lado a lado y yacen en el plano xy . Se cierra un interruptor y comienza una corriente contra las manecillas del reloj en la espira izquierda, visto desde un punto en el eje z positivo que pasa a través del centro de la espira. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto para la espira a la derecha? a) La corriente sigue siendo cero. b) Una corriente inducida se mueve contra las manecillas del reloj. c) Una corriente inducida se mueve en sentido de las manecillas del reloj.

El interruptor de fallo a tierra (GFI) es un interesante dispositivo de seguridad que protege a las personas contra choque eléctrico cuando tocan electrodomésticos y herramientas eléctricas. Su operación utiliza la ley de Faraday. La figura 20.11 muestra las partes esenciales de un interruptor de fallo a tierra. El alambre 1 va del tomacorriente en la pared al aparato a proteger y el alambre 2 va de regreso del aparato al tomacorriente en la pared. Un

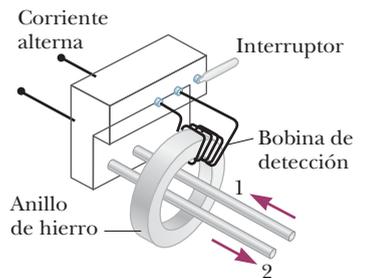


Figura 20.11 Componentes esenciales de un interruptor de fallo a tierra (contenido de la caja gris en la figura 20.12a, página 696). En las casas más recientes, tales dispositivos se construyen directamente en los tomacorrientes de pared. El propósito de la bobina de detección y del interruptor es cortar la corriente antes de que se genere daño.

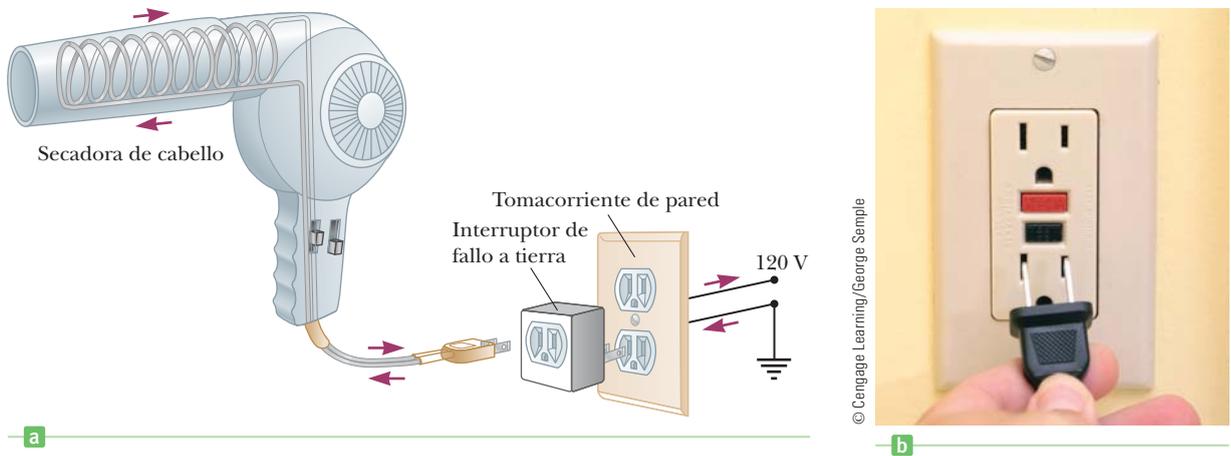


Figura 20.12 a) Esta secadora de cabello se conectó en un interruptor de fallo a tierra que a su vez se conecta en un tomacorriente sin protección. b) Probablemente has visto este tipo de interruptor de fallo a tierra en el baño de un hotel, donde los huéspedes con frecuencia usan las secadoras de cabello y las rasuradoras eléctricas justo afuera de la ducha o tocando una tubería de agua, lo que proporciona una vía fácil a tierra en el evento de un cortocircuito.

APLICACIÓN

Interruptores de fallo a tierra

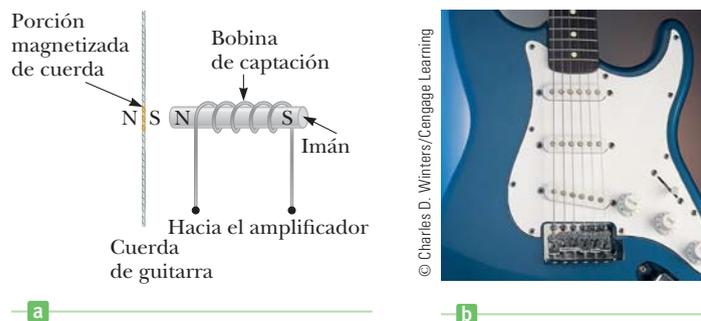
anillo de hierro rodea los dos alambres para confinar el campo magnético que establece cada alambre. Una bobina de detección, que puede activar un interruptor cuando ocurre un cambio en flujo magnético, se enrolla en torno a una parte del anillo de hierro. Puesto que las corrientes en los alambres están en direcciones opuestas, el campo magnético neto a través de la bobina de detección debido a las corrientes es cero. Sin embargo, si ocurre un cortocircuito en el aparato, de modo que no hay corriente de retorno, el campo magnético neto a través de la bobina de detección ya no es cero. Un cortocircuito puede ocurrir si, por ejemplo, uno de los alambres pierde su aislamiento, lo que proporciona una ruta a través de usted hacia tierra si sucede que toca el aparato y usted está aterrizado como en la figura 18.23a. Puesto que la corriente es alterna, el flujo magnético a través de la bobina de detección cambia con el tiempo, lo que produce un voltaje inducido en la bobina. Este voltaje inducido se usa para disparar un interruptor, lo que detiene la corriente muy rápido (en aproximadamente 1 ms) antes de llegar a un nivel que puede ser dañino para la persona que usa el aparato. Un interruptor de fallo a tierra proporciona protección más rápida y más completa incluso que la combinación de toma de tierra y el interruptor que se muestra en la figura 18.23b. Por esta razón, los interruptores de fallo a tierra por lo general se encuentran en baños, donde la electricidad plantea un riesgo para las personas. (Véase la figura 20.12.)

APLICACIÓN

Bobinas de captación de guitarra eléctrica

Otra interesante aplicación de la ley de Faraday es la producción de sonido en una guitarra eléctrica. Una cuerda que vibra induce un fem en una bobina (figura 20.13). La bobina de captación se coloca cerca a una cuerda de guitarra en vibración, que está hecha de un metal que se puede magnetizar. El imán permanente dentro de la bobina magnetiza la porción de la cuerda más cercana a la bobina. Cuando la cuerda de la guitarra vibra a cierta frecuencia, su segmento magnetizado produce un flujo magnético variable a través de la bobina de captación. El flujo variable induce un voltaje en la bobina; el voltaje se alimenta a un amplificador. La salida del amplificador se envía a las bocinas, lo que produce las ondas sonoras que usted escucha.

Figura 20.13 a) En una guitarra eléctrica, la cuerda que vibra induce un voltaje en la bobina de captación. b) Muchas captoras permiten que la vibración se detecte desde diferentes porciones de la cuerda.



Cortesía de PeaLink Pediatric Healthcare Resources, Newport Beach, CA



Figura 20.14 Este bebé viste un monitor diseñado para alertar a los cuidadores si la respiración se detiene. Observe los dos alambres unidos a lados opuestos del pecho.

El síndrome de muerte súbita del lactante, o SMSL, es una afección devastadora en la que un bebé súbitamente deja de respirar durante el sueño sin una causa aparente. En ocasiones se utiliza un tipo de dispositivo de monitoreo, llamado monitor de apnea, que alerta a los cuidadores del cese de la respiración. El dispositivo usa corrientes inducidas, como se muestra en la figura 20.14. Una bobina de alambre unida a un lado del pecho porta una corriente alterna. El flujo magnético variable producido por esta corriente pasa a través de una bobina de captación unida al lado opuesto del pecho. La expansión y contracción del pecho provocada por la respiración o el movimiento cambian la intensidad del voltaje inducido en la bobina de captación. Sin embargo, si la respiración se detiene, el patrón del voltaje inducido se estabiliza y circuitos externos que monitorean el voltaje activan una alarma para que el cuidador, después de una pausa momentánea, se asegure de que en realidad existe un problema.

BIO APLICACIÓN

Monitores de apnea

20.3 Fem de movimiento

En la sección 20.2 se consideran fem inducidas en un circuito cuando el campo magnético cambia con el tiempo. En esta sección se describe una aplicación particular de la ley de Faraday en la que se produce una llamada **fem de movimiento**. Es la fem inducida en un conductor que se mueve a través de un campo magnético.

Considere primero un conductor recto de longitud ℓ que se mueve con velocidad constante a través de un campo magnético uniforme que se dirige hacia el papel, como en la figura 20.15. Por simplicidad, suponga que el conductor se mueve en una dirección perpendicular al campo. Una fuerza magnética de magnitud $F_m = qvB$, que se dirige hacia abajo, actúa sobre los electrones en el conductor. Debido a esta fuerza magnética, los electrones libres se mueven hacia el extremo más bajo del conductor y se acumulan ahí, lo que deja una carga positiva neta en el extremo superior. Como resultado de esta separación de carga, en el conductor se produce un campo eléctrico. La carga en los extremos se acumula hasta que la fuerza magnética descendente qvB se equilibra mediante la fuerza eléctrica hacia arriba qE . En este punto, la carga deja de fluir y la condición para el equilibrio requiere que

$$qE = qvB \quad \text{o} \quad E = vB$$

Puesto que el campo eléctrico es uniforme, el campo producido en el conductor se relaciona con la diferencia de potencial a través de los extremos mediante $\Delta V = E\ell$, lo que produce

$$\Delta V = E\ell = B\ell v$$

[20.3]

Dado que existe un exceso de carga positiva en el extremo superior del conductor y un exceso de carga negativa en el extremo inferior, el extremo superior está a un potencial más alto que el extremo inferior. A través de un conductor existe una diferencia de potencial en tanto se mueve a través de un campo. Si el movimiento se invierte, la polaridad de la diferencia de potencial también se invierte.

Una situación más interesante ocurre si el conductor en movimiento es parte de una trayectoria conductora cerrada. Esta situación es particularmente útil para ilustrar cómo

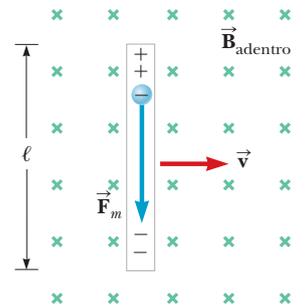


Figura 20.15 Conductor recto de longitud ℓ que se mueve con velocidad \vec{v} a través de un campo magnético uniforme \vec{B} perpendicular a \vec{v} . El vector \vec{F}_m es la fuerza magnética sobre un electrón en el conductor. Entre las terminales de la barra se induce una fem de $B\ell v$.

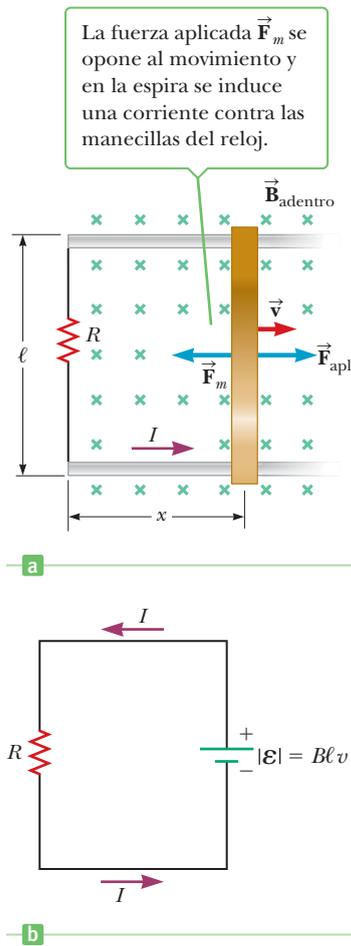
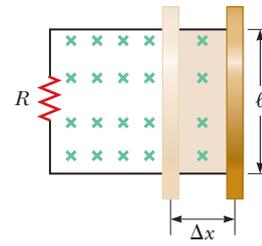


Figura 20.17 Conforme la barra se mueve hacia la derecha, el área que recorre la espira aumenta por la cantidad $\ell\Delta x$ y el flujo magnético a través de la espira aumenta por $B\ell\Delta x$.



el área variable que recorre una espira induce una corriente en un circuito cerrado, lo que se describe mediante la ley de Faraday. Considere un circuito que consiste en una barra conductora de longitud ℓ , que se desliza a lo largo de dos rieles conductores paralelos fijos, como en la figura activa 20.16a. Por simplicidad, suponga que la barra en movimiento tiene resistencia cero y la parte estacionaria del circuito tiene resistencia constante R . Un campo magnético uniforme y constante \vec{B} se aplica perpendicular al plano del circuito. Conforme la barra se jala hacia la derecha con velocidad \vec{v} bajo la influencia de una fuerza aplicada \vec{F}_{apl} , una fuerza magnética a lo largo de la longitud de la barra actúa sobre las cargas libres en la barra. Esta fuerza a su vez establece una corriente inducida porque las cargas tienen libertad para moverse en una trayectoria conductora cerrada. En este caso, el flujo magnético variable a través de la espira y la correspondiente fem inducida a través de la barra en movimiento surge del cambio en el área que recorre la espira conforme la barra se mueve a través del campo magnético. Debido a que el flujo dentro de la página aumenta, por la ley de Lenz, la corriente circula inducida en sentido contrario, produciendo el flujo que sale de la página que se opone al cambio.

Suponga que la barra se mueve una distancia Δx en el tiempo Δt , como se muestra en la figura 20.17. El aumento en flujo $\Delta\Phi_B$ a través de la espira en dicho tiempo es la cantidad de flujo que ahora pasa a través de la porción del circuito que tiene área $\ell \Delta x$:

$$\Delta\Phi_B = BA = B\ell \Delta x$$

Con la ley de Faraday, y al notar que existe una espira ($N = 1$), encontramos que la magnitud de la fem inducida es

$$|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = B\ell \frac{\Delta x}{\Delta t} = B\ell v \quad [20.4]$$

Esta fem inducida con frecuencia se llama **fem de movimiento** porque surge del movimiento de un conductor a través de un campo magnético.

Más aún, si la resistencia del circuito es R , la magnitud de la corriente inducida en el circuito es

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{B\ell v}{R} \quad [20.5]$$

La figura activa 20.16b muestra el diagrama de circuito equivalente para este ejemplo.

Figura activa 20.16 a) Barra conductora deslizando con velocidad \vec{v} a lo largo de dos rieles conductores bajo la acción de una fuerza aplicada \vec{F}_{apl} b) Circuito equivalente al de a).

FÍSICA APLICADA 20.2 **Catapulta espacial**

Aplicar una fuerza sobre la barra resultará en una fem inducida en el circuito que se muestra en la figura activa 20.16. Suponga que se remueve el campo magnético externo en el diagrama y el resistor se sustituye con una fuente de alto voltaje y un interruptor, como en la figura activa 20.18. ¿Qué sucederá cuando el interruptor se cierre? ¿La barra se moverá, e importa de qué forma se conecte la fuente de alto voltaje?

EXPLICACIÓN Suponga que la fuente es capaz de establecer alta corriente. Entonces las dos barras conductoras horizontales crearán un fuerte campo magnético en el área entre ellas, dirigido hacia la página. (La barra móvil también crea un campo magnético, pero este campo no puede

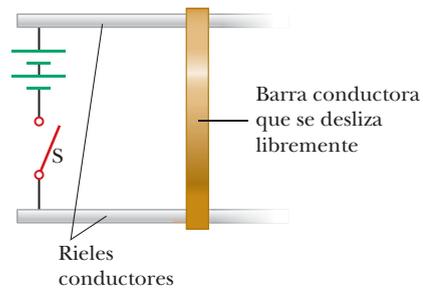


Figura 20.18 (Física aplicada 20.2)

ejercer fuerza sobre la barra.) Puesto que la barra en movimiento porta una corriente hacia abajo, sobre la barra se ejerce una fuerza magnética, dirigida hacia la derecha. Por lo tanto, la barra acelera a lo largo de los rieles alejándose de la fuente de poder. Si la polaridad de la potencia se invirtiera, el campo magnético estaría afuera de la página, la corriente en la barra sería hacia arriba y la fuerza sobre la barra todavía se dirigiría hacia la derecha. La fuerza $B\ell$ que ejerce un campo magnético de acuerdo con la ecuación 19.6 hace que la barra acelere alejándose de la fuente de voltaje. Algunos estudios mostraron que es posible lanzar cargas al espacio con esta tecnología. (Éste es el principio

operativo de un cañón de riel.) Con la tecnología actual se pueden obtener aceleraciones muy grandes, con cargas que se aceleran a una velocidad de muchos kilómetros por segundo en una fracción de segundo. Esta aceleración es más grande de la que pueden tolerar los humanos.

Los cañones de riel se han propuesto como sistemas de propulsión para mover asteroides hacia órbitas más útiles. El material del asteroide se podría minar y lanzarse de la superficie mediante un cañón de riel, que actuaría como un motor de cohete, lo que modificaría la velocidad y en consecuencia la órbita del asteroide. Algunos asteroides contienen billones de dólares en metales valiosos. ■

■ Examen rápido

20.4 Una barra metálica horizontal orientada de este a oeste se suelta recto hacia abajo en una ubicación donde el campo magnético de la Tierra es hacia el norte. Como resultado, entre los extremos se genera una fem. ¿Cuál extremo tiene carga positiva? a) el extremo este, b) el extremo oeste, c) ningún extremo porta carga.

20.5 Su intención es mover una espira rectangular de alambre en una región de campo magnético uniforme con una velocidad dada de modo que induzca una fem en la espira. El plano de la espira debe permanecer perpendicular a las líneas de campo magnético. ¿En qué orientación debe sostener la espira mientras lo mueve en la región con el campo magnético para generar la fem más grande? a) con la dimensión larga de la espira paralela al vector velocidad, b) con la dimensión corta de la espira paralela al vector velocidad, c) de cualquier forma, porque la fem es la misma sin importar la orientación.

■ EJEMPLO 20.3 Una diferencia de potencial inducida a través de las alas de un avión

OBJETIVO Encontrar la fem inducida por el movimiento a través de un campo magnético.

PROBLEMA Un avión con una envergadura de 30.0 m vuela hacia el norte en una ubicación donde la componente descendente del campo magnético de la Tierra es 0.600×10^{-4} T. También existe una componente que apunta hacia el norte que tiene una magnitud de 0.470×10^{-4} T. **a)** Encuentre la diferencia en potencial entre las puntas de las alas cuando la velocidad del avión es 2.50×10^2 m/s. **b)** ¿Cuál punta de ala es positiva?

ESTRATEGIA Puesto que el avión vuela hacia la norte, la componente hacia el norte del campo magnético no tendrá efecto alguno sobre la fem inducida. La fem inducida a través del ala es producto exclusivo del componente descendente del campo magnético de la Tierra. Sustituya las cantidades dadas en la ecuación 20.4. Use la regla de la mano derecha número 1 para encontrar la dirección en que la fuerza magnética impulsaría las cargas positivas.

SOLUCIÓN

a) Calcule la diferencia en potencial a través de las puntas de las alas.

Escriba la ecuación de fem de movimiento y sustituya las cantidades dadas:

b) ¿Cuál punta de ala es positiva?

Aplique la regla de la mano derecha número 1:

$$\begin{aligned}\mathcal{E} &= B\ell v = (0.600 \times 10^{-4} \text{ T})(30.0 \text{ m})(2.50 \times 10^2 \text{ m/s}) \\ &= 0.450 \text{ V}\end{aligned}$$

Apunte los dedos de su mano derecha al norte, en la dirección de la velocidad, y enróllelos hacia abajo, en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta al oeste. Por lo tanto, la punta del ala oeste es positiva.

COMENTARIOS Una fem inducida como ésta puede causar problemas en una aeronave.

PREGUNTA 20.3 ¿En qué direcciones se ejercen fuerzas magnéticas sobre electrones en el avión metálico si vuela hacia el oeste? a) norte b) sur c) este d) oeste e) arriba f) abajo

(continúa)

EJERCICIO 20.3 Suponga que el campo magnético en una región dada del espacio es paralelo a la superficie de la Tierra, apunta al norte y tiene 1.80×10^{-4} T de magnitud. Un cable metálico unido a una estación espacial se estira radialmente hacia afuera 2.50 km. a) Estime la diferencia de potencial que se desarrolla entre los extremos del cable si viaja hacia el este alrededor de la Tierra a 7.70×10^3 m/s. b) ¿Cuál extremo del cable es positivo, el extremo inferior o el extremo superior?

RESPUESTAS a) 3.47×10^3 V b) El extremo superior es positivo.

■ EJEMPLO 20.4 ¿Dónde está la fuente de energía?

OBJETIVO Usar fem de movimiento para encontrar una fem inducida y una corriente.

PROBLEMA a) La barra deslizante en la figura activa 20.16a tiene una longitud de 0.500 m y se mueve a 2.00 m/s en un campo magnético de 0.250 T de magnitud. Con el concepto de fem de movimiento, encuentre el voltaje inducido en la barra en movimiento. b) Si la resistencia en el circuito es 0.500Ω , encuentre la corriente en el circuito y la potencia entregada al resistor. (*Nota:* En este caso la corriente va contra las manecillas del reloj alrededor de la espira.) c) Calcule la fuerza magnética sobre la barra. d) Use los conceptos de trabajo y potencia para calcular la fuerza aplicada.

ESTRATEGIA Para el inciso a), sustituya en la ecuación 20.4 para la fem de movimiento. Una vez que encuentre la fem, la sustitución en la ley de Ohm produce la corriente. En el inciso c), use la ecuación 19.6 para la fuerza magnética sobre un conductor portador de corriente. En el inciso d), use el hecho de que la potencia disipada por el resistor, multiplicada por el tiempo transcurrido, debe ser igual al trabajo realizado por la fuerza aplicada.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fem inducida con el concepto de fem de movimiento.

Sustituya en la ecuación 20.4 para encontrar la fem inducida:

$$\mathcal{E} = Blv = (0.250 \text{ T})(0.500 \text{ m})(2.00 \text{ m/s}) = 0.250 \text{ V}$$

b) Encuentre la corriente inducida en el circuito y la potencia disipada por el resistor.

Sustituya la fem y la resistencia en la ley de Ohm para encontrar la corriente inducida:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0.250 \text{ V}}{0.500 \Omega} = 0.500 \text{ A}$$

Sustituya $I = 0.500$ A y $\mathcal{E} = 0.250$ V en la ecuación 17.8 para encontrar la potencia disipada por el resistor de 0.500Ω :

$$P = I\Delta V = (0.500 \text{ A})(0.250 \text{ V}) = 0.125 \text{ W}$$

c) Calcule la magnitud y dirección de la fuerza magnética sobre la barra.

Sustituya valores para I , B y ℓ en la ecuación 19.6, con $\sin \theta = \sin(90^\circ) = 1$, para encontrar la magnitud de la fuerza:

$$F_m = IB\ell = (0.500 \text{ A})(0.250 \text{ T})(0.500 \text{ m}) = 6.25 \times 10^{-2} \text{ N}$$

Aplique la regla de la mano derecha número 2 para encontrar la dirección de la fuerza:

Apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la corriente positiva, luego enróllelos en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta en la dirección x negativa.

d) Encuentre el valor de F_{apl} , la fuerza aplicada.

Igualé el trabajo realizado por la fuerza aplicada con la potencia disipada por el tiempo transcurrido:

$$W_{\text{apl}} = F_{\text{apl}}d = P\Delta t$$

Resuelva para F_{apl} y sustituya $d = v\Delta t$:

$$F_{\text{apl}} = \frac{P\Delta t}{d} = \frac{P\Delta t}{v\Delta t} = \frac{P}{v} = \frac{0.125 \text{ W}}{2.00 \text{ m/s}} = 6.25 \times 10^{-2} \text{ N}$$

COMENTARIOS El inciso d) podría resolverse con la segunda ley de Newton para un objeto en equilibrio: dos fuerzas actúan horizontalmente sobre la barra y la aceleración de la barra es cero, así que las fuerzas deben ser iguales en magnitud y opuestas en dirección. Observe la concordancia entre las respuestas para F_m y F_{apl} , a pesar de la diferencia entre los conceptos usados.

PREGUNTA 20.4 Suponga que se remueven la fuerza aplicada y el campo magnético en la figura 20.16a, pero una batería crea una corriente en la misma dirección que se indica. ¿Qué ocurre con la barra?

EJERCICIO 20.4 Suponga que la corriente súbitamente aumenta a 1.25 A en la misma dirección que antes debido a un aumento en la velocidad de la barra. Encuentre a) la fem inducida en la barra y b) la nueva velocidad de la barra.

RESPUESTAS a) 0.625 V b) 5.00 m/s

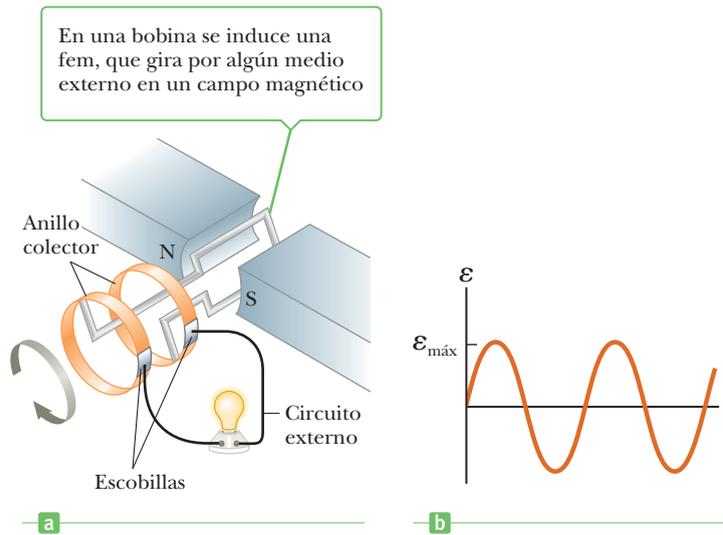


Figura activa 20.19

a) Diagrama esquemático de un generador CA. En una bobina se induce una fem, que gira por algún medio externo en un campo magnético. b) Gráfica de la fem alterna inducida en la espira frente al tiempo.

20.4 Generadores

Los generadores y motores son importantes dispositivos prácticos que operan bajo el principio de inducción electromagnética. Primero, considere al **generador de corriente alterna (CA)**, un dispositivo que convierte energía mecánica a energía eléctrica. En su forma más simple, el generador CA consiste en una espira de alambre que gira en un campo magnético activado por algún medio externo (figura activa 20.19a). En las plantas de electricidad comerciales, la energía requerida para girar la espira se puede derivar de varias fuentes. En una planta hidroeléctrica, por ejemplo, el agua que cae y se dirige contra las aspas de una turbina produce el movimiento giratorio; en una planta impulsada por carbón, el calor que se produce por la quema del carbón se usa para convertir agua en vapor y este vapor se dirige contra las aspas de la turbina. Conforme la espira gira, el flujo magnético a través de ella cambia con el tiempo, lo que induce una fem y una corriente en un circuito externo. Los extremos de la espira se conectan a anillos colectores que giran con la espira. Las conexiones con el circuito externo se hacen mediante escobillas estacionarias en contacto con los anillos colectores.

Se puede deducir una expresión para la fem generada en la espira giratoria al usar la ecuación para fem de movimiento, $\mathcal{E} = B\ell v$. La figura 20.20a muestra una espira de alambre que gira en sentido de las manecillas del reloj en un campo magnético uniforme que se dirige hacia la derecha. La fuerza magnética (qvB) sobre las cargas en los alambres

APLICACIÓN

Generadores de corriente alterna

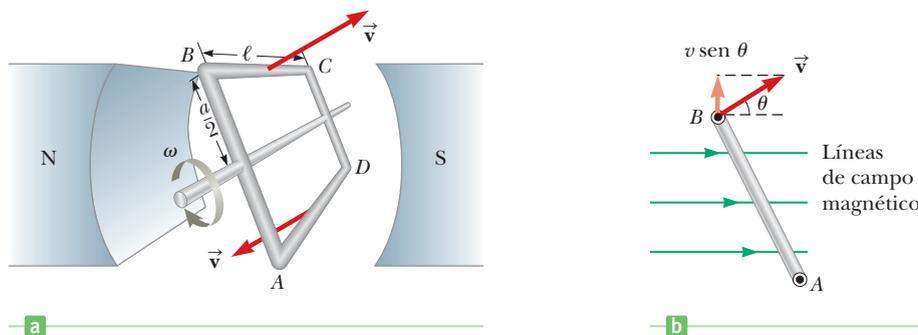


Figura 20.20 a) Espira que gira con cierta velocidad angular constante en un campo magnético externo. La fem inducida en la espira varía de manera sinusoidal con el tiempo. b) Vista lateral de la espira giratoria.



Luis Castañeda, Inc.

Turbinas que hacen girar los generadores eléctricos en una planta hidroeléctrica.

AB y CD no es a lo largo de las longitudes de los alambres. (La fuerza sobre los electrones en estos alambres es perpendicular a los alambres.) Por lo tanto, una fem se genera sólo en los alambres BC y AD . En algún instante, el alambre BC tiene velocidad \vec{v} a un ángulo θ con el campo magnético, como se muestra en la figura 20.20b. (Observe que la componente de velocidad paralela al campo no tiene efecto sobre las cargas en el alambre, mientras que el componente de velocidad perpendicular al campo produce una fuerza magnética sobre las cargas que mueve electrones de C a B .) La fem que se genera en el alambre BC es igual a $B\ell v_{\perp}$, donde ℓ es la longitud del alambre y v_{\perp} es la componente de velocidad perpendicular al campo. También se genera una fem de $B\ell v_{\perp}$ en el alambre DA y el sentido de esta fem es el mismo que en el alambre BC . Dado que $v_{\perp} = v \text{ sen } \theta$, la fem inducida total es

$$\mathcal{E} = 2B\ell v_{\perp} = 2B\ell v \text{ sen } \theta \quad [20.6]$$

Si la espira gira con una velocidad angular constante ω , se puede usar la relación $\theta = \omega t$ en la ecuación 20.6. Más aún, dado que cada punto sobre los alambres BC y DA gira en trayectoria circular en torno al eje de rotación con la misma velocidad angular ω , se tiene $v = r\omega = (a/2)\omega$, donde a es la longitud de lados AB y CD . Por lo tanto, la ecuación 20.6 se reduce a

$$\mathcal{E} = 2B\ell \left(\frac{a}{2}\right)\omega \text{ sen } \omega t = B\ell a\omega \text{ sen } \omega t$$

Si una bobina tiene N espiras, la fem es N veces mayor porque cada espira tiene la misma fem inducida. Más aún, puesto que el área de la espira es $A = \ell a$, la fem total es

$$\mathcal{E} = NBA\omega \text{ sen } \omega t \quad [20.7]$$

Este resultado muestra que la fem varía sinusoidalmente con el tiempo, como se grafica en la figura activa 20.19b. Observe que la fem máxima tiene el valor

$$\mathcal{E}_{\text{máx}} = NBA\omega \quad [20.8]$$

que ocurre cuando $\omega t = 90^\circ$ o 270° . En otras palabras, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}}$ cuando el plano de la espira es paralelo al campo magnético. Más aún, la fem es cero cuando $\omega t = 0$ o 180° , que ocurre siempre que el campo magnético es perpendicular al plano de la espira. En Estados Unidos y Canadá la frecuencia de rotación para generadores comerciales es 60 Hz, mientras que en algunos países europeos se usa 50 Hz. (Recuerde que $\omega = 2\pi f$, donde f es la frecuencia en hertz.)

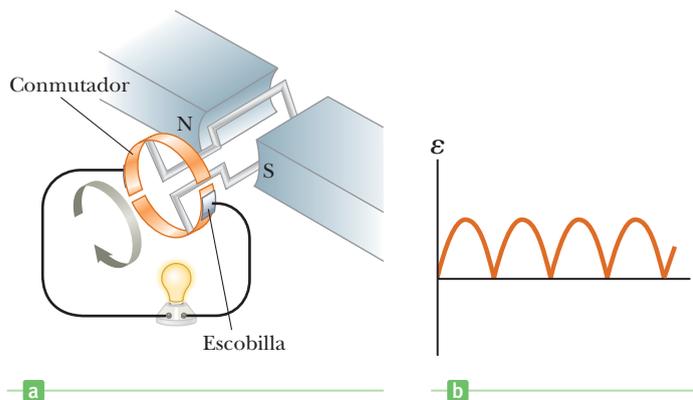
APLICACIÓN

Generadores de corriente directa

El **generador de corriente directa** (CD) se ilustra en la figura activa 20.21a. Las componentes en esencia son las mismas que los del generador CA, excepto que los contactos a la espira giratoria están hechos mediante un anillo colector, o conmutador. En este diseño el voltaje de salida siempre tiene la misma polaridad y la corriente es una corriente directa que pulsa, como en la figura activa 20.21b. Observe que los contactos al anillo colector invierten sus papeles cada medio ciclo. Al mismo tiempo, la polaridad de la fem inducida se invierte. Por lo tanto, la polaridad del anillo colector permanece igual.

Figura activa 20.21

a) Diagrama esquemático de un generador CD. b) La fem fluctúa en magnitud, pero siempre tiene la misma polaridad.



Una corriente CD que pulsa no es adecuada para la mayoría de las aplicaciones. Para producir una corriente CD estacionaria, los generadores CD comerciales usan muchas espiras y conmutadores distribuidos en torno al eje de rotación, de modo que los pulsos sinusoidales de las espiras se traslapan en fase. Cuando estos pulsos se superponen, la salida CD casi está libre de fluctuaciones.

■ EJEMPLO 20.5 Fem inducida en un generador CA

OBJETIVO Comprender los aspectos físicos de un generador CA.

PROBLEMA Un generador CA consiste en ocho espiras de alambre, cada una con área $A = 0.0900 \text{ m}^2$, con una resistencia total de 12.0Ω . La bobina gira en un campo magnético de 0.500 T a una frecuencia constante de 60.0 Hz , con eje de rotación perpendicular a la dirección del campo magnético. **a)** Encuentre la máxima fem inducida. **b)** ¿Cuál es la máxima corriente inducida? **c)** Determine la fem inducida y la corriente como funciones del tiempo. **d)** ¿Qué torque máximo se debe aplicar para mantener la bobina dando vueltas?

ESTRATEGIA A partir de la frecuencia dada, calcule la frecuencia angular ω y sustituya, junto con las cantidades dadas, en la ecuación 20.8. Como funciones del tiempo, la fem y la corriente tienen la forma $A \text{ sen } \omega t$, donde A es la máxima fem o corriente, respectivamente. Para el inciso d), calcule el torque magnético sobre la bobina cuando la corriente está en un máximo. (Véase el capítulo 19.) El torque aplicado debe realizar trabajo contra este torque magnético para mantener la bobina dando vueltas.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la máxima fem inducida.

Primero, calcule la frecuencia angular del movimiento rotacional:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi(60.0 \text{ Hz}) = 377 \text{ rad/s}$$

Sustituya los valores para N , A , B y ω en la ecuación 20.8, y obtenga la máxima fem inducida:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{máx}} &= NAB\omega = 8(0.0900 \text{ m}^2)(0.500 \text{ T})(377 \text{ rad/s}) \\ &= 136 \text{ V} \end{aligned}$$

b) ¿Cuál es la máxima corriente inducida?

Sustituya la máxima fem inducida $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ y la resistencia R en la ley de Ohm para encontrar la máxima corriente inducida:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{máx}}}{R} = \frac{136 \text{ V}}{12.0 \Omega} = 11.3 \text{ A}$$

c) Determine la fem inducida y la corriente como funciones del tiempo.

Sustituya $\mathcal{E}_{\text{máx}}$ y ω en la ecuación 20.7 para obtener la variación de \mathcal{E} con el tiempo t en segundos:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{máx}} \text{ sen } \omega t = (136 \text{ V}) \text{ sen } 377t$$

La variación de la corriente en el tiempo se parece a esta expresión, excepto con la máxima corriente afuera en el frente:

$$I = (11.3 \text{ A}) \text{ sen } 377t$$

d) Calcule el máximo torque aplicado necesario para mantener la bobina dando vueltas.

Escriba la ecuación para torque magnético:

$$\tau = \mu B \text{ sen } \theta$$

Calcule el máximo momento magnético de la bobina, μ :

$$\mu = I_{\text{máx}} AN = (11.3 \text{ A})(0.0900 \text{ m}^2)(8) = 8.14 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

Sustituya en la ecuación de torque magnético, con $\theta = 90^\circ$ para encontrar el máximo torque aplicado:

$$\tau_{\text{máx}} = (8.14 \text{ A} \cdot \text{m}^2)(0.500 \text{ T}) \text{ sen } 90^\circ = 4.07 \text{ N} \cdot \text{m}$$

COMENTARIOS El número de espiras, N , no puede ser arbitrario, porque debe haber una fuerza suficientemente fuerte para hacer girar la bobina.

PREGUNTA 20.5 ¿Qué efecto tiene sobre la máxima fem inducida el duplicar la frecuencia?

(continúa)

EJERCICIO 20.5 Un generador de CA debe tener una salida máxima de 301 V. Cada espira circular de alambre tiene un área de 0.100 m^2 y una resistencia de 0.80Ω . La bobina gira en un campo magnético de 0.600 T , con una frecuencia de 40.0 Hz , con el eje de rotación perpendicular a la dirección del campo magnético. a) ¿Cuántas espiras de alambre debe tener la bobina para producir la fem deseada? b) Encuentre la corriente máxima inducida en la bobina. c) Determine la fem inducida como función del tiempo.

RESPUESTAS a) 20 espiras b) 18.8 A c) $\mathcal{E} = (301 \text{ V}) \text{ sen } 251t$

Motores y fuerza contraelectromotriz

APLICACIÓN

Motores

Los motores son dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica. En esencia, **un motor es un generador que corre a la inversa**: en lugar de generar una corriente mediante una espira giratoria, se suministra una corriente a la espira mediante una fuente de fem y el torque magnético sobre la espira portadora de corriente hace que gire.

Un motor puede realizar trabajo mecánico útil cuando un eje conectado a su bobina giratoria se une a algún dispositivo externo. Sin embargo, conforme gira la bobina en el motor, el flujo magnético variable a través de ella induce una fem que actúa para reducir la corriente en la bobina. Si *aumenta* la corriente, la ley de Lenz se violaría. La frase **fuerza contraelectromotriz** se usa para una fem que tiende a reducir la corriente aplicada. La fuerza contraelectromotriz aumenta en magnitud conforme aumenta la velocidad rotatoria de la bobina. Este estado de asuntos se puede ilustrar como el circuito equivalente en la figura 20.22. Para propósitos de ilustración, suponga que la fuente de poder externa que suministra corriente en la bobina del motor tiene un voltaje de 120 V , la bobina tiene una resistencia de 10Ω y la fuerza contraelectromotriz inducida en la bobina en este instante es de 70 V . El voltaje disponible para suministrar corriente es igual a la diferencia entre el voltaje aplicado y la fuerza contraelectromotriz, o 50 V en este caso. La corriente siempre se reduce por la fuerza contraelectromotriz.

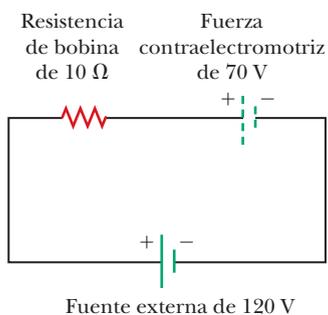


Figura 20.22 Un motor se puede representar como una resistencia más una fuerza contraelectromotriz.

Cuando se enciende un motor, inicialmente no hay fuerza contraelectromotriz y la corriente es muy grande porque está limitada sólo por la resistencia de la bobina. Conforme la bobina comienza a girar, la fuerza contraelectromotriz inducida se opone al voltaje aplicado y la corriente en la bobina se reduce. Si la carga mecánica aumenta, el motor se frena, lo que disminuye la fuerza contraelectromotriz. Esta reducción en la fuerza contraelectromotriz aumenta la corriente en la bobina y por lo tanto también aumenta la potencia necesaria de la fuente de voltaje externo. Como resultado, los requerimientos de potencia para arrancar un motor y para operarlo bajo cargas pesadas son mayores que aquellas para operar el motor bajo cargas promedio. Si al motor se le permite operar bajo ninguna carga mecánica, la fuerza contraelectromotriz reduce la corriente a un valor lo suficientemente grande para equilibrar las pérdidas de energía por calor y fricción.

■ EJEMPLO 20.6 Corriente inducida en un motor

OBJETIVO Aplicar el concepto de una fuerza contraelectromotriz para calcular la corriente inducida en un motor.

PROBLEMA Un motor tiene bobinas con una resistencia de 10.0Ω y se alimenta mediante un voltaje de $\Delta V = 1.20 \times 10^2 \text{ V}$. Cuando el motor opera a su máxima velocidad, la fuerza contraelectromotriz es 70.0 V . Encuentre la corriente en las bobinas **a)** cuando el motor se enciende por primera vez y **b)** cuando el motor alcanza su máxima velocidad de rotación.

ESTRATEGIA Para cada parte, encuentre el voltaje neto, que es el voltaje aplicado menos la fem inducida. Divida el voltaje neto entre la resistencia para obtener la corriente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la corriente inicial, cuando el motor se enciende por primera vez.

Si la bobina no gira, la fuerza contraelectromotriz es cero y la corriente tiene su valor máximo. Calcule la diferencia entre la fem y la fuerza contraelectromotriz inicial y divida entre la resistencia R , para obtener la corriente inicial:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{contra}}}{R} = \frac{1.20 \times 10^2 \text{ V} - 0}{10.0 \Omega} = 12.0 \text{ A}$$

b) Encuentre la corriente cuando el motor gira a su velocidad máxima.

Repita el cálculo con el uso del valor máximo de la fuerza contraelectromotriz:

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{contra}}}{R} = \frac{1.20 \times 10^2 \text{ V} - 70.0 \text{ V}}{10.0 \Omega} = \frac{50.0 \text{ V}}{10.0 \Omega} = 5.00 \text{ A}$$

COMENTARIOS El fenómeno de la fuerza contraelectromotriz es una forma en que se limita la velocidad de rotación de los motores eléctricos.

PREGUNTA 20.6 Conforme un motor aumenta su velocidad, ¿qué ocurre con la magnitud del torque magnético?
 a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece constante.

EJERCICIO 20.6 Si la corriente en el motor es 8.00 A en algún instante, ¿cuál es la fuerza contraelectromotriz en este tiempo?

RESPUESTA 40.0 V

20.5 Autoinductancia

Considere un circuito que consiste en un interruptor, un resistor y una fuente de fem, como en la figura 20.23. Cuando se cierra el interruptor, la corriente no cambia de inmediato desde cero hasta su valor máximo, \mathcal{E}/R . La ley de inducción electromagnética, la ley de Faraday, evita este cambio. Lo que ocurre es lo siguiente: conforme la corriente aumenta con el tiempo, el flujo magnético a través del circuito debido a esta corriente también aumenta. El flujo creciente induce una fem en el circuito que se opone al cambio en flujo magnético. Por la ley de Lenz, la fem inducida está en la dirección que se indica por la batería rayada en la figura. La diferencia de potencial neto a través del resistor es la fem de la batería menos la fem inducida que se opone. Conforme la magnitud de la corriente aumenta, la *tasa* de aumento se reduce y por ende la fem inducida disminuye. Esta fem que se opone resulta en un aumento gradual en la corriente. Por la misma razón, cuando se abre el interruptor, la corriente no cae inmediatamente a cero. Este efecto se llama **autoinducción** porque el flujo variable a través del circuito surge del circuito en sí. La fem que se establece en el circuito se llama **fem autoinducida**.

Como segundo ejemplo de autoinductancia, considere la figura 20.24, que muestra una bobina devanada sobre un núcleo de hierro cilíndrico. (Un dispositivo práctico tendría muchos cientos de espiras.) Suponga que la corriente cambia con el tiempo. Cuando la corriente está en la dirección que se muestra, dentro de la bobina se establece un campo magnético, que se dirige de derecha a izquierda. Como resultado, algunas líneas de flujo magnético pasan a través del área transversal de la bobina. Conforme la corriente cambia con el tiempo, el flujo a través de la bobina cambia e induce una fem en la bobina. La ley de Lenz muestra que esta fem inducida tiene una dirección que se opone al cambio en la corriente. Si la corriente aumenta, la fem inducida es como se muestra en la figura 20.24b, y si la corriente disminuye, la fem inducida es como se muestra en la figura 20.24c.

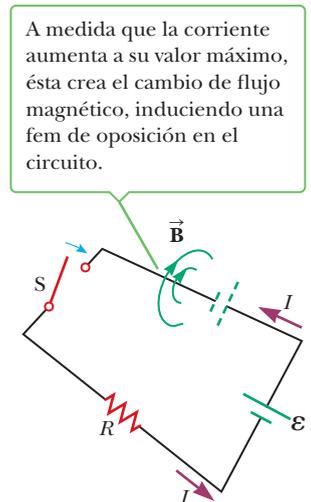


Figura 20.23 Después de que se cierra el interruptor en el circuito, la corriente produce su propio flujo magnético a través del circuito. Conforme la corriente aumenta hacia su valor de equilibrio, el flujo cambia en el tiempo e induce una fem en el circuito. La batería dibujada con líneas rayadas es un símbolo para la fem autoinducida.

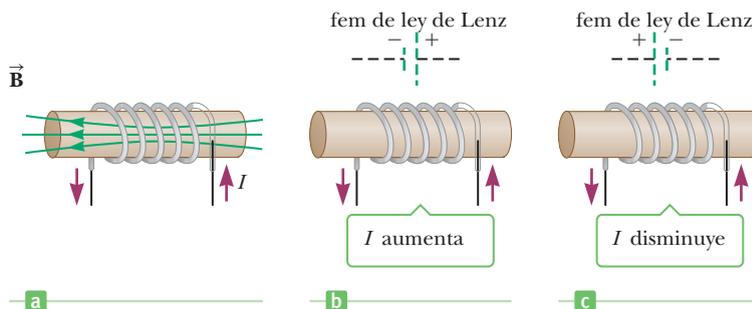


Figura 20.24 a) Una corriente en la bobina produce un campo magnético que se dirige hacia la izquierda. b) Si la corriente aumenta, la bobina actúa como una fuente de fem que se dirige, como se muestra, mediante la batería rayada. c) La fem inducida en la bobina cambia su polaridad si la corriente disminuye. Los símbolos de batería dibujados con líneas discontinuas representan la fem incluida en la bobina.

**Joseph Henry****Físico estadounidense (1797-1878)**

Henry fue el primer director del Instituto Smithsonian y el primer presidente de la Academia de Ciencias Naturales de Estados Unidos. Fue el primero en producir una corriente eléctrica con un campo magnético, pero no publicó sus resultados antes que Faraday debido a sus pesadas cargas académicas en la Academia Albany en el estado de Nueva York. Mejoró el diseño del electroimán y construyó uno de los primeros motores. También descubrió el fenómeno de autoinducción. La unidad de inductancia, el henry, se llamó así en su honor.

Inductancia ►

Para evaluar cuantitativamente la autoinductancia, observe primero que, de acuerdo con la ley de Faraday, la fem inducida está dada por la ecuación 20.2:

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

El flujo magnético es proporcional al campo magnético, que es proporcional a la corriente en la bobina. Por lo tanto, **la fem autoinducida debe ser proporcional a la razón de cambio de la corriente con el tiempo**, o

$$\mathcal{E} \equiv -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.9]$$

donde L es una constante de proporcionalidad llamada **inductancia** del dispositivo. El signo negativo indica que una corriente variable induce una fem en oposición al cambio. En otras palabras, si la corriente aumenta (ΔI positiva), la fem inducida es negativa, lo que indica oposición al aumento en corriente. Del mismo modo, si la corriente disminuye (ΔI negativa), el signo de la fem inducida es positivo, lo que indica que la fem actúa para oponerse a la disminución.

La inductancia de una bobina depende del área transversal de la bobina y otras cantidades, que se pueden agrupar todas bajo el encabezado general de factores geométricos. La unidad SI de inductancia es el **henry** (H), que, de la ecuación 20.9, es igual a 1 volt-segundo por ampere:

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$$

En el proceso de calcular autoinductancia, con frecuencia es conveniente igualar las ecuaciones 20.2 y 20.9 para encontrar una expresión para L :

$$N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$L = N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta I} = \frac{N\Phi_B}{I} \quad [20.10]$$

■ FÍSICA APLICADA 20.3 **Cómo sacar chispas**

En algunos circuitos ocurre una chispa entre los polos de un interruptor cuando el interruptor se abre. ¿Por qué no hay una chispa cuando se cierra el interruptor de este circuito?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la ley de Lenz, la dirección de las fem inducidas es tal que el campo magnético inducido se opone al cambio en el flujo magnético original. Cuando el interruptor se abre, la caída súbita en el campo

magnético en el circuito induce una fem en una dirección que se opone al cambio en la corriente original. Esta fem inducida puede provocar una chispa conforme la corriente zanja la brecha de aire entre los polos del interruptor. La chispa no ocurre cuando el interruptor se cierra, porque la corriente original es cero y la fem inducida se opone a cualquier cambio en dicha corriente. ■

En general, la determinación de la inductancia de un elemento de corriente dado puede ser desafiante. Sin embargo, encontrar una expresión para la inductancia de un solenoide común es sencillo. Sea N el número de espiras que tiene el solenoide y ℓ su longitud. Suponga que ℓ es grande en comparación con el radio y el núcleo del solenoide es aire. Considere que el campo magnético interior es uniforme y está dado por la ecuación 19.16,

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

donde $n = N/\ell$ es el número de espiras por unidad de longitud. Por lo tanto, el flujo magnético a través de cada espira es

$$\Phi_B = BA = \mu_0 \frac{N}{\ell} AI$$

donde A es el área transversal del solenoide. A partir de esta expresión y la ecuación 20.10, encontramos que

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad [20.11a]$$

Esta ecuación muestra que L depende de los factores geométricos ℓ y A , y de μ_0 , y es proporcional al cuadrado del número de espiras. Puesto que $N = n\ell$, el resultado también se puede expresar en la forma

$$L = \mu_0 \frac{(n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A \ell = \mu_0 n^2 V \quad [20.11b]$$

donde $V = A\ell$ es el volumen del solenoide.

■ EJEMPLO 20.7 Inductancia, fem autoinducida y solenoides

OBJETIVO Calcular la inductancia y la fem autoinducida de un solenoide.

PROBLEMA a) Calcule la inductancia de un solenoide que contiene 300 espiras, si la longitud del solenoide es 25.0 cm y su área transversal es $4.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. b) Calcule la fem autoinducida en el solenoide descrito en el inciso a) si la corriente en el solenoide disminuye a razón de 50.0 A/s.

ESTRATEGIA Al sustituir las cantidades dadas en la ecuación 20.11a se produce la inductancia L . Para el inciso b), sustituya el resultado del inciso a) y $\Delta I/\Delta t = -50.0 \text{ A/s}$ en la ecuación 20.9 para obtener la fem autoinducida.

SOLUCIÓN

a) Calcule la inductancia del solenoide.

Sustituya el número N de espiras, el área A y la longitud ℓ en la ecuación 20.11a para encontrar la inductancia:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \\ &= (4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}) \frac{(300)^2 (4.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2)}{25.0 \times 10^{-2} \text{ m}} \\ &= 1.81 \times 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{A} = \mathbf{0.181 \text{ mH}} \end{aligned}$$

b) Calcule la fem autoinducida en el solenoide.

Sustituya L y $\Delta I/\Delta t = -50.0 \text{ A/s}$ en la ecuación 20.9, para encontrar la fem autoinducida:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -(1.81 \times 10^{-4} \text{ H})(-50.0 \text{ A/s}) \\ &= \mathbf{9.05 \text{ mV}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Note que $\Delta I/\Delta t$ es negativa porque la corriente disminuye con el tiempo. La expresión de la inductancia en el inciso (a) se basa en el supuesto de que el radio del solenoide es pequeño en comparación con su longitud.

PREGUNTA 20.7 Si el solenoide se enrolla en un círculo de modo que se convierta en un solenoide toroidal, ¿qué sería cierto de su autoinductancia? a) Sería la misma. b) Sería mayor. c) Sería menor.

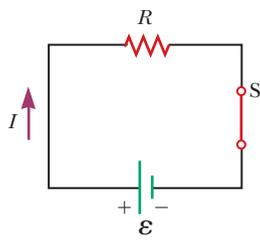
EJERCICIO 20.7 Un solenoide debe tener una inductancia de 0.285 mH, un área transversal de $6.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y una longitud de 36.0 cm. a) ¿Cuántas espiras por unidad de longitud debe tener? b) Si la fem autoinducida es -12.5 mV en un tiempo dado, ¿a qué razón cambia la corriente en dicho instante?

RESPUESTAS a) 1.02×10^3 espiras/m b) 43.9 A/s

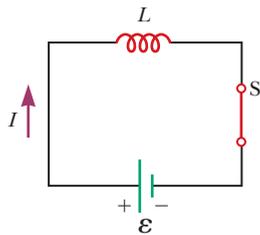
20.6 Circuitos RL

Un elemento de circuito que tiene una gran inductancia, como una bobina de muchas espiras enrolladas apretadamente, se llama **inductor**. El símbolo de circuito para un inductor es . Siempre se supondrá que la autoinductancia del resto del circuito es despreciable en comparación con la del inductor en el circuito.

Para comprender el efecto de un inductor en un circuito, considere los dos circuitos en la figura 20.25 (página 708). La figura 20.25a muestra un resistor conectado a las terminales



a



b

Figura 20.25 Comparación del efecto de un resistor con el de un inductor en un circuito simple.

de una batería. Para este circuito, la regla de la malla de Kirchhoff es $\mathcal{E} - IR = 0$. La caída de voltaje a través del resistor es

$$\Delta V_R = -IR \quad [20.12]$$

En este caso, **la resistencia se interpreta como una medida de la oposición a la corriente**. Ahora considere el circuito en la figura 20.25b, que consiste en un inductor conectado a las terminales de una batería. En el instante cuando se cierra el interruptor en el circuito, puesto que $IR = 0$, la fem de la batería es igual a la fuerza contraelectromotriz generada en la bobina. Por lo tanto, se tiene

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.13]$$

A partir de esta expresión, **L se interpreta como una medida de oposición a la razón de cambio de la corriente**.

La figura activa 20.26 muestra un circuito que consiste en un resistor, un inductor y una batería. Suponga que el interruptor se cierra en $t = 0$. La corriente comienza a aumentar, pero el inductor produce una fem que se opone a la corriente creciente. Como resultado, la corriente no puede cambiar instantáneamente desde cero hasta su valor máximo de \mathcal{E}/R . La ecuación 20.13 muestra que la fem inducida es un máximo cuando la corriente cambia más rápido, lo que ocurre cuando el interruptor se cierra por primera vez. Conforme la corriente tiende a su valor de estado estacionario, la fuerza contraelectromotriz de la bobina cae porque la corriente cambia de manera más lenta. Finalmente, cuando la corriente alcanza su valor de estado estacionario, la razón de cambio es cero y la fuerza contraelectromotriz también es cero. La figura activa 20.27 grafica la corriente en el circuito como una función del tiempo. Esta gráfica es similar a la de la carga sobre un capacitor como una función del tiempo, que se estudió en el capítulo 18 en la sección 5 en conexión con los circuitos RC. En este caso, encontramos que es conveniente introducir una cantidad llamada *constante de tiempo del circuito*, lo que dice algo acerca del tiempo que se requiere para que el capacitor tienda a su carga de estado estacionario. En la misma forma, las constantes de tiempo se definen para circuitos que contienen resistores e inductores. La **constante de tiempo τ** para un circuito *RL* es el tiempo que se requiere para que la corriente en el circuito alcance 63.2% de su valor inicial \mathcal{E}/R ; la constante de tiempo de un circuito *RL* está dada por

Constante de tiempo para un circuito *RL* ▶

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [20.14]$$

Utilizando métodos de cálculo se puede demostrar que la corriente en tal circuito está dada por

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad [20.15]$$

Esta ecuación es consistente con la intuición: cuando el interruptor se cierra en $t = 0$, la corriente inicialmente es cero, que se eleva con el tiempo hasta algún valor máximo.

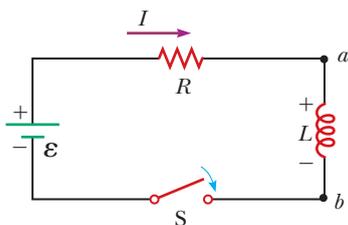
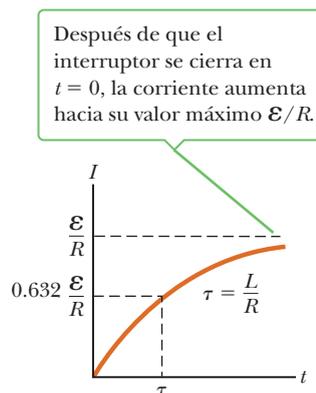


Figura activa 20.26 Un circuito *RL* en serie. Como la corriente se incrementa hasta su valor máximo, el inductor produce una fem que se opone al incremento de la corriente.

Figura activa 20.27 Gráfica de corriente frente al tiempo para el circuito *RL* que se muestra en la figura 20.26. El interruptor se cierra en $t = 0$ y la corriente aumenta hacia su valor máximo \mathcal{E}/R . La constante de tiempo τ es el tiempo que la corriente tarda en llegar a 63.2% de su valor máximo.



Observe la similitud matemática entre la ecuación 20.15 y la ecuación 18.7, que presenta un capacitor en lugar de un inductor. Como en el caso de un capacitor, la forma de la ecuación sugiere que se requiere una cantidad de tiempo infinita para que la corriente en el inductor alcance su valor máximo. Es útil suponer que la corriente se compone de cargas en movimiento que son infinitesimales, como se mostrará en el ejemplo 20.9.

Examen rápido

20.6 El interruptor en el circuito que se muestra en la figura 20.28 se cierra, y el foco brilla de manera estable. El inductor es un solenoide simple con núcleo de aire. Una barra de hierro se inserta en el interior del solenoide, lo que aumenta la magnitud del campo magnético en el solenoide. Conforme la barra se inserta, la brillantez del foco

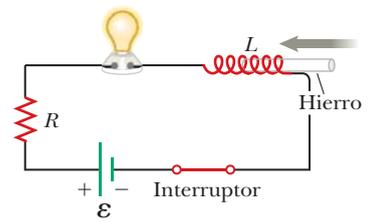


Figura 20.28 (Examen rápido 20.6)

EJEMPLO 20.8 Un circuito RL

OBJETIVO Calcular la constante de tiempo y relacionarla con la corriente en un circuito RL .

PROBLEMA Una batería de 12.6 V está en un circuito con un inductor de 30.0 mH y un resistor de 0.150 Ω , como en la figura 20.26. El interruptor se cierra en $t = 0$. **a)** Encuentre la constante de tiempo del circuito. **b)** Encuentre la corriente después de transcurrida la constante de tiempo. **c)** Encuentre la caída de voltaje a través del resistor cuando $t = 0$ y $t =$ una constante de tiempo. **d)** ¿Cuál es la razón de cambio de la corriente después de una constante de tiempo?

ESTRATEGIA El inciso a) sólo requiere sustitución en la definición de la constante de tiempo. Con este valor y la ley de Ohm, se puede encontrar la corriente después de una constante de tiempo y al multiplicar esta corriente por la resistencia produce la caída de voltaje a través del resistor después de una constante de tiempo. Con la caída de voltaje y la regla de la malla de Kirchhoff, se puede encontrar el voltaje a través del inductor. Este valor se puede sustituir en la ecuación 20.13 para obtener la razón de cambio de la corriente.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál es la constante de tiempo del circuito?

Sustituya la inductancia L y la resistencia R en la ecuación 20.14, para encontrar la constante de tiempo:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}}{0.150 \Omega} = 0.200 \text{ s}$$

b) Encuentre la corriente después de transcurrida una constante de tiempo.

Primero, use la ley de Ohm para calcular el valor final de la corriente después de transcurridas muchas constantes de tiempo:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12.6 \text{ V}}{0.150 \Omega} = 84.0 \text{ A}$$

Después de una constante de tiempo, la corriente se eleva a 63.2% de su valor final:

$$I_{1\tau} = (0.632)I_{\text{máx}} = (0.632)(84.0 \text{ A}) = 53.1 \text{ A}$$

c) Encuentre las caídas de voltaje a través de la resistencia cuando $t = 0$ y $t =$ una constante de tiempo.

Inicialmente, la corriente en el circuito es cero, así que, a partir de la ley de Ohm, el voltaje a través del resistor es cero:

$$\Delta V_R = IR \\ \Delta V_R(t = 0 \text{ s}) = (0 \text{ A})(0.150 \Omega) = 0$$

A continuación, use la ley de Ohm y encuentre la magnitud de la caída de voltaje a través del resistor después de una constante de tiempo:

$$\Delta V_R(t = 0.200 \text{ s}) = (53.1 \text{ A})(0.150 \Omega) = 7.97 \text{ V}$$

d) ¿Cuál es la razón de cambio de la corriente después de una constante de tiempo?

Use la regla de voltaje de Kirchhoff y calcule la caída de voltaje a través del inductor en dicho tiempo:

$$\mathcal{E} + \Delta V_R + \Delta V_L = 0$$

Resuelva para ΔV_L :

$$\Delta V_L = -\mathcal{E} - \Delta V_R = -12.6 \text{ V} - (-7.97 \text{ V}) = -4.6 \text{ V}$$

(continúa)

Ahora resuelva la ecuación 20.13 para $\Delta I/\Delta t$ y sustituya:

$$\Delta V_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{\Delta V_L}{L} = -\frac{-4.6 \text{ V}}{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}} = 150 \text{ A/s}$$

OBSERVACIONES Los valores utilizados en este problema fueron tomados de los componentes reales recuperados desde el sistema de arranque de un coche. Debido a que la corriente en dicho circuito RL es inicialmente cero, los inductores se denominan a veces como “ahogadores” porque temporalmente ahogan la corriente. En la solución del inciso d), atravesamos el circuito en la dirección de la corriente positiva, por lo que la diferencia de voltaje a través de la batería fue positiva y las diferencias entre la resistencia y el inductor fueron negativas.

PREGUNTA 20.8 Halle la corriente en el circuito después de dos constantes de tiempo.

EJERCICIO 20.8 Una batería de 12.6 V está en serie con una resistencia de 0.350Ω y un inductor. a) Después de un largo tiempo, ¿cuál es la corriente en el circuito? b) ¿Cuál es la corriente después de una constante de tiempo? c) ¿Cuál es la caída de voltaje en la bobina en este momento? d) Hallar la inductancia, si la constante de tiempo es 0.130 s.

RESPUESTAS a) 36.0 A b) 22.8 A c) 4.62 V d) $4.55 \times 10^{-2} \text{ H}$

■ EJEMPLO 20.9 Formación de un campo magnético

OBJETIVO Comprender el papel del tiempo en el establecimiento de un campo magnético en un inductor.

PROBLEMA Dado el circuito RL del ejemplo 20.8, encuentre el tiempo que se requiere para que la corriente alcance 99.9% de su valor máximo después de que se cierra el interruptor.

ESTRATEGIA La solución requiere resolver la ecuación 20.15 para el tiempo, seguido de sustitución. Observe que la corriente máxima es $I_{\text{máx}} = \mathcal{E}/R$.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación 20.15, con I_f sustituida por la corriente: $I_f = \frac{\mathcal{E}}{R}(1 - e^{-t/\tau}) = I_{\text{máx}}(1 - e^{-t/\tau})$

Divida ambos lados entre $I_{\text{máx}}$: $\frac{I_f}{I_{\text{máx}}} = 1 - e^{-t/\tau}$

Reste 1 de ambos lados y luego multiplique ambos lados por -1 : $1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}} = e^{-t/\tau}$

Obtenga el logaritmo natural de ambos lados: $\ln\left(1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}}\right) = \ln(e^{-t/\tau}) = -t/\tau$

Resuelva para t y sustituya la expresión para τ de la ecuación 20.14: $t = -\frac{L}{R} \ln\left(1 - \frac{I_f}{I_{\text{máx}}}\right)$

Sustituya valores y obtenga el tiempo deseado: $t = -\frac{30.0 \times 10^{-3} \text{ H}}{0.150 \Omega} \ln(1 - 0.999) = 1.38 \text{ s}$

COMENTARIOS A partir de este cálculo, se descubre que formar el campo magnético en un inductor y aproximarse a la corriente máxima ocurre con relativa rapidez. Contrario a lo que se podría esperar a partir de la forma matemática de la ecuación 20.15, en realidad no se requiere una cantidad infinita de tiempo.

PREGUNTA 20.9 Si la inductancia se duplica, ¿en qué factor cambiaría la longitud de tiempo? a) 1 (esto es, sin cambio), b) 2, c) $\frac{1}{2}$

EJERCICIO 20.9 Suponga que un circuito RL en serie está compuesto de un resistor de 2.00Ω , un inductor de 15.0 H y una batería de 6.00 V. a) ¿Cuál es la constante de tiempo para este circuito? b) Una vez que se cierra el interruptor, ¿cuánto tarda la corriente en alcanzar la mitad de su valor máximo?

RESPUESTAS a) 7.50 s b) 5.20 s

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

La fem inducida por un inductor evita que una batería establezca una corriente instantánea en un circuito. La batería tiene que realizar trabajo para producir una corriente. Podemos pensar en este trabajo necesario como en energía almacenada en el inductor en su campo magnético. En forma similar a la que se usó en la sección 16.9 para encontrar la energía almacenada en un capacitor, encontramos que la energía almacenada por un inductor es

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2$$

[20.16]

◀ Energía almacenada en un inductor

Observe que el resultado es similar en forma a la expresión para la energía almacenada en un capacitor cargado (ecuación 16.18):

$$EP_C = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2$$

◀ Energía almacenada en un capacitor

■ EJEMPLO 20.10 Energía magnética

OBJETIVO Relacionar el almacenamiento de energía magnética con las corrientes en un circuito RL .

PROBLEMA Una batería de 12.0 V se conecta en serie con un resistor de 25.0 Ω y un inductor de 5.00 H. **a)** Encuentre la corriente máxima en el circuito. **b)** Encuentre la energía almacenada en el inductor en este tiempo. **c)** ¿Cuánta energía se almacena en el inductor cuando la corriente cambia a razón de 1.50 A/s?

ESTRATEGIA En el inciso a) la ley de Ohm y la regla de voltaje de Kirchhoff produce la corriente máxima porque el voltaje a través del inductor es cero cuando la corriente es máxima. Al sustituir la corriente en la ecuación 20.16 se obtiene la energía almacenada en el inductor. En el inciso c) la razón de cambio dada en la corriente se puede usar para calcular la caída de voltaje a través del inductor en el tiempo especificado. La regla de voltaje de Kirchhoff y la ley de Ohm proporcionan entonces la corriente I en dicho tiempo, lo que se puede usar para encontrar la energía almacenada en el inductor.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la corriente máxima en el circuito.

Aplique al circuito la regla de voltaje de Kirchhoff:

$$\Delta V_{\text{bat}} + \Delta V_R + \Delta V_L = 0$$

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$$

Cuando se alcanza la corriente máxima, $\Delta I/\Delta t$ es cero, de modo que la caída de voltaje a través del inductor es cero. Resuelva para la corriente máxima $I_{\text{máx}}$:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{12.0 \text{ V}}{25.0 \Omega} = 0.480 \text{ A}$$

b) Encuentre la energía almacenada en el inductor en este tiempo.

Sustituya los valores conocidos en la ecuación 20.16:

$$EP_L = \frac{1}{2}LI_{\text{máx}}^2 = \frac{1}{2}(5.00 \text{ H})(0.480 \text{ A})^2 = 0.576 \text{ J}$$

c) Encuentre la energía en el inductor cuando la corriente cambia a razón de 1.50 A/s.

Aplique la regla de voltaje de Kirchhoff al circuito una vez más:

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$$

Resuelva esta ecuación para la corriente I y sustituya:

$$I = \frac{1}{R} \left(\mathcal{E} - L \frac{\Delta I}{\Delta t} \right)$$

$$= \frac{1}{25.0 \Omega} [12.0 \text{ V} - (5.00 \text{ H})(1.50 \text{ A/s})] = 0.180 \text{ A}$$

Finalmente, sustituya el valor para la corriente en la ecuación 20.15 y encuentre la energía almacenada en el inductor:

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}(5.00 \text{ H})(0.180 \text{ A})^2 = 0.081 \text{ J}$$

(continúa)

COMENTARIOS Observe cuán importante es combinar los conceptos de capítulos anteriores. Aquí la ley de Ohm y la regla de la malla de Kirchhoff fueron esenciales para la solución del problema.

PREGUNTA 20.10 Verdadero o Falso: Mientras más grande sea el valor de la inductancia en tal circuito RL , mayor es la corriente máxima.

EJERCICIO 20.10 Para el mismo circuito, encuentre la energía almacenada en el inductor cuando la tasa de cambio de la corriente es 1.00 A/s .

RESPUESTA 0.196 J

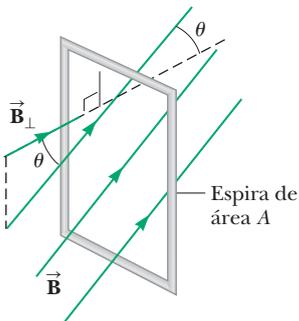
RESUMEN

20.1 Fem inducida y flujo magnético

El flujo magnético Φ_B a través de una espira cerrada se define como

$$\Phi_B \equiv BA \cos \theta \quad [20.1]$$

donde B es la intensidad del campo magnético uniforme, A es el área transversal de la espira y θ es el ángulo entre \vec{B} y una dirección perpendicular al plano de la espira.



En este punto de vista de una espira de área A , el componente del campo magnético perpendicular a la superficie \vec{B} multiplicado por el área da como resultado el flujo magnético a través de la superficie.

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

La **ley de inducción de Faraday** afirma que la fem inducida instantánea en un circuito es igual al negativo de la razón de cambio del flujo magnético a través del circuito,

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [20.2]$$

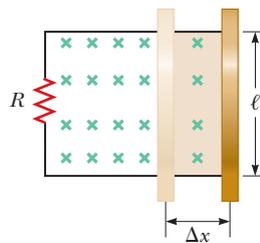
donde N es el número de espiras en el circuito. El flujo magnético Φ_B puede cambiar con el tiempo siempre que el campo magnético \vec{B} , el área A o el ángulo θ cambien con el tiempo.

La **ley de Lenz** afirma que la corriente proveniente de la fem inducida crea un campo magnético con flujo que se opone al *cambio* en flujo magnético a través de un circuito.

20.3 Fem de movimiento

Si una barra conductora de longitud ℓ se mueve a través de un campo magnético con una velocidad v , de modo que \vec{B} es perpendicular a la barra, la fem inducida en la barra, usualmente llamada **fem de movimiento** es

$$|\mathcal{E}| = B\ell v \quad [20.4]$$

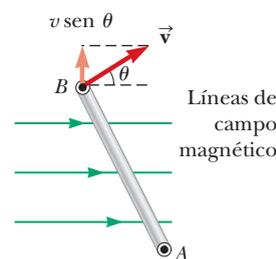


A medida que la barra se mueve hacia la derecha, el área que recorre la espira aumenta la cantidad $\ell \Delta x$ y el flujo magnético aumenta a través del lazo $B\ell \Delta x$.

20.4 Generadores

Cuando una bobina de alambre con N espiras, cada una con área A , gira con velocidad angular constante ω en un campo magnético uniforme \vec{B} , la fem inducida en la bobina es

$$\mathcal{E} = NBA\omega \sin \omega t \quad [20.7]$$



En este punto de vista de un circuito de rotación, el flujo magnético cambia continuamente, generando una corriente alterna en el circuito.

Tales generadores naturalmente producen corriente alterna (CA), que cambia de dirección con la frecuencia $\omega/2\pi$. La corriente CA se puede transformar en corriente directa.

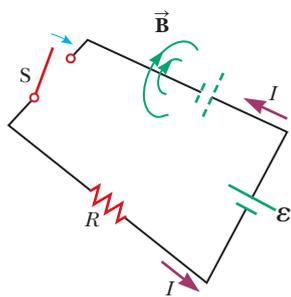
20.5 Autoinductancia

20.6 Circuitos RL

Cuando la corriente en una bobina cambia con el tiempo, en la bobina se induce una fem de acuerdo con la ley de Faraday. Esta **fem autoinducida** se define mediante la expresión

$$\mathcal{E} \equiv -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [20.9]$$

donde L es la inductancia de la bobina. La unidad SI para inductancia es el henry (H); $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$.



Cuando el interruptor está cerrado, un campo magnético comienza a desarrollarse como se muestra. El flujo magnético variable crea una fem autoinducida en la dirección opuesta, representada por las líneas punteadas.

La **inductancia** de una bobina se puede encontrar a partir de la expresión

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad [20.10]$$

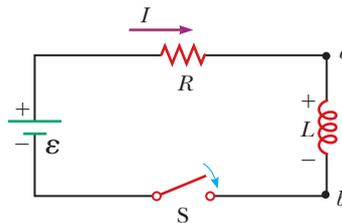
donde N es el número de espiras sobre la bobina, I es la corriente en la bobina y Φ_B es el flujo magnético a través de la bobina producida por dicha corriente. Para un solenoide, la inductancia está dada por

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad [20.11a]$$

Si un resistor y un inductor se conectan en serie con una batería y un interruptor se cierra en $t = 0$, la corriente en el circuito no se eleva instantáneamente a su valor máximo. Después

de una **constante de tiempo** $\tau = L/R$, la corriente en el circuito es 63.2% de su valor final \mathcal{E}/R . Conforme la corriente se aproxima a su valor máximo final, la caída de voltaje a través del inductor tiende a cero. La corriente I en tal circuito en cualquier tiempo t después de que el circuito se completa es

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad [20.15]$$



Un circuito RL en serie. A medida que la corriente aumenta a su valor máximo, el inductor produce una fem que se opone al incremento de la corriente.

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

La **energía almacenada** en el campo magnético de un inductor que porta corriente I es

$$EP_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad [20.16]$$

Conforme la corriente en un circuito RL tiende a su valor máximo, la energía almacenada tiende a un valor máximo.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una bobina plana de alambre se coloca en un campo magnético uniforme que está en la dirección y . El flujo magnético a través de la bobina es máximo si el plano de la bobina está ¿dónde? a) en el plano xy b) en el plano yz c) en el plano xz d) en cualquier orientación, ya que es constante.
- Una bobina cuadrada de 10 espiras, de 0.50 m por lado, se encuentra en el plano xy . Un campo magnético uniforme, de 1.0 T de magnitud en la dirección z negativa, cambia de manera estable a 3.0 T en la dirección z positiva, un proceso que tarda 2.0 s. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida en la bobina? a) 2.0 V b) 5.0 V c) 3.0 V d) 4.0 V e) 6.0 V
- La corriente en un inductor de 5.00 H disminuye de manera uniforme a razón de 2.00 A/s. ¿Cuál es la caída de voltaje a través del inductor? a) 2.50 V b) 5.00 V c) 0.400 V d) 10.0 V e) 7.50 V
- Un generador contiene una bobina de 100 espiras que gira 10.0 veces por segundo. Si cada espira tiene un área de 0.100 m^2 y el campo magnético a través de las bobinas es 0.050 T, ¿cuál es la fem máxima inducida en la bobina? a) 31.4 V b) 62.8 V c) 0.314 V d) 6.28 V e) 3.14 V
- Un pequeño avión, con envergadura de 12 m, vuela horizontalmente y hacia el norte con una velocidad de 60.0 m/s en una región donde el campo magnético de la Tierra es

60.0 μT dirigido 60.0° bajo la horizontal. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida entre las puntas de las alas del avión? a) 51 mV b) 31 mV c) 37 mV d) 44 mV e) 22 mV

- La barra en la figura POM 20.6 se mueve sobre rieles a la derecha con una velocidad \vec{v} , y un campo magnético constante uniforme se dirige fuera de la página. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta? (Más de una respuesta puede ser correcta.) a) La corriente inducida en el circuito es cero.

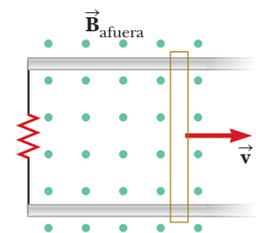


Figura POM20.6

- La corriente inducida en el circuito es a la derecha.
 - La corriente inducida en el circuito es a la izquierda.
 - Una fuerza externa es necesaria para mantener la barra en movimiento a velocidad constante.
 - No se requiere fuerza para mantener la barra moviéndose a velocidad constante.
- ¿Qué sucede con la amplitud de la fem inducida cuando la velocidad de rotación de una bobina del generador se duplica? a) Se convierte cuatro veces más grande. b) Se hace dos veces más grande. c) Se mantiene sin cambios. d) Se vuelve un medio más grande. e) Se convierte en un cuarto más grande.

8. Cuando una bobina se coloca en un campo magnético externo constante, que se dirige perpendicular al plano de la bobina, ¿cuál de las siguientes acciones *no* induce una fem en la bobina? a) Colapsar la bobina. b) Cambiar la intensidad del campo magnético. c) Mover la bobina a través del campo sin cambiar su orientación con respecto al campo. d) Girar la bobina. e) Remover la bobina del campo.
9. Un lazo rectangular se coloca cerca de un alambre largo que porta una corriente I , como se muestra en la figura POM20.9. Si I disminuye en el tiempo, ¿qué se puede decir de la corriente inducida en la espira? a) La corriente tiene una dirección que depende del tamaño de la espira. b) La corriente es en el sentido de las manecillas del reloj. c) La corriente es contra las manecillas del reloj. d) La corriente es cero. e) No se puede decir nada de la corriente y de la espira sin más información.



Figura POM20.9

10. Dos espiras de alambre rectangulares se encuentran en el mismo plano, como se muestra en la figura POM20.10. Si la corriente I en la espira exterior es contra las manecillas del reloj y aumenta con el tiempo, ¿qué es cierto de la corriente inducida en la espira interior? a) Es cero. b) Es en sentido de las manecillas del reloj. c) Es contra las manecillas del reloj. d) Su magnitud depende de las dimensiones de las espiras. e) Su dirección depende de las dimensiones de las espiras.



Figura POM20.10

11. Un imán de barra se sostiene sobre el centro de una espira de alambre que yace en el plano horizontal, como se muestra en la figura POM20.11. El extremo sur del imán apunta hacia la espira. Después de que el imán se suelta, ¿qué es cierto de la corriente en el resistor, visto desde arriba? a) Es en sentido de las manecillas del reloj conforme el imán cae hacia la espira. b) Es contra las manecillas del reloj conforme el imán cae hacia la espira. c) Es en sentido de las manecillas del reloj después de que el imán se mueve a través de la espira y alejándose de él. d) Siempre es en sentido de las manecillas del reloj. e) Primero es contra las manecillas del reloj, conforme el imán se aproxima a la espira y luego en sentido de las manecillas del reloj después de que pasa a través de la espira.

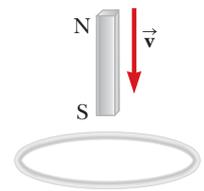


Figura POM20.11

12. Un circuito consiste en un foco conectado a dos rieles conductores y una barra móvil conductora, como se muestra en la figura POM20.12. Un campo magnético externo se dirige perpendicular al plano del circuito. ¿Durante cuál de las siguientes acciones el foco se encenderá? (Puede aplicarse más de un enunciado.) a) La barra se mueve hacia la izquierda. b) La barra se mueve hacia la derecha. c) La magnitud del campo magnético aumenta con el tiempo. d) La magnitud del campo magnético disminuye con el tiempo. e) El campo magnético permanece constante en el tiempo.

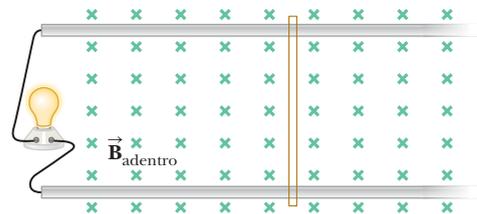


Figura POM20.12

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una nave espacial que orbita la Tierra tiene una bobina de alambre en ella. Un astronauta mide una pequeña corriente en la bobina, aunque no tiene batería conectada y no hay imanes en la nave espacial. ¿Qué causa la corriente?
2. ¿Soltar un imán por un tubo de cobre produce una corriente en el tubo? Explique.
3. Una espira circular se ubica en un campo magnético uniforme y constante. Describa cómo se puede inducir una fem en la espira en esta situación.
4. Una espira de alambre se coloca en un campo magnético uniforme. a) ¿Para qué orientación del lazo el flujo mag-

nético es un máximo? b) ¿Para qué orientación el flujo es cero?

5. Conforme la barra conductora de la figura PC20.5 se mueve hacia la derecha, se establece un campo eléctrico que se dirige hacia abajo. Si la barra se moviera hacia la izquierda, explique por qué el campo eléctrico sería hacia arriba.
6. ¿Cómo se produce la energía eléctrica en las presas? (Esto es:

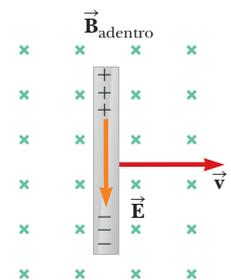


Figura PC20.5 Preguntas conceptuales 5 y 8.

¿cómo la energía de movimiento del agua se convierte en electricidad CA?)

- Usar un brazaete metálico en una región de campo intenso magnético podría ser peligroso. Analice esta afirmación.
- Conforme la barra de la figura PC20.5 se mueve perpendicular al campo, ¿se requiere una fuerza externa para mantenerla en movimiento con velocidad constante?

9. Las corrientes parásitas son corrientes inducidas que se establecen en una pieza de metal cuando se mueve a través de un campo magnético no uniforme. Por ejemplo, considere la placa metálica plana que se balancea en el extremo de una barra como péndulo, como se muestra en la figura PC20.9. a) En la posición 1, el péndulo se mueve desde una región donde no hay campo magnético hacia una región donde el campo \vec{B}_{adentro} se dirige hacia el papel. Demuestre que, en la posición 1, la dirección de la corriente parásita es contra las manecillas del reloj. b) En la posición 2, el péndulo se mueve afuera del campo hacia una región de campo cero. Demuestre que la dirección de la corriente parásita en este caso es en sentido de las manecillas del reloj. c) Use la regla de la mano derecha número 2 para demostrar que estas corrientes parásitas conducen a una fuerza magnética sobre la placa que se dirige como se muestra en la figura. Puesto que la corriente parásita inducida siempre produce una fuerza retardadora cuando la placa entra o sale del campo, la placa en balanceo rápidamente llega al reposo.

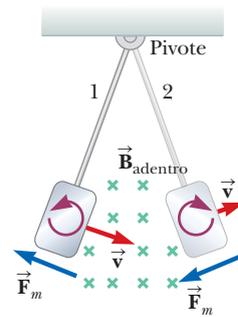


Figura PC20.9

- Un imán de barra se suelta hacia un anillo conductor que yace en el piso. Conforme el imán cae hacia el anillo, ¿se mueve como un objeto en caída libre? Explique.
- Un trozo de aluminio se suelta verticalmente hacia abajo entre los polos de un electroimán. ¿El campo magnético afecta la velocidad del aluminio? *Sugerencia:* Lea la pregunta conceptual 9.
- Cuando el interruptor de la figura PC20.12a está cerrado, la corriente se establece en la bobina y los anillos de metal saltan hacia arriba (figura PC20.12b). Explique este comportamiento.

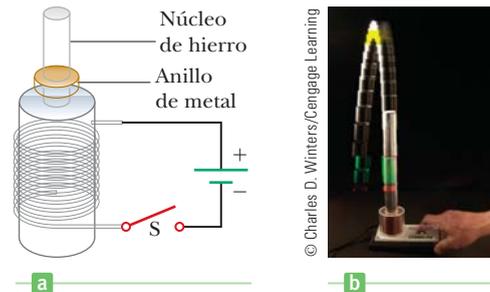


Figura PC20.12 Preguntas conceptuales 12 y 13.

- Suponer que la batería en la figura PC20.12a se sustituye por una fuente de CA y el interruptor se mantiene cerrado. Si se mantiene cerrado, el anillo de metal en la parte superior del solenoide se calienta. ¿Por qué?
- Un imán se usa para causar una chispa en una bujía en muchas podadoras modernas. Un magneto consiste en un imán permanente montado sobre un volante, de modo que gira frente a una bobina fija. Explique cómo este arreglo genera una diferencia de potencial suficientemente grande para causar la chispa.

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- 1.** denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

20.1 Fem inducida y flujo magnético

- Un campo magnético uniforme de 0.50 T de magnitud se dirige perpendicular al plano de una espira rectangular que tiene dimensiones de 8.0 por 12 cm. Encuentre el flujo magnético a través de la espira.
- Encuentre el flujo del campo magnético de la Tierra, de 5.00×10^{-5} T, a través de una espira cuadrado de 20.0 cm^2 de área cuando el campo a) es perpendicular al plano de la espira, b) forma un ángulo de 30.0° con la normal al plano de la espira y c) forma un ángulo de 90.0° con la normal al plano.

- Una espira circular de 12.0 cm de radio se coloca en un campo magnético uniforme. a) Si el campo se dirige perpendicular al plano de la espira y el flujo magnético a través de la espira es $8.00 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$, ¿cuál es la intensidad del campo magnético? b) Si el campo magnético se dirige paralelo al plano de la espira, ¿cuál es el flujo magnético a través de la espira?
- Un alambre largo recto, que porta una corriente de 2.00 A, se coloca a lo largo del eje de un cilindro de 0.500 m de radio y una longitud de 3.00 m. Determine el flujo magnético total a través del cilindro.

5. Un alambre largo recto se encuentra en el plano de una bobina circular con un radio de 0.010 m. El alambre porta una corriente de 2.0 A y se coloca a lo largo de un diámetro de la bobina. a) ¿Cuál es el flujo neto a través de la bobina? b) Si el alambre pasa a través del centro de la bobina y es perpendicular al plano de la bobina, ¿cuál es el flujo neto a través de la bobina?
6. Un solenoide de 400 espiras, 36.0 cm de longitud y 3.00 cm de radio porta una corriente de 5.00 A. Encuentre a) la intensidad del campo magnético dentro de la bobina en su punto medio y b) el flujo magnético a través de un área transversal circular del solenoide en su punto medio.

7. **M** Un cubo con aristas de longitud $\ell = 2.5$ cm es colocado como se muestra en la figura P20.7. A través de la región existe un campo magnético uniforme con componentes $B_x = +5.0$ T, $B_y = +4.0$ T y $B_z = +3.0$ T. a) Calcule el flujo a través de la cara sombreada del cubo. b) ¿Cuál es el flujo total que sale del volumen encerrado por el cubo (esto es: el flujo total a través de las seis caras)?

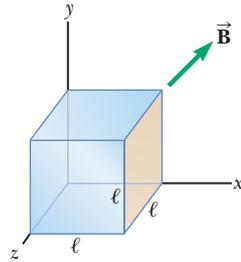


Figura P20.7

20.2 Ley de inducción de Faraday y ley de Lenz

8. **BIO** La estimulación magnética transcranial (TMS, por sus siglas en inglés) es una técnica no invasiva que se usa para estimular regiones del cerebro humano. Una pequeña bobina se coloca en el cuero cabelludo y un breve estallido de corriente en la bobina produce un campo magnético que varía rápidamente dentro del cerebro. La fem inducida puede ser suficiente para estimular actividad neuronal. Uno de tales dispositivos genera un campo magnético dentro del cerebro que se eleva de cero a 1.5 T en 120 ms. Determine la fem inducida dentro de un círculo de tejido de 1.6 mm de radio y que es perpendicular a la dirección del campo.
9. Tres espiras de alambre se mueven cerca de un alambre largo y recto que conduce una corriente como en la figura P20.9. ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida, en su caso, en a) espira A, b) espira B y c) espira C.

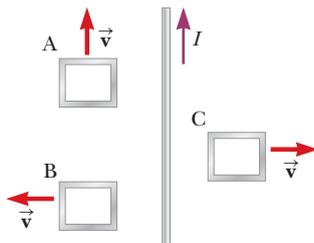


Figura P20.9

0.20 s, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida promedio en él durante este tiempo?

11. Una espira de alambre de 0.30 m de radio yace de modo que un campo magnético externo, de 0.30 T de magnitud, es perpendicular a la espira. El campo invierte su dirección y su magnitud cambia a 0.20 T en 1.5 s. Encuentre la magnitud de la fem inducida promedio en la espira durante este tiempo.

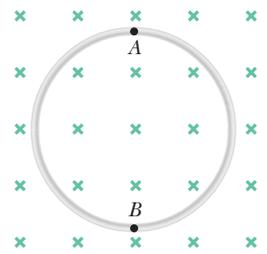


Figura P20.10
Problemas 10, 12 y 22

12. Una espira circular de alambre, de 12.0 cm de radio, se coloca en un campo magnético que se dirige perpendicular al plano de la espira, como se muestra en la figura P20.10. Si el campo disminuye a la razón de 0.050 0 T/s en cierto intervalo, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida en la espira durante este intervalo?
13. Un técnico con una banda circular de metal en la muñeca mueve la mano en un campo magnético uniforme de magnitud 2.5 T en un tiempo de 0.18 s. Si el diámetro de la banda es de 6.5 cm y el campo está en un ángulo de 45° con el plano de la banda de metal mientras que la mano está en el campo, encuentre la magnitud de la fem promedio inducida en la banda.

14. En la figura P20.14, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en la resistencia en el instante en que se cierra el interruptor?

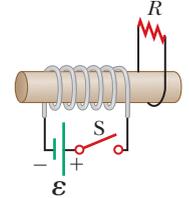


Figura P20.14

15. Un imán de barra se coloca cerca de una bobina de alambre, como se muestra en la figura P20.15. ¿Cuál es la dirección de la corriente en la resistencia cuando el imán se mueve a) a la izquierda y b) a la derecha?

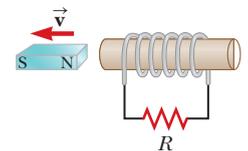


Figura P20.15

16. Encontrar la dirección de la corriente en la resistencia que se muestra en la figura P20.16 a) en el instante en que se cierra el interruptor, b) después de que el interruptor ha estado cerrado durante varios minutos, y c) en el instante en que el interruptor se abre.

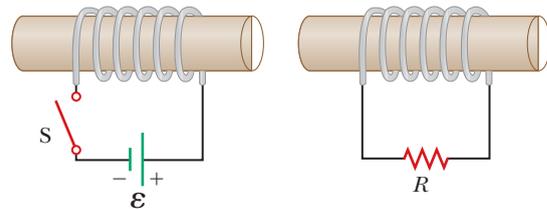


Figura P20.16

10. La espira flexible de la figura P20.10 tiene un radio de 12 cm y está en un campo magnético de 0.15 T de intensidad. La espira se sujeta en los puntos A y B y se estira hasta que su área casi es cero. Si cerrar la espira tarda

17. Un circuito circular de alambre se encuentra por debajo de un cable largo por el que circula una corriente que va en aumento como en la figura P20.17a. a) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el circuito, si es el

caso? b) Supongamos ahora que el circuito está al lado del mismo cable como en P20.17b. ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en el circuito, si es el caso? Explique sus respuestas.

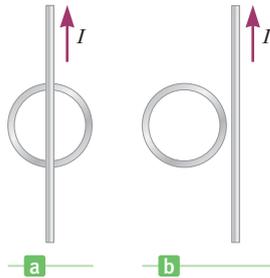


Figura P20.17

18. Una espira de alambre cuadrado de una sola vuelta $\ell = 1.00$ cm por lado, se coloca dentro de un solenoide que tiene una sección transversal circular de $r = 3.00$ cm, como se muestra en la figura P20.18. El solenoide tiene 20.0 cm de largo y se devana con 100 espiras de alambre. a) Si la corriente en el solenoide es de 3.00 A, ¿cuál es el flujo a través de la espira?

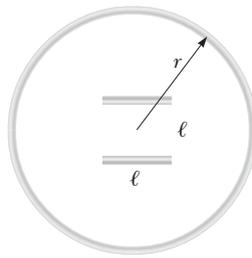


Figura P20.18

b) Si la corriente en el solenoide se reduce a cero en 3.00 s, ¿cuál es la magnitud de la fem inducida promedio en la espira?

19. **PG** Un solenoide de 300 espiras, con una longitud de 20.0 cm y un radio de 1.50 cm, porta una corriente de 2.00 A. Una segunda bobina de cuatro espiras se enrolla apretadamente alrededor de este solenoide, de modo que se puede considerar que tiene el mismo radio que el solenoide. La corriente en el solenoide de 300 espiras aumenta de manera estable hasta 5.00 A en 0.900 s. a) Use la ley de Ampere para calcular el campo magnético inicial en medio del solenoide de 300 espiras. b) Calcule el campo magnético del solenoide de 300 espiras después de 0.900 s. c) Calcule el área de la bobina de 4 espiras. d) Calcule el cambio en el flujo magnético a través de la bobina de 4 espiras durante el mismo periodo. e) Calcule la fem inducida promedio en la bobina de 4 espiras. ¿Es igual a la fem inducida instantánea? f) ¿Por qué en este cálculo podría usted despreciar las aportaciones al campo magnético por parte de la corriente en la bobina de 4 espiras?

20. **M** Una bobina circular, que encierra un área de 100 cm², está hecha de 200 espiras de alambre de cobre. El alambre del que está hecha la bobina tiene una resistencia de 5.0 Ω y los extremos del alambre se conectan para formar un circuito cerrado. Inicialmente, un campo magnético uniforme de 1.1 T apunta en forma perpendicular hacia arriba a través del plano de la bobina. Entonces la dirección del campo se invierte de modo que el campo magnético final tiene una magnitud de 1.1 T y apunta hacia abajo a través de la bobina. Si el tiempo que se requiere para que el campo invierta su dirección es de 0.10 s,

¿qué corriente promedio fluye a través de la bobina durante este tiempo?

21. **BIO** Para monitorear la respiración de un paciente de hospital, un delgado cinturón se ciñe alrededor de su pecho, como en la figura P20.21. El cinturón es una bobina de 200 espiras. Cuando el paciente inhala, el área que encierra la bobina aumenta en 39.0 cm². La magnitud del campo magnético de la Tierra es 50.0 μ T y forma un ángulo de 28.0° con el plano de la bobina. Suponiendo que un paciente tarda 1.80 s en inhalar, encuentre la magnitud de la fem inducida promedio en la bobina durante este tiempo.

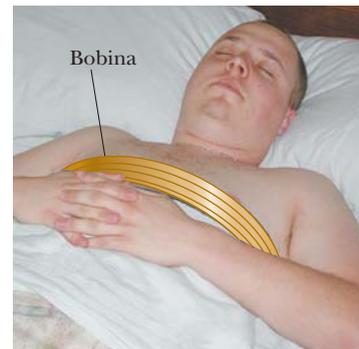


Figura P20.21

22. **CIC S** Una bobina de alambre circular de N espiras, de radio r , yace en el plano xy , como se muestra en la figura P20.10. Se enciende un campo magnético uniforme y aumenta de manera estable desde 0 hasta B_0 en la dirección z positiva en t segundos. a) Encuentre una expresión simbólica para la fem que se induce en la bobina, \mathcal{E} , en términos de las variables dadas. b) Al mirar hacia abajo el plano xy desde el eje z positivo, ¿la dirección de la corriente inducida es en sentido de las manecillas del reloj o en dirección contraria? c) Si cada espira tiene resistencia R , encuentre una expresión para la magnitud de la corriente inducida, I .

20.3 Fem de movimiento

23. Un camión lleva una viga de acero de longitud 15.0 m en una autopista. Un accidente hace que la viga sea lanzada del camión y se desliza horizontalmente por el suelo a una velocidad de 25.0 m/s. La velocidad del centro de masa de la viga está dirigida hacia el norte, mientras que la viga mantiene una orientación longitudinal este-oeste. La componente vertical del campo magnético de la Tierra en este lugar tiene una magnitud de 35.0 μ T. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida entre los extremos de la viga?

24. 2.00 m de alambre se sostienen en una dirección este-oeste y se mueven horizontalmente hacia el norte con una velocidad de 15.0 m/s. La componente vertical del campo magnético de la Tierra en esta región es 40.0 μ T y se dirige hacia abajo. Calcule la fem inducida entre los extremos del alambre y determine cuál extremo es positivo.

25. Una camioneta pickup tiene un ancho de 79.8 pulgadas. Si viaja hacia el norte a 37 m/s a través de un campo

magnético con componente vertical de $35 \mu\text{T}$, ¿qué magnitud de fem se induce entre el conductor y el lado del pasajero de la camioneta?

26. **CIC** Un imán se mantiene estacionario, mientras que una espira circular de alambre se mueve hacia el imán a una velocidad constante en la posición *A* como en la figura P20.26. La espira pasa por el imán en la posición *B* y se aleja del imán en la posición *C*. Encuentre la dirección de la corriente inducida en el circuito con la ley de Lenz a) en la posición *A*, y b) en la posición *C*. c) ¿Cuál es la corriente inducida en el circuito en la posición *B*? Explique.

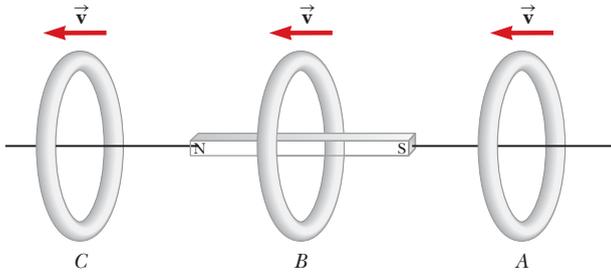


Figura P20.26 Problemas 26 y 43.

27. **M** Un automóvil tiene una antena de radio vertical de 1.20 m de largo. El automóvil viaja a 65.0 km/h sobre un camino horizontal donde el campo magnético de la Tierra es $50.0 \mu\text{T}$, que se dirige hacia el norte y hacia abajo en un ángulo de 65.0° bajo la horizontal. a) Especifique la dirección en que debe moverse el automóvil para generar la fem máxima de movimiento en la antena, con la parte superior de la antena positiva en relación con el fondo. b) Calcule la magnitud de esta fem inducida.
28. **CIC** Una astronauta se conecta a su nave espacial mediante una cuerda de amarre de 25 m de largo mientras ella y la nave espacial orbitan la Tierra en una trayectoria circular con una velocidad de $3.0 \times 10^3 \text{ m/s}$. En un instante, el voltaje medido entre los extremos de un alambre incrustado en el cordón se mide en 0.45 V. Suponga que la dimensión larga del alambre es perpendicular al componente vertical del campo magnético de la Tierra en dicho instante. a) ¿Cuál es la magnitud de la componente vertical del campo de la Tierra en esta posición? b) ¿El voltaje medido cambia conforme el sistema se mueve desde una posición a otra? Explique.

29. La figura P20.29 muestra una barra de masa $m = 0.200 \text{ kg}$ que puede deslizarse sin fricción sobre un par de carriles

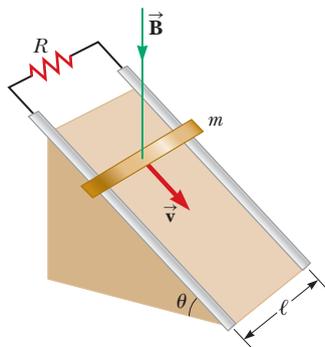


Figura P20.29

separados por una distancia $\ell = 1.20 \text{ m}$ situada en un plano inclinado que forma un ángulo $\theta = 25.0^\circ$ con respecto al suelo. La resistencia es $R = 1.00 \Omega$, y un campo magnético uniforme de magnitud $B = 0.500 \text{ T}$ está dirigido hacia abajo, perpendicular al suelo, sobre toda la región a través de la cual se mueve la barra. ¿Con qué velocidad constante v se desliza la barra a lo largo de los rieles?

30. Considere el arreglo que se muestra en la figura P20.30. Suponga que $R = 6.00 \Omega$, $\ell = 1.20 \text{ m}$ y un campo magnético uniforme de 2.50 T se dirige *hacia* la página. ¿Con qué velocidad se debe mover la barra para producir una corriente de 0.500 A en el resistor?

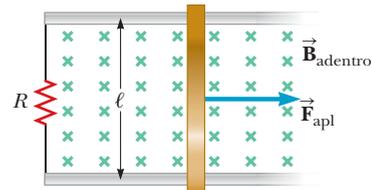


Figura P20.30 Problemas 30, 56 y 59

20.4 Generadores

31. Una bobina cuadrada de alambre de lado 2.80 cm se coloca en un campo magnético uniforme de magnitud 1.25 T dirigido hacia la página como en la figura P20.31. La bobina tiene 28.0 vueltas y una resistencia de 0.780 Ω . Si la bobina se hace girar en un ángulo de 90.0° sobre el eje horizontal 0.335 s, halle a) la magnitud de la fem promedio inducida en la bobina durante esta rotación y b) la corriente promedio inducida en la bobina durante esta rotación.

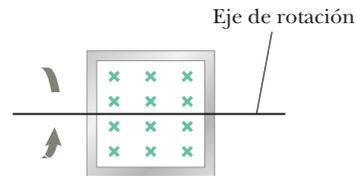


Figura P20.31

32. Una bobina de alambre cuadrada de 100 espiras, de 0.040 m^2 de área, gira en torno a un eje vertical a 1500 rev/min, como se indica en la figura P20.32. El componente horizontal del campo magnético de la Tierra en la ubicación de la bobina es $2.0 \times 10^{-5} \text{ T}$. Calcule la fem máxima inducida en la bobina por el campo de la Tierra.

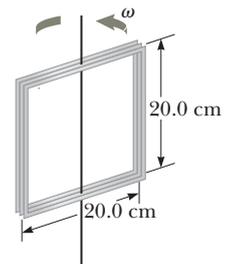


Figura P20.32

33. **BIO** Se realiza considerable trabajo científico en la actualidad para determinar si los campos magnéticos oscilatorios débiles, como los que se encuentran cerca de las líneas de transmisión eléctrica exteriores, pueden afectar la salud humana. Un estudio indica que un campo magnético de 1.0×10^{-3}

T de magnitud, que oscila a 60 Hz, puede estimular los eritrocitos para volverse cancerosos. Si el diámetro de un eritrocito es $8.0 \mu\text{m}$, determine la fem máxima que se puede generar en torno al perímetro de la célula.

34. Una bobina plana, que encierra un área de 0.10 m^2 gira a 60 rev/s , con su eje de rotación perpendicular a un campo magnético de 0.20 T . a) Si en la bobina hay 1 000 espiras, ¿cuál es el máximo voltaje inducido en la bobina? b) Cuando ocurre el máximo voltaje inducido, ¿cuál es la orientación de la bobina con respecto al campo magnético?
35. En un modelo de generador CA, una bobina rectangular de 500 espiras, de 8.0 por 20 cm , gira a 120 rev/min en un campo magnético uniforme de 0.60 T . a) ¿Cuál es la fem máxima inducida en la bobina? b) ¿Cuál es el valor instantáneo de la fem en la bobina a $t = (\pi/32) \text{ s}$? Suponga que la fem es cero en $t = 0$. c) ¿Cuál es el menor valor de t para el cual la fem tendrá su máximo valor?
36. Un motor tiene bobinas con una resistencia de 30Ω y opera a partir de un voltaje de 240 V . Cuando el motor opera a su velocidad máxima, la fuerza contraelectromotriz es 145 V . Determine la corriente en las bobinas a) cuando el motor se enciende por primera vez y b) cuando el motor alcanza su velocidad máxima. c) Si la corriente en el motor es 6.0 A en algún instante, ¿cuál es la fuerza contraelectromotriz en ese tiempo?
37. Una bobina de 10.0 espiras adquiere la forma de una elipse que tiene un eje mayor de 10.0 cm y un eje menor de 4.00 cm . La bobina gira a 100 rpm en una región donde la magnitud del campo magnético de la Tierra es $55 \mu\text{T}$. ¿Cuál es el voltaje máximo inducido en la bobina si el eje de rotación de la bobina es a lo largo de su eje mayor y se alinea a) perpendicular al campo magnético de la Tierra y b) paralelo al campo magnético de la Tierra? *Nota:* El área de una elipse está dada por $A = \pi ab$, donde a es la longitud del semieje mayor y b es la longitud del semieje menor.

20.5 Autoinductancia

38. Un técnico enrolla alambre en torno a un tubo de 36 cm de longitud que tiene un diámetro de 8.0 cm . Cuando los devanados están equitativamente dispersos sobre toda la longitud del tubo, el resultado es un solenoide que contiene 580 espiras de alambre. a) Determine la autoinductancia de este solenoide. b) Si la corriente en este solenoide aumenta a la tasa de 4.0 A/s , ¿cuál es la fem autoinducida en el solenoide?
39. La corriente en una bobina cambia de 3.5 a 2.0 A en 0.50 s . Si la fem inducida promedio en la bobina es 12 mV , ¿cuál es la autoinductancia de la bobina?
40. **S** Demuestre que las dos expresiones para inductancia dadas por

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad \text{y} \quad L = \frac{-\mathcal{E}}{\Delta I/\Delta t}$$

tienen las mismas unidades.

41. **M** Un solenoide de 2.5 cm de radio tiene 400 espiras y una longitud de 20 cm . Encuentre a) su inductancia y b) razón a la que debe cambiar la corriente a través de él para producir una fem de 75 mV .
42. Una fem de 24.0 mV se induce en una bobina de 500 espiras cuando la corriente cambia a una tasa de 10.0 A/s . ¿Cuál es el flujo magnético a través de cada espira de la bobina en un instante cuando la corriente es de 4.00 A ?

20.6 Circuitos RL

43. Un electroimán se puede modelar como un inductor en serie con una resistencia. Considere la posibilidad de un gran electroimán de inductancia $L = 12.0 \text{ H}$ y la resistencia $R = 4.50 \Omega$ conectados a una batería de 24.0 V y un interruptor como en la figura P20.43. Después de que el interruptor se cierra, encuentre a) la corriente máxima soportada por el electroimán, b) la constante de tiempo del circuito y c) el tiempo que toma la corriente para llegar a 95.0% de su valor máximo.
44. Un circuito RL con $L = 3.00 \text{ H}$ y un circuito RC con $C = 3.00 \mu\text{F}$ tiene la misma constante de tiempo. Si los dos circuitos tienen la misma resistencia R , a) ¿cuál es el valor de R y b) cuál es esta constante de tiempo común?

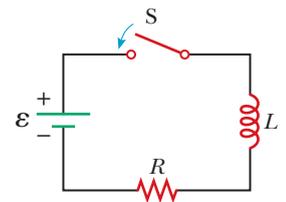


Figura P20.43
Problemas 43, 45, 46 y 48

45. Una batería se conecta en serie con un resistor de 0.30Ω y un inductor, como se muestra en la figura P20.43. El interruptor se cierra en $t = 0$. La constante de tiempo del circuito es 0.25 s , y la máxima corriente en el circuito es 8.0 A . Encuentre a) la fem de la batería, b) la inductancia del circuito, c) la corriente en el circuito después de transcurrida una constante de tiempo y d) el voltaje a través del resistor y el voltaje a través del inductor después de transcurrida una constante de tiempo.
46. Un inductor de 25 mH , un resistor de 8.0Ω y una batería de 6.0 V se conectan en serie, figura P20.43. El interruptor se cierra en $t = 0$. Determine la caída de voltaje a través del resistor a) en $t = 0$ y b) después de transcurrida una constante de tiempo. Además, encuentre la caída de voltaje a través del inductor c) en $t = 0$ y d) después de transcurrida una constante de tiempo.
47. Calcule la resistencia en un circuito RL en el que $L = 2.50 \text{ H}$ y la corriente aumenta a 90.0% de su valor final en 3.00 s .
48. Considere el circuito que se muestra en la figura P20.43. Considere $\mathcal{E} = 6.00 \text{ V}$, $L = 8.00 \text{ mH}$ y $R = 4.00 \Omega$. a) ¿Cuál es la constante de tiempo inductiva del circuito? b) Calcule la corriente en el circuito $250 \mu\text{s}$ después de que se cierra el interruptor. c) ¿Cuál es el valor de la corriente de estado estacionario final? d) ¿Cuánto tarda la corriente en alcanzar 80.0% de su valor máximo?

20.7 Energía almacenada en un campo magnético

49. a) Si un inductor que porta una corriente de 1.70 A almacena una energía de 0.300 mJ, ¿cuál es su inductancia?
 b) ¿Cuánta energía almacena el mismo inductor si porta una corriente de 3.0 A?
50. Un solenoide de 300 espiras tiene un radio de 5.00 cm y una longitud de 20.0 cm. Determine a) la inductancia del solenoide y b) la energía almacenada en el solenoide cuando la corriente en sus devanados es 0.500 A.
51. **M** Una batería de 24 V se conecta en serie con un resistor y un inductor, con $R = 8.0 \Omega$ y $L = 4.0 \text{ H}$, respectivamente. Determine la energía almacenada en el inductor a) cuando la corriente alcanza su valor máximo y b) una constante de tiempo después de cerrar el interruptor.
52. **PG** Una longitud de 60.0 m de alambre de cobre aislado se enrolla para formar un solenoide de 2.0 cm de radio. El alambre de cobre tiene un radio de 0.50 mm. a) ¿Cuál es la resistencia del alambre? b) Si trata cada espira del solenoide como una circunferencia, ¿cuántas espiras se pueden hacer con el alambre? c) ¿Cuán largo es el solenoide resultante? d) ¿Cuál es la autoinductancia del solenoide? e) Si el solenoide se une a una batería con una fem de 6.0 V y resistencia interna de 350 m Ω , calcule la constante de tiempo del circuito. f) ¿Cuál es la corriente máxima que se logra? g) ¿Cuánto tarda en alcanzar 99.9% de su corriente máxima? h) ¿Qué energía máxima se almacena en el inductor?

Problemas adicionales

53. Dos espiras circulares de alambre rodean una barra de aislamiento como en la figura P20.53. La espira 1 lleva una corriente I en la dirección de las agujas del reloj cuando se mira desde el extremo izquierdo. Si la espira 1 se mueve hacia la espira 2, que permanece inmóvil, ¿cuál es la dirección de la corriente inducida en la espira 2 cuando se ve desde el extremo izquierdo?

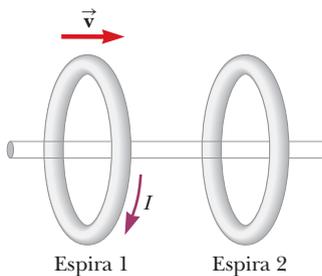


Figura P20.53

54. Una espira circular de alambre de resistencia $R = 0.500 \Omega$ y radio $r = 8.00 \text{ cm}$ está en un campo magnético uniforme dirigido hacia afuera de la página como en la figura P20.54. Si una corriente hacia la derecha de $I = 2.50 \text{ mA}$ es inducida en el circuito, a) ¿el campo magnético aumenta o disminuye en el tiempo? b) Halle la velocidad a la que el campo está cambiando con el tiempo.

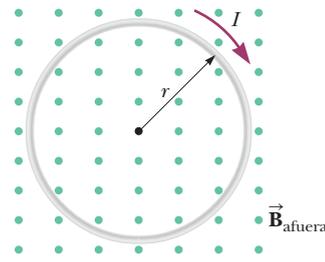


Figura P20.54

55. Una bobina rectangular con resistencia R tiene N vueltas, cada una de longitud ℓ y anchura w , como se muestra en la figura P20.55. La bobina se mueve en un campo magnético uniforme \vec{B}_{adentro} con \vec{v} velocidad constante. ¿Cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza magnética total de la bobina (a) al entrar en el campo magnético, b) al moverse dentro del campo y c) al salir del campo?

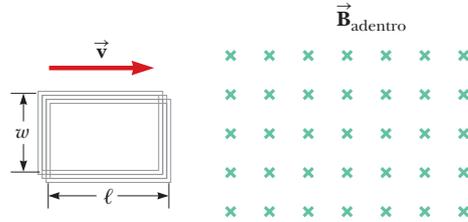


Figura P20.55

56. **CIC** Una barra conductora de longitud ℓ , se mueve hacia la derecha sobre dos rieles sin fricción, como se muestra en la figura P20.30. Un campo magnético uniforme dirigido hacia la página tiene una magnitud de 0.30 T. Suponga $\ell = 35 \text{ cm}$ y $R = 9.0 \Omega$. a) ¿A qué velocidad constante tendrían que moverse las barras para producir una corriente de 8.5 mA en la resistencia? ¿Cuál es la dirección de esta corriente inducida? b) ¿A qué razón es entregada la energía a la resistencia? c) Explique el origen de la energía que se entrega a la resistencia.
57. Una bobina de alambre de 820 espiras, de 24.0 Ω de resistencia, se coloca en la parte superior de un solenoide de 7.00 cm de largo y 12500 espiras, como en la figura P20.57. Tanto bobina como solenoide tienen áreas transversales de $1.00 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. a) ¿Cuánto tarda la corriente en el solenoide en alcanzar 0.632 veces su valor máximo? b) Determine la fuerza contraelectromotriz promedio causada por la autoinductancia del solenoide durante este intervalo. El campo magnético producido por el solenoide en la posición de la bobina es la mitad de intenso que el campo en el centro del solenoide. c) Determine

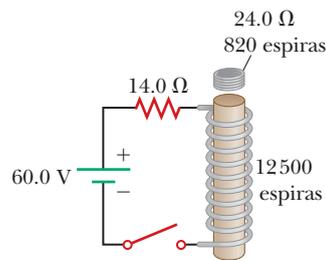


Figura P20.57

la razón de cambio promedio en flujo magnético a través de cada espira de la bobina durante el intervalo establecido. d) Encuentre la magnitud de la corriente inducida promedio en la bobina.

58. **CIC** Una nave espacial está en una órbita circular de 3.0×10^4 km de radio en torno a un pulsar de 2.0×10^{30} kg. El campo magnético del pulsar a dicha distancia radial es 1.0×10^2 T dirigido perpendicular a la velocidad de la nave espacial. La nave espacial tiene 0.20 km de largo, con un radio de 0.040 km y se mueve contra las manecillas del reloj en el plano xy en torno al pulsar. a) ¿Cuál es la velocidad de la nave espacial? b) Si el campo magnético apunta en la dirección z positiva, ¿la fem inducida es de la parte posterior al frente de la nave espacial, o de lado a lado? c) Calcule la fem inducida. d) Describa los riesgos para los astronautas dentro de cualquier nave espacial que se mueve en la vecindad de un pulsar.
59. **CIC** Una barra conductora de longitud ℓ se mueve sobre dos rieles sin fricción horizontales, como en la figura P20.30. Una fuerza constante de 1.00 N de magnitud mueve la barra con una velocidad uniforme de 2.00 m/s a través de un campo magnético \vec{B} que se dirige hacia la página. a) ¿Cuál es la corriente en un resistor R de 8.00Ω ? b) ¿Cuál es la razón de disipación de energía en el resistor? c) ¿Cuál es la potencia mecánica entregada por la fuerza constante?
60. Un solenoide largo de radio $r = 2.00$ cm se enrolla con 3.50×10^3 vueltas/m, y lleva una corriente que cambia a razón de 28.5 A/s como en la figura P20.60. ¿Cuál es la magnitud de la fem inducida en la espira cuadrada conductora que rodea el centro del solenoide?

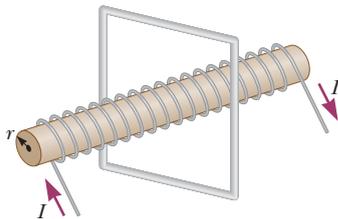


Figura P20.60

61. El relámpago que se muestra en la figura P20.61 pasa a 200 m de una bobina de 100 espiras orientada como se muestra. Si la corriente en el relámpago cae de 6.02×10^6 A a cero en $10.5 \mu\text{s}$, ¿cuál es el voltaje promedio inducido en la bobina? Suponga que la distancia al centro de la bobina determina el campo magnético promedio en la posición de la bobina. Trate el relámpago como un largo alambre vertical.

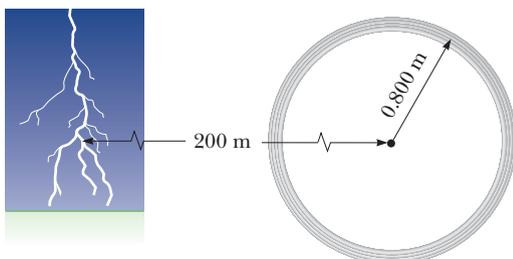


Figura P20.61

62. La espira cuadrada de la figura P20.62 está hecha de alambres con una resistencia en serie total de 10.0Ω . Se coloca en un campo magnético uniforme de 0.100 T que se dirige perpendicular hacia el plano del papel. La espira, que puede girar en cada esquina, se jala como se muestra hasta que la separación entre los puntos A y B es 3.00 m. Si este proceso tarda 0.100 s, ¿cuál es la corriente promedio generada en la espira? ¿Cuál es la dirección de la corriente?

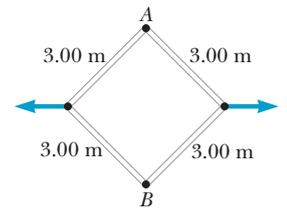


Figura P20.62

63. El campo magnético que se muestra en la figura P20.63 tiene una magnitud uniforme de 25.0 mT que se dirige hacia el papel. El diámetro inicial de la espira es 2.00 cm. a) El alambre rápidamente se tensa y la espira se encoge a un diámetro de cero en 50.0 ms. Determine el voltaje promedio inducido entre los puntos extremos A y B . Incluya la polaridad. b) Suponga que la espira no se afecta, pero que el campo magnético aumenta a 100 mT en 4.00×10^{-3} s. Determine el voltaje promedio a través de las terminales A y B , incluida polaridad, durante este periodo.

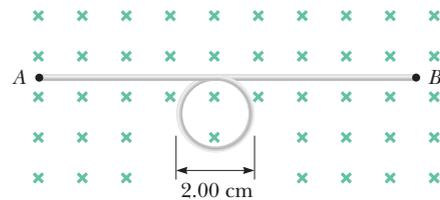


Figura P20.63

64. Un anillo de aluminio de 5.00 cm de radio y $3.00 \times 10^{-4} \Omega$ de resistencia se coloca en torno a la parte superior de un largo solenoide con núcleo de aire con 1000 espiras por metro y un radio más pequeño de 3.00 cm, como en la figura P20.64. Si la corriente en el solenoide aumenta a razón constante de 270 A/s, ¿cuál es la corriente inducida en el anillo? Suponga que el campo magnético que produce el solenoide sobre el área en el extremo del solenoide es la mitad de intenso que el campo en el centro del solenoide. Suponga también que el solenoide produce un campo despreciable afuera de su área transversal.

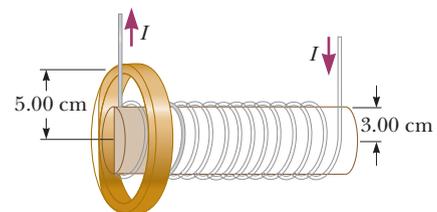


Figura P20.64

65. En la figura P20.65 (página 722), el eje que rueda, de 1.50 m de largo, se jala a lo largo de rieles horizontales con una velocidad constante $v = 3.00$ m/s. Un resistor

$R = 0.400 \Omega$ se conecta a los rieles en los puntos a y b , uno directamente opuesto al otro. (Las ruedas tienen buen contacto eléctrico con los rieles, de modo que eje, rieles y R forman un circuito cerrado. La única resistencia significativa en el circuito es R .) Un campo magnético uniforme $B = 0.800 \text{ T}$ se dirige en forma vertical hacia abajo. a) Encuentre la corriente inducida I en el resistor. b) ¿Qué fuerza horizontal \vec{F} se requiere para mantener el eje en rodamiento con velocidad constante? c) ¿Cuál extremo del resistor, a o b , está al potencial eléctrico más alto? d) Después de que el eje rueda por el resistor, ¿la corriente en R invierte su dirección? Explique su respuesta.

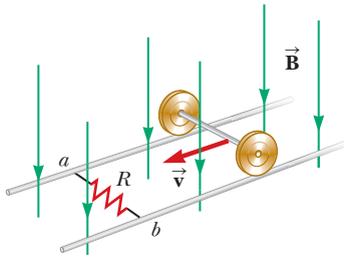


Figura P20.65

66. **CIC S** Una bobina cuadrada de N espiras, con lado ℓ y resistencia R , se jala hacia la derecha con velocidad constante v en la dirección x positiva en presencia de un campo magnético uniforme B que actúa perpendicular a la bobina, como se muestra en la figura P20.66. En $t = 0$, el lado derecho de la bobina está en el borde del campo. Después de transcurrido un tiempo t , toda la bobina está en la región donde $B = 0$. En términos de las cantidades N , B , ℓ , v y R , encuentre expresiones simbólicas para

- a) la magnitud de la fem inducida en la espira durante el intervalo t , b) la magnitud de la corriente inducida en la bobina, c) la potencia entregada a la bobina y d) la fuerza que requiere para remover la bobina del campo. e) ¿Cuál es la dirección de la corriente inducida en la espira? ¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre la espira mientras se jala fuera del campo?

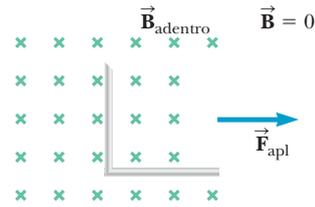


Figura P20.66

67. **S** Una espira conductora rectangular de masa M , resistencia R y dimensiones ℓ y w , cae desde el reposo en un campo magnético \vec{B} , como se muestra en la figura P20.67. Durante el intervalo antes de que el borde superior de la espira llegue al campo, la espira se acerca a una velocidad terminal v_T
- a) Demuestre que

$$v_T = \frac{MgR}{B^2 w^2}$$

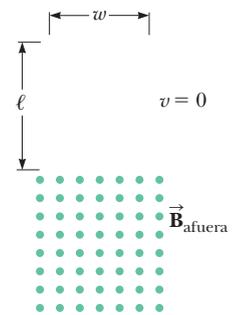


Figura P20.67

- b) ¿Por qué es v_T proporcional a R ? c) ¿Por qué es inversamente proporcional a B^2 ?



Arecibo, un gran radiotelescopio en Puerto Rico, recoge radiación electromagnética en la forma de ondas de radio. Estas largas longitudes de onda pasan a través de nubes de polvo que oscurecen, lo que permite a los astrónomos crear imágenes de la región central de la Vía Láctea, que no se podrían observar en el espectro visible.

© Bettmann/Corbis

Circuitos de corriente alterna y ondas electromagnéticas

21

Cada vez que usted enciende un televisor, un equipo de sonido o cualquier otro aparato eléctrico, hace que una corriente alterna (CA) proporcione la potencia para operarlos. El estudio de los circuitos CA comienza con el examen de las características de un circuito que contiene una fuente de fem y algún otro elemento de circuito: un resistor, un capacitor o un inductor. Luego se examina lo que ocurre cuando dichos elementos se conectan en combinación unos con otros. El estudio se limita a configuraciones simples en serie de los tres tipos de elementos.

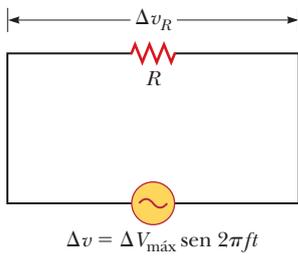
Este capítulo concluye con un análisis de las ondas electromagnéticas, que están compuestas de campos eléctricos y magnéticos fluctuantes. Las **ondas electromagnéticas** en forma de luz visible le permiten a usted ver el mundo a su alrededor; las ondas infrarrojas calientan el ambiente; las ondas de radiofrecuencia transportan los programas de televisión y radio, así como la información acerca de los procesos en el centro de la galaxia; y los rayos X permiten percibir estructuras ocultas dentro de su cuerpo y estudiar las propiedades de estrellas colapsadas distantes. La luz es clave para comprender el Universo.

21.1 Resistores en un circuito CA

Un circuito CA consiste de combinaciones de elementos de circuito y un generador CA o una fuente CA, que proporciona corriente alterna. Ya vimos que la salida de un generador CA es sinusoidal y varía con el tiempo de acuerdo con

$$\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft \quad [21.1]$$

- 21.1 Resistores en un circuito CA
- 21.2 Capacitores en un circuito CA
- 21.3 Inductores en un circuito CA
- 21.4 El circuito *RLC* en serie
- 21.5 Potencia en un circuito CA
- 21.6 Resonancia en un circuito *RLC* en serie
- 21.7 El transformador
- 21.8 Predicciones de Maxwell
- 21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell
- 21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena
- 21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas
- 21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas
- 21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

**Figura activa 21.1**

Un circuito en serie que consiste de un resistor R conectado a un generador CA, que se designa mediante el símbolo



donde Δv es el voltaje instantáneo, $\Delta V_{\text{máx}}$ es el voltaje máximo del generador CA y f es la frecuencia a la que cambia el voltaje, medido en hertz (Hz). (Compare las ecuaciones 20.7 y 20.8 con la ecuación 21.1 y recuerde $\omega = 2\pi f$.) Primero considere un circuito simple que consiste de un resistor y una fuente CA (que se designa mediante el símbolo), como en la figura activa 21.1. La corriente y el voltaje contra el tiempo a través del resistor se muestran en la figura activa 21.2.

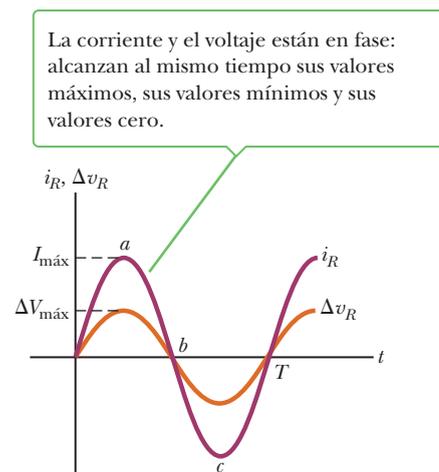
Para explicar el concepto de corriente alterna, primero analizaremos la curva de corriente frente a la curva de tiempo en la figura activa 21.2. En el punto a sobre la curva, la corriente tiene un valor máximo en una dirección, que arbitrariamente se llamó dirección positiva. Entre los puntos a y b , la corriente disminuye en magnitud pero todavía está en la dirección positiva. En el punto b , la corriente momentáneamente es cero; luego comienza a aumentar en la dirección opuesta (negativa) entre los puntos b y c . En el punto c , la corriente alcanza su valor máximo en la dirección negativa.

La corriente y el voltaje están a la par uno con otro porque varían de manera idéntica con el tiempo. **Puesto que la corriente y el voltaje alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo, se dice que están en fase.** Observe que **el valor promedio de la corriente durante un ciclo es cero** porque la corriente se mantiene en una dirección (la dirección positiva) por la misma cantidad de tiempo y a la misma magnitud que está en la dirección opuesta (la dirección negativa). Sin embargo, la dirección de la corriente no tiene efecto sobre el comportamiento del resistor en el circuito: las colisiones entre los electrones y los átomos fijos del resistor resultan en un aumento en la temperatura del resistor sin importar la dirección de la corriente.

Este análisis se cuantifica al recordar que la razón a la que se disipa la energía eléctrica en un resistor, la potencia P , es

$$P = i^2 R$$

donde i es la corriente *instantánea* en el resistor. Debido a que el efecto de calentamiento de una corriente es proporcional al *cuadrado* de la corriente, no hace diferencia si el signo asociado con la corriente es positivo o negativo. Sin embargo, el efecto de calentamiento que se produce mediante una corriente alterna con un valor máximo de $I_{\text{máx}}$ *no es el mismo* que el producido por una corriente directa del mismo valor. La razón es que la corriente alterna tiene este valor máximo sólo durante un instante de tiempo durante un ciclo. La cantidad importante en un circuito CA es un tipo especial de valor promedio de corriente, llamado **corriente rms**: la corriente directa que disipa la misma cantidad de energía en un resistor que es disipada mediante la corriente alterna real. Encontrar el promedio de la corriente alterna I , representado en la figura 21.3 a no sería útil, ya que el promedio es cero, mientras que la corriente efectiva siempre es positiva. Para encontrar la corriente rms, primero se eleva al cuadrado la corriente, luego se encuentra su valor promedio y finalmente se saca la raíz cuadrada de este valor promedio. Por lo tanto, la corriente rms es la *raíz cuadrada del promedio (mean) del cuadrado (square) de la corriente*. Puesto que i^2 varía como

Figura activa 21.2 La gráfica de la corriente y el voltaje cruza la gráfica de un resistor contra tiempo.

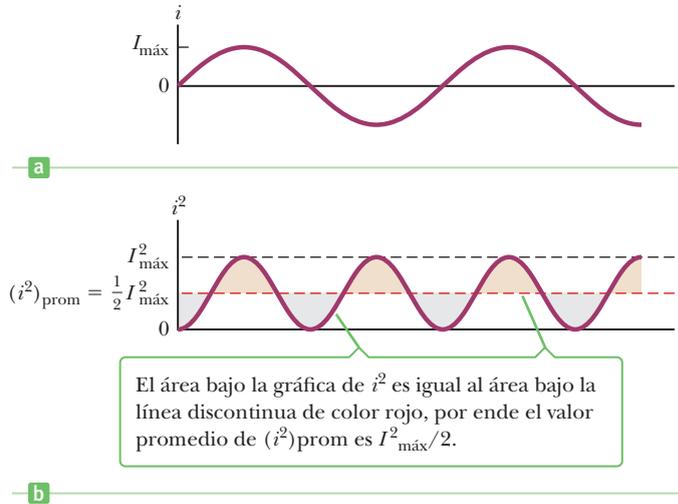


Figura 21.3 a) Gráfica de la corriente en un resistor como función del tiempo. b) Gráfica del cuadrado de la corriente en un resistor como función del tiempo. El área bajo la línea discontinua de color rojo, omite las regiones sombreadas con color, sin embargo está compuesta por la inclusión de las regiones sombreadas en gris con la misma área. Esto demuestra que el área bajo la curva de i^2 es igual al área sombreada bajo la línea discontinua de color rojo, así $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{máx}}^2/2$.

$\text{sen}^2 2\pi ft$, el valor promedio de i^2 es $\frac{1}{2} I_{\text{máx}}^2$ (figura 21.3b).¹ Por lo tanto, la corriente rms I_{rms} se relaciona con el valor máximo de la corriente alterna $I_{\text{máx}}$ mediante

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0.707 I_{\text{máx}} \quad [21.2]$$

Esta ecuación dice que una corriente alterna con un valor máximo de 3 A produce el mismo efecto de calentamiento en un resistor que una corriente directa de $(3/\sqrt{2})$ A. En consecuencia, se puede decir que la potencia promedio disipada en un resistor que porta corriente alterna I es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R$$

Los voltajes alternos también se estudian mejor en términos de voltajes rms, con una relación idéntica a la precedente,

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = 0.707 \Delta V_{\text{máx}} \quad [21.3]$$

◀ voltaje rms

donde ΔV_{rms} es el voltaje rms y $\Delta V_{\text{máx}}$ es el valor máximo del voltaje alterno.

Cuando se habla de medir un voltaje CA de 120 V desde un tomacorriente eléctrico, en realidad se entiende un voltaje rms de 120 V. Un cálculo rápido con la ecuación 21.3 muestra que tal voltaje CA en realidad tiene un valor pico de aproximadamente 170 V. En este capítulo se usan valores rms cuando se discuten corrientes y voltajes alternos. Una razón es que los amperímetros y voltímetros CA están diseñados para leer valores rms. Más aún, si se usan valores rms, muchas de las ecuaciones para corriente alterna tendrán la misma forma que las que se usan en el estudio de los circuitos de corriente directa (CD). La tabla 21.1 (página 726) resume las notaciones que se utilizan a lo largo de este capítulo.

¹Se puede demostrar que $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{máx}}^2/2$ del modo siguiente: la corriente en el circuito varía con el tiempo de acuerdo con la expresión $i = I_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft$, de modo que $i^2 = I_{\text{máx}}^2 \text{sen}^2 2\pi ft$. Por lo tanto, se puede encontrar el valor promedio de i^2 al calcular el valor promedio de $\text{sen}^2 2\pi ft$. Observe que una gráfica de $\text{cos}^2 2\pi ft$ contra el tiempo es idéntica a una gráfica de $\text{sen}^2 2\pi ft$ contra el tiempo, excepto que los puntos se recorren sobre el eje tiempo. Por ende, el promedio en el tiempo de $\text{sen}^2 2\pi ft$ es igual al promedio en el tiempo de $\text{cos}^2 2\pi ft$, tomado sobre uno o más ciclos. Esto es,

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = (\text{cos}^2 2\pi ft)_{\text{prom}}$$

Con este hecho y la identidad trigonométrica $\text{sen}^2 \theta + \text{cos}^2 \theta = 1$, se obtiene

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} + (\text{cos}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = 2(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = 1$$

$$(\text{sen}^2 2\pi ft)_{\text{prom}} = \frac{1}{2}$$

Cuando este resultado se sustituye en la expresión $i^2 = I_{\text{máx}}^2 \text{sen}^2 2\pi ft$, se obtiene $(i^2)_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 = I_{\text{máx}}^2/2$, o $I_{\text{rms}} = I_{\text{máx}}/\sqrt{2}$, donde I_{rms} es la corriente rms.

Tabla 21.1 Notación que se usa en este capítulo

	Voltaje Corriente	
Valor instantáneo	Δv	i
Valor máximo	$\Delta V_{\text{máx}}$	$I_{\text{máx}}$
Valor rms	ΔV_{rms}	I_{rms}

Considere el circuito en serie de la figura activa 21.1 activa (página 724), que consiste de un resistor conectado a un generador CA. Un resistor impide la corriente en un circuito CA, tal como lo hace en un circuito CD. Por lo tanto, la ley de Ohm es válida para un circuito CA y se tiene

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = I_{\text{rms}}R \quad [21.4a]$$

El voltaje rms a través de un resistor es igual a la corriente rms en el circuito, por la resistencia. Esta ecuación también es cierta si se usan valores máximos de corriente y voltaje:

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = I_{\text{máx}}R \quad [21.4b]$$

Examen rápido

21.1 ¿Cuál de los siguientes enunciados puede ser verdadero para un resistor que, en un circuito simple en serie, se conecta a un generador CA en operación? a) $P_{\text{prom}} = 0$ e $i_{\text{prom}} = 0$ b) $P_{\text{prom}} = 0$ e $i_{\text{prom}} > 0$ c) $P_{\text{prom}} > 0$ e $i_{\text{prom}} = 0$ d) $P_{\text{prom}} > 0$ e $i_{\text{prom}} > 0$

EJEMPLO 21.1 ¿Cuál es la corriente rms?

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito meramente resistivo.

PROBLEMA Una fuente de voltaje CA tiene una salida de $\Delta v = (2.00 \times 10^2 \text{ V}) \text{ sen } 2\pi ft$. Esta fuente se conecta a un resistor de $1.00 \times 10^2 \Omega$ como en la figura 21.1. Encuentre el voltaje rms y la corriente rms en el resistor.

ESTRATEGIA Compare la expresión para la salida de voltaje recién dada con la forma general, $\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{ sen } 2\pi ft$, y encuentre el voltaje máximo. Sustituya este resultado en la expresión para el voltaje rms.

SOLUCIÓN

Obtenga el voltaje máximo mediante comparación de la expresión dada para la salida, con la expresión general:

$$\Delta v = (2.00 \times 10^2 \text{ V}) \text{ sen } 2\pi ft \quad \Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{ sen } 2\pi ft$$

$$\rightarrow \Delta V_{\text{máx}} = 2.00 \times 10^2 \text{ V}$$

A continuación, sustituya en la ecuación 21.3 para encontrar el voltaje rms de la fuente:

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{2.00 \times 10^2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 141 \text{ V}$$

Sustituya este resultado en la ley de Ohm para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{R} = \frac{141 \text{ V}}{1.00 \times 10^2 \Omega} = 1.41 \text{ A}$$

COMENTARIOS Note cómo el concepto de valores rms permite el manejo de un circuito CA de manera cuantitativa en forma muy parecida a un circuito CD.

PREGUNTA 21.1 Verdadero o Falso: La corriente rms en un circuito CA oscila sinusoidalmente con el tiempo.

EJERCICIO 21.1 Encuentre la corriente máxima en el circuito y la potencia promedio que se entrega al circuito.

RESPUESTA 2.00 A; $2.00 \times 10^2 \text{ W}$

FÍSICA APLICADA 21.1 Campos eléctricos y tratamiento del cáncer **BIO**

Las células cancerosas se multiplican con mucha más frecuencia que la mayoría de las células normales, se dispersan en todo el cuerpo, usan sus recursos e interfieren con el funcionamiento normal. La mayoría de las terapias dañan tanto las células cancerosas como las sanas, así que encontrar métodos que hagan blanco en las células cancerosas es importante para desarrollar mejores tratamientos para la enfermedad.

Puesto que las células cancerosas se multiplican rápidamente, es natural considerar tratamientos que eviten o perturben la división celular. Los tratamientos como la quimioterapia interfieren con el ciclo de división celular, pero también pueden dañar las células sanas. Recientemente se descubrió que los campos eléctricos alternos que se producen mediante corrientes CA en el rango de 100 kHz pueden

perturbar el ciclo de división celular o frenar la división o hacer que una célula que se divide se desintegre. Las células sanas que se dividen solamente a una tasa muy lenta, son menos vulnerables que las células cancerosas de rápida división, así que tal terapia es prometedora para ciertos tipos de cáncer.

Se cree que los campos eléctricos alternos afectan el proceso de mitosis, que es la división del núcleo celular en dos conjuntos de cromosomas idénticos. Casi al final de la primera fase de la mitosis, llamada profase, se forma el huso mitótico, una estructura de filamentos finos que guía los dos conjuntos

replicados de cromosomas hacia células hijas separadas. El huso mitótico se hace a partir de una polimerización de dímeros de tubulina, una proteína con un gran momento de dipolo eléctrico. El campo eléctrico alterno ejerce fuerzas sobre estos dipolos, lo que perturba su funcionamiento adecuado.

La terapia de campo eléctrico es especialmente prometedora para el tratamiento de tumores cerebrales porque las células cerebrales sanas no se dividen y, en consecuencia, no serían dañadas por los campos eléctricos alternos. Continúa la investigación sobre tales terapias. ■

21.2 Capacitores en un circuito CA

Para entender el efecto de un capacitor sobre el comportamiento de un circuito que contiene una fuente de voltaje CA, primero revise lo que ocurre cuando un capacitor se coloca en un circuito que contiene una fuente CD, como una batería. Cuando el interruptor se cierra en un circuito en serie que contiene una batería, un resistor y un capacitor, la carga inicial sobre las placas del capacitor es cero. Por lo tanto, el movimiento de carga a través del circuito es relativamente libre y hay una gran corriente en el circuito. Conforme más carga se acumula sobre el capacitor, crece el voltaje a través de él y se opone a la corriente. Después de cierto intervalo de tiempo, que depende de la constante de tiempo RC , la corriente tiende a cero. En consecuencia, un capacitor en un circuito CD limita o impide la corriente, de modo que tiende a cero después de un breve tiempo.

Ahora considere el circuito simple en serie de la figura activa 21.4, que consiste de un capacitor conectado a un generador CA. Bosqueje las curvas de corriente contra tiempo y voltaje contra tiempo, y luego intente que las gráficas parezcan razonables. Las curvas se muestran en la figura 21.5. Primero, observe que el segmento de la curva de corriente de a a b indica que la corriente comienza en un valor más bien grande. Este valor grande se puede entender al reconocer que no hay carga sobre el capacitor en $t = 0$; como consecuencia, no hay nada en el circuito excepto la resistencia de los alambres para dificultar el flujo de carga en este instante. Sin embargo, la corriente disminuye mientras el voltaje a través del capacitor aumenta de c a d en la curva de voltaje. Cuando el voltaje está en el punto d , la corriente se invierte y comienza a aumentar en la dirección opuesta (de b a e sobre la curva de corriente). Durante este tiempo, el voltaje a través del capacitor disminuye de d a f porque las placas ahora pierden la carga que acumularon anteriormente. El resto del ciclo para voltaje y corriente es una repetición de lo que ocurrió durante la primera mitad del ciclo. La corriente alcanza un valor máximo en la dirección opuesta en el punto e sobre la curva de corriente y luego disminuye conforme se acumula el voltaje a través del capacitor.

En un circuito meramente resistivo, la corriente y el voltaje siempre están a la par uno con otro. Éste no es el caso cuando un capacitor está en el circuito. En la figura 21.5, cuando a través de un capacitor se aplica un voltaje alterno, el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de ciclo después que la corriente alcanza su valor máximo. Se dice que **el voltaje a través de un capacitor siempre se retrasa a la corriente por 90°** .

El efecto de impedimento de un capacitor en la corriente en un circuito CA se expresa en términos de un factor llamado **reactancia capacitiva** X_C , que se define como

$$X_C \equiv \frac{1}{2\pi fC}$$

[21.5]

Cuando C está en farads y f en hertz, la unidad de X_C es el ohm. Observe que $2\pi f = \omega$, la frecuencia angular.

A partir de la ecuación 21.5, conforme aumenta la frecuencia f de la fuente de voltaje, la reactancia capacitiva X_C (el efecto de impedimento del capacitor) disminuye, de modo que la corriente aumenta. A una alta frecuencia existe menos tiempo disponible para cargar el capacitor, así que menos carga y voltaje se acumulan en el capacitor, lo que se

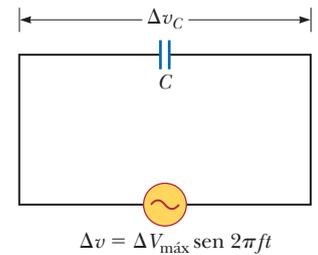


Figura activa 21.4 Circuito en serie que contiene un capacitor C conectado a un generador CA.

El voltaje alcanza su valor máximo 90° después de que la corriente alcanza su valor máximo, así que el voltaje se “retrasa” a la corriente.

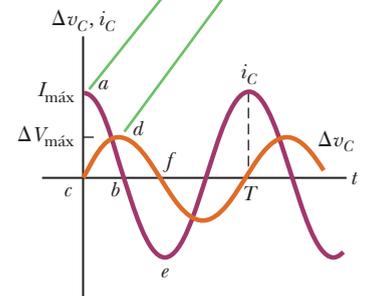


Figura activa 21.5 Gráficas de corrientes y voltaje a través de un capacitor contra el tiempo en un circuito CA.

◀ El voltaje a través de un capacitor se retrasa a la corriente por 90°

◀ Reactancia capacitiva

traduce en menos oposición al flujo de carga y, en consecuencia, a mayor corriente. La analogía entre reactancia capacitiva y resistencia significa que se puede escribir una ecuación de la misma forma que la ley de Ohm para describir los circuitos CA que contienen capacitores. Esta ecuación relaciona el voltaje rms y la corriente rms en el circuito con la reactancia capacitiva:

$$\Delta V_{C,\text{rms}} = I_{\text{máx}} X_C \quad [21.6]$$

■ EJEMPLO 21.2 Un circuito CA meramente capacitivo

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito capacitivo.

PROBLEMA Un capacitor de $8.00 \mu\text{F}$ se conecta a las terminales de un generador CA con un voltaje rms de $1.50 \times 10^2 \text{ V}$ y una frecuencia de 60.0 Hz . Encuentre la reactancia capacitiva y la corriente rms en el circuito.

ESTRATEGIA Sustituya valores en las ecuaciones 21.5 y 21.6.

SOLUCIÓN

Sustituya los valores de f y C en la ecuación 21.5:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60.0 \text{ Hz})(8.00 \times 10^{-6} \text{ F})} = 332 \Omega$$

Resuelva la ecuación 21.6 para la corriente y sustituya los valores para X_C y el voltaje rms para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{C,\text{rms}}}{X_C} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{332 \Omega} = 0.452 \text{ A}$$

COMENTARIOS De nuevo, observe cuán similar es la técnica con la de analizar un circuito CD con un resistor.

PREGUNTA 21.2 Verdadero o Falso: Mientras más grande sea la capacitancia de un capacitor, mayor será la reactancia capacitiva.

EJERCICIO 21.2 Si la frecuencia se duplica, ¿qué ocurre con la reactancia capacitiva y la corriente rms?

RESPUESTA X_C se reduce a la mitad e I_{rms} se duplica.

21.3 Inductores en un circuito CA

Ahora considere un circuito CA que consiste de un inductor conectado a las terminales de una fuente CA, como en la figura activa 21.6. (En cualquier circuito real existe alguna resistencia en el alambre que forma la bobina inductiva, pero por ahora se ignora esta consideración.) La salida de corriente variable del generador produce una fuerza contraelectromotriz que impide la corriente en el circuito. La magnitud de esta fuerza contraelectromotriz es

$$\Delta v_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [21.7]$$

La resistencia efectiva de la bobina en un circuito CA se mide mediante una cantidad llamada **reactancia inductiva**, X_L :

$$X_L \equiv 2\pi f L \quad [21.8]$$

Cuando f está en hertz y L en henrys, la unidad de X_L es el ohm. La reactancia inductiva *aumenta* con frecuencia e inductancia crecientes. Estos hechos contrastan con los capacitores, donde aumentar frecuencia o capacitancia *disminuye* la reactancia capacitiva.

Para entender el significado de la reactancia inductiva, compare la ecuación 21.8 con la ecuación 21.7. Primero, observe de la ecuación 21.8 que la reactancia inductiva depen-

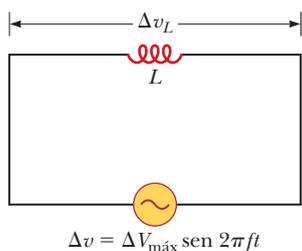


Figura activa 21.6

Circuito en serie que consiste de un inductor L conectado a un generador CA.

de de la inductancia L , que es razonable porque la fuerza contraelectromotriz (ecuación 21.7) es grande para valores grandes de L . Segundo, observe que la reactancia inductiva depende de la frecuencia f . Esta dependencia también es razonable porque la fuerza contraelectromotriz depende de $\Delta I/\Delta t$, una cantidad que es grande cuando la corriente cambia rápidamente, como lo sería para altas frecuencias.

Con esta definición de reactancia inductiva se puede escribir una ecuación de la misma forma que la ley de Ohm para el voltaje a través de la bobina o el inductor:

$$\Delta V_{L,rms} = I_{rms} X_L \quad [21.9]$$

donde $\Delta V_{L,rms}$ es el voltaje rms a través de la bobina e I_{rms} es la corriente rms en la bobina.

La figura activa 21.7 muestra el voltaje instantáneo y la corriente instantánea a través de la bobina como función del tiempo. Cuando a través de un inductor se aplica un voltaje sinusoidal, el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo de oscilación antes de que la corriente alcance su valor máximo. En esta situación se dice que **el voltaje a través de un inductor siempre se adelanta a la corriente por 90°**.

Para ver por qué hay una relación de fase entre voltaje y corriente, examine algunos puntos sobre las curvas de la figura activa 21.7. En el punto a sobre la curva de corriente, la corriente comienza a aumentar en la dirección positiva. En este instante la razón de cambio de la corriente, $\Delta I/\Delta t$ (la pendiente de la curva de corriente), está en un máximo y de la ecuación 21.7 vemos que el voltaje a través del inductor en consecuencia también está en un máximo. Conforme la corriente se eleva entre los puntos a y b sobre la curva, $\Delta I/\Delta t$ gradualmente disminuye hasta que llega a cero en el punto b . Como resultado, el voltaje a través del inductor disminuye durante este mismo intervalo de tiempo, como indica el segmento entre c y d sobre la curva de voltaje. Inmediatamente después del punto b , la corriente comienza a disminuir, aunque todavía tiene la misma dirección que tenía durante el cuarto de ciclo anterior. Conforme la corriente disminuye a cero (desde b hasta e sobre la curva), de nuevo se induce un voltaje en la bobina (de d a f), pero la polaridad de este voltaje es opuesto a la polaridad del voltaje inducida entre c y d . Esto ocurre porque las fuerzas contraelectromotrices siempre se oponen al cambio en la corriente.

Usted podría continuar examinando otros segmentos de la curva, pero no obtendría nueva información porque las variaciones de corriente y voltaje son repetitivas.

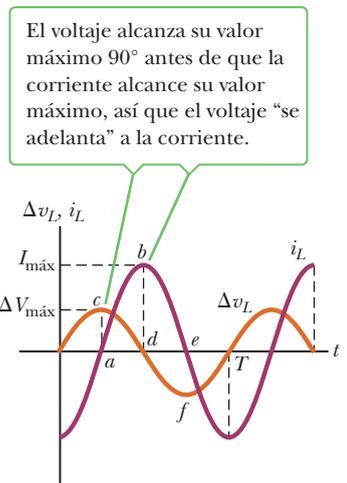


Figura activa 21.7 Gráficas de corriente y voltaje a través de un inductor contra el tiempo, en un circuito CA.

■ EJEMPLO 21.3 Un circuito CA meramente inductivo

OBJETIVO Realizar cálculos básicos de circuito CA para un circuito inductivo.

PROBLEMA En un circuito CA meramente inductivo (véase la figura activa 21.6), $L = 25.0$ mH y el voltaje rms es 1.50×10^2 V. Encuentre la reactancia inductiva y la corriente rms en el circuito si la frecuencia es 60.0 Hz.

SOLUCIÓN

Sustituya L y f en la ecuación 21.8 para obtener la reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi(60.0 \text{ s}^{-1})(25.0 \times 10^{-3} \text{ H}) = 9.42 \Omega$$

Resuelva la ecuación 21.9 para la corriente rms y sustituya:

$$I_{rms} = \frac{\Delta V_{L,rms}}{X_L} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{9.42 \Omega} = 15.9 \text{ A}$$

COMENTARIOS La analogía con los circuitos CD es incluso más cercana que en el caso capacitivo porque en el equivalente inductivo de la ley de Ohm, el voltaje a través de un inductor es *proporcional* a la inductancia L , tal como el voltaje a través de un resistor es proporcional a R en la ley de Ohm.

PREGUNTA 21.3 Verdadero o Falso: Una mayor inductancia o frecuencia resulta en una mayor reactancia inductiva.

EJERCICIO 21.3 Calcule la reactancia inductiva y la corriente rms en un circuito similar, si la frecuencia de nuevo es 60.0 Hz, pero el voltaje rms es 85.0 V y la inductancia es 47.0 mH.

RESPUESTA $X_L = 17.7 \Omega$, $I = 4.80 \text{ A}$

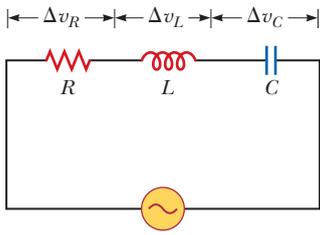


Figura activa 21.8

Circuito en serie que consiste de un resistor, un inductor y un capacitor conectados a un generador CA.

21.4 El circuito RLC en serie

En las secciones anteriores se examinaron los efectos de un inductor, un capacitor y un resistor cuando se conectan por separado a través de una fuente de voltaje CA. Ahora consideraremos lo que ocurre cuando estos elementos se combinan.

La figura activa 21.8 muestra un circuito que contiene un resistor, un inductor y un capacitor conectados en serie a través de una fuente CA que suministra un voltaje total Δv en cierto instante. La corriente en el circuito es la misma en todos los puntos del circuito en cualquier instante y varía sinusoidalmente con el tiempo, como se indica en la figura activa 21.9a. Este hecho se puede expresar matemáticamente como

$$i = I_{\text{máx}} \text{sen } 2\pi ft$$

Anteriormente aprendió que el voltaje a través de cada elemento puede o no estar en fase con la corriente. Los voltajes instantáneos a través de los tres elementos, que se muestran en la figura activa 21.9, tienen las siguientes relaciones de fase con la corriente instantánea:

1. El voltaje instantáneo Δv_R a través del resistor está *en fase* con la corriente instantánea. (Véase la figura activa 21.9b.)
2. El voltaje instantáneo Δv_L a través del inductor *se adelanta* a la corriente por 90° . (Véase la figura activa 21.9c.)
3. El voltaje instantáneo Δv_C a través del capacitor *se retrasa* a la corriente por 90° . (Véase la figura activa 21.9d.)

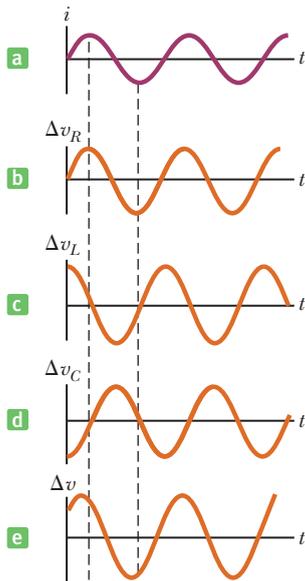


Figura activa 21.9 Relaciones de fase en el circuito RLC en serie que se muestra en la figura activa 21.8.

El voltaje instantáneo neto Δv proporcionado por la fuente CA es igual a la suma de los voltajes instantáneos a través de los elementos separados: $\Delta v = \Delta v_R + \Delta v_C + \Delta v_L$. Sin embargo, ¡esto no significa que los voltajes medidos con un voltímetro CA a través de R , C y L sumen el voltaje fuente medido! De hecho, el voltaje medido *no* suma el voltaje fuente medido porque los voltajes a través de R , C y L tienen todas fases diferentes.

Para explicar las diferentes fases de las caídas de voltaje se usa una técnica que involucra vectores. El voltaje a través de cada elemento se representa con un vector giratorio, como en la figura 21.10. A los vectores giratorios se les conoce como **fasores** y el diagrama se llama **diagrama de fasores**. Este diagrama particular representa el voltaje del circuito dado por la expresión $\Delta v = \Delta V_{\text{máx}} \text{sen } (2\pi ft + \phi)$, donde $\Delta V_{\text{máx}}$ es el voltaje máximo (la magnitud o longitud del vector giratorio o fasor) y ϕ es el ángulo entre el fasor y el eje x positivo cuando $t = 0$. El fasor se puede ver como un vector de magnitud $\Delta V_{\text{máx}}$ que gira con una frecuencia constante f de modo que su proyección a lo largo del eje y es el voltaje instantáneo en el circuito. Puesto que ϕ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente en el circuito, el fasor para la corriente (que no se muestra en la figura 21.10) yace a lo largo del eje x positivo cuando $t = 0$ y se expresa mediante la relación $i = I_{\text{máx}} \text{sen } (2\pi ft)$.

Los diagramas de fasores en la figura 21.11 son útiles para analizar el circuito RLC en serie. Los voltajes en fase con la corriente se representan mediante vectores a lo largo del eje x positivo y los voltajes fuera de fase con la corriente yacen a lo largo de otras direcciones. ΔV_R es horizontal y a la derecha porque no está en fase con la corriente. Del mismo modo, ΔV_L se representa mediante un fasor a lo largo del eje x positivo porque se adelanta a la corriente por 90° . Finalmente, ΔV_C está a lo largo del eje y negativo porque se retrasa a la corriente² por 90° . Si los fasores se suman como cantidades vectoriales, de modo que expliquen las diferentes fases de los voltajes a través de R , L y C , la figura 21.11a muestra que el único componente x para los voltajes es ΔV_R y el componente y neto es $\Delta V_L - \Delta V_C$. Ahora se suman los fasores vectorialmente para encontrar el fasor $\Delta V_{\text{máx}}$ (figura 21.11b),

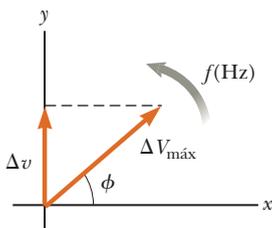


Figura 21.10 Diagrama de fasores para el voltaje en un circuito CA, donde ϕ es el ángulo de fase entre el voltaje y la corriente y Δv es el voltaje instantáneo.

² Un mnemotécnico para ayudar a recordar las relaciones de fase en los circuitos RLC es "ELI the ICE man". E representa el voltaje \mathcal{E} , I la corriente, L la inductancia y C la capacitancia. Por ende, el nombre ELI significa que, en un circuito inductivo, el voltaje \mathcal{E} adelanta a la corriente I . En un circuito capacitivo, ICE significa que la corriente adelanta al voltaje.

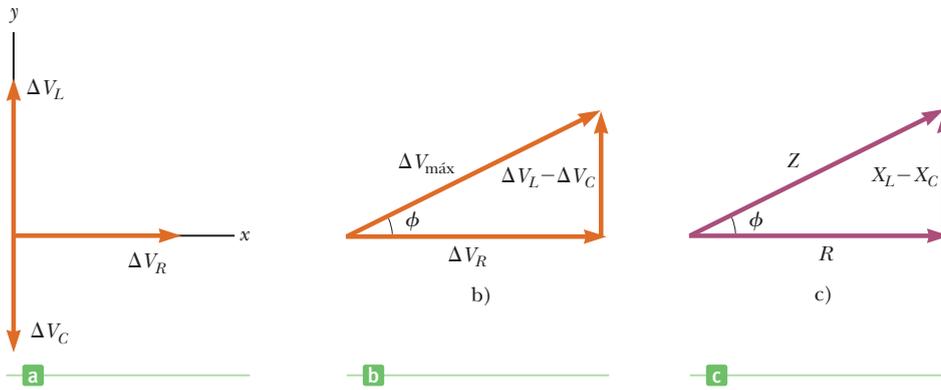


Figura 21.11 a) Diagrama de fasores para el circuito RLC. b) La suma de los fasores como vectores produce $\Delta V_{\text{máx}} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2}$. c) Triángulo de reactancia que produce la relación de impedancia $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$.

que representa el voltaje máximo. El triángulo rectángulo en la figura 21.11b proporciona las siguientes ecuaciones para el voltaje máximo y el ángulo de fase ϕ entre el voltaje máximo y la corriente:

$$\Delta V_{\text{máx}} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2} \quad [21.10]$$

$$\tan \phi = \frac{\Delta V_L - \Delta V_C}{\Delta V_R} \quad [21.11]$$

En estas ecuaciones, todos los voltajes son valores máximos. Aunque se elige usar voltajes máximos en el análisis, las ecuaciones anteriores se aplican bien a voltajes rms por igual porque las dos cantidades se relacionan mutuamente por el mismo factor para todos los elementos del circuito. El resultado para el voltaje máximo $\Delta V_{\text{máx}}$ dado por la ecuación 21.10 refuerza el hecho de que **los voltajes a través del resistor, capacitor e inductor no están en fase, así que no simplemente se pueden sumar para obtener el voltaje a través de la combinación de elementos o para obtener el voltaje fuente.**

Examen rápido

21.2 Para el circuito de la figura 21.8, ¿el voltaje instantáneo de la fuente es igual a a) la suma de los voltajes máximos a través de los elementos, b) la suma de los voltajes instantáneos a través de los elementos o c) la suma de los voltajes rms a través de los elementos?

La ecuación 21.10 se puede escribir en la forma de ley de Ohm, al usar las relaciones $\Delta V_R = I_{\text{máx}}R$, $\Delta V_L = I_{\text{máx}}X_L$ y $\Delta V_C = I_{\text{máx}}X_C$, donde $I_{\text{máx}}$ es la corriente máxima en el circuito:

$$\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.12]$$

Es conveniente definir un parámetro llamado **impedancia** Z del circuito como

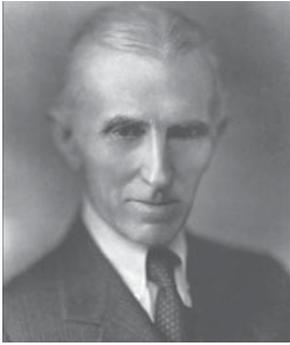
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.13] \quad \leftarrow \text{Impedancia}$$

de modo que la ecuación 21.12 se convierte en

$$\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}Z \quad [21.14]$$

La ecuación 21.14 está en la forma de ley de Ohm, $\Delta V = IR$, con la impedancia en ohms en sustitución de R . De hecho, la ecuación 21.14 se puede considerar como una forma generalizada de la ley de Ohm aplicada a un circuito CA en serie. La impedancia y, por lo tanto, la corriente en un circuito CA dependen de la resistencia, la inductancia, la capacitancia y la frecuencia (porque las reactancias son dependientes de la frecuencia).

Bettmann/Corbis



Nikola Tesla (1856-1943)

Tesla nació en Croacia, pero pasó la mayor parte de su vida profesional como inventor en Estados Unidos. Fue una figura clave en el desarrollo de la electricidad de corriente alterna, los transformadores de alto voltaje y el transporte de energía eléctrica vía líneas de transmisión CA. El punto de vista de Tesla estuvo en desacuerdo con las ideas de Edison, quien se comprometió con el uso de la corriente directa en las líneas de transmisión. Ganó el enfoque CA de Tesla.

Tabla 21.2 Valores de impedancia y ángulos de fase para varias combinaciones de elementos de circuito

Elementos de circuito	Impedancia Z	Ángulo de fase ϕ
	R	0°
	X_C	-90°
	X_L	$+90^\circ$
	$\sqrt{R^2 + X_C^2}$	Negativo, entre -90° y 0°
	$\sqrt{R^2 + X_L^2}$	Positivo, entre 0° y 90°
	$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$	Negativo si $X_C > X_L$ Positivo si $X_C < X_L$

Nota: En cada caso se aplica un voltaje CA (no se muestra) a través de la combinación de elementos (esto es, a través de los puntos).

Es útil representar la impedancia Z con un diagrama vectorial tal como el que se muestra en la figura 21.11c. Se construye un triángulo rectángulo con lado opuesto a ϕ $X_L - X_C$, base R e hipotenusa Z . Al aplicar el teorema de Pitágoras a este triángulo, vemos que

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

es la ecuación 21.13. Más aún, a partir del diagrama vectorial en la figura 21.11c vemos que el ángulo de fase ϕ entre la corriente y el voltaje obedece la relación

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad [21.15]$$

Ángulo de fase ϕ ►

El significado físico del ángulo de fase será aparente en la sección 21.5.

La tabla 21.2 proporciona valores de impedancia y ángulos de fase para algunos circuitos en serie que contienen diferentes combinaciones de elementos de circuito.

Los circuitos de corriente alterna en paralelo también son útiles en aplicaciones cotidianas. Sin embargo, no se les tratará aquí, porque su análisis está más allá del ámbito de este libro.

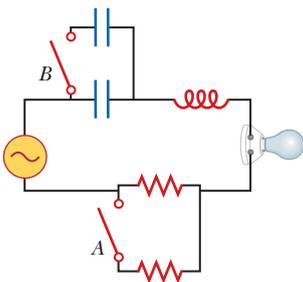


Figura 21.12 (Exámenes rápidos 21.3–21.6)

Examen rápido

21.3 Si el interruptor A se cierra en la figura 21.12, ¿qué ocurre con la impedancia del circuito? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.4 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12. Si el interruptor A se cierra, ¿qué ocurre con el ángulo de fase? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.5 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12. Si el interruptor A queda abierto y el interruptor B se cierra, ¿qué ocurre con el ángulo de fase? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

21.6 Suponga $X_L > X_C$ en la figura 21.12 y, con ambos interruptores abiertos, una pieza de hierro se desliza en el inductor. Durante este proceso, ¿qué ocurre con el brillo del foco? a) Aumenta. b) Disminuye. c) No cambia.

■ ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Circuitos RLC

Se recomienda el siguiente procedimiento para resolver problemas de circuitos RLC en serie:

1. Calcule las reactancias inductiva y capacitiva, X_L y X_C .
2. Use X_L y X_C junto con la resistencia R para calcular la impedancia Z del circuito.
3. Encuentre la máxima corriente o máxima caída de voltaje con la ley de Ohm equivalente, $\Delta V_{\text{máx}} = I_{\text{máx}}Z$.
4. Calcule las caídas de voltaje a través de los elementos individuales con las variaciones apropiadas de la ley de Ohm: $\Delta V_{R,\text{máx}} = I_{\text{máx}}R$, $\Delta V_{L,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_L$ y $\Delta V_{C,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_C$.
5. Obtenga el ángulo de fase con el uso de $\tan \phi = (X_L - X_C)/R$.

■ EJEMPLO 21.4 Un circuito RLC

OBJETIVO Analizar un circuito CA RLC en serie y encontrar el ángulo de fase.

PROBLEMA Un circuito CA RLC en serie tiene resistencia $R = 2.50 \times 10^2 \Omega$, inductancia $L = 0.600 \text{ H}$, capacitancia $C = 3.50 \mu\text{F}$, frecuencia $f = 60.0 \text{ Hz}$ y voltaje máximo $\Delta V_{\text{máx}} = 1.50 \times 10^2 \text{ V}$. Encuentre **a)** la impedancia del circuito, **b)** la corriente máxima en el circuito, **c)** el ángulo de fase y **d)** los voltajes máximos a través de los elementos.

ESTRATEGIA Calcule las reactancias inductiva y capacitiva, que se pueden usar con la resistencia para calcular la impedancia y el ángulo de fase. La impedancia y la ley de Ohm producen la corriente máxima.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la impedancia del circuito.

Primero, calcule las reactancias inductiva y capacitiva:

$$X_L = 2\pi fL = 226 \Omega \quad X_C = 1/2\pi fC = 758 \Omega$$

Sustituya estos resultados y la resistencia R en la ecuación 21.13 para obtener la impedancia del circuito:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \\ = \sqrt{(2.50 \times 10^2 \Omega)^2 + (226 \Omega - 758 \Omega)^2} = 588 \Omega$$

b) Encuentre la corriente máxima en el circuito.

Use la ecuación 21.12, la ley de Ohm equivalente, para encontrar la corriente máxima:

$$I_{\text{máx}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{Z} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{588 \Omega} = 0.255 \text{ A}$$

c) Encuentre el ángulo de fase.

Calcule el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje con la ecuación 21.15:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X_L - X_C}{R} = \tan^{-1} \left(\frac{226 \Omega - 758 \Omega}{2.50 \times 10^2 \Omega} \right) = -64.8^\circ$$

d) Encuentre los voltajes máximos a través de los elementos.

Sustituya en la “ley de Ohm” expresiones para cada tipo individual de elemento de corriente:

$$\Delta V_{R,\text{máx}} = I_{\text{máx}}R = (0.255 \text{ A})(2.50 \times 10^2 \Omega) = 63.8 \text{ V}$$

$$\Delta V_{L,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_L = (0.255 \text{ A})(2.26 \times 10^2 \Omega) = 57.6 \text{ V}$$

$$\Delta V_{C,\text{máx}} = I_{\text{máx}}X_C = (0.255 \text{ A})(7.58 \times 10^2 \Omega) = 193 \text{ V}$$

COMENTARIOS Puesto que el circuito es más capacitivo que inductivo ($X_C > X_L$), ϕ es negativo. Un ángulo de fase negativo significa que la corriente se adelanta al voltaje aplicado. Observe también que la suma de los voltajes máximos a través de los elementos es $\Delta V_R + \Delta V_L + \Delta V_C = 314 \text{ V}$, que es mucho mayor que 150 V el voltaje máximo del generador. Como se vio en el examen rápido 21.2, la suma de los voltajes máximos es una cantidad sin significado porque, cuando se suman voltajes alternos, se deben tomar en cuenta *tanto sus amplitudes como sus fases*. Sabemos que los voltajes máximos a través de varios elementos ocurren en diferentes momentos, así que no tiene sentido sumar todos los valores máximos. La forma correcta de “sumar” los voltajes es a través de la ecuación 21.10.

(continúa)

PREGUNTA 21.4 Verdadero o Falso: En un circuito RLC , la impedancia siempre debe ser mayor o igual a la resistencia.

EJERCICIO 21.4 Analice un circuito CA RLC en serie para el que $R = 175 \Omega$, $L = 0.500 \text{ H}$, $C = 22.5 \mu\text{F}$, $f = 60.0 \text{ Hz}$ y $\Delta V_{\text{máx}} = 325 \text{ V}$. Encuentre: a) la impedancia, b) la corriente máxima, c) el ángulo de fase y d) los voltajes máximos a través de los elementos.

RESPUESTAS a) 189Ω b) 1.72 A c) 22.0° d) $\Delta V_{R,\text{máx}} = 301 \text{ V}$, $\Delta V_{L,\text{máx}} = 324 \text{ V}$, $\Delta V_{C,\text{máx}} = 203 \text{ V}$

21.5 Potencia en un circuito CA

En un circuito CA no se asocian pérdidas de potencia con capacitores puros e inductores puros. Un capacitor puro, por definición, no tiene resistencia o inductancia, mientras que un inductor puro no tiene resistencia o capacitancia. (Estas definiciones son idealizaciones: en un capacitor real, por ejemplo, los efectos inductivos podrían volverse importantes a altas frecuencias.) Comience con el análisis de la potencia disipada en un circuito CA que sólo contiene un generador y un capacitor.

Cuando la corriente aumenta en una dirección en un circuito CA, la carga se acumula sobre el capacitor y a través de él aparece una caída de voltaje. Cuando el voltaje alcanza su valor máximo, la energía almacenada en el capacitor es

$$EP_C = \frac{1}{2} C (\Delta V_{\text{máx}})^2$$

Sin embargo, este almacenamiento de energía sólo es momentáneo: cuando la corriente invierte su dirección, la carga sale de las placas del capacitor y regresa a la fuente de voltaje. Durante la mitad de cada ciclo el capacitor se carga y durante la otra mitad la carga regresa a la fuente de voltaje. Por lo tanto, la potencia promedio que suministra la fuente es cero. En otras palabras, **no ocurre pérdida de potencia en un capacitor en un circuito CA.**

De igual modo, la fuente debe realizar trabajo contra la fuerza contraelectromotriz de un inductor que porta una corriente. Cuando la corriente alcanza su valor máximo, la energía almacenada en el inductor es un máximo y está dada por

$$EP_L = \frac{1}{2} LI_{\text{máx}}^2$$

Cuando la corriente comienza a disminuir en el circuito, esta energía almacenada regresa a la fuente conforme el inductor intenta mantener la corriente en el circuito. La potencia promedio que se entrega a un resistor en un circuito RLC es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R \quad [21.16]$$

La potencia promedio que entrega el generador se convierte en energía interna en el resistor. En un capacitor o inductor ideal no ocurre pérdida de potencia.

Una ecuación alternativa para la pérdida de potencia promedio en un circuito CA se puede encontrar al sustituir (de la ley de Ohm) $R = \Delta V_{R,\text{rms}}/I_{\text{rms}}$ en la ecuación 21.16:

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{R,\text{rms}}$$

Es conveniente consultar un triángulo de voltaje que muestre la relación entre ΔV_{rms} , $\Delta V_{R,\text{rms}}$ y $\Delta V_{L,\text{rms}} - \Delta V_{C,\text{rms}}$, como la figura 21.11b. (Recuerde que la figura 21.11 se aplica tanto a voltajes máximos como a rms.) A partir de esta figura, vemos que la caída de voltaje a través de un resistor se puede escribir en términos del voltaje de la fuente, ΔV_{rms} :

$$\Delta V_{R,\text{rms}} = \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi$$

Por lo tanto, la potencia promedio que entrega un generador en un circuito CA es:

Potencia promedio ►

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi \quad [21.17]$$

donde la cantidad $\cos \phi$ se llama **factor de potencia**.

La ecuación 21.17 muestra que la potencia que entrega una fuente CA a cualquier circuito depende de la diferencia de fase entre el voltaje fuente y la corriente resultante.

Este hecho tiene muchas aplicaciones interesantes. Por ejemplo, las fábricas con frecuencia usan dispositivos como grandes motores en máquinas, generadores y transformadores que tienen una gran carga inductiva debida a todos los devanados. Para entregar mayor potencia a tales dispositivos sin usar voltajes excesivamente altos, los técnicos de las fábricas introducen capacitancia en los circuitos para correr la fase.

APLICACIÓN

Corrimiento de fase para entregar más potencia

■ EJEMPLO 21.5 Potencia promedio en un circuito RLC en serie

OBJETIVO Reconocer la potencia en los circuitos RLC en serie.

PROBLEMA Calcule la potencia promedio que se entrega al circuito RLC en serie que se describe en el ejemplo 21.4.

ESTRATEGIA Después de encontrar la corriente rms y el voltaje rms con las ecuaciones 21.2 y 21.3, sustituya en la ecuación 21.17, y use el ángulo de fase que encontró en el ejemplo 21.4.

SOLUCIÓN

Primero, use las ecuaciones 21.2 y 21.3 para calcular la corriente rms y el voltaje rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{0.255 \text{ A}}{\sqrt{2}} = 0.180 \text{ A}$$

$$\Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} = \frac{1.50 \times 10^2 \text{ V}}{\sqrt{2}} = 106 \text{ V}$$

Sustituya estos resultados y el ángulo de fase $\phi = -64.8^\circ$ en la ecuación 21.17 para encontrar la potencia promedio:

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi = (0.180 \text{ A})(106 \text{ V}) \cos(-64.8^\circ) = 8.12 \text{ W}$$

COMENTARIOS El mismo resultado se puede obtener a partir de la ecuación 21.16, $P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}}^2 R$.

PREGUNTA 21.5 ¿Bajo qué circunstancias la potencia promedio de un circuito RLC puede ser cero?

EJERCICIO 21.5 Repita este problema con el sistema que se describe en el ejercicio 21.4.

RESPUESTA 259 W

21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie

En general, la corriente rms en un circuito RLC en serie se puede escribir

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad [21.18]$$

A partir de esta ecuación, vemos que si la frecuencia varía, la corriente tiene su valor *máximo* cuando la impedancia tiene su valor *mínimo*, lo que ocurre cuando $X_L = X_C$. En tal circunstancia, la impedancia del circuito se reduce a $Z = R$. La frecuencia f_0 a la que esto ocurre se llama **frecuencia de resonancia** del circuito. Para encontrar f_0 , establezca $X_L = X_C$, lo que produce, a partir de las ecuaciones 21.5 y 21.8,

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad [21.19]$$

La figura 21.13 es una gráfica de la corriente como función de la frecuencia para un circuito que contiene un valor fijo tanto para capacitancia como para inductancia. A partir de la ecuación 21.18, se debe concluir que la corriente se volvería infinita a resonancia cuando $R = 0$. Aunque la ecuación 21.18 predice este resultado, los circuitos reales siempre tienen cierta resistencia, lo que limita el valor de la corriente.

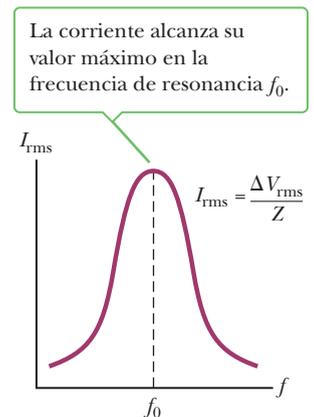


Figura activa 21.13 Gráfica de amplitud de corriente en un circuito RLC en serie, contra frecuencia del voltaje del generador.

APLICACIÓN

Sintonía de su radio

El circuito sintonizador de un radio es una importante aplicación de un circuito resonante en serie. El radio se sintoniza en una estación particular (que transmite una señal de radiofrecuencia específica) al variar un capacitor, que cambia la frecuencia de resonancia del circuito sintonizador. Cuando esta frecuencia de resonancia coincide con la onda de radio entrante, la corriente en el circuito sintonizador aumenta.

FÍSICA APLICADA 21.2 Detectores de metales en el juzgado

Cuando usted camina a través de las puertas del detector de metales de un juzgado, como lo hace la persona en la figura 21.14, en realidad camina a través de una bobina de muchas espiras. ¿Cómo funciona el detector de metales?

EXPLICACIÓN El detector de metales en esencia es un circuito resonante. El portal por el que cruza es un inductor (una gran espira de alambre conductor) que es parte del circuito. La frecuencia del circuito se sintoniza a la frecuencia de resonancia del circuito cuando no hay metal en el inductor. Cuando camina a través del arco con metal en su bolsillo, cambia la inductancia efectiva del circuito resonante, lo que resulta en un cambio en la corriente en el circuito. Este cambio en corriente se detecta y un circuito electrónico hace que se emita un sonido como alarma. ■



Figura 21.14 (Física aplicada 21.2) Detector de metales en el juzgado.

Kira Vuille-Kowling

EJEMPLO 21.6 Un circuito en resonancia

OBJETIVO Identificar la frecuencia de resonancia y su relación con inductancia, capacitancia y corriente rms.

PROBLEMA Considere un circuito RLC en serie para el que $R = 1.50 \times 10^2 \Omega$, $L = 20.0 \text{ mH}$, $\Delta V_{\text{rms}} = 20.0 \text{ V}$ y $f = 796 \text{ s}^{-1}$.
a) Determine el valor de la capacitancia para la cual la corriente rms es un máximo. **b)** Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

ESTRATEGIA La corriente es un máximo a la frecuencia de resonancia f_0 , que se debe igualar con la frecuencia impulsora, 796 s^{-1} . La ecuación resultante se puede resolver para C . Para el inciso b), sustituya en la ecuación 21.18 para obtener la corriente rms máxima.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la capacitancia dada la corriente máxima en el circuito (la condición de resonancia).

Resuelva la frecuencia de resonancia para la capacitancia:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \rightarrow \sqrt{LC} = \frac{1}{2\pi f_0} \rightarrow LC = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L}$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 (796 \text{ Hz})^2 (20.0 \times 10^{-3} \text{ H})} = 2.00 \times 10^{-6} \text{ F}$$

Inserte los valores dados y sustituya la frecuencia fuente para la frecuencia de resonancia, f_0 :

b) Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

Las reactancias capacitiva e inductiva son iguales, de modo que $Z = R = 1.50 \times 10^2 \Omega$. Sustituya en la ecuación 21.18 para encontrar la corriente rms:

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{20.0 \text{ V}}{1.50 \times 10^2 \Omega} = 0.133 \text{ A}$$

COMENTARIOS Puesto que la impedancia Z está en el denominador de la ecuación 21.18, la corriente máxima siempre ocurrirá cuando $X_L = X_C$, porque esto produce el valor mínimo de Z .

PREGUNTA 21.6 Verdadero o Falso: La magnitud de la corriente en un circuito RLC nunca es mayor que la corriente rms.

EJERCICIO 21.6 Considere un circuito RLC en serie para el que $R = 1.20 \times 10^2 \Omega$, $C = 3.10 \times 10^{-5} \text{ F}$, $\Delta V_{\text{rms}} = 35.0 \text{ V}$ y $f = 60.0 \text{ s}^{-1}$. a) Determine el valor de la inductancia para el cual la corriente rms es un máximo. b) Encuentre la corriente máxima rms en el circuito.

RESPUESTAS a) 0.227 H b) 0.292 A

21.7 El transformador

Con frecuencia es necesario cambiar un pequeño voltaje CA a uno mayor o viceversa. Tales cambios se realizan con un dispositivo llamado transformador.

En su forma más simple, el **transformador CA** consiste de dos bobinas de alambre devanadas alrededor de un núcleo de hierro blando, como se muestra en la figura 21.15. La bobina a la izquierda, que se conecta a la entrada de la fuente de voltaje CA y tiene N_1 espiras, se llama devanado primario, o el *primario*. La bobina a la derecha, que se conecta a un resistor R y consiste de N_2 espiras, es el *secundario*. El propósito del núcleo de hierro común es aumentar el flujo magnético y proporcionar un medio en el que casi todo el flujo a través de una bobina pase a través de la otra.

Cuando se aplica un voltaje CA de entrada ΔV_1 al primario, el voltaje inducido a través de él está dado por

$$\Delta V_1 = -N_1 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [21.20]$$

donde Φ_B es el flujo magnético a través de cada espira. Si supone que no escapa flujo del núcleo de hierro, entonces el flujo a través de cada espira del primario es igual al flujo a través de cada espira del secundario. Por lo tanto, el voltaje a través de la bobina secundaria es

$$\Delta V_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} \quad [21.21]$$

El término $\Phi_B/\Delta t$ es común a las ecuaciones 21.20 y 21.21 y se puede eliminar algebraicamente, lo que produce

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1 \quad [21.22]$$

Cuando N_2 es mayor que N_1 , ΔV_2 supera a ΔV_1 y al transformador se le conoce como *transformador de subida*. Cuando N_2 es menor que N_1 , lo que hace ΔV_2 menor que ΔV_1 , se tiene un *transformador de bajada*.

Por la ley de Faraday, se genera un voltaje a través del secundario sólo cuando hay un *cambio* en el número de líneas de flujo que pasan a través del secundario. Por lo tanto, la corriente de entrada en el primario cambia con el tiempo, que es lo que ocurre cuando se utiliza una corriente alterna. Sin embargo, cuando la entrada al primario es una corriente directa, ocurre una salida de voltaje en el secundario sólo en el instante cuando un interruptor en el circuito primario se abre o cierra. Una vez que la corriente en el primario alcanza un valor estacionario, el voltaje de salida en el secundario es cero.

Puede parecer que un transformador es un dispositivo en el que es posible obtener algo a partir de nada. Por ejemplo, un transformador de subida puede cambiar un voltaje de entrada de, por decir, 10 a 100 V. Esto significa que cada coulomb de carga que sale del secundario tiene 100 J de energía, mientras que cada coulomb de carga que entra al primario sólo tiene 10 J de energía. Sin embargo, éste no es el caso, porque **la potencia de entrada al primario es igual a la potencia de salida en el secundario**:

$$I_1 \Delta V_1 = I_2 \Delta V_2 \quad [21.23]$$

Aunque el *voltaje* en el secundario puede ser, por decir, 10 veces mayor que el voltaje en el primario, la *corriente* en el secundario será menor que la corriente del primario por un factor de 10. La ecuación 21.23 supone un **transformador ideal** en el que no existen pérdidas de potencia entre el primario y el secundario. Los transformadores reales por lo general tienen eficiencias de potencia que varían de 90 a 99%. Las pérdidas de potencia

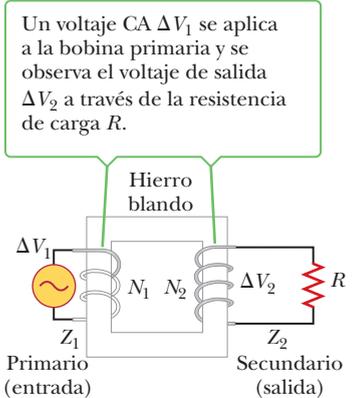


Figura 21.15 Un transformador ideal consiste de dos bobinas devanadas sobre el mismo núcleo de hierro blando. Un voltaje CA ΔV_1 se aplica a la bobina primaria y se observa el voltaje de salida ΔV_2 a través de la resistencia de carga R después de cerrar el interruptor.

◀ En un transformador ideal, la potencia de entrada es igual a la potencia de salida

APLICACIÓN

Transmisión de energía eléctrica a larga distancia

ocurren debido a factores como corrientes parásitas inducidas en el núcleo de hierro del transformador, que disipa energía en la forma de pérdidas I^2R .

Cuando la energía eléctrica se transmite a través de largas distancias, es económico usar un voltaje alto y una corriente baja porque la pérdida de potencia vía calentamiento resistivo en las líneas de transmisión varía como I^2R . Si una compañía eléctrica puede reducir la corriente por un factor de diez, por ejemplo, la pérdida de potencia se reduce por un factor de cien. En la práctica, el voltaje sube a alrededor de 230 000 V en la estación generadora, luego se baja a alrededor de 20 000 V en una estación de distribución y finalmente se baja a 120 V en el poste eléctrico del consumidor.

EJEMPLO 21.7 Distribución de electricidad en una ciudad

OBJETIVO Identificar los transformadores y su papel en la reducción de pérdidas de potencia.

PROBLEMA Un generador en una compañía eléctrica produce 1.00×10^2 A de corriente a 4.00×10^3 V. El voltaje se sube a 2.40×10^5 V mediante un transformador antes de enviarse a una línea de transmisión de alto voltaje a través de un área rural hasta una ciudad. Suponga que la resistencia efectiva de la línea de transmisión es 30.0Ω y que los transformadores son ideales. **a)** Determine el porcentaje de pérdida de potencia en la línea de transmisión. **b)** ¿Qué porcentaje de la potencia original se perdería en la línea de transmisión si el voltaje no se subiera?

ESTRATEGIA Resolver este problema sólo es cuestión de sustitución en la ecuación para transformadores y la ecuación para pérdida de potencia. Para obtener la fracción de pérdida de potencia, también es necesario calcular la salida de potencia del generador: la corriente por la diferencia de potencial que crea el generador.

SOLUCIÓN

a) Determine el porcentaje de pérdida de potencia en la línea.

Sustituya en la ecuación 21.23 para encontrar la corriente en la línea de transmisión:

$$I_2 = \frac{I_1 \Delta V_1}{\Delta V_2} = \frac{(1.00 \times 10^2 \text{ A})(4.00 \times 10^3 \text{ V})}{2.40 \times 10^5 \text{ V}} = 1.67 \text{ A}$$

Ahora use la ecuación 21.16 para encontrar la pérdida de potencia en la línea de transmisión:

$$(1) P_{\text{perdida}} = I_2^2 R = (1.67 \text{ A})^2 (30.0 \Omega) = 83.7 \text{ W}$$

Calcule la salida de potencia del generador:

$$P = I_1 \Delta V_1 = (1.00 \times 10^2 \text{ A})(4.00 \times 10^3 \text{ V}) = 4.00 \times 10^5 \text{ W}$$

Finalmente, divida P_{perdida} entre la salida de potencia y multiplique por cien para encontrar el porcentaje de pérdida de potencia:

$$\% \text{ potencia perdida} = \left(\frac{83.7 \text{ W}}{4.00 \times 10^5 \text{ W}} \right) \times 100 = 0.0209\%$$

b) ¿Qué porcentaje de la potencia original se perdería en la línea de transmisión si el voltaje no se subiera?

Sustituya la corriente subida en la ecuación (1) por la corriente original de 1.00×10^2 A:

$$P_{\text{perdida}} = I^2 R = (1.00 \times 10^2 \text{ A})^2 (30.0 \Omega) = 3.00 \times 10^5 \text{ W}$$

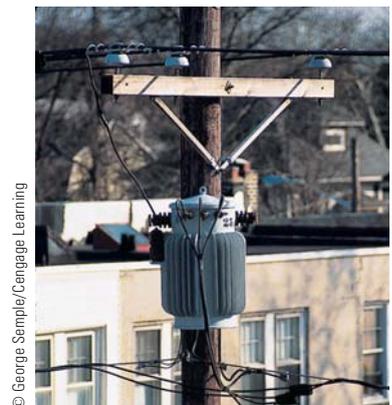
Calcule el porcentaje de pérdida, como antes:

$$\% \text{ potencia perdida} = \left(\frac{3.00 \times 10^5 \text{ W}}{4.00 \times 10^5 \text{ W}} \right) \times 100 = 75\%$$

COMENTARIOS Este ejemplo ilustra la ventaja de las líneas de transmisión de alto voltaje. En la ciudad, un transformador en una subestación baja de nuevo el voltaje a aproximadamente 4000 V y este voltaje se mantiene a través de las líneas eléctricas a lo largo de la ciudad. Cuando la potencia se usa en una casa o negocio, un transformador en el poste eléctrico cerca del establecimiento reduce el voltaje a 240 o 120 V.

PREGUNTA 21.7 Si el voltaje se sube al doble de la cantidad en este problema, ¿en qué factor cambia la pérdida de potencia? a) 2 b) no cambia c) $\frac{1}{2}$ d) $\frac{1}{4}$

Este transformador cilíndrico de bajada disminuye el voltaje de 4000 a 220 V para entregar a un grupo de casas.



EJERCICIO 21.7 Suponga que el mismo generador tiene el voltaje subido a sólo 7.50×10^4 V y que la resistencia de la línea es 85.0Ω . Encuentre el porcentaje de pérdida de potencia en este caso.

RESPUESTA 0.604%

21.8 Predicciones de Maxwell

Durante las primeras etapas de su estudio y desarrollo, los fenómenos eléctrico y magnético se consideraron como no relacionados. Sin embargo, en 1865, James Clerk Maxwell (1831-1879) proporcionó una teoría matemática que demostró una relación cercana entre todos los fenómenos eléctricos y magnéticos. Además de unificar los campos anteriormente separados de electricidad y magnetismo, su brillante teoría predijo que los campos eléctrico y magnético pueden moverse a través del espacio como ondas. La teoría que desarrolló se basa en las siguientes cuatro piezas de información:

1. Las líneas de campo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en cargas negativas.
2. Las líneas de campo magnético siempre forman rizos cerrados; no comienzan o terminan en alguna parte.
3. Un campo magnético variable induce una fem y por lo tanto un campo eléctrico. Este hecho es un enunciado de la ley de Faraday (capítulo 20).
4. Los campos magnéticos se generan mediante cargas en movimiento (o corrientes), como se resume en la ley de Ampère (capítulo 19).

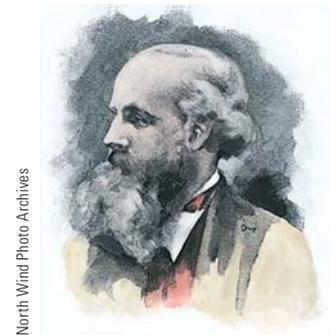
El primer enunciado es una consecuencia de la naturaleza de la fuerza electrostática entre partículas cargadas, dada por la ley de Coulomb. Representa el hecho de que **en la naturaleza existen cargas libres (monopolos eléctricos)**.

El segundo enunciado, que los campos magnéticos forman rizos continuos, se ejemplifica mediante las líneas de campo magnético en torno a un largo alambre recto, que son circunferencias cerradas y las líneas de campo magnético de un imán de barra, que forman rizos cerrados. Dice, en contraste con el primer enunciado, que **en la naturaleza no existen cargas magnéticas libres (monopolos magnéticos)**.

El tercer enunciado es equivalente a la ley de inducción de Faraday, y el cuarto es equivalente a la ley de Ampère.

En uno de los más grandes desarrollos teóricos del siglo XIX, Maxwell usó estos cuatro enunciados dentro de un marco matemático correspondiente para probar que los campos eléctrico y magnético juegan papeles simétricos en la naturaleza. Ya se sabía, por los experimentos, que un campo magnético variable produce un campo eléctrico de acuerdo con la ley de Faraday. Maxwell creía que la naturaleza era simétrica y por lo tanto hipotetizó que un campo eléctrico variable produciría un campo magnético. Esta hipótesis no se pudo probar experimentalmente en la época cuando se desarrolló, porque los campos magnéticos generados por los campos eléctricos variables por lo general son muy débiles y en consecuencia difíciles de detectar.

Para justificar su hipótesis, Maxwell investigó otros fenómenos que pudieran explicarse mediante ella. Volteó su atención hacia el movimiento de cargas de rápida oscilación (aceleradas), como las que existen en una barra conductora conectada a un voltaje alterno. Tales cargas son aceleradas y, de acuerdo con las predicciones de Maxwell, generan campos eléctrico y magnético variables. Los campos variables causan perturbaciones electromagnéticas que viajan a través del espacio como ondas, similar a la dispersión de las ondas en el agua creadas por un guijarro que se lanza hacia un estanque. Las ondas que envían las cargas oscilatorias son campos eléctrico y magnético fluctuantes, por lo que se llaman *ondas electromagnéticas*. A partir de la ley de Faraday y de la propia generalización de Maxwell de la ley de Ampère, Maxwell calculó la velocidad de las ondas como igual a la velocidad de la luz, $c = 3 \times 10^8$ m/s. Maxwell concluyó que la luz visible y otras ondas electromagnéticas consisten de campos eléctrico y magnético fluctuantes que viajan a través del espacio vacío, ¡y que cada campo variable induce al otro! El suyo fue uno de los más grandes descubrimientos de la ciencia, a la par con el descubrimiento de Newton de



North Wind Photo Archives

James Clerk Maxwell Físico teórico escocés (1831-1879)

Maxwell desarrolló la teoría electromagnética de la luz y la teoría cinética de los gases, además explicó la naturaleza de los anillos de Saturno y la visión a color. La exitosa interpretación de Maxwell al campo electromagnético resultó en las ecuaciones que llevan su nombre. Formidable habilidad matemática, combinada con gran comprensión, le permitieron ir adelante en el estudio del electromagnetismo y la teoría cinética.

las leyes del movimiento. Al igual que las leyes de Newton, tuvo profunda influencia sobre desarrollos científicos posteriores.

21.9 Confirmación de Hertz de las predicciones de Maxwell

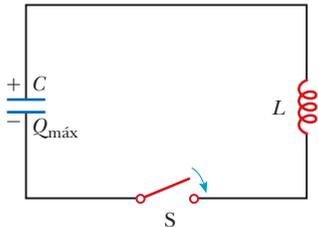


Figura 21.16 Circuito LC simple. El capacitor tiene una carga inicial de $Q_{\text{máx}}$ y el interruptor se cierra en $t = 0$.

En 1887, después de la muerte de Maxwell, Heinrich Hertz (1857-1894) fue el primero en generar y detectar ondas electromagnéticas en un laboratorio, con el uso de circuitos LC . En tal circuito, un capacitor cargado se conecta a un inductor, como en la figura 21.16. Cuando el interruptor se cierra, ocurren oscilaciones en la corriente en el circuito y en la carga sobre el capacitor. Si la resistencia del circuito es despreciable, no se disipa energía y las oscilaciones continúan.

En el siguiente análisis se desprecia la resistencia en el circuito. Suponga que el capacitor tiene una carga inicial $Q_{\text{máx}}$ y que el interruptor se cierra en $t = 0$. Cuando el capacitor está totalmente cargado, la energía total en el circuito se almacena en el campo eléctrico del capacitor y es igual a $Q_{\text{máx}}^2/2C$. En este tiempo, la corriente es cero, de modo que no se almacena energía en el inductor. Conforme el capacitor comienza a descargarse, la energía almacenada en su campo eléctrico disminuye. Al mismo tiempo, la corriente aumenta y la energía igual a $LI^2/2$ ahora se almacena en el campo magnético del inductor. Por lo tanto, se transfiere energía del campo eléctrico del capacitor al campo magnético del inductor. Cuando el capacitor está completamente descargado, no almacena energía. En este momento, la corriente alcanza su valor máximo y toda la energía se almacena en el inductor. Entonces el proceso se repite en la dirección inversa. La energía continúa para transferirse entre el inductor y el capacitor, lo que corresponde a oscilaciones en la corriente y carga.

Como vimos en la sección 21.6, la frecuencia de oscilación de un circuito LC se llama *frecuencia de resonancia* del circuito y está dada por

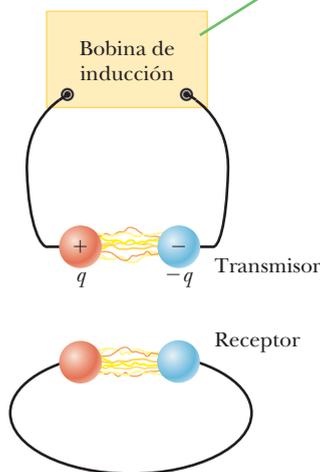
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

El circuito que usó Hertz en sus investigaciones de las ondas electromagnéticas es similar al que recién se estudió y se muestra de manera esquemática en la figura 21.17. Una bobina de inducción (una gran bobina de alambre) se conecta a dos esferas metálicas con una brecha angosta entre ellas para formar un capacitor. Las oscilaciones inician en el circuito mediante pulsos de voltaje cortos que se envían a través de la bobina hacia las esferas y carga una positiva y la otra negativa. Puesto que L y C son muy pequeñas en este circuito, la frecuencia de oscilación es muy alta, $f \approx 100$ MHz. Este circuito se llama transmisor porque produce ondas electromagnéticas.

A varios metros del circuito transmisor, Hertz colocó un segundo circuito, el receptor, que consistió de una sola espira de alambre conectada a dos esferas. Tenía su propia inductancia, capacitancia y frecuencia natural de oscilación efectivas. Hertz descubrió que la energía se enviaba desde el transmisor hasta el receptor cuando la frecuencia de resonancia del receptor se ajustaba para coincidir con la del transmisor. La transferencia de energía se detectó cuando el voltaje a través de las esferas en el circuito receptor se volvía lo suficientemente alto como para producir ionización en el aire, que generaba la aparición de chispas en la brecha de aire que separa las esferas. El experimento de Hertz es análogo al fenómeno mecánico en el que un diapason recoge las vibraciones de otro diapason idéntico.

Hertz planteó como hipótesis que la energía transferida del transmisor al receptor se transporta en la forma de ondas, ahora reconocidas como ondas electromagnéticas. En una serie de experimentos, también demostró que la radiación generada por el transmisor muestra propiedades ondulatorias: interferencia, difracción, reflexión, refracción y polarización. Como verá dentro de poco, todas estas propiedades las manifiesta la luz. Se volvió evidente que las ondas electromagnéticas de Hertz tenían las mismas propiedades conocidas de las ondas de luz y sólo diferían en frecuencia y longitud de onda. Hertz efectivamente

El transmisor consiste de dos electrodos esféricos conectados a una bobina de inducción, que proporciona cortos pulsos de voltaje a las esferas, lo que establece oscilaciones en la descarga.



El receptor es una sola espira de alambre cercana que contiene una segunda brecha de chispa.

Figura 21.17 Diagrama esquemático del aparato de Hertz para generar y detectar ondas electromagnéticas.

confirmó la teoría de Maxwell al demostrar que existían las misteriosas ondas electromagnéticas de Maxwell y que todas tenían las propiedades de las ondas de luz.

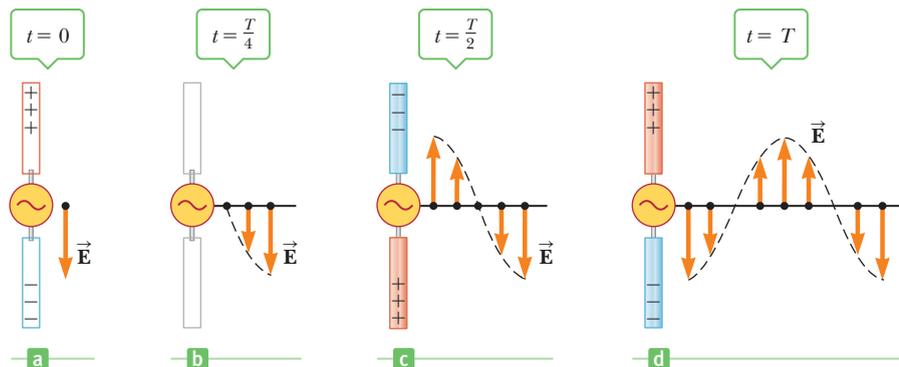
Acaso el experimento más convincente que realizó Hertz fue la medición de la velocidad de las ondas desde el transmisor, lo que logró del modo siguiente: ondas de frecuencia conocida desde el transmisor se reflejaban de una hoja metálica de modo que se establecía un patrón de interferencia, en forma muy parecida al patrón de onda estacionaria sobre una cuerda estirada. Como lo aprendió en el estudio de las ondas estacionarias, la distancia entre nodos es $\lambda/2$, de modo que Hertz pudo determinar la longitud de onda λ . Al usar la relación $v = \lambda f$, encontró que v estaba cerca de 3×10^8 m/s, la velocidad conocida de la luz visible. En consecuencia, los experimentos de Hertz proporcionaron la primera evidencia en apoyo a la teoría de Maxwell.

21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena

En la sección anterior encontramos que la energía almacenada en un circuito LC se transfiere de manera continua entre el campo eléctrico del capacitor y el campo magnético del inductor. Sin embargo, esta transferencia de energía continúa durante prolongados periodos de tiempo sólo cuando los cambios ocurren con lentitud. Si la corriente alterna rápidamente, el circuito pierde parte de su energía en la forma de ondas electromagnéticas. De hecho, *cualquier* circuito que porte una corriente alterna radia ondas electromagnéticas. El mecanismo fundamental responsable por esta radiación es la aceleración de una partícula cargada. **Siempre que una partícula cargada acelere, radia energía.**

Un voltaje alterno aplicado a los alambres de una antena fuerza las cargas eléctricas en la antena a oscilar. Esta técnica común para acelerar partículas cargadas es la fuente de las ondas de radio emitidas por la antena de transmisión de una estación de radio.

La figura 21.18 ilustra la producción de una onda electromagnética al oscilar cargas eléctricas en una antena. Dos barras metálicas se conectan a una fuente CA y hace que las cargas oscilen entre las barras. El voltaje de salida del generador es sinusoidal. En $t = 0$, a la barra superior se le proporciona una carga positiva máxima y a la barra inferior una carga negativa igual, como en la figura 21.18a. En la figura también se muestra el campo eléctrico cerca de la antena en este instante. Conforme las cargas oscilan, las barras quedan con menos carga, el campo cerca de las barras disminuye en intensidad y el campo eléctrico máximo que se dirige hacia abajo, producido en $t = 0$, se aleja de la barra. Cuando las cargas se neutralizan, como en la figura 21.18b, el campo eléctrico se vuelve cero, después de un intervalo igual a un cuarto del periodo de oscilación. Al continuar de esta forma, la barra superior pronto obtiene una carga negativa máxima y la barra inferior se vuelve positiva, como en la figura 21.18c, lo que resulta en un campo eléctrico que se dirige hacia arriba. Esto ocurre después de un intervalo igual a un medio del periodo de oscilación. Las oscilaciones continúan como se indica en la figura 21.18d.



Bettmann/Corbis

Heinrich Rudolf Hertz Físico alemán (1857-1894)

Hertz hizo su más importante descubrimiento de las ondas de radio en 1887. Después de descubrir que la velocidad de una onda de radio era la misma que la de la luz, Hertz demostró que las ondas de radio, como las ondas de luz, se podían reflejar, refractar y difractar. Hertz murió de envenenamiento sanguíneo a la edad de 36 años. Durante su corta vida realizó muchas contribuciones a la ciencia. El hertz, igual a una vibración o ciclo completo por segundo, se llama así en su honor.

APLICACIÓN

Transmisión de ondas de radio

Figura 21.18 Campo eléctrico establecido por cargas oscilatorias en una antena. El campo se mueve alejándose de la antena con la velocidad de la luz.

Tip 21.1 Las cargas aceleradas producen ondas electromagnéticas

Las cargas estacionarias sólo producen campos eléctricos, mientras que las cargas en movimiento uniforme (es decir, velocidad constante) producen campos eléctricos y magnéticos, mas no ondas electromagnéticas. En contraste, las cargas aceleradas producen ondas electromagnéticas, así como campos eléctricos y magnéticos. Una carga en aceleración también radia energía.

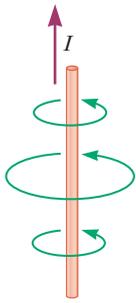


Figura 21.19 Líneas de campo magnético en torno a una antena que porta una corriente variable.

Observe que el campo eléctrico cerca de la antena oscila en fase con la distribución de carga: el campo apunta abajo cuando la barra superior es positiva y arriba cuando la barra superior es negativa. Más aún, la magnitud del campo en cualquier instante depende de la cantidad de carga sobre las barras en dicho instante.

Conforme las cargas continúan oscilando (y acelerando) entre las barras, el campo eléctrico que establecen las cargas se aleja de la antena en todas direcciones con la velocidad de la luz. La figura 21.18 muestra el patrón de campo eléctrico en un lado de la antena en ciertos tiempos durante el ciclo de oscilación. Como puede ver, un ciclo de oscilación de carga produce una longitud de onda completa en el patrón de campo eléctrico.

Puesto que las cargas en oscilación crean una corriente en las barras, también se genera un campo magnético cuando la corriente en las barras es hacia arriba, como se muestra en la figura 21.19. Las líneas de campo magnético dan vueltas a la antena (recuerde la regla de la mano derecha número 2) y son perpendiculares al campo eléctrico en todos los puntos. Conforme la corriente cambia con el tiempo, las líneas de campo magnético se dispersan desde la antena. A grandes distancias de la antena, las intensidades de los campos eléctrico y magnético se vuelven muy débiles. Sin embargo, a estas distancias es necesario tomar en cuenta los hechos de que 1) un campo magnético variable produce un campo eléctrico y 2) un campo eléctrico variable produce un campo magnético, como predijo Maxwell. Estos campos eléctrico y magnético inducidos están en fase: en cualquier punto, los dos campos alcanzan sus valores máximos en el mismo instante. Esta sincronía se ilustra en un instante de tiempo en la figura activa 21.20. Observe que 1) los campos \vec{E} y \vec{B} son mutuamente perpendiculares y 2) ambos campos son perpendiculares a la dirección de movimiento de la onda. Esta segunda propiedad es característica de las ondas transversales. Por lo tanto, vemos que **una onda electromagnética es una onda transversal**.

21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Vimos que el análisis detallado de Maxwell predijo la existencia y las propiedades de las ondas electromagnéticas. En esta sección se resume lo que se conoce acerca de las ondas electromagnéticas hasta el momento y se consideran algunas propiedades adicionales. En el presente análisis y en secciones futuras, con frecuencia se hará referencia a un tipo de onda llamada **onda plana**. Una onda electromagnética plana es una onda que viaja desde una fuente muy distante. La figura activa 21.20 representa tal onda en un instante de tiempo dado. En este caso las oscilaciones de los campos eléctrico y magnético tienen lugar en planos perpendiculares al eje xy y por lo tanto son perpendiculares a la dirección de viaje de la onda. Debido a la última propiedad, las ondas electromagnéticas son ondas transversales. En la figura el campo eléctrico \vec{E} está en la dirección y y el campo magnético \vec{B} está en la dirección z . La luz se propaga en una dirección perpendicular a estos dos campos. Esta dirección se determina todavía mediante otra regla de mano derecha: 1) apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de \vec{E} , 2) enróllelos en la dirección de \vec{B} y 3) entonces el pulgar derecho apunta en la dirección de propagación de la onda.

Las ondas electromagnéticas viajan con la velocidad de la luz. De hecho, se puede demostrar que la velocidad de una onda electromagnética se relaciona con la permeabilidad y permitividad del medio a través del cual viaja. Maxwell encontró que esta relación en el espacio libre era

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad [21.24]$$

donde c es la velocidad de la luz, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$ es la constante de permeabilidad del vacío y $\epsilon_0 = 8.854 19 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ es la permitividad del espacio libre. Al sustituir estos valores en la ecuación 21.24, se encuentra que

$$c = 2.997 92 \times 10^8 \text{ m/s} \quad [21.25]$$

Velocidad de la luz ►

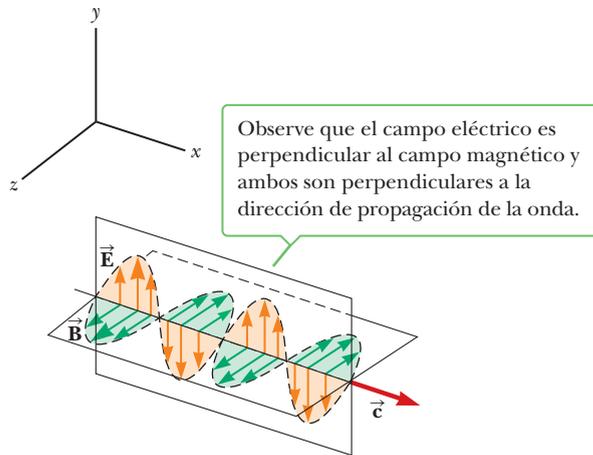


Figura activa 21.20 Una onda electromagnética enviada por cargas en oscilación en una antena, representada en un instante de tiempo y lejos de la antena, que se mueve en la dirección x positiva con velocidad c .

Puesto que las ondas electromagnéticas viajan con la misma velocidad que la luz en el vacío, los científicos concluyeron (correctamente) que **la luz es una onda electromagnética**.

Maxwell también probó la siguiente relación para ondas electromagnéticas:

$$\frac{E}{B} = c \quad [21.26]$$

que afirma que la razón de la magnitud del campo eléctrico a la magnitud del campo magnético es igual a la velocidad de la luz.

Las ondas electromagnéticas portan energía conforme viajan a través del espacio y esta energía se puede transferir a objetos colocados en sus trayectorias. La razón promedio a la que la energía pasa a través de un área perpendicular a la dirección de viaje de una onda o la potencia promedio por unidad de área, se llama **intensidad I** de la onda y está dada por

$$I = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} \quad [21.27]$$

donde $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ son los valores *máximos* de E y B . La cantidad I es análoga a la intensidad de las ondas sonoras que se introdujo en el capítulo 14. A partir de la ecuación 21.26, se ve que $E_{\text{máx}} = cB_{\text{máx}} = B_{\text{máx}}/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$. Por lo tanto, la ecuación 21.27 también se puede expresar como

$$I = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0} B_{\text{máx}}^2 \quad [21.28]$$

Observe que en estas expresiones se usa la potencia *promedio* por unidad de área. Un análisis detallado demostraría que la energía que porta una onda electromagnética se comparte equitativamente por los campos eléctrico y magnético.

Las ondas electromagnéticas tienen una intensidad promedio dada por la ecuación 21.28. Cuando las ondas golpean un área A de la superficie de un objeto para un tiempo dado Δt , energía $U = IA\Delta t$ se transfiere a la superficie. También se transfiere cantidad de movimiento. En consecuencia, cuando una onda electromagnética incide sobre una superficie, ejerce presión sobre ella. A continuación, suponemos que la onda electromagnética transporta una energía total U a una superficie en un tiempo Δt . Si la superficie absorbe toda la energía incidente U en este tiempo, Maxwell demostró que la cantidad de movimiento total \vec{p} que se entrega a esta superficie tiene una magnitud

$$p = \frac{U}{c} \quad (\text{absorción completa}) \quad [21.29]$$

Si la superficie es un reflector perfecto, entonces la cantidad de movimiento que se transfiere en un tiempo Δt para incidencia normal es el doble de la dada por la ecuación 21.29. Esto es análogo a una molécula de gas que rebota de la pared de un contenedor en una

Tip 21.2 ¿ E más fuerte que B ?

La relación $E = Bc$ hace que parezca que los campos eléctricos asociados con la luz sean mucho mayores que los campos magnéticos. Éste no es el caso: las unidades son diferentes, por lo que las cantidades no se pueden comparar directamente. Los dos campos contribuyen por igual a la energía de una onda de luz.

◀ La luz es una onda electromagnética y transporta energía y cantidad de movimiento

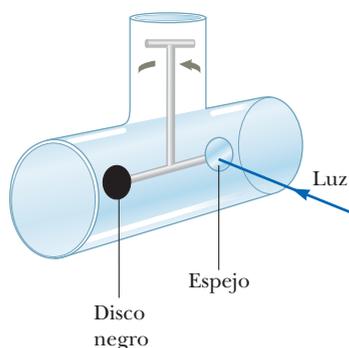


Figura 21.21 Un aparato para medir la presión de radiación de la luz. En la práctica, el sistema está contenido en un alto vacío.

colisión perfectamente elástica. Si la molécula inicialmente viaja en la dirección x positiva a la velocidad v y después de la colisión viaja en la dirección x con velocidad v , su cambio en cantidad de movimiento está dado por $\Delta p = mv - (-mv) = 2mv$. La luz que rebota de un reflector perfecto es un proceso similar, de modo que para reflexión completa,

$$p = \frac{2U}{c} \quad (\text{reflexión completa}) \quad [21.30]$$

Aunque las presiones de radiación son muy pequeñas (aproximadamente $5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ para luz solar directa), se han medido con un dispositivo como el que se muestra en la figura 21.21. La luz golpea un espejo y un disco negro que se conectan mutuamente mediante una barra horizontal suspendida de una fina fibra. La luz que golpea el disco negro se absorbe por completo, de modo que *toda* la cantidad de movimiento de la luz se transfiere al disco. La luz que golpea el espejo de manera frontal se refleja totalmente; en consecuencia, la cantidad de movimiento que se transfiere al espejo es el doble de la que se transmite al disco. Como resultado, la barra horizontal que sostiene los discos gira contra las manecillas del reloj, visto desde arriba. La barra llega al equilibrio en cierto ángulo bajo la acción de los torques causados por la presión de radiación y el giro de la fibra. La presión de radiación se puede determinar al medir el ángulo al que ocurre el equilibrio. El aparato se debe colocar en un alto vacío para eliminar los efectos de corrientes de aire. Es interesante que experimentos similares demuestran que las ondas electromagnéticas también portan cantidad de movimiento angular.

En resumen, las ondas electromagnéticas que viajan a través del espacio libre tienen las siguientes propiedades:

Algunas propiedades de las ▶
ondas electromagnéticas

1. Las ondas electromagnéticas viajan con la velocidad de la luz.
2. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales porque los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y uno a otro.
3. La razón del campo eléctrico al campo magnético en una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz.
4. Las ondas electromagnéticas portan tanto energía como cantidad de movimiento, que se pueden entregar a una superficie.

■ FÍSICA APLICADA 21.3 Polvo del Sistema Solar

En el espacio interplanetario del Sistema Solar, existe una gran cantidad de polvo. Aunque el polvo interplanetario en teoría puede tener varios tamaños, desde tamaño molecular hacia arriba, ¿por qué en el Sistema Solar hay tan pocas partículas de polvo menores que más o menos $0.2 \mu\text{m}$? *Sugerencia:* El Sistema Solar originalmente contenía partículas de polvo de todos los tamaños.

EXPLICACIÓN Las partículas de polvo en el Sistema Solar están sujetas a dos fuerzas: la fuerza gravitacional hacia el Sol y la fuerza de la presión de radiación, que se dirige ale-

jándose del Sol. La fuerza gravitacional es proporcional al cubo del radio de una partícula de polvo esférica porque es proporcional a la masa (ρV) de la partícula. La presión de radiación es proporcional al cuadrado del radio porque depende del área transversal de la partícula. Para partículas grandes, la fuerza gravitacional es mayor que la fuerza de la presión de radiación y la débil atracción hacia el Sol hace que tales partículas se muevan lentamente hacia él. Para partículas pequeñas, menores a aproximadamente $0.2 \mu\text{m}$, la fuerza más grande de la presión de radiación las barre del Sistema Solar. ■

■ Examen rápido

21.7 En un aparato como el de la figura 21.21, suponga que el disco negro se sustituye con uno con la mitad del radio. ¿Cuáles de los siguientes elementos son diferentes después de sustituir el disco? a) presión de radiación sobre el disco, b) fuerza de radiación sobre el disco, c) cantidad de movimiento de radiación entregada al disco en un intervalo de tiempo dado.

EJEMPLO 21.8 Un techo caliente de estaño (hogares con energía solar)

OBJETIVO Calcular algunas propiedades básicas de la luz y relacionélas con la radiación térmica.

PROBLEMA Suponga que el Sol entrega una potencia promedio por unidad de área de aproximadamente $1.00 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ a la superficie de la Tierra. **a)** Calcule la potencia total incidente sobre un techo de estaño plano de 8.00 m por 20.0 m . Suponga que la radiación incide de manera *normal* (perpendicular) al techo. **b)** El techo de estaño refleja algo de luz y convección, conducción y radiación transportan el resto de la energía térmica hasta que se establece cierta temperatura de equilibrio. Si el techo es un cuerpo negro perfecto y se deshace él mismo de la mitad de la radiación incidente a través de radiación térmica, ¿cuál es su temperatura de equilibrio? Suponga que la temperatura ambiente es 298 K .

GorillaAttack, 2010/Utilizada bajo licencia de Shutterstock.com



(Ejemplo 21.8) Una casa solar.

SOLUCIÓN

a) Calcule la potencia que se entrega al techo.

Multiplique la intensidad por el área para obtener la potencia:

$$P = IA = (1.00 \times 10^3 \text{ W/m}^2)(8.00 \text{ m} \times 20.0 \text{ m}) \\ = 1.60 \times 10^5 \text{ W}$$

b) Encuentre la temperatura de equilibrio del techo.

Sustituya en la ley de Stefan. Sólo debe sustituir la mitad de la potencia incidente y el doble del área del techo (cuentan tanto la parte superior como el lado inferior del techo).

$$P = \sigma eA(T^4 - T_0^4) \\ T^4 = T_0^4 + \frac{P}{\sigma eA} \\ = (298 \text{ K})^4 + \frac{(0.500)(1.60 \times 10^5 \text{ W/m}^2)}{(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(1)(3.20 \times 10^2 \text{ m}^2)} \\ T = 333 \text{ K} = 6.0 \times 10^1 \text{ }^\circ\text{C}$$

COMENTARIOS Si la potencia incidente se pudiera convertir *toda* en potencia eléctrica, sería más que suficiente para la casa promedio. Por desgracia, la energía solar no se aprovecha fácilmente y los prospectos para conversión a gran escala no son tan brillantes como pudiera parecer a partir de este cálculo simple. Por ejemplo, la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica es mucho menor que 100%; -20% es típico para celdas fotovoltaicas. Se han construido sistemas de techo que usan energía solar para elevar la temperatura del agua con eficiencias de alrededor del 50%. Sin embargo, se deben considerar otros problemas prácticos, como los días nublados, la posición geográfica y el almacenamiento de energía.

PREGUNTA 21.8 ¿El ángulo que forma el techo con respecto a la horizontal afecta la cantidad de potencia que absorbe el techo? Explique.

EJERCICIO 21.8 Un satélite esférico que orbita la Tierra se ilumina en un lado por el Sol, con 1340 W/m^2 de intensidad. Si el radio del satélite es 1.00 m , ¿qué potencia incide sobre él? *Nota:* El satélite efectivamente intercepta radiación sólo sobre una sección transversal, un área igual a la de un disco, πr^2 .

RESPUESTA $4.21 \times 10^3 \text{ W}$

EJEMPLO 21.9 Barcos de vela espaciales

OBJETIVO Relacionar la intensidad de la luz con su efecto mecánico sobre la materia.

PROBLEMA La película Mylar aluminizada es un material ligero, enormemente reflectivo, que se podría usar para elaborar velas para naves espaciales impulsadas mediante la luz del Sol. Suponga que una vela con un área de 1.00 km^2 orbita el Sol a una distancia de $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$. La vela tiene una masa de $5.00 \times 10^3 \text{ kg}$ y se sujeta a una carga de $2.00 \times 10^4 \text{ kg}$ de masa. **a)** Si la intensidad de la luz solar es $1.34 \times 10^3 \text{ W}$ y la

vela se orienta perpendicular a la luz incidente, ¿qué fuerza radial se ejerce sobre la vela? **b)** ¿Aproximadamente cuánto tardará en cambiar la velocidad radial de la vela por 1.00 km/s ? Suponga que la vela es perfectamente reflectiva. **c)** Suponga que la luz fue suministrada por un grande y poderoso láser, en lugar del Sol. (Estos sistemas se han propuesto.) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico de la luz láser.

(continúa)

ESTRATEGIA La ecuación 21.30 proporciona la cantidad de movimiento que se imparte cuando la luz golpea un objeto y se refleja totalmente. El cambio en esta cantidad de movimiento con el tiempo es una fuerza. Para el inciso b), use la segunda ley de Newton para obtener la aceleración. La ecuación cinemática de velocidad produce entonces el tiempo necesario para lograr el cambio deseado en la velocidad. El inciso c) se obtiene a partir de la ecuación 21.27 y $E = Bc$

SOLUCIÓN

a) Encuentre la fuerza que se ejerce sobre la vela.

Escriba la ecuación 21.30 y sustituya $U = P\Delta t = IA\Delta t$ para la energía que se entrega a la vela:

Divida ambos lados por Δt y obtenga la fuerza $\Delta p/\Delta t$ que la luz ejerce sobre la vela:

$$\Delta p = \frac{2U}{c} = \frac{2P\Delta t}{c} = \frac{2IA\Delta t}{c}$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{2IA}{c} = \frac{2(1340 \text{ W/m}^2)(1.00 \times 10^6 \text{ m}^2)}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 8.93 \text{ N}$$

b) Encuentre el tiempo que tarda en cambiar la velocidad radial en 1.00 km/s.

Sustituya la fuerza en la segunda ley de Newton y resuelva para la aceleración de la vela:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{8.93 \text{ N}}{2.50 \times 10^4 \text{ kg}} = 3.57 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$$

Aplique la ecuación cinemática de velocidad:

$$v = at + v_0$$

Resuelva para t :

$$t = \frac{v - v_0}{a} = \frac{1.00 \times 10^3 \text{ m/s}}{3.57 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2} = 2.80 \times 10^6 \text{ s}$$

c) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico, si la luz es suministrada por un láser.

Resuelva la ecuación 21.28 para $E_{\text{máx}}$:

$$I = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} \rightarrow E_{\text{máx}} = \sqrt{2\mu_0 c I}$$

$$E_{\text{máx}} = \sqrt{2(4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2)(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})(1.34 \times 10^3 \text{ W/m}^2)} = 1.01 \times 10^3 \text{ N/C}$$

Obtenga $B_{\text{máx}}$ utilizando $E_{\text{máx}} = B_{\text{máx}}c$:

$$B_{\text{máx}} = \frac{E_{\text{máx}}}{c} = \frac{1.01 \times 10^3 \text{ N/C}}{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}} = 3.37 \times 10^{-6} \text{ T}$$

COMENTARIOS La respuesta al inciso b) es un poco más de un mes. Aunque la aceleración es muy baja, no hay costos por combustible y dentro de pocos meses la velocidad puede cambiar lo suficiente para permitir que la nave espacial llegue a cualquier planeta en el Sistema Solar. Tal nave espacial puede ser útil para ciertos propósitos y son enormemente económicas, pero requieren una considerable cantidad de paciencia.

PREGUNTA 21.9 ¿En qué factor cambiará la fuerza que ejerce la luz del Sol cuando la nave espacial esté el doble de lejos del Sol? a) no cambia b) $\frac{1}{2}$ c) $\frac{1}{4}$ d) $\frac{1}{8}$

EJERCICIO 21.9 Un láser tiene una potencia de 22.0 W y un radio de haz de 0.500 mm. a) Encuentre la intensidad del láser. b) Suponga que flota en el espacio y apunta

el haz láser alejándose de usted. ¿Cuál sería su aceleración? Suponga que su masa total, incluido el equipo, es de 72.0 kg y que la fuerza se dirige a través de su centro de masa. *Sugerencia:* El cambio en cantidad de movimiento es el mismo que en el caso no reflectivo. c) Calcule su aceleración si ésta se debiera a la gravedad de una estación espacial de 1.00×10^6 kg de masa, si el centro de masa de la estación está a 100.0 m de distancia. d) Calcule los campos eléctricos y magnéticos pico del láser.

RESPUESTAS a) $2.80 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ b) $1.02 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ c) $6.67 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$ d) $1.45 \times 10^5 \text{ N/C}$, $4.84 \times 10^{-4} \text{ T}$. Si planea usar su soplete láser como propulsor para regresar a la estación, ni se moleste, porque la fuerza de gravedad es más fuerte. Mejor haga que alguien le lance una soga.

21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas

Todas las ondas electromagnéticas viajan en un vacío con la velocidad de la luz, c . Estas ondas transportan energía y cantidad de movimiento desde alguna fuente hasta un receptor. En 1887, Hertz generó y detectó con éxito las ondas electromagnéticas de radiofrecuencia que predijo Maxwell. El mismo Maxwell reconocía como ondas electromagnéticas, tanto

la luz visible como la radiación infrarroja descubierta en 1880 por William Herschel. Ahora sabemos que existen otras formas de ondas electromagnéticas que se distinguen por sus frecuencias y longitudes de onda.

Puesto que todas las ondas electromagnéticas viajan a través del espacio libre con una velocidad c , su frecuencia f y longitud de onda λ se relacionan mediante la expresión importante

$$c = f\lambda \quad [21.31]$$

En la figura 21.22 se presentan los diversos tipos de ondas electromagnéticas. Observe el ancho y el rango de traslapamiento de frecuencias y longitudes de onda. Por ejemplo, una onda de radio AM con una frecuencia de 1.50 MHz (un valor típico) tiene una longitud de onda de

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.50 \times 10^6 \text{ s}^{-1}} = 2.00 \times 10^2 \text{ m}$$

Las siguientes abreviaturas se usan con frecuencia para designar longitudes de onda y distancias cortas:

- 1 micrómetro (μm) = 10^{-6} m
- 1 nanómetro (nm) = 10^{-9} m
- 1 angstrom (\AA) = 10^{-10} m

Las longitudes de onda de la luz visible, por ejemplo, varían de 0.4 a 0.7 μm , o 400 a 700 nm, o 4000 a 7000 \AA .



Raymond A. Serway

Usar gafas para el Sol que carezcan de protección ultravioleta (UV) es peor para sus ojos que no usar gafas en absoluto. Las gafas sin protección absorben algo de luz visible, lo que hace que las pupilas se dilaten. Esto permite que más luz UV entre al ojo, lo que aumenta el daño al cristalino con el tiempo. Sin las gafas, las pupilas se contraen, lo que reduce tanto la radiación visible como la peligrosa radiación UV. Póngase en onda: use gafas con protección UV.

Examen rápido

- 21.8** ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos acerca de las ondas de luz?
- A mayor frecuencia, longitud de onda más larga.
 - A menor frecuencia, longitud de onda más larga.
 - La luz con mayor frecuencia viaja más rápido que la luz con frecuencia más baja.
 - A longitud de onda más corta, mayor frecuencia.
 - A menor frecuencia, longitud de onda más corta.

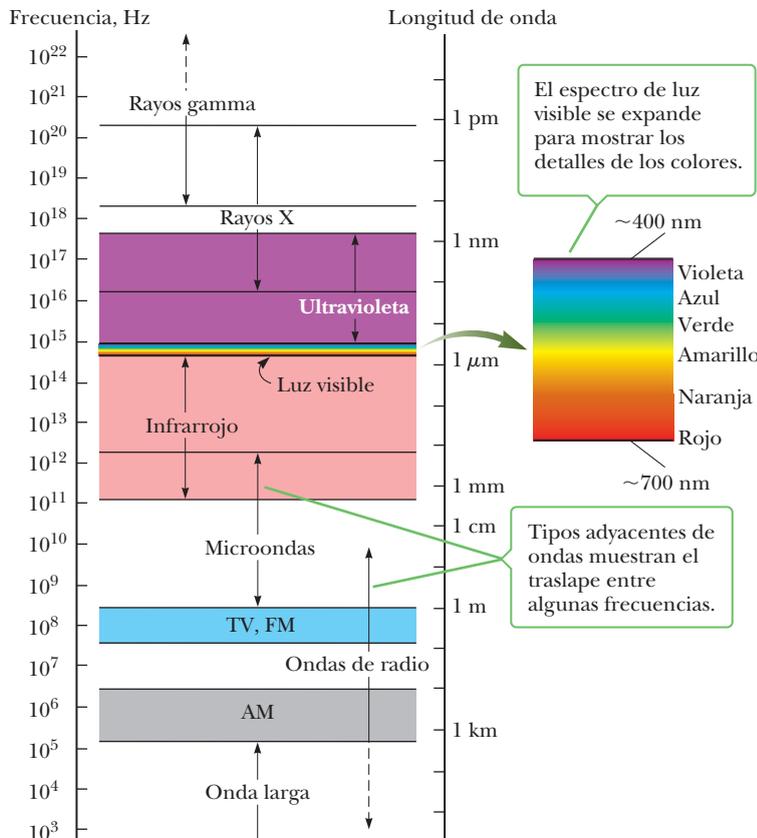


Figura 21.22 El espectro electromagnético.

A continuación se proporcionan breves descripciones de los tipos de onda, en orden de longitud de onda decreciente. No hay división precisa entre un tipo de onda electromagnética y el siguiente. Todas las formas de radiación electromagnética se producen mediante cargas aceleradas.

Las **ondas de radio**, que se analizaron en la sección 21.10, son el resultado de las cargas que aceleran a través de alambres de conducción. Desde luego, se usan en sistemas de comunicación de radio y televisión.

Las **microondas** (ondas de radio con longitud de onda corta) tienen longitudes de onda que varían entre más o menos 1 mm y 30 cm y se generan mediante dispositivos electrónicos. Sus longitudes de onda cortas las hacen muy adecuadas para los sistemas de radar que se usan en la navegación aérea y para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia. Los hornos de microondas son una interesante aplicación doméstica de estas ondas. Se ha sugerido que la energía solar se podría utilizar al enviar haces de microondas hacia la Tierra desde un colector solar en el espacio.

Las **ondas infrarrojas** (en ocasiones llamadas de manera incorrecta “ondas de calor”), se producen mediante objetos calientes y moléculas, tienen longitudes de onda que varían de más o menos 1 mm a la longitud de onda más larga de la luz visible, 7×10^{-7} m. Se absorben con facilidad por la mayoría de los materiales. La energía infrarroja que absorbe una sustancia hace que se ponga más caliente porque la energía agita los átomos del objeto, lo que aumenta su movimiento vibratorio o traslacional. El resultado es un aumento en temperatura. La radiación infrarroja tiene muchas aplicaciones prácticas y científicas, incluidas terapia física, fotografía infrarroja y el estudio de las vibraciones de los átomos.

La **luz visible**, la forma más familiar de ondas electromagnéticas, se puede definir como la parte del espectro que detecta el ojo humano. La luz se produce mediante el reordenamiento de los electrones en átomos y moléculas. Las longitudes de onda de la luz visible se clasifican como colores que van del violeta ($\lambda \approx 4 \times 10^{-7}$ m) a rojo ($\lambda \approx 7 \times 10^{-7}$ m). La sensibilidad del ojo es una función de la longitud de onda y es mayor a una longitud de onda de aproximadamente 5.6×10^{-7} m (amarillo verdoso).

La **luz ultravioleta (UV)** abarca longitudes de onda que van de más o menos 4×10^{-7} m (400 nm) a 6×10^{-10} m (0.6 nm). El Sol es una importante fuente de luz ultravioleta (que es la principal causa del bronceado). La mayor parte de la luz ultravioleta que proviene del Sol la absorben los átomos en la atmósfera superior, o estratosfera, lo que es afortunado, porque la luz UV en grandes cantidades tiene efectos dañinos sobre los humanos. Un importante constituyente de la estratosfera es el ozono (O_3), que se produce a partir de reacciones de oxígeno con radiación ultravioleta. La capa de ozono resultante hace que la letal radiación ultravioleta de alta energía caliente la estratosfera.

Los **rayos X** son ondas electromagnéticas con longitudes de onda de más o menos 10^{-8} m (10 nm) a 10^{-13} m (10^{-4} nm). La fuente más común de rayos X es la aceleración de electrones de alta energía que bombardean un blanco metálico. Los rayos X se usan como herramienta diagnóstica en medicina y como tratamiento para ciertas formas de cáncer. Puesto que los rayos X penetran con facilidad y dañan o destruyen tejidos y organismos vivos, se debe tener cuidado para evitar exposición innecesaria y sobreexposición.

Los **rayos gamma**, ondas electromagnéticas emitidas por núcleos radiactivos, tienen longitudes de onda que varían de alrededor de 10^{-10} m a menos de 10^{-14} m. Son enormemente penetrantes y causan daño serio cuando la absorben los tejidos vivos. En concordancia, quienes trabajan cerca de tal radiación deben protegerse con prendas que contengan pesados materiales absorbentes, como capas de plomo.

Cuando los astrónomos observan el mismo objeto celeste con el uso de detectores sensibles a diferentes regiones del espectro electromagnético, se pueden apreciar sorprendentes variaciones en las características del objeto. La figura 21.23 muestra imágenes de la nebulosa del Cangrejo tomadas en tres rangos distintos de longitud de onda. La nebulosa del

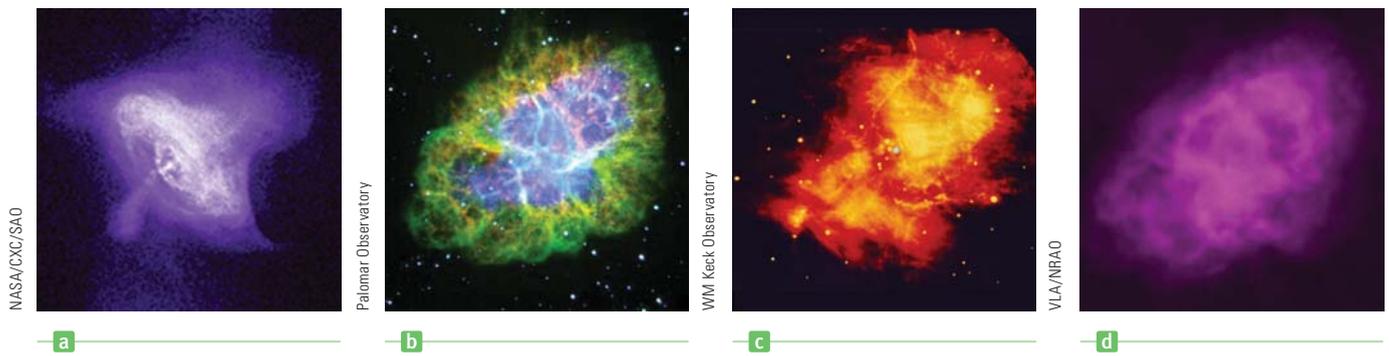


Figura 21.23 Observaciones en diferentes partes del espectro electromagnético muestran diferentes características de la nebulosa del Cangrejo. a) Imagen de rayos X. b) Imagen óptica. c) Luz visible polarizada. d) Imagen de radio.

Cangrejo es el remanente de una explosión supernova que se vio desde la Tierra en 1054 d. C. (Compare con la figura 8.31.)

■ FÍSICA APLICADA 21.4 Luz y tratamiento de heridas BIO

Un tema importante en la salud humana es el manejo de las heridas. Las heridas crónicas afectan de cinco millones hasta siete millones de personas en los Estados Unidos a un costo anual de más de veinte mil millones de dólares. La terapia con láser de bajo nivel ha demostrado facilitar la curación y el cierre de las heridas.

La luz infrarroja aumenta la generación de trifosfato de adenosina (ATP) en las mitocondrias y puede estimular la activación de genes y enzimas asociadas con la respiración celular. (Las moléculas de ATP proporcionan la energía para una variedad de funciones celulares importantes.) La luz infrarroja también puede aumentar la concentración de moléculas reactivas del oxígeno, lo que podría aumentar la comunicación entre el núcleo, el citosol y la mitocondria. Este mecanismo puede mejorar y acelerar el proceso de curación.

La luz verde del láser también puede ser utilizada para estimular los mecanismos de reparación del cuerpo por medio de un proceso diferente. Un tinte de color rosa, llamado “rosa de bengala,” se aplica a los tejidos, que se exponen a la luz del láser durante unos minutos. Cuando el colorante absorbe la luz, hace enlaces cruzados entre las moléculas de colágeno en el tejido. Las moléculas entrecruzadas promueven



Figura 21.24 Después de unir los lados de la herida con suturas profundas, el cierre en el lado izquierdo se logra con la tecnología de luz activada, mientras que el cierre lateral derecho se llevó a cabo con puntos de sutura. Esta foto, tomada al final de dos semanas, muestra que la sanidad ha mejorado con la activación de la luz.

el cierre de los tejidos y reducen o eliminan la formación de cicatriz en el tejido. La figura 21.24 muestra el contraste entre los tejidos que reciben el tratamiento normal y el tejido irradiado por rayos láser. La técnica también está siendo estudiada para su aplicación a los nervios periféricos dañados, los vasos sanguíneos y otros tejidos, tales como incisiones en la córnea durante una cirugía ocular. ■

■ FÍSICA APLICADA 21.5 El Sol y la evolución del ojo BIO

El centro de sensibilidad de sus ojos coincide con el centro de la distribución de longitud de onda del Sol. ¿Ésta es una coincidencia sorprendente?

EXPLICACIÓN Este hecho no es una coincidencia; más bien es el resultado de la evolución biológica. Los humanos evo-

lucionaron con visión más sensible a longitudes de onda que son más intensas desde el Sol. Si los habitantes de otro planeta llegaran alguna vez a la Tierra, sus ojos tendrían el centro de sensibilidad en longitudes de onda diferentes a la suya. Si su Sol fuese una enana roja, por ejemplo, los ojos de los extraterrestres serían más sensibles a la luz roja. ■

21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

Como vimos en la sección 14.6, las ondas sonoras muestran el efecto Doppler cuando el observador, la fuente o ambos se mueven en relación con el medio de propagación. Recuerde que, en el efecto Doppler, la frecuencia observada de la onda es mayor o menor que la frecuencia emitida por la fuente de la onda.

También para las ondas electromagnéticas ocurre un efecto Doppler, pero difiere del efecto Doppler para ondas sonoras en dos formas. Primero, en el efecto Doppler para ondas sonoras, el movimiento en relación con el medio es más importante porque las ondas sonoras requieren un medio donde propagarse. En contraste, el medio de propagación no tiene un papel en el efecto Doppler para ondas electromagnéticas porque las ondas no requieren medio para propagarse. Segundo, la velocidad del sonido que aparece en la ecuación para el efecto Doppler para el sonido depende del marco de referencia en que se mide. En contraste, como vimos en el capítulo 26, la velocidad de las ondas electromagnéticas tiene el mismo valor en todos los sistemas coordenados que están o en reposo o en movimiento con velocidad constante uno con respecto al otro.

La ecuación que describe el efecto Doppler para ondas electromagnéticas está dada por la expresión aproximada

$$f_o \approx f_s \left(1 \pm \frac{u}{c} \right) \quad \text{si } u < c \quad [21.32]$$

donde f_o es la frecuencia observada, f_s es la frecuencia emitida por la fuente, u es la velocidad *relativa* del observador y la fuente, y c es la velocidad de la luz en un vacío. Observe que la ecuación 21.32 sólo es válida si u es mucho menor que c . Más aún, también se puede usar para el sonido en tanto la velocidad relativa de la fuente y el observador sea mucho menor que la velocidad del sonido. El signo positivo en la ecuación se debe usar cuando la fuente y el observador se muevan uno hacia otro, mientras que el signo negativo se debe usar cuando se muevan alejándose mutuamente. Por lo tanto, se anticipa un aumento en la frecuencia observada si la fuente y el observador se aproximan mutuamente y una disminución si la fuente y el observador se alejan uno del otro.

Los astrónomos han realizado importantes descubrimientos con el uso de observaciones Doppler sobre la luz que llega a la Tierra desde estrellas y galaxias distantes. Tales mediciones muestran que cuanto más distante está una galaxia de la Tierra, más de su luz se desplaza hacia el extremo rojo del espectro. Este *corrimiento hacia el rojo cosmológico* es una evidencia de que el Universo se expande. El estiramiento y la expansión del espacio, como una lámina de goma que se jala en todas direcciones, es consistente con la teoría de Einstein de la relatividad general. Una estrella o una galaxia dada, sin embargo, puede tener un movimiento peculiar acercándose o alejándose de la Tierra. Por ejemplo, mediciones de efecto Doppler más recientes hechas con el telescopio espacial Hubble muestran que una galaxia marcada como M87 gira, con un extremo que se mueve hacia la Vía Láctea y el otro que se aleja. Su velocidad de rotación medida se usó para identificar un hoyo negro supermasivo ubicado en su centro.

RESUMEN

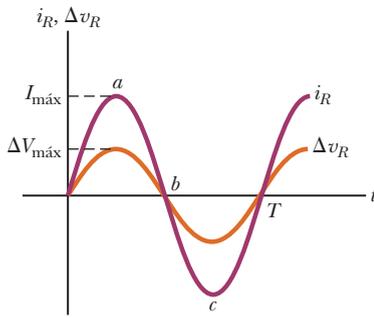
21.1 Resistores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un resistor, la corriente en el circuito está en fase con el voltaje, lo que significa que la corriente y el voltaje alcanzan sus valores máximos al mismo tiempo.

En discusiones de voltajes y corrientes en circuitos CA, por lo general se usan **valores rms** de voltajes. Una razón es

que los amperímetros y voltímetros CA están diseñados para leer valores rms. Los valores rms de corrientes y voltajes (I_{rms} y ΔV_{rms}) se relacionan con los valores máximos de estas cantidades ($I_{\text{máx}}$ y $\Delta V_{\text{máx}}$) del modo siguiente:

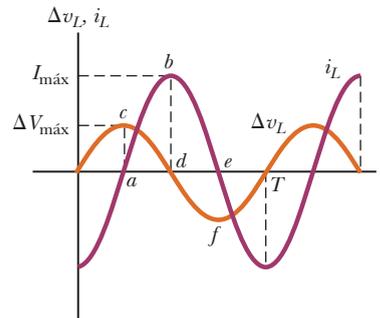
$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad \text{y} \quad \Delta V_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad [21.2, 21.3]$$



El voltaje a través de una resistencia y la corriente están en fase: alcanzan al mismo tiempo sus valores máximos, sus valores mínimos y sus valores cero.

El voltaje rms a través de un resistor se relaciona con la corriente rms en el resistor mediante la **ley de Ohm**:

$$\Delta V_{R,rms} = I_{rms}R \quad [21.4a]$$



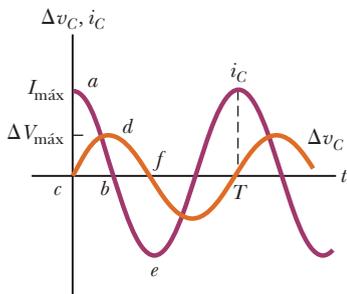
El voltaje a través de un inductor alcanza su valor máximo de 90° antes de que la corriente alcance su valor máximo, por lo que el voltaje “adelanta” la corriente.

El voltaje rms a través de una bobina se relaciona con la corriente rms en la bobina mediante

$$\Delta V_{L,rms} = I_{rms}X_L \quad [21.9]$$

21.2 Capacitores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un capacitor, el voltaje se retrasa a la corriente por 90°. Esto significa que el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo después que la corriente alcanza su valor máximo.



El voltaje a través de un capacitor alcanza su valor máximo de 90° después de que la corriente llega a su valor máximo, por lo que el voltaje “atrassa” la corriente.

El efecto de impedimento de un capacitor sobre la corriente en un circuito CA está dado por la **reactancia capacitiva** X_C , que se define como

$$X_C \equiv \frac{1}{2\pi fC} \quad [21.5]$$

donde f es la frecuencia de la fuente de voltaje CA.

El voltaje rms a través de un capacitor y la corriente rms en él, se relacionan mediante

$$\Delta V_{C,rms} = I_{rms}X_C \quad [21.6]$$

21.3 Inductores en un circuito CA

Si un circuito CA consiste de un generador y un inductor, el voltaje se adelanta a la corriente por 90°. Esto significa que el voltaje alcanza su valor máximo un cuarto de periodo antes que la corriente alcance su valor máximo.

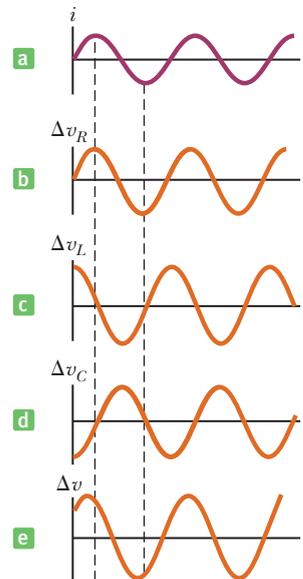
La impedancia efectiva de una bobina en un circuito CA se mide por una cantidad llamada **reactancia inductiva** X_L , que se define como

$$X_L \equiv 2\pi fL \quad [21.8]$$

21.4 El circuito RLC en serie

En un circuito RLC en serie, el voltaje máximo aplicado ΔV se relaciona con los voltajes máximos a través del resistor (ΔV_R), del capacitor (ΔV_C) y del inductor (ΔV_L) mediante

$$\Delta V_{máx} = \sqrt{\Delta V_R^2 + (\Delta V_L - \Delta V_C)^2} \quad [21.10]$$



La dependencia temporal de las diferencias de voltaje de los diferentes elementos de un circuito RLC en serie se muestran en estas gráficas. Observe que el Δv_R está en fase con la corriente, Δv_L adelanta la corriente y Δv_C atrassa la corriente.

Si un circuito CA contiene un resistor, un inductor y un capacitor conectados en serie, el límite que colocan sobre la corriente está dado por la **impedancia** Z del circuito, que se define como

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [21.13]$$

La relación entre el voltaje máximo que se suministra a un circuito CA RLC en serie y la máxima corriente en el circuito, que es la misma en cada elemento, es

$$\Delta V_{máx} = I_{máx}Z \quad [21.14]$$

En un circuito CA *RLC* en serie, el voltaje rms aplicado y la corriente están fuera de fase. El **ángulo de fase** ϕ entre la corriente y el voltaje está dado por

$$\tan \phi = \frac{X_L - X_C}{R} \quad [21.15]$$

21.5 Potencia en un circuito CA

La **potencia promedio** que entrega la fuente de voltaje en un circuito CA *RLC* en serie es

$$P_{\text{prom}} = I_{\text{rms}} \Delta V_{\text{rms}} \cos \phi \quad [21.17]$$

donde la constante $\cos \phi$ se denomina **factor de potencia**.

21.6 Resonancia en un circuito *RLC* en serie

En general, la corriente rms en un circuito *RLC* en serie se puede escribir

$$I_{\text{rms}} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{\Delta V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad [21.18]$$

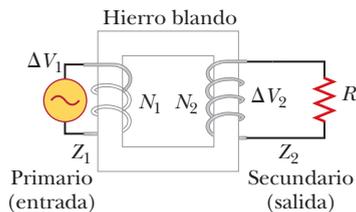
La corriente tiene su valor *máximo* cuando la impedancia tiene su valor *mínimo*, que corresponde a $X_L = X_C$ y $Z = R$. La frecuencia f_0 a la que esto ocurre se llama **frecuencia de resonancia** del circuito, dada por

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [21.19]$$

21.7 El transformador

Si el devanado primario de un transformador tiene N_1 espiras y el devanado secundario consiste de N_2 espiras y luego se aplica una entrada de voltaje CA ΔV_1 al primario, el voltaje inducido en el devanado secundario está dado por

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1 \quad [21.22]$$



Un voltaje CA ΔV_1 se aplica a la bobina primaria, y el voltaje de salida ΔV_2 se observa a través de la resistencia de carga R .

Cuando N_2 es mayor que N_1 , ΔV_2 excede a ΔV_1 y al transformador se le conoce como *transformador de subida*. Cuando N_2 es menor que N_1 , lo que hace que ΔV_2 sea menor que ΔV_1 , se tiene un *transformador de bajada*. En un transformador ideal, la salida de potencia es igual a la entrada de potencia.

21.8–21.13 Ondas electromagnéticas y sus propiedades

James Clerk Maxwell predijo las **ondas electromagnéticas** y Heinrich Hertz las confirmó experimentalmente. Estas ondas se crean mediante cargas eléctricas en aceleración y tienen las siguientes propiedades:

1. Las ondas electromagnéticas son ondas transversales porque los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de las ondas.
2. Las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.
3. La razón del campo eléctrico al campo magnético en un punto dado en una onda electromagnética es igual a la velocidad de la luz:

$$\frac{E}{B} = c \quad [21.26]$$

4. Las ondas electromagnéticas portan energía conforme viajan a través del espacio. La potencia promedio por unidad de área es la intensidad I , dada por

$$I = \frac{E_{\text{máx}} B_{\text{máx}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{máx}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c}{2\mu_0} B_{\text{máx}}^2 \quad [21.27, 21.28]$$

donde $E_{\text{máx}}$ y $B_{\text{máx}}$ son los valores máximos de los campos eléctrico y magnético.

5. Las ondas electromagnéticas transportan cantidad de movimiento lineal y angular, así como energía. La cantidad de movimiento p que se entrega a incidencia normal en el tiempo Δt a un objeto que absorbe por completo la energía luminosa U está dada por

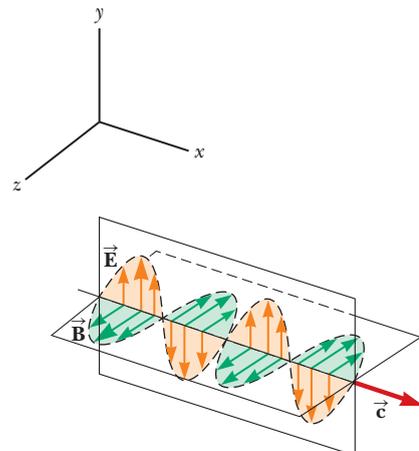
$$p = \frac{U}{c} \quad (\text{absorción completa}) \quad [21.29]$$

Si la superficie es un reflector perfecto, la cantidad de movimiento que se entrega en el tiempo Δt a incidencia normal es el doble que el dado por la ecuación 21.29:

$$p = \frac{2U}{c} \quad (\text{reflexión completa}) \quad [21.30]$$

6. La velocidad c , la frecuencia f y la longitud de onda λ de una onda electromagnética se relacionan mediante

$$c = f\lambda \quad [21.31]$$



Una onda electromagnética enviada por las cargas que oscilan en una antena, representadas en un instante de tiempo y lejos de la antena, moviéndose en la dirección x positiva con velocidad c .

El **espectro electromagnético** incluye ondas que abarcan un amplio rango de frecuencia y longitudes de onda. Estas ondas tienen varias aplicaciones y características, que dependen de sus frecuencias o longitudes de onda. La frecuencia de una onda dada se puede correr por la velocidad relativa de observador y fuente, con la frecuencia observada f_o dada por

$$f_o \approx f_s \left(1 \pm \frac{u}{c} \right) \quad \text{si } u < c \quad [21.32]$$

donde f_s es la frecuencia de la fuente, u es la velocidad *relativa* del observador y la fuente, y c es la velocidad de la luz en el vacío. El signo positivo se usa cuando la fuente y el observador se aproximan mutuamente, el signo negativo cuando se alejan uno de otro.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Considere la posibilidad de una onda electromagnética que viaja en la dirección y positiva. El campo magnético asociado con la onda en algún lugar y en algunos puntos al instante en la dirección x negativa se muestra en la figura POM21.1. ¿Cuál es la dirección del campo eléctrico en esta posición y en este instante? a) la dirección x positiva b) la dirección y positiva c) la dirección z positiva d) la dirección z negativa e) la dirección y negativa

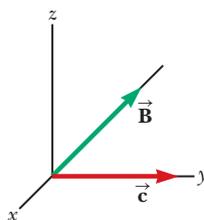


Figura POM21.1

2. Cuando un inductor particular se conecta a una fuente de voltaje que varía sinusoidalmente con amplitud constante y una frecuencia de 60.0 Hz, la corriente rms es 3.0 A. ¿Cuál es la corriente rms si la frecuencia de la fuente se duplica? a) 12 A b) 6.0 A c) 4.2 A d) 3.0 A e) 1.5 A
3. Un circuito RLC en serie contiene un resistor de 20Ω , un capacitor de $0.75 \mu\text{F}$ y un inductor de 120 mH. Si a través de esta combinación de elementos se aplica un voltaje de 120 V rms que varía sinusoidalmente, ¿cuál es la corriente rms en el circuito cuando opera a su frecuencia de resonancia? a) 2.4 A b) 6.0 A c) 10 A d) 17 A e) 8.2 A
4. Encuentre el voltaje a través de un inductor de $(1.0/2\pi)$ H cuando porta 2.0 A de corriente rms a 60.0 Hz. a) 160 V b) 140 V c) 120 V d) 95 V e) 85 V
5. ¿Cuál es el voltaje rms a través de un capacitor con capacitancia $(1.00/2\pi) \mu\text{F}$ que porta 1.00 mA de corriente rms CA a 60.0 Hz? a) 16.7 V b) 13.2 V c) 32.2 V d) 0.560 V e) 4.43 V
6. Un batería de 6.0 V se conecta a través de la bobina primaria de un transformador que tiene 50 espiras. Si la bobina secundaria del transformador tiene 100 espiras, ¿qué voltaje aparece a través del secundario? a) 24 V b) 12 V c) 6.0 V d) 3.0 V e) ninguno de éstos
7. Un horno de microondas típico opera a una frecuencia de 2.45 GHz. ¿Cuál es la longitud de onda asociada con las ondas electromagnéticas en el horno? a) 8.20 m b) 122 cm c) 1.20×10^8 m d) 8.20×10^{-9} m e) ninguna de las respuestas
8. Un inductor y un resistor se conectan en serie a través de un generador CA, como se muestra en la figura POM21.8.

Inmediatamente después de cerrar el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) La corriente es $\Delta V/R$. b) El voltaje a través del inductor es cero. c) La corriente en el circuito es cero. d) El voltaje a través del resistor es ΔV . e) El voltaje a través del inductor es la mitad de su valor máximo.

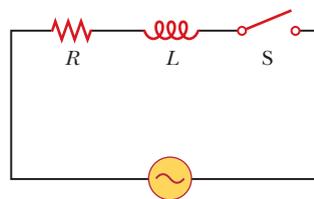


Figura POM21.8

9. Un capacitor y un resistor se conectan en serie a través de un generador CA, como se muestra en la figura POM21.9. Después de que se cierra el interruptor, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) El voltaje a través del capacitor se retrasa a la corriente por 90° . b) El voltaje a través del resistor está fuera de fase con la corriente. c) El voltaje a través del capacitor se adelanta a la corriente por 90° . d) La corriente disminuye conforme aumenta la frecuencia del generador, pero su voltaje pico permanece igual. e) Ninguno de éstos.

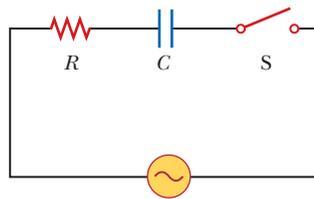


Figura POM21.9

10. Un resistor, un capacitor y un inductor se conectan en serie a través de un generador CA. ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) Toda la potencia se pierde en el inductor. b) Toda la potencia se pierde en el capacitor. c) Toda la potencia se pierde en el resistor. d) La poten-

cia se pierde en los tres elementos. e) La potencia que entrega el generador no depende de la diferencia de fase entre el voltaje del generador y la corriente.

11. Un resistor, un capacitor y un inductor se conectan en serie a través de un generador CA. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso? a) El voltaje instantáneo a través del capacitor se retrasa a la corriente por 90° . b) El voltaje instantáneo a través del inductor se adelanta a la corriente por 90° . c) El voltaje instantáneo a través del resistor está en fase con la corriente. d) Los voltajes a través del resistor, capacitor e inductor no están en fase. e) El voltaje rms a través de la combinación de los tres elementos es igual a la suma algebraica de los voltajes rms a través de cada elemento por separado.
12. Si el voltaje a través de un elemento de circuito tiene su valor máximo cuando la corriente en el circuito es cero, ¿cuál de los siguientes enunciados *debe* ser cierto? a) El elemento de circuito es un resistor. b) El elemento de circuito es un capacitor. c) El elemento de circuito es un

inductor. d) La corriente y el voltaje están 90° fuera de fase. e) La corriente y el voltaje están 180° fuera de fase.

13. ¿Cuál es la impedancia de un circuito RLC en serie en resonancia? a) X_L b) X_C c) R d) $X_L - X_C$ e) 0
14. Un circuito RLC en serie contiene un resistor de 20.0Ω , un capacitor de $0.75 \mu\text{F}$ y un inductor de 120 mH . Si a través de esta combinación de elementos se aplica un voltaje rms de 120 V que varía sinusoidalmente con $f = 5.0 \times 10^2 \text{ Hz}$, ¿cuál es la corriente rms en el circuito? a) 2.3 A b) 6.0 A c) 10 A d) 17 A e) 4.8 A
15. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera con respecto a las ondas electromagnéticas que viajan a través del vacío? Más de una afirmación puede ser correcta. a) Todas las ondas tienen la misma longitud de onda. b) Todas las ondas tienen la misma frecuencia. c) Todas las ondas viajan a $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$. d) Los campos eléctricos y magnéticos asociados con las ondas son perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación de las ondas. e) La velocidad de las ondas depende de su frecuencia.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Antes del advenimiento de la televisión por cable y los platos satelitales, los dueños de las casas montaban una antena de televisión en el techo o usaban “orejas de conejo” sobre sus aparatos. (Véase la figura PC21.1.) Ciertas orientaciones de las antenas receptoras en un televisor tienen mejor recepción que otras. Más aún, la mejor orientación varía de estación a estación. Explique.



Figura PC21.1

2. a) ¿El ángulo de fase en un circuito en serie RLC depende de la frecuencia? b) ¿Cuál es el ángulo de fase en el circuito cuando la reactancia inductiva es igual a la reactancia capacitiva?
3. Si la fuente fundamental de una onda sonora es un objeto que vibra, ¿cuál es la fuente fundamental de una onda electromagnética?
4. Las antenas receptoras de radio pueden tener forma de líneas o espiras conductoras. ¿Cuál debe ser la orientación

de cada una de estas antenas en relación con una antena de transmisión que es vertical?

5. En la transmisión de radio, una onda de radio sirve como onda portadora (*carrier*) y la señal sonora se superpone sobre la onda portadora. En la radio de amplitud modulada (AM), la amplitud de la onda portadora varía de acuerdo con la onda sonora. La marina estadounidense en ocasiones usa destellos de luz para enviar código Morse entre barcos vecinos, un proceso que tiene similitudes con la transmisión de radio. a) ¿Este proceso es AM o FM? b) ¿Cuál es la frecuencia portadora? c) ¿Cuál es la frecuencia de la señal? d) ¿Cuál es la antena de transmisión? e) ¿Cuál es la antena receptora?
6. Cuando la luz (u otra radiación electromagnética) viaja a través de una región dada, a) ¿qué es lo que oscila? b) ¿Qué es lo que se transporta?
7. En la navegación espacial, que es una alternativa propuesta para el transporte a otros planetas, una nave espacial porta una vela muy grande. La luz solar que golpea la vela ejerce una fuerza, lo que acelera la nave espacial. ¿La vela debe ser absorbente o reflejante para ser más efectiva?
8. ¿Qué hace una onda de radio con las cargas en la antena de recepción para proporcionar una señal a la radio del automóvil?
9. ¿Un alambre conectado a una batería emite una onda electromagnética?
10. Suponga que una criatura de otro planeta tiene ojos que son sensibles a la radiación infrarroja. Describa lo que vería

si mira alrededor de la habitación en que está usted ahora. Esto es: ¿qué sería brillante y qué sería oscuro?

11. ¿Por qué la fotografía infrarroja de una persona parecería diferente de una fotografía que se tome con luz visible?
12. Si una corriente de alta frecuencia pasa a través de un solenoide que contiene un núcleo metálico, el núcleo se calienta debido a inducción. Explique por qué la temperatura del material se eleva en esta situación.

13. ¿Cuál es la ventaja de transmitir potencia a altos voltajes?
14. ¿Por qué la suma de los voltajes máximos a través de cada uno de los elementos en un circuito RLC en serie por lo general es mayor que el máximo voltaje aplicado? ¿Esto no viola la regla del bucle de Kirchhoff?
15. Si la resistencia en un circuito RLC permanece igual, pero la capacitancia y la inductancia se duplican cada una, ¿cómo cambiará la frecuencia de resonancia?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

21.1 Resistores en un circuito CA

1. a) ¿Cuál es la resistencia de un foco que utiliza una potencia media de 75.0 W cuando se conecta a una fuente de alimentación de 60.0 Hz con un voltaje máximo de 170 V? b) ¿Cuál es la resistencia de un foco de 100 W?
2. **CIC** Cierta foco se clasifica a 60.0 W cuando opera a un voltaje rms de 120 V. a) ¿Cuál es el voltaje pico aplicado a través del foco? b) ¿Cuál es la resistencia del foco? c) ¿Un foco de 100 W tiene mayor o menor resistencia que uno de 60.0 W? Explique.
3. La corriente en el circuito de la figura P21.3 es igual a 60.0% del pico de corriente en $t = 7.00$ ms. ¿Cuál es la frecuencia más baja que la fuente da a esta corriente?

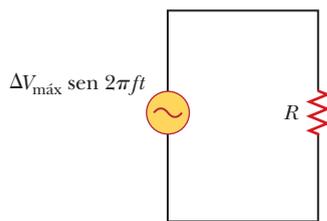


Figura P21.3

4. La figura P21.4 muestra tres lámparas conectadas a un voltaje de suministro casero (rms) de 120 V CA. Las lámparas 1 y 2 tienen focos de 150 W; la lámpara 3 tiene un foco de 100 W. Encuentre, a) la corriente rms y b) la resistencia de cada foco.

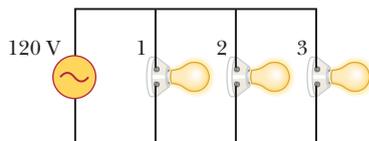


Figura P21.4

5. Un amplificador de audio, que se representa mediante la fuente CA y el resistor R en la figura P21.5, entrega voltajes alternos a frecuencias de audio a la bocina. Si la fuente pone un voltaje alterno de 15.0 V (rms), la resistencia R es 8.20 Ω y la bocina es equivalente a una resistencia de 10.4 Ω , ¿cuál es la potencia promedio en el tiempo que se entrega a las bocinas?
6. **PG** El voltaje de salida de un generador CA está dado por $\Delta v = (170 \text{ V}) \text{sen}(60\pi t)$. El generador se conecta a través de un resistor de 20.0 Ω . Por inspección, ¿cuáles son a) el voltaje máximo y b) la frecuencia? Encuentre c) el voltaje rms a través del resistor, d) la corriente rms en el resistor, e) la corriente máxima en el resistor, f) la potencia entregada al resistor y g) la corriente cuando $t = 0.005$ s. h) ¿El argumento de la función seno estará en grados o radianes?

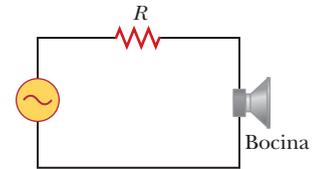


Figura P21.5

21.2 Capacitores en un circuito CA

7. a) ¿Para qué frecuencias un capacitor de 22.0 μF tiene una reactancia por debajo de 175 Ω ? b) ¿Cuál es la reactancia de un condensador de 44.0 μF en este mismo rango de frecuencia?
8. ¿Cuál es la corriente máxima que se entrega a un circuito que contiene un capacitor de 2.20 μF cuando se conecta a través de a) un tomacorriente en Norteamérica que tiene $\Delta V_{\text{rms}} = 120$ V y $f = 60.0$ Hz y b) un tomacorriente en Europa que tiene $\Delta V_{\text{rms}} = 240$ V y $f = 50.0$ Hz?
9. Cuando un capacitor de 4.0 μF se conecta a un generador cuya salida rms es 30 V, se observa que la corriente en el circuito es 0.30 A. ¿Cuál es la frecuencia de la fuente?

10. **CIC** Un generador CA con una salida de voltaje rms de 36.0 V a una frecuencia de 60.0 Hz se conecta a través de un capacitor de 12.0 μF . Encuentre a) la reactancia capacitiva, b) la corriente rms y c) la corriente máxima en el circuito. d) ¿El capacitor tiene su carga máxima cuando la corriente toma su valor máximo? Explique.
11. **M** ¿Qué corriente máxima es entregada por una fuente de CA con $\Delta V_{\text{máx}} = 48.0 \text{ V}$ y $f = 90.0 \text{ Hz}$ cuando se conecta a través de un capacitor de 3.70 μF ?

12. Un generador entrega un voltaje CA de la forma $\Delta v = (98.0 \text{ V}) \sin(80\pi t)$ a un capacitor. La máxima corriente en el circuito es 0.500 A. Encuentre a) el voltaje rms del generador, b) la frecuencia del generador, c) la corriente rms, d) la reactancia y e) el valor de la capacitancia.

21.3 Inductores en un circuito CA

13. Un inductor tiene una reactancia de 54.0 Ω cuando se conecta a una fuente de 60.0 Hz. El inductor es removido y luego se conecta a una fuente de 50.0 Hz, que produce un voltaje rms de 100 V. ¿Cuál es la corriente máxima en el inductor?
14. Un generador CA tiene una salida de voltaje rms de 78.0 V a una frecuencia de 80.0 Hz. Si el generador se conecta a través de un inductor de 25.0 mH, encuentre a) la reactancia inductiva, b) la corriente rms y c) la corriente máxima en el circuito.

15. **M** En un circuito puramente inductivo de CA, como se muestra en la figura P21.15, $\Delta V_{\text{máx}} = 100 \text{ V}$. a) La corriente máxima es de 7.50 A a 50.0 Hz. Calcule la inductancia L . b) ¿A qué frecuencia angular ω la corriente de 2.50 A es máxima?

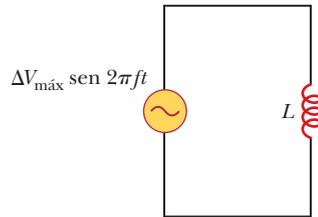


Figura P21.15

16. **PG** El voltaje de salida de un generador CA está dado por $\Delta v = (1.20 \times 10^2 \text{ V}) \sin(30\pi t)$. El generador se conecta a través de un inductor de 0.500 H. Encuentre a) la frecuencia del generador, b) el voltaje rms a través del inductor, c) la reactancia inductiva, d) la corriente rms en el inductor, e) la corriente máxima en el inductor y f) la potencia promedio entregada al inductor. g) Encuentre una expresión para la corriente instantánea. h) ¿En qué tiempo después de $t = 0$ la corriente instantánea alcanza por primera vez 1.00 A? (Use la función inversa de seno.)
17. Determine el flujo magnético máximo a través de un inductor conectado a un tomacorriente estándar ($\Delta V_{\text{rms}} = 120 \text{ V}$, $f = 60.0 \text{ Hz}$).

21.4 El circuito RLC en serie

18. Un voltaje sinusoidal $\Delta v = (80.0 \text{ V}) \sin(150t)$ se aplica a un circuito RLC en serie con $L = 80.0 \text{ mH}$, $C = 125.0 \mu\text{F}$ y $R = 40.0 \Omega$. a) ¿Cuál es la impedancia del circuito? b) ¿Cuál es la corriente máxima en el circuito?

19. Un capacitor de 40.0 μF se conecta a un resistor de 50.0 Ω y a un generador cuya salida rms es 30.0 V a 60.0 Hz. Encuentre a) la corriente rms en el circuito, b) la caída de voltaje rms a través del resistor, c) la caída de voltaje rms a través del capacitor y d) el ángulo de fase para el circuito.

20. **M** Un inductor ($L = 400 \text{ mH}$), un capacitor ($C = 4.43 \mu\text{F}$) y un resistor ($R = 500 \Omega$) se conectan en serie. Un generador CA de 50.0 Hz que se conecta en serie con estos elementos produce una corriente máxima de 250 mA en el circuito. a) Calcule el voltaje máximo requerido $\Delta V_{\text{máx}}$. b) Determine el ángulo de fase por el que la corriente se adelanta o retrasa al voltaje aplicado.

21. Un resistor ($R = 9.00 \times 10^2 \Omega$), un capacitor ($C = 0.250 \mu\text{F}$) y un inductor ($L = 2.50 \text{ H}$) se conectan en serie a través de una fuente CA de $2.40 \times 10^2 \text{ Hz}$ para el cual $\Delta V_{\text{máx}} = 1.40 \times 10^2 \text{ V}$. Calcule a) la impedancia del circuito, b) la corriente máxima que entrega la fuente y c) el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje. d) ¿La corriente se adelanta o retrasa al voltaje?

22. Un resistor de 50.0 Ω , un inductor de 0.100 H y un capacitor de 10.0 μF se conectan en serie a una fuente de 60.0 Hz. La corriente rms en el circuito es 2.75 A. Encuentre los voltajes rms a través de a) el resistor, b) el inductor, c) el capacitor y d) la combinación RLC. e) Bosqueje el diagrama de fasores para este circuito.

23. Un circuito RLC está formado por una resistencia de 150 Ω , un capacitor de 21.0 μF y un inductor de 460 mH conectado en serie con uno de 120 V y una fuente de alimentación de 60.0 Hz. a) ¿Cuál es el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje aplicado? b) ¿Cuál alcanza antes su máximo, la corriente o la tensión?

24. Una fuente CA que opera a 60 Hz con un voltaje máximo de 170 V se conecta en serie con un resistor ($R = 1.2 \text{ k}\Omega$) y un inductor ($L = 2.8 \text{ H}$). a) ¿Cuál es el valor máximo de la corriente en el circuito? b) ¿Cuáles son los valores máximos de la diferencia de potencial a través del resistor y el inductor? c) Cuando la corriente está en un máximo, ¿cuáles son las magnitudes de las diferencias de potencial a través del resistor, el inductor y la fuente CA? d) Cuando la corriente es cero, ¿cuáles son las magnitudes de la diferencia de potencial a través del resistor, el inductor y la fuente CA?

25. Una persona trabaja cerca del secundario de un transformador, como se muestra en la figura P21.25 (página 757). El voltaje primario es 120 V (rms) a 60.0 Hz. La capacitancia C_s , que es la capacitancia parásita entre la mano y el devanado secundario, es 20.0 pF. Suponiendo que la persona tiene una resistencia corporal a tierra de $R_b = 50.0 \text{ k}\Omega$, determine el voltaje rms a través del cuerpo. *Sugerencia:* Vuelva a dibujar el circuito con el secundario del transformador como una fuente CA simple.

26. **CIC** Un resistor de 60.0 Ω se conecta en serie con un capacitor de 30.0 μF y un generador que tiene un voltaje máximo de $1.20 \times 10^2 \text{ V}$ y opera a 60.0 Hz. Encuentre a) la reactancia capacitiva del circuito, b) la impedancia del

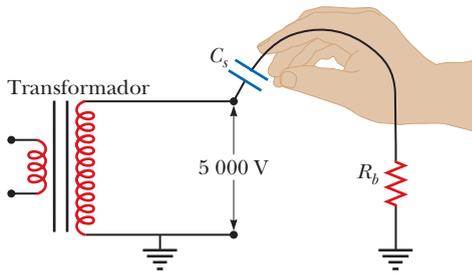


Figura P21.25

circuito y c) la corriente máxima en el circuito. d) ¿El voltaje se adelanta o retrasa a la corriente? e) ¿Cómo afectará la corriente poner un inductor en serie con el capacitor y el resistor existentes? Explique.

27. **PG** Un circuito de CA en serie contiene un resistor, un inductor de 150 mH, un capacitor de $5.00 \mu\text{F}$ y un generador con $\Delta V_{\text{máx}} = 240 \text{ V}$ operando a 50.0 Hz. La corriente máxima en el circuito es de 100 mA. Calcule a) la reactancia inductiva, b) la reactancia capacitiva, c) la impedancia, d) la resistencia en el circuito y e) el ángulo de fase entre la corriente y el voltaje del generador.
28. ¿A qué frecuencia la reactancia inductiva de un inductor de $57.0 \mu\text{H}$ es igual a la reactancia capacitiva de un capacitor $57.0 \mu\text{F}$?
29. Una fuente CA con un voltaje máximo de 150 V y $f = 50.0 \text{ Hz}$ se conecta entre los puntos *a* y *b* en la figura P21.29. Calcule los voltajes rms entre los puntos a) *a* y *b*, b) *b* y *c*, c) *c* y *d* y d) *b* y *d*.

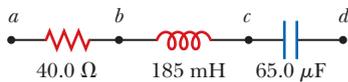


Figura P21.29

21.5 Potencia en un circuito CA

30. Una fuente CA que opera a 60 Hz, con un voltaje máximo de 170 V, se conecta en serie con un resistor ($R = 1.2 \text{ k}\Omega$) y un capacitor ($C = 2.5 \mu\text{F}$). a) ¿Cuál es el valor máximo de la corriente en el circuito? b) ¿Cuáles son los valores máximos de la diferencia de potencial a través del resistor y el capacitor? c) Cuando la corriente es cero, ¿cuáles son las magnitudes de la diferencia de potencial a través del resistor, el capacitor y la fuente CA? ¿Cuánta carga hay en el capacitor en este instante? d) Cuando la corriente está en un máximo, ¿cuáles son las magnitudes de las diferencias de potencial a través del resistor, el capacitor y la fuente CA? ¿Cuánta carga hay en el capacitor en este instante?

31. Un multímetro en un circuito *RL* registra una corriente rms de 0.500 A y un voltaje rms de 60 Hz, generador de 104 V. Un vatímetro muestra que la potencia promedio que entrega al resistor es 10.0 W. Determine a) la impedancia en el circuito, b) la resistencia *R* y c) la inductancia *L*.
32. Un voltaje CA de la forma $\Delta v = (90.0 \text{ V}) \sin(350t)$ se aplica a un circuito *RLC* en serie. Si $R = 50.0 \Omega$, $C = 25.0 \mu\text{F}$ y $L = 0.200 \text{ H}$, encuentre a) la impedancia del circuito, b) la corriente rms en el circuito y c) la potencia promedio que se entrega al circuito.
33. Un voltaje CA de la forma $\Delta v = 100 \sin(1000t)$, donde Δv está en volts y *t* está en segundos, se aplica a un circuito *RLC* en serie. Suponga que la resistencia es de 400Ω , la capacitancia es de $5.00 \mu\text{F}$ y la inductancia es 0.500 H. Determine la potencia promedio que se entrega al circuito.
34. Un circuito *RLC* en serie tiene una resistencia de 22.0Ω y una impedancia de 80.0Ω . Si el voltaje rms que se aplica al circuito es de 160 V, ¿qué potencia promedio se entrega al circuito?
35. Un inductor y un resistor se conectan en serie. Cuando se conecta a una fuente de 90 V (rms) a 60 Hz, la caída de voltaje a través del resistor es de 50 V (rms) y la potencia que se entrega al circuito es 14 W. Encuentre a) el valor de la resistencia y b) el valor de la inductancia.
36. **CIC** Considere un circuito *RLC* en serie con $R = 25 \Omega$, $L = 6.0 \text{ mH}$ y $C = 25 \mu\text{F}$. El circuito se conecta a una fuente CA de 10 V (rms) a 600 Hz. a) ¿La suma de la caída de voltaje a través de *R*, *L* y *C* es igual a 10 V (rms)? b) ¿Cuál es mayor, la potencia que se entrega al resistor, al capacitor o al inductor? c) Encuentre la potencia promedio que se entrega al circuito.

21.6 Resonancia en un circuito RLC en serie

37. **M** Un circuito *RLC* se utiliza en una radio para sintonizar una emisora de radiodifusión en FM en $f = 99.7 \text{ MHz}$. La resistencia en el circuito es $R = 12.0 \Omega$ y la inductancia es $L = 1.40 \mu\text{H}$. ¿Qué capacitancia se debe utilizar?
38. La frecuencia de resonancia de un circuito *RLC* en serie es de 2.84 kHz y el valor de su capacitancia es de $6.50 \mu\text{F}$. ¿Cuál es el valor de la frecuencia de resonancia, cuando la capacitancia del circuito es de $9.80 \mu\text{F}$?
39. La banda AM se extiende desde aproximadamente 500 kHz hasta 1600 kHz. Si un inductor de $2.0 \mu\text{H}$ se usa en un circuito sintonizador para un radio, ¿cuáles son los extremos que debe alcanzar un capacitor para cubrir la banda completa de frecuencias?
40. Considere un circuito *RLC* en serie con $R = 15 \Omega$, $L = 200 \text{ mH}$, $C = 75 \mu\text{F}$ y un voltaje máximo de 150 V. a) ¿Cuál es la impedancia del circuito en resonancia? b) ¿Cuál es la frecuencia de resonancia del circuito? c) ¿Cuándo será mayor la corriente: en resonancia, a 10% bajo la frecuencia de resonancia o a 10% arriba de la frecuencia de resonancia? d) ¿Cuál es la corriente rms en el circuito a una frecuencia de 60 Hz?

41. Dos osciladores eléctricos se utilizan en un detector de metales heterodino para detectar objetos metálicos enterrados (véase figura P21.41). El detector utiliza dos osciladores eléctricos idénticos en forma de circuitos LC con frecuencias de resonancia de 725 kHz. Cuando las señales de los dos circuitos oscilantes se combinan, la frecuencia de sonido es cero, porque cada uno tiene la misma frecuencia de resonancia. Sin embargo, cuando la bobina de un circuito se encuentra con un objeto de metal enterrado, la inductancia de este circuito se incrementa en 1.000%, mientras que la de la segunda no ha cambiado. Determine la frecuencia de sonido que se detecta en esta situación.



Figura P21.41

42. Un circuito en serie contiene un inductor de 3.00 H, un capacitor de 3.00 μF y un resistor de 30.0 Ω conectados a una fuente de 120 V (rms) de frecuencia variable. Encuentre la potencia que se entrega al circuito cuando la frecuencia de la fuente es a) la frecuencia de resonancia, b) la mitad de la frecuencia de resonancia, c) un cuarto de la frecuencia de resonancia, d) dos veces la frecuencia de resonancia y e) cuatro veces la frecuencia de resonancia. A partir de sus cálculos, ¿puede extraer una conclusión acerca de la frecuencia a la que se entrega potencia máxima al circuito?

21.7 El transformador

43. La bobina primaria de un transformador tiene $N_1 = 250$ espiras y su bobina secundaria tiene $N_2 = 1500$ espiras. Si el voltaje de entrada a través de la bobina primaria es $\Delta v = (170 \text{ V}) \sin \omega t$, ¿qué voltaje rms se desarrolla a través de la bobina secundaria?

44. Un transformador de bajada se usa para recargar las baterías de dispositivos portátiles. La razón de espiras N_2/N_1 para un transformador particular que se usa en un reproductor de CD es 1:13. Cuando se usa con la energía doméstica de 120 V (rms), el transformador extrae una corriente rms de 250 mA. Encuentre a) el voltaje de salida rms del transformador y b) la potencia que se entrega al reproductor de CD.

45. Un generador de potencia CA produce 50 A (rms) a 3600 V. El voltaje se sube a 100 000 V mediante un transformador ideal, y la energía se transmite a través de una línea de transmisión de larga distancia que tiene una resistencia de 100 Ω . ¿Qué porcentaje de la potencia que entrega el generador se disipa como calor en la línea de transmisión?

46. Un transformador se usará para proporcionar potencia para una unidad de disco de computadora que necesita 6.0 V (rms) en lugar de los 120 V (rms) del tomacorriente de pared. El número de espiras en el primario es 400

y entrega 500 mA (la corriente secundaria) a un voltaje de salida de 6.0 V (rms). a) ¿El transformador debe tener más espiras en el secundario en comparación con el primario o menos espiras? b) Encuentre la corriente en el primario. c) Encuentre el número de espiras en el secundario.

47. Un transformador sobre un poste cerca de una fábrica baja el voltaje de 3600 V (rms) a 120 V (rms). El transformador entrega 1000 kW a la fábrica a 90% de eficiencia. Encuentre a) la potencia que entrega al primario, b) la corriente en el primario y c) la corriente en el secundario.

48. Una línea de transmisión que tiene una resistencia por unidad de longitud de $4.50 \times 10^{-4} \Omega/\text{m}$ se usará para transmitir 5.00 MW a través de 400 millas ($6.44 \times 10^5 \text{ m}$). El voltaje de salida del generador es 4.50 kV (rms). a) ¿Cuál es la pérdida en la línea si se usa un transformador para subir el voltaje a 500 kV (rms)? b) ¿Qué fracción de la potencia de entrada se pierde en la línea bajo estas circunstancias? c) ¿Qué dificultades se encontrarían al intentar transmitir los 5.00 MW al voltaje del generador de 4.50 kV (rms)?

21.10 Producción de ondas electromagnéticas mediante una antena

21.11 Propiedades de las ondas electromagnéticas

49. La marina estadounidense propuso hace mucho tiempo la construcción de sistemas de comunicación de frecuencia extremadamente baja (ondas ELF); tales ondas podrían penetrar los océanos para alcanzar submarinos distantes. Calcule la longitud de una antena de un cuarto de longitud de onda para un transmisor que genera ondas ELF de 75 Hz de frecuencia. ¿Cuán práctica es esta antena?

50. a) La distancia a Polaris, la Estrella del Norte, es aproximadamente $6.44 \times 10^{18} \text{ m}$. Si Polaris estallara hoy, ¿cuántos años transcurrirían para verla desaparecer? b) ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? c) ¿Cuánto tarda una señal de microonda en viajar de la Tierra a la Luna y de vuelta? (La distancia de la Tierra a la Luna es $3.84 \times 10^5 \text{ km}$.)

51. **CIC** La Tierra refleja aproximadamente 38.0% de la luz solar incidente en sus nubes y la superficie. a) Teniendo en cuenta que la intensidad de la radiación solar en la parte superior de la atmósfera es de 1370 W/m^2 , encuentre la presión de la radiación en la Tierra, en pascales, en el lugar donde el Sol se encuentra justo encima. b) Indique cómo se compara esta cantidad con la presión atmosférica normal en la superficie de la Tierra, que es de 101 kPa.

52. Experimentadores en el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología estadounidense realizaron mediciones precisas de la velocidad de la luz con el uso del hecho de que, en el vacío, la velocidad de las ondas electromagnéticas es $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, donde las constantes $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$ y $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$. ¿Qué valor (a cuatro cifras significativas) proporciona esta fórmula para la velocidad de la luz en el vacío?

53. BIO La hemoglobina oxigenada se absorbe débilmente en el rojo (de ahí su color rojo) y fuertemente en el infrarrojo cercano, mientras que la hemoglobina desoxigenada tiene la absorción opuesta. Este hecho se usa en un “oxímetro de pulso” para medir la saturación de oxígeno en la sangre arterial. El dispositivo se pone en el extremo del dedo de una persona y tiene dos diodos emisores de luz, uno rojo (660 nm) y uno infrarrojo (940 nm), y una fotocelda que detecta la cantidad de luz transmitida a través del dedo en cada longitud de onda. a) Determine la frecuencia de cada una de estas fuentes de luz. b) Si 67% de la energía de la fuente roja se absorbe en la sangre, ¿en qué factor cambia la amplitud de la onda electromagnética? *Sugerencia:* La intensidad de la onda es igual a la potencia promedio por unidad de área según la ecuación 21.28.

54. BIO Operación del oxímetro de pulso (consulte el problema anterior). La transmisión de energía luminosa conforme pasa a través de una solución de moléculas que absorben luz se describe mediante la ley Beer-Lambert

$$I = I_0 10^{-\epsilon CL} \quad \text{o} \quad \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\epsilon CL$$

que proporciona la disminución en intensidad I en términos de la distancia L que la luz recorre a través de un fluido con una concentración C de la molécula que absorbe luz. La cantidad ϵ se llama coeficiente de extinción y su valor depende de la frecuencia de la luz. (Tiene unidades de m^2/mol .) Suponga que el coeficiente de extinción para luz de 660 nm que pasa a través de una solución de hemoglobina oxigenada es idéntica al coeficiente para luz de 940 nm que pasa a través de hemoglobina desoxigenada. Suponga también que la luz de 940 nm tiene absorción cero ($\epsilon = 0$) en hemoglobina oxigenada y la luz de 660 nm tiene absorción cero en la hemoglobina desoxigenada. Si 33% de la energía de la fuente roja y 76% de la energía infrarroja se transmite a través de la sangre, ¿cuál es la fracción de hemoglobina que está oxigenada?

55. El Sol entrega una potencia promedio de 1370 W/m^2 a la parte superior de la atmósfera de la Tierra. Encuentre las magnitudes de $\vec{E}_{\text{máx}}$ y $\vec{B}_{\text{máx}}$ para las ondas electromagnéticas en la parte superior de la atmósfera.

56. C/C Un haz láser se usa para levitar un disco metálico contra la fuerza de gravedad de la Tierra. a) Deduzca una ecuación que proporcione la intensidad requerida de luz, I , en términos de la masa m del disco, la aceleración gravitacional g , la velocidad de la luz c y el área transversal del disco A . Suponga que el disco es perfectamente reflejante y que el haz se dirige perpendicular al disco. b) Si el disco tiene 5.00 g de masa y 4.00 cm de radio, encuentre la intensidad de luz necesaria. c) Proporcione dos razones por las que usar presión como propulsión no es práctico cerca de la superficie de la Tierra.

57. Un horno de microondas se activa mediante un tubo de electrones llamado magnetrón, que genera ondas electromagnéticas de 2.45 GHz de frecuencia. Las microondas entran al horno y se reflejan en las paredes. El patrón de onda estacionaria que se produce en el horno puede

cocinar el alimento de manera desigual, con manchas calientes en el alimento y antinodos y manchas frías en los nodos, de modo que con frecuencia se usa una tornamesa para girar el alimento y distribuir la energía. Si un horno de microondas se usa con un plato para cocinar en una posición fija, los antinodos pueden aparecer como marcas de quemadura sobre los alimentos, como en las tiras de zanahoria o queso. La distancia de separación entre las quemaduras se mide en 6.00 cm. Calcule la velocidad de las microondas a partir de estos datos.

58. Considere la posibilidad de una estrella brillante en nuestro cielo nocturno. Suponga que la distancia desde la Tierra es de 20.0 años luz (al) y su potencia es de $4.00 \times 10^{28} \text{ W}$, alrededor de 100 veces mayor que la del Sol. a) Encuentre la intensidad de la luz de las estrellas en la Tierra. b) Determine la potencia de la luz de las estrellas que la Tierra intercepta. Un año luz es la distancia recorrida por la luz en el vacío en un año.

21.12 El espectro de las ondas electromagnéticas

59. ¿Cuáles son las longitudes de onda de las ondas electromagnéticas en el espacio libre que tienen frecuencias de a) $5.00 \times 10^{19} \text{ Hz}$ y b) $4.00 \times 10^9 \text{ Hz}$?

60. BIO Una máquina diatérmica, que se usa en fisioterapia, genera radiación electromagnética que produce el efecto de “calor profundo” cuando se absorbe en el tejido. Una frecuencia asignada para diatermia es 27.33 MHz. ¿Cuál es la longitud de onda de la radiación?

61. ¿Cuáles son los rangos de longitud de onda en a) la banda de radio AM (540–1600 kHz) y b) la banda de radio FM (88–108 MHz)?

62. Un importante anuncio noticioso se transmite por ondas de radio a personas que están a 100 km de distancia, sentadas junto a sus radios, y mediante ondas sonoras a las personas que están sentadas en la sala de redacción, a 3.0 m del locutor. ¿Quién recibe primero la noticia? Explique. Considere que la velocidad del sonido en el aire es 343 m/s.

63. Los espectros infrarrojos los usan los químicos para ayudarse a identificar una sustancia desconocida. Los átomos en una molécula que se enlazan juntos mediante un enlace particular vibran a una frecuencia predecible y el átomo absorbe fuertemente la luz a dicha frecuencia. En el caso del enlace doble C=O, por ejemplo, el átomo de oxígeno se enlaza al carbono mediante un enlace que tiene una constante de resorte efectiva de 2800 N/m. Suponiendo que el átomo de carbono permanece estacionario (está unido a los otros átomos en la molécula), determine la frecuencia de resonancia de este enlace y la longitud de onda de la luz que coincide con dicha frecuencia. Verifique que esta longitud de onda se encuentra en la región infrarroja del espectro. (La masa de un átomo de oxígeno es $2.66 \times 10^{-26} \text{ kg}$.)

21.13 El efecto Doppler para ondas electromagnéticas

64. Una nave se aproxima a la estación espacial con una velocidad de $1.8 \times 10^5 \text{ m/s}$. La estación tiene un faro que emite luz verde con una frecuencia de $6.0 \times 10^{14} \text{ Hz}$.

- a) ¿Cuál es la frecuencia del faro que se observa en la nave espacial? b) ¿Cuál es el cambio en frecuencia? (Conserve cinco dígitos en estos cálculos.)
65. Mientras conduce a velocidad constante de 80 km/h, pasa junto a un auto que viaja a 120 km/h. Si la frecuencia de la luz que emiten las luces traseras del auto que pasa junto a usted es de 4.3×10^{14} Hz, ¿qué frecuencia observará? ¿Cuál es el cambio en frecuencia?
66. Un conductor que viaja con exceso de velocidad intenta explicar al policía que las luces de advertencia amarillas en el lado del camino le parecieron verdes debido al corrimiento Doppler. ¿Cuán rápido viajaba si la luz amarilla, de 580 nm de longitud de onda, se corrió al verde, con 560 nm de longitud de onda? *Nota:* Para velocidades menores que $0.03c$, la ecuación 21.32 conducirá a un valor para el cambio de frecuencia preciso a aproximadamente dos cifras significativas.

Problemas adicionales

67. Un rayo láser de 25.0 mW de diámetro 2.00 mm se refleja en la incidencia normal de un espejo que refleja perfectamente. Calcule la presión de radiación en el espejo.
68. La intensidad de la radiación solar en la parte superior de la atmósfera de la Tierra es 1370 W/m^2 . Suponiendo que 60% de la energía solar entrante llega a la superficie de la Tierra y suponiendo que usted absorbe 50% de la energía incidente, realice una estimación del orden de magnitud de la cantidad de energía solar que absorbe en un baño de Sol de 60 minutos.
69. Un resistor de 200Ω se conecta en serie con un capacitor de $5.0 \mu\text{F}$ y una línea rms de 120 V a 60 Hz. Si la energía eléctrica cuesta $\$0.080/\text{kWh}$, ¿cuánto cuesta dejar conectado este circuito durante 24 h?
70. **S** En un circuito en serie *RLC*, que incluye una fuente de corriente alterna opera a una frecuencia y voltaje fijos, la resistencia R es igual a la reactancia inductiva. Si la separación de las placas del capacitor de placas paralelas se reduce a la mitad de su valor original, la corriente en el circuito se duplica. Encuentre la reactancia capacitiva inicial en términos de R .
71. Como una forma de determinar la inductancia de una bobina que se usa en un proyecto de investigación, un estudiante primero conecta la bobina a una batería de 12.0 V y mide una corriente de 0.630 A. Luego el estudiante conecta la bobina a un generador de 24.0 V (rms) y 60.0 Hz y mide una corriente rms de 0.570 A. ¿Cuál es la inductancia?
72. a) ¿Qué capacitancia resonará con una espira de una vuelta de 400 pH de inductancia para producir una onda de radar de 3.0 cm de longitud de onda? b) Si el capacitor tiene placas paralelas cuadradas separadas por 1.0 mm de aire, ¿cuál debe ser la longitud de arista de las placas? c) ¿Cuál es la reactancia común de la espira y del capacitor en resonancia?
73. **M** Una antena de plato, con un diámetro de 20.0 m, recibe (a incidencia normal) una señal de radio desde una fuente distante, como se muestra en la figura P21.73. La señal de radio es una onda sinusoidal continua con amplitud $E_{\text{máx}} = 0.20 \mu\text{V/m}$. Suponga que la antena absorbe toda la radiación que cae sobre el plato. a) ¿Cuál es la amplitud del campo magnético en esta onda? b) ¿Cuál es la intensidad de la radiación que recibe la antena? c) ¿Cuál es la potencia que recibe la antena?

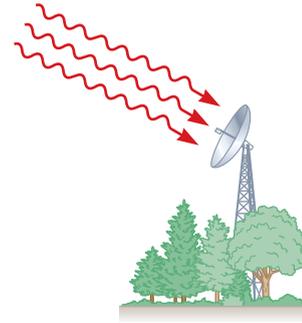


Figura P21.73

74. Un inductor particular tiene resistencia considerable. Cuando el inductor se conecta a una batería de 12 V, la corriente en el inductor es 3.0 A. Cuando se conecta a una fuente CA con una salida rms de 12 V y una frecuencia de 60 Hz, la corriente cae a 2.0 A. ¿Cuáles son a) la impedancia a 60 Hz y b) la inductancia del inductor?
75. Un posible medio para lograr vuelos espaciales es colocar una hoja perfectamente reflejante en la órbita de la Tierra y usar la luz del Sol para empujar esta vela solar. Suponga que tal vela, de $6.00 \times 10^4 \text{ m}^2$ de área y 6000 kg de masa, se coloca en órbita de cara al Sol. a) ¿Qué fuerza se ejerce sobre la vela? b) ¿Cuál es la aceleración de la vela? c) ¿Cuánto tarda esta vela en llegar a la Luna, a $3.84 \times 10^8 \text{ m}$ de distancia? Desprecia todos los efectos gravitacionales y suponga una intensidad solar de 1340 W/m^2 . *Sugerencia:* La presión de radiación mediante una onda reflejada está dada por 2 (potencia promedio por unidad de área)/ c .
76. **BIO C|C** La FDA (Administración de Alimentos y Medicamentos) estadounidense limita la fuga de radiación de los hornos de microondas a no más de 5.0 mW/cm^2 a una distancia de 2.0 pulgadas. Un teléfono celular típico, que también transmite microondas, tiene una potencia de salida pico de aproximadamente 2.0 W. a) Aproximando el teléfono celular como una fuente puntual, calcule la intensidad de la radiación de un teléfono celular a una distancia de 2.0 pulgadas. ¿Cómo se compara la respuesta con la fuga máxima permisible de un horno de microondas? b) La distancia desde su oreja hasta su cerebro es de más o menos 2 pulgadas. ¿Cuál sería la intensidad de la radiación en su cerebro si usa un auricular Bluetooth y mantiene el teléfono en su bolsillo, a 1.0 m de distancia de su cerebro? La mayoría de los auriculares son los llamados dispositivos clase 2, con una potencia de salida máxima de 2.5 mW.



Dianne Kowling

La luz se desvía (refracta) conforme pasa a través del agua y las diferentes longitudes de onda se separan en diferentes cantidades, un fenómeno llamado dispersión. Junto con la reflexión, estos fenómenos físicos conducen a la creación de un arcoiris cuando la luz pasa a través de pequeñas gotas de agua suspendidas.

Reflexión y refracción de la luz

22

La luz tiene una naturaleza dual. En algunos experimentos actúa como una partícula, mientras que en otros actúa como una onda. En este y los dos capítulos siguientes nos concentraremos en los aspectos de la luz que se entienden mejor a través del modelo ondulatorio. Primero estudiaremos la reflexión de la luz en la frontera entre dos medios y la refracción (desviación) de la luz mientras viaja de un medio hacia otro. Estas ideas las utilizamos para estudiar la refracción de la luz conforme pasa a través de lentes y la reflexión de la luz en superficies de espejos. Finalmente, describiremos cómo pueden usarse los lentes y espejos para ver objetos con telescopios y microscopios y cómo se usan los lentes en fotografía. La habilidad para manipular la luz mejoró enormemente la capacidad para investigar y comprender la naturaleza del Universo.

- 22.1** La naturaleza de la luz
- 22.2** Reflexión y refracción
- 22.3** La ley de refracción
- 22.4** Dispersión y prismas
- 22.5** El arco iris
- 22.6** Principio de Huygens
- 22.7** Reflexión interna total

22.1 La naturaleza de la luz

Hasta comienzos del siglo XIX, la luz se modelaba como una corriente de partículas emitidas por una fuente que estimulaba el sentido de la vista al entrar al ojo. El arquitecto jefe de la teoría corpuscular de la luz fue Newton. Con esta teoría, proporcionó explicaciones simples de algunos hechos experimentales conocidos concernientes a la naturaleza de la luz, a saber, las leyes de reflexión y refracción.

La mayoría de los científicos aceptó la teoría corpuscular de la luz de Newton. Sin embargo, durante la vida de Newton, se propuso otra teoría. En 1678, el físico y astrónomo holandés, Christian Huygens (1629-1695), demostró que una teoría ondulatoria de la luz también podía explicar las leyes de reflexión y refracción.

La teoría ondulatoria no recibió inmediata aceptación, por varias razones. Primero, todas las ondas conocidas en la época (sonoras, en el agua, etc.) viajaban a través de alguna



Christian Huygens
(1629-1695), Físico y astrónomo holandés

Huygens es mejor conocido por sus aportaciones a los campos de la óptica y la dinámica. Para Huygens, la luz era un movimiento vibratorio en el éter, que se dispersa hacia afuera y produce la sensación de luz cuando incide sobre el ojo. Sobre la base de esta teoría, dedujo las leyes de reflexión y refracción y explicó el fenómeno de doble refracción.

especie de medio, pero la luz proveniente del Sol podía viajar a la Tierra a través de espacio vacío. Más aún, se argumentó que si la luz fuese alguna forma de onda, se doblaría alrededor de los obstáculos; por lo tanto, se podría ver a la vuelta de las esquinas. Ahora se sabe que la luz de hecho se dobla alrededor de los bordes de los objetos. Este fenómeno, que se conoce como *difracción*, es difícil de observar porque las ondas de luz tienen longitudes de onda muy cortas. Aun cuando la evidencia experimental para la difracción de la luz la descubrió Francesco Grimaldi (1618-1663) alrededor de 1660, durante más de un siglo la mayoría de los científicos rechazaron la teoría ondulatoria y se adhirieron a la teoría corpuscular de Newton, probablemente debido a la gran reputación de Newton como científico.

La primera demostración clara de la naturaleza ondulatoria de la luz la proporcionó Thomas Young (1773-1829) en 1801, quien demostró que, bajo condiciones adecuadas, la luz muestra comportamiento de interferencia. Las ondas de luz emitidas por una sola fuente y que viajan a lo largo de dos trayectorias diferentes pueden llegar a algún punto y combinarse y cancelarse mutuamente mediante interferencia destructiva. Tal comportamiento no se podría explicar en aquella época mediante un modelo corpuscular porque los científicos no podían imaginar cómo dos o más partículas podrían juntarse y cancelarse unas a otras.

El desarrollo más importante en la teoría de la luz fue el trabajo de Maxwell, quien predijo en 1865 que la luz era una forma de onda electromagnética de alta frecuencia (capítulo 21). Su teoría también predijo que estas ondas debían tener una velocidad de 3×10^8 m/s, en concordancia con el valor medido.

Aunque la teoría clásica de electricidad y magnetismo explicaba la mayoría de las propiedades conocidas de la luz, algunos experimentos posteriores no podían explicarse mediante la suposición de que la luz era una onda. El experimento más sorprendente fue el *efecto fotoeléctrico* (que se examina con más detalle en el capítulo 27), descubierto por Hertz. El descubrió que las superficies metálicas limpias emiten cargas cuando se exponen a luz ultravioleta.

En 1905, Einstein publicó un ensayo que formuló la teoría de los cuantos (“partículas”) de luz y explicó el efecto fotoeléctrico. Llegó a la conclusión de que la luz está compuesta de corpúsculos, o cuantos de energía discontinuos. Estos corpúsculos o cuantos ahora se llaman *fotones* para enfatizar su naturaleza parecida a partícula. De acuerdo con la teoría de Einstein, la energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la onda electromagnética asociada con ella, o

Energía de un fotón ►

$$E = hf$$

[22.1]

donde $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J · s es la *constante de Planck*. Esta teoría conserva algunas características de las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz. Como lo veremos más adelante, el efecto fotoeléctrico es resultado de la transferencia de energía de un solo fotón a un electrón en el metal. Esto significa que el electrón interactúa con un fotón de luz como si el electrón fuese golpeado por una partícula. Con todo, el fotón tiene características parecidas a una onda, como lo implica el hecho de que se usa una frecuencia en su definición.

En vista de estos desarrollos, la luz se debe considerar como poseedora de una *naturaleza dual*. **En algunos experimentos la luz actúa como una onda y en otros actúa como partícula.** La teoría clásica de ondas electromagnéticas proporciona explicaciones adecuadas de la propagación de la luz y de los efectos de interferencia, mientras que el efecto fotoeléctrico y otros experimentos que involucran la interacción de luz con la materia se explican mejor al suponer que la luz es una partícula.

De modo que en el análisis final, ¿la luz es una onda o una partícula? La respuesta es ninguna y ambas: la luz tiene algunas propiedades físicas, algunas asociadas con ondas y otras con partículas.

22.2 Reflexión y refracción

Cuando la luz que viaja en un medio encuentra una frontera que conduce hacia un segundo medio, pueden ocurrir procesos de reflexión y refracción. En la **reflexión**, parte de la luz que encuentra el segundo medio rebota de dicho medio. En la **refracción**, la luz que

pasa hacia el segundo medio se desvía en un ángulo con respecto a la normal, a la frontera. A menudo, ambos procesos ocurren al mismo tiempo, con parte de la luz que se refleja y parte que se refracta. Para estudiar reflexión y refracción es necesaria una forma de pensar acerca de los haces de luz, y ésta se proporciona mediante la aproximación de rayos.

La aproximación de rayos en óptica geométrica

Una importante propiedad de la luz que se puede entender con base en la experiencia común es la siguiente: **la luz viaja en una trayectoria en línea recta en un medio homogéneo, hasta que encuentra una frontera entre dos materiales diferentes.** Cuando la luz golpea una frontera, se refleja de dicha frontera, pasa hacia el material en el otro lado de la frontera o hace ambas cosas parcialmente.

La observación anterior conduce al uso de lo que se llama **aproximación de rayos** para representar haces de luz. Como se muestra en la figura 22.1, un rayo de luz es una línea imaginaria dibujada a lo largo de la dirección de viaje del haz de luz. Por ejemplo, un haz de luz solar que pasa a través de una habitación oscura traza la trayectoria de un rayo de luz. También se usa el concepto de frentes de onda de luz. Un **frente de onda** es una superficie que pasa a través de los puntos de una onda que tiene la misma fase y amplitud. Por ejemplo, los frentes de onda en la figura 22.1 podrían ser superficies que pasan a través de las crestas de ondas. Los rayos, que corresponden a la dirección de movimiento de la onda, son líneas rectas perpendiculares a los frentes de onda. Cuando los rayos de luz viajan en trayectorias paralelas, los frentes de onda son planos perpendiculares a los rayos.

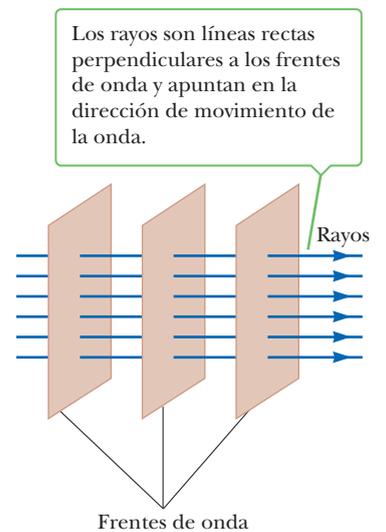


Figura 22.1 Una onda plana que viaja hacia la derecha.

Reflexión de la luz

Cuando un rayo de luz que viaja en un medio transparente encuentra una frontera que conduce hacia un segundo medio, parte del rayo incidente se refleja de regreso hacia el primer medio. La figura 22.2a muestra varios rayos de un haz de luz incidente sobre una superficie lisa reflejante parecida a un espejo. Los rayos reflejados son paralelos unos a otros, como se indica en la figura. La reflexión de la luz desde tal superficie lisa se llama **reflexión especular**. Por otra parte, si la superficie reflejante es rugosa, como en la figura 22.2b, la superficie refleja los rayos en varias direcciones. La reflexión de cualquier superficie rugosa se conoce como **reflexión difusa**. Una superficie se comporta como una superficie lisa en tanto sus variaciones sean pequeñas, comparadas con la longitud de onda de la luz incidente. Las figuras 22.2c y 22.2d son fotografías de reflexión especular y difusa de luz láser, respectivamente.

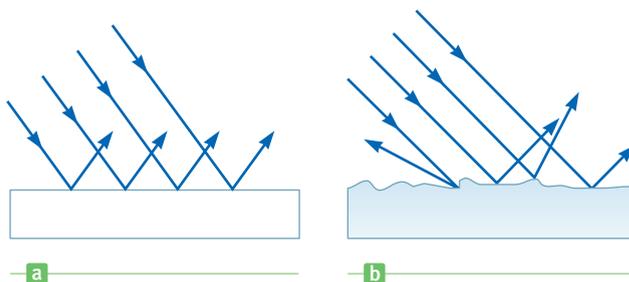
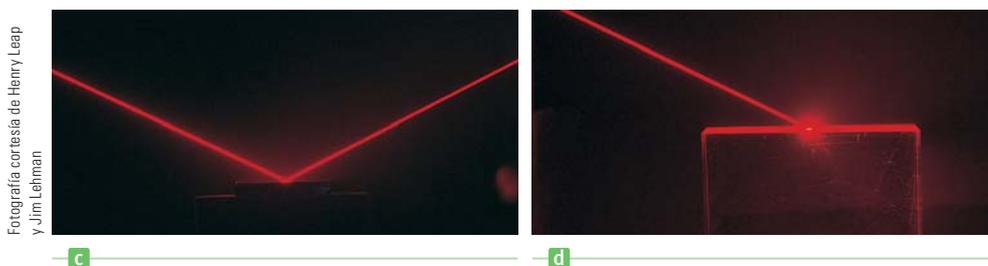


Figura 22.2 Representación esquemática de a) reflexión especular, donde los rayos reflejados son todos paralelos unos a otros y, b) reflexión difusa, donde los rayos reflejados viajan en direcciones aleatorias. (c, d) Fotografías de reflexión especular y difusa, hecha con luz láser.



APLICACIÓN

Cómo ver el camino en una noche lluviosa

Como ejemplo, considere los dos tipos de reflexión desde una superficie del camino que un conductor puede observar mientras conduce de noche. Cuando el camino está seco, la luz proveniente de los vehículos que se acercan se dispersa del camino en diferentes direcciones (reflexión difusa) y el camino es claramente visible. En una noche lluviosa, cuando el camino está húmedo, las irregularidades del camino están llenas de agua. Esto significa que la luz se refleja recto hacia adelante y el conductor de un vehículo sólo ve lo que está directamente enfrente de él. La luz proveniente de un lado nunca llega al ojo del conductor. En este libro nos preocupamos sólo por la reflexión especular y usaremos el término *reflexión* para denotar la reflexión especular.

Examen rápido

22.1 ¿Cuál inciso de la figura 22.3, a) o b), muestra mejor la reflexión especular de la luz desde el camino?



© Charles D. Winters/Cengage Learning

El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal se encuentran todos en el mismo plano, y $\theta_1 = \theta_1'$.

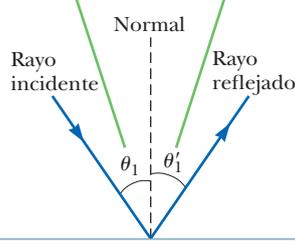


Figura activa 22.4

La onda bajo el modelo de reflexión.

BIO APLICACIÓN

Ojos rojos en fotografías con flash

Considere un rayo de luz que viaja en aire e incide a cierto ángulo sobre una superficie plana lisa, como en la figura activa 22.4. Los rayos incidente y reflejado forman ángulos θ_1 y θ_1' , respectivamente, **con una línea perpendicular a la superficie** en el punto donde el rayo incidente golpea la superficie. A esta línea se le llama *normal* a la superficie. Los experimentos demuestran que **el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia:**

$$\theta_1' = \theta_1 \quad [22.2]$$

Tal vez haya observado un suceso común en las fotografías de personas: sus ojos parecen tener un brillo rojizo. Los “ojos rojos” ocurren cuando se usa un flash fotográfico y la unidad de flash está cerca del lente de la cámara. La luz proveniente del flash entra al ojo y se refleja de regreso a lo largo de su trayectoria original desde la retina. Este tipo de reflexión de regreso a lo largo de la dirección original se llama *retroreflexión*. Si la unidad de flash y el lente están juntos, la luz que se retrorefleja puede entrar al lente. La mayor parte de la luz que se refleja de la retina es roja debido a los vasos sanguíneos en la parte posterior del ojo, lo que produce el efecto de ojo rojo en la fotografía.

■ FÍSICA APLICADA 22.1 Los colores de las ondas de agua en el atardecer

Una persona, que ve hacia el oeste en la playa de un gran lago, observa el comienzo del atardecer. El agua es muy lisa, excepto por algunas áreas con pequeñas ondas. El observador nota que algunas áreas del agua son azules y algunas son rosas. ¿Por qué el agua parece ser de diferentes colores en distintas áreas?

EXPLICACIÓN Los diferentes colores surgen de reflexión especular y difusa. Las áreas lisas del agua reflejarán de manera especular la luz del oeste, que es la luz rosa del atardecer. Las áreas con pequeñas ondas reflejarán la luz de manera difusa, de modo que la luz de todas las partes del cielo se reflejará en los ojos del observador. Puesto que la mayor parte del cielo todavía es azul al comienzo del atardecer, estas áreas parecerán azules. ■

■ FÍSICA APLICADA 22.2 Imágenes dobles

Cuando usted está de pie afuera, bajo la luz del sol, cerca de una ventana de un solo cristal y mira hacia el interior oscuro de un edificio, ¿por qué con frecuencia ve dos imágenes de usted mismo, una superpuesta sobre la otra?

EXPLICACIÓN La reflexión ocurre siempre que hay una interfaz entre dos medios diferentes. Para el vidrio en

la ventana existen dos de tales superficies, la ventana que da frente al exterior y la ventana que da frente al interior. Cada una de estas interfaces resulta en una imagen. Observará que una imagen es ligeramente menor que la otra, porque la superficie reflejante está más alejada. ■

■ EJEMPLO 22.1 El rayo de luz que se refleja dos veces

OBJETIVO Calcular un ángulo resultante a partir de dos reflexiones.

PROBLEMA Dos espejos forman un ángulo de 120° uno con otro, como en la figura 22.5. Un rayo incide sobre el espejo M_1 a un ángulo de 65° con la normal. Encuentre el ángulo que forma el rayo con la normal a M_2 después de que se refleja de ambos espejos.

ESTRATEGIA Aplique la ley de reflexión dos veces. Proporcione al rayo incidente un ángulo θ_{inc} y encuentre el ángulo resultante final, β_{ref} .

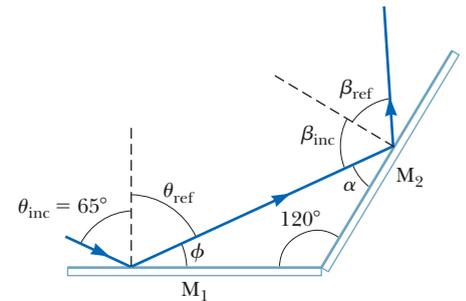


Figura 22.5 (Ejemplo 22.1) Los espejos M_1 y M_2 forman un ángulo de 120° uno con otro.

SOLUCIÓN

Aplique la ley de reflexión a M_1 para encontrar el ángulo de reflexión, θ_{ref} :

$$\theta_{\text{ref}} = \theta_{\text{inc}} = 65^\circ$$

Encuentre el ángulo ϕ que es el complemento del ángulo θ_{ref} :

$$\phi = 90^\circ - \theta_{\text{ref}} = 90^\circ - 65^\circ = 25^\circ$$

Encuentre el ángulo desconocido α en el triángulo de M_1 , M_2 y el rayo que viaja de M_1 a M_2 , y use el hecho de que los tres ángulos suman 180° :

$$180^\circ = 25^\circ + 120^\circ + \alpha \rightarrow \alpha = 35^\circ$$

El ángulo α es complementario al ángulo de incidencia, β_{inc} , para M_2 :

$$\alpha + \beta_{\text{inc}} = 90^\circ \rightarrow \beta_{\text{inc}} = 90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$$

Aplique la ley de reflexión una segunda vez y obtenga β_{ref} :

$$\beta_{\text{ref}} = \beta_{\text{inc}} = 55^\circ$$

COMENTARIOS Note la fuerte relevancia en la geometría elemental y la trigonometría en estos problemas de reflexión.

PREGUNTA 22.1 En general, ¿cuál es la relación entre el ángulo incidente θ_{inc} y el ángulo reflejado final β_{ref} cuando el ángulo entre los espejos es 90.0° ? a) $\theta_{\text{inc}} + \beta_{\text{ref}} = 90.0^\circ$ b) $\theta_{\text{inc}} - \beta_{\text{ref}} = 90.0^\circ$ c) $\theta_{\text{inc}} + \beta_{\text{ref}} = 180^\circ$

EJERCICIO 22.1 Repita el problema si el ángulo de incidencia es 55° y el segundo espejo forma un ángulo de 100° con el primer espejo.

RESPUESTA 45°

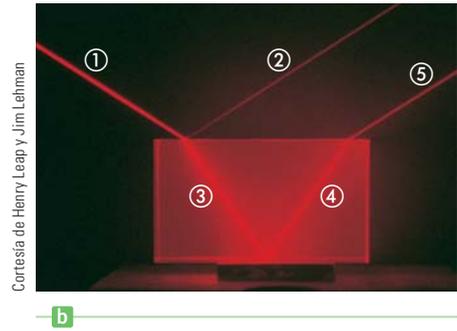
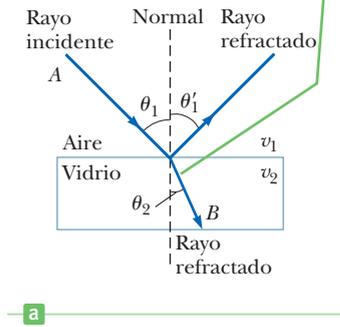
Refracción de la luz

Cuando un rayo de luz que viaja a través de un medio transparente encuentra una frontera que conduce a otro medio transparente, como en la figura activa 22.6a (página 766), parte del rayo se refleja y parte entra al segundo medio. El rayo que entra al segundo medio se desvía en la frontera y se dice que se *refracta*. El rayo incidente, el rayo reflejado, el rayo refractado y la normal en el punto de incidencia se encuentran todos en el mismo plano.

Figura activa 22.6

a) La onda bajo el modelo de refracción. b) La luz que incide sobre el bloque de lucita se refracta tanto cuando entra al bloque como cuando sale del bloque.

Todos los rayos y la normal yacen en el mismo plano y el rayo refractado está desviado hacia la normal ya que $v_2 < v_1$.



El **ángulo de refracción**, θ_2 , en la figura activa 22.6a depende de las propiedades de los dos medios y del ángulo de incidencia, mediante la relación

$$\frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \text{constante} \quad [22.3]$$

donde v_1 es la velocidad de la luz en el medio 1 y v_2 es la velocidad de la luz en el medio 2. Observe que el ángulo de refracción también se mide con respecto a la normal. En la sección 22.7 se deducen las leyes de reflexión y refracción con el uso del principio de Huygens.

Los experimentos demuestran que **la trayectoria de un rayo de luz a través de una superficie refractante es reversible**. Por ejemplo, el rayo en la figura activa 22.6a viaja del punto A al punto B. Si el rayo se origina en B, seguiría la misma trayectoria para llegar al punto A, pero el rayo reflejado estaría en el vidrio.

Examen rápido

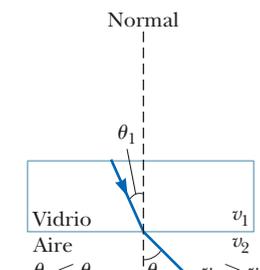
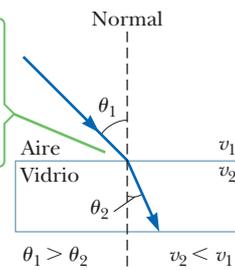
22.2 Si el haz 1 es el haz entrante en la figura activa 22.6b, ¿cuál de los otros cuatro haces se deben a reflexión? ¿Cuáles se deben a refracción?

Quando la luz se mueve de un material donde su velocidad es alta, hacia un material donde su velocidad es más baja, el ángulo de refracción θ_2 es menor que el ángulo de incidencia. Por lo tanto, el rayo refractado se desvía hacia la normal, como se muestra en la figura activa 22.7a. Si el rayo se mueve de un material donde viaja lentamente a un material donde viaja más rápidamente, θ_2 es mayor que θ_1 , de modo que el rayo se desvíe alejándose de la normal, como se muestra en la figura activa 22.7b.

Figura activa 22.7

Refracción de la luz cuando a) el haz de luz se mueve de aire a vidrio y b) el haz se mueve de vidrio a aire.

Quando el haz de luz se mueve de aire a vidrio, su trayectoria se desvía hacia la normal.



Quando el haz de luz se mueve de vidrio a aire, su trayectoria se desvía hacia la normal.

22.3 La ley de refracción

Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, se refracta porque la velocidad de la luz es diferente en los dos medios.¹ El **índice de refracción**, n , de un medio se define como la razón c/v :

$$n \equiv \frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en un medio}} = \frac{c}{v} \quad [22.4]$$

A partir de esta definición, vemos que el índice de refracción es un número adimensional que es mayor o igual a 1 porque v siempre es menor que c . Más aún, n es igual a uno para el vacío. La tabla 22.1 menciona los índices de refracción para varias sustancias.

Conforme la luz viaja de un medio a otro, su frecuencia no cambia. Para ver por qué, considere la figura 22.8. Los frentes de onda pasan a un observador en el punto A en el medio 1 con cierta frecuencia e inciden sobre la frontera entre el medio 1 y el medio 2. La frecuencia a la que los frentes de onda pasan junto a un observador en el punto B en el medio 2 debe ser igual a la frecuencia a la que llegan al punto A. Si no es así, los frentes de onda se apilarían en la frontera, se destruirían o crearían en la frontera. Puesto que ninguno de estos eventos ocurre, la frecuencia debe permanecer igual conforme un rayo de luz pasa de un medio a otro.

En consecuencia, puesto que la relación $v = f\lambda$ debe ser válida en ambos medios y porque $f_1 = f_2 = f$, vemos que

$$v_1 = f\lambda_1 \text{ y } v_2 = f\lambda_2$$

Puesto que $v_1 \neq v_2$, tenemos que $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Se puede obtener una relación entre el índice de refracción y la longitud de onda al dividir estas dos ecuaciones y usar la definición del índice de refracción dado por la ecuación 22.4:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad [22.5]$$

lo que produce

$$\lambda_1 n_1 = \lambda_2 n_2 \quad [22.6]$$

Tabla 22.1 Índices de refracción para varias sustancias, medidas con luz de longitud de onda en vacío $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$

Sustancia	Índice de refracción	Sustancia	Índice de refracción
Sólidos a 20°C		Líquidos a 20°C	
Diamante (C)	2.419	Benceno	1.501
Fluorita (CaF ₂)	1.434	Disulfuro de carbono	1.628
Cuarzo fundido (SiO ₂)	1.458	Tetracloruro de carbono	1.461
Vidrio, corona	1.52	Alcohol etílico	1.361
Vidrio	1.66	Glicerina	1.473
Hielo (H ₂ O) (a 0°C)	1.309	Agua	1.333
Poliestireno	1.49		
Cloruro de sodio (NaCl)	1.544	Gases a 0°C, 1 atm	
Zirconio	1.923	Aire	1.000 293
		Dióxido de carbono	1.000 45

Conforme la onda se mueve del medio 1 al medio 2, su longitud de onda cambia, pero su frecuencia permanece constante.

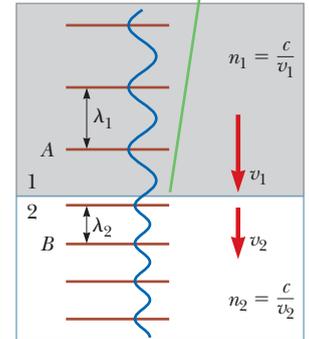


Figura 22.8 Una onda viaja del medio 1 al medio 2, en el que se mueve con una velocidad más baja.

Tip 22.1 Una relación inversa

El índice de refracción es *inversamente* proporcional a la velocidad de la onda. Por lo tanto, conforme la velocidad de la onda v disminuye, el índice de refracción, n , *aumenta*.

Tip 22.2 La frecuencia permanece igual

La *frecuencia* de una onda *no* cambia conforme la onda pasa de un medio a otro. Tanto la velocidad de onda como la longitud de onda *sí* cambian, pero la frecuencia permanece igual.

¹La velocidad de la luz varía entre los medios porque los retrasos de tiempo provocados por la absorción y la reemisión de luz conforme viaja de átomo a átomo dependen de la estructura electrónica particular de los átomos que constituyen cada material.

Sea el medio 1 el vacío, de modo que $n_1 = 1$. De la ecuación 22.6 se tiene que el índice de refracción de cualquier medio se puede expresar como la razón

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} \quad [22.7]$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío y λ_n es la longitud de onda en el medio que tiene índice de refracción n . La figura 22.9 es una representación esquemática de esta reducción en longitud de onda cuando la luz pasa de un vacío hacia un medio transparente.

Ahora está usted en posición de expresar la ecuación 22.3 en una forma alternativa. Si sustituye la ecuación 22.5 en la ecuación 22.3, obtiene

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad [22.8]$$

El descubrimiento experimental de esta relación usualmente se le acredita a Willebrørd Snell (1591-1626) y por lo tanto se conoce como **ley de refracción de Snell**.

Ley de refracción de Snell ▶

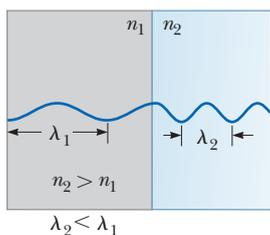


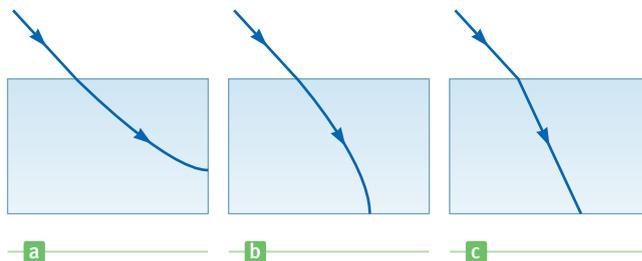
Figura 22.9 Diagrama esquemático de la *reducción* en longitud de onda cuando la luz viaja de un medio con un índice de refracción bajo, a uno con un índice de refracción más alto.

Examen rápido

22.3 Un material tiene un índice de refracción que aumenta de manera continua de la parte superior a la inferior. De las tres trayectorias que se muestran en la figura 22.10, ¿cuál trayectoria seguirá un rayo de luz conforme pasa a través del material?

22.4 Conforme la luz viaja de un vacío ($n = 1$) a un medio como el vidrio ($n > 1$), ¿cuál de las siguientes propiedades permanece igual, a) la longitud de onda, b) la velocidad de onda o c) la frecuencia?

Figura 22.10 (Examen rápido 22.3)



EJEMPLO 22.2 **Ángulo de refracción para el vidrio**

OBJETIVO Aplicar la ley de Snell.

PROBLEMA Un rayo de luz, con longitud de onda de 589 nm (producido por una lámpara de sodio), que viaja a través de aire, incide sobre una losa plana lisa de vidrio corona en un ángulo θ_1 de 30.0° con la normal, como se bosqueja en la figura 22.11. **a)** Determine el ángulo de refracción, θ_2 . **b)** ¿A qué ángulo θ_3 el rayo deja el vidrio, al entrar de nuevo en el aire? **c)** ¿De qué manera la respuesta para θ_3 cambia, si el rayo entra en el agua debajo de la losa en lugar del aire?

ESTRATEGIA Sustituya cantidades en la ley de Snell y resuelva para el ángulo de refracción desconocido.

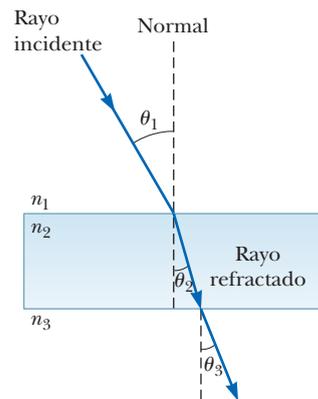


Figura 22.11 (Ejemplo 22.2) Refracción de luz por vidrio.

SOLUCIÓN

a) Determine el ángulo de refracción, θ_2 .

Resuelva la ley de Snell (ecuación 22.8) para $\text{sen } \theta_2$:

$$(1) \text{ sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{ sen } \theta_1$$

A partir de la tabla 22.1, encuentre $n_1 = 1.00$ para aire y $n_2 = 1.52$ para vidrio corona. Sustituya estos valores en la ecuación (1) y tome el seno inverso de ambos lados:

$$\text{sen } \theta_2 = \left(\frac{1.00}{1.52} \right) (\text{sen } 30.0^\circ) = 0.329$$

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}(0.329) = 19.2^\circ$$

b) ¿A qué ángulo θ_3 el rayo deja el vidrio, al entrar de nuevo en el aire?

Escriba la ecuación (1), sustituyendo θ_3 por θ_2 , θ_2 por θ_1 ,

$$(2) \text{ sen } \theta_3 = \frac{n_2}{n_3} \text{ sen } \theta_2 = \frac{1.52}{1.00} \text{ sen } (19.2^\circ) = 0.500$$

Tome el seno inverso de ambos lados para hallar θ_3 :

$$\theta_3 = \text{sen}^{-1}(0.500) = 30.0^\circ$$

c) ¿De qué manera la respuesta para θ_3 cambia, si el rayo entra en el agua debajo de la losa en lugar del aire?

Escriba la ecuación (2) y sustituya el valor para el índice de refracción del agua en n_3 :

$$\text{sen } \theta_3 = \frac{n_2}{n_3} \text{ sen } \theta_2 = \frac{1.52}{1.33} \text{ sen } (19.2^\circ) = 0.376$$

$$\theta_3 = \text{sen}^{-1}(0.376) = 22.1^\circ$$

COMENTARIOS Advierta que el rayo de luz se desvía hacia la normal cuando entra a un material de un índice de refracción más alto. Si el rayo que deja el material sigue la misma trayectoria a la inversa, se desviaría alejándose de la normal. Al pasar por una losa de material con superficies paralelas, por ejemplo del aire al vidrio y de regreso al aire, la dirección final del rayo es paralela a la dirección del rayo incidente. El único efecto en este caso es un desplazamiento lateral del rayo de luz.

PREGUNTA 22.2 Si el vidrio se sustituye con un material transparente con menor índice de refracción, ¿el ángulo de refracción θ_2 será a) menor, b) mayor o c) no cambiará?

EJERCICIO 22.2 Suponga que un rayo de luz en el aire ($n = 1.00$) entra en un cubo de material ($n = 2.50$) a un ángulo de 45.0° con respecto a la normal y luego sale de la parte inferior del cubo dentro del agua ($n = 1.33$). ¿A qué ángulo con la normal sale el rayo de la losa?

RESPUESTA 32.1°

■ EJEMPLO 22.3 Luz en cuarzo fundido

OBJETIVO Usar el índice de refracción para determinar el efecto de un medio sobre la velocidad y longitud de onda de la luz.

PROBLEMA Luz con 589 nm de longitud de onda en el vacío pasa a través de un trozo de cuarzo fundido con índice de refracción $n = 1.458$. a) Encuentre la velocidad de la luz en cuarzo fundido. b) ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz en cuarzo fundido? c) ¿Cuál es la frecuencia de la luz en cuarzo fundido?

ESTRATEGIA Sustituya valores en las ecuaciones 22.4 y 22.7.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la velocidad de la luz en cuarzo fundido.

Obtenga la velocidad a partir de la ecuación 22.4:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.458} = 2.06 \times 10^8 \text{ m/s}$$

b) ¿Cuál es la longitud de onda de esta luz en cuarzo fundido?

Use la ecuación 22.7 para calcular la longitud de onda:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.458} = 404 \text{ nm}$$

c) ¿Cuál es la frecuencia de la luz en cuarzo fundido?

La frecuencia en cuarzo es la misma que en vacío. Resuelva $c = f\lambda$ para la frecuencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{589 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5.09 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

COMENTARIOS Es interesante advertir que la velocidad de la luz en el vacío, $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$, es un límite superior para la rapidez de los objetos materiales. En el tratamiento de la relatividad, en el capítulo 26, encontrará que este límite superior es consistente con observaciones experimentales. Sin embargo, es posible que una partícula que se mueve en un medio

(continúa)

tenga una velocidad que supere la velocidad de la luz en dicho medio. Por ejemplo, teóricamente es posible que una partícula viaje a través de cuarzo fundido con una velocidad mayor que 2.06×10^8 m/s, mas todavía debe tener una velocidad menor que 3.00×10^8 m/s.

PREGUNTA 22.3 Verdadero o Falso: Si luz con longitud de onda λ en vidrio pasa hacia agua con índice n_w , la nueva longitud de onda de la luz es λ/n_w .

EJERCICIO 22.3 Luz con longitud de onda de 589 nm pasa a través de cloruro de sodio cristalino. En este medio, determine a) la velocidad de la luz, b) la longitud de onda y, c) la frecuencia de la luz.

RESPUESTAS a) 1.94×10^8 m/s b) 381 nm c) 5.09×10^{14} Hz

EJEMPLO 22.4 Refracción de luz láser en un videodisco digital (DVD)

OBJETIVO Aplicar la ley de Snell junto con restricciones geométricas.

PROBLEMA Un DVD es una grabación en video que consiste en una pista espiral, de aproximadamente $1.0 \mu\text{m}$ de ancho, con información digital. (Véase la figura 22.12a.) La información digital consiste en una serie de depresiones (pits) que se “leen” mediante un rayo láser que se ajusta con precisión sobre una pista (*track*) en la capa de información. Si el ancho a del haz en la capa de información debe ser igual a $1.0 \mu\text{m}$ para distinguir pistas individuales y el ancho w del haz conforme entra al plástico es 0.700 mm , determine el ángulo θ_1 al que debe entrar al plástico el haz cónico. (Véase la figura 22.12b.) Suponga que el plástico tiene un grosor $t = 1.20 \text{ mm}$ y un índice de refracción $n = 1.55$. Observe que este sistema es relativamente inmune a pequeñas partículas de polvo que degradan la calidad del video, porque las partículas tendrían que ser tan grandes como 0.700 mm para oscurecer el haz en el punto donde entra al plástico.

ESTRATEGIA Utilice la trigonometría de triángulos rectángulos para determinar el ángulo θ_2 y luego aplique la ley de Snell para obtener el ángulo θ_1 .

SOLUCIÓN

A partir de la parte superior e inferior de la figura 22.12b, obtenga una ecuación que relacione w , b y a :

Resuelva esta ecuación para b y sustituya los valores dados:

Ahora use la función tangente para encontrar θ_2 :

Finalmente, use la ley de Snell para encontrar θ_1 :

$$w = 2b + a$$

$$b = \frac{w - a}{2} = \frac{700.0 \times 10^{-6} \text{ m} - 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}}{2} = 349.5 \mu\text{m}$$

$$\tan \theta_2 = \frac{b}{t} = \frac{349.5 \mu\text{m}}{1.20 \times 10^3 \mu\text{m}} \rightarrow \theta_2 = 16.2^\circ$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2 \sin \theta_2}{n_1} = \frac{1.55 \sin 16.2^\circ}{1.00} = 0.432$$

$$\theta_1 = \sin^{-1}(0.432) = 25.6^\circ$$

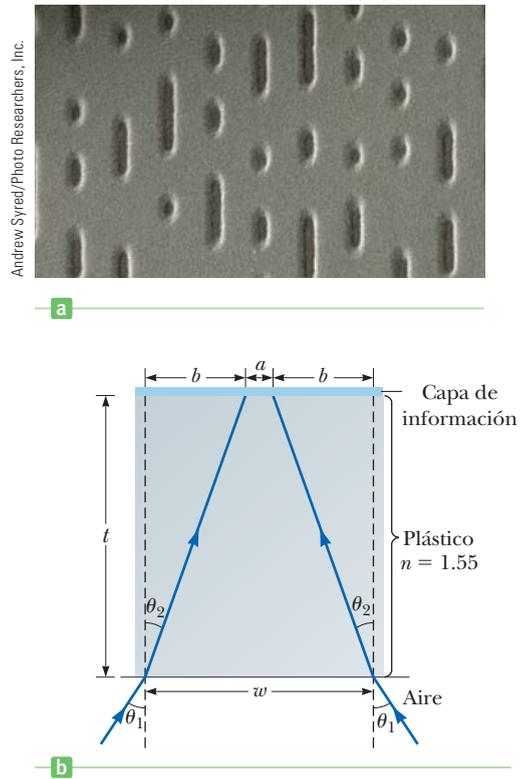


Figura 22.12 (Ejemplo 22.4) Un micrografo de la superficie de un DVD que muestra las pistas y depresiones a lo largo de cada pista. b) Sección transversal de un haz de láser cónico que se usa para leer un DVD.

COMENTARIOS A pesar de su aparente complejidad, el problema no es diferente al del ejemplo 22.2.

PREGUNTA 22.4 Suponga que el plástico se sustituye con un material con un mayor índice de refracción. ¿Cómo se afectaría el ancho del haz en la capa de información? a) Permanecería igual. b) Disminuiría. c) Aumentaría.

EJERCICIO 22.4 Suponga que quiere rediseñar el sistema para reducir el ancho inicial del haz de 0.700 0 mm a 0.600 0 mm, pero dejar el ángulo incidente θ_1 y todos los otros parámetros igual que antes, excepto el índice de refracción para el material plástico (n_2) y el ángulo θ_2 . ¿Qué índice de refracción tendría el plástico?

RESPUESTA 1.79

22.4 Dispersión y prismas

En la tabla 22.1 se presentaron valores para el índice de refracción de varios materiales. Sin embargo, si se realizan mediciones cuidadosas, se encuentra que el índice de refracción en algo más que vacío depende de la longitud de onda de la luz. La dependencia del índice de refracción de la longitud de onda se llama **dispersión**. La figura 22.13 es una representación gráfica de esta variación en el índice de refracción con la longitud de onda. Puesto que n es una función de la longitud de onda, la ley de Snell indica que **el ángulo de refracción que se forma cuando la luz entra a un material, depende de la longitud de onda de la luz**. Como se ve en la figura, por lo general el índice de refracción para un material disminuye con el aumento en longitud de onda. Esto significa que la luz violeta ($\lambda \cong 400$ nm) se refracta más que la luz roja ($\lambda \cong 650$ nm) cuando pasa de aire a un material.

Para comprender los efectos de dispersión sobre la luz, considere lo que sucede cuando la luz golpea un prisma, como en la figura 22.14a. Un rayo de luz de una sola longitud de onda, que incide sobre el prisma desde la izquierda, sale desviado alejándose de su dirección original de viaje en un ángulo δ , llamado **ángulo de desviación**. Ahora suponga que un haz de luz blanca (una combinación de todas las longitudes de onda visibles) incide sobre un prisma. Debido a la dispersión, los diferentes colores se refractan a través de diferentes ángulos de desviación como se muestra en la figura 22.14b y los rayos que salen de la segunda cara del prisma se dispersan en una serie de colores conocidos como **espectro visible**, como se muestra en la figura 22.15 en la página 772. Estos colores, en orden de longitud de onda decreciente, son rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. La luz violeta se desvía más, la luz roja menos y los colores restantes en el espectro visible caen en medio de estos extremos.

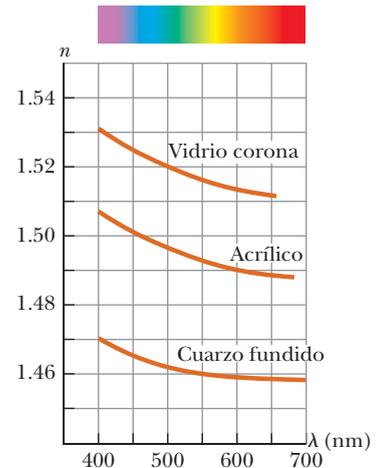


Figura 22.13 Variaciones del índice de refracción en el espectro visible con respecto a la longitud de onda en el vacío para tres materiales.

Tip 22.3 Dispersión

La luz de menor longitud de onda, como la luz violeta, se refracta más que la luz de longitudes de onda mayores, como la luz roja.

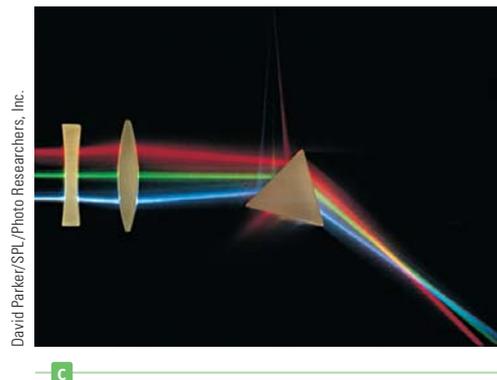
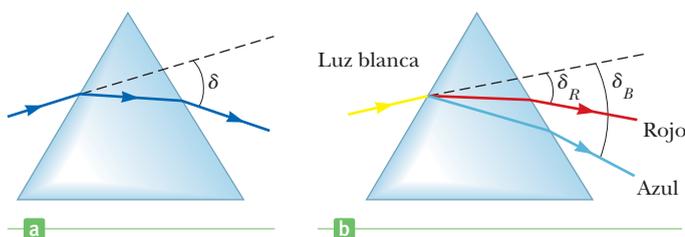
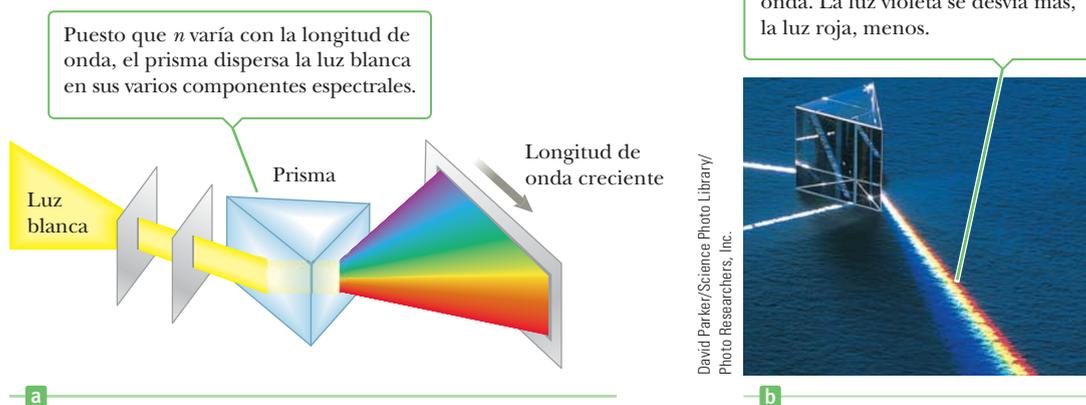


Figura 22.14 a) Un prisma refracta un rayo de luz y desvía la luz a través del ángulo δ . b) Cuando la luz incide sobre un prisma, la luz azul se desvía más que la luz roja. c) Luz de diferentes colores pasa a través de un prisma y dos lentes. Observe que, conforme la luz pasa a través del prisma, diferentes longitudes de onda se refractan en diferentes ángulos.

Figura 22.15 a) Dispersión de luz blanca mediante un prisma.
b) Luz blanca entra en un prisma de vidrio en la parte superior izquierda.



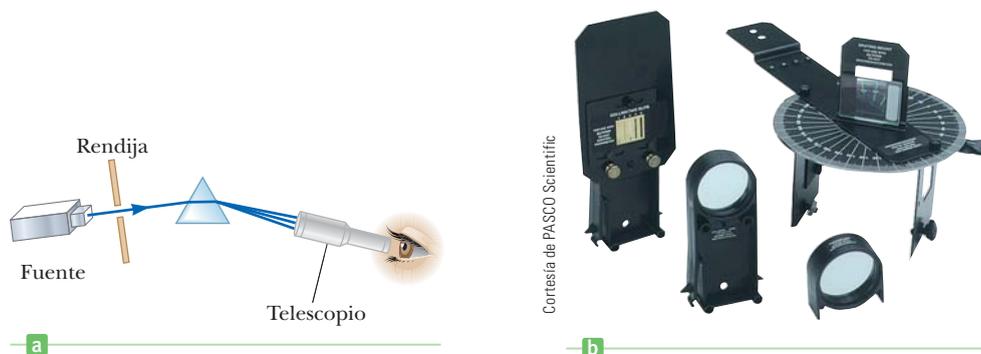
Los prismas se usan con frecuencia en un instrumento conocido como **espectrómetro de prisma**, cuyos elementos esenciales se muestran en la figura 22.16a. Este instrumento se usa comúnmente para estudiar las longitudes de onda emitidas por una fuente de luz, como una lámpara de vapor de sodio. La luz proveniente de la fuente se envía a través de una estrecha rendija ajustable y un lente para producir un haz paralelo o colimado. Entonces la luz pasa a través del prisma y se dispersa en un espectro. La luz refractada se observa a través de un telescopio. El experimentador ve diferentes imágenes coloridas de la rendija a través del ocular del telescopio. El telescopio se puede mover o el prisma se puede girar para ver las varias longitudes de onda, que tienen diferentes ángulos de desviación. La figura 22.16b muestra un tipo de espectrómetro de prisma que se usa en laboratorios de pregrado.

APLICACIÓN

Cómo identificar gases con un espectrómetro

Todos los gases calientes a baja presión emiten sus espectros característicos, de modo que un uso de un espectrómetro de prisma es la identificación de gases. Por ejemplo, el sodio emite sólo dos longitudes de onda en el espectro visible: dos líneas amarillas cercanamente espaciadas. (Las imágenes lineales brillantes de la rendija que se ven en un espectrómetro se llaman *líneas espectrales*.) Un gas que emite estos y sólo estos colores se puede identificar como sodio. Del mismo modo, el vapor de mercurio tiene su propio espectro característico, que consiste en cuatro longitudes de onda prominentes (líneas naranja, verde, azul y violeta) junto con algunas longitudes de onda de menor intensidad. Las longitudes de onda particulares emitidas por un gas sirven como “huellas digitales” de dicho gas. El análisis espectral, que es la medición de las longitudes de onda emitidas o absorbidas por una sustancia, es una poderosa herramienta general en muchas áreas científicas. Como ejemplo, químicos y biólogos usan espectroscopía infrarroja para identificar moléculas, los astrónomos usan espectroscopía de luz visible para identificar elementos en estrellas distantes y los geólogos usan análisis espectral para identificar minerales.

Figura 22.16 a) Diagrama de un espectrómetro de prisma. Los colores en el espectro se ven a través de un telescopio. b) Un espectrómetro de prisma con componentes intercambiables.



■ FÍSICA APLICADA 22.3 Dispersión

Cuando un haz de luz entra a un prisma de vidrio, que tiene lados no paralelos, el arcoiris de color que sale del prisma es un testimonio de la dispersión que ocurre en el vidrio. Suponga que un haz de luz entra a una losa de material con lados paralelos. Cuando el haz sale del otro lado y viaja en la misma dirección que el haz original, ¿existe alguna evidencia de dispersión?

EXPLICACIÓN Debido a dispersión, la luz en el extremo violeta del espectro muestra un mayor ángulo de refracción al entrar al vidrio que la luz en el extremo rojo. Todos los colores de la luz regresan a su dirección de propagación original conforme se refractan de vuelta hacia el aire. Como resultado, el haz saliente es blanco. Sin embargo, el corrimiento neto en la posición de la luz violeta a lo largo del borde de la losa es mayor que el corrimiento de la luz roja, de modo que un borde del haz saliente tiene un matiz azulado (parece azul en lugar de violeta porque el ojo no es muy sensible a la luz violeta), mientras que el otro borde tiene un matiz rojizo. Este efecto se indica en la figura 22.17. Los bordes coloridos del haz saliente de luz blanca son evidencia de dispersión. ■

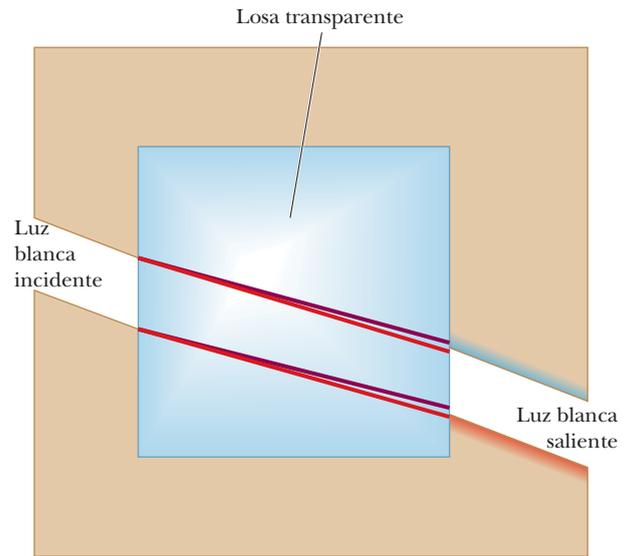


Figura 22.17 (Física aplicada 22.3)

■ EJEMPLO 22.5 Luz a través de un prisma

OBJETIVO Calcular las consecuencias de la dispersión.

PROBLEMA Un haz de luz incide sobre un prisma de cierto vidrio en un ángulo de $\theta_1 = 30.0^\circ$, como se muestra en la figura 22.18. Si el índice de refracción del vidrio para luz violeta es 1.80, encuentre **a)** θ_2 , el ángulo de refracción en la interfaz aire-vidrio, **b)** ϕ_2 , el ángulo de incidencia en la interfaz vidrio-aire y **c)** ϕ_1 , el ángulo de refracción cuando la luz violeta sale del prisma. **d)** ¿Cuál es el valor de Δy , la cantidad que se desplaza verticalmente la luz violeta?

ESTRATEGIA Este problema requiere la ley de Snell para encontrar los ángulos de refracción y algo de geometría y trigonometría elemental con base en la figura 22.18.

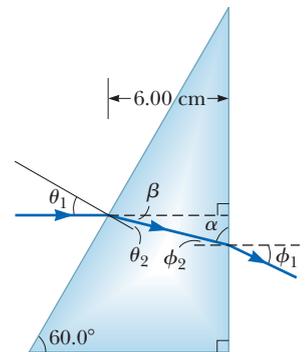


Figura 22.18 (Ejemplo 22.5)

SOLUCIÓN

a) Encuentre θ_2 , el ángulo de refracción en la interfaz aire-vidrio.

Use la ley de Snell para encontrar el primer ángulo de refracción:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow (1.00) \sin 30.0 = (1.80) \sin \theta_2$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{0.500}{1.80}\right) = 16.1^\circ$$

b) Encuentre ϕ_2 , el ángulo de incidencia en la interfaz vidrio-aire.

Calcule el ángulo β :

$$\beta = 30.0^\circ - \theta_2 = 30.0^\circ - 16.1^\circ = 13.9^\circ$$

Calcule el ángulo α a partir del hecho de que la suma de los ángulos interiores de un triángulo es igual a 180° :

$$180^\circ = 13.9^\circ + 90^\circ + \alpha \rightarrow \alpha = 76.1^\circ$$

El ángulo incidente ϕ_2 en la interfaz vidrio-aire es complementario a α :

$$\phi_2 = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 76.1^\circ = 13.9^\circ$$

(continúa)

c) Encuentre ϕ_1 , el ángulo de refracción cuando la luz violeta sale del prisma.

Aplique la ley de Snell:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \text{sen}^{-1} \left[\frac{n_2 \text{sen } \phi_2}{n_1} \right] \\ &= \text{sen}^{-1} [(1.80) \text{sen } 13.9^\circ] = 25.6^\circ \end{aligned}$$

d) ¿Cuál es el valor de Δy , la cantidad que se desplaza verticalmente la luz violeta?

Use la función tangente para encontrar el desplazamiento vertical:

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \frac{\Delta y}{\Delta x} \rightarrow \Delta y = \Delta x \tan \beta \\ \Delta y &= (6.00 \text{ cm}) \tan (13.9^\circ) = 1.48 \text{ cm} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El mismo cálculo para luz roja se deja como ejercicio. La luz violeta se desvía más y se desplaza más lejos por la cara del prisma. Observe que un teorema en geometría acerca de las líneas paralelas y los ángulos creados por una línea transversal produce inmediatamente $\phi_2 = \beta$, lo que habría ahorrado algo de cálculo. Sin embargo, en general, esta táctica puede no estar disponible.

PREGUNTA 22.5 Al pasar a través de un prisma, ¿la luz amarilla se desviará a través de un ángulo mayor o un ángulo menor que la luz violeta? a) La luz amarilla se desvía en un ángulo mayor. b) La luz amarilla se desvía en un ángulo menor. c) Los ángulos son los mismos.

EJERCICIO 22.5 Repita los incisos de la a) a la d) del ejemplo para luz roja que pasa a través del prisma, dado que el índice de refracción para luz roja es 1.72.

RESPUESTAS a) 16.9° b) 13.1° c) 22.9° d) 1.40 cm

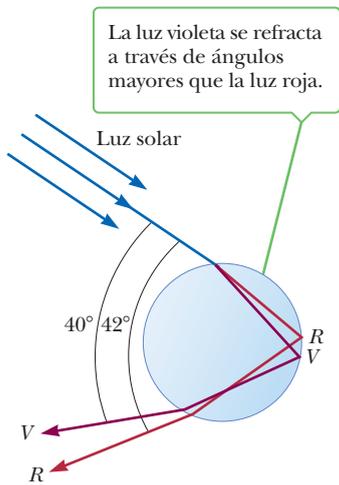


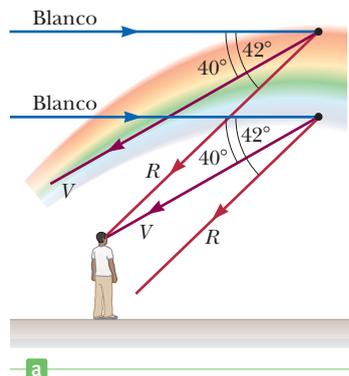
Figura activa 22.19 Refracción de la luz solar por una gota de lluvia esférica.

Figura 22.20 a) La formación de un arco iris vista por un observador de espaldas al Sol. b) Esta fotografía de un arco iris muestra un distinto arco iris secundario con los colores invertidos.

22.5 El arco iris

La dispersión de la luz en un espectro se demuestra más vívidamente en la naturaleza mediante la formación de un arco iris, que con frecuencia es visto por un observador colocado entre el Sol y una lluvia. Para entender cómo se forma un arco iris, considere la figura activa 22.19. Un rayo de luz que pasa por arriba golpea una gota de agua en la atmósfera y se refracta y refleja del modo siguiente: primero se refracta en la superficie frontal de la gota y la luz violeta se desvía más y la luz roja menos. En la superficie posterior de la gota, la luz se refleja y regresa a la superficie frontal, donde de nuevo experimenta refracción conforme se mueve del agua al aire. Los rayos salen de la gota de modo que el ángulo entre la luz blanca incidente y el rayo violeta de regreso es 40° y el ángulo entre la luz blanca y el rayo rojo de regreso es 42° . Esta pequeña diferencia angular entre los rayos de regreso hace que vea el arco como se explica en el siguiente párrafo.

Ahora considere a un observador que ve un arco iris, como en la figura 22.20a. Si observa una gota de lluvia en lo alto del cielo, la luz roja que regresa de la gota puede llegar al observador porque se desvía más, pero la luz violeta pasa sobre el observador porque se



Mark D. Phillips/Photo Researchers, Inc.

desvía menos. Por lo tanto, el observador ve esta gota como roja. De igual modo, una gota baja en el cielo dirigiría la luz violeta hacia el observador y parecería ser violeta. (La luz roja de esta gota golpearía el suelo y no se vería.) Los colores restantes del espectro llegarían al observador desde las gotas de lluvia que yacen entre estas dos posiciones extremas. La figura 22.20b muestra un hermoso arco iris y un arco iris secundario con sus colores invertidos.

22.6 Principio de Huygens

Las leyes de reflexión y refracción se pueden deducir usando un método geométrico propuesto por Huygens en 1678. Huygens supuso que la luz es una forma de movimiento ondulatorio en lugar de una corriente de partículas. Él no tenía conocimiento de la naturaleza de la luz o de su carácter electromagnético. No obstante, su modelo ondulatorio simplificado es adecuado para comprender muchos aspectos prácticos de la propagación de la luz.

El principio de Huygens es una construcción geométrica para determinar en algún instante la posición de un nuevo frente de onda a partir del conocimiento del frente de onda que lo precedió. (Un frente de onda es una superficie que pasa a través de aquellos puntos de una onda que tienen la misma fase y amplitud. Por ejemplo, un frente de onda podría ser una superficie que pase a través de las crestas de ondas.) En la construcción de Huygens, **todos los puntos sobre un frente de onda dado se toman como fuentes puntuales para la producción de ondas secundarias esféricas, llamadas wavelets, que se propagan en la dirección hacia adelante con velocidades características de ondas en dicho medio. Después de transcurrido cierto tiempo, la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las onditas.**

La figura 22.21 ilustra dos ejemplos simples de la construcción de Huygens. Primero, considera una onda plana que se mueve a través del espacio libre, como en la figura 22.21a. En $t = 0$, el frente de onda se indica mediante el plano marcado AA' . En la construcción de Huygens, cada punto sobre este frente de onda se considera una fuente puntual. Por claridad, sólo se muestran algunos puntos sobre AA' . Con estos puntos como fuentes para las wavelets, se dibujan circunferencias de radio $c\Delta t$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y Δt es el periodo de propagación desde un frente de onda hasta el siguiente. La superficie que se dibuja tangente a estas wavelets es el plano BB' , que es paralelo a AA' . En forma similar, la figura 22.21b muestra la construcción de Huygens para una onda esférica saliente.

◀ Principio de Huygens

Principio de Huygens aplicado a reflexión y refracción

Las leyes de reflexión y refracción se establecieron previamente en el capítulo sin una demostración. Ahora se deducen estas leyes con el principio de Huygens. La figura 22.22a (página 776) ilustra la ley de reflexión. La línea AA' representa un frente de onda de la luz incidente. Conforme el rayo 3 viaja de A' a C , el rayo 1 se refleja de A y produce una wavelet esférica de radio AD . (Recuerde que el radio de una wavelet de Huygens es $v\Delta t$.)

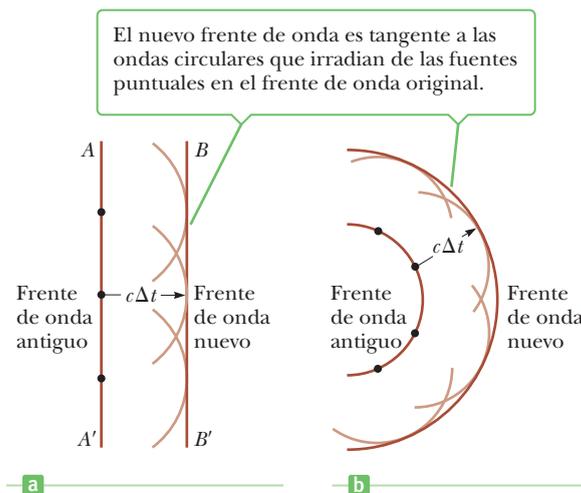
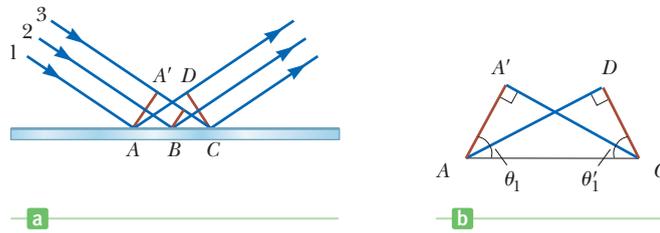


Figura 22.21 Construcción de Huygens para a) una onda plana que se propaga hacia la derecha y b) una onda esférica.

Figura 22.22 a) Construcción de Huygens para probar la ley de reflexión. b) El triángulo ADC es congruente con el triángulo $AA'C$.



Puesto que las dos wavelets que tienen radios $A'C$ y AD están en el mismo medio, tienen la misma velocidad v , de modo que $AD = A'C$. Mientras tanto, la wavelet esférica con centro en B se dispersó sólo la mitad que una con centro en A porque el rayo 2 golpea la superficie más tarde que el rayo 1.

A partir del principio de Huygens, se encuentra que el frente de onda reflejado es CD , una línea tangente a todas las wavelets esféricas salientes. El resto del análisis depende de geometría, como se resume en la figura 22.22b. Observe que los triángulos rectos ADC y $AA'C$ son congruentes porque tienen la misma hipotenusa, AC , y porque $AD = A'C$. A partir de la figura, se tiene

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{A'C}{AC} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta'_1 = \frac{AD}{AC}$$

Los lados derechos de ambas ecuaciones son iguales, así que $\text{sen } \theta = \text{sen } \theta'_1$, por lo que $\theta_1 = \theta'_1$, que es la ley de reflexión.

El principio de Huygens y la figura 22.23a se pueden usar para deducir la ley de refracción de Snell. En el intervalo de tiempo Δt , el rayo 1 se mueve de A a B , y el rayo 2 se mueve de A' a C . El radio de la wavelet esférica saliente con centro en A es igual a $v_2 \Delta t$. La distancia $A'C$ es igual a $v_1 \Delta t$. Consideraciones geométricas muestran que el ángulo $A'AC$ es igual a θ_1 y el ángulo ACB es igual a θ_2 . A partir de los triángulos $AA'C$ y ACB , tenemos que

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{v_1 \Delta t}{AC} \quad \text{y} \quad \text{sen } \theta_2 = \frac{v_2 \Delta t}{AC}$$

Si divide la primera ecuación entre la segunda, obtiene

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Sin embargo, a partir de la ecuación 22.4, sabemos que $v_1 = c/n_1$ y $v_2 = c/n_2$. Por lo tanto,

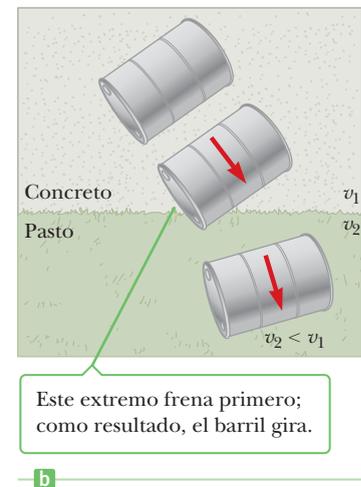
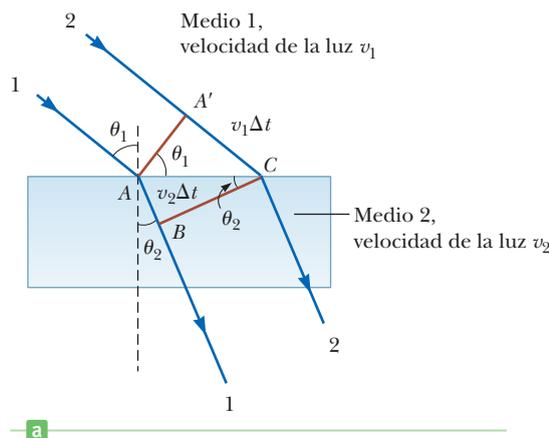
$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

y tenemos que

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

que es la ley de refracción.

Figura 22.23 a) Construcción de Huygens para probar la ley de refracción. b) Vista superior de un barril que rueda de concreto a pasto.



En la figura 22.23b se muestra una analogía mecánica de la refracción. Cuando el extremo izquierdo del barril rodante llega al pasto, frena, mientras que el extremo derecho permanece sobre el concreto y se mueve con su velocidad original. Esta diferencia en velocidades hace que el barril pivotee y cambie la dirección de su movimiento.

22.7 Reflexión interna total

Un interesante efecto, llamado *reflexión interna total*, puede ocurrir cuando la luz encuentra la frontera entre un medio con un índice de refracción *mayor* y uno con un índice de refracción *menor*. Considere un haz de luz que viaja en el medio 1 y encuentra la frontera entre el medio 1 y el medio 2, donde n_1 es mayor que n_2 (figura activa 22.24). Las posibles direcciones del haz se indican mediante los rayos del 1 al 5. Observe que los rayos refractados se doblan alejándose de la normal porque n_1 es mayor que n_2 . En algún ángulo particular de incidencia θ_c , llamado **ángulo crítico**, el rayo de luz refractado se mueve paralelo a la frontera, de modo que $\theta_2 = 90^\circ$ (figura activa 22.24b). Para ángulos de incidencia mayores que θ_c , el haz se refleja por completo en la frontera, como el rayo 5 en la figura activa 22.24a. Este rayo se refleja como si hubiese golpeado una superficie perfectamente reflectante. Este y todos los rayos como él obedecen la ley de reflexión: el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Es posible usar la ley de Snell para encontrar el ángulo crítico. Cuando $\theta_1 = \theta_c$ y $\theta_2 = 90^\circ$, la ley de Snell (ecuación 22.8) produce

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ = n_2$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{para } n_1 > n_2$$

[22.9]

La ecuación 22.9 se puede usar sólo cuando n_1 es mayor que n_2 porque **la reflexión interna total sólo ocurre cuando la luz intenta moverse de un medio de mayor índice de refracción a un medio de menor índice de refracción**. Si n_1 fuese menor que n_2 , la ecuación 22.9 daría $\sin \theta_c > 1$, que es un resultado absurdo porque el seno de un ángulo nunca puede ser mayor que 1.

Cuando el medio 2 es aire, el ángulo crítico es pequeño para sustancias con índice de refracción grande, como el diamante, donde $n = 2.42$ y $\theta_c = 24.0^\circ$. En comparación, para



Cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Esta fotografía muestra rayos de luz no paralelos que entran a un prisma de vidrio. Los dos rayos inferiores experimentan reflexión interna total en el lado más largo del prisma. Los tres rayos superiores se refractan en el lado más largo conforme salen del prisma.

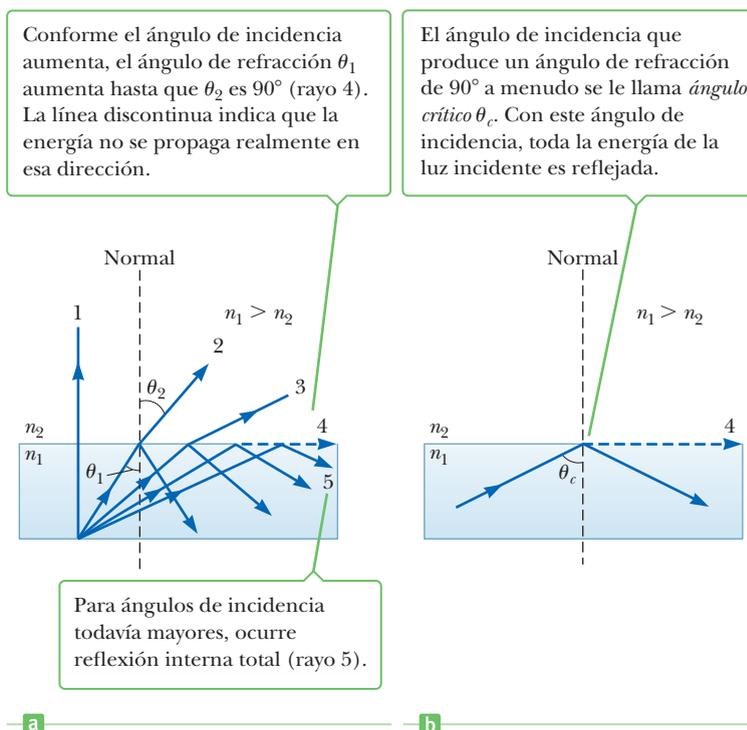
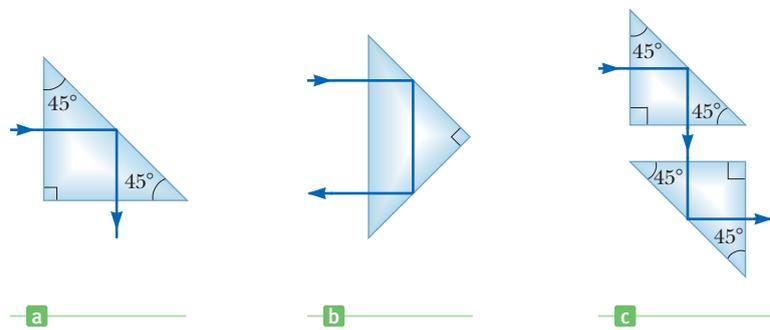


Figura activa 22.24

a) Rayos de un medio con índice de refracción n_1 viajan hacia un medio con índice de refracción n_2 , donde $n_1 > n_2$. b) El rayo 4 está señalado.

Figura 22.25 Reflexión interna en un prisma. a) El rayo se desvía 90° . b) La dirección del rayo se invierte. c) Dos prismas usados como periscopio.



vidrio corona, $n = 1.52$ y $\theta_c = 41.0^\circ$. Esta propiedad, combinada con el pulido de caras adecuado, hace que un diamante produzca chispas brillantes.

APLICACIÓN

Periscopios de submarinos

Un prisma y el fenómeno de reflexión interna total pueden alterar la dirección de viaje de un haz de luz. La figura 22.25 ilustra dos de tales posibilidades. En un caso el haz de luz se desvía 90.0° (figura 22.25a) y en el segundo caso la trayectoria del haz se invierte (figura 22.25b). Una aplicación común de la reflexión interna total es un periscopio submarino. En este dispositivo, dos prismas se ordenan como en la figura 22.25c, de modo que un haz de luz incidente sigue la trayectoria que se muestra y el usuario puede “ver a la vuelta de la esquina”.

■ FÍSICA APLICADA 22.4 Reflexión interna total y dispersión

Un haz de luz blanca incide sobre el borde curvo de un trozo de vidrio semicircular, como se muestra en la figura 22.26. La luz entra a la superficie curva a lo largo de la normal, de modo que no muestra refracción. Encuentra el lado recto del vidrio en el centro de curvatura del lado curvo y se refracta al aire. El haz incidente se mueve en sentido de las manecillas

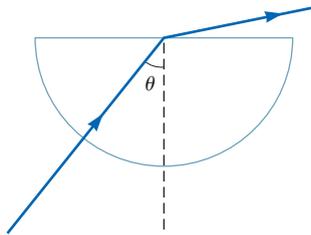


Figura 22.26 (Física aplicada 22.4)

del reloj (de modo que el ángulo θ aumenta) tal que el haz siempre entra a lo largo de la normal al lado curvo y encuentra el lado recto en el centro de curvatura del lado curvo. ¿Por qué el haz refractado se vuelve más rojo conforme se aproxima a una dirección paralela al lado recto?

EXPLICACIÓN Cuando el haz saliente se aproxima a la dirección paralela al lado recto, el ángulo incidente tiende al ángulo crítico para reflexión interna total. La dispersión ocurre conforme la luz sale del vidrio. El índice de refracción para la luz en el extremo violeta del espectro visible es mayor que en el extremo rojo, conforme el haz saliente se aproxima al lado recto, la luz violeta experimenta reflexión interna total, seguida por los otros colores. La luz roja es la última en experimentar reflexión interna total, así que, justo antes de que desaparezca la luz saliente, está compuesta de luz proveniente del extremo rojo del espectro visible. ■

■ EJEMPLO 22.6 Vista a ojo de pez

OBJETIVO Aplicar el concepto de reflexión interna total.

PROBLEMA a) Encuentre el ángulo crítico para una frontera agua-aire. b) Use el resultado del inciso a) para predecir lo que verá un pez (figura 22.27) si mira hacia arriba, a la superficie del agua, a ángulos de 40.0° , 48.6° y 60.0° .

ESTRATEGIA Después de encontrar el ángulo crítico por sustitución, úselo en la trayectoria de un rayo de luz que sea reversible: a un ángulo dado, a dondequiera que vaya un haz de luz también es de donde puede provenir un haz de luz, a lo largo de la misma trayectoria.

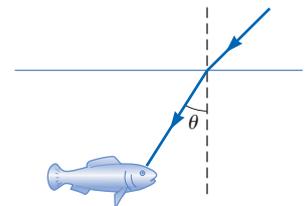


Figura 22.27 (Ejemplo 22.6) Un pez mira hacia arriba, hacia la superficie del agua.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el ángulo crítico para una frontera agua-aire.

Sustituya en la ecuación 22.9 para encontrar el ángulo crítico:

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.00}{1.333} = 0.750$$

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}(0.750) = 48.6^\circ$$

b) Prediga qué verá un pez si mira hacia arriba a la superficie del agua a ángulos de 40.0° , 48.6° y 60.0° .

A un ángulo de 40.0° , un haz de luz desde abajo del agua se refractará en la superficie y entrará al aire sobre ella. Dado que la trayectoria de un rayo de luz es reversible (la ley de Snell funciona tanto de ida como de vuelta), la luz desde arriba puede seguir la misma trayectoria y el pez la puede percibir. A un ángulo de 48.6° , el ángulo crítico para el agua, la luz proveniente de abajo del agua se dobla de modo que viaja a lo

largo de la superficie. De modo que la luz que sigue la misma trayectoria en reversa puede llegar al pez sólo si pasa rozando la superficie del agua antes de refractarse hacia el ojo del pez. A ángulos mayores que el ángulo crítico de 48.6° , un haz de luz que se dispare hacia la superficie se reflejará por completo hacia el fondo del estanque. Al invertir la trayectoria, el pez ve un reflejo de algún objeto en el fondo.

PREGUNTA 22.6 Si el agua se sustituye con un fluido transparente con un mayor índice de refracción, ¿el ángulo crítico de la frontera fluido-aire es a) mayor, b) menor o, c) el mismo que para el agua?

EJERCICIO 22.6 Suponga que una capa de aceite, con $n = 1.50$, recubre la superficie del agua. ¿Cuál es el ángulo crítico para la reflexión interna total para luz que viaja en la capa de aceite y encuentra la frontera aceite-agua?

RESPUESTA 62.7°

Fibras ópticas

Otra interesante aplicación de la reflexión interna total es el uso de barras de vidrio sólido o plástico transparente como “tuberías” de luz de un lugar a otro. Como se indica en la figura 22.28, la luz está confinada a viajar dentro de las barras, incluso alrededor de curvas suaves, como resultado de sucesivos reflejos internos. Tal tubería de luz puede ser bastante flexible si se usan fibras delgadas en lugar de barras gruesas. Si se utiliza un haz de fibras paralelas para construir una línea de transmisión óptica, las imágenes se pueden transferir de un punto a otro.

En estas fibras se pierde muy poca luz como resultado de los reflejos en los lados. Cualquier pérdida de intensidad se debe en esencia a reflejos desde los dos extremos y la absorción mediante el material de la fibra. Los dispositivos de fibra óptica son particularmente útiles para ver imágenes producidas en lugares inaccesibles. Los médicos con frecuencia usan cables de fibra óptica para auxiliarse en el diagnóstico y corrección de ciertos problemas médicos sin la intrusión de cirugía mayor. Por ejemplo, un cable de fibra óptica se puede introducir a través del esófago y hacia el estómago para observar úlceras. En esta aplicación el cable consiste en dos líneas de fibra óptica: una para transmitir un haz de luz hacia el estómago para iluminación y el otro para permitir que la luz se transmita afuera del estómago. La imagen resultante, en algunos casos, la puede ver directamente el médico, pero con más frecuencia se despliega en un monitor de televisión o se guarda en formato digital. En forma similar, los cables de fibra óptica se pueden usar para examinar el colon o para ayudar a los médicos a realizar cirugía sin necesidad de grandes incisiones.

El campo de las fibras ópticas revolucionó toda la industria de las comunicaciones. En Estados Unidos se han instalado miles de millones de kilómetros de fibra óptica para transmitir tráfico en Internet de alta velocidad, señales de radio y televisión, y llamadas de teléfonos. Las fibras pueden portar volúmenes mucho más altos de llamadas telefónicas y otras formas de comunicación que los alambres eléctricos, debido a la mayor frecuencia de luz infrarroja que usan para transmitir la información en las fibras ópticas. Las fibras ópticas también son preferibles a los alambres de cobre porque son aislantes y no recogen campos eléctricos y magnéticos parásitos o “ruido” electrónico.

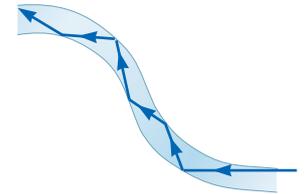


Figura 22.28 Luz que viaja en una barra transparente curva mediante múltiples reflejos internos.

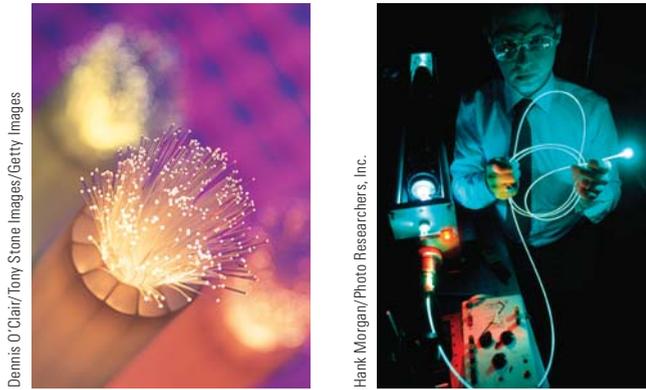
BIO APLICACIÓN

Fibras ópticas en diagnóstico médico y cirugía

APLICACIÓN

Fibras ópticas en telecomunicaciones

(Izquierda) Hebras de fibras ópticas de vidrio que se usan para transmitir señales de voz, video y datos en redes de telecomunicación.
 (Derecha) Haz de fibras ópticas iluminadas mediante un láser.



Dennis O'Clair/Tony Stone Images/Getty Images

Hank Morgan/Photo Researchers, Inc.

■ FÍSICA APLICADA 22.5 Diseño de una fibra óptica

Una fibra óptica consta de un núcleo transparente rodeado por un revestimiento, que es un material con un índice de refracción más bajo que el núcleo (figura 22.29). Un cono de ángulos, llamado cono de aceptación, está a la entrada de la fibra. La luz que entra a ángulos dentro de este cono se

transmitirá a través de la fibra, mientras que la luz que entra al núcleo desde ángulos fuera del cono no se transmitirá. La figura muestra un rayo de luz que entra a la fibra justo dentro del cono de aceptación y experimenta reflexión interna total en la interfaz entre el núcleo y el revestimiento. Si tecnológicamente es difícil producir luz de modo que entre a la fibra desde un pequeño rango de ángulos, ¿cómo podría usted ajustar los índices de refracción del núcleo y el revestimiento para aumentar el tamaño del cono de aceptación? ¿Diseñaría los índices para que estuvieran más separados o más juntos?

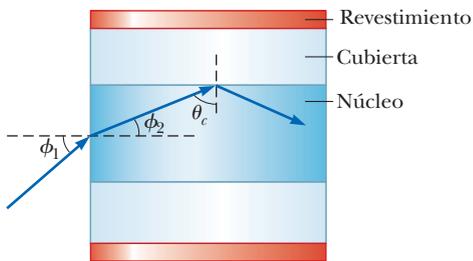


Figura 22.29 (Física aplicada 22.5)

EXPLICACIÓN El cono de aceptación se volvería más grande si el ángulo crítico (θ_c en la figura) se pudiera hacer más pequeño. Este ajuste se puede realizar al hacer que el índice de refracción del material de revestimiento sea menor, de modo que los índices de refracción del núcleo y el material de revestimiento estén más separados. ■

■ RESUMEN

22.1 La naturaleza de la luz

La luz tiene una naturaleza dual. En algunos experimentos actúa como una onda, en otros como partícula, llamada fotón por Einstein. La energía de un fotón es proporcional a su frecuencia,

$$E = hf \quad [22.1]$$

donde $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ es la *constante de Planck*.

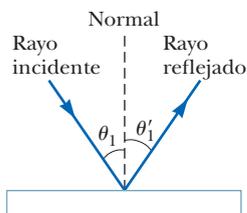
La luz que pasa hacia un medio transparente se desvía en la frontera y se dice que se *refracta*. El ángulo de refracción es el ángulo que el rayo forma con respecto a una línea perpendicular a la superficie después de que entra al nuevo medio.

22.2 Reflexión y refracción

En la reflexión de la luz de una superficie lisa plana, el ángulo de incidencia, θ_1 , con respecto a una línea perpendicular a la superficie es igual al ángulo de reflexión, θ_1' :

$$\theta_1' = \theta_1 \quad [22.2]$$

▮ Onda bajo el modelo de reflexión. ▮

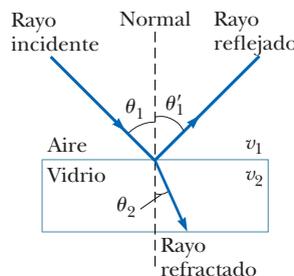


22.3 La ley de refracción

El **índice de refracción** de un material, n , se define como

$$n = \frac{c}{v} \quad [22.4]$$

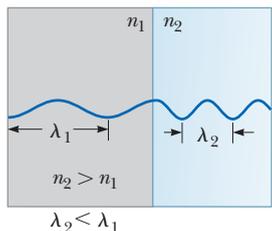
▮ Onda bajo el modelo de refracción. ▮



donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el material. El índice de refracción de un material también es

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda_n} \quad [22.7]$$

donde λ_0 es la longitud de onda de la luz en el vacío y λ_n es su longitud de onda en el material.



Al entrar en un material con un mayor índice de refracción, la longitud de onda de la luz se reduce.

La ley de refracción, o ley de Snell, afirma que

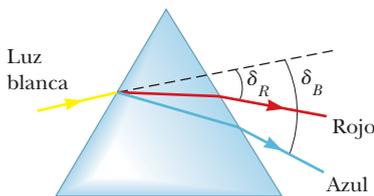
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad [22.8]$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción en los dos medios. El rayo incidente, el rayo reflejado, el rayo refractado y la normal a la superficie se encuentran todos en el mismo plano.

22.4 Dispersión y prismas

22.5 El arco iris

El índice de refracción de un material depende de la longitud de onda de la luz incidente, un efecto llamado *dispersión*. La luz en el extremo violeta del espectro muestra un mayor ángulo de refracción al entrar en vidrio que la luz en el extremo rojo. Los arco iris son consecuencia de la dispersión.



Debido a la dispersión, la luz azul se inclina más que la luz roja.

22.6 Principio de Huygens

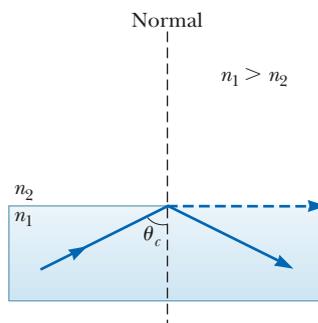
El **principio de Huygens** afirma que todos los puntos sobre un frente de onda son fuentes puntuales para la producción de ondas secundarias esféricas llamadas wavelets. Éstas se propagan hacia adelante con una velocidad característica de ondas en un medio particular. Después de transcurrido cierto tiempo, la nueva posición del frente de onda es la superficie tangente a las wavelets. Este principio se puede usar para deducir las leyes de reflexión y refracción.

22.7 Reflexión interna total

Cuando la luz se propaga en un medio con índice de refracción n_1 e incide sobre la frontera de un material con un índice de refracción n_2 , $n_1 > n_2$, entonces la reflexión interna total puede ocurrir si el ángulo de incidencia es igual o mayor que el **ángulo crítico** θ_c dado por

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2) \quad [22.9]$$

La reflexión interna total se usa en las fibras ópticas que portan datos a alta velocidad alrededor del mundo.



Un rayo se somete a la reflexión total interna en ángulo igual o mayor que el ángulo crítico.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una fuente de luz monocromática emite una longitud de onda de 495 nm en aire. Cuando pasa a través de un líquido, la longitud de onda se reduce a 434 nm. ¿Cuál es el índice de refracción del líquido? a) 1.26 b) 1.49 c) 1.14 d) 1.33 e) 2.03
- En un contenedor de vidrio corona ($n = 1.52$) se vierte disulfuro de carbono ($n = 1.63$). ¿Cuál es el ángulo crítico para reflexión interna de un rayo en el líquido cuando incide sobre la superficie líquido-vidrio? a) 89.2° b) 68.8° c) 21.7° d) 1.07° e) 43.0°
- ¿Cuántos fotones de 800 nm se requieren para tener la misma energía total que cuatro fotones de 200 nm? a) 1 b) 2 c) 4 d) 8 e) 16
- Un rayo de luz viaja a través de dos placas paralelas con diferentes índices de refracción como en la figura POM22.4.

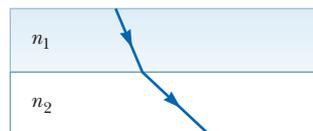


Figura POM22.4

Los rayos que se muestran son sólo los rayos refractados. ¿Cuál de las siguientes opciones es verdadera con respecto al tamaño relativo de los índices de refracción? a) $n_1 \geq n_2$ b) $n_1 \leq n_2$ c) $n_1 = n_2$ d) $n_1 > n__2$ e) $n_1 < n_2$

5. La luz que viaja en un medio con índice de refracción n_1 incide sobre otro medio que tiene un índice de refracción n_2 . ¿Bajo cuáles de las siguientes condiciones puede ocurrir reflexión total en la interfaz de los dos medios? a) Los índices de refracción tienen la relación $n_2 > n_1$ b) Los índices de refracción tienen la relación $n_1 > n_2$ c) La luz viaja más lento en el segundo medio que en el primero. d) El ángulo de incidencia es menor que el ángulo crítico. e) El ángulo de incidencia debe ser igual al ángulo de refracción.
6. La luz puede viajar de aire a agua o de agua a aire, con algunas trayectorias posibles, como se muestra en la figura POM22.6. ¿Cuál trayectoria es más probable que siga la luz? a) A b) B c) C d) D e) E

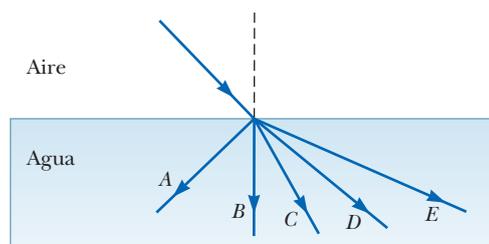


Figura POM22.6

7. El índice de refracción del agua es aproximadamente $4/3$. ¿Qué sucede con la luz cuando viaja de aire a agua? a) Su velocidad aumenta a $4c/3$ y su frecuencia disminuye. b)

Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su longitud de onda disminuye por un factor de $4/3$. c) Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su longitud de onda aumenta por un factor de $4/3$. d) Su velocidad y frecuencia permanecen iguales. e) Su velocidad disminuye a $3c/4$ y su frecuencia aumenta.

8. ¿Cuál color de luz se desvía más cuando entra a vidrio corona desde aire a cierto ángulo positivo θ con respecto a la normal? a) violeta b) azul c) verde d) amarillo e) rojo.
9. Un rayo de luz que contiene longitudes de onda azul y roja incide en un ángulo sobre una losa de vidrio. ¿Cuál de los bosquejos en la figura POM22.9 representa el resultado más probable? a) A b) B c) C d) D e) ninguno de éstos.

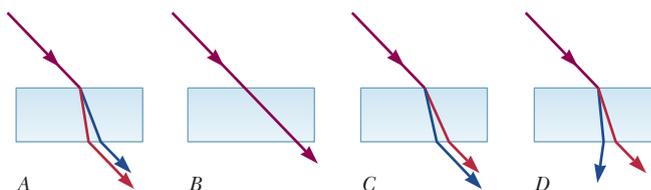


Figura POM22.9

10. Un rayo de luz viaja del vacío hacia una losa de material con índice de refracción n_1 y ángulo incidente θ . Posteriormente pasa hacia una segunda losa de material con índice de refracción n_2 antes de pasar de nuevo al vacío. Las superficies de los diferentes materiales son todas paralelas unas con otras. Conforme la luz sale de la segunda losa, ¿qué puedes decir acerca del ángulo final ϕ que la luz forma con la normal? a) $\phi > \theta$ b) $\phi < \theta$ c) $\phi = \theta$ d) El ángulo depende de las magnitudes de n_1 y n_2 . e) El ángulo depende de las longitudes de onda de la luz.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿Por qué el arco de un arco iris aparece con rojo en la parte superior y violeta en la inferior?
- Un rayo de luz se mueve de un material que tiene un índice de refracción alto a un material con un índice de refracción más bajo. a) ¿El rayo se desvía hacia la normal o se aleja de ella? b) Si la longitud es 600 nm en el material con el índice de refracción alto, ¿es mayor, menor o el mismo en el material con el índice de refracción más bajo? c) ¿Cómo cambia la frecuencia conforme la luz se mueve entre los dos materiales? ¿Aumenta, disminuye o permanece igual?
- Un rayo de luz viaja a través de tres bloques paralelos con diferentes índices de refracción como en la figura PC22.3. Los rayos que se muestran son sólo los rayos refractados. Ordene los materiales de acuerdo con el tamaño de sus índices de refracción, de mayor a menor.



Figura PC22.3

- ¿Bajo qué condiciones se forma un espejismo? En un día caliente, ¿qué observa cuando mira el espejismo de un charco de agua en la carretera?
- Explique por qué un diamante pierde la mayor parte de su brillo cuando se sumerge en disulfuro de carbono.
- Un tipo de espejismo llamado *pingo* se observa con frecuencia en Alaska. Los pingos ocurren cuando la luz de una pequeña colina pasa hacia un observador mediante

una trayectoria que toma la luz sobre un cuerpo de agua más caliente que el aire. Lo que se ve es la colina y una imagen invertida directamente bajo ella. Explique cómo se forman estos espejismos.

- En los materiales dispersivos, el ángulo de refracción para un rayo de luz depende de la longitud de onda de la luz. ¿El ángulo de reflexión de la superficie del material depende de la longitud de onda? ¿Por qué sí o por qué no?
- El nivel de agua en un vidrio claro incoloro puede observarse fácilmente a simple vista. El nivel de helio líquido en un contenedor de vidrio claro es extremadamente difícil ver a simple vista. Explique. *Sugerencia:* El índice de refracción del helio líquido está cerca del perteneciente al aire.
- Suponga que se le dice que sólo dos colores de luz (X y Y) se envían a través de un prisma de vidrio y que X se dobla más que Y . ¿Cuál color viaja más lentamente en el prisma?
- ¿Es posible tener reflexión interna total para luz incidente de aire a agua? Explique.
- La Figura PC22.11 muestra un lápiz parcialmente sumergido en un vaso de agua. ¿Por qué el lápiz parece doblado?



Figura PC22.11

- Haga este sencillo experimento por su cuenta. Tome dos tazas opacas, coloque una moneda en el fondo de cada taza cerca del borde, y llene una taza con agua. A continuación, vea las tazas desde un lado en algún ángulo de modo que la moneda en el agua sea apenas visible, como se muestra a la izquierda en la figura PC22.12. Tenga en cuenta que la moneda en aire no es visible, como se muestra a la derecha en la figura PC22.12. Explique esta observación.



Figura PC22.12

- ¿Por qué los astrónomos que observan galaxias distantes hablan acerca de mirar hacia atrás en el tiempo?

PROBLEMAS

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

22.1 La naturaleza de la luz

- Durante el alunizaje del Apolo XI, sobre la superficie de la Luna se erigió un panel retrorreflector. La velocidad de la luz se puede encontrar al medir el tiempo que tarda un haz láser en viajar desde la Tierra, reflejarse en el panel y regresar a la Tierra. Si este intervalo es de 2.51 s, ¿cuál es la velocidad medida de la luz? Considere que la distancia de centro a centro entre la Tierra y la Luna es de 3.84×10^8 m.

Suponga que la Luna está directamente arriba y no se desprecian los tamaños de la Tierra y la Luna.

- CIC** a) ¿Cuál es la energía en joules de un fotón de rayos X con 1.00×10^{-10} m de longitud de onda? b) Convierta la energía a electrón-volts. c) Si se desean rayos X más penetrantes, ¿la longitud de onda debe aumentar o disminuir? d) ¿La frecuencia debe aumentar o disminuir?

3. **M** Encuentre la energía de a) un fotón que tiene una frecuencia de 5.00×10^{17} Hz y b) un fotón que tiene una longitud de onda de 3.00×10^2 nm. Expresé sus respuestas en unidades de electrón-volts y observe que $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$.
4. **C/C** a) Calcule la longitud de onda de luz en vacío que tiene una frecuencia de 5.45×10^{14} Hz. b) ¿Cuál es su longitud de onda en benceno? c) Calcule la energía de un fotón de tal luz en el vacío. Expresé su respuesta en electrón-volts. d) ¿La energía del fotón cambia cuando entra al benceno? Explique.
5. Encuentre la velocidad de la luz en a) agua, b) vidrio corona y c) diamante.
6. **S** a) Encuentre una expresión simbólica para la longitud de onda λ de un fotón en términos de su energía E , constante de Planck h y la velocidad de la luz c . b) ¿Qué dice la ecuación acerca de las longitudes de onda de fotones de mayor energía?
7. Un rayo de luz viaja del aire a otro medio y forma un ángulo de $\theta_1 = 45.0^\circ$ con la normal, como en la figura P22.7. Encuentre el ángulo de refracción θ_2 si el segundo medio es a) cuarzo, b) disulfuro de carbono y c) agua.

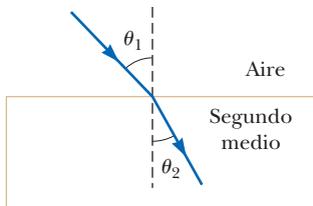


Figura P22.7

22.2 Reflexión y refracción

22.3 La ley de refracción

8. Los dos espejos en la figura P22.8 se encuentran en ángulo recto. El haz de luz en el plano vertical P golpea el espejo 1 como se muestra. a) Determine la distancia que recorre el haz de luz reflejado antes de golpear el espejo 2. b) ¿En qué dirección viaja el haz de luz después de reflejarse en el espejo 2?
9. Un buzo bajo el agua ve el Sol en un ángulo aparente de 45.0° desde la vertical. ¿Cuál es la dirección real del Sol?
10. Dos espejos planos forman un ángulo recto entre sí como se muestra en la vista lateral en la figura P22.10. Un rayo de luz incide sobre el espejo 1 en ángulo θ con la vertical. Utilizando la ley de la reflexión y la geometría, demuestre que después de que el rayo se refleja en ambos espejos, el rayo saliente se refleja paralelo al rayo incidente.

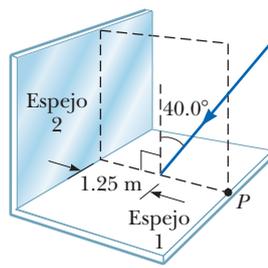


Figura P22.8

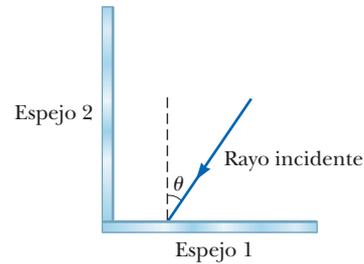


Figura P22.10

11. Un haz láser incide en un ángulo de 30.0° con la vertical en una solución de jarabe de maíz en agua. Si el haz se refracta a 19.24° con la vertical, a) ¿cuál es el índice de refracción de la solución de jarabe? Suponga que la luz es roja, con longitud de onda de 632.8 nm en el vacío. Encuentre su b) longitud de onda, c) frecuencia y d) velocidad en la solución.
12. Luz que contiene longitudes de onda de 400 , 500 y 650 nm incide desde el aire sobre un bloque de vidrio corona a un ángulo de 25.0° . a) ¿Todos los colores se refractan igual o un color se dobla más que los otros? b) Calcule el ángulo de refracción en cada caso para verificar su respuesta.
13. Un rayo de luz incide sobre la superficie de un bloque de hielo claro a un ángulo de 40.0° con la normal. Parte de la luz se refleja y parte se refracta. Encuentre el ángulo entre la luz reflejada y refractada.
14. Dos espejos planos forman un ángulo $\theta_1 = 50.0^\circ$ entre sí como se muestra en la vista lateral en la figura P22.14. Si un rayo horizontal incide en el espejo 1, ¿con qué ángulo θ_2 el rayo saliente se refleja en la superficie del espejo 2?
15. La luz que emite un láser helio-neón tiene una longitud de onda de 632.8 nm en aire. Conforme la luz viaja de aire a circonio, determine su a) velocidad, b) longitud de onda y c) frecuencia, todo en el circonio.

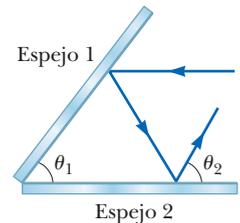


Figura P22.14

16. La figura P22.16 muestra un rayo de luz que viaja en una losa de vidrio corona rodeada por aire. El rayo incide sobre superficie recta en un ángulo de 55° con la normal y luego se refleja en los puntos A , B y C . a) ¿En cuál de estos puntos parte del rayo entra al aire? b) Si la losa de cristal está rodeada de disulfuro de carbono, ¿en qué punto parte del rayo entra en el disulfuro de carbono?
17. ¿Cuántas veces el haz incidente que se muestra en la figura P22.17 se reflejará en cada uno de los espejos paralelos?

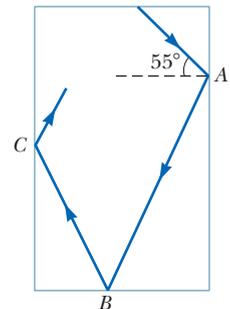


Figura P22.16

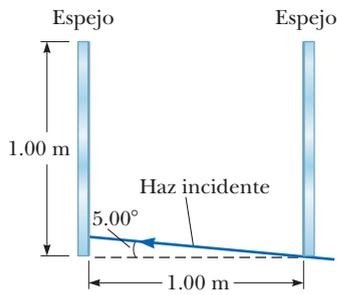


Figura P22.17

18. **CIC** Un rayo de luz golpea un bloque plano de vidrio ($n = 1.50$), de 2.00 cm de grosor, en un ángulo de 30.0° con respecto a la normal (figura P22.18). a) Encuentre el ángulo de refracción en la superficie superior. b) Encuentre el ángulo de incidencia en la superficie inferior y el ángulo refractado. c) Encuentre la distancia lateral d por el que se corre el haz de luz. d) Calcule la velocidad de la luz en el vidrio y e) el tiempo requerido para que la luz pase a través del bloque de vidrio. f) ¿El ángulo de incidencia afecta el tiempo de viaje a través del bloque? Explique.

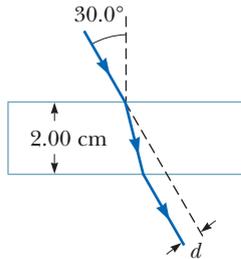


Figura P22.18

19. **M** El haz de luz que se muestra en la figura P22.19 forma un ángulo de 20.0° con la línea normal NN' en el aceite de linaza. Determine los ángulos θ y θ' . (El índice de refracción para el aceite de linaza es 1.48.)

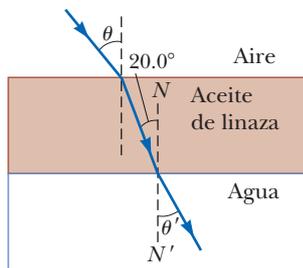


Figura P22.19

20. Un haz láser incide sobre un prisma de $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ perpendicular a una de sus caras, como se muestra en la figura P22.20. El haz transmitido que sale por la hipotenusa del prisma forma un ángulo $\theta = 15^\circ$ con la dirección del haz incidente. Encuentre el índice de refracción del prisma.

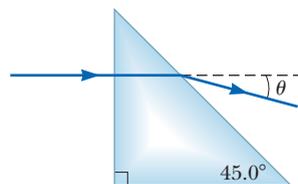


Figura P22.20

21. Un bloque de vidrio corona se sumerge en agua como en la figura P22.21. Un rayo de luz incide sobre la cara superior con un ángulo de $\theta_1 = 42.0^\circ$ con la normal y sale del bloque en el punto P . a) Encuentre la distancia y vertical

desde la parte superior del bloque de P . b) Halle el ángulo de refracción θ_2 del rayo de luz al salir del bloque en P .

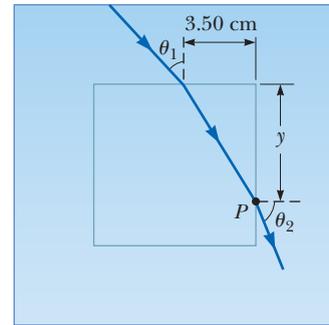


Figura P22.21

22. **BIO** Un estrecho haz de ondas ultrasónicas se refleja del tumor hepático en la figura P22.22. Si la velocidad de la onda es 10.0% menor en el hígado que en el medio circundante, determine la profundidad del tumor.

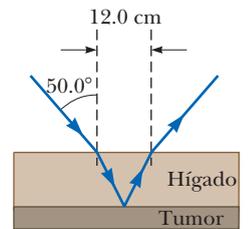


Figura P22.22

23. **S** Una persona que mira hacia un contenedor vacío puede ver el extremo lejano del fondo del contenedor, como se muestra en la figura P22.23a. La altura del contenedor es h y su ancho es d . Cuando el contenedor está completamente lleno con un fluido con índice de refracción n , la persona puede ver una moneda en medio del fondo del contenedor, como se muestra en la figura P22.23b. a) Demuestre que la razón h/d está dada por

$$\frac{h}{d} = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{4 - n^2}}$$

b) Suponiendo que el contenedor tiene un ancho de 8.0 cm y está lleno con agua, use la expresión anterior para encontrar la altura del contenedor.

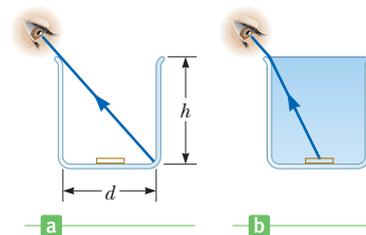


Figura P22.23

24. **PG** Un submarino está a 3.00×10^2 m horizontalmente desde la playa y 1.00×10^2 m bajo la superficie del agua. Un haz láser se envía desde el edificio de modo que el haz golpea la superficie del agua a 2.10×10^2 m de la playa. Sobre la playa hay un edificio y el haz láser golpea un blanco en la parte superior del edificio. El objetivo es

encontrar la altura del blanco sobre el nivel del mar.
 a) Dibuje un diagrama de la situación e identifique los dos triángulos que son importantes para encontrar la solución. b) Encuentre el ángulo de incidencia del haz que golpea la interfaz agua-aire. c) Encuentre el ángulo de refracción. d) ¿Qué ángulo forma el haz refractado con respecto a la horizontal? e) Encuentre la altura del blanco sobre el nivel del mar.

25. **S** Un haz de luz se refleja y refracta en la superficie entre aire y vidrio, como se muestra en la figura P22.25. Si el índice de refracción del vidrio es n_g , encuentre el ángulo de incidencia θ_1 , en el aire que resultaría en el rayo reflejado y el rayo refractado mutuamente perpendiculares. *Sugerencia:* Recuerde la identidad $\sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta$.

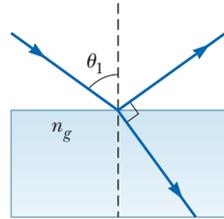


Figura P22.25

26. La figura P22.26 muestra un rayo de luz incidente en una serie de losas con distinto índice de refracción, donde $n_1 < n_2 < n_3 < n_4$. Observe que la trayectoria del rayo cada vez se inclina hacia la normal. Si la variación en n fuera continua, la trayectoria formarí una curva suave. Use esta idea y un diagrama de rayos para explicar por qué se puede ver el Sol al atardecer después de haber caído por debajo del horizonte.

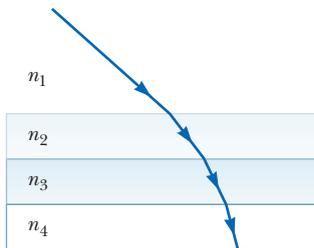


Figura P22.26 Problemas 26 y 39

27. **M** Un tanque cilíndrico opaco, con la parte superior abierta, tiene un diámetro de 3.00 m y está completamente lleno con agua. Cuando el Sol de la tarde llega en un ángulo de 28.0° sobre el horizonte, la luz solar deja de iluminar el fondo del tanque. ¿Cuán profundo es el tanque?

22.4 Dispersión y prismas

28. Cierta tipo de vidrio tiene un índice de refracción de 1.650 para luz azul de 430 nm de longitud de onda y un índice de 1.615 para luz roja de 680 nm de longitud de onda. Si un haz que contiene estos dos colores incide en un ángulo de 30.00° sobre un trozo de este vidrio, ¿cuál es el ángulo entre los dos haces dentro del vidrio?
29. El índice de refracción para luz roja en agua es 1.331 y el de la luz azul es 1.340. Si un rayo de luz blanca entra al agua en un ángulo de incidencia de 83.00° , ¿cuáles son los ángulos de refracción submarinos para los componentes a) azul y b) rojo de la luz?
30. El índice de refracción para vidrio corona es 1.512 a una longitud de onda de 660 nm (rojo), mientras que su índice

de refracción es 1.530 a una longitud de onda de 410 nm (violeta). Si ambas longitudes de onda inciden sobre una losa de vidrio corona al mismo ángulo de incidencia, 60.0° , ¿cuál es el ángulo de refracción para cada longitud de onda?

31. Un haz de luz que contiene longitudes de onda roja y violeta incide sobre una losa de cuarzo a un ángulo de incidencia de 50.00° . El índice de refracción del cuarzo es 1.455 a 660 nm (luz roja) y su índice de refracción es 1.468 a 410 nm (luz violeta). Encuentre la dispersión de la losa, que se define como la diferencia en los ángulos de refracción para las dos longitudes de onda.

32. El índice de refracción para luz violeta en vidrio de sílice es 1.66, y el de la luz roja es 1.62. ¿Cuál es la dispersión angular de la luz visible que pasa a través de un prisma equilátero con ángulo vértice de 60.0° , si el ángulo de incidencia es 50.0° ? (Véase la figura P22.32.)

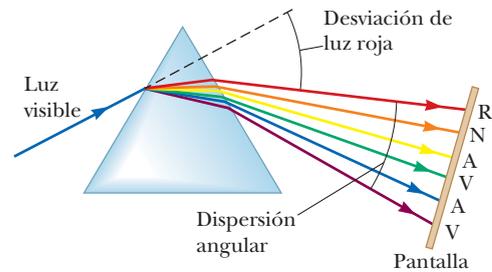


Figura P22.32

33. **M** Un rayo de luz golpea el punto medio de una cara de un prisma de vidrio ($n = 1.5$) equiangular ($60^\circ - 60^\circ - 60^\circ$) en un ángulo de incidencia de 30° . a) Trace la trayectoria del rayo de luz a través del vidrio y encuentre los ángulos de incidencia y refracción en cada superficie. b) Si una pequeña fracción de luz también se refleja en cada superficie, ¿cuáles son los ángulos de reflexión en la superficie?

22.7 Reflexión interna total

34. Para luz con longitud de onda de 589 nm, calcule los ángulos críticos para las siguientes sustancias cuando las rodea aire: a) cuarzo fundido, b) poliestireno, c) cloruro de sodio.
35. Repita el problema 34, pero esta vez suponga que el cuarzo, el poliestireno y el cloruro de sodio están rodeados con agua.
36. **M** Un haz de luz incide desde aire sobre la superficie de un líquido. Si el ángulo de incidencia es 30.0° y el ángulo de refracción es 22.0° , encuentre el ángulo crítico para el líquido cuando está rodeado por aire.
37. Una tubería plástica ligera tiene un índice de refracción de 1.53. Para reflexión interna total, ¿cuál es el ángulo de incidencia mínimo, si la tubería está en a) aire y b) agua?
38. Determine el ángulo máximo θ para el cual los rayos de luz incidentes en el extremo de la tubería

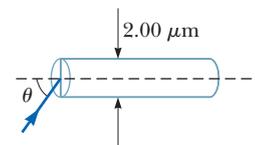


Figura P22.38

de luz en la figura P22.38 están sujetos a reflexión interna total a lo largo de las paredes de la tubería. Suponga que la tubería de luz tiene un índice de refracción de 1.36 y el medio exterior es aire.

39. Un rayo de luz incide de manera normal a la cara larga (la hipotenusa) de un prisma $45^\circ-45^\circ-90^\circ$ rodeado por aire, como se muestra en la figura 22.26b. Calcule el índice de refracción mínimo del prisma para el que el rayo se reflejará internamente de manera total en cada uno de los dos lados que forman el ángulo recto.

40. **CIC** Un haz de luz láser con longitud de onda de 612 nm se dirige a través de una losa de vidrio que tiene índice de refracción 1.78. a) ¿Para qué ángulo incidente mínimo un rayo de luz experimentaría reflexión interna total? b) Si una capa de agua se coloca sobre el vidrio, ¿cuál es el ángulo de incidencia mínimo sobre la interfaz vidrio-agua que resultará en reflexión interna total en la interfaz agua-aire? c) ¿El grosor de la capa de agua o vidrio afecta el resultado? d) ¿El índice de refracción de la capa que interviene afecta el resultado?

41. Una habitación contiene aire en la que la velocidad del sonido es 343 m/s. Las paredes de la habitación están hechas de concreto, en la cual la velocidad del sonido es 1850 m/s. a) Encuentre el ángulo crítico para la reflexión interna total del sonido en la frontera concreto-aire. b) ¿En cuál medio debe viajar el sonido para experimentar reflexión interna total? c) “Un muro de concreto desnudo es un espejo enormemente eficiente para el sonido”. Proporcione evidencia a favor o en contra de este enunciado.

42. **PG CIC** Considere un rayo de luz que viaja entre el aire y un diamante cortado en la forma mostrada en la figura P22.42. a) Encuentre el ángulo crítico para la reflexión interna total de la luz en el diamante incidente en la interfaz entre el diamante y el aire exterior. b) Considere que el rayo de luz incide normalmente en la parte superior de la superficie del diamante como se muestra en la figura P22.42. Demuestre que la luz que viaja hacia el punto P en el diamante se refleja totalmente. c) Si el diamante se sumerge en agua, encuentre el ángulo crítico en la interfase agua-diamante. d) Cuando el diamante se sumerge en agua, ¿el rayo de luz que entra en la parte superior de la superficie de la figura P22.42 se somete a la reflexión total interna en P ? Explique. e) Si el rayo de luz que entra en el diamante permanece en posición vertical como se muestra en la figura P22.42, ¿de qué manera el diamante en el agua puede girar sobre un eje perpendicular a la página a través de O , de modo que la luz salga del diamante, en P ? f) ¿A qué ángulo de rotación del diamante en el inciso e) saldrá primero la luz en el punto P ?

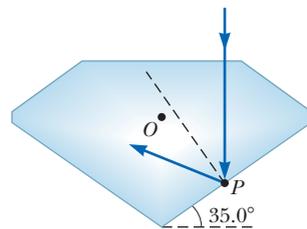


Figura P22.42

43. El haz de luz en la figura P22.43 golpea la superficie 2 en el ángulo crítico. Determine el ángulo de incidencia, θ_1 .

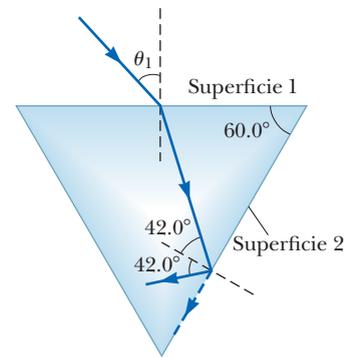


Figura P22.43

44. Un ladrón de joyas oculta un diamante al colocarlo en el fondo de una alberca pública. Coloca una balsa circular sobre la superficie del agua directamente arriba y con centro sobre el diamante, como se muestra en la figura P22.44. Si la superficie del agua está quieta y la alberca tiene 2.00 m de profundidad, encuentre el diámetro mínimo de la balsa que evitaría la visualización del diamante.

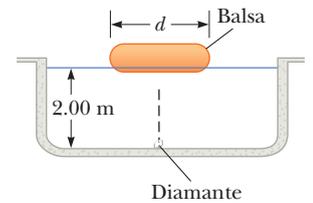


Figura P22.44

Problemas adicionales

45. Una capa de hielo, que tiene lados paralelos, flota sobre agua. Si sobre la superficie superior del hielo incide luz con un ángulo de incidencia de 30.0° , ¿cuál es el ángulo de refracción en el agua?
46. **CIC** Un rayo de luz incide con un ángulo de 30.0° sobre una losa plana de vidrio rodeada por agua. a) Encuentre el ángulo de refracción. b) Suponga que el índice de refracción del medio circundante se puede ajustar, pero el ángulo de incidencia de la luz permanece igual. Conforme el índice de refracción del medio se aproxima al del vidrio, ¿qué sucede con el ángulo de refracción? c) ¿Qué sucede con el ángulo de refracción cuando el índice de refracción del medio excede al del vidrio?
47. Cuando un hombre se encuentra cerca del borde de una zanja de drenaje vacía de una profundidad de 2.80 m, apenas puede ver el límite entre la pared de enfrente y la

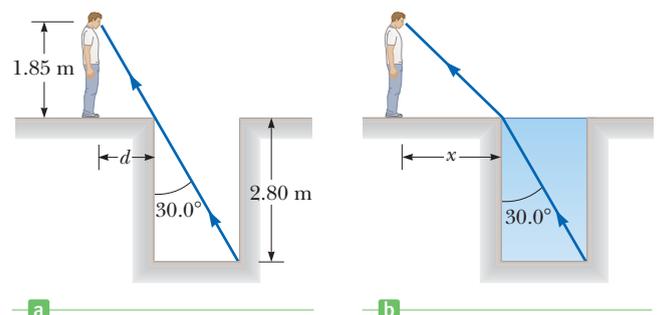


Figura P22.47

parte inferior de la zanja como en la figura P22.47a. La distancia desde sus ojos a la tierra es de 1.85 m. a) ¿Cuál es la distancia horizontal d desde el hombre hasta el borde de la zanja de drenaje? b) Después de que la zanja de drenaje es llenada con agua como en la figura P22.47b, ¿cuál es la distancia máxima x del borde a la que el hombre permanece y continúa viendo el mismo límite?

48. Un rayo de luz, con longitud de onda de 589 nm, incide con un ángulo θ sobre la superficie superior de un bloque de poliestireno rodeado por aire, como se muestra en la figura P22.48. a) Encuentre el valor máximo de θ para el cual el rayo refractado experimentará reflexión interna total en la cara vertical izquierda del bloque. b) Repita el cálculo para el caso en el cual el bloque de poliestireno se sumerja en agua. c) ¿Qué ocurre si el bloque se sumerge en disulfuro de carbono?

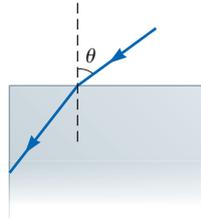


Figura P22.48

49. Como se muestra en la figura P22.49, un rayo de luz incide normal a una cara de un bloque $30^\circ-60^\circ-90^\circ$ de vidrio denso (un prisma) que está sumergido en agua. a) Determine el ángulo de salida θ_3 del rayo. b) Una sustancia se disuelve en el agua para aumentar el índice de refracción n_2 . ¿A qué valor de n_2 la reflexión interna total cesa en el punto P ?

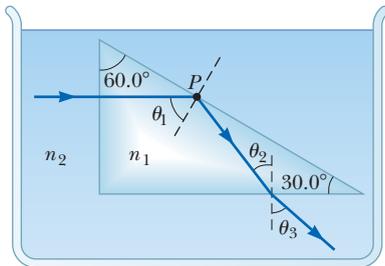


Figura P22.49

50. Un estrecho haz de luz incide desde aire en una superficie de vidrio con índice de refracción 1.56. Encuentre el ángulo de incidencia para el cual el correspondiente ángulo de refracción sea la mitad del ángulo de incidencia. *Sugerencia:* Puede usar la identidad trigonométrica $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$.

51. En la figura P22.51 se muestra una técnica para medir el ángulo de un prisma. Un haz de luz paralelo se dirige

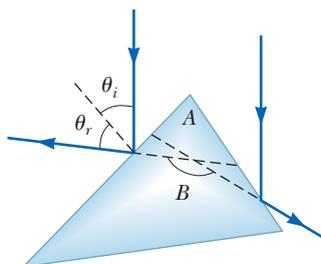


Figura P22.51

hacia el vértice del prisma, de modo que el haz se refleje desde sus caras opuestas del prisma. Demuestre que la separación angular de los dos haces reflejados está dada por $B = 2A$.

52. Una fibra óptica, con índice de refracción n y diámetro d está rodeada con aire. Hacia la fibra se envía luz a lo largo de su eje, como se muestra en la figura P22.52. a) Encuentre el menor radio exterior R permitido para un doblez en la fibra, si no escapa luz. b) ¿El resultado del inciso a) predice comportamiento razonable conforme d tiende a cero? ¿Conforme n aumenta? ¿Conforme n tiende a la unidad? c) Evalúe R , suponiendo que el diámetro de la fibra es $100 \mu\text{m}$ y su índice de refracción es 1.40.

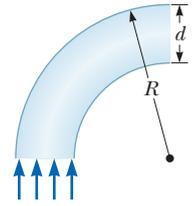


Figura P22.52

53. Un trozo de alambre se dobla hasta un ángulo θ . El alambre doblado se sumerge parcialmente en benceno (índice de refracción = 1.50) de modo que, para una persona que mira a lo largo de la parte seca, el alambre parece ser recto y forma un ángulo de 30.0° con la horizontal. Determine el valor de θ .

54. Un rayo de luz que viaja en aire, incide sobre una cara de un prisma de ángulo recto con índice de refracción $n = 1.50$, como se muestra en la figura P22.54 y el rayo sigue la trayectoria que se muestra en la figura. Suponiendo que $\theta = 60.0^\circ$ y la base del prisma tiene espejo, determine el ángulo ϕ que forma el rayo saliente con la normal a la cara derecha del prisma.

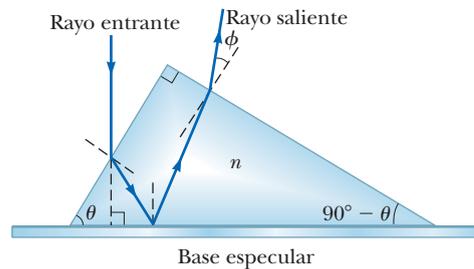


Figura P22.54

55. Un cilindro transparente, de radio $R = 2.00 \text{ m}$, tiene una superficie especular sobre su mitad derecha, como se muestra en la figura P22.55. Un rayo de luz que viaja en aire incide sobre el lado izquierdo del cilindro. El rayo de luz incidente y el rayo de luz saliente son paralelos y $d = 2.00 \text{ m}$. Determine el índice de refracción del material.

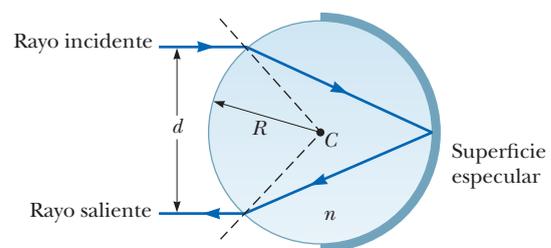


Figura P22.55

56. Un haz láser golpea un extremo de una losa de material, como en la figura P22.56. El índice de refracción de la losa es 1.48. Determine el número de reflexiones internas del haz antes de salir del extremo opuesto de la losa.

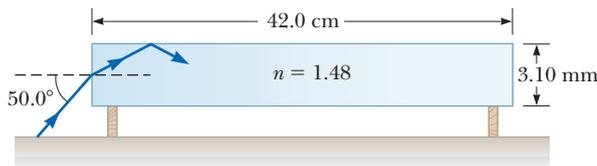


Figura P22.56

57. Un rayo de luz entra a un bloque rectangular de plástico a un ángulo $\theta_1 = 45.0^\circ$ y sale a un ángulo $\theta_2 = 76.0^\circ$, como se muestra en la figura P22.57. a) Determine el índice de refracción del plástico. b) Si el rayo de luz entra al plástico en un punto $L = 50.0$ cm del borde inferior, ¿cuánto tarda el rayo de luz en viajar a través del plástico?

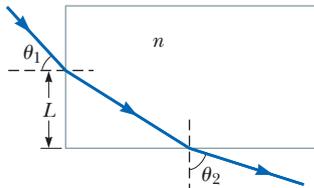


Figura P22.57

58. Unos estudiantes permiten que un estrecho haz de luz láser golpee una superficie de agua. Se organizan para medir el ángulo de refracción para ángulos de incidencia seleccionados y registran los datos que se muestran en la siguiente tabla:

Ángulo de incidencia (grados)	Ángulo de refracción (grados)
10.0	7.5
20.0	15.1
30.0	22.3
40.0	28.7
50.0	35.2
60.0	40.3
70.0	45.3
80.0	47.7

Use los datos para verificar la ley de refracción de Snell al graficar el seno del ángulo de incidencia frente al seno del ángulo de refracción. A partir de la gráfica resultante, deduzca el índice de refracción del agua.

59. La figura P22.59 muestra la trayectoria de un haz de luz a través de varias capas con diferentes índices de refracción. a) Si $\theta_1 = 30.0^\circ$, ¿cuál es el ángulo θ_2 del haz saliente? b) ¿Cuál debe ser el ángulo incidente θ_1 para tener reflexión interna total en la superficie entre el medio con $n = 1.20$ y el medio con $n = 1.00$?

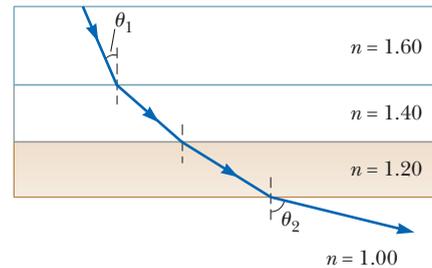


Figura P22.59

60. Tres hojas de plástico tienen índices de refracción desconocidos. La hoja 1 se coloca sobre la hoja 2 y un haz láser se dirige hacia las hojas desde arriba, de modo que golpea la interfaz a un ángulo de 26.5° con la normal. El haz refractado en la hoja 2 forma un ángulo de 31.7° con la normal. El experimento se repite con la hoja 3 sobre la hoja 2 y, con el mismo ángulo de incidencia, el haz refractado forma un ángulo de 36.7° con la normal. Si el experimento se repite de nuevo con la hoja 1 sobre la hoja 3, ¿cuál es el ángulo de refracción esperado en la hoja 3? Suponga el mismo ángulo de incidencia.

61. Un pedazo grueso de lucita ($n = 1.50$) tiene la forma de un cuarto de círculo de radio $R = 12.0$ cm como se muestra en la vista lateral de la figura P22.61. Un rayo de luz viaja en el aire paralelo a la base de la lucita, es incidente a una distancia $h = 6.00$ cm por encima de la base y emerge de la lucita en un ángulo θ con la horizontal. Determinar el valor de θ .

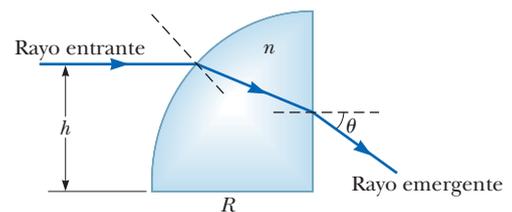


Figura P22.61

Los espejos deformantes distorsionan las imágenes, porque las superficies curvas esencialmente cambian el ángulo de incidencia de los rayos entrantes, un cambio que varía en función de la forma del espejo en un lugar determinado. En todos los casos, sin embargo, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.



Gail Mooney/Masterfile Corporation

23

Espejos y lentes

- 23.1 Espejos planos
- 23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos
- 23.3 Espejos convexos y convenciones de signo
- 23.4 Imágenes formadas por refracción
- 23.5 Refracción atmosférica
- 23.6 Lentes delgadas
- 23.7 Aberraciones de lentes y espejos

El desarrollo de la tecnología de espejos y lentes condujo a una revolución en el progreso de la ciencia. Estos dispositivos, relativamente simples de construir a partir de materiales baratos, llevaron a microscopios y telescopios, lo que extendió la visión humana y abrió nuevas rutas al conocimiento, desde microbios hasta planetas distantes.

Este capítulo cubre la formación de imágenes cuando ondas de luz planas y esféricas caen sobre superficies planas y esféricas. Las imágenes se pueden formar mediante reflexiones desde los espejos o por refracción a través de lentes. En nuestro estudio de los espejos y lentes, todavía supondremos que la luz viaja en líneas rectas (la aproximación de rayos) ignorando la difracción.

23.1 Espejos planos

Comenzaremos por examinar el espejo plano. Considere una fuente puntual de luz colocada en O en la figura 23.1, a una distancia p enfrente de un espejo plano. La distancia p se llama **distancia del objeto**. Los rayos de luz dejan la fuente y se reflejan del espejo. Después de la reflexión, los rayos divergen (se dispersan), pero para el observador parecen provenir desde un punto I detrás del espejo. El punto I se llama **imagen** del objeto en O . Sin importar el sistema bajo estudio, **las imágenes se forman en el punto donde los rayos de luz realmente se intersecan o donde parecerían originarse**. Puesto que los rayos en la figura parecen originarse en I , que está a una distancia q detrás del espejo, esta es la ubicación de la imagen. La distancia q se llama **distancia de la imagen**.

Las imágenes se clasifican como reales o virtuales. En la formación de una *imagen real* la luz en realidad pasa a través del punto de imagen. Para una *imagen virtual*, la luz no pasa a través del punto de la imagen, sino que parece provenir (divergir) desde ahí. La imagen

que se forma por la imagen plana en la figura 23.1 es una imagen virtual. De hecho, las imágenes que se ven en un espejo plano siempre son virtuales (para objetos reales). Las imágenes reales se pueden desplegar sobre una pantalla (como en una película), pero las imágenes virtuales no pueden hacerlo.

Ahora examinaremos algunas de las propiedades de las imágenes formadas por los espejos planos con el uso de simples técnicas geométricas. Para descubrir dónde se forma una imagen, es necesario seguir al menos dos rayos de luz conforme se reflejan del espejo, como en la figura activa 23.2. Uno de estos rayos parte de P , sigue la trayectoria horizontal PQ hasta el espejo y se refleja de vuelta sobre sí mismo. El segundo rayo sigue la trayectoria oblicua PR y se refleja como se muestra. Un observador a la izquierda del espejo trazaría los dos rayos reflejados de vuelta al punto desde el cual parecen originarse: el punto P' . Una continuación de este proceso para puntos distintos de P sobre el objeto resultaría en una imagen virtual (que se dibuja como una flecha amarilla) a la derecha del espejo. Puesto que los triángulos PQR y $P'QR$ son idénticos, $PQ = P'Q$. Por lo tanto, concluimos que **la imagen formada por un objeto colocado frente a un espejo plano está tan atrás del espejo como el objeto que está frente al espejo**. La geometría también muestra que la altura del objeto h es igual a la altura de la imagen h' . La **amplificación lateral M** se define como

$$M \equiv \frac{\text{altura de la imagen}}{\text{altura del objeto}} = \frac{h'}{h} \quad [23.1]$$

La ecuación 23.1 es una definición general de la amplificación lateral de cualquier tipo de espejo. Para un espejo plano, $M = 1$ porque $h' = h$.

En resumen, la imagen formada por un espejo plano tiene las siguientes propiedades:

1. La imagen está tan atrás del espejo como el objeto que está al frente.
2. La imagen no tiene aumento, es virtual y derecha. (Por *derecha* se entiende que, si la flecha del objeto apunta hacia arriba, como en la figura activa 23.2, la flecha de la imagen está igual. Lo opuesto de una imagen derecha es una imagen invertida.)

Finalmente, observe que un espejo plano produce una imagen que tiene una inversión *aparente* izquierda-derecha. Puede ver esta inversión si se para frente a un espejo y eleva la mano derecha. La imagen en el espejo eleva la mano izquierda. Del mismo modo, su cabello parece partirse en el lado opuesto y un lunar en su mejilla derecha parece estar en la mejilla izquierda de la imagen.

Examen rápido

23.1 En la vista superior de la figura 23.3, la imagen de la piedra vista por el observador 1 está en C . ¿Dónde ve la imagen el observador 2: en A , en B , en C , en D , en E o en ninguno?

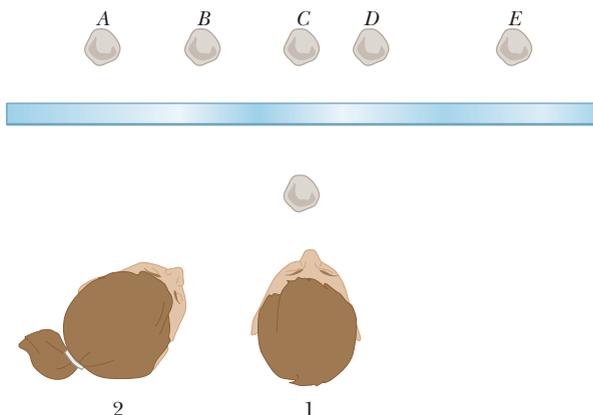


Figura 23.3 (Examen rápido 23.1)

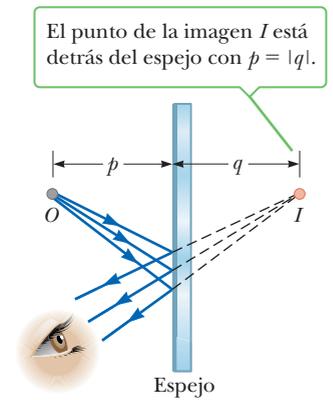


Figura 23.1 Imagen formada por reflexión desde un espejo plano. La imagen en el punto I es virtual. En la sección 23.3, se verá que q debe ser tomada como negativa para las imágenes virtuales: la distancia del objeto p , por lo tanto, es igual al valor absoluto de la distancia de la imagen q .

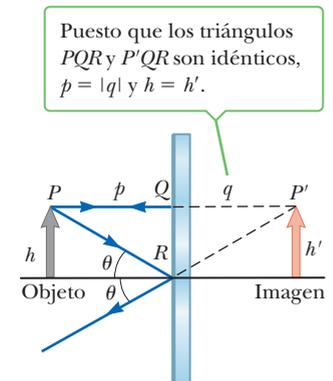


Figura activa 23.2 Construcción geométrica para localizar la imagen de un objeto colocado frente a un espejo plano.

Tip 23.1 Amplificación \neq ampliación

Observe que la palabra *amplificación* como se usa en óptica, no siempre significa *ampliación* porque la imagen podría ser menor que el objeto.

EJEMPLO 23.1 "Espejito, espejito en la pared"

OBJETIVO Aplicar las propiedades de un espejo plano.

PROBLEMA Un hombre de 1.80 m de alto se para frente a un espejo y ve todo su cuerpo, ni más ni menos. Si sus ojos están a 0.14 m de la parte superior de su cabeza, ¿cuál es la altura mínima del espejo?

ESTRATEGIA La figura 23.4 muestra dos rayos de luz, uno desde los pies del hombre y el otro desde la parte superior de su cabeza, que se reflejan del espejo y entran a su ojo. El rayo desde sus pies golpea justo la parte inferior del espejo, de modo que si el espejo fuese más largo, sería demasiado largo y si fuese más corto, el rayo no se reflejaría. El ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión son iguales, marcados como θ . Esto significa que los dos triángulos, ABD y CBD , son idénticos porque son triángulos rectángulos con un lado común (DB) y dos ángulos idénticos θ . Use este hecho clave y el pequeño triángulo isósceles FEC para resolver el problema.

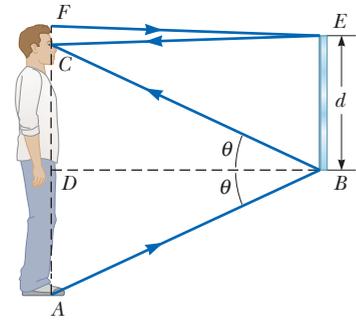


Figura 23.4 (Ejemplo 23.1)

SOLUCIÓN

Necesita encontrar BE , que es igual a d . Relacione esta longitud con las longitudes en el cuerpo del hombre:

$$(1) \quad BE = DC + \frac{1}{2}CF$$

Necesita las longitudes DC y CF . Iguale la suma de los lados opuestos a los ángulos idénticos θ , con AC :

$$(2) \quad AD + DC = AC = (1.80 - 0.14) = 1.66 \text{ m}$$

$AD = DC$, así que sustituya en la ecuación (2) y resuelva para DC :

$$AD + DC = 2DC = 1.66 \text{ m} \rightarrow DC = 0.83 \text{ m}$$

CF está dado como 0.14 m. Sustituya este valor y DC en la ecuación (1):

$$BE = d = DC + \frac{1}{2}CF = 0.83 \text{ m} + \frac{1}{2}(0.14 \text{ m}) = 0.90 \text{ m}$$

COMENTARIOS El espejo debe ser exactamente igual a la mitad de la altura del hombre para que él sólo vea su altura completa y nada más o menos. Observe que la respuesta no depende de su distancia desde el espejo.

PREGUNTA 23.1 ¿Un hombre más alto podría ver su altura completa en el mismo espejo?

EJERCICIO 23.1 ¿Cuán grande debe ser el espejo si quiere ver solamente el tercio superior de su cuerpo?

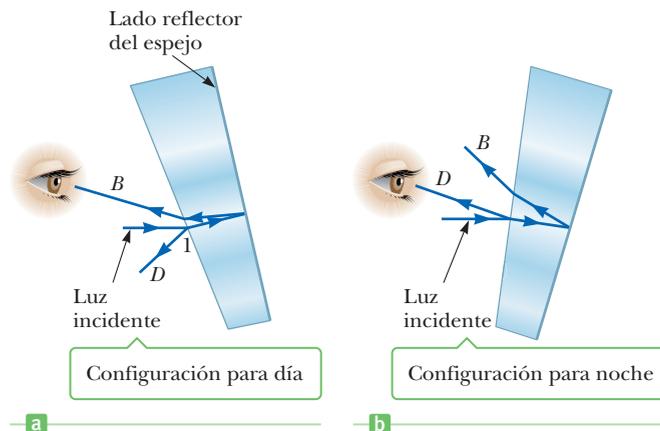
RESPUESTA 0.30 m

APLICACIÓN

Configuraciones de día y de noche para espejos retrovisores

La mayoría de los espejos retrovisores en los automóviles tienen una configuración para día y otra para noche. La configuración para noche disminuye enormemente la intensidad de la imagen de modo que las luces de los automóviles que vienen detrás no cieguen al conductor. Para entender cómo funciona tal espejo, considere la figura 23.5. El espejo es una cuña de vidrio con un recubrimiento metálico reflector en el lado posterior. Cuando el espejo está en la configuración de día, como en la figura 23.5a, la luz proveniente de un objeto detrás del auto golpea el espejo en el punto 1. La mayor parte de la

Figura 23.5 Vistas transversales de un espejo retrovisor. a) Con la configuración para día, la superficie plateada posterior del espejo refleja un rayo brillante B en los ojos del conductor. b) Con la configuración para noche, el vidrio de la superficie frontal no plateada del espejo refleja un rayo más apagado D en los ojos del conductor.



luz entra a la cuña, se refracta y refleja de la parte posterior del espejo para regresar a la superficie frontal, donde se refracta de nuevo conforme vuelve a entrar al aire como rayo B (por *brillante*). Además, una pequeña porción de la luz se refleja en la superficie frontal, como se indica mediante el rayo D (por *débil*). Esta luz débil reflejada es responsable de la imagen que se observa cuando el espejo está en la configuración para noche, como en la figura 23.5b. Ahora la cuña gira de modo que la trayectoria que sigue la luz brillante (rayo B) no se dirige al ojo. En vez de ello, la luz débil que se refleja de la superficie frontal viaja hacia el ojo y el brillo de los faros que vienen detrás no se vuelve peligrosa.

■ FÍSICA APLICADA 23.1 Truco de ilusionista

El profesor en la caja que se muestra en la figura 23.6 parece equilibrarse sobre sus dedos con ambos pies elevados del suelo. Él puede mantener esta posición durante mucho tiempo y parece desafiar la gravedad. ¿Cómo supone que se crea esta ilusión?

EXPLICACIÓN Este truco es un ejemplo de ilusión óptica, utilizada por los magos, y que usa un espejo. La caja sobre la que se para el profesor es un marco cúbico abierto que contiene un espejo vertical plano a través de un plano diagonal. El profesor se coloca dentro de la caja de modo que una pierna está frente al espejo y la otra pierna detrás de él, fuera de la vista. Cuando eleva la pierna frontal, el reflejo de dicha pierna se eleva también, lo que hace parecer que los dos pies están por encima del suelo, lo que crea la ilusión de que flota en el aire. De hecho, él se sostiene con la pierna detrás del espejo, que permanece en contacto con el suelo. ■

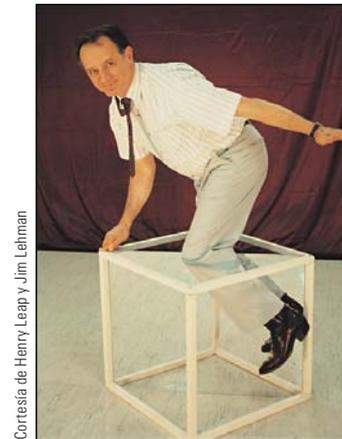


Figura 23.6 (Física aplicada 23.1)

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

Un **espejo esférico**, como su nombre implica, tiene la forma de un segmento de esfera. La figura 23.7 muestra un espejo esférico con una superficie cóncava interior plateada; este tipo de espejo se llama **espejo cóncavo**. El espejo tiene radio de curvatura R y su centro de curvatura está en el punto C . El punto V es el centro del segmento esférico y una línea que se dibuja de C a V se llama **eje principal** del espejo.

Ahora considere una fuente puntual de luz colocada en el punto O en la figura 23.7b, sobre el eje principal y fuera del punto C . Se muestran muchos rayos divergentes que se originan en O . Después de reflejarse del espejo, estos rayos convergen para reunirse en I , que se llama **punto de imagen**. Luego los rayos continúan y divergen de I como si ahí hubiera un objeto. Como resultado, se forma una imagen real. **Siempre que la luz reflejada pase a través de un punto, la imagen que se forma ahí es real.**

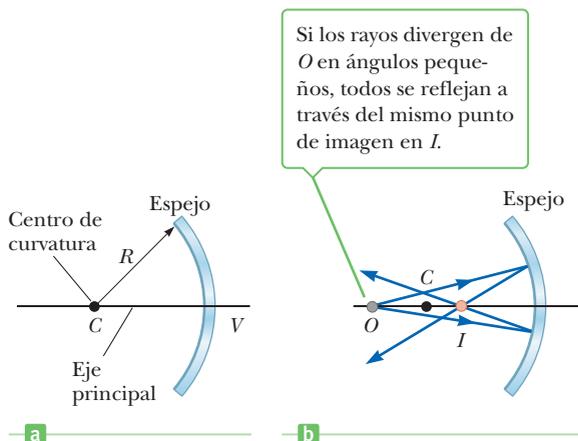


Figura 23.7 a) Espejo cóncavo de radio R . El centro de curvatura, C , se ubica sobre el eje principal. b) Un objeto puntual colocado en O frente a un espejo esférico cóncavo de radio R , donde O es cualquier punto sobre el eje principal cuya distancia al espejo es mayor que R desde la superficie del espejo, forma una imagen real en I .

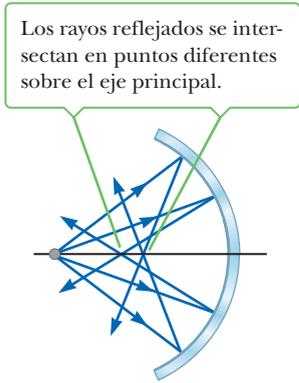


Figura 23.8 Un espejo esférico cóncavo inhibe la aberración esférica cuando los rayos de luz forman grandes ángulos con el eje principal.

Con frecuencia suponemos que todos los rayos que divergen del objeto forman ángulos pequeños con el eje principal. Tales rayos se reflejan a través del punto de imagen, como en la figura 23.7b. Los rayos que forman un ángulo grande con el eje principal, como en la figura 23.8, convergen en otros puntos sobre el eje principal, lo que produce una imagen borrosa. Este efecto, llamado **aberración esférica**, se presenta en cierta medida con cualquier espejo esférico y lo analizaremos en la sección 23.7.

Puede usar la geometría que se muestra en la figura 23.9 para calcular la distancia de la imagen q a partir de la distancia del objeto p y el radio de curvatura R . Por convención, estas distancias se miden desde el punto V . La figura muestra dos rayos de luz que salen de la punta del objeto. Un rayo pasa a través del centro de curvatura, C , del espejo y golpea el objeto de manera frontal (perpendicular a la superficie del espejo) y se refleja de vuelta sobre él mismo. El segundo rayo golpea el espejo en el punto V y se refleja como se muestra y obedece la ley de reflexión. La imagen de la punta de la flecha está en el punto donde los dos rayos se intersectan. A partir del triángulo más grande en la figura 23.9, vemos que $\tan \theta = h/p$; el triángulo amarillo proporciona $\tan \theta = -h'/q$. El signo negativo se introdujo para satisfacer la convención de que h' es negativa cuando la imagen está invertida con respecto al objeto, como lo está aquí. A partir de la ecuación 23.1 y estos resultados, encontramos que la amplificación del espejo es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.2]$$

A partir de otros dos triángulos en la figura, obtenemos

$$\tan \alpha = \frac{h}{p - R} \quad \text{y} \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{R - q}$$

de los cuales encontramos que

$$\frac{h'}{h} = -\frac{R - q}{p - R} \quad [23.3]$$

Si comparamos la ecuación 23.2 con la ecuación 23.3, vemos que

$$\frac{R - q}{p - R} = \frac{q}{p}$$

El álgebra simple reduce esta ecuación a

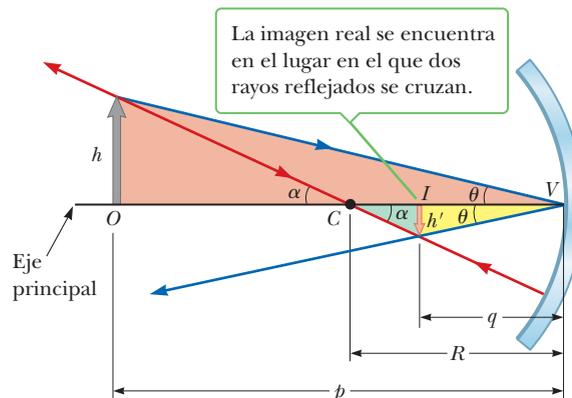
Ecuación del espejo ►

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad [23.4]$$

Esta ecuación se llama **ecuación del espejo**.

Si el objeto está muy lejos del espejo, si la distancia del objeto p es lo suficientemente grande en comparación con R , que se puede decir que p tiende al infinito, entonces $1/p \approx 0$ y a partir de la ecuación 23.4 vemos que $q \approx R/2$. En otras palabras, cuando el objeto está

Figura 23.9 La imagen formada por un espejo esférico cóncavo, donde el objeto en O yace afuera del centro de curvatura, C .



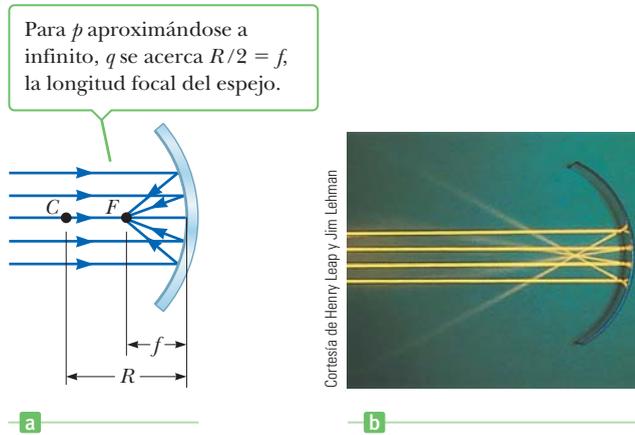


Figura 23.10 a) Rayos de luz provenientes de un objeto distante ($p \rightarrow \infty$) se reflejan de un espejo cóncavo a través del punto focal F . b) Fotografía de la reflexión de rayos paralelos de un espejo cóncavo.

muy lejos del espejo, **el punto de imagen está a la mitad entre el centro de curvatura y el centro del espejo**, como en la figura 23.10a. Los rayos entrantes en esencia son paralelos en dicha figura porque la fuente se supuso muy lejana del espejo. En este caso especial, al punto de imagen se le llama **punto focal F** y la distancia de la imagen **longitud focal f** , donde

$$f = \frac{R}{2} \quad [23.5] \quad \leftarrow \text{Longitud focal}$$

Por lo tanto, la ecuación del espejo se puede expresar en términos de la longitud focal:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.6]$$

Observe que los rayos de los objetos en el infinito siempre están enfocados en el punto focal.

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

La figura 23.11 muestra la formación de una imagen mediante un **espejo convexo**, que está plateado de modo que la luz se refleja desde la superficie exterior convexa. En ocasiones se llama **espejo divergente** porque los rayos provenientes de cualquier punto sobre el objeto divergen después de una reflexión, como si se considerara que provienen desde algún punto detrás del espejo. La imagen en la figura 23.11 es virtual en vez de real porque yace detrás del espejo en el punto donde parecerían originarse los rayos reflejados. En general, la imagen formada por un espejo convexo es derecha, virtual y menor que el objeto.

En el texto no se deducirán ecuaciones para espejos esféricos convexos. Si se hiciera, encontraríamos que las ecuaciones desarrolladas para espejos cóncavos se pueden usar

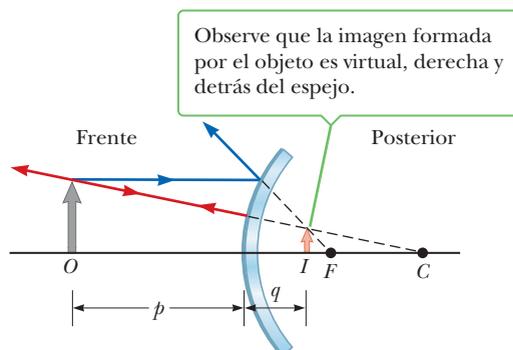


Figura 23.11 Formación de una imagen mediante un espejo esférico convexo.

Tip 23.2 Punto focal \neq punto de enfoque

El punto focal *no* es el punto en el que los rayos de luz se enfocan para formar una imagen. El punto focal de un espejo se determina únicamente por su curvatura, que no depende de la ubicación de cualquier objeto.

Tabla 23.1 Convenciones de signo para espejos

Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Imagen derecha	Imagen invertida
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	+	-		
Longitud focal	f	+	-		
Altura de imagen	h'			+	-
Amplificación	M			+	-

Tip 23.3 Positivo es donde está la luz

Las cantidades p , q y f son positivas cuando se encuentran del lado en donde la luz está frente al espejo, como se indica en la figura 23.12.

con espejos convexos si se aplican convenciones de signo particulares. A la región donde se mueven los rayos de luz se le llama *lado frontal* del espejo y al otro lado, donde se forman las imágenes virtuales, *lado posterior*. Por ejemplo, en las figuras 23.9 y 23.11, el lado a la izquierda del espejo es el lado frontal y el lado a la derecha es el lado posterior. La figura 23.12 es útil para comprender las reglas para distancias de objeto y de imagen, y la tabla 23.1 resume las convenciones de signo para todas las cantidades necesarias. Observe que, cuando las cantidades p , q y f (y R) se ubican donde está la luz, frente al espejo, son positivas, mientras que cuando se ubican detrás del espejo (donde no está la luz), son negativas.

Diagramas de rayos para espejos

Las posiciones y tamaños de las imágenes formadas por espejos se pueden determinar convenientemente al construir *diagramas de rayos* similares a los que usted ha utilizado. Este tipo de construcción gráfica expresa la naturaleza global de la imagen y se puede usar para comprobar parámetros calculados a partir del espejo y las ecuaciones de amplificación. La elaboración de un diagrama de rayos requiere conocer la posición del objeto y la ubicación del centro de curvatura. Para ubicar la imagen, se construyen tres rayos, en lugar de sólo los dos que se construyeron hasta el momento, como se muestra mediante los ejemplos en la figura activa 23.13. Los tres rayos parten del mismo punto del objeto; para estos ejemplos, se eligió la punta de la flecha. Para los espejos cóncavos en las figuras activas 23.13a y b, los rayos se dibujan del modo siguiente:

1. El rayo 1 se dibuja paralelo al eje principal y se refleja de vuelta a través del punto focal F .
2. El rayo 2 se dibuja a través del punto focal y se refleja paralelo al eje principal.
3. El rayo 3 se dibuja a través del centro de curvatura, C , y se refleja de vuelta sobre sí mismo.

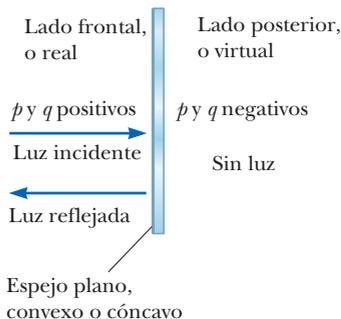
Observe que los rayos en realidad van en todas direcciones desde el objeto; elegimos seguir los que se mueven en una dirección que simplifica el dibujo.

La intersección de cualesquiera *dos* de estos rayos en un punto ubica la imagen. El tercer rayo sirve como comprobación de la construcción. El punto de imagen que se obtiene de esta forma siempre debe concordar con el valor de q calculado a partir de la fórmula del espejo.

En el caso de un espejo cóncavo, observe lo que ocurre conforme el objeto se acerca más al espejo. La imagen real invertida en la figura 23.13a se mueve hacia la izquierda conforme el objeto se aproxima al punto focal. Cuando el objeto está en el punto focal, la imagen está infinitamente lejos a la izquierda. Sin embargo, cuando el objeto yace entre el punto focal y la superficie del espejo, como en la figura 23.13b, la imagen es virtual y derecha.

Con el espejo convexo que se muestra en la figura activa 23.13c, la imagen de un objeto real siempre es virtual y derecha. Conforme aumenta la distancia del objeto, la imagen virtual se encoge y tiende al punto focal conforme p tiende a infinito. Construya un diagrama de rayos para verificar estos enunciados.

Las características de formación de la imagen de los espejos curvos obviamente determinan sus usos. Por ejemplo, suponga que quiere diseñar un espejo que ayudará a las

**Figura 23.12** Diagrama que describe los signos de p y q para espejos convexo y cóncavo.

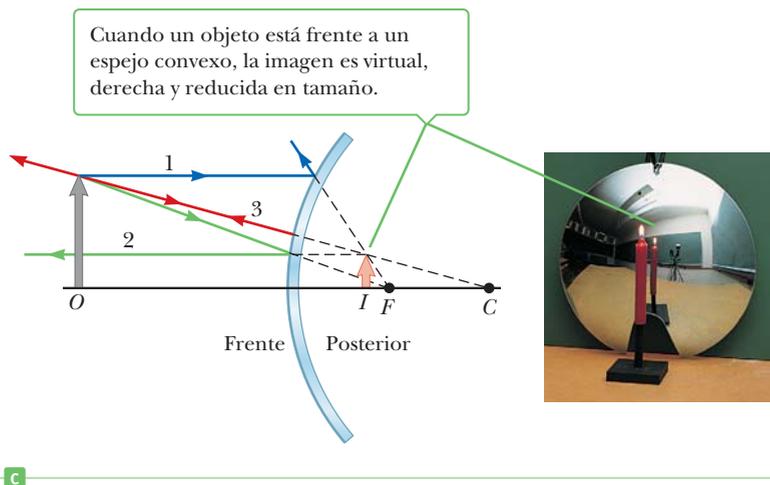
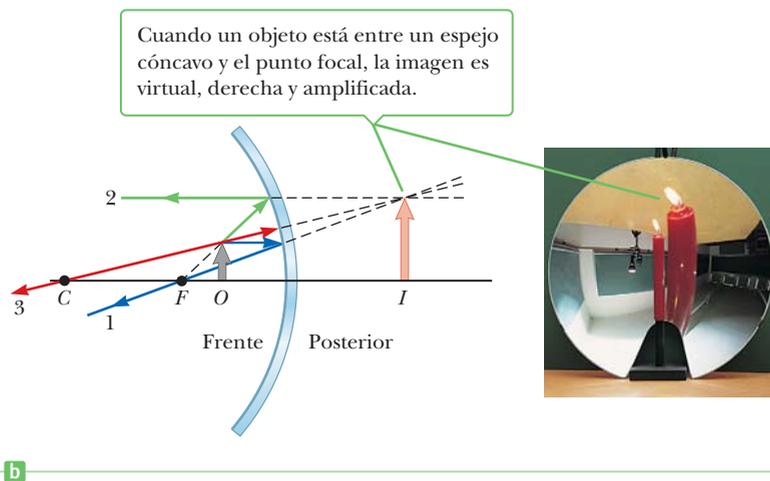
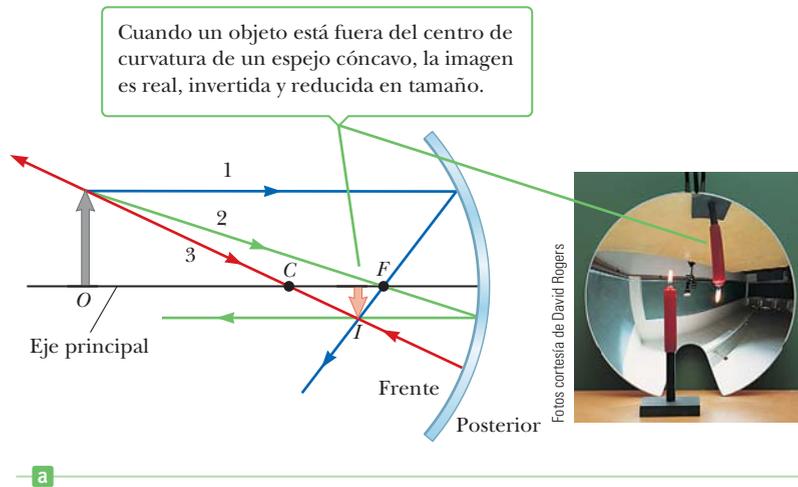


Figura activa 23.13 Diagramas de rayos para espejos esféricos y fotografías correspondientes de las imágenes de las velas.

personas a rasurarse o aplicarse cosméticos. Para esto, necesita un espejo cóncavo que pone al usuario dentro del punto focal, como el espejo en la figura activa 23.13b. Con dicho espejo, la imagen es derecha y enormemente agrandada. En contraste, suponga que el propósito principal de un espejo es observar un gran campo de visión. En ese caso necesita un espejo convexo, como el de la figura activa 23.13c. El tamaño reducido de la imagen significa que en el espejo se percibe un campo visual bastante grande. Los espejos como éste con frecuencia se colocan en las tiendas para ayudar a los empleados a descubrir a los ladrones. Un segundo uso de tales espejos es un espejo lateral en un auto (figura

Figura 23.14 Un espejo lateral convexo en un vehículo produce una imagen derecha que es menor que el objeto. La imagen más pequeña significa que el objeto está más cerca que su distancia aparente como se observa en el espejo.



© Junebug Clark 1988/Photo Researchers, Inc.

23.14). Este tipo de espejo por lo general se coloca en el lado del pasajero del auto y lleva la advertencia “Los objetos están más cerca de lo que parecen”. Sin tal advertencia, una conductora puede pensar que mira un espejo plano, que no altera el tamaño de la imagen. Se podría engañar al creer que un camión está lejos porque parece pequeño, cuando en realidad es uno grande muy cerca detrás de ella, pero reducido en tamaño debido a las características de formación de imagen del espejo convexo.

■ FÍSICA APLICADA 23.2 Cóncavo frente a convexo

Una imagen virtual puede estar en cualquier parte detrás de un espejo cóncavo. ¿Por qué hay una distancia máxima a la cual la imagen puede existir detrás de un espejo *convexo*?

EXPLICACIÓN Considere primero el espejo cóncavo e imagine dos rayos de luz diferentes que salen de un pequeño objeto y golpean el espejo. Si el objeto está en el punto focal, los rayos de luz que se reflejan del espejo serán paralelos al eje del espejo. Se pueden interpretar como que forman una imagen virtual infinitamente alejada detrás del espejo. Conforme el objeto se acerca más al espejo, los rayos reflejados divergirán a través de ángulos cada vez más grandes, lo que resultará en que sus extensiones converjan cada vez más

cerca en la parte posterior del espejo. Cuando el objeto se lleve recto al espejo, la imagen está justo detrás del espejo. Cuando el objeto está mucho más cerca del espejo que la longitud focal, los espejos actúan como un espejo plano y la imagen está justo tan lejos detrás del espejo, como el objeto está enfrente de él. Por lo tanto, la imagen puede estar en cualquier parte, desde infinitamente lejos hasta justo en la superficie del espejo. Para el espejo convexo, un objeto en el infinito produce una imagen virtual en el punto focal. Conforme el objeto se acerca más, los rayos reflejados divergen de manera más clara y la imagen se acerca más al espejo. Como resultado, la imagen virtual se restringe a la región entre el espejo y el punto focal. ■

■ FÍSICA APLICADA 23.3 Ondas reversibles

Los grandes camiones con frecuencia tienen un letrero en la parte posterior que dice “Si usted no puede ver mi espejo, yo no puedo verlo a usted”. Explique esto.

EXPLICACIÓN Las compañías camioneras utilizan el principio de reversibilidad de los rayos de luz. Para que en el

espejo del conductor se forme una imagen de usted, debe haber una ruta para que los rayos de luz lleguen al espejo, lo que permite al conductor ver su imagen. Si usted no puede ver el espejo, esta ruta no existe. ■

■ EJEMPLO 23.2 Imágenes formadas por un espejo cóncavo

OBJETIVO Calcular propiedades de un espejo cóncavo.

PROBLEMA Suponga que cierto espejo esférico cóncavo tiene una longitud focal de 10.0 cm. **a)** Ubique la imagen y encuentre la amplificación para una distancia de objeto de 25.0 cm. Determine si la imagen es real o virtual, invertida o derecha, más grande o más pequeña. Realice lo mismo para distancias de objeto de **b)** 10.0 cm y **c)** 5.00 cm.

ESTRATEGIA Para cada inciso, sustituya en las ecuaciones de espejo y amplificación. El inciso b) involucra un proceso límite porque las respuestas tienden al infinito.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la posición de la imagen para una distancia de objeto de 25.0 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

Use la ecuación del espejo para encontrar la distancia de la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Sustituya y resuelva para q . De acuerdo con la tabla 23.1, p y f son positivos.

$$\frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$q = 16.7 \text{ cm}$$

Puesto que q es positiva, la imagen está enfrente del espejo y es real. La amplificación se encuentra al sustituir en la ecuación 23.2:

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{16.7 \text{ cm}}{25.0 \text{ cm}} = -0.668$$

La imagen es menor que el objeto porque $|M| < 1$, y es invertida porque M es negativa. (Véase la figura 23.13a.)

b) Ubique la distancia de la imagen cuando la distancia del objeto es 10.0 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

El objeto está en el punto focal. Sustituya $p = 10.0 \text{ cm}$ y $f = 10.0 \text{ cm}$ en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{q} = 0 \rightarrow q \rightarrow \infty$$

Puesto que $M = -q/p$, la amplificación tiende al infinito.

c) Ubique la distancia de la imagen cuando la distancia del objeto es 5.00 cm. Calcule la amplificación y describa la imagen.

Una vez más, sustituya en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{5.00 \text{ cm}} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$q = -10.0 \text{ cm}$$

La imagen es virtual (detrás del espejo) porque q es negativa. Use la ecuación 23.2 para calcular la amplificación:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-10.0 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = 2.00$$

La imagen es más grande (aumentada por un factor de 2) porque $|M| > 1$, y derecha porque M es positiva. (Véase la figura 23.13b.)

COMENTARIOS Observe las características de una imagen formada por un espejo esférico cóncavo. Cuando el objeto está fuera del punto focal, la imagen es invertida y real; en el punto focal, la imagen se forma en el infinito; dentro del punto focal, la imagen es derecha y virtual.

PREGUNTA 23.2 ¿A qué ubicación se aproxima la imagen conforme el objeto se aleja arbitrariamente del espejo? a) infinito b) el punto focal c) el radio de curvatura del espejo d) el mismo espejo

EJERCICIO 23.2 Si la distancia del objeto es 20.0 cm, encuentre la distancia de la imagen y la amplificación del espejo.

RESPUESTA $q = 20.0 \text{ cm}$, $M = -1.00$

EJEMPLO 23.3 Imágenes formadas por un espejo convexo**OBJETIVO** Calcular propiedades de un espejo convexo.**PROBLEMA** Un objeto de 3.00 cm de alto se coloca a 20.0 cm de un espejo convexo con una longitud focal de 8.00 cm de magnitud. Encuentre **a)** la posición de la imagen, **b)** la amplificación del espejo y **c)** la altura de la imagen.**ESTRATEGIA** Este problema de nuevo sólo requiere sustitución en las ecuaciones del espejo y de amplificación. Multiplicar la altura del objeto por la amplificación produce la altura de la imagen.**SOLUCIÓN****a)** Encuentre la posición de la imagen.

Puesto que el espejo es convexo, su longitud focal es negativa. Sustituya en la ecuación del espejo:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{-8.00 \text{ cm}}$$

Resuelva para q :

$$q = -5.71 \text{ cm}$$

b) Encuentre la amplificación del espejo.

Sustituya en la ecuación 23.2:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-5.71 \text{ cm}}{20.0 \text{ cm}}\right) = 0.286$$

c) Encuentre la altura de la imagen:

Multiplique la altura del objeto por la amplificación:

$$h' = hM = (3.00 \text{ cm})(0.286) = 0.858 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El valor negativo de q indica que la imagen es virtual, o que está detrás del espejo, como en la figura 23.13c. La imagen es derecha porque M es positiva.**PREGUNTA 23.3** Verdadero o Falso: Un espejo convexo puede producir sólo imágenes virtuales.**EJERCICIO 23.3** Suponga que el objeto se mueve de modo que está a 4.00 cm del mismo espejo. Repita los incisos a) al c).**RESPUESTAS** a) -2.67 cm b) 0.668 c) 2.00 cm; la imagen es derecha y virtual.**EJEMPLO 23.4** La cara en el espejo**OBJETIVO** Encontrar una longitud focal a partir de una amplificación y una distancia de objeto.**PROBLEMA** Cuando una mujer se para con el rostro a 40.0 cm de un espejo cosmético, la imagen derecha es el doble de larga que su rostro. ¿Cuál es la longitud focal del espejo?**ESTRATEGIA** Para encontrar f en este ejemplo, primero debemos encontrar q , la distancia de la imagen. Puesto que el problema afirma que la imagen es derecha, la amplificación debe ser positiva (en este caso, $M = +2$) y dado que $M = -q/p$, se puede determinar q .**SOLUCIÓN**Obtenga q a partir de la ecuación de amplificación:

$$M = -\frac{q}{p} = 2$$

$$q = -2p = -2(40.0 \text{ cm}) = -80.0 \text{ cm}$$

Puesto que q es negativa, la imagen está en el lado opuesto del espejo y por lo tanto es virtual. Sustituya q y p en la ecuación del espejo y resuelva para f :

$$\frac{1}{40.0 \text{ cm}} - \frac{1}{80.0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

$$f = 80.0 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El signo positivo para la longitud total dice que el espejo es cóncavo, un hecho que ya se sabía porque el espejo aumentó el objeto. (Un espejo convexo produciría una imagen más pequeña.)

PREGUNTA 23.4 Si el espejo se acerca a su rostro, ¿qué ocurre con la imagen? a) Se invierte y es más pequeña. b) Permanece derecha y se vuelve más pequeña. c) Se invierte y se vuelve más grande. d) Permanece derecha y se vuelve más grande.

EJERCICIO 23.4 Suponga que un espejo esférico en un parque de diversiones hace que usted parezca un tercio de su estatura normal. Si está a 1.20 m del espejo, encuentre su longitud focal. ¿El espejo es cóncavo o convexo?

RESPUESTAS -0.600 m, convexo

23.4 Imágenes formadas por refracción

En esta sección describimos cómo se forman las imágenes por refracción en una superficie esférica. Considere dos medios transparentes con índices de refracción n_1 y n_2 , donde la frontera entre los dos es una superficie esférica de radio R (figura 23.15). Suponga que el medio a la derecha tiene un mayor índice de refracción que el de la izquierda: $n_2 > n_1$. Este sería el caso para luz que entra a un trozo curvo de vidrio desde el aire o para luz que entra al agua en una pecera desde el aire. Los rayos que se originan en la ubicación del objeto O se refractan en la superficie esférica y luego convergen al punto de imagen I . Puede comenzar con la ley de refracción de Snell y usar técnicas geométricas simples para demostrar que la distancia del objeto, la distancia de la imagen y el radio de curvatura se relacionan mediante la ecuación

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad [23.7]$$

Más aún, la amplificación de una superficie refractante es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} \quad [23.8]$$

Como con los espejos, se sostienen ciertas convenciones de signos, dependiendo de las circunstancias. Observe primero que las imágenes reales se forman mediante refracción en el lado de la superficie *opuesta* al lado desde el cual proviene la luz, en contraste con los espejos, donde las imágenes reales se forman en el *mismo* lado de la superficie reflectora. Esto tiene sentido porque la luz se refleja de los espejos, de modo que cualquier imagen real debe formarse en el mismo lado de donde viene la luz. Con un medio transparente, los rayos pasan a través y naturalmente forman imágenes reales en el lado opuesto. El lado de la superficie donde se originan los rayos de luz se define como lado frontal. El otro lado se llama lado posterior. Debido a la diferencia en posición de las imágenes reales, las convenciones de signo de refracción para q y R son las opuestas a las de la reflexión. Por ejemplo, p , q y R son todas positivas en la figura 23.15. Las convenciones de signo para superficies refractoras esféricas se resumen en la tabla 23.2.

Los rayos que forman ángulos pequeños con el eje principal divergen de un objeto puntual en O y pasan a través del punto de imagen I .

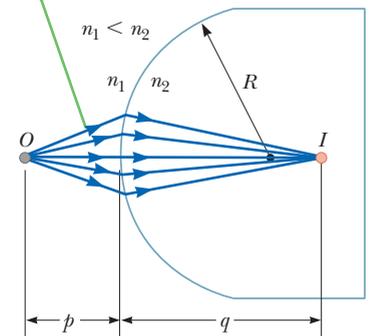


Figura 23.15 Imagen formada por refracción en una superficie esférica.

Tabla 23.2 Convenciones de signo para superficies refractoras

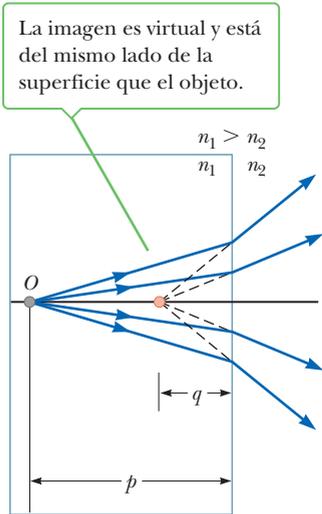
Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Imagen derecha	Imagen invertida
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	-	+		
Radio	R	-	+		
Altura de imagen	h'			+	-

FÍSICA APLICADA 23.4 **Visión submarina** BIO

¿Por qué una persona con visión normal ve una imagen borrosa si abre los ojos bajo el agua sin usar goggles o máscara de buceo?

EXPLICACIÓN El ojo presenta una superficie refractora esférica. Éste normalmente funciona de modo que la luz que entra desde el aire se refracta para formar una imagen en la retina ubicada en la parte posterior del globo ocular. La diferencia en el índice de refracción entre el agua y el ojo es

menor que la diferencia en el índice de refracción entre aire y ojo. En consecuencia, la luz que entra al ojo desde el agua no experimenta tanta refracción como la luz que entra desde el aire y la imagen se forma detrás de la retina. Una máscara de buceo o goggles para nadar no tienen acción óptica propia; simplemente son piezas planas de vidrio o plástico en una montura de caucho. Sin embargo, sí proporcionan una región de aire adyacente a los ojos, de modo que se establece la relación de refracción correcta y las imágenes estarán en foco. ■



Superficies refractantes planas

Si la superficie refractante es plana, entonces R tiende a infinito y la ecuación 23.7 se reduce a

$$\frac{n_1}{p} = - \frac{n_2}{q}$$

$$q = - \frac{n_2}{n_1} p \quad [23.9]$$

A partir de la ecuación 23.9 vemos que el signo de q es opuesto al de p . En consecuencia, **la imagen que se forma mediante una superficie refractante plana está en el mismo lado de la superficie que el objeto**. Este enunciado se ilustra en la figura activa 23.16 para la situación donde n_1 es mayor que n_2 , donde se forma una imagen virtual entre el objeto y la superficie. Observe que el rayo refractado se dobla *alejándose* de la normal en este caso, porque $n_1 > n_2$.

Figura activa 23.16 La imagen que se forma mediante una superficie refractora.

Examen rápido

23.2 Una persona que pesca con arpón desde un bote ve un pez ubicado a 3 m del bote a una profundidad aparente de 1 m. Para arponear al pez, ¿la persona debe apuntar a) hacia la imagen del pez, b) arriba de o c) abajo de la imagen del pez?

23.3 Verdadero o Falso: a) La imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo cóncavo siempre es derecha. b) La altura de la imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo cóncavo debe ser menor que o igual a la altura del objeto. c) La imagen de un objeto colocado enfrente de un espejo convexo siempre es derecha y menor que el objeto.

EJEMPLO 23.5 **Un vistazo a la bola de cristal**

OBJETIVO Calcular las propiedades de una imagen creada por una lente esférica.

PROBLEMA Una moneda de 2.00 cm de diámetro está incrustada en una bola de vidrio sólida de 30.0 cm de radio (figura 23.17). El índice de refracción de la bola es 1.50 y la moneda está a 20.0 cm de la superficie. Encuentre la posición de la imagen de la moneda y la altura de la imagen de la moneda.

ESTRATEGIA Puesto que los rayos se mueven desde un medio de alto índice de refracción (la bola de vidrio) hasta un medio de menor índice de refracción (aire), los rayos que se originan en la moneda se refractan alejándose de la normal en la superficie y divergen hacia afuera. La imagen se forma en el vidrio y es virtual. Sustituya en las ecuaciones 23.7 y 23.8 para la posición de la imagen y la amplificación, respectivamente.

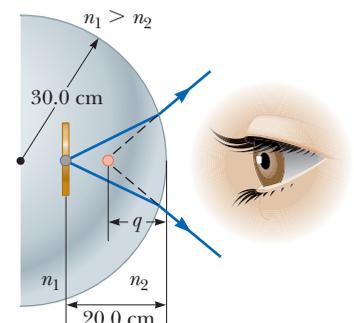


Figura 23.17 (Ejemplo 23.5) Una moneda incrustada en una bola de vidrio forma una imagen virtual entre la moneda y la superficie del vidrio.

La imagen se forma en el vidrio y es virtual. Sustituya en las ecuaciones 23.7 y 23.8 para la posición de la imagen y la amplificación, respectivamente.

SOLUCIÓN

Aplique la ecuación 23.7 y considere $n_1 = 1.50$, $n_2 = 1.00$, $p = 20.0$ cm y $R = -30.0$ cm:

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

$$\frac{1.50}{20.0 \text{ cm}} + \frac{1.00}{q} = \frac{1.00 - 1.50}{-30.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q :

$$q = -17.1 \text{ cm}$$

Para encontrar la altura de la imagen, use la ecuación 23.8 para la amplificación:

$$M = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{1.50(-17.1 \text{ cm})}{1.00(20.0 \text{ cm})} = \frac{h'}{h}$$

$$h' = 1.28h = (1.28)(2.00 \text{ cm}) = 2.56 \text{ cm}$$

COMENTARIOS El signo negativo en q indica que la imagen está en el mismo medio que el objeto (el lado de luz incidente), en concordancia con el diagrama de rayos y por lo tanto debe ser virtual. El valor positivo de M significa que la imagen es derecha.

PREGUNTA 23.5 ¿Cómo se afectaría la respuesta final si la bola y el observador estuvieran sumergidos en agua? a) Sería menor. b) Sería mayor. c) No habría cambio.

EJERCICIO 23.5 Una moneda está incrustada a 20.0 cm de la superficie de una bola similar de sustancia transparente que tiene 30.0 cm de radio y composición desconocida. Si la imagen de la moneda es virtual y se ubica a 15.0 cm de la superficie, encuentre a) el índice de refracción de la sustancia y b) la amplificación.

RESPUESTAS a) 2.00 b) 1.50

EJEMPLO 23.6 El que se escapó

OBJETIVO Calcular las propiedades de una imagen creada por una superficie refractora plana.

PROBLEMA Un pequeño pez nada a una profundidad d bajo la superficie de un estanque (figura 23.18). a) ¿Cuál es la *profundidad aparente* del pez, visto directamente desde arriba? b) Si el pez mide 12 cm de largo, ¿cuán larga es su imagen?

ESTRATEGIA En este ejemplo, la superficie refractora es plana, de modo que R tiende al infinito. Por lo tanto, se puede usar la ecuación 23.9 para determinar la ubicación de la imagen, que es la ubicación aparente del pez.

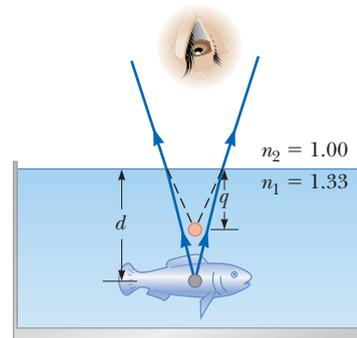


Figura 23.18 (Ejemplo 23.6) La profundidad aparente q a la que se encuentra el pez es menor que la profundidad verdadera d .

SOLUCIÓN

a) Encuentre la profundidad aparente del pez.

Sustituya $n_1 = 1.33$ para agua y $p = d$ en la ecuación 23.9:

$$q = -\frac{n_2}{n_1} p = -\frac{1}{1.33} d = -0.752d$$

b) ¿Cuál es el tamaño de la imagen del pez?

Use la ecuación 23.9 para eliminar q de la ecuación 23.8, la ecuación de amplificación:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} = -\frac{n_1 \left(-\frac{n_2}{n_1} p\right)}{n_2 p} = 1$$

$$h' = h = 12 \text{ cm}$$

COMENTARIOS De nuevo, dado que q es negativa, la imagen es virtual, como se indica en la figura 23.18. La profundidad aparente es tres cuartos la profundidad real. Por ejemplo, si $d = 4.0$ m, entonces $q = -3.0$ m.

PREGUNTA 23.6 Suponga que un experimento similar se realiza con un objeto sumergido en aceite ($n = 1.5$) a la misma distancia por abajo de la superficie. ¿Cómo se compara la profundidad aparente del objeto, con su profundidad aparente cuando se sumerge en agua? a) La profundidad aparente no cambia. b) La profundidad aparente es mayor. c) La profundidad aparente es menor.

(continúa)

EJERCICIO 23.6 Un pescador con arpón estima que una trucha está a 1.5 m por abajo de la superficie del agua. ¿Cuál es la profundidad real a la que se encuentra al pez?

RESPUESTA 2.0 m

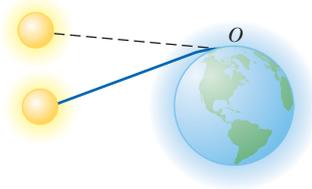
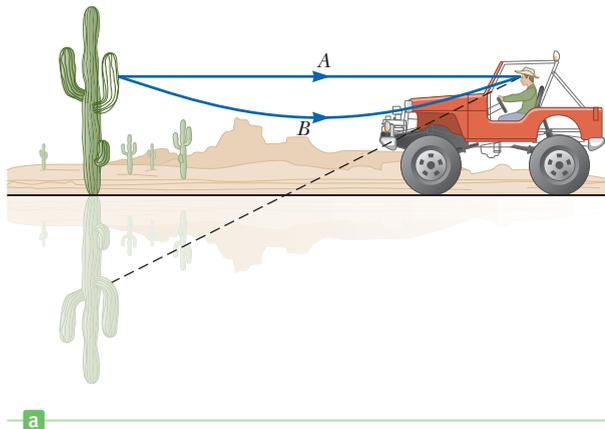


Figura 23.19 Puesto que la luz se refracta en la atmósfera de la Tierra, un observador en O ve el Sol aun cuando caiga por abajo del horizonte.

23.5 Refracción atmosférica

Las imágenes que se forman mediante refracción en la atmósfera conducen a algunos fenómenos interesantes. Uno de tales fenómenos que ocurre diariamente es la visibilidad del Sol en el crepúsculo aun cuando pase por abajo del horizonte. La figura 23.19 muestra por qué ocurre. Los rayos de luz provenientes del Sol golpean la atmósfera de la Tierra (representada mediante el área sombreada alrededor del planeta) y se doblan conforme pasan hacia un medio que tiene un índice de refracción diferente del que tiene el espacio casi vacío en el que viajan. El doblamiento en esta situación difiere un poco del doblamiento que se consideró anteriormente en el que es gradual y continuo conforme la luz se mueve a través de la atmósfera hacia un observador en el punto O . Esto es porque la luz se mueve a través de capas de aire que tienen un índice de refracción que cambia de manera continua. Cuando los rayos llegan al observador, el ojo los sigue de vuelta a lo largo de la dirección desde donde parecieron provenir (que se indica mediante la trayectoria de rayas en la figura). El resultado final es que el Sol parece estar arriba del horizonte incluso después de que cayó bajo él.

El **espejismo** es otro fenómeno de la naturaleza producido por refracción en la atmósfera. Un espejismo se puede observar cuando el suelo está tan caliente que el aire directamente arriba de él está más caliente que el aire en alturas superiores. El desierto es una región donde prevalecen tales circunstancias, pero los espejismos también se ven en las autopistas calientes durante el verano. Las capas de aire a diferentes alturas sobre la Tierra tienen diferentes densidades y diferentes índices de refracción. El efecto que pueden tener estas diferencias se muestra en la figura 23.20a. El observador ve el cielo y un árbol en dos formas distintas. Un grupo de rayos de luz llega al observador mediante la trayectoria en línea recta y el ojo traza estos rayos de vuelta para ver el árbol en la forma normal. Además, un segundo grupo de rayos viaja a lo largo de la trayectoria curva B . Estos rayos se dirigen hacia el suelo y luego se doblan como resultado de refracción. Como consecuencia, el observador también ve una imagen invertida del árbol y el fondo del cielo conforme traza los rayos de vuelta hacia el punto de donde parecen originarse.



John M. Duray IV, Fundamental Photographs, NYC

Figura 23.20 a) Un espejismo se produce por el doblamiento de los rayos de luz en la atmósfera cuando existen grandes diferencias de temperatura entre el suelo y el aire. b) Observe el reflejo de los autos en esta fotografía de un espejismo. El camino parece como si estuviera inundado, pero en realidad está seco.

Puesto que se ven una imagen derecha y una invertida cuando la imagen de un árbol se observa en un charco de agua reflejante, el observador de manera inconsciente apela a sus experiencias pasadas y concluye que el cielo se refleja en el charco de agua enfrente del árbol.

23.6 Lentes delgadas

Una **lente delgada** típica consiste en un trozo de vidrio o plástico, tallado de modo que cada una de sus dos superficies refractantes es un segmento de una esfera o un plano. Las lentes se usan comúnmente para formar imágenes mediante refracción en instrumentos ópticos como cámaras, telescopios y microscopios. La ecuación que relaciona las distancias de objeto e imagen para una lente es virtualmente idéntica a la ecuación del espejo que se dedujo con anterioridad y el método que se usó para deducirla también es similar.

La figura 23.21 muestra algunas formas de lentes representativas. Observe que estas lentes se colocaron en dos grupos. Las de la figura 23.21a son más gruesas en el centro que en el borde y las de la figura 23.21b son más delgadas en el centro que en el borde. Las lentes del primer grupo son ejemplos de **lentes convergentes** y las del segundo grupo son **lentes divergentes**. La razón para estos nombres pronto será evidente.

Como se hizo para los espejos, es conveniente definir un punto llamado **punto focal** para una lente. Por ejemplo, en la figura 23.22a, un grupo de rayos paralelos al eje pasa a través del punto focal F después de convergir por la lente. La distancia desde el punto focal hasta la lente se llama **longitud focal f** . **La longitud focal es la distancia de la imagen que corresponde a una distancia de objeto infinita.** Recuerde que se considera que las lentes son muy delgadas. Como resultado, no hay diferencia si se considera que la longitud focal es la distancia desde el punto focal a la superficie de la lente o la distancia desde el punto focal al centro de la lente, porque la diferencia entre estas dos longitudes es despreciable. Una lente delgada tiene *dos* puntos focales, como se ilustra en la figura 23.22, uno en cada lado de la lente. Un punto focal corresponde a los rayos paralelos que viajan desde la izquierda y el otro corresponde a rayos paralelos que viajan desde la derecha.

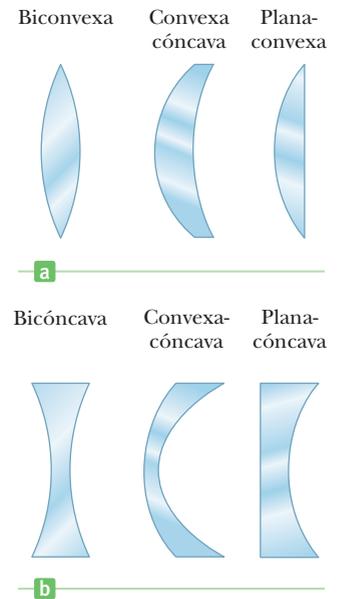


Figura 23.21 Varias formas de lentes. a) Las lentes convergentes tienen longitudes focales positivas y son más gruesas en medio. b) Las lentes divergentes tienen longitudes focales negativas y son más gruesas en los bordes.

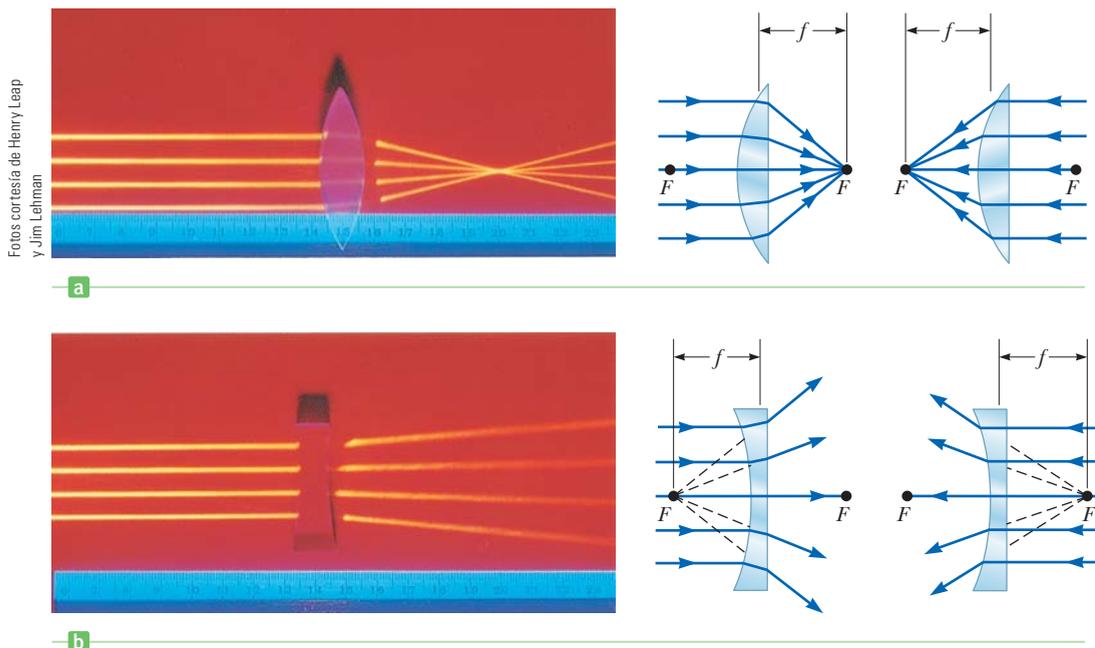
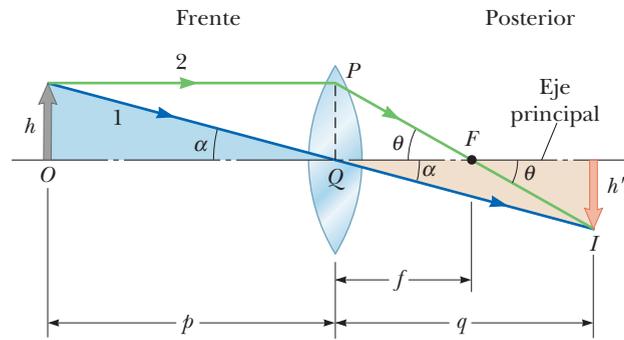


Figura 23.22 (Izquierda) Fotografías de los efectos de lentes convergentes y divergentes sobre rayos paralelos. (Derecha) Puntos focales de lentes a) biconvexa y b) bicóncava.

Fotos cortesía de Henry Leap y Jim Lehman

Figura 23.23 Construcción geométrica para desarrollar la ecuación de lente delgada.



Los rayos paralelos al eje divergen después de pasar a través de una lente de forma bicóncava, como se muestra en la figura 23.22b. En este caso, el punto focal se define como el punto donde los rayos divergentes parecen originarse, marcado F en la figura. Las figuras 23.22a y 23.22b indican por qué a estas lentes se les aplican los nombres *convergente* y *divergente*.

Ahora considere un rayo de luz que pasa a través del centro de una lente. Tal rayo se marca rayo 1 en la figura 23.23. Para una lente delgada, un rayo que pasa a través del centro no se desvía. El rayo 2 en la misma figura es paralelo al eje principal de la lente (el eje horizontal que pasa a través de O) y como resultado pasa a través del punto focal F después de la refracción. Los rayos 1 y 2 se intersectan en el punto que es la punta de la flecha imagen.

Observe primero que la tangente del ángulo α se puede encontrar al usar los triángulos sombreados azul y oro en la figura 23.23:

$$\tan \alpha = \frac{h}{p} \quad \text{o} \quad \tan \alpha = -\frac{h'}{q}$$

A partir de este resultado encontramos que

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \tag{23.10}$$

La ecuación para amplificación mediante una lente es la misma que la ecuación para amplificación mediante un espejo. Observe también de la figura 23.23 que

$$\tan \theta = \frac{PQ}{f} \quad \text{o} \quad \tan \theta = -\frac{h'}{q-f}$$

Sin embargo, la altura PQ que se usó en la primera de estas ecuaciones es la misma que h , la altura del objeto. Por lo tanto,

$$\frac{h}{f} = -\frac{h'}{q-f}$$

$$\frac{h'}{h} = -\frac{q-f}{f}$$

Al usar la última ecuación en combinación con la ecuación 23.10 se obtiene

$$\frac{q}{p} = \frac{q-f}{f}$$

que se reduce a

Ecuación de lente delgada ▶
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \tag{23.11}$$

Esta ecuación, llamada **ecuación de lente delgada**, se puede usar con lentes convergentes y divergentes si se adhiere a un conjunto de convenciones de signo. La figura 23.24 es útil para

Tabla 23.3 Convenciones de signos para lentes delgadas

Cantidad	Símbolo	Enfrente	Atrás	Convergente	Divergente
Ubicación de objeto	p	+	-		
Ubicación de imagen	q	-	+		
Radios de lente	R_1, R_2	-	+		
Longitud focal	f			+	-

obtener los signos de p y q , y la tabla 23.3 proporciona las convenciones de signo completas para lentes. Observe que **una lente convergente tiene una longitud focal positiva** bajo esta convención y **una lente divergente tiene una longitud focal negativa**. Por lo tanto, a menudo a estas lentes se les dan los nombres de *positiva* y *negativa*.

La longitud focal para una lente en aire se relaciona con las curvaturas de sus superficies frontal y posterior y al índice de refracción n del material de la lente mediante

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad [23.12]$$

donde R_1 es el radio de curvatura de la superficie frontal de la lente y R_2 es el radio de curvatura de la superficie posterior. (Como con los espejos, el lado de donde se aproxima la luz se denomina arbitrariamente *frente* de la lente.) La tabla 23.3 proporciona las convenciones de signos para R_1 y R_2 . La ecuación 23.12, llamada **ecuación del fabricante de lentes**, permite calcular la longitud focal a partir de las propiedades conocidas de la lente.

Diagramas de rayos para lentes delgadas

Los diagramas de lentes son esenciales para comprender la formación de imagen global mediante una lente delgada o un sistema de lentes. También debe ayudar a clarificar las convenciones de signos ya analizadas. La figura activa 23.25 ilustra este método para tres situaciones de una sola lente. Para ubicar la imagen formada por una lente convergente (figuras activas 23.25a y b), los siguientes tres rayos se dibujan desde la parte superior del objeto:

1. El primer rayo se dibuja paralelo al eje principal. Después de refractarse por la lente, este rayo pasa a través (o parece provenir desde) uno de los puntos focales.
2. El segundo rayo se dibuja a través del centro de la lente. Este rayo continúa en una línea recta.
3. El tercer rayo se dibuja a través del otro punto focal y sale de la lente paralelo al eje principal.



Figura 23.24 Diagrama para obtener los signos de p y q para una lente delgada o una superficie refractante.

◀ Ecuación del fabricante de lentes

Tip 23.4 De nuevo donde la luz está es positivo

Para las lentes, p y q son positivos, donde la luz está, el objeto o la imagen es real. De objetos reales, la luz se origina con el objeto delante de la lente, por lo que p es positivo, como se indica en la figura 23.24. Si la imagen se forma en la parte trasera de la lente, q es positivo allí también.

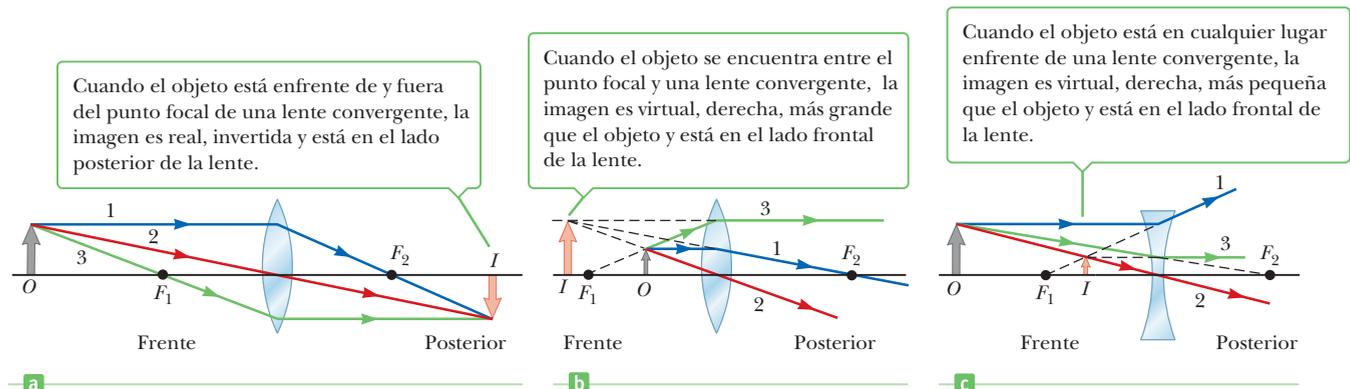


Figura activa 23.25 Diagramas de rayos para ubicar la imagen de un objeto formado por una lente delgada.

Tip 23.5 Sólo se eligen algunos rayos

Aunque los diagramas de rayos en la figura 23.25 sólo muestran tres rayos que salen de un objeto, entre el objeto y su imagen se puede dibujar un número infinito de rayos.

Una construcción similar se usa para ubicar la imagen formada por una lente divergente, como se muestra en la figura activa 23.25c. El punto de intersección de *cualesquiera dos* de los rayos en estos diagramas se puede usar para ubicar la imagen. El tercer rayo sirve como comprobación en la construcción.

Para la lente convergente en la figura activa 23.25a, donde el objeto está *fuera* del punto focal frontal ($p > f$), el diagrama de rayos muestra que la imagen es real e invertida. Cuando el objeto real está *dentro* del punto focal ($p < f$), como en la figura activa 23.25b, la imagen es virtual y derecha. Para la lente divergente de la figura activa 23.25c, la imagen es virtual y derecha.

Examen rápido

23.4 Una bolsa plástica clara para sándwich llena con agua puede actuar como una lente convergente burda en aire. Si la bolsa está llena con aire y se coloca bajo agua, ¿la lente efectiva es a) convergente o b) divergente?

23.5 En la figura activa 23.25a, la flecha azul se sustituye con una que es mucho más alta que la lente. ¿Cuántos rayos desde el objeto golpearán la lente?

23.6 Un objeto se coloca a la izquierda de una lente convergente. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero y cuál es falso? a) La imagen siempre está a la derecha de la lente. b) La imagen puede ser derecha o invertida. c) La imagen siempre es menor o del mismo tamaño que el objeto.

Su éxito al trabajar con problemas de lentes o espejos se determinará principalmente por si comete errores de signo cuando sustituya en las ecuaciones de lentes o espejos. La única forma de garantizar que no comete errores de signo es convertirse en un experto en el uso de las convenciones de signos. La mejor forma de hacerlo es resolver muchos problemas por cuenta propia y construir diagramas de rayos de comprobación. Observar a su instructor o leer los problemas de ejemplo no sustituye a la práctica.

FÍSICA APLICADA 23.5 Máscaras de visión y buceo

Las máscaras de buceo a menudo tienen lentes construidas en el vidrio de la careta para los buzos que no tienen visión perfecta. Esta lente permite al individuo bucear sin la necesidad de gafas porque la careta realiza la refracción necesaria para producir visión clara. Las gafas normales tienen lentes que son curvos en ambas superficies, frontal y posterior. Las lentes en la careta de una máscara de buceo con frecuencia tienen superficies curvas sólo en el interior del vidrio. ¿Por qué es aconsejable este diseño?

SOLUCIÓN La razón principal para curvar sólo la superficie interior de la lente en la careta de una máscara de buceo es

permitir al buzo ver con claridad mientras está bajo el agua y en el aire. Si hubiese superficies curvas tanto en el frente como en la parte posterior de la lente de buceo, habría dos refracciones. La lente se podría diseñar de modo que estas dos refracciones produzcan visión clara mientras el buzo está en el aire. Sin embargo, cuando el buzo estuviera bajo el agua, la refracción entre el agua y el vidrio en la primera interfaz diferiría porque el índice de refracción del agua es diferente de la del aire. En consecuencia, la visión del buzo no sería clara bajo el agua. ■

EJEMPLO 23.7 Imágenes formadas por una lente convergente

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas asociadas con una lente convergente.

PROBLEMA Una lente convergente, con longitud focal de 10.0 cm, forma imágenes de un objeto situado a varias distancias.
a) Si el objeto se coloca a 30.0 cm de la lente, ubique la imagen, establezca si es real o virtual y encuentre su amplificación.
b) Repita el problema cuando el objeto esté a 10.0 cm y **c)** de nuevo cuando el objeto esté a 5.00 cm de la lente.

ESTRATEGIA Los tres problemas sólo requieren sustitución en la ecuación de lentes delgadas y la ecuación de amplificación asociada, ecuaciones 23.10 y 23.11, respectivamente. Debe seguir las convenciones de la tabla 23.3.

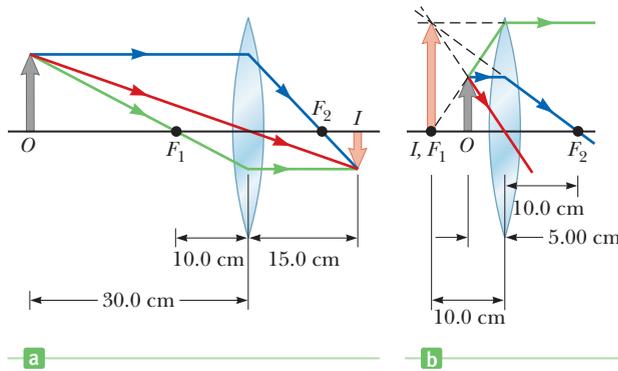


Figura 23.26 (Ejemplo 23.7)

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia de la imagen y describa la imagen cuando el objeto se coloca a 30.0 cm.

En la figura 23.26a se muestra el diagrama de rayos. Sustituya valores en la ecuación de lentes delgadas para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , la distancia de la imagen. Es positiva, así que la imagen es real y está en el lado lejano de la lente:

$$q = +15.0 \text{ cm}$$

La amplificación de la lente se obtiene de la ecuación 23.10. M es negativa y menor que 1 en valor absoluto, así que la imagen es invertida y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\frac{15.0 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}} = -0.500$$

b) Repita el problema, cuando el objeto se coloca a 10.0 cm.

Ubique la imagen al sustituir en la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} \rightarrow \frac{1}{q} = 0$$

Esta ecuación se satisface sólo en el límite cuando q tiende a infinito igual que cuando M lo hace también.

$$q \rightarrow \infty$$

c) Repita el problema cuando el objeto se coloca a 5.00 cm de la lente.

Observe el diagrama de rayos que se muestra en la figura 23.26b. Sustituya en la ecuación de lente delgada para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es negativa, lo que significa que está en el mismo lado que el objeto y es virtual:

$$q = -10.0 \text{ cm}$$

Sustituya los valores de p y q en la ecuación de amplificación. M es positivo y mayor que 1, así que la imagen es derecha y duplica el tamaño del objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-10.0 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = +2.00$$

COMENTARIOS La habilidad de una lente para amplificar objetos condujo a la invención de gafas para lectura, microscopios y telescopios.

PREGUNTA 23.7 Si la lente se usa para formar una imagen del Sol sobre una pantalla, ¿cuán lejos de la lente debe colocarse la pantalla?

EJERCICIO 23.7 Suponga que la imagen de un objeto está derecha y aumentada 1.75 veces cuando el objeto se coloca a 15.0 cm de una lente. Encuentre la ubicación de la imagen y la longitud focal de la lente.

RESPUESTAS a) -26.3 cm (virtual, en el mismo lado que el objeto) b) 34.9 cm

EJEMPLO 23.8 El caso de una lente divergente

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas asociadas con una lente divergente.

PROBLEMA Repita el problema del ejemplo 23.7 para una lente *divergente* con 10.0 cm de longitud focal.

ESTRATEGIA Una vez más, la sustitución en la ecuación de lente delgada y la ecuación de amplificación asociada, junto con las convenciones de la tabla 23.3, resuelven las diversas partes. La única diferencia es la longitud focal negativa.

SOLUCIÓN

a) Ubique la imagen y su amplificación si el objeto está a 30.0 cm.

El diagrama de rayos está dado en la figura 23.27a. Aplique la ecuación de lente delgada con $p = 30.0$ cm para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es negativa y, por lo tanto, virtual:

$$q = -7.50 \text{ cm}$$

Sustituya en la ecuación 23.10 para obtener la amplificación. Dado que M es positiva y tiene valor absoluto menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-7.50 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}}\right) = +0.250$$

b) Localice la imagen y determine su amplificación si el objeto está a 10.0 cm de la lente.

Aplique la ecuación de lente delgada y considere $p = 10.0$ cm:

$$\frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q (una vez más, el resultado es negativo, de modo que la imagen es virtual):

$$q = -5.00 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación. Puesto que M es positiva y tiene valor absoluto menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\frac{q}{p} = -\left(\frac{-5.00 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}}\right) = +0.500$$

c) Localice la imagen y encuentre su amplificación cuando el objeto está en 5.00 cm.

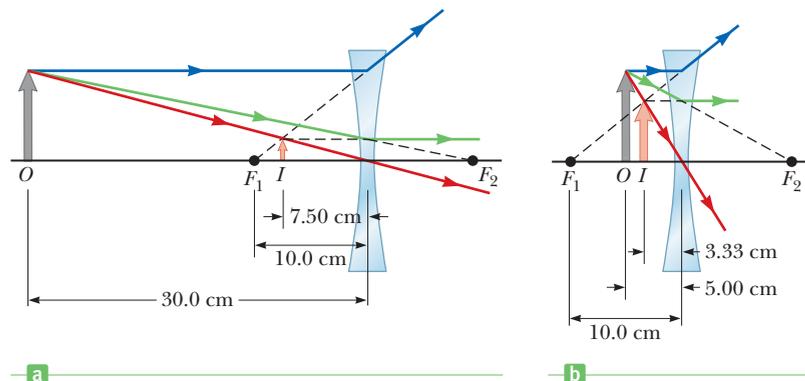
El diagrama de rayos se proporciona en la figura 23.27b. Sustituya $p = 5.00$ cm en la ecuación de lente delgada para ubicar la imagen:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = -\frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q . La respuesta es negativa, así que una vez más la imagen es virtual:

$$q = -3.33 \text{ cm}$$

Figura 23.27 (Ejemplo 23.8)



Calcule la amplificación. Puesto que M es positiva y menor que 1, la imagen es derecha y menor que el objeto:

$$M = -\left(\frac{-3.33 \text{ cm}}{5.00 \text{ cm}}\right) = +0.666$$

COMENTARIOS Advierta que, en cada caso, la imagen es virtual, por ende está en el mismo lado de la lente que el objeto. Más aún, la imagen es menor que el objeto. Para una lente divergente y un objeto real, éste *siempre* es el caso, como se puede demostrar matemáticamente.

PREGUNTA 23.8 ¿Una lente divergente se puede usar como lente de aumento? Explique.

EJERCICIO 23.8 Repita el cálculo y encuentre la posición de la imagen y la amplificación si el objeto está a 20.0 cm de la lente.

RESPUESTAS $q = -6.67 \text{ cm}$, $M = 0.334$

Combinaciones de lentes delgadas

Muchos dispositivos ópticos útiles requieren dos lentes. Manipular problemas que involucren dos lentes no es muy diferente de lidiar con un problema de una sola lente dos veces. Primero, la imagen producida por la primera lente se calcula como si la segunda lente no estuviera presente. Entonces la luz se aproxima a la segunda lente *como si* hubiese llegado de la imagen formada por la primera lente. En consecuencia, **la imagen formada por la primera lente se trata como el objeto para la segunda lente**. La imagen formada por la segunda lente es la imagen final del sistema. Si la imagen formada por la primera lente se encuentra en el lado posterior de la segunda lente, la imagen se trata como un objeto virtual para la segunda lente, de modo que p es negativa. El mismo procedimiento se puede extender a un sistema de tres o más lentes. La amplificación global de un sistema de lentes delgadas es el *producto* de las amplificaciones de las lentes separadas. También es posible combinar lentes delgadas y espejos como se muestra en el ejemplo 23.10

■ EJEMPLO 23.9 Dos lentes en fila

OBJETIVO Calcular cantidades geométricas para un par de lentes sucesivos.

PROBLEMA Dos lentes convergentes se colocan separadas 20.0 cm, como se muestra en la figura 23.28a (página 812), con un objeto a 30.0 cm enfrente de la lente 1 a la izquierda. **a)** Si la lente 1 tiene una longitud focal de 10.0 cm, ubique la imagen formada por esta lente y determine su amplificación. **b)** Si la lente 2 a la derecha tiene una longitud focal de 20.0 cm, localice la imagen final formada y encuentre la amplificación total del sistema.

ESTRATEGIA Aplique la ecuación de lente delgada a cada lente. La imagen formada por la lente 1 se trata como el objeto para la lente 2. Además, use el hecho de que la amplificación total del sistema es el producto de las amplificaciones producidas por las lentes separadas.

SOLUCIÓN

a) Ubique la imagen y determine la amplificación de la lente 1.

Observe el diagrama de rayos, figura 23.28b. Aplique la ecuación de lente delgada a la lente 1:

$$\frac{1}{30.0 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

Resuelva para q , que es positiva y por lo tanto a la derecha de la primera lente:

$$q = +15.0 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación de la lente 1:

$$M_1 = -\frac{q}{p} = -\frac{15.0 \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}} = -0.500$$

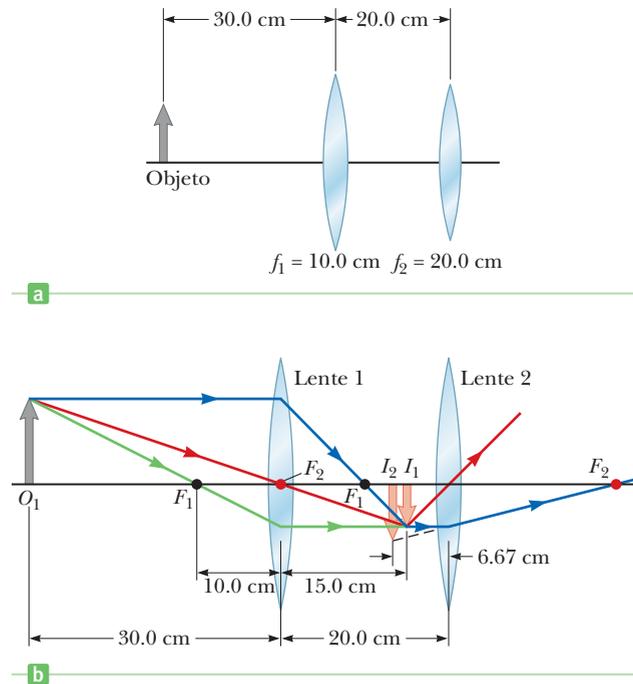
b) Ubique la imagen final y encuentre la amplificación total.

La imagen formada por la lente 1 se convierte en el objeto para la lente 2. Calcule la distancia del objeto para la lente 2:

$$p = 20.0 \text{ cm} - 15.0 \text{ cm} = 5.00 \text{ cm}$$

(continúa)

Figura 23.28 (Ejemplo 23.9)



Una vez más aplique la ecuación de lente delgada a la lente 2 para ubicar la imagen final:

$$\frac{1}{5.00 \text{ cm}} + \frac{1}{q} = \frac{1}{20.0 \text{ cm}}$$

$$q = -6.67 \text{ cm}$$

Calcule la amplificación de la lente 2:

$$M_2 = -\frac{q}{p} = -\frac{(-6.67 \text{ cm})}{5.00 \text{ cm}} = +1.33$$

Multiplique las dos amplificaciones para obtener la amplificación global del sistema:

$$M = M_1 M_2 = (-0.500)(1.33) = -0.665$$

COMENTARIOS El signo negativo para M indica que la imagen final está invertida y es menor que el objeto porque el valor absoluto de M es menor que 1. Puesto que q es negativa, la imagen final es virtual.

PREGUNTA 23.9 Si la lente 2 se mueve de modo que está a 40 cm de distancia de la lente 1, ¿la imagen final sería derecha o invertida?

EJERCICIO 23.9 Si las dos lentes en la figura 23.28 están separadas 10.0 cm, ubique la imagen final y encuentre la amplificación del sistema. *Sugerencia:* ¡El objeto para la segunda lente es virtual!

RESPUESTAS 4.00 cm detrás de la segunda lente, $M = -0.400$

EJEMPLO 23.10 Lente delgada y un espejo cóncavo

OBJETIVO Resolver un problema que involucra tanto una lente y un espejo.

PROBLEMA Un objeto se coloca 20.0 cm a la derecha de un espejo cóncavo con distancia focal 12.0 cm y 30.0 cm a la izquierda de una lente convergente con distancia focal de 10.0 cm, como en la figura 23.29. Localizar **a)** la imagen formada por la lente sola, **b)** la imagen creada por el espejo solo, y **c)** la imagen creada tanto por el espejo y la lente. **d)** El espejo se mueve de modo que es de 6.00 cm de distancia del objeto. Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

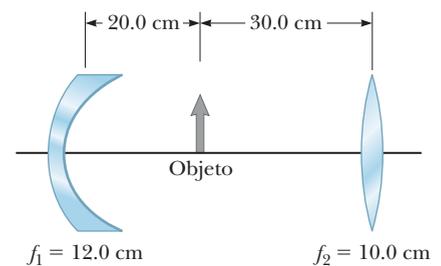


Figura 23.29 (Ejemplo 23.10)

ESTRATEGIA El inciso a) es una sencilla aplicación de la ecuación de la lente delgada, la ecuación 23.11. El inciso b) se puede calcular de la ecuación 23.6. Utilizando la imagen formada por el espejo como el objeto de la lente, encuentre la ubicación de la imagen solicitada en el inciso c), para la luz que se refleja primero en el espejo antes de pasar a través de la lente.

SOLUCIÓN

a) Localice sólo la imagen formada por la lente.

Aplique la ecuación 23.11:

$$\frac{1}{p_2} + \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2}$$

Sustituya valores y resuelva para la posición q_2 de la imagen:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{30.0 \text{ cm}} = \frac{1}{15.0 \text{ cm}}$$

$$q_2 = 15.0 \text{ cm}$$

b) Localice la imagen creada sólo por el espejo.

Aplique la ecuación 23.6:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1}$$

Sustituya valores para f_1 y p_1 , ambos positivos y resuelva para q_1 :

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{12.0 \text{ cm}} - \frac{1}{20.0 \text{ cm}} = \frac{1}{30.0 \text{ cm}}$$

$$q_1 = 30.0 \text{ cm}$$

c) Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

Aplique la ecuación 23.11 para la imagen hallada en el inciso b), la cual se vuelve un objeto real para la lente, considerando que la imagen se forma a 20.0 cm de la lente:

$$\frac{1}{q_{2f}} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_{2f}} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{20.0 \text{ cm}} = \frac{1}{20.0 \text{ cm}}$$

$$q_{2f} = 20.0 \text{ cm}$$

d) El espejo se mueve a 6.00 cm hacia la izquierda del objeto. Localice la imagen formada por el espejo y la lente.

El objeto está ahora más cerca del espejo. Encuentre la nueva posición de la imagen creada por el espejo:

$$\frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} - \frac{1}{p_1} = \frac{1}{12.0 \text{ cm}} - \frac{1}{6.0 \text{ cm}} = -\frac{1}{12.0 \text{ cm}}$$

$$q_1 = -12.0 \text{ cm}$$

La imagen creada por el espejo es virtual y por lo tanto, detrás del espejo. Sin embargo, ésta actúa igual que un objeto real para la lente. Aplique la ecuación 23.11 con $p_2 = 30.0 \text{ cm} + 18.0 \text{ cm} = 48.0 \text{ cm}$:

$$\frac{1}{q_2} = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{p_2} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}} - \frac{1}{48.0 \text{ cm}} = \frac{19}{2.40 \times 10^2 \text{ cm}}$$

$$q_2 = 12.6 \text{ cm}$$

OBSERVACIONES Hay dos imágenes finales creadas a la derecha de la lente, como se esperaba. A medida que el espejo se mueve más cerca del objeto, la imagen final, debida al espejo y a la lente se mueve más cerca de ésta. La imagen del inciso a) se invierte, sin embargo, la imagen del inciso c) pasa a través de dos inversiones, por lo tanto está en posición vertical. La imagen virtual en el espejo del inciso d) está en posición vertical, por lo que la imagen de la lente está invertida.

PREGUNTA 23.10 ¿Es posible tener un objeto virtual de un espejo? Explicar con un ejemplo.

EJERCICIO 23.10 El mismo espejo y lentes se vuelven a colocar de manera que el espejo es 24.0 cm a la izquierda de la lente y el objeto es de 20.0 cm a la derecha de la lente. Busque la imagen de a) de la lente solo, b) la primera imagen formada por el espejo y c) la imagen final, la segunda formada por la lente.

RESPUESTAS a) 20.0 cm a la izquierda de la lente b) 6.00 cm detrás del espejo c) 15.0 cm a la derecha de la lente

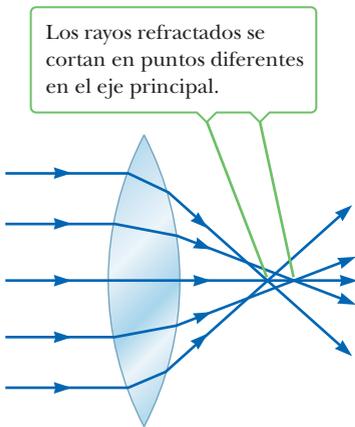


Figura 23.30 Aberración esférica producida por una lente convergente. ¿Una lente divergente produce aberración esférica?

23.7 Aberraciones de lentes y espejos

Uno de los problemas básicos de los sistemas que contienen espejos y lentes es la calidad imperfecta de las imágenes, que principalmente es resultado de defectos en la forma. La teoría simple de espejos y lentes supone que los rayos forman pequeños ángulos con el eje principal y que todos los rayos que llegan a la lente o espejo desde una fuente puntual se enfocan en un solo punto, lo que produce una imagen clara. Esto no siempre es cierto en el mundo real. Donde no se sostienen las aproximaciones utilizadas en esta teoría, se forman imágenes imperfectas.

Si uno quiere analizar la formación de imágenes con precisión, es necesario trazar cada rayo y usar la ley de Snell en cada superficie refractante. Este procedimiento muestra que no hay una sola imagen puntual; en vez de ello, la imagen es borrosa. Las desviaciones de las imágenes reales (imperfectas) del ideal predicho por la teoría simple se llaman **aberraciones**. Dos tipos comunes de aberraciones son la aberración esférica y la aberración cromática.

Aberración esférica

La aberración esférica resulta del hecho de que los puntos focales de los rayos de luz que pasan lejos del eje principal de una lente (o espejo) esférica son diferentes de los puntos focales de los rayos con la misma longitud de onda que pasan cerca del eje. La figura 23.30 ilustra la aberración esférica para rayos paralelos que pasan a través de una lente convergente. Los rayos cerca de la parte media de la lente forman imagen más lejos de la lente que los rayos en los bordes. En consecuencia, no hay una sola longitud focal para una lente esférica.

La mayoría de las cámaras están equipadas con una apertura ajustable para controlar la intensidad de la luz y, cuando es posible, reducir la aberración esférica. (Una apertura es una abertura que controla la cantidad de luz que se transmite a través de la lente.) Conforme se reduce el tamaño de la apertura, se producen imágenes más nítidas porque sólo la porción central de la lente se expone a la luz incidente cuando la apertura es muy pequeña. Sin embargo, al mismo tiempo, menos luz forma imágenes progresivamente. Para compensar esta pérdida, se usa un tiempo de exposición más largo. Un ejemplo de los resultados obtenidos con pequeñas aperturas es la imagen clara que produce una cámara de orificio, con un tamaño de apertura de aproximadamente 0.1 mm.

En el caso de los espejos que se utilizan para objetos muy distantes, uno puede eliminar, o al menos minimizar, la aberración esférica al emplear una superficie parabólica en lugar de esférica. Sin embargo, las superficies parabólicas no se usan en muchas aplicaciones, porque su fabricación es muy costosa con óptica de alta calidad. Los rayos de luz paralelos que inciden sobre tal superficie se enfocan en un punto común. Las superficies reflejantes parabólicas se usan en un gran número de telescopios astronómicos para mejorar la calidad de la imagen. También se usan en linternas, en las que un haz de luz casi paralelo se produce a partir de una pequeña lámpara colocada en el foco de la superficie reflejante.

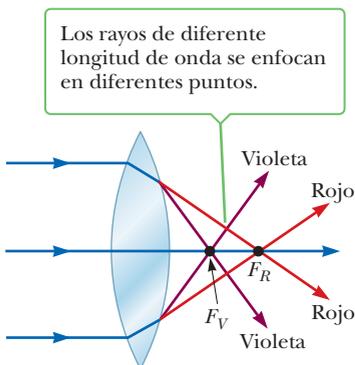


Figura 23.31 Aberración cromática producida por una lente convergente.

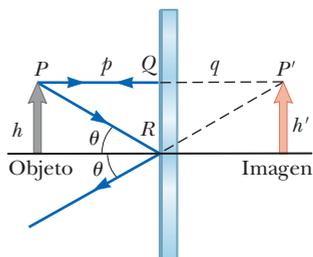
Aberración cromática

Diferentes longitudes de onda refractadas por una lente se enfocan en diferentes puntos, lo que da lugar a aberración cromática. En el capítulo 22 describimos cómo el índice de refracción de un material varía con la longitud de onda. Cuando pasa luz blanca a través de una lente, por ejemplo, los rayos de luz violeta se refractan más que los rayos de luz roja (véase la figura 23.31), de modo que la longitud focal para luz roja es mayor que para luz violeta. Otras longitudes de onda (que no se muestran en la figura) tendrían puntos focales intermedios. La aberración cromática para una lente divergente es opuesta a la de una lente convergente. La aberración cromática se puede reducir enormemente mediante una combinación de lentes convergentes y divergentes.

RESUMEN

23.1 Espejos planos

Las imágenes se forman donde los rayos de luz se intersecan o donde parecen originarse. Cuando la luz se interseca o pasa a través de un punto de imagen se forma una **imagen real**. En una **imagen virtual** la luz no pasa a través del punto de imagen, sino que parece divergir de él.



Una construcción geométrica para buscar la imagen de un objeto colocado delante de un espejo plano. Debido a que los triángulos PQR y P'QR son idénticos, $p = |q|$ y $h = h'$.

La imagen formada por un espejo plano tiene las siguientes propiedades: **1.** La imagen está tan lejos detrás del espejo como está en frente de él. **2.** La imagen no tiene aumento, es virtual y derecha.

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

La **amplificación M** de un espejo esférico se define como la razón de la **altura de la imagen h'** a la **altura del objeto h**, que es el negativo de la razón de la distancia de la imagen q a la distancia del objeto p :

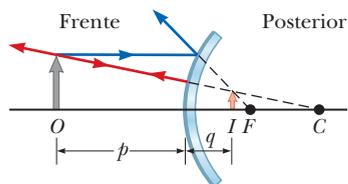
$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.2]$$

La **distancia del objeto** y la **distancia de la imagen** para un espejo esférico de radio R se relacionan mediante la **ecuación del espejo**:

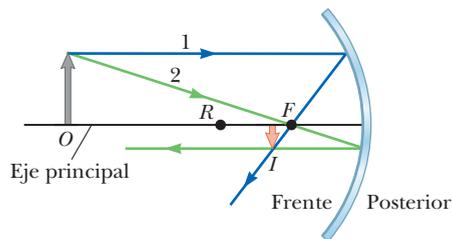
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.6]$$

donde $f = R/2$ es la **longitud focal** del espejo.

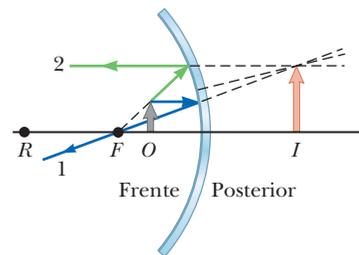
Las ecuaciones 23.2 y 23.6 se sostienen para espejos cóncavos y convexos, sujetos a las convenciones de signo dadas en la tabla 23.1.



La imagen de un espejo convexo es virtual, derecha y detrás del espejo.



a



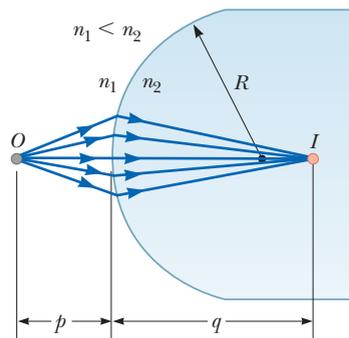
b

a) La imagen de un espejo cóncavo es real e invertida cuando el objeto está fuera del punto focal, es decir, $p > f$. La imagen es más grande que el objeto cuando $f < p < R$, y más pequeña que el objeto cuando $p > R$. b) La imagen de un espejo cóncavo es virtual, derecha y más grande que el objeto cuando $p < f$.

23.4 Imágenes formadas por refracción

Una imagen se puede formar mediante refracción en una superficie esférica de radio R . Las distancias del objeto y de la imagen para refracción de tal superficie se relacionan mediante

$$\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad [23.7]$$



Una imagen que se forma por la refracción en una superficie esférica. Los rayos que forman ángulos pequeños con el eje principal divergen de un punto en el objeto O y pasa por el punto imagen I .

La **amplificación de una superficie refractante** es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{n_1 q}{n_2 p} \quad [23.8]$$

donde el objeto se ubica en el medio con índice de refracción n_1 y la imagen se forma en el medio con índice de refracción n_2 . Las ecuaciones 23.7 y 23.8 están sujetas a las convenciones de signo de la tabla 23.2.

23.6 Lentes delgadas

La **amplificación de una lente delgada** es

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{q}{p} \quad [23.10]$$

Las distancias del objeto y de la imagen de una lente delgada se relacionan mediante la **ecuación de lente delgada**:

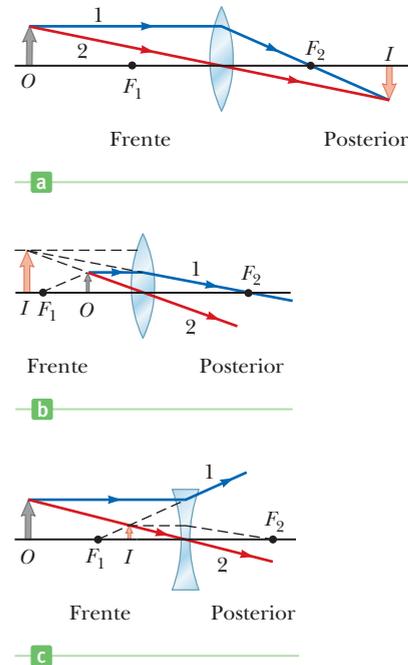
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad [23.11]$$

Las ecuaciones 23.10 y 23.11 están sujetas a las convenciones de signos de la tabla 23.3.

23.7 Aberraciones de lentes y espejos

Las **aberraciones** son responsables de la formación de imágenes imperfectas por lentes y espejos. La **aberración esférica** es consecuencia de que los puntos focales de los rayos de luz lejos del eje principal de una lente o espejo esférico son diferentes de los puntos focales de los rayos que pasan a través del centro. La **aberración cromática** surge porque los rayos de luz

de diferentes longitudes de onda se enfocan en diferentes puntos cuando se refractan mediante una lente.



Diagramas de rayos para localizar la imagen de un objeto. a) El objeto se encuentra fuera del punto focal de una lente convergente. b) El objeto está dentro del punto focal de una lente convergente. c) El objeto se encuentra fuera del punto focal de una lente divergente.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Cuando la imagen de un objeto real se forma mediante un espejo plano, ¿cuál de los siguientes enunciados siempre es cierto? a) La imagen es mayor que el objeto. b) La imagen tiene el mismo tamaño que el objeto. c) La imagen es virtual. d) La imagen es más pequeña que el objeto. e) La imagen es derecha.
2. Si la cara de José está a 30.0 cm por delante de un espejo cóncavo de afeitarse crea una imagen vertical 1.50 veces mayor que el objeto, ¿cuál es la longitud focal del espejo? a) 12.0 cm b) 20.0 cm c) 70.0 cm d) 90.0 cm e) ninguna de las respuestas.
3. Una lente delgada convergente tiene una longitud focal de 8.00 cm. Si una imagen invertida real se ubica a 12.0 cm a la derecha de la lente, ¿dónde se ubica el objeto? a) 12.0 cm a la izquierda de la lente b) 24.0 cm a la derecha de la lente c) 24.0 cm a la izquierda de la lente d) 18.0 cm a la derecha de la lente e) 18.0 cm a la izquierda de la lente.
4. Una lente convergente tiene un objeto virtual ubicado a una distancia finita. ¿Cuál de las siguientes expresiones debe ser cierta? a) La imagen es virtual. b) La imagen es real. c) $p < 0$ d) $p > 0$ e) $f > q$
5. Un objeto se coloca a 16.0 cm de un espejo convexo con una longitud focal de 6.00 cm de magnitud. ¿Cuál es la ubicación de la imagen? a) 9.60 cm enfrente del espejo b) 4.36 cm enfrente del espejo c) 9.60 cm detrás del espejo d) 4.36 cm detrás del espejo e) 10.0 cm enfrente del espejo.
6. Un objeto real está a 10.0 cm a la izquierda de una delgada lente convergente que tiene una longitud focal de 16.0 cm de magnitud. ¿Cuál es la ubicación de la imagen? a) 6.15 cm a la derecha de la lente b) 6.15 cm a la izquierda de la lente c) 26.7 cm a la derecha de la lente d) 26.7 cm a la izquierda de la lente e) 6.00 cm a la derecha de la lente
7. Cuando la imagen de un objeto real se forma mediante un espejo cóncavo, ¿cuál de los siguientes enunciados es cierto? a) La imagen siempre es real. b) La imagen siempre es virtual. c) Si la distancia del objeto es menor que la longitud focal, la imagen es real. d) Si la distancia del objeto es mayor que la longitud focal, la imagen es real. e) Si $q < 0$, la imagen es virtual.
8. Un objeto se ubica a 50 cm de una lente convergente que tiene una longitud focal de 15 cm. ¿Cuál de los siguientes

- es cierto en cuanto a la imagen formada por la lente?
- Es virtual, derecha y más grande que el objeto.
 - Es virtual, invertida y más pequeña que el objeto.
 - Es real, invertida y más pequeña que el objeto.
 - Es real, invertida y más grande que el objeto.
 - Es real, derecha y más grande que el objeto.
- Un espejo convexo forma la imagen de un objeto real. ¿Cuál de los siguientes enunciados siempre es cierto?
 - La imagen es real y derecha.
 - La imagen es virtual y más grande que el objeto.
 - La imagen es virtual y derecha.
 - La imagen es más grande que el objeto.
 - La imagen es virtual e invertida.
 - Para un objeto real, ¿la imagen formada por una lente divergente siempre es a) virtual e invertida, b) virtual y derecha, c) real y derecha, d) real e invertida o e) real y ampliada?
 - Una persona desde un barco de pesca con arpón ve un pez inmóvil a pocos metros en una dirección alrededor de 30° por debajo de la horizontal. Para arponear al pez, y suponiendo que el arpón no cambia de dirección al en-

trar en el agua, la persona podría a) ¿apuntar por encima de donde él ve el pez? b) ¿apuntar por debajo del pez, o c) ¿apuntar precisamente al pez?

- Un objeto, representado por una flecha de color gris, se coloca delante de un espejo plano. ¿Cuál de los diagramas de la figura POM23.12 describe mejor la imagen, representada por la flecha de color rosa?

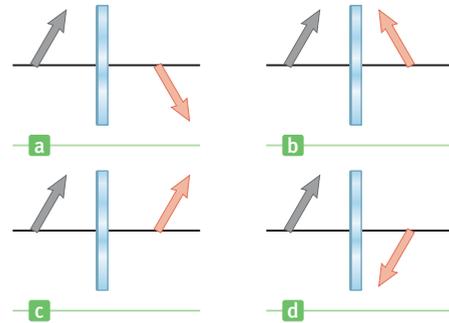


Figura POM23.12

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Coloque una fotografía suya en un espejo de baño. Párese a varios centímetros de distancia del espejo. ¿Puede enfocar sus ojos *tanto* en la fotografía pegada al espejo *como* en su imagen en el espejo *al mismo tiempo*? ¿Dónde está la imagen de usted mismo?
- ¿Por qué un torrente claro siempre parece menos profundo de lo que en realidad es?
- Un espejo plano crea una imagen virtual de su cara. Suponga que el espejo plano se combina con otro elemento óptico. ¿El espejo puede formar una imagen real en tal combinación?
- Explique por qué un espejo no puede dar lugar a aberración cromática.
- Un espejismo común se forma cuando el aire en forma gradual se vuelve más frío conforme aumenta la altura sobre el suelo. ¿Qué puede ocurrir si el aire gradualmente se vuelve más caliente conforme aumenta la altura? A menudo esto ocurre sobre cuerpos de agua o suelo cubierto con nieve; el efecto se llama *espejismo emergente (looming)*.
- Una imagen virtual con frecuencia se describe como una imagen a través de la cual los rayos de luz en realidad no viajan, como lo hacen para una imagen real. ¿Una imagen virtual se puede fotografiar?
- Suponga que quiere usar una lente convergente para proyectar la imagen de dos árboles sobre una pantalla. Un árbol está a una distancia x de la lente; el otro está a $2x$, como en la figura PC23.7. Ajuste la pantalla de modo que el árbol cercano esté en foco. Si ahora quiere que el árbol lejano esté en foco, ¿usted acerca o aleja la pantalla de la lente?

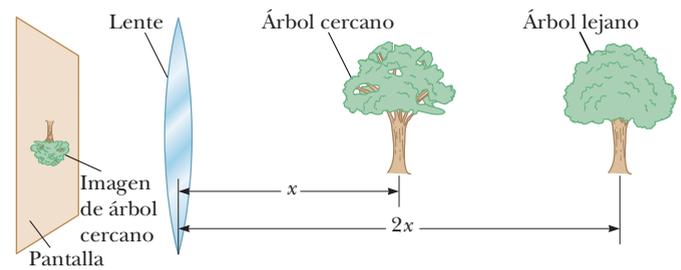


Figura PC23.7

- Las lentes que se usan en las gafas, ya sean convergentes o divergentes, siempre se diseñan de tal modo que la parte media de la lente se curve alejándose del ojo. ¿Por qué?
- En una novela de Julio Verne, a un trozo de hielo se le da forma de lente de aumento para enfocar la luz solar y prender fuego. ¿Esto es posible?
- Si se coloca un cilindro de vidrio sólido o plástico claro sobre las palabras LEAD OXIDE (óxido de plomo) y se ve de lado, como se muestra en la figura PC23.10, la palabra LEAD parece invertida, pero la palabra OXIDE no. Explique.



Figura PC23.10

- ¿Se puede hacer una lente convergente que diverja la luz si se coloca en un líquido? ¿Y qué hay de un espejo convergente?
- La luz de un objeto pasa a través de una lente y forma una imagen visible sobre una pantalla. Si la pantalla se retira, ¿podría ver la imagen a) si permanece en su posición actual y b) si pudiera mirar la lente a lo largo de su eje, más allá de la posición original de la pantalla?
- ¿Por qué la longitud focal de un espejo no depende del material del espejo cuando la longitud focal de una lente sí depende del material de la lente?
- La imagen invertida de un objeto se observa sobre una pantalla desde el lado que da frente a una lente convergente. Entonces se introduce una tarjeta opaca que cubre sólo la mitad superior de la lente. ¿Qué sucede con la imagen sobre la pantalla? a) Desaparecería la mitad de la imagen. b) Aparecería la imagen completa y permanecería invariable. c) Desaparecería la mitad de la imagen y sería más débil. d) Aparecería toda la imagen, pero sería más débil.
- ¿Por qué algunos vehículos de emergencia tienen escrita la palabra **AIDAJU8MA** en el frente?

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, **2.** denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto
- 1.** denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- I.** denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO** denota problemas biomédicos
- PG** denota problemas guiados
- M** denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC** denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S** denota problema de razonamiento simbólico

23.1 Espejos planos

- a) ¿El espejo de su baño lo muestra a usted más viejo o más joven de su edad real? b) Calcule una estimación del orden de magnitud para la diferencia de edad, con base en datos que especifique.
- CIC** Dos espejos planos están uno frente al otro, separados 3.00 m y una mujer está de pie entre ellos. La mujer está frente a uno de los espejos a una distancia de 1.0 m, con la palma de la mano izquierda frente al espejo más cercano. a) ¿Cuál es la posición aparente de la imagen más cercana de su mano izquierda, medida desde la superficie del espejo frente a ella b) Muestra la palma de la mano o la parte trasera de la mano? c) ¿Cuál es la posición de la siguiente imagen? d) ¿Muestra la palma de su mano o la parte trasera de su mano? e) ¿Cuál es la posición de la tercera imagen más cercana? f) ¿Muestra la palma de la mano o la parte trasera de la mano?. g) ¿Cuáles de las imágenes son reales y cuáles son virtuales?
- Una persona camina en una habitación que tiene, en paredes opuestas, dos espejos planos que producen múltiples imágenes. Encuentre las distancias desde la persona hasta las primeras tres imágenes vistas en el espejo de la izquierda cuando la persona está a 5.00 pies del espejo en la pared izquierda y 10.0 pies del espejo en la pared derecha.
- En el altílo del coro de una iglesia, dos paredes están separadas 5.30 m. Los cantantes se paran contra la pared norte. La organista está frente a la pared sur, y se sienta separada 0.800 m de ella. Para que pueda ver al coro, sobre la pared sur se monta un espejo plano de 0.600 m de ancho, recto enfrente de la organista. ¿Qué ancho de la pared norte puede ver? *Sugerencia:* Dibuje un diagrama de vista superior para justificar su respuesta.

- Un periscopio (figura P23.5) es útil para ver objetos que no se pueden ver directamente. Puede ser utilizado en los submarinos y para ver los partidos de golf o desfiles detrás de una multitud de personas. Supongamos que el objeto p_1 está a una distancia desde el espejo superior y los centros de los dos espejos planos están separados por una distancia h . a) ¿Cuál es la distancia de la imagen final en el espejo inferior? b) ¿La imagen final es real o virtual? c) ¿Está en posición vertical o invertida? d) ¿Cuál es su aumento? e) ¿Aparece invertida de izquierda a derecha?

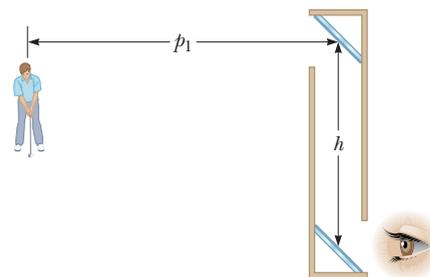


Figura P23.5

23.2 Imágenes formadas por espejos cóncavos

23.3 Espejos convexos y convenciones de signo

En los siguientes problemas no se proporcionan signos algebraicos. Se deja que usted determine el signo correcto a usar con cada cantidad, con base en un análisis del problema y las convenciones de signos de la tabla 23.1.

- Un dentista usa un espejo para examinar un diente que está 1.00 cm enfrente del espejo. La imagen del diente se

forma 10.0 cm detrás del espejo. Determine a) el radio de curvatura del espejo y b) la amplificación de la imagen.

7. Un espejo esférico convexo, cuya distancia focal tiene una magnitud de 15.0 cm, forma una imagen 10.0 cm detrás del espejo. a) ¿Dónde debe colocarse el objeto? b) ¿Cuál es la amplificación del espejo?
8. **BIO** Para ajustar un lente de contacto al ojo de un paciente, se puede usar un *queratómetro* para medir la curvatura de la córnea, la superficie frontal del ojo. Este instrumento coloca un objeto iluminado de tamaño conocido a una distancia conocida p de la córnea, que luego refleja parte de la luz del objeto y forma una imagen del mismo. La amplificación M de la imagen se mide con el uso de un pequeño telescopio de visualización que permite una comparación de la imagen formada por la córnea con una segunda imagen calibrada proyectada en el campo de visión mediante un arreglo de prismas. Determine el radio de curvatura de la córnea cuando $p = 30.0$ cm y $M = 0.0130$.
9. Una imagen virtual es formada 20.0 cm a partir de un espejo cóncavo que tiene un radio de curvatura de 40.0 cm. a) Encuentre la posición del objeto. b) ¿Cuál es la amplificación del espejo?
10. **C/C** Mientras observa su imagen en un espejo cosmético, Dina nota que su rostro está enormemente amplificado cuando ella se acerca al espejo, pero conforme se aleja del espejo, su imagen primero se vuelve borrosa, luego desaparece cuando está aproximadamente a 30 cm del espejo y luego se invierte cuando está más allá de 30 cm. Con base en estas observaciones, ¿qué puede concluir acerca de las propiedades del espejo?
11. Un objeto de 2.00 cm de altura se coloca a 3.00 cm enfrente de un espejo cóncavo. Si la imagen tiene 5.00 cm de alto y es virtual, ¿cuál es la longitud focal del espejo?
12. Un dedicado entusiasta de los autos deportivos pule las superficies interior y exterior de un tapacubos que es una sección de una esfera. Cuando se mira en un lado del tapacubos, ve una imagen de su rostro 30.0 cm atrás de él. Luego voltea el tapacubos y mantiene la misma distancia de su rostro. Ahora ve una imagen de su rostro 10.0 cm atrás del tapacubos. a) ¿Cuán lejos está su rostro del tapacubos? b) ¿Cuál es el radio de curvatura del tapacubos?
13. Un espejo de maquillaje curvo se diseña de modo que una persona a 25 cm enfrente de él ve una imagen derecha aumentada por un factor de dos. ¿Cuál es el radio de curvatura del espejo?
14. Un espejo cóncavo tiene una distancia focal de 30.0 cm. a) ¿Cuál es su radio de curvatura? Localizar y describir las propiedades de la imagen cuando la distancia del objeto es b) 100 cm y c) 10.0 cm.
15. **M** Un hombre de pie a 1.52 m enfrente de un espejo para rasurar produce una imagen invertida de 18.0 cm enfrente de él. ¿Cuán cerca del espejo debe pararse si quiere formar una imagen derecha de su barbilla que sea el doble del tamaño real de la barbilla?

16. Un espejo convexo tiene una longitud focal de 8.0 cm de magnitud. a) Si la imagen es virtual, ¿cuál es la ubicación del objeto para la cual la magnitud de la distancia de la imagen sea un tercio de la magnitud de la distancia del objeto? b) Encuentre la amplificación de la imagen y establezca si es derecha o invertida.
17. **M** En la intersección de los pasillos del hospital, un espejo esférico convexo es montado en lo alto de una pared para ayudar a las personas a evitar las colisiones. La magnitud de la radio del espejo de curvatura es 0.550 m. a) Localice la imagen de un paciente ubicada a 10.0 m del espejo. b) Indique si la imagen está derecha o invertida. c) Determine el tamaño de la imagen.
18. **C/C** Un espejo cóncavo tiene un radio de curvatura de 24.0 cm. a) Determine la posición del objeto para la cual la imagen resultante sea derecha y 3.00 el tamaño del objeto. b) Dibuje un diagrama de rayos para determinar la posición de la imagen. c) ¿La imagen es real o virtual?
19. **C/C** Un espejo esférico se usará para formar una imagen, cinco veces el alto de un objeto, sobre una pantalla colocada a 5.0 m del espejo. a) Describa el tipo de espejo requerido. b) ¿Dónde se debe colocar el espejo en relación con el objeto?
20. **C/C** Una bola se suelta desde el reposo 3.00 m directamente arriba del vértice de un espejo cóncavo que tiene un radio de 1.00 m y yace en un plano horizontal. a) Describa el movimiento de la imagen de la bola en el espejo. b) ¿En qué tiempo coinciden la bola y su imagen?

23.4 Imágenes formadas por refracción

21. Un bloque cúbico de hielo de 50.0 cm de arista se coloca en un piso a nivel sobre una mancha de polvo. Ubique la imagen de la mancha, cuando se ve directamente desde arriba, si el índice de refracción del hielo es 1.309.
22. Un pez de colores nada dentro de un recipiente de agua esférico con un índice de refracción $n = 1.333$. Supongamos que el pez de colores está $p = 10.0$ cm de la pared de un recipiente de radio $|R| = 15.0$ cm, como en la figura P23.22. Haga caso omiso de la refracción de la luz causada por la pared del recipiente, determine la distancia aparente de los peces de colores de la pared de acuerdo con un observador fuera del recipiente.

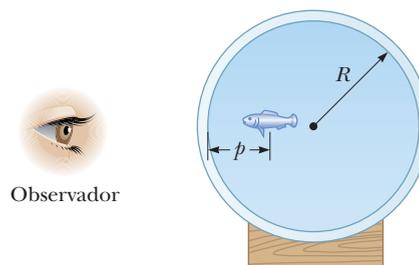


Figura P23.22

23. Un pisapapeles está hecho de un hemisferio sólido de vidrio con índice de refracción 1.50. El radio de la sección

transversal circular es de 4.0 cm. El hemisferio se coloca sobre su superficie plana, con el centro directamente sobre una línea de 2.5 mm de largo dibujada sobre una hoja de papel. ¿Qué longitud de la línea ve alguien que observa verticalmente hacia abajo sobre el hemisferio?

24. La parte superior de una alberca está a nivel del suelo. Si la alberca tiene 2.00 m de profundidad, ¿cuán lejos bajo el nivel del suelo parece ubicarse el fondo de la alberca cuando a) la alberca está completamente llena con agua y b) la alberca está llena a la mitad con agua?
25. Se observa que una esfera transparente de composición desconocida forma una imagen del Sol sobre su superficie opuesta al Sol. ¿Cuál es el índice refractivo del material de la esfera?
26. Una placa de vidrio ($n = 1.66$) descansa en el fondo del tanque de un acuario. La placa tiene 8.00 cm de grosor (dimensión vertical) y está cubierta con agua ($n = 1.33$) a una profundidad de 12.0 cm. Calcule el grosor aparente de la placa vista desde arriba del agua. (Suponga incidencia casi normal de los rayos de luz.)
27. **CIC** Una medusa flota en un acuario lleno con agua 1.00 m detrás de un panel plano de vidrio de 6.00 cm de grosor y con 1.50 de índice de refracción. a) ¿Dónde se ubica la imagen de la medusa? b) Repita el problema cuando el vidrio es tan delgado que su grosor se puede despreciar. c) ¿Cómo afecta el grosor del vidrio la respuesta al inciso a)?
28. **S** La figura P23.28 muestra una superficie curva que separa un material con índice de refracción n_1 de un material con índice de n_2 . La superficie forma una imagen I del objeto O . El rayo que se muestra en rojo pasa a través de la superficie a lo largo de una línea radial. Sus ángulos de incidencia y refracción son cero, por lo que su dirección no cambia en la superficie. Para el rayo que se muestra en azul, la dirección cambia de acuerdo con $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Para los rayos paraxiales, asumimos θ_1 y θ_2 son pequeños, por lo que se puede escribir $n_1 \tan \theta_1 = n_2 \tan \theta_2$. El aumento se define como $M = h'/h$. Demuestre que el aumento viene dado por $M = -n_1 q / n_2 p$.

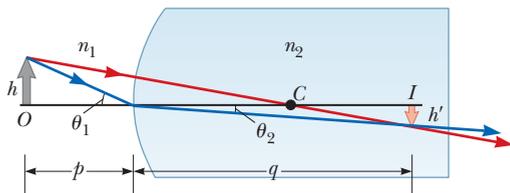


Figura P23.28

23.6 Lentes delgadas

29. **BIO** Un lente de contacto está hecho de plástico con un índice de refracción de 1.50. El lente tiene un radio de curvatura exterior de +2.00 cm y un radio de curvatura interior de +2.50 cm. ¿Cuál es la longitud focal de la lente?

30. Un objeto se coloca 50.0 cm de una pantalla. a) ¿Dónde debe colocarse una lente convergente de distancia focal 10.0 cm para formar una imagen en la pantalla? b) Determine la ampliación de la lente.
31. Una lente convergente tiene una longitud focal de 10.0 cm. Ubique las imágenes para distancias de objeto de a) 20.0 cm, b) 10.0 cm y c) 5.00 cm, si existen. Para cada caso, establezca si la imagen es real o virtual, derecha o invertida y encuentre la ampliación.
32. Un objeto se coloca 20.0 cm de un espejo esférico cóncavo tiene una distancia focal de magnitud 40.0 cm. a) Utilice papel cuadriculado para la construcción precisa de un diagrama de rayos para esta situación. b) A partir de su diagrama de rayos, determine la ubicación de la imagen. c) ¿Cuál es el tamaño de la imagen? d) Revise sus respuestas a los incisos b) y c) utilizando la ecuación del espejo.
33. Una lente divergente tiene una longitud focal de 20.0 cm. Ubique las imágenes para distancias de objeto de a) 40.0 cm, b) 20.0 cm y c) 10.0 cm. Para cada caso, establezca si la imagen es real o virtual y derecha o invertida y encuentre la ampliación.
34. **CIC** Una lente divergente tiene una longitud focal de 20.0 cm. Use papel gráfico para construir diagramas de rayos precisos para distancias de objeto de a) 40.0 cm y b) 10.0 cm. En cada caso determine la ubicación de la imagen a partir del diagrama y la ampliación de la imagen y establezca si la imagen es derecha o invertida. c) Estime la magnitud de incertidumbre en la ubicación de los puntos en la gráfica. ¿Sus respuestas y la incertidumbre son consistentes con las respuestas algebraicas que encontró en el problema 33?
35. Una diapositiva fotográfica transparente se coloca enfrente de una lente convergente con una longitud focal de 2.44 cm. La lente forma una imagen de la diapositiva a 12.9 cm de ella. ¿Cuán lejos está la lente de la diapositiva si la imagen es a) real, b) virtual?
36. La imagen de la moneda en la figura P23.36 tiene el doble de diámetro de la moneda cuando la lente está a 2.84 cm de ella. Determine la longitud focal de la lente.



Figura P23.36

37. Cierta proyector LCD contiene una sola lente delgada. Un objeto de 24.0 mm de alto se proyectará de modo que su imagen llene una pantalla de 1.80 m de alto. La

distancia objeto a pantalla es de 3.00 m. a) Determine la longitud focal de la lente de proyección. b) ¿Cuán lejos del objeto debe colocarse la lente del proyector para formar la imagen sobre la pantalla?

38. **M** Un objeto se encuentra 20.0 cm a la izquierda de una lente divergente que tiene una longitud focal $f = -32.0$ cm. Determine a) la ubicación y b) la ampliación de la imagen. c) Construya un diagrama de rayos para este arreglo.
39. Una lente convergente se coloca 30.0 cm a la derecha de una lente divergente con 10.0 cm de longitud focal. Un haz de luz paralela entra a la lente divergente desde la izquierda y el haz de nuevo es paralelo cuando sale de la lente convergente. Calcule la longitud focal de la lente convergente.
40. **C C S** a) Use la ecuación de lente delgada para deducir una expresión para q en términos de f y p . b) Pruebe que, para un objeto real y una lente divergente, la imagen siempre debe ser virtual. *Sugerencia:* Considere $f = -|f|$ y demuestre que q debe ser menor que cero bajo las condiciones dadas. c) Para un objeto real y lente convergente, ¿qué desigualdad que involucra a p y f debe sostenerse si la imagen debe ser real?
41. Dos lentes convergentes, cada una con longitud focal de 15.0 cm, se colocan separadas 40.0 cm, y un objeto se coloca a 30.0 cm enfrente de la primera lente. ¿Dónde se forma la imagen final y cuál es la ampliación del sistema?
42. El objeto O_1 está 15.0 cm a la izquierda de una lente convergente con una longitud focal de 10.0 cm. Una segunda lente se ubica 10.0 cm a la derecha de la primera lente y se observa que forma una imagen final en la posición del objeto original O_1 . a) ¿Cuál es la longitud focal de la segunda lente? b) ¿Cuál es la ampliación global del sistema? c) ¿Cuál es la naturaleza (es decir, real o virtual, derecha o invertida) de la imagen final?
43. **M** Un objeto de 1.00 cm de alto se coloca 4.00 cm a la izquierda de una lente convergente con longitud focal de 8.00 cm. Una lente divergente con longitud focal de -16.00 cm está 6.00 cm a la derecha de la lente convergente. Encuentre la posición y altura de la imagen final. ¿La imagen es invertida o derecha? ¿Real o virtual?
44. Dos lentes convergentes, que tienen longitudes focales de $f_1 = 10.0$ y $f_2 = 20.0$ cm, se colocan separadas $d = 50.0$ cm, como se muestra en la figura P23.44. La imagen final

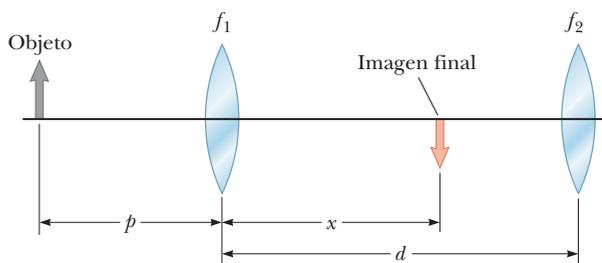


Figura P23.44

se ubicará entre las lentes, en la posición que se indica. a) ¿Cuán lejos de la primera lente se debe colocar el objeto? b) ¿Cuál es la ampliación global del sistema? c) ¿La imagen final es derecha o invertida?

45. La lente L_1 en la figura P23.45 tiene una longitud focal de 15.0 cm y se ubica a una distancia fija enfrente del plano de la película de una cámara. La lente L_2 tiene una longitud focal de 13.0 cm y su distancia d desde el plano de la película puede variar desde 5.00 hasta 10.0 cm. Determine el rango de distancias para las cuales los objetos se pueden enfocar sobre la película.
46. **PG** Un objeto se coloca a 15.0 cm de una primera lente convergente con longitud focal de 10.0 cm. Una segunda lente convergente, con longitud focal de 5.00 cm, se coloca 10.0 cm a la derecha de la primera lente convergente. a) Encuentre la posición q_1 de la imagen formada por la primera lente convergente. b) ¿Cuán lejos de la segunda lente está la imagen de la primera lente? c) ¿Cuál es el valor de p_2 , la posición del objeto para la segunda lente? d) Encuentre la posición q_2 de la imagen formada por la segunda lente. e) Calcule la ampliación de la primera lente. f) Calcule la ampliación de la segunda lente. g) ¿Cuál es la ampliación total para el sistema? h) ¿La imagen final es real o virtual? ¿Está derecha o invertida (comparada con el objeto original para el sistema de lentes)?

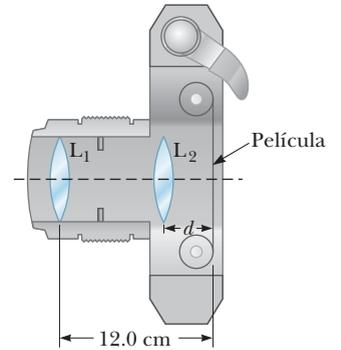


Figura P23.45

Problemas adicionales

47. Un objeto colocado a 10.0 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen real a 8.00 cm del espejo. Si el objeto se mueve hacia una nueva posición a 20.0 cm del espejo, ¿cuál es la posición de la imagen? ¿La imagen final es real o virtual?
48. **S** La distancia de un objeto real desde una lente convergente es cinco veces la longitud focal. a) Determine la ubicación de la imagen q en términos de la longitud focal f . b) Encuentre la ampliación de la imagen. c) ¿La imagen es real o virtual? ¿Es derecha o invertida? ¿La imagen está en el mismo lado de la lente que el objeto o en el lado opuesto?
49. Las magnitudes de los radios de curvatura son 32.5 cm y 42.5 cm para las dos caras de una lente bicóncava. El vidrio tiene un índice de refracción de 1.53 para la luz violeta y 1.51 para la luz roja. Para un objeto muy lejano, encuentre a) la imagen formada por la luz violeta y b) la imagen formada por la luz roja.
50. Una lente divergente ($n = 1.50$) tiene la forma que se muestra en la figura 23.25c. El radio de la primera superficie es 15.0 cm y la de la segunda superficie es 10.0 cm. a) Encuentre la longitud focal de la lente. Determine las

posiciones de la imagen para distancias de objeto de b) infinito, c) $3|f|$, d) $|f|$ y e) $|f|/2$.

- 51.** La lente y el espejo en la figura P23.51 están separadas por 1.00 m y tienen longitudes focales de +80.0 cm y -50.0 cm, respectivamente. Si un objeto se coloca 1.00 m a la izquierda de la lente, ¿dónde se ubicará la imagen final? Establezca si la imagen es derecha o invertida y determine la amplificación global.

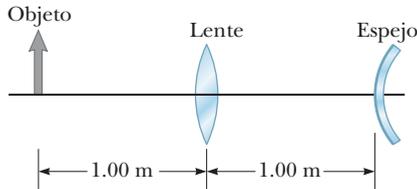


Figura P23.51

- 52.** El objeto en la figura P23.52 está a medio camino entre la lente y el espejo el cual está a una distancia $d = 25.0$ cm. El radio de curvatura del espejo es 20.0 cm y la lente tiene una longitud focal de -16.7 cm.
- Considerando sólo la luz que sale del objeto y viaja primero hacia el espejo, ubique la imagen final formada por este sistema.
 - ¿La imagen es real o virtual?
 - ¿Está derecha o invertida?
 - ¿Cuál es la amplificación global de la imagen?

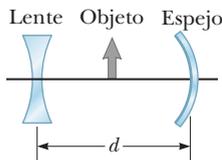


Figura P23.52

- 53.** Un haz paralelo de luz entra a un hemisferio de vidrio perpendicular a la cara plana, como se muestra en la figura P23.53. El radio del hemisferio es $R = 6.00$ cm y el índice de refracción es $n = 1.56$. Determine el punto donde el haz se enfoca. (Suponga rayos paraxiales; esto es, suponga que todos los rayos se ubican cerca del eje principal.)

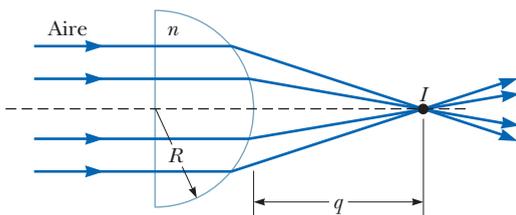


Figura P23.53

- 54.** Dos rayos que viajan en paralelo al eje principal golpean una gran lente plano-convexa que tiene un índice de refracción de 1.60 (figura P23.54). Si la cara convexa es esférica, un rayo cerca de la orilla no pasa por el punto focal (se produce la aberración esférica). Suponga que esta cara tiene un radio de curvatura de $R = 20.0$ cm y los dos rayos se encuentran a distancias $h_1 = 0.500$ cm y $h_2 = 12.0$ cm desde el eje principal. Determine el diferencial Δx en las posiciones donde cruza el eje principal.

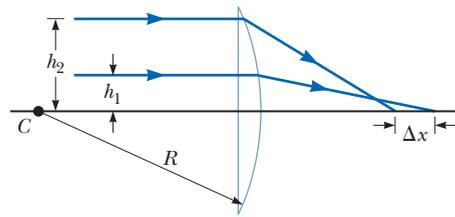


Figura P23.54

- 55.** Para resolver este problema, use el hecho de que la imagen formada por la primera superficie se convierte en el objeto para la segunda superficie. La figura P23.55 muestra una pieza de vidrio con índice de refracción $n = 1.50$. Los extremos son hemisferios con radios de $R_1 = 2.00$ cm y $R_2 = 4.00$ cm y los centros de los extremos hemisféricos están separados por una distancia de $d = 8.00$ cm. Un objeto puntual está en aire, a una distancia $p = 1.00$ cm del extremo izquierdo del vidrio.
- Ubique la imagen del objeto debida a refracción en las dos superficies esféricas.
 - ¿La imagen es real o virtual?

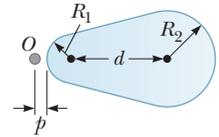


Figura P23.55

- 56.** **S** Considere dos lentes delgadas, una con longitud focal f_1 y la otra con longitud focal f_2 , colocadas en contacto mutuo, como se muestra en la figura P23.56. Aplique la ecuación de lentes delgadas a cada una de estas lentes y combine los resultados para demostrar que esta combinación de lentes se comporta como una lente delgada que tiene una longitud focal f dada por $1/f = 1/f_1 + 1/f_2$. Suponga que el grosor de la lente se puede despreciar en comparación con las otras distancias involucradas.

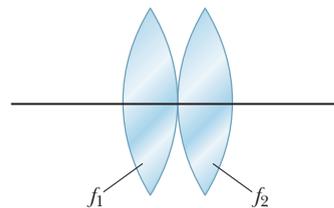


Figura P23.56

- 57.** Un objeto de 2.00 cm de alto se coloca 40.0 cm a la izquierda de una lente convergente que tiene una longitud focal de 30.0 cm. Una lente divergente que tiene una longitud focal de -20.0 cm se coloca 110 cm a la derecha de la lente convergente.
- Determine la posición final y la amplificación de la imagen final.
 - ¿La imagen es derecha o invertida?
 - Repita los incisos a) y b) para el caso donde la segunda lente es una lente convergente que tiene una longitud focal de +20.0 cm.

- 58.** Una ilusión de "fresa flotante" se puede producir mediante dos espejos parabólicos, cada uno con una longitud focal de 7.5 cm, enfrentados mutuamente de modo que sus centros están separados 7.5 cm (figura P23.58). Si una fresa se coloca en el espejo inferior, la imagen de

la fresa se forma en la pequeña apertura en el centro del espejo superior. Demuestre que la imagen final se forma en dicha ubicación y describa sus características. *Nota:* Un haz de linterna que brille sobre estas imágenes tiene un efecto muy sorprendente: incluso en un ángulo oblicuo, ¡el haz de luz entrante aparentemente se refleja de las imágenes de la fresa! ¿Entiende usted por qué?

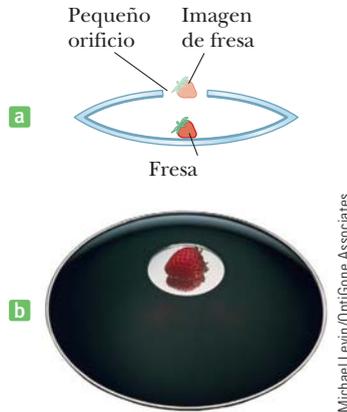


Figura P23.58

59. La figura P23.59 muestra una lente convergente con radios $R_1 = 9.00$ cm y $R_2 = -11.00$ cm, frente a un espejo esférico cóncavo de radio $R = 8.00$ cm. También se muestran los puntos focales (F_1 y F_2) para la lente delgada y el centro de curvatura (C) del espejo. a) Si los puntos focales F_1 y F_2 están a 5.00 cm del vértice de la lente delgada, ¿cuál es el índice de refracción de la lente? b) Si la lente y el espejo están separados 20.0 cm y un objeto se coloca 8.00 cm a la izquierda de la lente, ¿cuál es la posición de la imagen final y su amplificación vista por el ojo en la figura? c) ¿La imagen final está invertida o derecha? Explique.

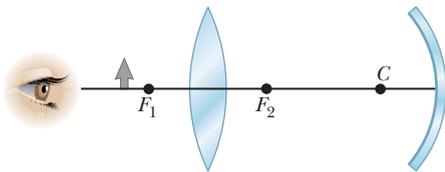


Figura P23.59

60. **S** Encuentre las distancias de objeto (en términos de f) para una lente delgada convergente con longitud focal F si a) la imagen es real y la distancia de la imagen es cuatro veces la longitud focal y b) la imagen es virtual y la distancia de la imagen es tres veces la longitud focal. c) Calcule la amplificación de la lente para los casos a) y b).
61. La ecuación del fabricante de lentes para una lente con índice n_1 sumergido en un medio con índice n_2 toma la forma

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Una lente divergente delgada de vidrio (índice = 1.50), con $R_1 = -3.00$ m y $R_2 = -6.00$ m, está rodeada con aire. Una flecha se coloca 10.0 m a la izquierda de la lente. a) Determine la posición de la imagen. Repita el inciso a) con la flecha y la lente sumergidos en b) agua (índice = 1.33) c) un medio con un índice de refracción de 2.00. d) ¿Cómo puede una lente que es divergente en aire, cambiar a una lente convergente?

62. Un observador a la derecha de la combinación espejo-lente que se muestra en la figura P23.62 ve dos imágenes reales que son del mismo tamaño y están en la misma ubicación. Una imagen es derecha y la otra invertida. Ambas imágenes son 1.50 veces más grandes que el objeto. La lente tiene una longitud focal de 10.0 cm. La lente y el espejo están separados por 40.0 cm. Determine la longitud focal del espejo. (No suponga que la figura se dibuja a escala.)

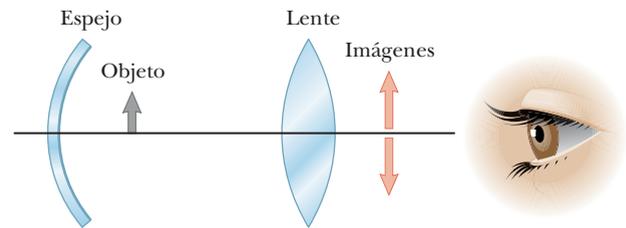


Figura P23.62

63. La ecuación del fabricante de lentes se aplica a una lente sumergida en un líquido si n en la ecuación se sustituye por n_1/n_2 . Aquí n_1 se refiere al índice de refracción del material de la lente y n_2 es el del medio que rodea a la lente. a) Cierta lente tiene longitud focal de 79.0 cm en aire y un índice de refracción de 1.55. Encuentre su longitud focal en agua. b) Cierta lente tiene longitud focal de 79.0 cm en agua. Encuentre su longitud focal en aire.
64. Un cierto adorno del árbol de Navidad es una esfera de plata con un diámetro de 8.50 cm. a) Si el tamaño de una imagen creada por el reflejo en el ornamento es tres cuartas partes la magnitud real del objeto reflejado, determine la ubicación del objeto. b) Utilice un diagrama de rayos para determinar si la imagen es vertical o invertida.
65. **M** Una esfera de vidrio ($n = 1.50$) con un radio de 15.0 cm tiene una pequeña burbuja de aire 5.00 cm por encima de su centro. La esfera es vista hacia abajo a lo largo del radio extendido que contiene la burbuja. ¿Cuál es la profundidad aparente de la burbuja debajo de la superficie de la esfera?
66. Un objeto 10.0 cm de altura se coloca en la marca de cero de una cinta de medir. Un espejo esférico situado en algún punto de la cinta crea una imagen del objeto que está en posición vertical, a 4.00 cm de altura, y situado en la marca de 42.0 cm de la cinta de medir. a) ¿El espejo es convexo o cóncavo? b) ¿Dónde está el espejo? c) ¿Cuál es la longitud focal del espejo?

Los colores en muchas de las plumas de los colibríes no se deben a pigmentos. La *iridiscencia* que forma los brillantes colores que con frecuencia aparecen en la garganta y vientre de esta ave se debe a un efecto de interferencia causado por estructuras en las plumas. Los colores varían con el ángulo de visión.

RO-MA/Index Stock Imagery



24

Óptica ondulatoria

- 24.1 Condiciones para interferencia
- 24.2 Experimento de doble rendija de Young
- 24.3 Cambio de fase debido a reflexión
- 24.4 Interferencia en películas delgadas
- 24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD
- 24.6 Difracción
- 24.7 Difracción de una sola rendija
- 24.8 La rejilla de difracción
- 24.9 Polarización de ondas de luz

Los colores giran en una pompa de jabón mientras están a la deriva en el aire en un día de verano y vívidos arco iris se reflejan desde la suciedad de las películas de aceite en los charcos de una sucia calle de la ciudad. Los turistas de las playas, cubiertos con delgadas capas de aceite, usan sus gafas para el Sol recubiertas que absorben la mitad de la luz entrante. En los laboratorios, los científicos determinan la composición precisa de los materiales al analizar la luz que emiten cuando se calientan y en observatorios alrededor del mundo, los telescopios recopilan luz de galaxias distantes, filtran longitudes de onda individuales en bandas y de este modo determinan la velocidad de expansión del Universo.

Comprender cómo se forman estos arco iris y cómo ciertos instrumentos científicos pueden determinar las longitudes de onda es el dominio de la óptica ondulatoria. La luz se puede ver como partícula o como onda. La óptica geométrica, el tema del capítulo anterior, depende de la naturaleza corpuscular de la luz. La óptica ondulatoria depende de la naturaleza ondulatoria de la luz. Los tres temas principales que examinaremos en este capítulo son interferencia, difracción y polarización. Estos fenómenos no se pueden explicar de manera adecuada con la óptica de rayos, pero se pueden entender si la luz es vista como una onda.

24.1 Condiciones para interferencia

En el estudio de la interferencia de ondas mecánicas del capítulo 13, encontramos que dos ondas podían sumarse constructiva o destructivamente. En la interferencia constructiva la amplitud de la onda resultante es mayor que la de cualquiera de las ondas individuales, mientras que en la interferencia destructiva, la amplitud resultante es menor que la de cualquiera onda individual. Las ondas de luz también interfieren unas con otras. Es fundamental

saber que toda la interferencia asociada con las ondas de luz surge cuando se combinan los campos electromagnéticos que constituyen las ondas individuales.

Los efectos de interferencia en las ondas de luz no son fáciles de observar debido a las cortas longitudes de onda involucradas (aproximadamente 4×10^{-7} m a más o menos 7×10^{-7} m). Sin embargo, las dos condiciones siguientes facilitan la observación de interferencia entre dos fuentes de luz:

1. Las fuentes son **coherentes**, lo cual significa que las ondas que emiten deben mantener una fase constante una con respecto a la otra.
2. Las ondas tienen longitudes de onda idénticas.

◀ Condiciones para interferencia

Para crear interferencia se necesitan dos fuentes (que producen dos ondas viajeras). Para producir un patrón de interferencia estable, las ondas individuales deben mantener una fase constante una con otra. Cuando esta situación prevalece, se dice que las fuentes son coherentes. Las ondas sonoras emitidas por dos bocinas lado a lado, activadas por un solo amplificador pueden producir interferencia porque las dos bocinas responden al amplificador en la misma forma al mismo tiempo: están en fase.

Sin embargo, si dos fuentes de luz se colocan lado a lado, no se observan efectos de interferencia porque las ondas de luz provenientes de una fuente se emiten de manera independiente de las ondas de la otra fuente; por lo tanto, las emisiones de las dos fuentes no mantienen una relación de fase constante mutua durante el tiempo de observación. Una fuente de luz ordinaria experimenta cambios aleatorios aproximadamente una vez cada 10^{-8} s. En consecuencia, las condiciones para interferencia constructiva, interferencia destructiva y estados intermedios tienen duraciones en el orden de 10^{-8} s. El resultado es que no se observan efectos de interferencia porque el ojo no puede seguir tales cambios a corto plazo. Se dice que las fuentes de luz ordinarias son **incoherentes**.

Un antiguo método para producir dos fuentes de luz coherentes es pasar luz de una fuente con una sola longitud de onda (monocromática) a través de una estrecha rendija y luego permitir que la luz caiga sobre una pantalla que contiene otras dos rendijas estrechas. La primera rendija se necesita para crear un solo frente de onda que ilumine ambas rendijas de manera coherente. La luz que sale de las dos rendijas es coherente porque una sola fuente produce el haz de luz original y las rendijas sólo sirven para separar el haz original en dos partes. Cualquier cambio aleatorio en la luz emitida por la fuente ocurrirá en los dos haces separados al mismo tiempo, y se pueden observar efectos de interferencia.

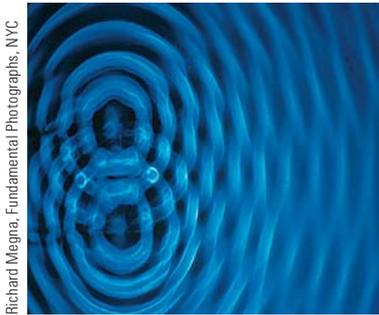
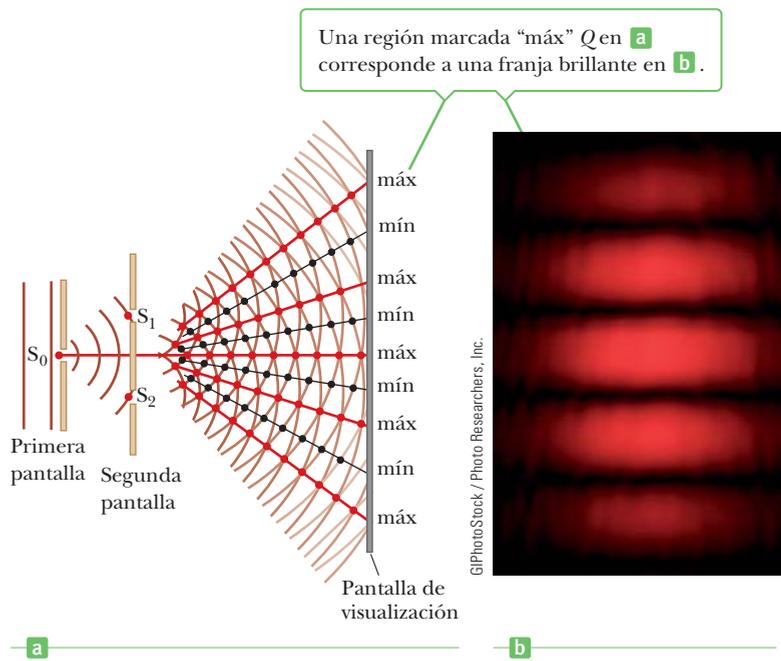
En la actualidad es mucho más común usar un láser como fuente coherente para demostrar interferencia. Un láser produce un intenso haz monocromático coherente sobre un ancho de varios milímetros. Por lo tanto, el láser puede usarse para iluminar múltiples rendijas de forma directa y los efectos de interferencia se pueden observar con facilidad en una habitación iluminada por completo. Los principios de operación de un láser se explican en el capítulo 28.

24.2 Experimento de doble rendija de Young

Thomas Young fue el primero en demostrar la interferencia en las ondas de luz a partir de dos fuentes en 1801. La figura activa 24.1a (página 826) es un diagrama esquemático del aparato que usó en este experimento. (En sus experimentos originales, Young usó orificios de alfiler en lugar de rendijas.) La luz incide sobre una pantalla que contiene una estrecha rendija S_0 . Las ondas de luz que salen de esta rendija llegan a una segunda pantalla que contiene dos estrechas rendijas paralelas S_1 y S_2 . Estas rendijas sirven como un par de fuentes de luz coherente porque las ondas que salen de ellas se originaron del mismo frente de onda y por lo tanto siempre están en fase. La luz proveniente de las dos rendijas produce un patrón visible sobre la pantalla C que consiste en una serie de bandas paralelas brillantes y oscuras llamadas **franja** (figura activa 24.1b). Cuando la luz proveniente de las rendijas S_1 y S_2 llega a un punto sobre la pantalla de modo que ocurre interferencia constructiva en dicha posición, aparece una franja brillante. Cuando la luz proveniente de las dos rendijas se combina de manera destructiva en cualquier posición sobre la pantalla,

Figura activa 24.1

a) Diagrama de experimento de doble rendija de Young. Las rendijas estrechas actúan como fuentes de ondas. Las rendijas S_1 y S_2 se comportan como fuentes coherentes que producen un patrón de interferencia sobre la pantalla C. (El dibujo no está a escala.) b) El patrón de franjas que se forma sobre la pantalla C podría parecerse a éste.



Richard Megna, Fundamental Photographs, NYC

Figura 24.2 Un patrón de interferencia que involucra ondas de agua se produce mediante dos fuentes vibratorias en la superficie del agua. El patrón es análogo al que se observa en el experimento de doble rendija de Young. Observe las regiones de interferencia constructiva y destructiva.

resulta una franja oscura. La figura 24.2 es una fotografía de un patrón de interferencia producido por dos fuentes vibratorias coherentes en un tanque de agua.

La figura 24.3 es un diagrama esquemático de algunas de las formas en las que las dos ondas pueden combinarse en la pantalla C de la figura 24.1. En la figura 24.3a dos ondas, que salen de las dos rendijas en fase, golpean la pantalla en el punto central P . Puesto que estas ondas recorren iguales distancias, llegan en fase a P y como resultado ahí ocurre interferencia constructiva y se observa una franja brillante. En la figura 24.3b las dos ondas de luz de nuevo parten en fase, pero la onda superior tiene que recorrer una longitud de onda mayor para llegar al punto Q sobre la pantalla. Puesto que la onda superior cae abajo de la onda inferior por exactamente una longitud de onda, las dos ondas todavía llegan en fase a Q de modo que en dicha ubicación aparece una segunda franja brillante. Ahora considere el punto R , a la mitad entre P y Q , en la figura 24.3c. En R , la onda superior cae media longitud de onda detrás de la onda inferior. Esto significa que el valle de la onda inferior se traslapa con la cresta de la onda superior, lo que da lugar a interferencia destructiva. Como resultado, en R se puede observar una franja oscura.

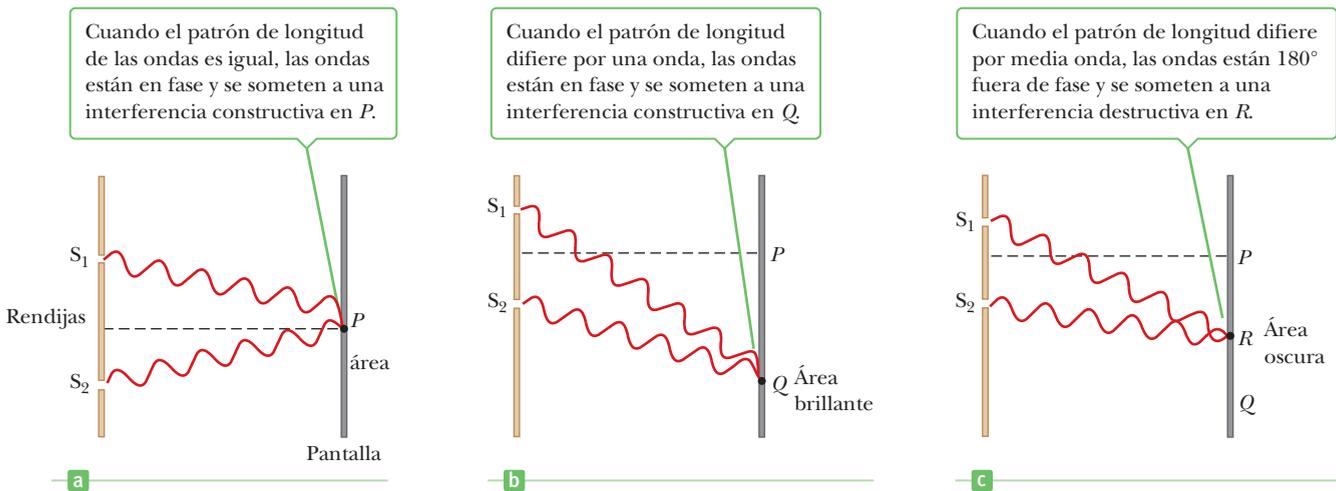


Figura 24.3 Ondas que dejan las rendijas y se combinan en varios puntos en la pantalla de visualización. (Estas figuras no se dibujan a escala.)

Con ayuda de la figura 24.4 se puede describir de manera cuantitativa el experimento de Young. Considere el punto P sobre la pantalla de visualización; la pantalla se coloca a una distancia perpendicular L desde la pantalla que contiene las rendijas S_1 y S_2 , que están separadas una distancia d , y r_1 y r_2 son las distancias que recorren las ondas secundarias desde la rendija hasta la pantalla. Suponga que las ondas que salen de S_1 y S_2 tienen la misma frecuencia constante, tienen la misma amplitud y parten en fase. La intensidad de luz sobre la pantalla en P es resultado de la luz de ambas rendijas. Sin embargo, una onda de la rendija inferior recorre más distancia que una onda de la rendija superior por la cantidad $d \sen \theta$. Esta distancia se llama **diferencia de trayectoria** δ (delta minúscula), donde

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sen \theta \quad [24.1]$$

◀ Diferencia de trayectoria

La ecuación 24.1 supone que las dos ondas viajan en líneas paralelas, lo que es aproximadamente cierto porque L es mucho mayor que d . Como ya se anotó, el valor de esta diferencia de trayectoria determina si las dos ondas están en fase cuando llegan a P . Si la diferencia de trayectoria es cero o algún múltiplo entero de longitud de onda, las dos ondas están en fase en P y resulta interferencia constructiva. Por lo tanto, la condición para franjas brillantes o **interferencia constructiva** en P es

$$\delta = d \sen \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.2]$$

◀ Condición para interferencia constructiva (dos rendijas)

El número m se llama **número de orden**. La franja brillante central en $\theta_{\text{brillante}} = 0$ ($m = 0$) se llama *máximo de orden cero*. El primer máximo en cualquier lado, donde $m = \pm 1$, se llama *máximo de primer orden* y así por el estilo.

Cuando δ es un múltiplo par de $\lambda/2$, las dos ondas que llegan a P están 180° fuera de fase y dan lugar a interferencia destructiva. Por lo tanto, la condición para franjas oscuras o **interferencia destructiva** en P es

$$\delta = d \sen \theta_{\text{oscura}} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.3]$$

◀ Condición para interferencia destructiva (dos rendijas)

Si $m = 0$ en esta ecuación, la diferencia de trayectoria es $\delta = \lambda/2$, que es la condición para la ubicación de la primera franja oscura en cualquier lado del máximo central (brillante). Del mismo modo, si $m = 1$, la diferencia de trayectoria es $\delta = 3\lambda/2$, que es la condición para la segunda franja oscura en cada lado, etcétera.

Es útil obtener expresiones para las posiciones de las franjas brillantes y oscuras, medidas verticalmente desde O hasta P . Además del supuesto de que $L \gg d$, se considera $d \gg \lambda$. Estos supuestos pueden ser válidos porque, en la práctica, L con frecuencia está en el orden de 1 m, d es una fracción de milímetro y λ es una fracción de un micrómetro de luz visible. Bajo estas condiciones, θ es pequeño, así que se puede usar la aproximación $\sen \theta \cong \tan \theta$. Entonces, a partir del triángulo OPQ en la figura 24.4, vemos que

$$y = L \tan \theta \approx L \sen \theta \quad [24.4]$$

Tip 24.1 Aproximación de ángulo pequeño: ¡el tamaño importa!

La aproximación de ángulo pequeño $\sen \theta \cong \tan \theta$ es cierta a una precisión de tres dígitos sólo para ángulos menores de aproximadamente 4° .

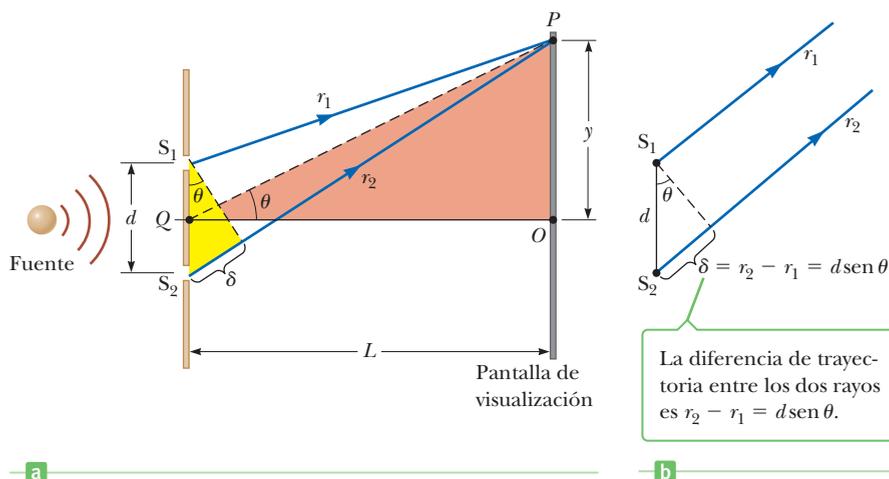


Figura 24.4 Construcción geométrica que describe el experimento de doble rendija de Young. (Esta figura no se dibuja a escala.)

La diferencia de trayectoria entre los dos rayos es $r_2 - r_1 = d \sen \theta$.



En esta fotografía aérea de olas en el océano se pueden ver reflexión, interferencia y difracción.

Al resolver la ecuación 24.2 para $\sin \theta$ y sustituir el resultado en la ecuación 24.4, encontramos que las posiciones para las *franjas brillantes*, medidas desde O , son

$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.5]$$

Al usar las ecuaciones 24.3 y 24.4, encontramos que las *franjas oscuras* se ubican en

$$y_{\text{oscura}} = \frac{\lambda L}{d} \left(m + \frac{1}{2}\right) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.6]$$

Como lo mostraremos en el ejemplo 24.1, el experimento de doble rendija de Young proporciona un método para medir la longitud de onda de la luz. De hecho, Young usó esta técnica para hacer justo eso. Además, su experimento dio al modelo ondulatorio de la luz una mayor cantidad de credibilidad. Era inconcebible que partículas de luz que pasaban a través de las rendijas se pudieran cancelar de manera mutua en una forma que explicaría las franjas oscuras.

■ FÍSICA APLICADA 24.1 Un humeante experimento de Young

Considere un experimento de doble rendija en el que un haz láser pasa a través de un par de rendijas cercanamente espaciadas y un claro patrón de interferencia se despliega sobre una pantalla distante. Ahora suponga que coloca partículas de humo entre la doble rendija y la pantalla. Con la presencia de las partículas de humo, ¿podrá ver los efectos de interferencia en el espacio entre las rendijas y la pantalla, o sólo verá los efectos sobre la pantalla?

EXPLICACIÓN Verá el patrón de interferencia tanto en la pantalla como en el área llena con humo entre las rendijas y la pantalla. Habrá líneas brillantes que se dirigen hacia las áreas brillantes sobre la pantalla y líneas oscuras que se dirigen hacia las áreas oscuras sobre la pantalla. Esto es porque las ecuaciones 24.5 y 24.6 dependen de la distancia a la pantalla, L , que puede tomar cualquier valor. ■

■ FÍSICA APLICADA 24.2 Interferencia de señal de televisión

Suponga que mira televisión por medio de una antena en lugar de un sistema por cable. Si un avión vuela cerca de su ubicación, quizá note imágenes fantasma que tiemblan en la pantalla del televisor. ¿Qué puede causar este fenómeno?

EXPLICACIÓN La antena de su televisor recibe dos señales: la señal directa desde la antena de transmisiones y una señal

que se refleja de la superficie del avión. Conforme el avión cambia de posición, existen algunos momentos en los que estas dos señales están en fase y otros momentos cuando están fuera de fase. Como resultado, variará la intensidad de la señal combinada que recibe la antena. El temblor de las imágenes fantasma de la imagen es la evidencia de esta variación. ■

■ Examen rápido

24.1 En un patrón de interferencia de doble rendija que se proyecta sobre una pantalla, ¿las franjas están equitativamente espaciadas sobre la pantalla a) en todas partes, b) sólo para ángulos grandes o c) sólo para ángulos pequeños?

24.2 Si la distancia entre las rendijas se duplica en el experimento de Young, ¿qué sucede con el ancho del máximo central? a) El ancho se duplica. b) El ancho no cambia. c) El ancho se reduce a la mitad.

24.3 Un experimento de doble rendija de Young se realiza con tres diferentes colores de luz: rojo, verde y azul. Clasifique los colores por la distancia entre franjas brillantes adyacentes, de menor a mayor. a) rojo, verde, azul; b) verde, azul, rojo; y c) azul, verde, rojo.

■ EJEMPLO 24.1 Medición de la longitud de onda de una fuente de luz

OBJETIVO Demuestre cómo se puede usar el experimento de Young para medir la longitud de onda de luz coherente.

PROBLEMA Una pantalla está separada 1.20 m de una fuente de doble rendija. La distancia entre las dos rendijas es de 0.030 0 mm. La franja brillante de segundo orden ($m = 2$) se mide en 4.50 cm desde la línea central. Determine **a)** la longitud de onda de la luz y **b)** la distancia entre franjas brillantes.

ESTRATEGIA La ecuación 24.5 relaciona las posiciones de las franjas brillantes con las otras variables, incluida la longitud de onda de la luz. Sustituya en esta ecuación y resuelva para λ . Al tomar la diferencia entre y_{m+1} y y_m se obtiene una expresión general para la distancia entre franjas brillantes.

SOLUCIÓN

a) Determine la longitud de onda de la luz.

Resuelva la ecuación 24.5 para la longitud de onda y sustituya los valores $m = 2$, $y_2 = 4.50 \times 10^{-2} \text{ m}$, $L = 1.20 \text{ m}$ y $d = 3.00 \times 10^{-5} \text{ m}$:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{y_2 d}{mL} = \frac{(4.50 \times 10^{-2} \text{ m})(3.00 \times 10^{-5} \text{ m})}{2(1.20 \text{ m})} \\ &= 5.63 \times 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{563 \text{ nm}}\end{aligned}$$

b) Determine la distancia entre franjas brillantes adyacentes.

Use la ecuación 24.5 para encontrar la distancia entre *cualquier* franja brillante adyacente (aquí, las caracterizadas mediante m y $m + 1$):

$$\begin{aligned}\Delta y &= y_{m+1} - y_m = \frac{\lambda L}{d} (m + 1) - \frac{\lambda L}{d} m = \frac{\lambda L}{d} \\ &= \frac{(5.63 \times 10^{-7} \text{ m})(1.20 \text{ m})}{3.00 \times 10^{-5} \text{ m}} = \mathbf{2.25 \text{ cm}}\end{aligned}$$

COMENTARIOS Este cálculo depende de que el ángulo θ sea pequeño, porque se usó de manera implícita la aproximación de ángulo pequeño. La medición de la posición de las franjas brillantes produce la longitud de onda de la luz, que a su vez es una firma de los procesos atómicos, como se analizará en los capítulos acerca de física moderna. En consecuencia, este tipo de medición ayuda a abrir el mundo del átomo.

PREGUNTA 24.1 Verdadero o Falso: Una rendija más grande crea una separación más grande entre las franjas de interferencia.

EJERCICIO 24.1 Suponga que el mismo experimento se realiza con una fuente de luz diferente. Si el máximo de primer orden se encuentra en 1.85 cm desde la línea central, ¿cuál es la longitud de onda de la luz?

RESPUESTA 463 nm

24.3 Cambio de fase debido a reflexión

El método de Young para producir dos fuentes de luz coherentes involucra iluminar un par de rendijas con una sola fuente. Otro arreglo simple, aunque ingenioso, para producir un patrón de interferencia con una sola fuente de luz se conoce como *espejo de Lloyd*. Una fuente puntual de luz se coloca en el punto S cerca de un espejo, como se ilustra en la figura 24.5. Las ondas de luz pueden llegar al punto de vista P o mediante la ruta directa SP o por la trayectoria que involucra reflexión del espejo. El rayo reflejado se puede tratar como un rayo que se origina en la fuente S' detrás del espejo. La fuente S' , que es la imagen de S , se puede considerar una fuente virtual.

En puntos alejados de la fuente, se observa un patrón de interferencia debido a ondas desde S y S' , tal como para dos fuentes coherentes reales. Sin embargo, las posiciones de las franjas oscuras y brillantes se *invierten* en relación con el patrón que se obtiene de dos fuentes coherentes reales (experimento de Young). Esto se debe a que las fuentes coherentes S y S' difieren en fase por 180° , un cambio de fase producto de la reflexión.

Para ilustrar el punto todavía más, considere P' , como el punto donde el espejo interseca la pantalla. Este punto es equidistante de S y S' . Si la diferencia de trayectoria sola fuese responsable de las diferencias de fase, en P' se observaría una franja brillante (porque la diferencia de trayectoria es cero para este punto), que corresponde a la franja central del patrón de interferencia de dos rendijas. En vez de ello, se observa una franja *oscura* en P' , de lo cual concluimos que se debe producir un cambio de fase de 180° por reflexión del espejo. En general, **una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión desde un medio que tenga un índice de refracción más alto que el del medio donde viaja la onda.**

Es posible extraer una analogía entre las ondas de luz reflejadas y las reflexiones de una onda transversal sobre una cuerda estirada cuando la onda encuentra una frontera, como en la figura 24.6. El pulso reflejado sobre una cuerda experimenta un cambio de

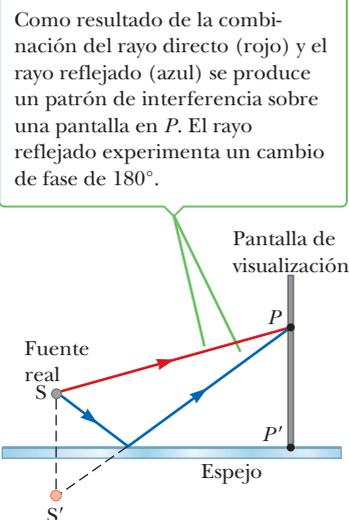


Figura 24.5 Espejo de Lloyd.

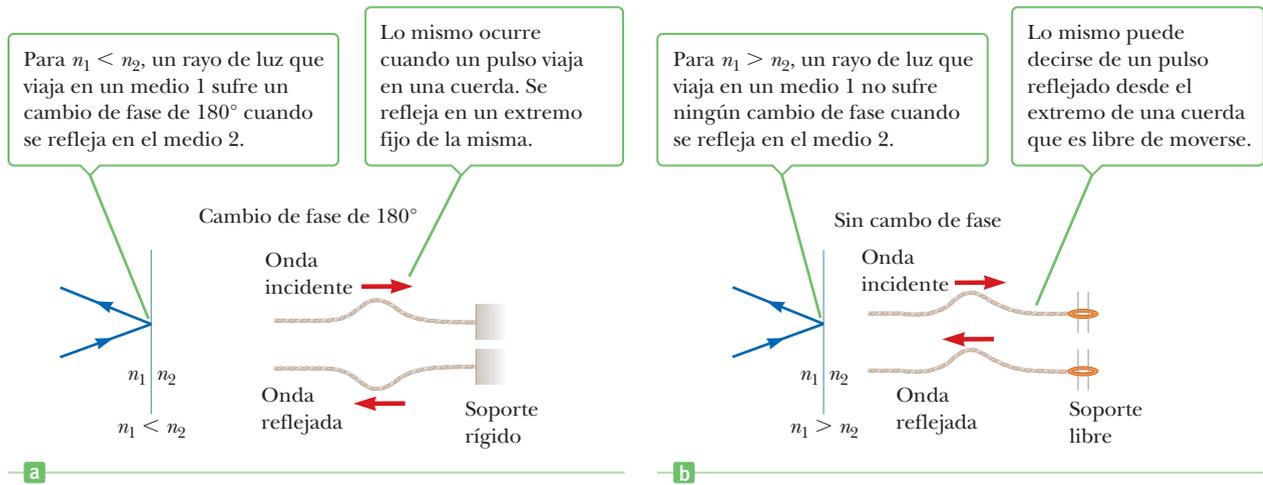


Figura 24.6 Comparaciones de las reflexiones de las ondas de luz y las ondas en las cuerdas.

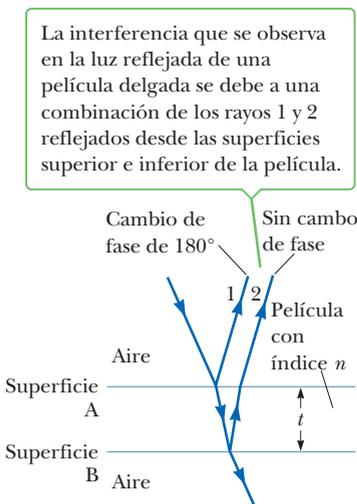


Figura 24.7 Luz que pasa a través de una película delgada.

fase de 180° cuando se refleja de la frontera de una cuerda más densa o de una barrera rígida y no experimenta cambio de fase cuando se refleja de la frontera de una cuerda menos densa. De igual modo, una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° cuando se refleja de la frontera de un medio con índice de refracción mayor que el del medio donde viaja. No hay cambio de fase cuando la onda se refleja de una frontera que conduce a un medio de menor índice de refracción. La onda transmitida que cruza la frontera tampoco experimenta cambio de fase.

24.4 Interferencia en películas delgadas

Los efectos de interferencia comúnmente se observan en películas delgadas, como la delgada superficie de una pompa de jabón o capas delgadas de aceite sobre agua. Los variados colores que se observan cuando luz blanca incoherente incide sobre tales películas resultan de la interferencia de las ondas reflejadas de las dos superficies de la película.

Considere una película de grosor uniforme t e índice de refracción n , como en la figura 24.7. Suponga que los rayos de luz que viajan en aire son casi normales a las dos superficies de la película. Para determinar si los rayos reflejados interfieren constructiva o destructivamente, observe primero los siguientes hechos:

1. Una onda electromagnética que viaja desde un medio con índice de refracción n_1 hacia un medio con índice de refracción n_2 experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión cuando $n_2 > n_1$. No hay cambio de fase en la onda reflejada si $n_2 < n_1$.
2. La longitud de onda de la luz λ_n en un medio con índice de refracción n es

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad [24.7]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz en el vacío.

Aplique estas reglas a la película de la figura 24.7. De acuerdo con la primera regla, el rayo 1, que se refleja de la superficie superior A, experimenta un cambio de fase de 180° con respecto a la onda incidente. El rayo 2, que se refleja de la superficie inferior B, no experimenta cambio de fase con respecto a la onda incidente. Por lo tanto, el rayo 1 está 180° fuera de fase con respecto al rayo 2, que es equivalente a una diferencia de trayectoria de $\lambda_n/2$. Sin embargo, también se debe considerar que el rayo 2 recorre una distancia adicional de $2t$ antes de que las ondas se recombinen en el aire sobre la superficie. Por ejemplo,



Los colores observados en las pompas de jabón en agua se deben a interferencia entre los rayos de luz reflejados de las superficies frontal y posterior de la delgada película de jabón que constituye la burbuja. El color depende del grosor de la película, que varía de negro donde la película es más delgada, a magenta donde es más gruesa.

si $2t = \lambda_n/2$, los rayos 1 y 2 se recombinan en fase y resulta interferencia constructiva. En general, la condición para *interferencia constructiva* en película delgada es

$$2t = (m + \frac{1}{2})\lambda_n \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.8]$$

Esta condición toma en consideración dos factores: 1) la diferencia en longitud de trayectoria para los dos rayos (el término $m\lambda_n$) y 2) el cambio de fase de 180° en la reflexión (el término $\lambda_n/2$). Puesto que $\lambda_n = \lambda/n$, la ecuación 24.8 se puede escribir en la forma

$$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.9]$$

Si la distancia adicional $2t$ recorrida por el rayo 2 es un múltiplo de λ_n , las dos ondas se combinan fuera de fase y el resultado es interferencia destructiva. La ecuación general para *interferencia destructiva* en película delgada es

$$2nt = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad [24.10]$$

Las ecuaciones 24.9 y 24.10 para interferencia constructiva y destructiva son válidas cuando sólo hay una inversión de fase. Esto ocurrirá cuando los medios arriba y abajo de la película delgada tienen ambos índices de refracción mayores que la película o cuando ambos tienen índices de refracción menores que la película. La figura 24.7 es un ejemplo: el aire ($n = 1$) que está tanto arriba como abajo de la película tiene un índice de refracción menor que el de la película. Como resultado, hay una inversión de fase en la reflexión de la capa superior de la película, mas no del fondo y aplican las ecuaciones 24.9 y 24.10. **Si la película se coloca entre dos medios diferentes, uno de menor índice refractivo que la película y uno de mayor índice refractivo, las ecuaciones 24.9 y 24.10 se invierten: la ecuación 24.9 se usa para interferencia destructiva y la ecuación 24.10 para interferencia constructiva.** En este caso existe un cambio de fase de 180° tanto para el rayo 1 que se refleja de la superficie A como para el rayo 2 que se refleja de la superficie B, como en la figura 24.9 del ejemplo 24.3 o no hay cambio de fase para algún rayo, que sería el caso si el rayo incidente proviene de abajo de la película. Por lo tanto, el cambio neto en fase relativa debido a las reflexiones es *cero*.



Una película delgada de aceite sobre agua muestra interferencia, lo que se evidencia mediante el patrón de colores cuando luz blanca incide sobre la película. Las variaciones en el grosor de la película producen el patrón de color que interseca. La navaja de rasurar proporciona una idea del tamaño de las bandas coloridas.

Examen rápido

24.4 Suponga que el experimento de Young se realiza en aire y entonces, en un segundo experimento, el aparato se sumerge en agua. ¿En qué forma cambia la distancia entre franjas brillantes? a) Se separan más. b) Se acercan más. c) No cambian.

Tip 24.2 Los dos trucos de las películas delgadas
Asegúrese de incluir *ambos* efectos, longitud de trayectoria y cambio de fase, cuando analice un patrón de interferencia de una película delgada.

Anillos de Newton

Otro método para observar interferencia en ondas de luz es colocar una lente plano-convexa encima de una superficie de vidrio plana, como en la figura 24.8a. Con este arreglo, la película de aire entre las superficies de vidrio varía en grosor desde cero en el punto de

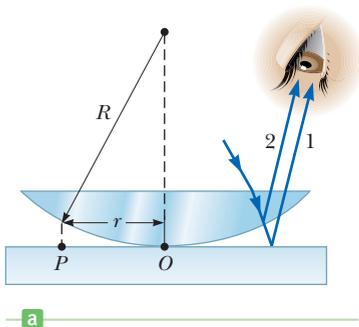


Figura 24.8 a) La combinación de rayos reflejados de la placa de vidrio y la superficie curva de la lente da lugar a un patrón de interferencia conocido como anillos de Newton. b) Fotografía de anillos de Newton. c) Este patrón de interferencia asimétrico indica imperfecciones en la lente.

contacto, hasta cierto valor t en P . Si el radio de curvatura R de la lente es mucho mayor que la distancia r y el sistema se ve desde arriba con luz de longitud de onda λ , se observa un patrón de anillos claros y oscuros (figura 24.8b). Estas franjas circulares, descubiertas por Newton, se llaman **anillos de Newton**. La interferencia se debe a la combinación del rayo 1, reflejado de la placa, con el rayo 2, reflejado desde la superficie inferior de la lente. El rayo 1 experimenta un cambio de fase de 180° en la reflexión porque se refleja desde una frontera que conduce hacia un medio de mayor índice de refracción, mientras que el rayo 2 no experimenta cambio de fase porque se refleja de un medio con menor índice de refracción. Por lo tanto, las condiciones para interferencia constructiva y destructiva se proporcionan en las ecuaciones 24.9 y 24.10, respectivamente, con $n = 1$ porque la “película” es aire. El punto de contacto O es oscuro, como se ve en la figura 24.8b, porque no hay diferencia de trayectoria y el cambio de fase total se debe sólo al cambio de fase de 180° en la reflexión. Al aplicar la geometría que se muestra en la figura 24.8a, podemos obtener expresiones para los radios de las bandas brillante y oscura en términos del radio de curvatura R y longitud de onda en el vacío λ . Por ejemplo, los anillos oscuros tienen radios de $r \approx \sqrt{m\lambda R/n}$.

APLICACIÓN

Comprobación de imperfecciones en lentes ópticas

Un uso importante de los anillos de Newton es la prueba de lentes ópticas. Un patrón circular como el de la figura 24.8b se logra sólo cuando la lente se esmerila en una curvatura perfectamente esférica. Las variaciones de tal simetría pueden producir un patrón como el de la figura 24.8c. Estas variaciones proporcionan un indicio de cómo se deben volver a esmerilar las lentes y pulir para remover imperfecciones.

ESTRATEGIA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Interferencia de película delgada

Los siguientes pasos se recomiendan para abordar los problemas de interferencia de película delgada:

1. Identifique la película delgada que causa la interferencia y los índices de refracción en la película y en el medio en cualquier lado de ella.
2. Determine el número de inversiones de fase: cero, uno o dos.
3. Consulte la siguiente tabla, que contiene las ecuaciones 24.9 y 24.10, y seleccione la columna correcta para el problema en cuestión:

Ecuación ($m = 0, 1, \dots$)	Inversión de fase 1	Inversiones de fase 0 o 2
$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ [24.9]	Constructiva	Destructiva
$2nt = m\lambda$ [24.10]	Destructiva	Constructiva

4. Sustituya valores en las ecuaciones adecuadas, como se seleccionaron en el paso anterior.

EJEMPLO 24.2 Interferencia en una película jabonosa

OBJETIVO Estudie los efectos de interferencia constructiva en una película delgada.

PROBLEMA a) Calcule el grosor mínimo de una película de pompa de jabón ($n = 1.33$) que resultará en interferencia constructiva en la luz reflejada, si la película se ilumina con luz de 602 nm de longitud de onda en espacio libre. b) Vuelva a calcular el grosor mínimo para interferencia constructiva cuando la película de la pompa de jabón esté en la parte superior de una placa de vidrio con $n = 1.50$.

ESTRATEGIA En el inciso a) sólo hay una inversión, así que la condición para interferencia constructiva es $2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$. El grosor de película mínimo para interferencia constructiva corresponde a $m = 0$ en esta ecuación. El inciso b) involucra dos inversiones, de modo que se requiere $2nt = m\lambda$.

SOLUCIÓN

a) Calcule el grosor mínimo de la película de pompa de jabón que resultará en interferencia constructiva.

Resuelva $2nt = \lambda/2$ para el grosor t y sustituya:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{602 \text{ nm}}{4(1.33)} = 113 \text{ nm}$$

b) Encuentre el grosor mínimo de la pompa de jabón cuando la película esté en la parte superior de una placa de vidrio con $n = 1.50$.

Escriba la condición para interferencia constructiva, cuando tienen lugar dos inversiones: $2nt = m\lambda$

Resuelva para t y sustituya:

$$t = \frac{m\lambda}{2n} = \frac{1 \cdot (602 \text{ nm})}{2(1.33)} = 226 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Los colores que giran en una pompa de jabón resultan del grosor de la capa de jabón que varía de un lugar a otro.

PREGUNTA 24.2 Una película jabonosa parece roja en un área y violeta en otra área cercana. ¿En cuál área la película jabonosa es más gruesa?

EJERCICIO 24.2 ¿Qué otros grosores de película en el inciso a) producirán interferencia constructiva?

RESPUESTAS 339 nm, 566 nm, 792 nm, etcétera

EJEMPLO 24.3 Recubrimientos no reflectivos para celdas solares y lentes ópticos

OBJETIVO Estudie los efectos de interferencia destructiva en una película delgada cuando hay dos inversiones.

PROBLEMA Los semiconductores como el silicio se usan para fabricar celdas solares, dispositivos que generan energía eléctrica cuando se exponen a luz solar. Las celdas solares con frecuencia se recubren con una película delgada transparente, como monóxido de silicio (SiO ; $n = 1.45$), para minimizar las pérdidas reflectivas (figura 24.9). Una celda solar de silicio ($n = 3.50$) se recubre con una delgada película de monóxido de silicio con este propósito. Suponiendo incidencia normal, determine el grosor mínimo de la película que producirá la menor reflexión a una longitud de onda de 552 nm.

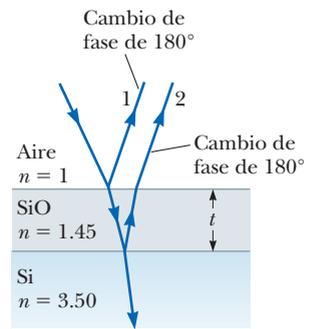


Figura 24.9 (Ejemplo 24.3) Las pérdidas reflectivas de una celda solar de silicio se minimizan al recubrirlas con una película delgada de monóxido de silicio (SiO).

ESTRATEGIA La reflexión es menor cuando los rayos 1 y 2 en la figura 24.9 satisfacen la condición para interferencia destructiva. Observe que *ambos* rayos experimentan cambios de fase de 180° en la reflexión. La condición para una reflexión mínima es por lo tanto $2nt = \lambda/2$.

SOLUCIÓN

Resuelva $2nt = \lambda/2$ para t , el grosor requerido:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{552 \text{ nm}}{4(1.45)} = 95.2 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Por lo general, tales recubrimientos reducen la pérdida reflectiva de 30% (sin recubrimiento) a 10% (con recubrimiento) y por lo tanto aumenta la eficiencia de la celda porque más luz está disponible para crear portadores de carga en la celda. En realidad, el recubrimiento nunca es perfectamente no reflectivo, porque el grosor requerido depende de la longitud de onda y la luz incidente cubre un amplio rango de longitudes de onda.

PREGUNTA 24.3 Para minimizar la reflexión de una longitud de onda menor, ¿el grosor del recubrimiento debe ser más grueso o más delgado?

EJERCICIO 24.3 Las lentes de vidrio que se usan en cámaras y otros instrumentos ópticos por lo general están recubiertas con una o más películas transparentes, como fluoruro de magnesio (MgF_2), para reducir o eliminar reflexión indeseada. Carl Zeiss desarrolló este método; su primer recubrimiento fue de 1.00×10^2 nm de grueso, sobre vidrio. Al usar $n = 1.38$ para MgF_2 , ¿qué longitud de onda visible se eliminaría mediante interferencia destructiva en la luz reflejada?

RESPUESTA 552 nm

EJEMPLO 24.4 Interferencia en una película con forma de cuña

OBJETIVO Calcule los efectos de interferencia cuando la película tiene grosor variable.

PROBLEMA Un par de placas de vidrio de 10.0 cm de largo y con $n = 1.52$ se separan en un extremo mediante un cabello, que forma una cuña triangular de aire, como se ilustra en la figura 24.10. Cuando luz coherente de un láser helio-neón con 633 nm de longitud de onda incide sobre la película desde arriba, se observan 15.0 franjas oscuras por centímetro. ¿Cuán grueso es el cabello?

ESTRATEGIA El patrón de interferencia se crea mediante la película delgada de aire que tiene grosor variable. El patrón es una serie de bandas paralelas alternadas brillantes y oscuras. Una banda oscura corresponde a interferencia destructiva y hay una inversión de fase, de modo que se debe usar $2nt = m\lambda$. También puede usar los triángulos semejantes en la figura 24.10 para obtener la relación $t/x = D/L$. Puede encontrar el grosor para cualquier m y si la posición x también se puede encontrar, esta última ecuación proporciona el diámetro del cabello, D .

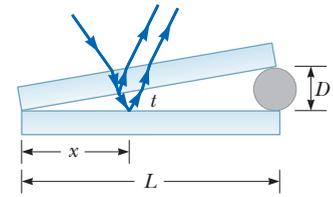


Figura 24.10 (Ejemplo 24.4) Las bandas de interferencia en luz reflejada se pueden observar al iluminar una película con forma de cuña con luz monocromática. Las áreas oscuras en el patrón de interferencia corresponden a posiciones de interferencia destructiva.

SOLUCIÓN

Resuelva la ecuación de interferencia destructiva para el grosor de la película, t , con $n = 1$ para aire:

$$t = \frac{m\lambda}{2}$$

Si d es la distancia desde una banda oscura a la siguiente, entonces la coordenada x de la m -ésima banda es un múltiplo de d :

$$x = md$$

Mediante análisis dimensional, d es justo el inverso del número de bandas por centímetro:

$$d = \left(15.0 \frac{\text{bandas}}{\text{cm}}\right)^{-1} = 6.67 \times 10^{-2} \frac{\text{cm}}{\text{banda}}$$

Ahora use triángulos semejantes y sustituya toda la información:

$$\frac{t}{x} = \frac{m\lambda/2}{md} = \frac{\lambda}{2d} = \frac{D}{L}$$

Resuelva para D y sustituya valores dados:

$$D = \frac{\lambda L}{2d} = \frac{(633 \times 10^{-9} \text{ m})(0.100 \text{ m})}{2(6.67 \times 10^{-4} \text{ m})} = 4.75 \times 10^{-5} \text{ m}$$

COMENTARIOS Algunos pueden preocuparse por la interferencia provocada por la luz que rebota de la parte superior e inferior de, por decir, la placa de vidrio superior. Sin embargo, es improbable que el grosor de la placa sea la mitad de un múltiplo entero de la longitud de onda del láser helio-neón (para algún valor muy grande de m). Además, en contraste con la cuña de aire, el grosor del vidrio no varía.

PREGUNTA 24.4 Si la cuña de aire está llena con agua, ¿cómo se afecta la distancia entre bandas oscuras? Explique.

EJERCICIO 24.4 La cuña de aire se sustituye con agua, con $n = 1.33$. Encuentre la distancia entre bandas oscuras cuando la luz del láser helio-neón golpea las placas de vidrio.

RESPUESTA $5.02 \times 10^{-4} \text{ m}$

FÍSICA APLICADA 24.3 Espejos perfectos

Cuando la luz golpea un espejo metálico, los electrones en los metales se mueven en respuesta a los campos electromagnéticos, que absorben parte de la energía de la luz. Para muchas aplicaciones, como la dirección de la luz láser de alta intensidad, la reducción en la intensidad no es deseable. Un espejo dieléctrico, por el contrario, está hecho de vidrio o de plástico y no conduce la electricidad. Para mejorar la reflexión, capas delgadas de materiales dieléctricos diferentes se apilan en la superficie del vidrio. Si el espesor y constante dieléctrica son elegidos de forma correcta, la luz reflejada por una capa se combina de manera constructiva con la luz reflejada por la capa inferior, aumentando la reflectancia del espejo. Espejos casi perfectos se pueden construir usando varias capas de dieléctrico. Los espejos pueden ser diseñados

para reflejar una determinada longitud de onda o un rango de longitudes de onda.

Espejos dieléctricos, desarrollados en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés) en 1998, tiene un enorme número de aplicaciones. Uno de los más importantes es la fibra OmniGuide, un tubo hueco del tamaño de un espagueti que puede guiar la luz sin una pérdida significativa de la intensidad. (Las fibras ópticas ordinarias tienden a calentarse.) Estas fibras tienen un máximo de cuarenta capas concéntricas de plástico y de vidrio y son muy flexibles. Utilizando una fibra OmniGuide, una intensa luz láser puede ser guiada de forma segura en el cuerpo humano durante una cirugía para extirpar tumores y otros tejidos enfermos sin dañar el tejido sano circundante. ■

24.5 Uso de interferencia para leer CD y DVD

Los discos compactos (CD) y videodiscos digitales (DVD) revolucionaron las industrias de la computación y el entretenimiento al proporcionar acceso rápido; almacenamiento de alta densidad de texto, gráficos y películas; y grabaciones de sonido de alta calidad. Los datos en estos videodiscos se almacenan de manera digital como una sucesión de ceros y unos, y estos ceros y unos se leen mediante la luz láser que se refleja del disco. Las reflexiones intensas (interferencia constructiva) del disco se eligen para representar ceros y las reflexiones débiles (interferencia destructiva) representan unos.

Para ver con más detalle cómo la interferencia de película delgada juega un papel crucial en la lectura de un CD, considere la figura 24.11. Esta figura muestra una fotomicrografía de varias pistas de un CD que consisten en una secuencia de pits (depresiones, cuando se ven desde la parte superior o lado de etiqueta del disco) de longitud variable formados en una capa de información de metal reflector. La vista transversal de un CD, como se muestra en la figura 24.12, revela que los pits aparecen como protuberancias al haz láser, que brilla en la capa metálica a través de un recubrimiento plástico claro desde abajo.

Conforme el disco gira, el haz láser se refleja en la secuencia de protuberancias y áreas inferiores hacia un fotodetector, que convierte la intensidad de luz reflejada fluctuante en una cadena eléctrica de ceros y unos. Para hacer las fluctuaciones de luz más pronunciadas y fáciles de detectar, la profundidad del pit t se iguala a un cuarto de una longitud de onda de la luz láser en el plástico. Cuando el haz golpea el borde de una protuberancia que se eleva o cae, parte del haz se refleja desde la parte superior de la protuberancia y parte desde el área adyacente inferior, lo que asegura interferencia destructiva y muy baja intensidad cuando los haces reflejados se combinan en el detector. Los bordes de la protuberancia se leen como unos y las partes superiores planas de la protuberancia y terrenos planos intermedios se leen como ceros.

En el ejemplo 24.5, con el uso de un láser infrarrojo de 780 nm de longitud de onda, se calcula la profundidad del pit para un CD estándar. El DVD usa láseres con longitud de onda más corta, de 635 nm y la separación de pistas, profundidad de pit y longitud mínima de pit, son más pequeñas. Estas diferencias permiten a un DVD almacenar cerca de 30 veces más información que un CD.

APLICACIÓN

La física de CD y DVD

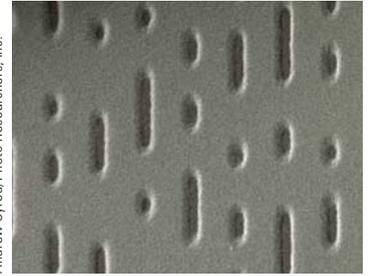


Figura 24.11 Fotomicrografía de pistas adyacentes sobre un disco compacto (CD). La información codificada en estos pits y áreas suaves se lee mediante un haz láser.

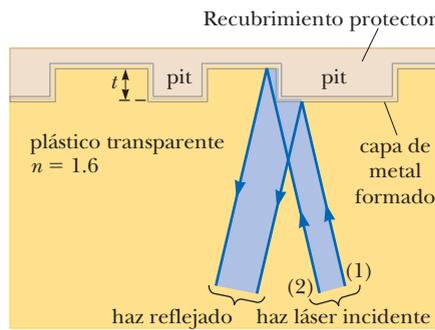


Figura 24.12 Sección transversal de un CD que muestra pits metálicos de profundidad t y un haz láser que detecta el borde de un pit.

■ EJEMPLO 24.5 Profundidad de pit en un CD

OBJETIVO Aplique principios de interferencia a un CD.

PROBLEMA Encuentre la profundidad de pit en un CD que tiene una capa plástica transparente con índice de refracción de 1.60 y está diseñado para usar en un reproductor de CD que usa un láser con una longitud de onda de 7.80×10^2 nm en aire.

ESTRATEGIA (Véase la figura 24.12.) Los rayos 1 y 2 se reflejan ambos de la capa metálica, que actúa como un espejo, de modo que no hay diferencia de fase debida a reflexión entre dichos rayos. Sin embargo, sí existe la diferencia de fase usual causada por la distancia adicional $2t$ que recorre el rayo 2. La longitud de onda es λ/n , donde n es el índice de refracción en la sustancia.

(continúa)

SOLUCIÓN

Use la condición adecuada para interferencia destructiva en una película delgada:

$$2t = \frac{\lambda}{2n}$$

Resuelva para el grosor t y sustituya:

$$t = \frac{\lambda}{4n} = \frac{7.80 \times 10^2 \text{ nm}}{(4)(1.60)} = 1.22 \times 10^2 \text{ nm}$$

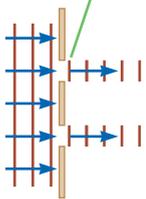
COMENTARIOS Diferentes sistemas de CD tienen diferentes tolerancias a los rayones. Cualquier cosa que cambie las propiedades reflectoras del disco puede afectar la legibilidad del disco.

PREGUNTA 24.5 Verdadero o Falso: Dados dos plásticos con diferentes índices de refracción, el material con el índice de refracción más grande tendrá una mayor profundidad de pit.

EJERCICIO 24.5 Repita el ejemplo para un láser con longitud de onda de 635 nm.

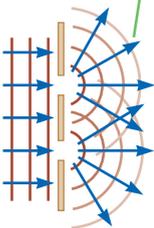
RESPUESTA 99.2 nm

La luz que pasa a través de rendijas estrechas *no* se comporta de esta manera.



a

La luz que pasa a través de rendijas estrechas se *difracta*.



b

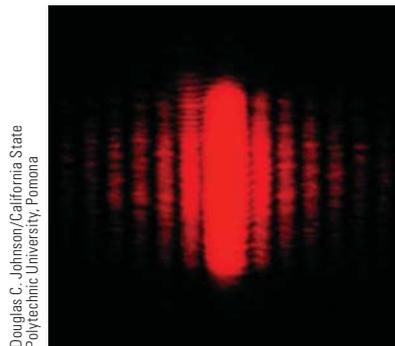
Figura 24.13 a) Si la luz no se dispersara después de pasar a través de las rendijas, no ocurriría interferencia. b) La luz proveniente de las dos rendijas se traslapa conforme se dispersa y llena las regiones sombreadas esperadas con luz y produce franjas de interferencia.

24.6 Difracción

Suponga que un haz de luz incide sobre dos rendijas, como en el experimento de doble rendija de Young. Si la luz realmente viaja en trayectorias en línea recta después de pasar a través de las rendijas, como en la figura 24.13a, las ondas no se traslaparían y no se vería patrón de interferencia. En vez de ello, el principio de Huygens requiere que las ondas se dispersen de las rendijas, como se muestra en la figura 24.13b. En otras palabras, la luz se dobla desde una trayectoria en línea recta y entra a la región que de otro modo sería sombreada. Esta dispersión de la luz desde su línea de viaje inicial se llama **difracción**.

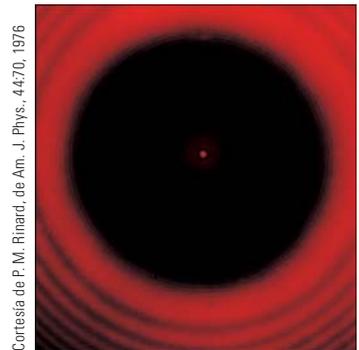
En general, la difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de una pequeña abertura, alrededor de obstáculos o mediante bordes agudos. Por ejemplo, cuando una sola rendija estrecha se coloca entre una fuente de luz distante (o un haz láser) y una pantalla, la luz produce un patrón de difracción como el de la figura 24.14. El patrón consiste en una amplia banda central intensa flanqueada por una serie de bandas secundarias más estrechas y menos intensas (llamados **máximos secundarios**) y una serie de bandas oscuras, o **mínimos**. Este fenómeno no se puede explicar dentro del marco de la óptica geométrica, que dice que los rayos de luz que viajan en línea recta deben proyectar una imagen clara de la rendija sobre la pantalla.

La figura 24.15 muestra el patrón de difracción y sombra de una moneda. El patrón consiste en la sombra, una mancha brillante en su centro y una serie de bandas de



Douglas C. Johnson/California State Polytechnic University, Pomona

Figura 24.14 Patrón de difracción que aparece sobre una pantalla cuando la luz pasa a través de una estrecha rendija vertical. El patrón consiste en una amplia banda central y una serie de bandas laterales menos intensas y más estrechas.



Cortesía de P. M. Rinard, de Am. J. Phys., 44:70, 1976

Figura 24.15 Patrón de difracción de una moneda colocada a medio camino entre la pantalla y la fuente. Observe el punto brillante en el centro.

luz circulares brillantes y oscuras cerca de la sombra. La mancha brillante en el centro (llamada la *mancha brillante de Fresnel*) se explica mediante la teoría ondulatoria de la luz de Augustin Fresnel, que predice interferencia constructiva en este punto para ciertas ubicaciones de la moneda. Desde el punto de vista de la óptica geométrica, no habría mancha brillante alguna: la moneda ocultaría por completo el centro del patrón.

Un tipo de difracción, llamada **difracción de Fraunhofer**, ocurre cuando los rayos salen del objeto difractante en direcciones paralelas. La difracción de Fraunhofer se puede lograr en experimentos o al colocar la pantalla de observación lejos de la rendija o con el uso de una lente convergente para enfocar los rayos paralelos sobre una pantalla cercana, como en la figura activa 24.16a. A lo largo del eje, en $\theta = 0$, se observa una franja brillante, con franjas oscuras y brillantes alternas en cada lado de la franja brillante central. La figura activa 24.16b es una fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

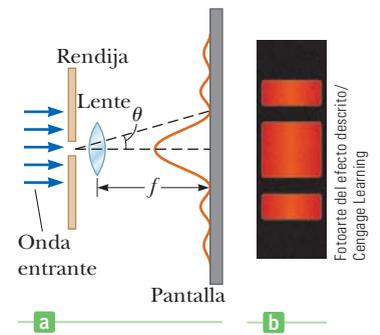


Figura activa 24.16 a) Patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija. Los rayos paralelos se llevan a foco sobre la pantalla con una lente convergente. El patrón consiste en una región brillante central flanqueada por máximos mucho más débiles. (Este dibujo no está a escala.) b) Fotografía de un patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija.

24.7 Difracción de una sola rendija

Hasta ahora supusimos que las rendijas que tienen ancho despreciable, actúan como fuentes lineales de luz. En esta sección determinaremos cómo sus anchos distintos de cero son la base para comprender la naturaleza del patrón de difracción de Fraunhofer producido por una sola rendija.

A partir de este problema se pueden deducir algunas características importantes al examinar las ondas provenientes desde varias porciones de la rendija, como se muestra en la figura 24.17. De acuerdo con el principio de Huygens, **cada porción de la rendija actúa como una fuente de ondas. Por lo tanto, la luz proveniente de una porción de la rendija puede interferir con la luz proveniente de otra porción** y la intensidad resultante sobre la pantalla depende de la dirección θ .

Para analizar el patrón de difracción, es conveniente dividir la rendija en mitades, como en la figura 24.17. Todas las ondas que se originan en la rendija están en fase. Considere las ondas 1 y 3, que se originan en el fondo y el centro de la rendija, respectivamente. La onda 1 viaja más que la onda 3 por una cantidad igual a la diferencia de trayectoria $(a/2) \sin \theta$, donde a es el ancho de la rendija. De igual modo la diferencia de trayectoria entre las ondas 3 y 5 es $(a/2) \sin \theta$. Si esta diferencia de trayectoria es exactamente la mitad de una longitud de onda (que corresponde a una diferencia de fase de 180°), las dos ondas se cancelan de manera mutua y resulta interferencia destructiva. Esto es cierto, de hecho, para cualesquiera dos ondas que se originan en puntos separados por medio ancho de rendija porque la diferencia entre dos de tales puntos es 180° . Por lo tanto, las ondas provenientes de la mitad superior de la rendija interfieren *destructivamente* con las ondas provenientes de la mitad inferior de la rendija cuando

$$\frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2}$$

o bien

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a}$$

Si la rendija se divide en cuatro partes en lugar de dos y se usa un razonamiento similar, se encuentra que la pantalla también es oscura cuando

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{a}$$

Al continuar de esta forma, puede dividir la rendija en seis partes y demostrar que la oscuridad ocurre sobre la pantalla cuando

$$\sin \theta = \frac{3\lambda}{a}$$

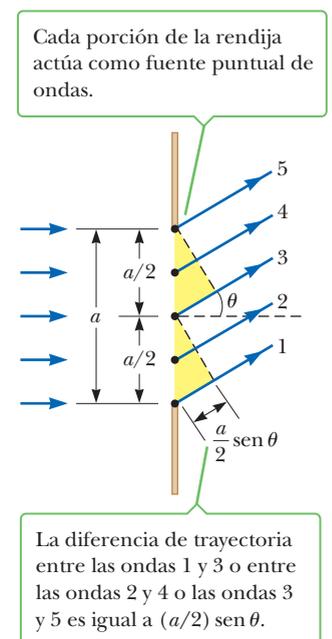
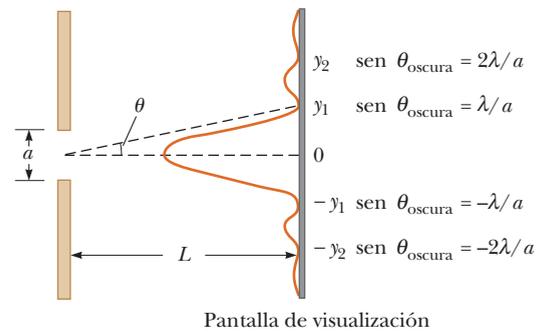


Figura 24.17 Difracción de luz mediante una rendija estrecha de ancho a . (Este dibujo no está a escala y se supone que las ondas convergen en un punto distante.)

Figura 24.18 Posiciones de los mínimos para el patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija de ancho a . (Este dibujo no está a escala.)



Por lo tanto, la condición general para **interferencia destructiva** para una sola rendija de ancho a es

$$\text{sen } \theta_{\text{oscura}} = m \frac{\lambda}{a} \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [24.11]$$

La ecuación 24.11 proporciona los valores de θ para los cuales el patrón de difracción tiene intensidad cero, donde se forma una franja oscura. Sin embargo, la ecuación no dice nada acerca de la variación en intensidad a lo largo de la pantalla. Las características generales de la distribución de intensidad a lo largo de la pantalla se muestran en la figura 24.18. Una amplia franja brillante central está flanqueada por franjas brillantes mucho más débiles que alternan con franjas oscuras. Las diversas franjas oscuras (puntos de intensidad cero) ocurren en los valores de θ que satisfacen la ecuación 24.11. Los puntos de interferencia constructiva yacen aproximadamente a la mitad entre las franjas oscuras. Observe que la franja brillante central es el doble de ancha que los máximos más débiles que tienen $m > 1$.

Tip 24.3 Lo mismo, pero diferente

Aunque las ecuaciones 24.2 y 24.11 tienen la misma forma, tienen diferentes significados. La ecuación 24.2 describe las regiones brillantes en un patrón de interferencia de dos rendijas, mientras que la ecuación 24.11 describe las regiones oscuras en un patrón de interferencia de una sola rendija

Examen rápido

24.5 En un experimento de difracción de una sola rendija, conforme el ancho de la rendija se hace más pequeño, ¿el ancho del máximo central del patrón de difracción a) se vuelve más pequeño, b) se vuelve más grande o c) permanece igual?

FÍSICA APLICADA 24.4 Difracción de ondas sonoras

Si la puerta de un salón de clase se abre una pequeña cantidad, puede escuchar los sonidos provenientes del corredor, aunque no pueda ver lo que ocurre. ¿Cómo se puede explicar esta diferencia?

Las ondas sonoras tienen longitudes de onda más grandes que el ancho de la rendija, así que el sonido se difracta mediante la abertura y el máximo central se dispersa a través de la habitación. Las longitudes de onda de la luz son mucho menores que el ancho de la rendija, así que virtualmente no hay difracción para la luz. Usted debe tener una línea de visión directa para detectar las ondas de luz. ■

EXPLICACIÓN El espacio entre la puerta ligeramente abierta y la pared actúa como una sola rendija para ondas.

EJEMPLO 24.6 Experimento de una sola rendija

OBJETIVO Encuentre las posiciones de las franjas oscuras en difracción de una sola rendija.

PROBLEMA Luz con longitud de onda de 5.80×10^2 nm incide sobre una rendija de 0.300 mm de ancho. La pantalla de observación se coloca a 2.00 m de la rendija. Determine las posiciones de las primeras franjas oscuras y el ancho de la franja brillante central.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustitución en la ecuación 24.11 para determinar los senos de los ángulos de las primeras franjas oscuras. Entonces las posiciones se pueden encontrar con la función tangente porque, para ángulos pequeños, $\text{sen } \theta \approx \tan \theta$. La extensión del máximo central se define mediante estas dos franjas oscuras.

SOLUCIÓN

Las primeras franjas oscuras que flanquean la franja brillante central corresponden a $m = \pm 1$ en la ecuación 24.11:

$$\text{sen } \theta = \pm \frac{\lambda}{a} = \pm \frac{5.80 \times 10^{-7} \text{ m}}{0.300 \times 10^{-3} \text{ m}} = \pm 1.93 \times 10^{-3}$$

Use el triángulo en la figura 24.18 para relacionar la posición de la franja con la función tangente:

$$\tan \theta = \frac{y_1}{L}$$

Puesto que θ es muy pequeña, puede usar la aproximación $\sin \theta \approx \tan \theta$ y luego resolver para y_1 :

$$\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{y_1}{L}$$

$$y_1 \approx L \sin \theta = (2.00 \text{ m})(\pm 1.93 \times 10^{-3}) = \pm 3.86 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Calcule la distancia entre los máximos positivo y negativo de primer orden, que es el ancho w del máximo central:

$$w = +3.86 \times 10^{-3} \text{ m} - (-3.86 \times 10^{-3} \text{ m}) = 7.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$

COMENTARIOS Note que este valor de w es mucho mayor que el ancho de la rendija. Sin embargo, conforme el ancho de la rendija *aumenta*, el patrón de difracción *se estrecha*, lo que corresponde a valores más pequeños de θ . De hecho, para valores grandes de a , los máximos y mínimos están tan cercanamente espaciados que el único patrón observable es una gran área brillante central que recuerda la imagen geométrica de la rendija. Puesto que el ancho de la imagen geométrica aumenta conforme el ancho de la rendija aumenta, la imagen más estrecha ocurre cuando los anchos geométrico y de difracción son iguales.

PREGUNTA 24.6 Suponga que todo el aparato se sumerge en agua. Si la misma longitud de onda de luz (en aire) incide sobre la rendija sumergida en agua, ¿el máximo central resultante es mayor o menor? Explique.

EJERCICIO 24.6 Determine el ancho de la franja brillante de primer orden en el ejemplo, cuando el aparato está en aire.

RESPUESTA 3.86 mm

24.8 La rejilla de difracción

La rejilla de difracción, un útil dispositivo para analizar fuentes de luz, consiste en un gran número de rendijas paralelas igualmente espaciadas. Una rejilla se puede elaborar al rayar líneas paralelas sobre una placa de vidrio con una técnica de fabricación de precisión. Los paneles claros entre rayas actúan como rendijas. Una rejilla típica contiene muchos miles de líneas por centímetro. Por ejemplo, una rejilla pautada con 5000 líneas/cm tiene un espaciamiento de rendija d igual al recíproco de dicho número; por lo tanto, $d = (1/5000) \text{ cm} = 2 \times 10^{-4} \text{ cm}$.

La figura activa 24.19 es un diagrama esquemático de una sección de una rejilla de difracción plana. Una onda plana incide desde la izquierda, normal al plano de la rejilla.

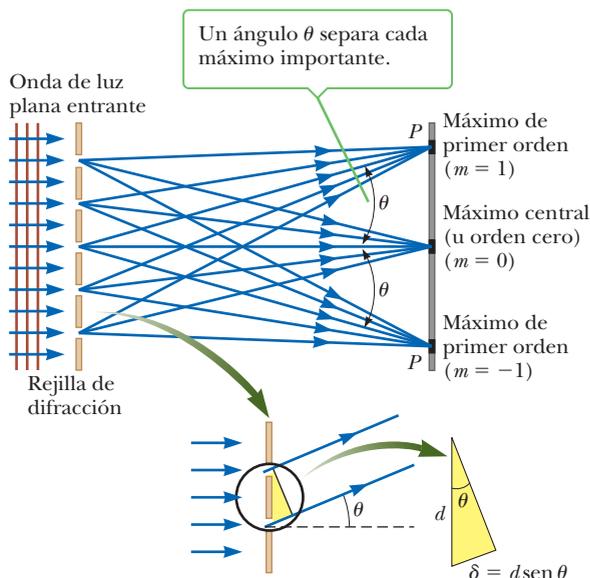


Figura activa 24.19 Vista lateral de una rejilla de difracción. La separación de rendijas es d y la diferencia de trayectoria entre rendijas adyacentes es $d \sin \theta$.

La intensidad del patrón sobre la pantalla es resultado de los efectos combinados de interferencia y difracción. Cada rendija causa difracción y los haces difractados a su vez interfieren unos con otros para producir el patrón. Más aún, cada rendija actúa como una fuente de ondas y todas las ondas parten en fase en las rendijas. Sin embargo, para alguna dirección arbitraria θ medida desde la horizontal, las ondas deben recorrer *diferentes* longitudes de trayectoria antes de llegar a un punto particular P sobre la pantalla. En la figura 24.19, observe que la diferencia de trayectoria entre ondas desde cualesquiera dos rendijas adyacentes es $d \sin \theta$. Si esta diferencia de trayectoria es igual a una longitud de onda o cierto múltiplo entero de una longitud de onda, las ondas de todas las rendijas estarán en fase en P y en dicho punto se observará una línea brillante. Por lo tanto, la condición para **máximos** en el patrón de interferencia en el ángulo θ es

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.12]$$

Condición para máximos en el patrón de interferencia de una rejilla de difracción

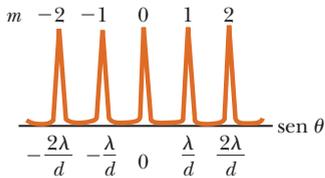


Figura activa 24.20 Intensidad contra $\sin \theta$ para la rejilla de difracción. Se muestran los máximos principales de orden cero, primero y segundo.

La luz que sale de una rendija a un ángulo distinto a aquel para un máximo interfiere casi por completo de manera destructiva con la luz proveniente de alguna otra rendija en la rejilla. Todos esos pares resultarán en poca o ninguna transmisión en dicha dirección, como se ilustra en la figura 24.20.

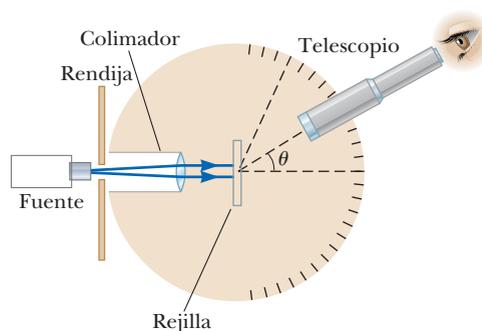
La ecuación 24.12 se puede usar para calcular la longitud de onda a partir del espaciamiento de la rejilla y el ángulo de desviación, θ . El entero m es el **número de orden** del patrón de difracción. Si la radiación incidente contiene muchas longitudes de onda, cada longitud de onda se desvía a través de un ángulo específico, que se puede encontrar a partir de la ecuación 24.12. Todas las longitudes de onda se enfocan en $\theta = 0$, que corresponden a $m = 0$. Este punto se llama *máximo de orden cero*. El *máximo de primer orden*, que corresponde a $m = 1$, se observa a un ángulo que satisface la relación $\sin \theta = \lambda/d$; el *máximo de segundo orden*, que corresponde a $m = 2$, se observa a un ángulo mayor θ , etc. La figura activa 24.20 es un bosquejo de la distribución de intensidad para algunos de los órdenes producidos por una rejilla de difracción. Observe lo agudo del máximo principal y el amplio rango de áreas oscuras, un patrón en contraste directo con las amplias franjas brillantes características del patrón de interferencia de dos rendijas.

En la figura activa 24.21 se muestra un arreglo simple que se puede usar para medir los ángulos en un patrón de difracción. Esta configuración es una forma de espectrómetro de rejilla de difracción. La luz a analizar pasa a través de una rendija y se forma un haz paralelo mediante una lente. Luego la luz golpea la rejilla a un ángulo de 90° . Para ver la imagen de la rendija se usa un telescopio. La longitud de onda se puede determinar al medir los ángulos en los que aparecen las imágenes de la rendija para los diversos órdenes.

Examen rápido

24.6 Si luz láser se refleja de un disco fonográfico o un disco compacto, aparece un patrón de difracción. El patrón surge porque ambos dispositivos contienen pistas paralelas de información que actúan como rejilla de difracción por reflexión. ¿Cuál dispositivo, disco o compacto, resulta en máximos de difracción que están más separados?

Figura activa 24.21 Diagrama de un espectrómetro de rejilla de difracción. El haz colimado incidente sobre la rejilla se difracta en los diversos órdenes en los ángulos θ que satisfacen la ecuación $d \sin \theta = m\lambda$, donde $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$



■ FÍSICA APLICADA 24.5 Prisma frente a rejilla

Cuando luz blanca entra a través de una abertura en una caja opaca y sale a través de una abertura en el otro lado de la misma, sobre la pared aparece un espectro de colores. A partir de esta observación, ¿cómo podría usted determinar si la caja contiene un prisma o una rejilla de difracción?

EXPLICACIÓN La determinación se podría hacer al observar el orden de los colores en el espectro, en relación con la dirección del haz original de luz blanca. Para un prisma, en el que la separación de la luz es resultado de dispersión,

la luz violeta se refractará más que la luz roja. Por ende, el orden del espectro de un prisma será desde rojo, más cerca a la dirección original, hacia violeta. Para una rejilla de difracción, el ángulo de difracción aumenta con la longitud de onda, de modo que el espectro proveniente de la rejilla de difracción tendrá colores en el orden desde violeta, más cerca a la dirección original, hacia rojo. Más aún, la rejilla de difracción producirá *dos* espectros de primer orden en cualquier lado de la rejilla, mientras que el prisma sólo producirá un espectro. ■

■ FÍSICA APLICADA 24.6 Arco iris desde un disco compacto

La luz blanca reflejada desde la superficie de un CD tiene una apariencia multicolor, como se muestra en la figura 24.22. La observación depende de la orientación del disco en relación

con el ojo y la posición de la fuente de luz. Explique cómo funciona esto.

EXPLICACIÓN La superficie de un CD tiene una pista en espiral (con un espaciamiento cercano a $1 \mu\text{m}$) que actúa como rejilla de reflexión. La luz que se dispersa mediante estas pistas paralelas cercanamente espaciadas depende tanto de la longitud de onda como de la dirección de la luz incidente. Cualquier sección del disco sirve como rejilla de difracción para luz blanca, que envía haces de interferencia constructiva para diferentes colores en diversas direcciones. Los distintos colores que se ven cuando observa una sección del disco cambian conforme la fuente de luz, el disco o usted se mueven para cambiar los ángulos de incidencia o difracción. ■



Figura 24.22 (Física aplicada 24.6) Los discos compactos actúan como rejillas de difracción cuando se observan bajo luz blanca.

Uso de una rejilla de difracción en rastreo en un CD

Si un reproductor de CD debe reproducir el sonido con fidelidad, el haz láser debe seguir la pista espiral de información a la perfección. Sin embargo, en ocasiones el haz láser puede salirse de la pista y, sin un procedimiento de retroalimentación para permitir que el reproductor sepa lo que ocurre, la fidelidad de la música se puede reducir en gran cantidad.

La figura 24.23 muestra cómo se usa una rejilla de difracción en un método de tres haces para mantener el haz en pista. El máximo central del patrón de difracción lee la información sobre la pista del CD y los dos máximos de primer orden dirigen el haz. La rejilla se diseña de modo que los máximos de primer orden caen sobre las superficies lisas en cualquier lado de la pista de información. Estos dos rayos reflejados tienen sus propios

APLICACIÓN

Rastreo de información en un CD

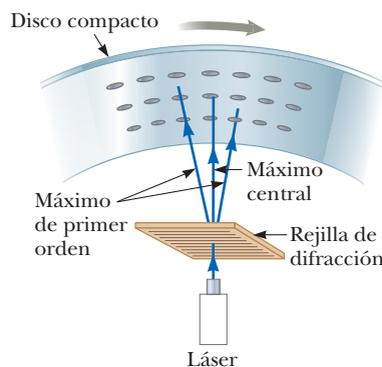


Figura 24.23 El haz láser en un reproductor de CD puede seguir la pista espiral con el uso de tres haces producidos con una rejilla de difracción.

detectores y dado que ambos haces se reflejan en superficies lisas, deben tener la misma intensidad cuando se detectan. Sin embargo, si el haz central sale de la pista, uno de los haces de dirección comenzará a golpear protuberancias en la pista de información y la cantidad de luz reflejada disminuirá. Entonces esta información se usa mediante circuitos electrónicos para dirigir el haz principal de vuelta a la ubicación deseada.

■ EJEMPLO 24.7 Una rejilla de difracción

OBJETIVO Calcule máximos principales de diferente orden para una rejilla de difracción.

PROBLEMA Luz monocromática de un láser helio-neón ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) incide de manera normal sobre una rejilla de difracción que contiene 6.00×10^3 líneas/cm. Encuentre los ángulos en los cuales uno observaría el máximo de primer orden, el máximo de segundo orden, etcétera.

ESTRATEGIA Encuentre la separación de las rendijas al invertir el número de líneas por centímetro, luego sustituya en la ecuación 24.12.

SOLUCIÓN

Invierta el número de líneas por centímetro para obtener la separación de las rendijas:

$$d = \frac{1}{6.00 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}} = 1.67 \times 10^{-4} \text{ cm} = 1.67 \times 10^3 \text{ nm}$$

Sustituya $m = 1$ en la ecuación 24.12 para encontrar el seno del ángulo correspondiente al máximo de primer orden:

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{\lambda}{d} = \frac{632.8 \text{ nm}}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 0.379$$

Tome el seno inverso del resultado anterior para encontrar θ_1 :

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} 0.379 = 22.3^\circ$$

Repita el cálculo para $m = 2$:

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{2\lambda}{d} = \frac{2(632.8 \text{ nm})}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 0.758$$

$$\theta_2 = 49.3^\circ$$

Repita el cálculo para $m = 3$:

$$\text{sen } \theta_3 = \frac{3\lambda}{d} = \frac{3(632.8 \text{ nm})}{1.67 \times 10^3 \text{ nm}} = 1.14$$

Puesto que $\text{sen } \theta$ no puede exceder 1, no hay solución para θ_3 .

COMENTARIOS El cálculo anterior demuestra que sólo puede haber un número finito de máximos principales. En este caso sólo se observarían máximos de orden cero, primero y segundo.

PREGUNTA 24.7 ¿Una rejilla de difracción con más líneas tiene una separación menor o mayor entre máximos principales adyacentes?

EJERCICIO 24.7 Suponga que en lugar de luz monocromática se usa luz con longitud de onda de $7.80 \times 10^2 \text{ nm}$ y que la rejilla de difracción tiene 3.30×10^3 líneas por centímetro. Encuentre los ángulos de todos los máximos principales.

RESPUESTAS $0^\circ, 14.9^\circ, 31.0^\circ, 50.6^\circ$

24.9 Polarización de ondas de luz

En el capítulo 21 describimos la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas. La figura 24.24 muestra que los vectores de campo eléctrico y magnético asociados con una onda electromagnética están en ángulos rectos entre sí y también con la dirección de propagación de la onda. El fenómeno de polarización, descrito en esta sección, es firme evidencia de la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas.

Un haz de luz ordinario consiste en un gran número de ondas electromagnéticas emitidas por los átomos o moléculas de la fuente de luz. Las cargas vibratorias asociadas con

los átomos actúan como pequeñas antenas. Cada átomo produce una onda con su propia orientación de \vec{E} , como en la figura 24.24, que corresponde a la dirección de vibración atómica. Sin embargo, dado que todas las direcciones de vibración son posibles, la onda electromagnética resultante es una superposición de ondas producidas por las fuentes atómicas individuales. El resultado es una onda de luz **no polarizada**, representada de manera esquemática en la figura 24.25a. La dirección de propagación de la onda que se muestra en la figura es perpendicular a la página. Observe que *todas* las direcciones del vector de campo eléctrico son de igual forma probables y yacen en un plano (como el plano de esta página) perpendicular a la dirección de propagación.

Se dice que una onda está **linealmente polarizada** si el campo eléctrico resultante \vec{E} vibra en la misma dirección *en todo momento* en un punto particular, como en la figura 24.25b. (A veces tal onda se describe como *polarizada plana* o sólo *polarizada*.) La onda en la figura 24.24 es un ejemplo de una onda que está linealmente polarizada en la dirección y . Conforme la onda se propaga en la dirección x , \vec{E} siempre está en la dirección y . El plano que forma \vec{E} y la dirección de propagación se llama *plano de polarización* de la onda. En la figura 24.24 el plano de polarización es el plano xy .

Es posible obtener un haz linealmente polarizado a partir de un haz no polarizado al remover todas las ondas del haz excepto aquellas con vectores de campo eléctrico que oscilan en un solo plano. Ahora analizaremos tres procesos para hacer esto: 1) absorción selectiva, 2) reflexión y 3) dispersión.

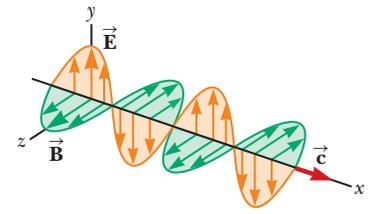


Figura 24.24 Diagrama esquemático de una onda electromagnética polarizada que se propaga en la dirección x . El vector de campo eléctrico \vec{E} vibra en el plano xy , mientras que el vector de campo magnético \vec{B} vibra en el plano xz .

Polarización mediante absorción selectiva

La técnica más común para polarizar luz es usar un material que transmita ondas que tengan vectores de campo eléctrico que vibren en un plano paralelo a cierta dirección y absorban dichas ondas con vectores de campo eléctrico que vibren en direcciones perpendiculares a dicha dirección.

En 1932, E. H. Land descubrió un material, que llamó **Polaroid**, que polariza luz a través de absorción selectiva mediante moléculas orientadas. Este material se fabrica en hojas delgadas de hidrocarburos de cadena larga, que se estiran durante la fabricación de modo que las moléculas se alinean. Después de que una hoja se sumerge en una solución que contiene yodo, las moléculas se convierten en buenos conductores eléctricos. Sin embargo, la conducción tiene lugar principalmente a lo largo de las cadenas de hidrocarburos, porque los electrones de valencia de las moléculas se pueden mover con facilidad sólo a lo largo de dichas cadenas. (Recuerde que los electrones de valencia son electrones “libres” que se pueden mover de forma fácil a través del conductor.) Como resultado, las moléculas fácilmente *absorben* luz que tiene un vector de campo eléctrico paralelo a sus longitudes y *transmiten* luz con un vector de campo eléctrico perpendicular a sus longitudes. Es común referirse a la dirección perpendicular a las cadenas moleculares como el **eje de transmisión**. En un polarizador ideal, se absorbe toda la luz con \vec{E} perpendicular al eje de transmisión.

Los materiales polarizadores reducen la intensidad de la luz que pasa a través de ellos. En la figura activa 24.26 un haz de luz no polarizado incide sobre la primera hoja polarizadora,

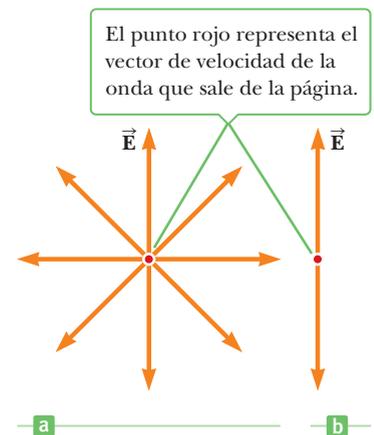


Figura 24.25 a) Un haz de luz no polarizado visto a lo largo de la dirección de propagación (perpendicular a la página). El vector de campo eléctrico puede vibrar en cualquier dirección con igual probabilidad. b) Un haz de luz linealmente polarizado con el vector de campo eléctrico que vibra en la dirección vertical.

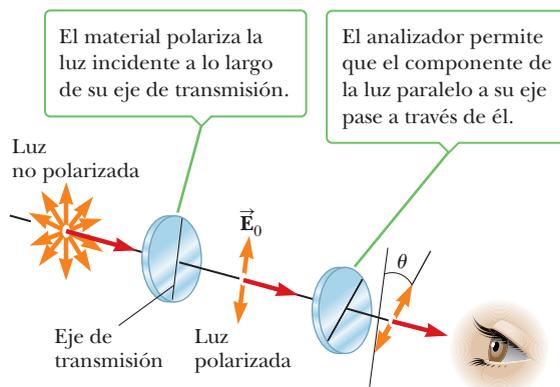
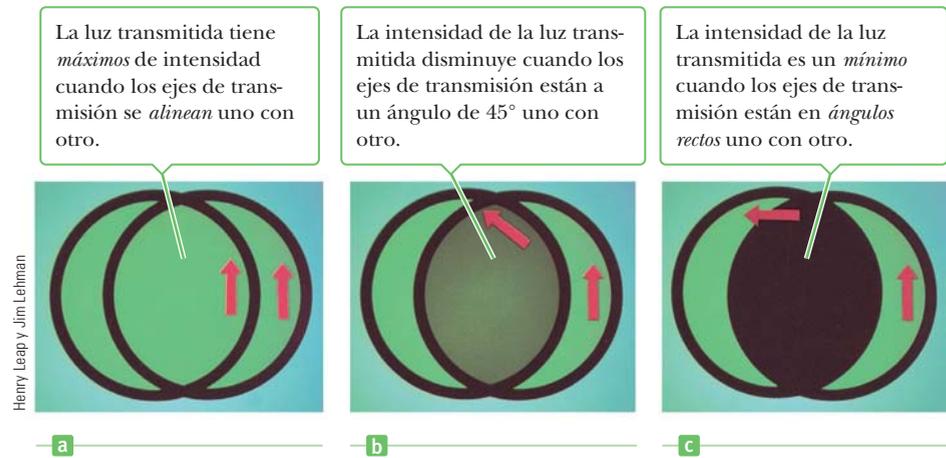


Figura activa 24.26 Dos hojas polarizadoras cuyos ejes de transmisión forman un ángulo θ entre sí. Sólo se transmite una fracción de la luz polarizada que incide sobre el analizador.

Figura 24.27 La intensidad de la luz transmitida a través de dos polarizadores depende de las orientaciones relativas de sus ejes de transmisión.



llamada **polarizador**; el eje de transmisión es como se indica. La luz que pasa a través de esta hoja se polariza verticalmente y el vector de campo eléctrico transmitido es \vec{E}_0 . Una segunda hoja polarizadora, llamada **analizador**, intercepta este haz con su eje de transmisión a un ángulo de θ con el eje del polarizador. El componente de \vec{E}_0 que es perpendicular al eje del analizador se absorbe por completo. Al componente de \vec{E}_0 que es paralelo al eje del analizador, $E_0 \cos \theta$, se le permite pasar a través del analizador. Puesto que la intensidad del haz transmitido varía como el *cuadrado* de su amplitud E , se concluye que la intensidad del haz (polarizado) transmitido a través del analizador varía como

Ley de Malus ►

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad [24.13]$$

donde I_0 es la intensidad de la onda polarizada incidente sobre el analizador. Esta expresión, conocida como **ley de Malus**, se aplica a cualesquiera dos materiales polarizadores que tienen ejes de transmisión a un ángulo θ uno con otro. Observe de la ecuación 24.13 que la intensidad transmitida es un máximo cuando los ejes de transmisión son paralelos ($\theta = 0$ o 180°) y es un mínimo (absorción completa por el analizador) cuando los ejes de transmisión son mutuamente perpendiculares. Esta variación en intensidad transmitida a través de un par de hojas polarizadoras se ilustra en la figura 24.27.

Cuando luz no polarizada con intensidad I_0 se envía a través de un solo polarizador ideal, la luz linealmente polarizada que se transmite tiene intensidad $I_0/2$. Este hecho se sigue de la ley de Malus, porque el valor promedio de $\cos^2 \theta$ es un medio.

■ FÍSICA APLICADA 24.7 Microondas de polarización

Un polarizador para microondas se puede fabricar como una rejilla de alambres metálicos paralelos separados por cerca de 1 cm. ¿El vector de campo eléctrico para las microondas transmitidas a través de este polarizador es paralelo o perpendicular a los alambres metálicos?

EXPLICACIÓN Los vectores de campo eléctrico paralelos a los alambres metálicos hacen que los electrones en el metal

oscilen paralelos al alambre. Por ende, la energía de las ondas con estos vectores de campo eléctrico se transfiere al metal al acelerar los electrones y eventualmente se transforma en energía interna a través de la resistencia del metal. Las ondas con vectores de campo eléctrico perpendiculares a los alambres metálicos no pueden acelerar electrones y pasan a través de los alambres. En consecuencia, la polarización del campo eléctrico es perpendicular a los alambres metálicos. ■

■ EJEMPLO 24.8 Polarizador

OBJETIVO Comprenda cómo los materiales polarizadores afectan la intensidad de la luz.

PROBLEMA Luz no polarizada incide sobre tres polarizadores. El primer polarizador tiene un eje de transmisión vertical, el segundo tiene un eje de transmisión rotado 30.0° con respecto al primero y el tercero tiene un eje de transmisión rotado 75.0° en relación con el primero. Si la intensidad de luz inicial del haz es I_0 , calcule la intensidad de la luz después de que el haz pasa a través de **a)** el segundo polarizador y **b)** el tercer polarizador.

ESTRATEGIA Después de que el haz pasa a través del primer polarizador, se polariza y su intensidad se corta a la mitad. Entonces se puede aplicar la ley de Malus al segundo y tercer polarizadores. El ángulo que se usa en la ley de Malus debe ser en relación con el eje de transmisión inmediatamente anterior.

SOLUCIÓN

a) Calcule la intensidad del haz después de que pasa a través del segundo polarizador.

La intensidad incidente es $I_b/2$. Aplique la ley de Malus al segundo polarizador:

$$I_2 = I_0 \cos^2 \theta = \frac{I_b}{2} \cos^2 (30.0^\circ) = \frac{I_b}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 = \frac{3}{8} I_b$$

b) Calcule la intensidad del haz después de que pasa a través del tercer polarizador.

La intensidad incidente ahora es $3I_b/8$. Aplique la ley de Malus al tercer polarizador:

$$I_3 = I_2 \cos^2 \theta = \frac{3}{8} I_b \cos^2 (45.0^\circ) = \frac{3}{8} I_b \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right)^2 = \frac{3}{16} I_b$$

COMENTARIOS Observe que el ángulo que se usó en el inciso b) no fue 75.0° , sino $75.0^\circ - 30.0^\circ = 45.0^\circ$. El ángulo siempre es con respecto al eje de transmisión del polarizador anterior, porque el material polarizador determina físicamente qué dirección pueden tener los campos eléctricos transmitidos.

PREGUNTA 24.8 ¿A qué ángulo, en relación con el polarizador anterior, se debe colocar un polarizador adicional de modo que bloquee por completo la luz?

EJERCICIO 24.8 Los polarizadores se rotan de modo que el segundo polarizador tiene un eje de transmisión de 40.0° con respecto al primer polarizador y el tercer polarizador tiene un ángulo de 90.0° con respecto al primero. Si I_b es la intensidad de la luz no polarizada original, ¿cuál es la intensidad del haz después de que pasa a través de a) el segundo polarizador y b) el tercer polarizador? c) ¿Cuál es la intensidad transmitida final si se quita el segundo polarizador?

RESPUESTAS a) $0.293I_b$ b) $0.121I_b$ c) 0

Polarización por reflexión

Cuando un haz de luz no polarizada se refleja en una superficie, la luz reflejada es por completo polarizada, parcialmente polarizada o no polarizada, dependiendo del ángulo de incidencia. Si el ángulo de incidencia es 0° o 90° (un ángulo normal o que pasa rozando), el haz reflejado es no polarizado. Sin embargo, para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la luz reflejada es polarizada en cierta medida. Para un ángulo de incidencia particular, el haz reflejado es totalmente polarizado.

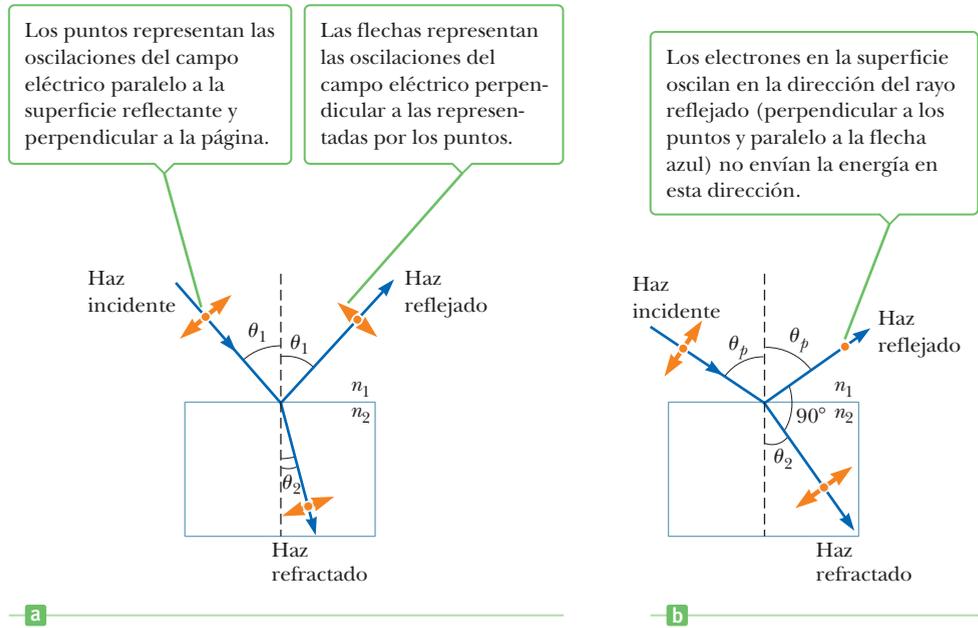
Suponga que un haz de luz no polarizado incide sobre una superficie, como en la figura 24.28a en la página 846. El haz se puede describir mediante dos componentes de campo eléctrico, uno paralelo a la superficie (representado mediante puntos) y el otro perpendicular al primer componente y a la dirección de propagación (representados mediante flechas anaranjadas). Se encuentra que el componente paralelo se refleja con más intensidad que los otros componentes y el resultado es un haz parcialmente polarizado. Además, el haz refractado también es parcialmente polarizado.

Ahora suponga que el ángulo de incidencia, θ_1 , varía hasta que el ángulo entre los haces reflejado y refractado es 90° (figura 24.28b). A este ángulo de incidencia particular, llamado **ángulo de polarización** θ_p , el haz reflejado es completamente polarizado, con su vector de campo eléctrico paralelo a la superficie, mientras que el haz refractado es parcialmente polarizado.

Una expresión que relaciona el ángulo de polarización con el índice de refracción de la superficie reflejante se puede obtener al usar la figura 24.28b. A partir de esta figura, vemos que, al ángulo de polarización, $\theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$, de modo que $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$. Al usar la ley de Snell y tomar $n_1 = n_{\text{aire}} = 1.00$ y $n_2 = n$ produce

$$n = \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\text{sen } \theta_p}{\text{sen } \theta_2}$$

Figura 24.28 a) Cuando luz no polarizada incide sobre una superficie reflejante, los haces reflejado y refractado son parcialmente polarizados. b) El haz reflejado es completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de polarización θ_p , lo que satisface la ecuación $n = \tan \theta_p$.



Puesto que $\text{sen } \theta_2 = \text{sen } (90^\circ - \theta_p) = \text{cos } \theta_p$, la expresión para n se puede escribir

Ley de Brewster ►

$$n = \frac{\text{sen } \theta_p}{\text{cos } \theta_p} = \tan \theta_p$$

[24.14]

La ecuación 24.14 se llama **ley de Brewster** y el ángulo de polarización θ_p a veces se llama **ángulo de Brewster** en honor a su descubridor, sir David Brewster (1781-1868). Por ejemplo, el ángulo de Brewster para vidrio corona (donde $n = 1.52$) tiene el valor $\theta_p = \tan^{-1}(1.52) = 56.7^\circ$. Puesto que n varía con la longitud de onda para una sustancia dada, el ángulo de Brewster también es una función de la longitud de onda.

APLICACIÓN

Lentes polarizados

La polarización por reflexión es un fenómeno común. La luz solar que se refleja del agua, vidrio o nieve es parcialmente polarizada. Si la superficie es horizontal, el vector de campo eléctrico de la luz reflejada tiene un fuerte componente horizontal. Las gafas para Sol hechas de material polarizador reducen el destello, que es la luz reflejada. Los ejes de transmisión de las lentes se orientan de manera vertical para absorber al fuerte campo horizontal de la luz reflejada. Puesto que la luz reflejada es principalmente polarizada, la mayor parte del destello se puede eliminar sin remover una cantidad considerable de la luz normal.

Polarización por dispersión

Cuando la luz incide sobre un sistema de partículas, como un gas, los electrones en el medio pueden absorber y volver a radiar parte de la luz. La absorción y re-radiación de la luz por el medio, llamada **dispersión**, es lo que hace que se polarice la luz solar que llega a un observador en la Tierra directa sobre su cabeza. Puede observar este efecto al mirar directamente hacia arriba a través de un par de gafas para el Sol hechas de vidrio polarizado. Menos luz pasa a través de ciertas orientaciones de las lentes que de otras.

La figura 24.29 ilustra cómo se polariza la luz solar. El lado izquierdo de la figura muestra un haz incidente no polarizado de luz solar a punto de golpear una molécula de aire. Cuando el haz golpea la molécula de aire, pone a vibrar los electrones de las moléculas. Estas cargas en vibración actúan como las de una antena, excepto que vibran en un patrón complicado. La parte horizontal del vector de campo eléctrico en la onda incidente hace que las cargas vibren en forma horizontal y la parte vertical del vector simultáneamente las hace vibrar verticalmente. Como resultado de su movimiento horizontal, los electrones emiten una onda horizontalmente polarizada y, como resultado de su movimiento vertical, se emite una onda verticalmente polarizada paralela a la Tierra.

La luz dispersada viaja perpendicular a la luz incidente y está polarizada en un plano, porque las vibraciones verticales de las cargas en la molécula de aire no envían la luz en esta dirección.

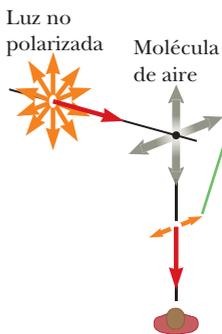


Figura 24.29 Dispersión de luz solar no polarizada por las moléculas de aire.

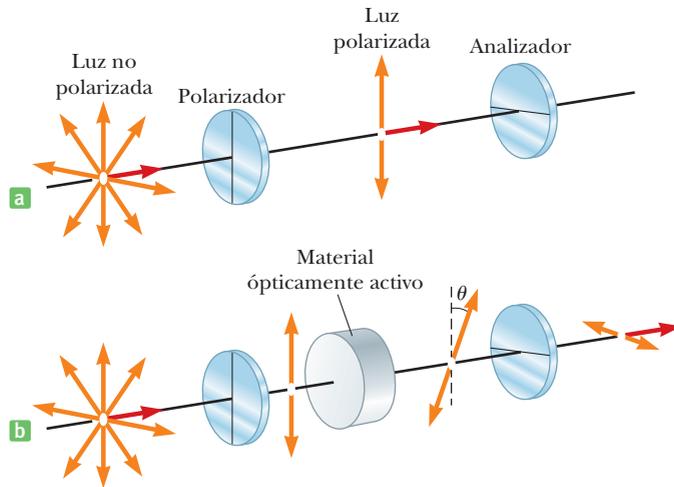


Figura 24.30 a) Cuando se usan polarizadores cruzados, nada de la luz polarizada puede pasar a través del analizador. b) Un material ópticamente activo rota la dirección de polarización a través del ángulo θ , lo que permite que algo de la luz polarizada pase a través del analizador.

Los científicos descubrieron que las abejas y las palomas mensajeras usan la polarización de la luz solar como auxiliar de navegación.

Actividad óptica

Muchas aplicaciones prácticas importantes de la luz polarizada involucran el uso de ciertos materiales que despliegan la propiedad de **actividad óptica**. Se dice que una sustancia es ópticamente activa si rota el plano de polarización de luz transmitida. Suponga que luz no polarizada incide sobre un polarizador desde la izquierda, como en la figura 24.30a. La luz transmitida se polariza en forma vertical, como se muestra. Si entonces esta luz incide sobre un analizador con su eje perpendicular al del polarizador, no sale luz de él. Si un material ópticamente activo se coloca entre el polarizador y el analizador, como en la figura 24.30b, el material hace que la dirección del haz polarizado gire a través del ángulo θ . Como resultado, algo de luz puede pasar a través del analizador. El ángulo a través del cual el material hace girar la luz se puede encontrar al rotar el polarizador hasta que la luz de nuevo se extingue. Esto determina que el ángulo de rotación depende de la longitud de la muestra y, si la sustancia es una solución, de la concentración. Un material ópticamente activo es una solución de azúcar común, dextrosa. Un método estándar para determinar la concentración de una solución de azúcar es medir la rotación que produce una longitud fija de la solución.

La actividad óptica ocurre en un material debido a una asimetría en la forma de sus moléculas constituyentes. Por ejemplo, algunas proteínas son ópticamente activas debido a sus formas espirales. Otros materiales, como vidrio y plástico, se vuelven ópticamente activos cuando se colocan bajo tensión. Si luz polarizada pasa a través de un trozo de plástico sin tensión y luego a través de un analizador con un eje perpendicular al del polarizador, nada de la luz polarizada se transmite. Sin embargo, si el plástico se coloca bajo tensión, las regiones de mayor tensión producen los mayores ángulos de rotación de luz polarizada y en la luz transmitida se observa una serie de bandas claras y oscuras. Los ingenieros por lo regular utilizan esta propiedad en el diseño de estructuras que van desde puentes hasta pequeñas herramientas. Se construye un modelo de plástico y se analiza bajo diferentes condiciones de carga para determinar las posiciones de debilidad potencial y falla bajo tensión. Si el diseño es pobre, los patrones de bandas claras y oscuras indicarán los puntos de mayor debilidad y el diseño se puede corregir a una etapa temprana. La figura 24.31 muestra ejemplos de patrones de tensión en plástico.

Pantallas de cristal líquido (LCD)

Un efecto similar a la rotación del plano de polarización se usa para crear las familiares pantallas en las calculadoras de bolsillo, relojes de muñeca, computadoras portátiles y artículos similares. Las propiedades de una sustancia única llamada cristal líquido hacen posibles

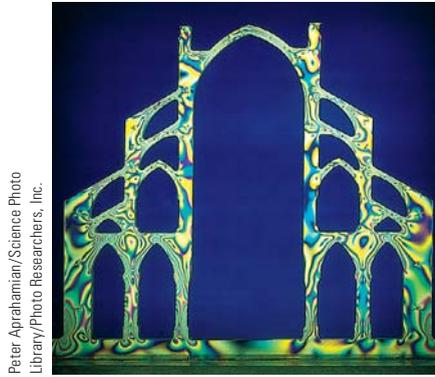
APLICACIÓN

Cómo encontrar las concentraciones de soluciones mediante su actividad óptica.

APLICACIÓN

Pantallas de cristal líquido

Figura 24.31 Un modelo de plástico de una estructura de arco bajo condiciones de carga observado entre polarizadores perpendiculares. Estos patrones son útiles en el diseño óptimo de los componentes arquitectónicos.

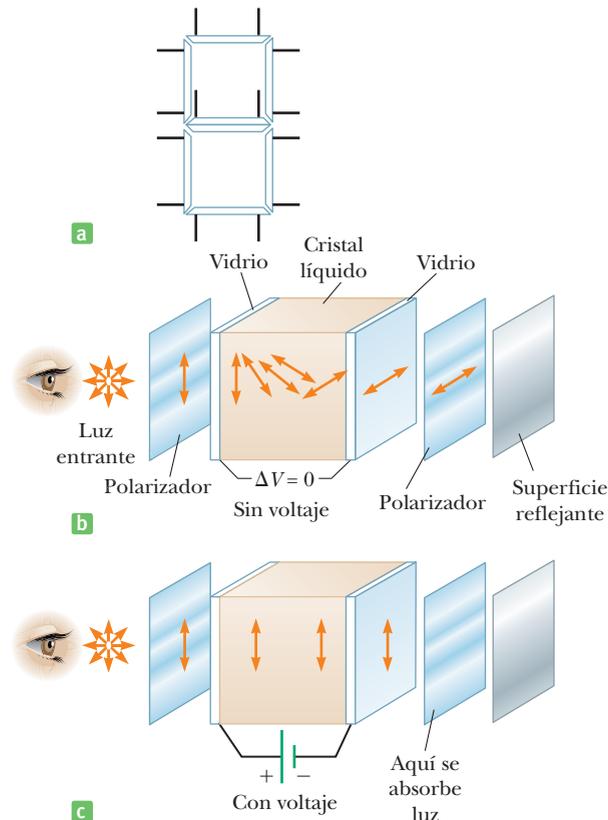


estas pantallas (llamadas LCD, por las siglas en inglés de *liquid crystal displays*). Como implica su nombre, un **crystal líquido** es una sustancia con propiedades intermedias entre las de un sólido cristalino y las de un líquido; esto es, las moléculas de la sustancia están más ordenadas que en un líquido, pero menos ordenadas que en un sólido cristalino puro. Las fuerzas que mantienen las moléculas juntas en tal estado son apenas lo suficientemente intensas como para permitir a la sustancia mantener una forma definida, de modo que es razonable llamarla sólido. Sin embargo, pequeñas entradas de energía mecánica o eléctrica pueden perturbar estos enlaces débiles y hacer que la sustancia fluya, rote o gire.

Para ver cómo se pueden usar los cristales líquidos para crear una pantalla, considere la figura 24.32a. El cristal líquido se coloca entre dos placas de vidrio en el patrón que se muestra y se forman contactos eléctricos, que se indican mediante líneas delgadas. Cuando se aplica un voltaje a través de cualquier segmento en la pantalla, dicho segmento se vuelve oscuro. De esta forma cualquier número entre 0 y 9 se puede formar por el patrón, dependiendo de los voltajes aplicados a los siete segmentos.

Para ver por qué un segmento se puede cambiar de oscuro a brillante por la aplicación de un voltaje, considere la figura 24.32b, que muestra la construcción básica de una

Figura 24.32 a) Patrón de segmento brillante de una pantalla de cristal líquido. b) Rotación de un haz de luz polarizado por un cristal líquido cuando el voltaje aplicado es cero. c) Las moléculas del cristal líquido se alinean con el campo eléctrico cuando se aplica un voltaje.



porción de la pantalla. El cristal líquido se coloca entre dos sustratos de vidrio que se empaquetan entre dos piezas de material Polaroid con sus ejes de transmisión perpendiculares. Una superficie reflejante se coloca detrás de una pieza de Polaroid. Primero considere lo que ocurre cuando la luz cae sobre este paquete y no se aplican voltajes al cristal líquido, como se muestra en la figura 24.32b. La luz entrante se polariza en el polarizador de la izquierda y luego cae sobre el cristal líquido. Conforme la luz pasa a través del cristal, su plano de polarización gira 90°, lo que le permite pasar a través del polarizador a la derecha. Se refleja de la superficie reflejante y vuelve a trazar su trayectoria a través del cristal. Por ende, un observador a la izquierda del cristal ve el segmento como brillante. Cuando se aplica un voltaje, como en la figura 24.32c, las moléculas de cristal líquido no rotan el plano de polarización de la luz. En este caso la luz se absorbe en el polarizador de la derecha y nada se refleja de vuelta al observador a la izquierda del cristal. Como resultado, el observador ve este segmento como negro. Cambiar el voltaje aplicado al cristal en el patrón preciso en tiempos precisos puede hacer que el patrón marque los segundos en un reloj, despliegue una letra en una pantalla de computadora, y otras situaciones similares.

RESUMEN

24.1 Condiciones para interferencia

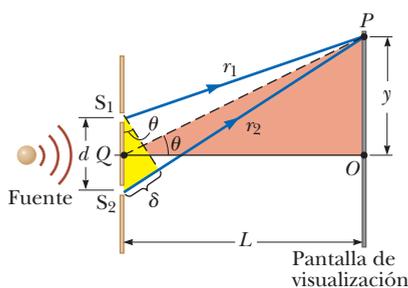
La **interferencia** ocurre cuando dos o más ondas de luz se traslapan en un punto dado. Un patrón de interferencia sostenido se observa si 1) las fuentes son coherentes (esto es, mantienen una relación de fase constante mutua), 2) las fuentes tienen longitudes de onda idénticas y 3) es aplicable el principio de superposición.

24.2 Experimento de doble rendija de Young

En el **experimento de doble rendija de Young** dos rendijas separadas por la distancia d se iluminan mediante una fuente de luz de una sola longitud de onda. Sobre una pantalla a una distancia L de las rendijas se observa un patrón de interferencia que consiste en franjas brillantes y oscuras. La condición para **franjas brillantes** (interferencia constructiva) es

$$d \sin \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.2]$$

El número m se llama **número de orden** de la franja.



Construcción geométrica que describe el experimento de doble rejilla de Young. (La figura no está dibujada a escala.)

La condición para **franjas oscuras** (interferencia destructiva) es

$$d \sin \theta_{\text{oscura}} = (m + \frac{1}{2})\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.3]$$

La posición y_m de las franjas brillantes sobre la pantalla se pueden determinar al usar la relación $\sin \theta \approx \tan \theta = y_m/L$, que es cierta para ángulos pequeños. Esta relación se puede sustituir en las ecuaciones 24.2 y 24.3, lo que produce la ubicación de las franjas brillantes:

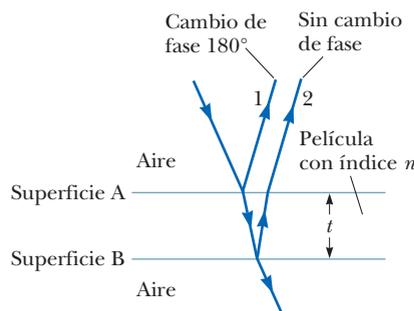
$$y_{\text{brillante}} = \frac{\lambda L}{d} m \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.5]$$

Una expresión similar se puede deducir para las franjas oscuras. Esta ecuación se puede usar o para ubicar los máximos o para determinar la longitud de onda de la luz al medir y_m .

24.3 Cambio de fase debido a reflexión

24.4 Interferencia en películas delgadas

Una onda electromagnética experimenta un cambio de fase de 180° en su reflexión desde un medio con un índice de refracción mayor que el del medio donde la onda viaja. No hay cambio cuando la onda, que viaja en un medio con mayor índice de refracción, se refleja desde un medio con un índice de refracción menor.



La interferencia en la luz reflejada por una fina película se debe a una combinación de los rayos 1 y 2, que se refleja en las superficies superior e inferior de la película.

La longitud de onda λ_n de la luz en un medio con índice de refracción n es

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad [24.7]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz en el espacio libre. La luz que encuentra una película delgada de grosor t se reflejará de las partes superior e inferior de la película y cada rayo experimentará un posible cambio de fase como se describió con anterioridad. Los dos rayos se recombinan y

se observarán franjas brillantes y oscuras, con las condiciones de interferencia dadas por la siguiente tabla:

Ecuación ($m = 0, 1, \dots$)	Inversión de fase 1	Inversiones de fase 0 y 2
$2nt = (m + \frac{1}{2})\lambda$ [24.9]	Constructiva	Destructiva
$2nt = m\lambda$ [24.10]	Destructiva	Constructiva

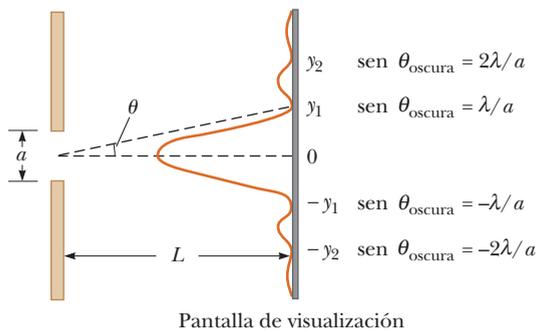
24.6 Difracción

24.7 Difracción de una sola rendija

La difracción ocurre cuando las ondas pasan a través de pequeñas aberturas, alrededor de obstáculos o por bordes agudos. El **patrón de difracción** que se produce mediante una sola rendija sobre una pantalla distante consiste en un máximo brillante central flanqueado por franjas menos brillantes que alternan con regiones oscuras. Los ángulos θ a los que el patrón de difracción tiene intensidad cero (regiones de interferencia destructiva) se describen mediante

$$\text{sen } \theta_{\text{oscura}} = m \frac{\lambda}{a} \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad [24.11]$$

donde λ es la longitud de onda de la luz que incide sobre la rendija y a es el ancho de la rendija.



Posiciones de los mínimos para el patrón de difracción de Fraunhofer de una sola rendija de ancho a . (Este dibujo no está a escala.)

24.8 La rejilla de difracción

Una **rejilla de difracción** consiste en muchas rendijas idénticas igualmente espaciadas. La condición para **intensidad máxima** en el patrón de interferencia de una rejilla de difracción es

$$d \text{ sen } \theta_{\text{brillante}} = m\lambda \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [24.12]$$

donde d es el espaciamiento entre rendijas adyacentes y m es el número de orden del patrón de difracción. Una rejilla de difracción se puede fabricar al poner un gran número de rayas igualmente espaciadas sobre una placa de vidrio. El número de tales líneas por centímetro es el inverso del espaciamiento d .

24.9 Polarización de ondas de luz

La luz no polarizada se puede polarizar mediante absorción selectiva, reflexión o dispersión. Un material puede polarizar luz si transmite ondas que tengan vectores de campo eléctrico que vibran en un plano paralelo a cierta dirección y absorben ondas con vectores de campo eléctrico que vibran en direcciones perpendiculares a dicha dirección. Cuando luz no polarizada pasa a través de una hoja polarizadora, su intensidad se reduce a la mitad y la luz se polariza. Cuando esta luz pasa a través de una segunda hoja polarizadora con eje de transmisión en un ángulo θ con respecto al eje de transmisión de la primera hoja, la intensidad transmitida está dada por

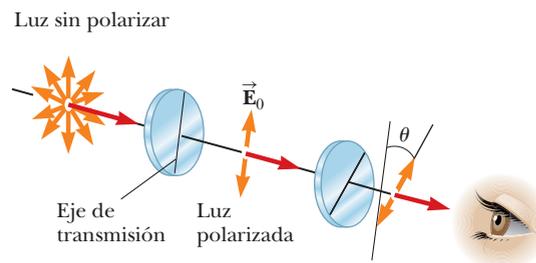
$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad [24.13]$$

donde I_0 es la intensidad de la luz después de pasar a través de la primera hoja polarizadora.

En general, la luz que se refleja de un material amorfo, como el vidrio, se polariza en forma parcial. La luz que se refleja está completamente polarizada, con su campo eléctrico paralelo a la superficie, cuando el ángulo de incidencia produce un ángulo de 90° entre los haces reflejado y refractado. Este ángulo de incidencia, llamado **ángulo de polarización** θ_p , satisface la **ley de Brewster**, dada por

$$n = \tan \theta_p \quad [24.14]$$

donde n es el índice de refracción del medio reflejante.



Dos hojas de polarización, con ejes de transmisión en ángulo θ , transmiten sólo una fracción de la luz incidente.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una delgada película de aceite ($n = 1.25$) flota sobre agua ($n = 1.33$). ¿Cuál es el mínimo grosor distinto de cero del aceite en la región que refleja fuertemente luz verde ($\lambda = 530 \text{ nm}$)? a) 500 nm b) 313 nm c) 404 nm d) 212 nm e) 285 nm
- Un haz de luz monocromática que tiene una longitud de onda de $5.0 \times 10^2 \text{ nm}$ ilumina una doble rendija que tiene una separación de rendijas de $2.0 \times 10^{-5} \text{ m}$. ¿Cuál es el ángulo de la franja brillante de segundo orden? a) 0.050 rad b) 0.025 rad c) 0.10 rad d) 0.25 rad e) 0.010 rad

3. Un patrón de difracción de Fraunhofer se produce sobre una pantalla ubicada a 1.00 m de una sola rendija. Si se usa una fuente de luz de 5.00×10^{-7} m y la distancia desde el centro de la franja brillante central a la primera franja oscura es 5.00×10^{-3} m, ¿cuál es el ancho de la rendija? a) 0.0100 mm b) 0.100 mm c) 0.200 mm d) 1.00 mm e) 0.005 00 mm
4. Si luz plano-polarizada se envía a través de dos polarizadores, el primer polarizador a 45° con el plano original de polarización y el segundo polarizador a 90° con el plano original de polarización, ¿qué fracción de la intensidad polarizada original pasa a través del último polarizador? a) 0 b) 0.25 c) 0.50 d) 0.125 e) 0.10
5. Una onda de luz monocromática plana incide sobre una doble rendija como se ilustra en la figura 24.4. Conforme la separación de la rendija disminuye, ¿qué sucede con la separación entre las franjas de interferencia sobre la pantalla? a) Disminuye. b) Aumenta. c) Permanece igual. d) Puede aumentar o disminuir, dependiendo de la longitud de onda de la luz. e) Se requiere más información.
6. Una onda de luz monocromática plana incide sobre una doble rendija como se ilustra en la figura 24.4. Si la pantalla de visualización se aleja de la doble rendija, ¿qué sucede con la separación entre las franjas de interferencia sobre la pantalla? a) Aumenta. b) Disminuye. c) Permanece igual. d) Puede aumentar o disminuir, dependiendo de la longitud de onda de la luz. e) Se requiere más información.
7. En un experimento, luz con longitud de onda λ_1 pasa a través de una sola rendija y forma un patrón de interferencia sobre una pantalla. En un segundo experimento, luz con longitud de onda λ_2 pasa a través de la misma rendija y forma otro patrón de interferencia sobre la pantalla. Si $\lambda_2 > \lambda_1$, ¿cuál es la separación entre líneas brillantes en los dos experimentos? a) Es la misma para ambos experimentos. b) Es mayor en el primer experimento. c) Es mayor en el segundo experimento. d) Depende de la intensidad de la luz. e) Se requiere más información.
8. ¿Qué le sucede a la luz cuando se refleja en una superficie brillante en un día soleado? a) Experimenta refracción. b) Se polariza por completo. c) Es no polarizada. d) Tiende a ser parcialmente polarizada. e) Se requiere más información.
9. ¿Qué provocan los brillantes patrones coloridos que a veces se ven sobre las calles mojadas cubiertas con una capa de aceite? Elija la mejor respuesta. a) difracción y polarización b) interferencia y desviación c) polarización y reflexión d) refracción y difracción e) reflexión e interferencia.
10. Considere una onda que pasa a través de una sola rendija. ¿Qué sucede con el ancho del máximo central de su patrón de difracción conforme la rendija se hace la mitad de ancho? a) Se vuelve un cuarto de ancho. b) Se vuelve la mitad de ancho. c) Su ancho no cambia. d) Se vuelve el doble de ancho. e) Se vuelve cuatro veces más ancho.
11. Una película de aceite sobre un charco en un estacionamiento muestra una variedad de colores brillantes en parches arremolinados. ¿Qué puede decir sobre el espesor de la capa de aceite? a) Es mucho menor que la longitud de onda de la luz visible. b) Es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la luz visible. c) Es mucho mayor que la longitud de onda de la luz visible. d) Puede ser que haya alguna relación con la longitud de onda de la luz visible.
12. Cuando se recibe una radiografía de tórax en un hospital, los rayos X pasan a través de un conjunto de nervios paralelos en el pecho. ¿Sus costillas actúan como una rejilla de difracción de rayos X? a) Sí. Producen haces difractados que se pueden observar por separado. b) No para una extensión mensurable. Las costillas están demasiado separadas. c) En esencia no. Las costillas están muy juntas. d) En esencia no. Las costillas son muy pocas en número. e) Por supuesto que no. No pueden difractar los rayos X.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Su automóvil tiene dos faros. ¿Qué tipo de patrón de interferencia espera ver a partir de ellos? ¿Por qué?
2. Si sostiene su mano a la longitud de brazo, fácilmente puede bloquear la luz solar directa de sus ojos. ¿Por qué no puedes bloquear el sonido a sus oídos de esta forma?
3. Considere una franja oscura en un patrón de interferencia al cual casi no llega energía luminosa. La luz proveniente de ambas rendijas llega a este punto, pero las ondas se cancelan. ¿A dónde va la energía?
4. Si el experimento de doble rendija de Young se realiza bajo agua, ¿cómo se afectaría el patrón de interferencia observado?
5. En un accidente de laboratorio, se derramaron dos líquidos en agua, ninguno de los cuales se mezcla con el agua. Ambos forman películas delgadas sobre la superficie del agua. Conforme las películas se dispersan y se vuelven muy delgadas, observe que una película se vuelve brillante y la otra negra en luz reflejada. ¿Por qué puede ser esto?
6. Si en el experimento de doble rendija de Young se usa luz blanca en lugar de luz monocromática, ¿cómo cambia el patrón de interferencia?
7. Una lente con radio de curvatura exterior R e índice de refracción n descansa sobre una placa de vidrio plana, y la combinación se ilumina desde arriba con luz blanca.

- ¿En el centro de la lente hay una mancha oscura o una mancha clara? ¿Qué significa si los anillos observados no son circulares?
- Con frecuencia, las huellas digitales que quedan sobre un trozo de vidrio, como el panel de una ventana, muestran espectros coloridos como los de una rejilla de difracción. ¿Por qué?
 - En la experiencia cotidiana, ¿por qué se polarizan las ondas de radio, mientras que la luz no se polariza?
 - Suponga que luz blanca reflejada se usa para observar un delgado recubrimiento transparente sobre vidrio conforme el material de recubrimiento se deposita gradualmente mediante evaporación en un vacío. Describa algunos cambios de color que puedan ocurrir durante el proceso de acumulación del grosor del recubrimiento.
 - ¿Sería posible colocar un recubrimiento no reflector sobre un avión para cancelar ondas de radar con 3 cm de longitud de onda?
 - Ciertas gafas para el Sol usan un material polarizador para reducir la intensidad de la luz reflejada de superficies brillantes, como el agua o el cofre de un automóvil.

¿Qué orientación del eje de transmisión debe tener el material para ser más eficaz?

- ¿Por qué es mucho más fácil realizar experimentos de interferencia con un láser que con una fuente de luz ordinaria?
- Una película jabonosa se mantiene de forma vertical en aire y se ve en luz reflejada como en la figura PC24.14. Explique por qué la película parece ser oscura en la parte superior.

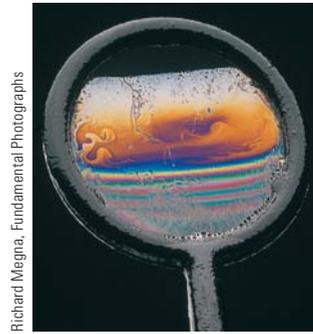


Figura PC24.14

■ PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, **2.** denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- denota problemas biomédicos
- denota problemas guiados
- denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- denota problema de razonamiento simbólico

24.2 Experimento de doble rendija de Young

- Un haz láser incide sobre dos rendijas con una separación de 0.200 mm, y una pantalla se coloca a 5.00 m de las rendijas. Si las franjas de interferencia brillante sobre la pantalla están separadas 1.58 cm, ¿cuál es la longitud de onda de la luz láser?
- En un experimento de doble rendija de Young, un conjunto de rendijas paralelas, con una separación de 0.100 mm, se ilumina con luz que tiene una longitud de onda de 589 nm, y el patrón de interferencia se observa sobre una pantalla a 4.00 m de las rendijas. a) ¿Cuál es la diferencia en longitudes de trayectoria de cada una de las rendijas a la ubicación de una tercera franja brillante de tercer orden sobre la pantalla? b) ¿Cuál es la diferencia en longitudes de trayectoria desde las dos rendijas hasta la ubicación de la tercera franja oscura sobre la pantalla, lejos del centro del patrón?
- Un par de estrechas rendijas paralelas, separadas 0.250 mm, se ilumina mediante el componente verde de una lámpara de vapor de mercurio ($\lambda = 546.1$ nm). El patrón de interferencia se observa sobre una pantalla a 1.20 m del plano de las rendijas paralelas. Calcule la distancia
 - desde el máximo central hasta la primera región brillante a cualquier lado del máximo central y b) entre la primera y segunda bandas oscuras en el patrón de interferencia.
- Luz de 620 nm de longitud de onda cae en una doble rendija y la primera franja brillante del patrón de interferencia se ve en un ángulo de 15.0° a partir del máximo central. Busque la separación entre las rendijas.
- En una ubicación donde la velocidad del sonido es 354 m/s, una onda sonora de 2 000 Hz incide sobre dos rendijas separadas 30.0 cm. a) ¿A qué ángulo se ubica el primer máximo? b) Si la onda sonora se sustituye con microondas de 3.00 cm, el primer máximo? c) Si la separación de las rendijas es $1.00 \mu\text{m}$, ¿qué frecuencia de luz produce el mismo ángulo de primer máximo?
- Dos rendijas separadas 0.058 0 mm y ubicadas a 1.50 m de una pantalla. a) Si la luz amarilla de longitud de onda de 588 nm incide en la doble rendija, ¿cuál es la separación entre los máximos de orden cero y primer orden en la pantalla? b) Si la luz azul de longitud de onda 412 nm incide en la doble rendija, ¿cuál es la separación entre los máximos de segundo orden y de cuarto orden?

7. **M** Dos antenas de radio separadas $d = 300$ m, como se muestra en la figura P24.7, transmiten de forma simultánea señales idénticas de la misma longitud de onda. Un automóvil viaja hacia el norte, a lo largo de una línea recta en la posición $x = 1000$ m desde el punto central entre las antenas y su radio recibe las señales. a) Si el coche está en la posición del segundo máximo después del punto O cuando éste ha recorrido una distancia de $y = 400$ m hacia el norte, ¿cuál es la longitud de onda de las señales? b) ¿Cuánto más lejos debe viajar el coche desde esta posición para encontrar el mínimo siguiente en la recepción? *Sugerencia:* No utilice la aproximación de ángulo pequeño en este problema.

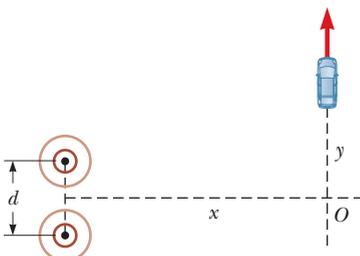


Figura P24.7

8. Luz con 6.0×10^2 nm de longitud de onda cae sobre una doble rendija, y la primera franja brillante del patrón de interferencia se observa que forma un ángulo de 12° con la horizontal. Encuentre la separación entre las rendijas.
9. Luz monocromática incide sobre una pantalla de 1.75 m a partir de dos rendijas separadas por 2.10 mm. Las franjas brillantes de primer y segundo orden están separadas por 0.552 mm. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz?
10. Un par de rendijas, separadas 0.150 mm, se ilumina con luz que tiene una longitud de onda $\lambda = 643$ nm. Sobre una pantalla a 140 cm de las rendijas se observa un patrón de interferencia. Considere un punto sobre la pantalla ubicado en $y = 1.80$ cm del máximo central de este patrón. a) ¿Cuál es la diferencia de trayectoria δ para las dos rendijas en la posición y ? b) Expresé esta diferencia de trayectoria en términos de la longitud de onda. c) ¿La interferencia corresponderá a un máximo, un mínimo o una condición intermedia?
11. Una bodega a la orilla de un río tiene dos puertas abiertas, como en la figura P24.11. Su interior está recubierto con un

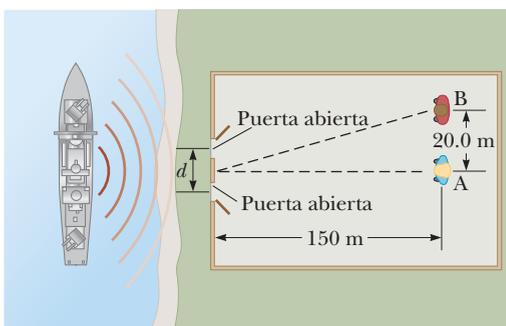


Figura P24.11

material que absorbe sonido. Un bote sobre el río suena su sirena. Para la persona A, el sonido es fuerte y claro. Para la persona B, el sonido apenas es audible. La longitud de onda principal de las ondas sonoras es 3.00 m. Suponiendo que la persona B está en la posición del primer mínimo, determine la distancia entre las puertas, de centro a centro.

12. **C/C** Un estudiante monta un experimento de doble rendija con luz monocromática que tiene longitud de onda λ . La distancia entre las rendijas es igual a 25λ . a) Encuentre los ángulos a los cuales ocurren los máximos $m = 1, 2$ y 3 sobre la pantalla de visualización. b) ¿A qué ángulos ocurren las primeras tres franjas oscuras? c) ¿Por qué las respuestas están tan equitativamente espaciadas? ¿El espaciamiento es equitativo para todos los órdenes? Explique.
13. Ondas de radio de una estrella, con longitud de onda de 250 m, llegan a un radiotelescopio mediante dos trayectorias separadas, como se muestra en la figura P24.13. La primera es una trayectoria directa hasta el receptor, que se sitúa sobre el borde de un risco junto al océano. La segunda es mediante reflexión del agua. El primer mínimo de interferencia destructiva ocurre cuando la estrella está 25.0° arriba del horizonte. Encuentre la altura del risco. (Suponga que no hay cambio de fase en la reflexión.)

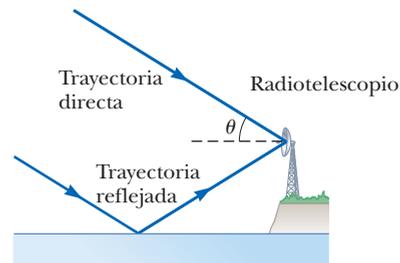


Figura P24.13

14. **PG** Luz monocromática con longitud de onda λ incide sobre un par de rendijas separadas por 2.40×10^{-4} m y forma un patrón de interferencia sobre una pantalla colocada a 1.80 m de distancia de las rendijas. La franja brillante de primer orden es 4.52 mm desde el centro del máximo central. a) Dibuje una imagen y marque el ángulo θ y las patas del triángulo recto asociado con la franja brillante de primer orden. b) Calcule la tangente del ángulo θ asociado con la franja brillante de primer orden. c) Encuentre el ángulo que corresponde a la franja brillante de primer orden y calcule el seno de dicho ángulo. ¿El seno y la tangente del ángulo son comparables en valor? ¿Su respuesta siempre es verdadera? d) Calcule la longitud de onda de la luz. e) Calcule el ángulo de la franja brillante de quinto orden. f) Encuentre su posición sobre la pantalla.
15. Ondas provenientes de una estación tienen una longitud de onda de 300 m. Las ondas viajan por dos rutas hasta un receptor casero a 20.0 km del transmisor. Una ruta es una trayectoria directa y la segunda es mediante reflexión de una montaña directamente detrás del receptor. ¿Cuál es la distancia mínima desde la montaña hasta el receptor que produce interferencia destructiva en el receptor? (Suponga que no ocurren cambios de fase en la reflexión de la montaña.)

24.3 Cambio de fase debido a reflexión**24.4 Interferencia en películas delgadas**

16. **C/C** Una pompa de jabón ($n = 1.33$), que tiene un grosor de pared de 120 nm, flota en aire. a) ¿Cuál es la longitud de onda de la luz visible que se refleja con más fuerza? b) Explique cómo una burbuja de diferente grosor también podría reflejar intensamente luz con esta misma longitud de onda. c) Encuentre los dos grosores de película más pequeños, mayores que el proporcionado, que pueden producir luz de esta misma longitud de onda que se refleja fuertemente.
17. Una capa delgada de yoduro de metileno líquido ($n = 1.756$) se empareda entre dos placas paralelas planas de vidrio ($n = 1.50$). ¿Cuál es el grosor mínimo de la capa líquida, si luz con $\lambda = 6.00 \times 10^2$ nm en aire, que incide de manera normal, se debe reflejar con fuerza?
18. **S** Una película delgada de aceite ($n = 1.25$) se ubica sobre pavimento liso húmedo. Cuando se ve desde una dirección perpendicular al pavimento, la película refleja con más intensidad luz roja a 640 nm y no refleja luz verde a 512 nm. a) ¿Cuál es el grosor mínimo de la película de aceite? b) Sea m_1 el orden de interferencia constructiva y m_2 el orden de la interferencia destructiva. Obtenga una relación entre m_1 y m_2 que sea consistente con los datos.
19. Una fina capa de vidrio ($n = 1.52$) de espesor de $0.420 \mu\text{m}$ es visto bajo la luz blanca en incidencia casi normal. ¿Qué longitud de onda de la luz *visible* es más fuertemente reflejada en la película cuando está rodeada por aire?
20. Un aceite transparente, con índice de refracción 1.29, se derrama sobre la superficie del agua (índice de refracción 1.33), lo que produce un máximo de reflexión con luz anaranjada que incide de manera normal (longitud de onda 600 nm en aire). Suponiendo que el máximo ocurre en el primer orden, determine el grosor de la resbaladiza superficie de aceite.
21. **M** Un posible medio para hacer que un avión sea invisible para el radar, es recubrirlo con un polímero anti-reflector. Si las ondas de radar tienen una longitud de onda de 3.00 cm y el índice de refracción del polímero es $n = 1.50$, ¿cuán grueso haría el recubrimiento?
22. **C/C** Una película de aceite ($n = 1.45$) que flota sobre agua se ilumina mediante luz blanca a incidencia normal. La película tiene 2.80×10^2 nm de grosor. Encuentre a) la longitud de onda y el color de la luz en el espectro visible que se refleja con más intensidad y b) la longitud de onda y el color de la luz en el espectro visible que se transmite con más intensidad. Explique su razonamiento.
23. **C/C** Los astrónomos observan la cromósfera del Sol con un filtro que pasa la línea espectral del hidrógeno rojo de 656.3 nm de longitud de onda, llamada línea H_α . El filtro consiste en un dieléctrico transparente de grosor d que se mantiene entre dos placas de vidrio parcialmente aluminizadas. El filtro se mantiene a una temperatura constante. a) Encuentre el valor mínimo de d que pro-

ducirá máxima transmisión de luz H_α perpendicular si el dieléctrico tiene un índice de refracción de 1.378. b) Si la temperatura del filtro aumenta arriba del valor normal al aumentar su grosor, ¿qué sucede con la longitud de onda transmitida? c) El dieléctrico también pasará ¿cuál longitud de onda visible cercana? Una de las placas de vidrio tiene color rojo para absorber esta luz.

24. Dos placas planas ópticamente rectangulares ($n = 1.52$) están en contacto a lo largo de un extremo y están separadas a lo largo del otro extremo mediante un espaciador de $2.00 \mu\text{m}$ de grueso (figura P24.24). La placa superior es iluminada con luz monocromática de 546.1 nm de longitud de onda. Calcule el número de bandas paralelas oscuras que cruzan la placa superior (incluida la banda oscura a grosor cero a lo largo del borde de contacto entre las placas).

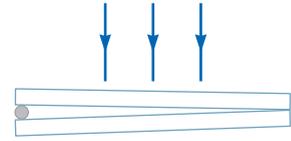


Figura P24.24
(Problemas 24 y 25)

25. Una investigadora encuentra una fibra en la escena del crimen que desea utilizar como evidencia en contra de un sospechoso. Le da la fibra a un técnico para poner a prueba las propiedades de la misma. Para medir el diámetro de la fibra, el técnico la coloca entre dos placas de vidrio plano en sus extremos como en la figura P24.24. Cuando las placas, de la longitud 14.0 cm, se iluminan desde arriba con luz de longitud de onda de 650 nm, ella observa interferencia en bandas brillantes separadas por 0.580 mm. ¿Cuál es el diámetro de la fibra?
26. Una lente plano-convexa, con radio de curvatura $R = 3.0$ m, está en contacto con una placa plana de vidrio. Una fuente de luz y el ojo del observador están ambos cerca de la normal, como se muestra en la figura 24.8a. El radio del 50o. anillo de Newton brillante se encuentra en 9.8 mm. ¿Cuál es la longitud de onda de la luz producida por la fuente?
27. Una lente plano-convexa descansa con su lado curvo sobre una superficie de vidrio plana y se ilumina desde arriba mediante luz con longitud de onda de 500 nm. (Vea la figura 24.8.) Una mancha oscura se observa en el centro, que rodea 19 anillos oscuros concéntricos (con anillos brillantes en medio). ¿Cuánto más gruesa es la cuña de aire en la posición del 19o. anillo oscuro que en el centro?
28. Los recubrimientos no reflejantes sobre las lentes de las cámaras reducen la pérdida de luz en las superficies de los sistemas multilentes y evitan reflexiones internas que pueden estropear la imagen. Encuentre el grosor mínimo de una capa de fluoruro de magnesio ($n = 1.38$) sobre vidrio flint ($n = 1.66$) que causará interferencia destructiva de luz reflejada con longitud de onda de 550 nm cerca del medio del espectro visible.
29. Una fina capa de glicerina ($n = 1.473$) de 524 nm de espesor con aire en ambos lados se ilumina con luz blanca en incidencia casi normal. ¿Qué longitudes de onda se reflejan fuertemente en el rango de 300 nm a 700 nm?

30. **CIC** Una lente de vidrio ($n_g = 1.52$) está cubierta con una fina capa de MgF_2 ($n_s = 1.38$) de espesor t . La luz visible incide de forma normal en la lente cubierta como en la figura P24.30. a) ¿Para qué valor mínimo de t la luz reflejada de la longitud de onda de 540 nm (en aire) se pierde? b) ¿Existen otros valores de t que reduzcan al mínimo la luz reflejada en esta longitud de onda? Explique.

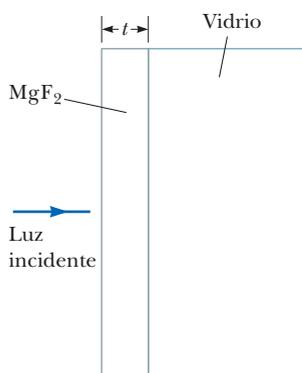


Figura P24.30

24.7 Difracción de una sola rendija

31. Luz con 5.40×10^2 nm de longitud de onda pasa a través de una rendija de 0.200 mm de ancho. a) Encuentre el ancho del máximo central sobre una pantalla ubicada a 1.50 m de la rendija. b) Determine el ancho de la franja brillante de primer orden.
32. Luz con 600 nm de longitud de onda cae sobre una rendija de 0.40 mm de ancho y forma un patrón de difracción sobre una pantalla a 1.5 m de distancia. a) Encuentre la posición de la primera banda oscura a cada lado del máximo central. b) Encuentre el ancho del máximo central.
33. **M** Luz con 587.5 nm de longitud de onda ilumina una rendija de 0.75 mm de ancho. a) ¿A qué distancia de la rendija se debe colocar una pantalla si el primer mínimo en el patrón de difracción debe estar a 0.85 mm del máximo central? b) Calcule el ancho del máximo central.
34. Microondas con 5.00 cm de longitud de onda entran a una larga y estrecha ventana en un edificio que de otro modo en esencia es opaco a las ondas entrantes. Si la ventana tiene 36.0 cm de ancho, ¿cuál es la distancia desde el máximo central al mínimo de primer orden a lo largo de una pared de 6.50 m desde la ventana?
35. Un haz de luz monocromática se difracta mediante una rendija de 0.600 mm de ancho. El patrón de difracción se forma sobre una ventana a 1.30 m más allá de la rendija. El ancho del máximo central es 2.00 mm. Calcule la longitud de onda de la luz.
36. Una pantalla se coloca a 50.0 cm de una sola rendija, que se ilumina con luz de 680 nm de longitud de onda. Si la distancia entre el primero y tercer mínimos en el patrón de difracción es 3.00 mm, ¿cuál es el ancho de la rendija?
37. Una rendija de 0.50 mm de ancho se ilumina con luz de 500 nm de longitud de onda y una pantalla se coloca a 120 cm enfrente de la rendija. Encuentre los anchos del primero y segundo máximos a cada lado del máximo central.
38. La franja oscura de segundo orden en un patrón de difracción de rendija es de 1.40 mm desde el centro del máximo central. Suponiendo que la pantalla está a 85.0 cm de

una rendija de 0.800 mm de anchura y asumiendo luz monocromática incidente, calcule la longitud de onda de la luz incidente.

24.8 La rejilla de difracción

39. Tres líneas espectrales discretas ocurren a ángulos de 10.1° , 13.7° y 14.8° , respectivamente, en el espectro de primer orden de un espectrómetro de rejilla de difracción. a) Si la rejilla tiene 3660 rendijas/cm, ¿cuáles son las longitudes de onda de la luz? b) ¿A qué ángulos se encuentran estas líneas en los espectros de segundo orden?
40. Intensa luz blanca incide sobre una rejilla de difracción que tiene 600 líneas/mm. a) ¿Cuál es el orden más alto en el que el espectro visible completo se puede ver con esta rejilla? b) ¿Cuál es la separación angular entre el borde violeta (400 nm) y el borde rojo (700 nm) del espectro de primer orden producido por la rejilla?
41. **M** El espectro del hidrógeno tiene una línea roja a 656 nm y una línea violeta a 434 nm. ¿Qué separación angular entre estas dos líneas espectrales se obtiene con una rejilla de difracción que tiene 4500 líneas/cm?
42. Considere un arreglo de alambres paralelos con una separación uniforme de 1.30 cm entre los centros. En el aire a 20.0°C , el ultrasonido con una frecuencia de 37.2 kHz de una fuente distante incidente es perpendicular al arreglo. (Tome la velocidad del sonido igual a 343 m/s.) a) Encuentre el número de direcciones en el otro lado del arreglo en los que hay un máximo de intensidad. b) Halle el ángulo de cada una de estas direcciones respecto a la dirección del haz incidente.
43. Un láser helio-neón ($\lambda = 632.8$ nm) se usa para calibrar una rejilla de difracción. Si el máximo de primer orden ocurre a 20.5° , ¿cuál es el espaciamiento entre surcos adyacentes en la rejilla?
44. Luz blanca se dispersa en sus componentes espectrales mediante una rejilla de difracción. Si la rejilla tiene 2000 líneas por centímetro, ¿a qué ángulo la luz roja con 640 nm de longitud de onda aparece en el espectro de primer orden?
45. Luz de un láser de argón golpea una rejilla de difracción que tiene 5310 surcos por centímetro. Los máximos central y principal de primer orden están separados 0.488 m sobre una pared a 1.72 m de la rejilla. Determine la longitud de onda de la luz láser.
46. **S** Considere luz roja de 700 nm y violeta de 400 nm como los extremos del espectro visible y considere el espectro continuo de luz blanca formado por una rejilla de difracción con un espaciamiento de d metros entre líneas adyacentes. Demuestre que el intervalo $\theta_{v2} \leq \theta \leq \theta_{r2}$ del espectro continuo en segundo orden debe traslapar el intervalo $\theta_{v3} \leq \theta \leq \theta_{r3}$ del espectro de tercer orden. *Nota:* θ_{v2} es el ángulo de la luz violeta en segundo orden y θ_{r2} es el ángulo formado por la luz roja en segundo orden.
47. Luz solar incide sobre una rejilla de difracción que tiene 2750 líneas/cm. El espectro de segundo orden sobre el

rango visible (400-700 nm) estará limitado a 1.75 cm a lo largo de una pantalla que está a una distancia L de la rejilla. ¿Cuál es el valor requerido de L ?

48. **PG** Una rejilla de difracción tiene 4.200×10^3 rendijas por centímetro. La pantalla está a 2.000 m de la rejilla. En los incisos de la a) a la e), redondee cada resultado a cuatro dígitos y use los valores redondeados para cálculos posteriores. a) Calcule el valor de d , la distancia entre rendijas adyacentes. Expresé la respuesta en metros. b) Calcule el ángulo del máximo de segundo orden formado por la longitud de onda de 589.0 nm del sodio. c) Encuentre la posición del máximo secundario sobre la pantalla. d) Repita los incisos b) y c) para el máximo de segundo orden de la longitud de onda de 589.6 nm del sodio y encuentre el ángulo y la posición sobre la pantalla. e) ¿Cuál es la distancia entre los dos máximos secundarios sobre la pantalla? f) Ahora encuentre la distancia entre los dos máximos secundarios sin redondeo y acarree todos los dígitos en la memoria de una calculadora. ¿Cuántas cifras significativas están en concordancia? ¿Qué puede concluir acerca del redondeo y el uso de respuestas intermedias en este caso?
49. Luz de longitud de onda de 500 nm incide en forma normal sobre una rejilla de difracción. Si el máximo de tercer orden del patrón de difracción se observa a 32.0° , a) ¿cuál es el número de resolución por centímetro de la rejilla? b) Determine el número total de máximos primarios que se pueden observar en esta situación.
50. Luz que contiene dos longitudes de onda diferentes pasa a través de una rejilla de difracción con 1200 rendijas/cm. En una pantalla a 15.0 cm de la rejilla, el máximo de tercer orden de la longitud de onda más corta cae a la mitad entre el máximo central y el máximo de primer lado para la longitud de onda más larga. Si los máximos vecinos de la longitud de onda más larga están separados 8.44 mm sobre la pantalla, ¿cuáles son las longitudes de onda en la luz? *Sugerencia:* Use la aproximación de ángulo pequeño.

24.9 Polarización de ondas de luz

51. El ángulo de incidencia de un haz de luz en aire sobre una superficie reflectora varía en forma continua. Se descubre que el rayo reflejado está completamente polarizado cuando el ángulo de incidencia es 48.0° . a) ¿Cuál es el índice de refracción del material reflejante? b) Si parte de la luz incidente (a un ángulo de 48.0°) pasa al material bajo la superficie, ¿cuál es el ángulo de refracción?
52. Luz no polarizada pasa a través de dos hojas Polaroid. El eje de transmisión del analizador forma un ángulo de 35.0° con el eje del polarizador. a) ¿Qué fracción de la luz no polarizada original se transmite a través del analizador? b) ¿Qué fracción de la luz original se absorbe en el analizador?
53. El índice de refracción de una placa de vidrio es 1.52. ¿Cuál es el ángulo de Brewster cuando la placa está a) en aire y b) en agua? (Véase el problema 57.)

54. ¿A qué ángulo sobre el horizonte está el Sol, si la luz que proviene de él está por completo polarizada al reflejarse en el agua?
55. Un haz de luz incide sobre un trozo de cuarzo fundido ($n = 1.458$) al ángulo de Brewster. Encuentre a) el valor del ángulo de Brewster y b) el ángulo de refracción para el rayo transmitido.
56. El ángulo crítico para reflexión interna total para zafiro rodeado por aire es 34.4° . Calcule el ángulo de Brewster para el zafiro si la luz incide desde el aire.
57. La ecuación 24.14 supone que la luz incidente está en aire. Si la luz incide desde un medio con índice n_1 sobre un medio con índice n_2 , siga el procedimiento utilizado para deducir la ecuación 24.14 para demostrar que $\theta_p = n_2/n_1$.
58. Luz plano-polarizada incide sobre un solo disco polarizador, con la dirección de E_0 paralela a la dirección del eje de transmisión. ¿A través de qué ángulo debe girar el disco para que la intensidad en el haz transmitido se reduzca por un factor de a) 2.00, b) 4.00 y c) 6.00?
59. **M** Tres placas polarizadoras, cuyos planos son paralelos, se centran sobre un eje común. Las direcciones de los ejes de transmisión en relación con la dirección vertical común se muestran en la figura P24.59. Un haz de luz linealmente polarizado, con plano de polarización paralelo a la dirección de referencia vertical, incide desde la izquierda sobre el primer disco, con intensidad $I_i = 10.0$ unidades (arbitrarias). Calcule la intensidad transmitida I_f cuando $\theta_1 = 20.0^\circ$, $\theta_2 = 40.0^\circ$ y $\theta_3 = 60.0^\circ$. *Sugerencia:* Use varias veces la ley de Malus.

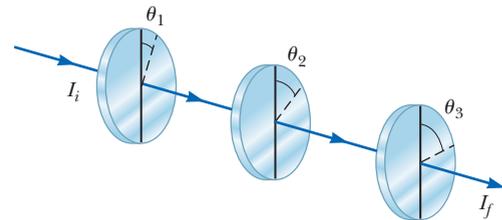


Figura P24.59 (Problemas 59 y 70)

60. Luz con intensidad I_0 y polarizada paralela al eje de transmisión de un polarizador, incide sobre un analizador. a) Si el eje de transmisión del analizador forma un ángulo de 45° con el eje del polarizador, ¿cuál es la intensidad de la luz transmitida? b) ¿Cuál debe ser el ángulo entre los ejes de transmisión para hacer $I/I_0 = 1/3$?
61. **BIO** Luz con longitud de onda en vacío de 546.1 nm cae en forma perpendicular sobre un espécimen biológico que tiene $1.000 \mu\text{m}$ de grueso. La luz se divide en dos haces polarizados en ángulos rectos, para los cuales los índices de refracción son 1.320 y 1.333, respectivamente. a) Calcule la longitud de onda de cada componente de la luz mientras recorre el espécimen. b) Calcule la

diferencia de fase entre los dos haces cuando salen del espécimen.

Problemas adicionales

62. Luz de un láser helio-neón ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) incide sobre una sola rendija. ¿Cuál es el máximo ancho de la rendija para la cual no se observan mínimos de difracción?
63. **C/C** Luz láser con longitud de onda de 632.8 nm se dirige a través de una rendija o dos rendijas y se le permite caer sobre una pantalla 2.60 m más allá. La figura P24.63 muestra el patrón sobre la pantalla, con una regla en centímetros bajo ella. ¿La luz pasa a través de una rendija o de dos rendijas? Explique cómo puede decirlo. Si la respuesta es una rendija, encuentre su ancho. Si la respuesta es dos rendijas, encuentre la distancia entre sus centros.

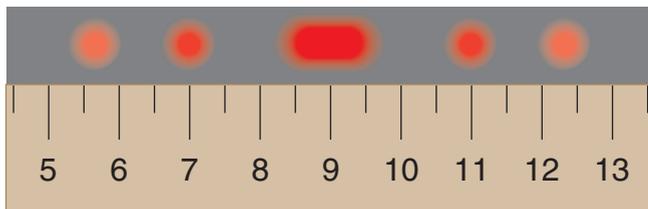


Figura P24.63

64. **S** En un experimento de interferencia de Young, las dos rendijas están separadas 0.150 mm y la luz incidente incluye dos longitudes de onda: $\lambda_1 = 540 \text{ nm}$ (verde) y $\lambda_2 = 450 \text{ nm}$ (azul). Los patrones de interferencia de traslapamiento se observan sobre una pantalla a 1.40 m de las rendijas. a) Encuentre una relación entre los órdenes de m_1 y m_2 que determinan dónde una franja brillante de la luz verde coincide con una franja brillante de la luz azul. (El orden m_1 se asocia con λ_1 , y m_2 se asocia con λ_2 .) b) Encuentre los valores mínimos de m_1 y m_2 tales que el traslapamiento de las franjas brillantes ocurrirá y encuentre la posición del traslape sobre la pantalla.
65. Luz con 546 nm de longitud de onda (la intensa línea verde desde una fuente de mercurio) produce un patrón de interferencia de Young donde el segundo mínimo desde el máximo central está a lo largo de una dirección que forma un ángulo de 18.0 min de arco con el eje a través del máximo central. ¿Cuál es la distancia entre las rendijas paralelas?
66. Dos bocinas se colocan separadas 35.0 cm . Un solo oscilador hace que las bocinas vibren en fase a una frecuencia de 2.00 kHz . ¿A qué ángulos, medidos desde el bisector perpendicular de la línea que une a las bocinas, un observador distante escucharía máxima intensidad de sonido? ¿Mínima intensidad de sonido? (Considere que la velocidad del sonido es 340 m/s .)
67. Efectos de interferencia se producen en el punto P sobre una pantalla como resultado de rayos directos desde una fuente de 500 nm y los rayos reflejados de un espejo, como se muestra en la figura P24.67. Si la fuente está

$L = 100 \text{ m}$ a la izquierda de la pantalla y $h = 1.00 \text{ cm}$ arriba del espejo, encuentre la distancia y (en milímetros) a la primera banda oscura arriba del espejo.

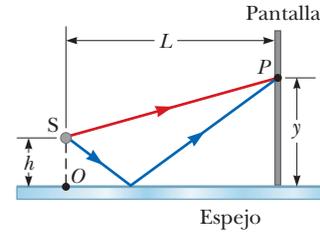


Figura P24.67

68. **BIO** Muchas células son transparentes e incoloras. Las estructuras de gran interés en biología y medicina prácticamente pueden ser invisibles a los microscopios ordinarios. Un *microscopio de interferencia* revela una diferencia en índice refractivo para indicar el tamaño y la forma de las estructuras celulares. La idea se ejemplifica en el siguiente problema: una cuña de aire se forma entre dos placas de vidrio en contacto a lo largo de un borde y ligeramente separada en el borde opuesto. Cuando las placas se iluminan con luz monocromática desde arriba, la luz reflejada tiene 85 franjas oscuras. Calcule el número de franjas oscuras que aparecen si el agua ($n = 1.33$) sustituye al aire entre las placas.
69. La figura P24.69 muestra un transmisor de ondas de radio y un receptor, ambos con $h = 50.0 \text{ m}$ arriba del suelo y separados $d = 600 \text{ m}$. El receptor puede recibir señales directas desde el transmisor e indirectamente de señales que rebotan del suelo. Si el suelo está a nivel entre el transmisor y el receptor, y en la reflexión ocurre un corrimiento de fase de $\lambda/2$, determine las longitudes de onda más largas que interfieren a) constructiva y b) destructivamente.

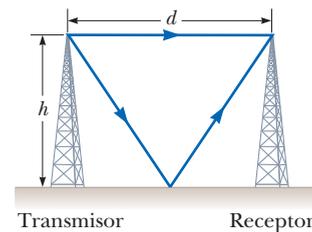


Figura P24.69

70. Tres polarizadores, centrados sobre un eje común y con sus planos mutuamente paralelos, tienen ejes de transmisión orientados a ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 de la vertical, como se muestra en la figura P24.59. Luz con intensidad I_i polarizada con su plano de polarización orientado verticalmente, incide desde la izquierda sobre el primer polarizador. ¿Cuál es la razón I_f/I_i de la intensidad final transmitida, a la intensidad incidente si a) $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$ y $\theta_3 = 0^\circ$, b) $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$ y $\theta_3 = 90^\circ$?

71. La antena de transmisión de un submarino está 5.00 m arriba del agua cuando la nave sale a la superficie. El capitán quiere transmitir un mensaje a un receptor sobre un risco de 90.0 m de alto a la orilla del océano. Si la señal debe ser por completo polarizada por reflexión de la superficie del océano, ¿cuán lejos debe estar la nave de la playa?

72. S Una lente plano-convexa (plana en un lado, convexa en el otro), con índice de refracción n , descansa con su lado curvo (radio de curvatura R) sobre una superficie de vidrio plana con el mismo índice de refracción, con una película de índice $n_{\text{película}}$ entre ellas. La lente se ilumina desde arriba con luz de longitud de onda λ . Demuestre que los anillos de Newton oscuros que aparecen tienen radios de

$$r \approx \sqrt{m\lambda R / n_{\text{película}}}$$

donde m es un entero.

73. Un patrón de difracción se produce sobre una pantalla a 140 cm de una sola rendija, con el uso de luz monocromática con longitud de onda de 500 nm. La distancia desde el centro del máximo central hasta el máximo de primer orden es 3.00 mm. Calcule el ancho de la rendija. *Sugerencia:* Suponga que el máximo de primer orden está a la mitad entre los mínimos de primero y segundo órdenes.

74. Una pieza plana de vidrio se sostiene en forma horizontal sobre el extremo plano de una barra metálica de 10.0 cm de largo que tiene su extremo inferior rígidamente fijo. La delgada película de aire entre la barra y el vidrio se observa que es brillante cuando se ilumina con luz de 500 nm de longitud de onda. Conforme la temperatura aumenta lentamente en 25.0 °C, la película cambia de brillante a oscura y de vuelta a brillante 200 veces. ¿Cuál es el coeficiente de expansión lineal del metal?



Los telescopios gemelos Keck, en la cima del volcán Mauna Kea en Hawaii, son los telescopios ópticos e infrarrojos más grandes del mundo. Cada uno tiene un espejo primario de 10 m de diámetro que comprende 36 segmentos hexagonales que funcionan en conjunto como una sola pieza de vidrio reflector. Lejos de las luces de la ciudad, sobre un volcán dormido en el aire seco y no contaminado, los telescopios tienen una ubicación ideal para sondear los misterios del Universo.

Instrumentos ópticos

25

Cada vez que se pone un par de gafas o lentes de contacto, toma una fotografía, mira al cielo a través de un telescopio, etc., usa dispositivos hechos con lentes, espejos y otros componentes ópticos. En este capítulo examinaremos cómo funcionan los instrumentos ópticos. Para la mayor parte, el análisis involucra las leyes de reflexión y refracción y los procedimientos de la óptica geométrica. Sin embargo, para explicar ciertos fenómenos, debemos usar la naturaleza ondulatoria de la luz.

25.1 La cámara

La cámara fotográfica de una sola lente es un instrumento óptico simple que tiene las características que se muestran en la figura 25.1 en la página 860. Consiste en una caja opaca, una lente convergente que produce una imagen real y una película fotográfica detrás de la lente para recibir la imagen. Las cámaras digitales difieren en que la imagen se forma sobre un dispositivo de carga acoplada (CCD) o un sensor semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) en lugar de una película. Los sensores de imagen CCD y CMOS convierten la imagen en forma digital, que luego se puede almacenar en la memoria de la cámara.

El enfoque de una cámara se logra al variar la distancia entre la lente y la película, con un fuelle ajustable en las cámaras antiguas y otros mecanismos en los modelos contemporáneos. Para un enfoque adecuado, que conduce a imágenes definidas, la distancia lente a película depende de la distancia del objeto así como de la longitud focal de la lente. El obturador, que se ubica detrás de la lente, es un dispositivo mecánico que se abre durante intervalos seleccionados. Con este arreglo, los objetos en movimiento se pueden fotografiar con el uso de tiempos de exposición cortos y las escenas oscuras (con bajos niveles de luz) con el uso de tiempos de exposición largos. Si este ajuste no fuese posible, sería

25.1 La cámara

25.2 El ojo

25.3 El amplificador simple

25.4 El microscopio compuesto

25.5 El telescopio

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

25.7 El interferómetro Michelson

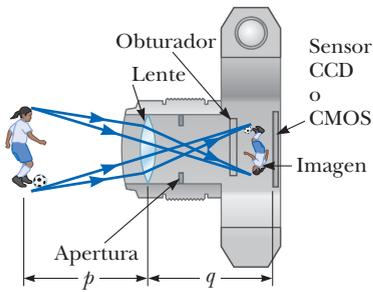


Figura 25.1 Vista transversal de una cámara digital simple. El sensor de imagen CCD o CMOS es el componente sensible a la luz de la cámara. En una cámara no digital la luz de la lente cae sobre película fotográfica. En realidad, $p \gg q$.

imposible tomar fotografías que detengan la acción. Un vehículo que se mueve rápidamente, por ejemplo, podría avanzar lo suficiente, mientras el obturador está abierto, para producir una imagen borrosa. Otra causa principal de imágenes borrosas es el movimiento de la cámara mientras el obturador está abierto. Para evitar tal movimiento, debe montar la cámara en un trípode o usar tiempos de exposición cortos. La velocidad típica de obturador (esto es, tiempos de exposición) son $1/30$ s, $1/60$ s, $1/125$ s y $1/250$ s. Los objetos estacionarios con frecuencia se toman con una velocidad de obturador de $1/60$ s.

La mayoría de las cámaras también tienen una apertura de diámetro ajustable para mayor control de la intensidad de la luz que llega a la película. Cuando se usa una apertura de diámetro pequeño, sólo la luz de la porción central de la lente llega a la película, de modo que se reduce la aberración esférica.

La intensidad I de la luz que llega a la película es proporcional al área de la lente. Puesto que esta área a su vez es proporcional al cuadrado del diámetro de la lente D , la intensidad también es proporcional a D^2 . La intensidad de la luz es una medida de la tasa a la cual la película recibe energía por unidad de área de la imagen. Puesto que el área de la imagen es proporcional a q^2 en la figura 25.1 y $q \approx f$ (cuando $p \gg f$, de modo que p se puede aproximar como infinito), concluimos que la intensidad también es proporcional a $1/f^2$. Por lo tanto, $I \propto D^2/f^2$. La brillantez de la imagen formada sobre la película depende de la intensidad de la luz, así que a final de cuentas se ve que depende, tanto de la longitud focal f como del diámetro D de la lente. La razón f/D se llama **número f** (o razón focal) de una lente:

$$\text{número } f \equiv \frac{f}{D} \quad [25.1]$$

El número f con frecuencia proporciona una descripción de la “velocidad” de la lente. Una lente con un número f bajo, es una lente “rápida”. Las lentes extremadamente rápidas, que tienen un número f tan bajo, aproximadamente 1.2, son costosas debido a la dificultad de mantener aberraciones aceptablemente pequeñas con rayos que pasan a través de una gran área de la lente. Las lentes de las cámaras con frecuencia se marcan con un rango de números f , como 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8 y 11. Cualquiera de estas configuraciones se puede seleccionar al ajustar la apertura, lo que cambia el valor de D . Aumentar la configuración de un número f al siguiente valor más alto (por ejemplo, de 2.8 a 4) reduce el área de la apertura por un factor de 2. La configuración de número f más bajo en una cámara corresponde a una apertura muy abierta y el uso de la máxima área posible de la lente.

Las cámaras simples por lo general tienen una longitud focal fija y tamaño de apertura fijo, con un número f aproximado de 11. Este valor alto del número f permite una gran **profundidad de campo**, lo que significa que los objetos a un amplio rango de distancias de la lente forman imágenes razonablemente claras en la película. En otras palabras, la cámara no tiene que enfocarse. La mayoría de las cámaras con números f variables se ajustan de manera automática.

25.2 El ojo BIO

Como una cámara, un ojo normal enfoca luz y produce una imagen clara. Sin embargo, el mecanismo mediante el cual el ojo controla la cantidad de luz admitida y se ajusta para producir imágenes correctamente enfocadas es incluso mucho más complejo, intrincado y eficaz que el de las cámaras más sofisticadas. En todos los aspectos el ojo es una maravilla fisiológica.

La figura 25.2a muestra las partes esenciales del ojo. La luz que entra al ojo pasa a través de una estructura transparente llamada *córnea*, detrás de la cual hay un líquido claro (el *humor acuoso*), una abertura variable (la *pupila*, que es una abertura en el *iris*) y el *crystalino*. La mayor parte de la refracción ocurre en la superficie exterior del ojo, donde la córnea está cubierta con una película de lágrimas. En el cristalino ocurre relativamente poca refracción porque el humor acuoso, en contacto con el cristalino, tiene un índice de refracción promedio cercano al del cristalino. El iris, que es la porción colorida del ojo, es un diafragma muscular que controla el tamaño de la pupila. El iris regula la cantidad de luz que entra al ojo al dilatar la pupila en condiciones de baja iluminación y contrae la

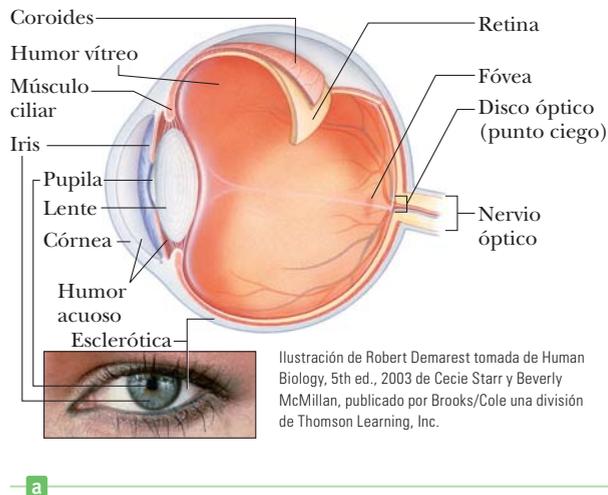


Figura 25.2 a) Partes esenciales del ojo. ¿Puedes relacionar las partes esenciales del ojo con las de la cámara simple en la figura 25.1? b) Acercamiento fotográfico de la córnea humana.

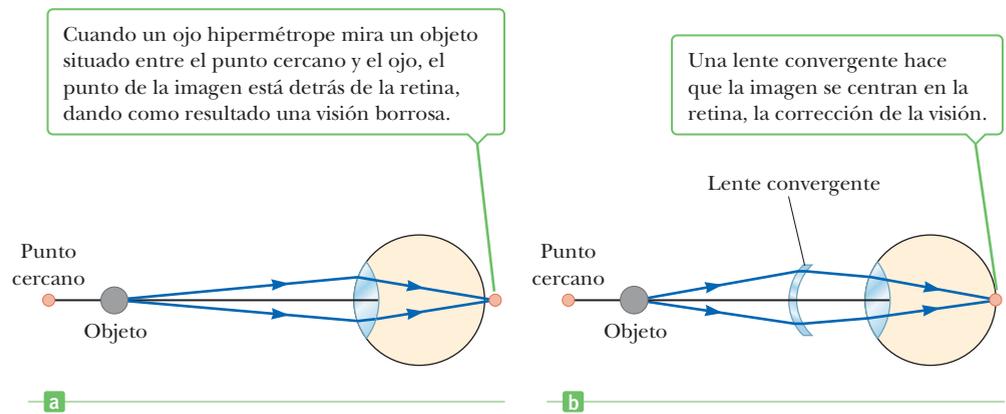
pupila bajo condiciones de luz brillante. El rango de números f del ojo va de aproximadamente 2.8 hasta 16.

El sistema córnea-cristalino enfoca la luz en la superficie posterior del ojo, la *retina*, que consiste en millones de receptores sensibles llamados *bastones* y *conos*. Cuando se estimulan con luz, estas estructuras envían impulsos al cerebro vía el nervio óptico y los convierte en la visión consciente del mundo. El proceso por el cual el cerebro realiza esta conversión todavía no se comprende bien y es tema de mucha especulación e investigación. A diferencia de la película en una cámara, los conos y bastones ajustan químicamente su sensibilidad de acuerdo con las condiciones de iluminación dominante. Este ajuste, que tarda cerca de 15 minutos, es responsable de la experiencia de “acostumbrarse a la oscuridad” en lugares como las salas cinematográficas. El control de apertura del iris, que tarda menos de 1 segundo, ayuda a proteger la retina de sobrecarga en el proceso de ajuste.

El ojo enfoca un objeto al variar la forma del cristalino maleable a través de un sorprendente proceso llamado **acomodación**. Un importante componente en la acomodación es el *músculo ciliar*, que se sitúa en un círculo alrededor del borde del cristalino. Delgados filamentos, llamados *zónulas*, van desde este músculo hasta el borde del cristalino. Cuando el ojo se enfoca en un objeto distante, el músculo ciliar se relaja, lo que tensa las zónulas que unen el músculo ciliar al borde del cristalino. La fuerza de las zónulas hace que el cristalino se aplane, lo que aumenta su longitud focal. Para un objeto distante en el infinito, la longitud focal del ojo es igual a la distancia fija entre cristalino y retina, aproximadamente 1.7 cm. El ojo se enfoca en los objetos cercanos al tensar el músculo ciliar, lo que relaja las zónulas. Esta acción permite que el cristalino se abombe un poco y su longitud focal disminuye, lo que resulta en que la imagen se enfoca en la retina. Todos estos ajustes del cristalino son tan suaves que uno ni siquiera percibe el cambio. En este aspecto, incluso la cámara electrónica más fina es un juguete en comparación con el ojo.

Existe un límite para la acomodación porque los objetos que están muy cerca del ojo producen imágenes borrosas. El **punto cercano** es la distancia más próxima para la cual el cristalino se puede acomodar para enfocar la luz en la retina. Esta distancia por lo regular aumenta con la edad y tiene un valor promedio de 25 cm. Por lo general, a los 10 años de edad el punto cercano del ojo es de aproximadamente 18 cm. Éste aumenta alrededor de 25 cm a los 20 años de edad, a 50 cm a los 40 y a 500 cm o más a los 60. El **punto lejano** del ojo representa la distancia más alejada para la cual el cristalino del ojo relajado puede enfocar luz sobre la retina. Una persona con visión normal puede ver objetos muy distantes, como la Luna y por lo tanto tiene un punto lejano en el infinito.

Figura 25.3 a) Un ojo hipermetrópe sin corregir. b) Un ojo hipermetrópe se puede corregir con una lente convergente. (Suponiendo que el objeto es muy pequeño en estas figuras.)



Condiciones del ojo

Cuando el ojo sufre una falta de concordancia entre el poder de enfoque del sistema cristalino-córnea y la longitud del ojo, de modo que los rayos de luz llegan a la retina antes de convergir para formar una imagen, como en la figura 25.3a, la condición se conoce como **hipermetropía** (o *hiperopia*). Una persona hipermetrópe puede ver con claridad objetos lejanos, pero no los objetos cercanos. Aunque el punto cercano de un ojo normal es de aproximadamente 25 cm, el punto cercano de una persona hipermetrópe está mucho más lejos que eso. El ojo de una persona hipermetrópe intenta enfocar por acomodación, al acortar su longitud focal. La acomodación funciona para objetos distantes, pero, debido a que la longitud focal del ojo hipermetrópe es más larga que la normal, la luz de los objetos cercanos no se puede llevar a un foco definido antes de llegar a la retina, lo que causa una imagen borrosa. La condición se puede corregir al colocar una lente convergente frente al ojo, como en la figura 25.3b. La lente refracta los rayos entrantes más hacia el eje principal antes de entrar al ojo, lo que les permite convergir y enfocarse en la retina.

La **miopía** es otra condición de falta de concordancia en la cual una persona puede enfocar los objetos cercanos, pero no los objetos lejanos. En el caso de *miopía axial*, la miopía es producto de un cristalino muy alejado de la retina. También es posible tener *miopía refractiva*, en la cual el sistema cristalino-córnea es muy poderoso para la longitud normal del ojo. El punto lejano del ojo miope no está en el infinito y puede estar a menos de 1 metro. La máxima longitud focal del ojo miope es insuficiente para producir una imagen clara en la retina y los rayos de un objeto distante convergen a un foco enfrente de la retina. Luego continúan a través de dicho punto, divergen antes de que finalmente lleguen a la retina y producen una imagen borrosa (figura 25.4a).

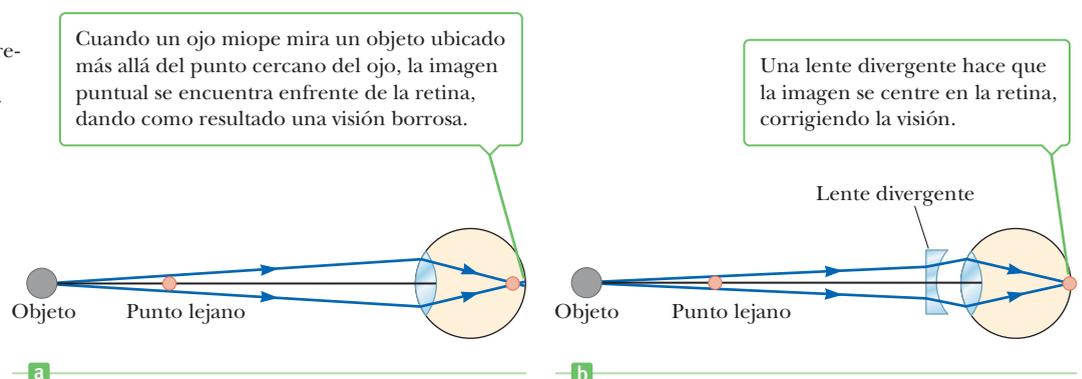
La miopía se puede corregir con una lente divergente, como se muestra en la figura 25.4b. La lente refracta los rayos alejándose del eje principal antes de que entren al ojo, lo que les permite enfocarse sobre la retina.

Al comenzar la edad madura, la mayoría de las personas pierden parte de su habilidad de acomodación, conforme los músculos ciliares se debilitan y el cristalino se endurece.

BIO APLICACIÓN

Uso de lentes ópticas para corregir defectos

Figura 25.4 a) Un ojo miope sin corregir b) Un ojo miope corregido con una lente divergente. (Se supone que el objeto es muy pequeño en estas figuras.)



A diferencia de la hipermetropía, que es una falta de concordancia del poder de enfoque y la longitud del ojo, la **presbicia** (literalmente “vista cansada”) se debe a una reducción en la capacidad de acomodación. La córnea y el cristalino ya no pueden enfocar los objetos cercanos en la retina. Los síntomas son los mismos que los de la hipermetropía y la condición puede corregirse con lentes convergentes.

En el defecto ocular llamado **astigmatismo**, la luz proveniente de una fuente puntual produce una imagen lineal sobre la retina. Esta condición surge cuando la córnea o el cristalino (o ambos) no son perfectamente simétricos. El astigmatismo se puede corregir con lentes que tienen diferentes curvaturas en dos direcciones mutuamente perpendiculares.

Los optometristas y oftalmólogos por lo general prescriben lentes medidos en **dioptrías**:

El **poder** P de un lente en dioptrías es igual al inverso de la longitud focal en metros:
 $P = 1/f$.

Por ejemplo, una lente convergente con una longitud focal de +20 cm tiene un poder de +5.0 dioptrías y una lente divergente con una longitud focal de -40 cm tiene un poder de -2.5 dioptrías. (Aunque el símbolo P es el mismo que para la potencia mecánica, no hay relación entre los dos conceptos.)

La posición de la lente en relación con el ojo causa diferencias en poder, pero por lo general representan menos de un cuarto de dioptría, lo que no es perceptible para la mayoría de los pacientes. Como resultado, los practicantes de optometría tratan con incrementos de un cuarto de dioptría. Despreciar la distancia ojo-lente es equivalente a hacer el cálculo para un lente de contacto, que descansa directamente sobre el ojo.

■ EJEMPLO 25.1 Prescripción de una lente correctiva para un paciente hipermetrope BIO

OBJETIVO Aplique óptica geométrica para corregir la hipermetropía.

PROBLEMA El punto cercano del ojo de un paciente es 50.0 cm. **a)** ¿Qué longitud focal debe tener una lente correctiva para permitir al ojo ver con claridad un objeto a 25.0 cm de distancia? Desprecie la distancia ojo-lente. **b)** ¿Cuál es la potencia de esta lente? **c)** Repita el problema y considere que, para gafas típicas, la lente correctiva está a 2.00 cm frente al ojo.

ESTRATEGIA Este problema requiere sustitución en la ecuación de lentes delgadas (ecuación 23.11) y luego usar la definición de poder de lente en términos de dioptrías. El objeto está a 25.0 cm, pero la lente debe formar una imagen en el punto cercano del paciente, 50.0 cm, el punto más cercano donde el ojo del paciente puede ver con claridad. En el inciso c) se debe restar 2.00 cm tanto de la distancia del objeto como de la distancia de la imagen para explicar la posición de la lente.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la longitud focal de la lente correctiva y desprecie su distancia desde el ojo.

Aplique la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Sustituya $p = 25.0$ cm y $q = -50.0$ cm (esta última es negativa porque la imagen debe ser virtual) en el mismo lado de la lente que el objeto:

$$\frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-50.0 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

Resuelva para f . La longitud focal es negativa, lo que corresponde a una lente convergente.

$$f = 50.0 \text{ cm}$$

b) ¿Cuál es el poder de esta lente?

El poder es el recíproco de la longitud focal en metros:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.500 \text{ m}} = +2.00 \text{ dioptrías}$$

c) Repita el problema y observe que la lente correctiva en realidad está a 2.00 cm enfrente del ojo.

Sustituya los valores corregidos de p y q en la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{23.0 \text{ cm}} + \frac{1}{(-48.0 \text{ cm})} = \frac{1}{f}$$

$$f = 44.2 \text{ cm}$$

(continúa)

Calcule la potencia:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.442 \text{ m}} = + 2.26 \text{ dioptrías}$$

COMENTARIOS Advierta que el cálculo en el inciso c), que no desprecia la distancia ojo-lente, resulta en una diferencia de 0.26 dioptrías.

PREGUNTA 25.1 Verdadero o Falso: Mientras mayor sea la distancia a un punto cercano, mayor será el poder de la lente correctiva requerida.

EJERCICIO 25.1 Suponga que una lente se coloca en un dispositivo que determina su poder como 2.75 dioptrías. Encuentre a) la longitud focal de la lente y b) la distancia mínima a la que un paciente podrá enfocar un objeto, si el punto cercano del paciente es 60.0 cm. Desprecie la distancia ojo-lente.

RESPUESTAS a) 36.4 cm b) 22.7 cm

■ EJEMPLO 25.2 Una lente correctiva para miopía

OBJETIVO Aplique óptica geométrica para corregir miopía.

PROBLEMA Un paciente miope particular no puede ver objetos claramente cuando están más allá de 25 cm (el punto lejano del ojo). **a)** ¿Qué longitud focal deben tener los lentes de contacto prescritos para corregir este problema? **b)** Encuentre el poder de la lente, en dioptrías. Desprecie la distancia entre el ojo y la lente correctiva.

ESTRATEGIA El propósito de la lente en este ejemplo es tomar objetos en el infinito y crear una imagen de ellos en el punto lejano del paciente. Aplique la ecuación de lente delgada.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la longitud focal de la lente correctiva.

Aplique la ecuación de lente delgada para un objeto en el infinito e imagen a 25.0 cm:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{(-25.0 \text{ cm})} = \frac{1}{f}$$

$$f = -25.0 \text{ cm}$$

b) Encuentre el poder de la lente en dioptrías.

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{-0.250 \text{ m}} = -4.00 \text{ dioptrías}$$

COMENTARIOS La longitud focal es negativa, consistente en una lente divergente. Observe que el poder también es negativo y tiene el mismo valor numérico que la suma del lado izquierdo de la ecuación de lente delgada.

PREGUNTA 25.2 Verdadero o Falso: Mientras más corta sea la distancia al punto lejano de un paciente, más negativo será el poder de la lente correctiva requerida.

EJERCICIO 25.2 a) ¿Qué poder de lente prescribiría a un paciente con un punto lejano de 35.0 cm? Desprecie la distancia ojo-lente. b) Repita, pero suponiendo una distancia ojo-lente correctivo de 2.00 cm.

RESPUESTAS a) -2.86 dioptrías b) -3.03 dioptrías

■ FÍSICA APLICADA 25.1 Visión del hombre invisible

Una clásica historia de ciencia ficción, *El hombre invisible*, de H. G. Wells, habla de un hombre que se volvió invisible al cambiar el índice de refracción de su cuerpo al del aire. Estudiantes que saben cómo funciona el ojo critican esta historia; afirman que el hombre invisible no podría ver. Sobre la base de su conocimiento del ojo, ¿el hombre invisible podría ver?

EXPLICACIÓN No podría ver. Para que el ojo vea un objeto, la luz entrante debe refractarse en la córnea y el cristalino para formar una imagen sobre la retina. Si la córnea y el cristalino tienen el mismo índice de refracción que el aire, la refracción no puede ocurrir y no se formaría una imagen. ■

■ Examen rápido

25.1 Dos excursionistas quieren encender una fogata durante el día. Un excursionista es miope y otro es hipermetrope. ¿Las gafas de quién se deben usar para enfocar los rayos del Sol sobre algo de papel para encender el fuego? a) los de cualquier excursionista b) los del excursionista miope c) los del excursionista hipermetrope.

25.3 El amplificador simple

El **amplificador simple** es uno de los instrumentos ópticos más básicos porque consiste solamente en una única lente convergente. Como el nombre implica, este dispositivo se utiliza para aumentar el tamaño aparente de un objeto. Suponga que un objeto se ve a cierta distancia p del ojo, como en la figura 25.5. El tamaño de la imagen formada en la retina depende del ángulo θ que subtende el objeto en el ojo. Conforme el objeto se acerca más al ojo, θ aumenta y se observa una imagen más grande. Sin embargo, un ojo normal no puede enfocar un objeto más cerca que aproximadamente 25 cm, el punto cercano (figura 25.6a). (¡Inténtelo!) Por lo tanto, θ es un máximo en el punto cercano.

Para mayor aumento en el tamaño angular aparente de un objeto, se puede colocar una lente convergente frente al ojo con el objeto colocado en el punto O , justo dentro del punto focal de la lente, como en la figura 25.6b. En esta posición, la lente forma una imagen virtual, derecha y alargada, como se muestra. La **amplificación angular** m se define como la razón del ángulo subtendido por un pequeño objeto cuando se usa la lente (ángulo θ en la figura 25.6b), al ángulo subtendido por el objeto colocado en el punto cercano sin uso de lente (ángulo θ_0 en la figura 25.6a):

$$m \equiv \frac{\theta}{\theta_0} \quad [25.2]$$

Para el caso donde la lente se sostiene cerca del ojo, la amplificación angular es un máximo cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo, que corresponde a $q = -25$ cm (véase la figura 25.6b). La distancia del objeto que corresponde a esta distancia de la imagen se puede calcular a partir de la ecuación de lente delgada:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{-25 \text{ cm}} = \frac{1}{f} \quad [25.3]$$

$$p = \frac{25f}{25 + f}$$

Aquí, f es la longitud focal del amplificador en centímetros. De las figuras 25.6a y 25.6b, la aproximación de ángulo pequeño produce

$$\tan \theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \text{y} \quad \tan \theta \approx \theta \approx \frac{h}{p} \quad [25.4]$$

En consecuencia, la ecuación 25.2 se convierte en

$$m_{\text{máx}} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h/p}{h/25} = \frac{25}{p} = \frac{25}{25f/(25 + f)}$$

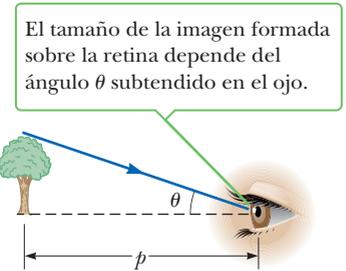
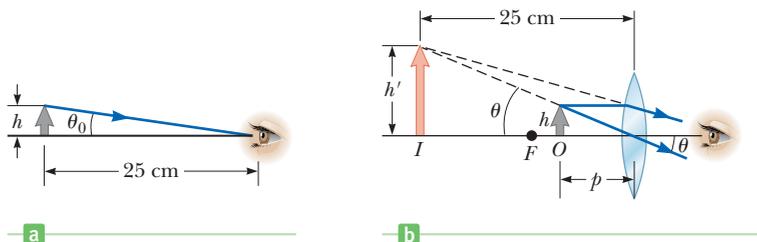


Figura 25.5 Un observador mira un objeto a una distancia p .

◀ Amplificación angular con el objeto en el punto cercano

Figura 25.6 a) Un objeto colocado en el punto cercano ($p = 25$ cm) subtendiendo un ángulo de $\theta_0 \approx h/25$ en el ojo. b) Un objeto colocado cerca del punto focal de una lente convergente produce una imagen ampliada, que subtende un ángulo de $\theta \approx h'/25$ en el ojo. Observe que en esta situación $q = -25$ cm.

de modo que

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.5]$$

La máxima amplificación angular dada por la ecuación 25.5 es la razón del tamaño angular visto con la lente al tamaño angular visto sin la lente, con el objeto en el punto cercano del ojo. Aunque el ojo normal puede enfocar una imagen formada en cualquier parte entre el punto cercano y el infinito, está más relajado cuando la imagen está en el infinito (sección 25.2). Para que la imagen formada por la lente de aumento aparezca en el infinito, el objeto se debe colocar en el punto focal de la lente, de modo que $p = f$. En este caso, la ecuación 25.4 se convierte en

$$\theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \text{y} \quad \theta \approx \frac{h}{f}$$

y la amplificación angular es

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.6]$$

Con una sola lente, es posible lograr amplificaciones angulares de hasta aproximadamente 4 sin serias aberraciones. Amplificaciones de hasta 20 se pueden lograr con el uso de una o dos lentes para corregir aberraciones.

■ EJEMPLO 25.3 Amplificación de una lente

OBJETIVO Calcule amplificaciones de una lente cuando la imagen está en el punto cercano y cuando está en el infinito.

PROBLEMA a) ¿Cuál es la máxima amplificación angular de una lente con una longitud focal de 10.0 cm? b) ¿Cuál es la amplificación angular de esta lente cuando el ojo está relajado? Suponga una distancia ojo-lente de cero.

ESTRATEGIA La máxima amplificación angular ocurre cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo. Bajo estas circunstancias, la ecuación 25.5 proporciona la máxima amplificación angular. En el inciso b) el ojo se relaja sólo si la imagen está en el infinito, de modo que se aplica la ecuación 25.6.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la máxima amplificación angular de la lente.

Sustituya en la ecuación 25.5:

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}} = 3.5$$

b) Encuentre la amplificación de la lente cuando el ojo está relajado.

Cuando el ojo está relajado, la imagen está en el infinito, así que sustituya en la ecuación 25.6:

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}} = 2.5$$

PREGUNTA 25.3 Para mayor amplificación, ¿debe seleccionar una lente con longitud focal más grande o más pequeña?

EJERCICIO 25.3 ¿Cuál longitud focal será necesaria si la lente debe tener una amplificación angular máxima de 4.0?

RESPUESTA 8.3 cm

25.4 El microscopio compuesto

Un amplificador simple proporciona sólo asistencia limitada con la inspección de los detalles mínimos de un objeto. Se puede lograr mayor amplificación al combinar dos lentes en un dispositivo llamado microscopio compuesto, del cual se muestra un diagrama esquemático en la figura 25.7a. El instrumento consiste en dos lentes: una lente objetivo con una longitud focal muy corta f_o (donde $f_o < 1 \text{ cm}$) y una lente ocular con una longitud focal f_e

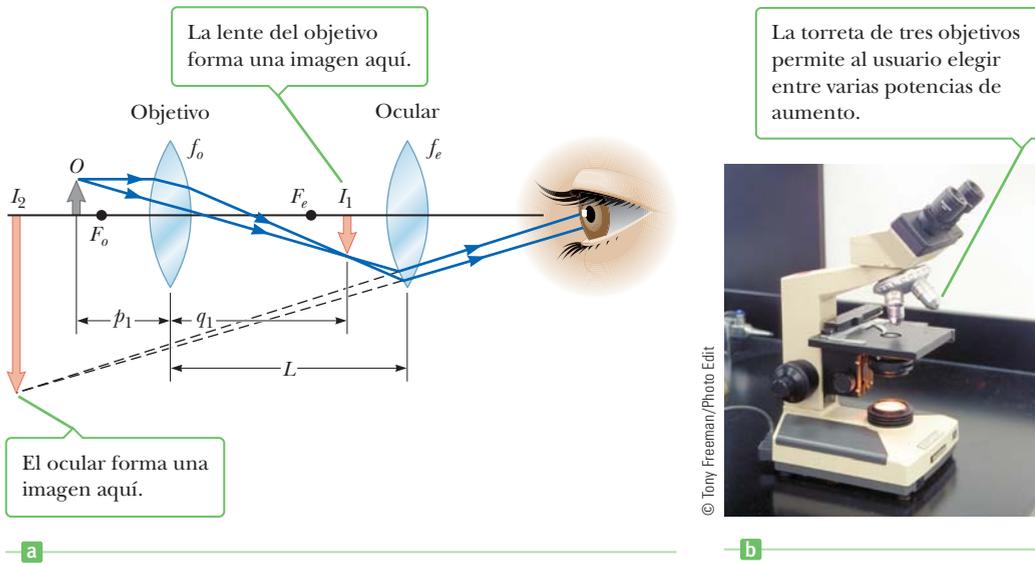


Figura activa 25.7

a) Diagrama de un microscopio compuesto, que consiste en un objetivo y un ocular. b) Un microscopio compuesto. La torre de tres objetivos permite al usuario cambiar a varias potencias de ampliación diferentes. Las combinaciones de oculares con diferentes longitudes focales y diferentes objetivos pueden producir un amplio rango de ampliaciones.

de algunos centímetros. Las dos lentes están separadas por la distancia L , que es mucho mayor que f_o o f_e .

El enfoque básico que se usa para analizar las propiedades de formación de imagen de un microscopio es el de dos lentes en fila: la imagen formada por la primera se convierte en el objeto de la segunda. El objeto O colocado justo fuera de la longitud focal del objetivo forma una imagen real invertida en I_1 que está en o justo dentro del punto focal del ocular. Esta imagen está mucho más ampliada. (Por claridad, la ampliación de I_1 no se muestra en la figura activa 25.7a.) El ocular, que sirve como un amplificador simple, usa la imagen en I_1 como su objeto y produce una imagen en I_2 . La imagen que ve el ojo en I_2 es virtual, invertida y mucho muy ampliada.

La ampliación lateral M_1 de la primera imagen es $-q_1/p_1$. Observe que q_1 es aproximadamente igual a L porque el objeto se coloca cerca del punto focal del objetivo, lo que asegura que la imagen formada estará lejos del mismo. Más aún, puesto que el objeto está muy cerca del punto focal del objetivo, $p_1 \approx f_o$. Por lo tanto, la ampliación lateral del objetivo es

$$M_1 = -\frac{q_1}{p_1} \approx -\frac{L}{f_o}$$

A partir de la ecuación 25.6, la ampliación angular del ocular para un objeto (que corresponde a la imagen en I_1) colocado en el punto focal es

$$m_e = \frac{25 \text{ cm}}{f_e}$$

La ampliación global del microscopio compuesto se define como el producto de las ampliaciones lateral y angular:

$$m = M_1 m_e = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right)$$

[25.7] ◀ Amplificación de un microscopio

El signo negativo indica que la imagen está invertida respecto al objeto.

El microscopio extendió la visión en el antes desconocido reino de objetos increíblemente pequeños y las capacidades de este instrumento crecen de manera constante con técnicas mejoradas en el pulido de precisión de lentes. Una pregunta natural es si existe algún límite a cuán poderoso podría ser un microscopio. Por ejemplo, ¿se podría hacer un

microscopio lo suficientemente poderoso como para poder ver un átomo? La respuesta a esta pregunta es no, en tanto se use luz visible para iluminar el objeto. Para verlo, el objeto bajo un microscopio al menos debe ser tan grande como una longitud de onda de luz. Un átomo es muchas veces menor que la longitud de onda de la luz visible, así que sus misterios se deben probar vía otras técnicas.

La dependencia de la longitud de onda de las habilidades de “visualización” de una onda se puede ilustrar mediante el establecimiento de ondas de agua en una bañera de la siguiente forma. Imagine que agita una mano en el agua hasta que en la superficie se mueven ondas con una longitud de aproximadamente 6 pulgadas. Si coloca un pequeño objeto, como un palillo, en la ruta de las ondas, descubrirá que las ondas no se perturban de manera considerable por el palillo, sino que continúan a lo largo de su trayectoria. Ahora suponga que coloca un objeto más grande, como un barco de juguete, en la trayectoria de las ondas. En este caso las ondas se perturban de manera considerable por el objeto. El palillo era mucho más pequeño que la longitud de onda y, como resultado, las ondas no lo “vieron”. Sin embargo, el barco de juguete tiene aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda y por lo tanto crea una perturbación. Las ondas de luz se comportan de esta forma general. La habilidad de un microscopio óptico para ver un objeto depende del tamaño del objeto en relación con la longitud de onda de la luz que se usa para observarlo. En consecuencia, nunca será posible observar átomos o moléculas con tal microscopio porque sus dimensiones son muy pequeñas (≈ 0.1 nm) en relación con la longitud de onda de la luz (≈ 500 nm).

■ EJEMPLO 25.4 Amplificaciones de microscopio

OBJETIVO Comprenda los factores críticos involucrados en la determinación del poder de amplificación de un microscopio.

PROBLEMA Cierta microscopio tiene dos objetivos intercambiables. Uno tiene una longitud focal de 2.0 cm y el otro tiene una longitud focal de 0.20 cm. También están disponibles dos oculares con longitudes focales de 2.5 cm y 5.0 cm. Si la longitud del microscopio es de 18 cm, calcule las amplificaciones para las siguientes combinaciones: el objetivo de 2.0 cm y el ocular de 5.0 cm, el objetivo de 2.0 cm y el ocular de 2.5 cm, y el objetivo de 0.20 cm y el ocular de 5.0 cm.

ESTRATEGIA La solución consiste en sustituir en la ecuación 25.7 para tres diferentes combinaciones de lentes.

SOLUCIÓN

Aplice la ecuación 25.7 y combine el objetivo de 2.0 cm con el ocular de 5.0 cm:

$$m = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right) = -\frac{18 \text{ cm}}{2.0 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{5.0 \text{ cm}} \right) = -45$$

Combine el objetivo de 2.0 cm con el ocular de 2.5 cm:

$$m = -\frac{18 \text{ cm}}{2.0 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{2.5 \text{ cm}} \right) = -9.0 \times 10^1$$

Combine el objetivo de 0.20 cm con el ocular de 5.0 cm:

$$m = -\frac{18 \text{ cm}}{0.20 \text{ cm}} \left(\frac{25 \text{ cm}}{5.0 \text{ cm}} \right) = -450$$

COMENTARIOS Es posible lograr amplificaciones mucho mayores, pero la resolución comienza a fallar, lo que resulta en imágenes borrosas que no transmiten detalle alguno. (Véase la sección 25.6 para una mayor discusión de este punto.)

PREGUNTA 25.4 Verdadero o Falso: Una longitud focal más corta para ocular u objetivo resultará en mayor amplificación.

EJERCICIO 25.4 Combine el objetivo de 0.20 cm con el ocular de 2.5 cm y encuentre la amplificación.

RESPUESTA -9.0×10^2

25.5 El telescopio

Existen dos tipos fundamentalmente diferentes de telescopio, ambos diseñados para ayudar a ver objetos distantes como los planetas en el Sistema Solar: 1) el **telescopio refractor**, que usa una combinación de lentes para formar una imagen, y 2) el **telescopio reflector**, que

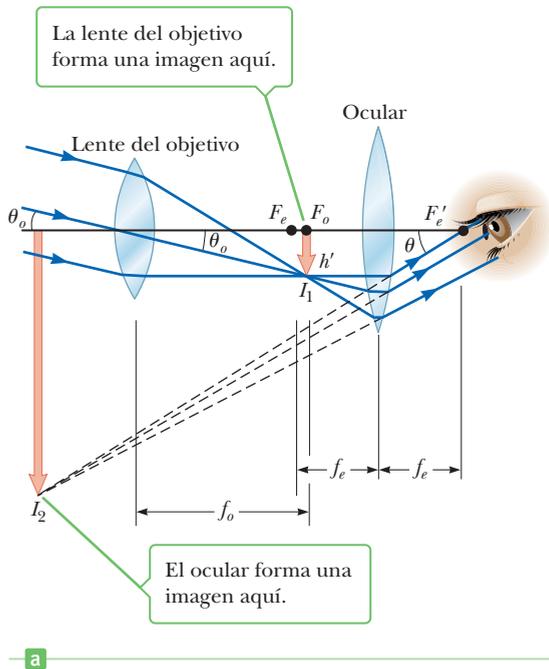


Figura activa 25.8

a) Diagrama de telescopio refractor, con el objeto en el infinito.
b) Telescopio refractor.

usa un espejo curvo y una lente para formar una imagen. Una vez más, es posible analizar el telescopio al considerarlo como un sistema de dos elementos ópticos en hilera. Como antes, la técnica básica seguida es que la imagen formada por el primer elemento se convierte en el objeto para el segundo.

En el telescopio refractor se ordenan dos lentes de modo que el objetivo forma una imagen real invertida del objeto distante muy cerca del punto focal del ocular (figura activa 25.8a). Más aún, la imagen en I_1 se forma en el punto focal del objetivo porque el objeto en esencia está en el infinito. Por lo tanto, las dos lentes están separadas por la distancia $f_o + f_e$ que corresponde a la longitud del tubo del telescopio. Finalmente, en I_2 , el ocular forma una imagen ampliada de la imagen en I_1 .

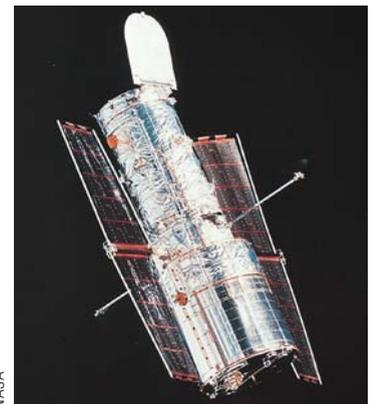
La amplificación angular del telescopio está dada por θ/θ_0 , donde θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto en el objetivo y θ es el ángulo subtendido por la imagen final. A partir de los triángulos en la figura 25.8a, y para ángulos pequeños, se tiene

$$\theta \approx \frac{h'}{f_e} \quad \text{y} \quad \theta_0 \approx \frac{h'}{f_o}$$

Por lo tanto, la amplificación angular del telescopio se puede expresar como

$$m = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h'/f_e}{h'/f_o} = \frac{f_o}{f_e}$$

[25.8]



El telescopio espacial Hubble permite ver tanto más allá en el espacio como más atrás en el tiempo que nunca antes.

◀ Amplificación angular de un telescopio

Esta ecuación dice que la amplificación angular de un telescopio es igual a la razón de la longitud focal del objetivo a la longitud focal del ocular. Una vez más, la amplificación angular es la razón del tamaño angular visto con el telescopio al tamaño angular visto con el ojo sin ayuda.

En algunas aplicaciones (por ejemplo, la observación de objetos relativamente cercanos como el Sol, la Luna o los planetas) la amplificación angular es importante. Sin embargo, las estrellas están tan alejadas que siempre aparecen como pequeños puntos de luz sin importar cuánta amplificación angular se use. Los grandes telescopios de investigación utilizados para estudiar objetos muy distantes deben tener grandes diámetros para recoger tanta luz como sea posible. Es difícil y costoso fabricar lentes tan grandes para telescopios refractores. Además, el peso de las lentes grandes conduce a pandeo, que es otra fuente de aberración.

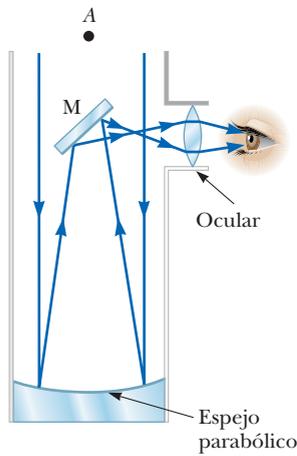


Figura 25.9 Telescopio reflector con un foco newtoniano.

Figura 25.10 El telescopio Hale en el observatorio de Monte Palomar. Justo antes de tomar el elevador al alojamiento del foco principal, a un observador que lo visita por primera vez siempre se le dice: “¡Buena vista! Y, si se cae, intente evadir el espejo”.



Cortesía de Palomar Observatory/ California Institute of Technology

Estos problemas se pueden superar en parte al sustituir el objetivo con un espejo reflector cóncavo, que usualmente tiene forma parabólica para evitar aberración esférica. La figura 25.9 muestra el diseño de un telescopio reflector típico. Los rayos de luz entrantes pasan por el barril del telescopio y se reflejan mediante un espejo parabólico en la base. Estos rayos convergen hacia el punto *A* en la figura, donde se formaría una imagen sobre una placa fotográfica u otro detector. Sin embargo, antes de que se forme esta imagen, un pequeño espejo plano en *M* refleja la luz hacia una abertura en el lado del tubo que pasa hacia un ocular. Se dice que este diseño tiene un *foco newtoniano*, en honor a su desarrollador. Observe que, en el telescopio reflector, la luz nunca pasa a través de vidrio (excepto por el pequeño ocular). Como resultado, virtualmente se eliminan los problemas asociados con la aberración cromática.

Los telescopios ópticos más grandes en el mundo son los dos reflectores Keck de 10 m de diámetro, en Mauna Kea, Hawaii. El telescopio reflector de un solo espejo más grande en Estados Unidos es el instrumento de 5 m de diámetro en Monte Palomar, en California. (Véase la figura 25.10.) En contraste, el telescopio refractor más grande del mundo, en el Observatorio Yerkes, en Williams Bay, Wisconsin, tiene un diámetro de sólo 1 m.

EJEMPLO 25.5 Poder del Hubble

OBJETIVO Comprenda la amplificación en telescopios.

PROBLEMA El telescopio espacial Hubble tiene 13.2 m de largo, pero un espejo secundario que aumenta su longitud focal efectiva a 57.8 m. (Véase la figura 25.11.) El telescopio no tiene un ocular porque varios instrumentos, no un ojo humano, registran la luz recopilada. Sin embargo, puede producir imágenes varios miles de veces más grandes de lo que aparecen con el ojo humano sin ayuda. ¿Qué longitud focal de ocular, usado en el sistema de espejos del Hubble, produciría una amplificación de 8.00×10^3 ?

ESTRATEGIA La ecuación 25.8 para amplificación de telescopio se puede resolver para la longitud focal del ocular. La ecuación para encontrar la amplificación angular de un reflector es la misma que para un refractor.

SOLUCIÓN

Resuelva para f_e en la ecuación 25.8 y sustituya valores:

$$m = \frac{f_o}{f_e} \rightarrow f_e = \frac{f_o}{m} = \frac{57.8 \text{ m}}{8.00 \times 10^3} = 7.23 \times 10^{-3} \text{ m}$$

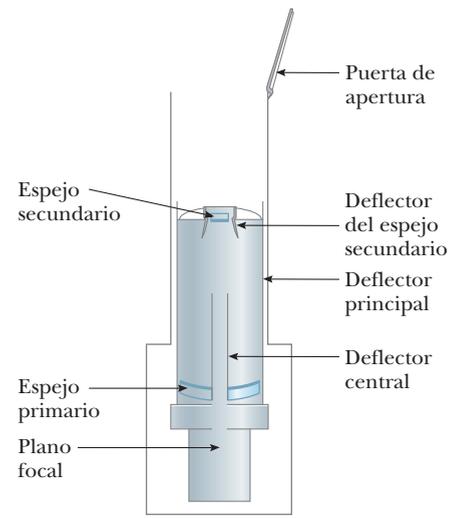


Figura 25.11 Esquema del telescopio espacial Hubble.

COMENTARIOS El poder de recolección de luz de un telescopio y la longitud de la línea base sobre la cual se recopila luz son, de hecho, más importantes que la amplificación de un telescopio, porque estos dos factores contribuyen a la resolución de la imagen. Una imagen de alta resolución siempre se puede amplificar de modo que sus detalles se puedan examinar. Sin embargo, una imagen de baja resolución con frecuencia es borrosa cuando se amplifica. (Véase la sección 25.6.)

PREGUNTA 25.5 ¿Es posible lograr mayor amplificación de un telescopio al aumentar la longitud focal del espejo? ¿Qué efecto tendrá sobre la amplificación el aumento de la longitud focal del ocular?

EJERCICIO 25.5 El telescopio Hale en Monte Palomar tiene una longitud focal de 16.8 m. Encuentre la amplificación del telescopio en conjunto con un ocular que tenga una longitud focal de 5.00 mm.

RESPUESTA 3.36×10^3

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

La capacidad de un sistema óptico como el ojo, un microscopio o un telescopio para distinguir entre objetos cercanamente espaciados está limitada debido a la naturaleza ondulatoria de la luz. Para entender esta dificultad, considere la figura 25.12, que muestra dos fuentes de luz lejos de una estrecha rendija de ancho a . Las fuentes se pueden considerar como dos fuentes puntuales S_1 y S_2 que *no* son coherentes. Por ejemplo, podrían ser dos estrellas distantes. Si no ocurre difracción, se observarían dos manchas brillantes distantes (o imágenes) sobre la pantalla a la derecha en la figura. Sin embargo, debido a la difracción, cada fuente forma una imagen como una región central brillante flanqueada por anillos brillantes y oscuros más débiles. Lo que se observa en la pantalla es la suma de dos patrones de difracción, uno de S_1 y el otro de S_2 .

Si las dos fuentes están separadas de modo que sus máximos centrales no se traslapan, como en la figura 25.12a, sus imágenes se pueden distinguir y se dice que están *resueltas*. Sin embargo, si las fuentes están juntas, como en la figura 25.12b, los dos máximos centrales pueden traslaparse y las imágenes *no se resuelven*. Para decidir si dos imágenes están resueltas, con frecuencia se aplica la siguiente condición a sus patrones de difracción:

Cuando el máximo central de una imagen cae sobre el primer mínimo de otra imagen, se dice que las imágenes están apenas resueltas. Esta condición límite de resolución se conoce como **criterio de Rayleigh**.

◀ Criterio de Rayleigh

La figura 25.13 (página 872) muestra patrones de difracción en tres situaciones. Las imágenes apenas están resueltas cuando su separación angular satisface el criterio de Rayleigh (figura 25.13a). Como los objetos se aproximan entre sí, sus imágenes están apenas resueltas

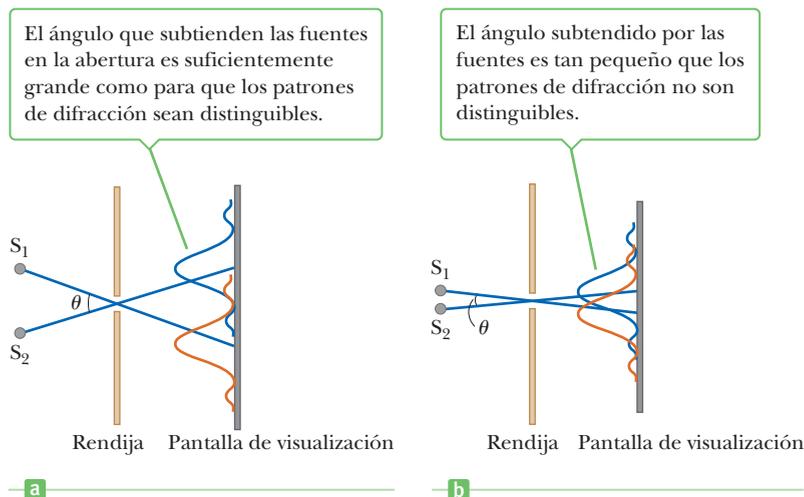


Figura 25.12 Dos fuentes puntuales alejadas de una estrecha rendija producen cada una un patrón de difracción. a) Las fuentes están separadas por un ángulo grande. b) Las fuentes están separadas por un ángulo pequeño. (Observe que los ángulos están enormemente exagerados. El dibujo no está a escala.)

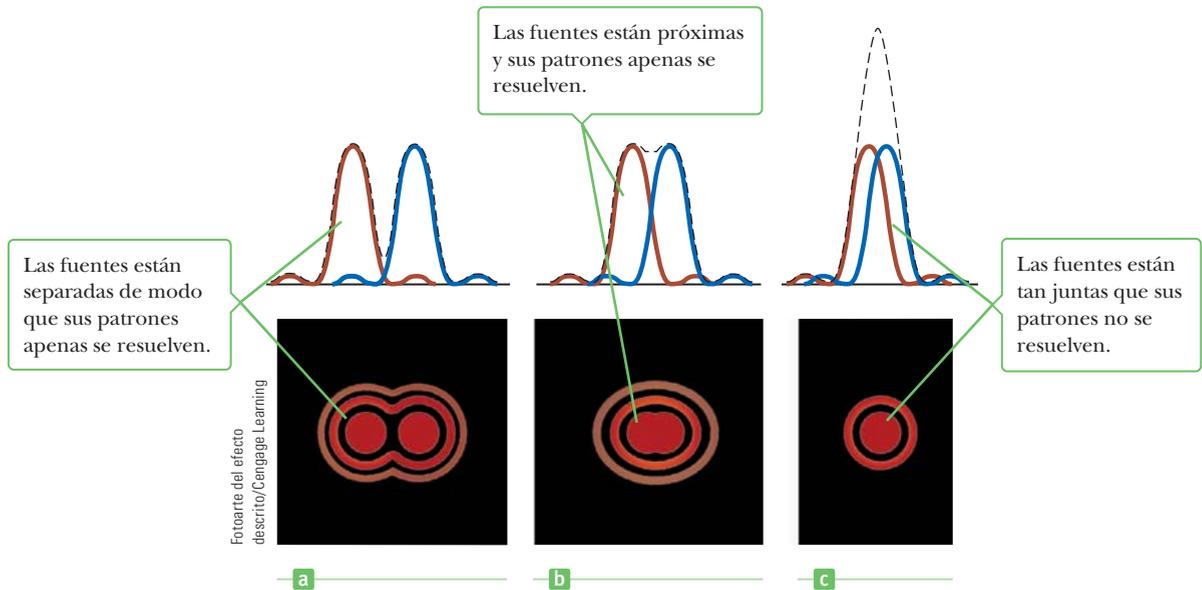


Figura 25.13 Patrones de difracción de dos fuentes puntuales (curvas sólidas) y el patrón resultante (curva punteada) para tres separaciones angulares de las fuentes.

(figura 25.13b). Finalmente, cuando las fuentes están muy cercanas, sus imágenes no están resueltas (figura 25.13c).

A partir del criterio de Rayleigh, se puede determinar la mínima separación angular $\theta_{\text{mín}}$ subtendida por la fuente en la rendija, de modo que las imágenes estarán apenas resueltas. En el capítulo 24 descubrimos que el primer mínimo en un patrón de difracción de una sola rendija ocurre en el ángulo que satisface la relación

$$\text{sen } \theta = \frac{\lambda}{a}$$

donde a es el ancho de la rendija. De acuerdo con el criterio de Rayleigh, esta expresión proporciona la separación angular más pequeña para la cual las dos imágenes se pueden resolver. Puesto que $\lambda \ll a$ en la mayoría de las situaciones, $\text{sen } \theta$ es pequeño y se puede usar la aproximación $\text{sen } \theta \approx \theta$. Por lo tanto, el ángulo de resolución límite para una rendija de ancho a es

$$\theta_{\text{mín}} \approx \frac{\lambda}{a} \quad [25.9]$$

Ángulo de resolución límite ▶
para una rendija

donde $\theta_{\text{mín}}$ está en radianes. Por lo tanto, el ángulo subtendido por las dos fuentes en la rendija deben ser *mayores* que λ/a si las imágenes se deben resolver.

Muchos sistemas ópticos usan aberturas circulares en vez de rendijas. El patrón de difracción de una abertura circular (figura 25.14) consiste en una región brillante circular rodeada por anillos progresivamente más débiles. Los análisis muestran que el ángulo de resolución límite de la abertura circular es

$$\theta_{\text{mín}} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad [25.10]$$

donde D es el diámetro de la abertura. Observe que la ecuación 25.10 es similar a la ecuación 25.9, excepto por el factor 1.22, que surge de un complejo análisis matemático de difracción de una abertura circular.

Examen rápido

25.2 Suponga que observa una estrella binaria con un telescopio y tiene dificultad para resolver las dos estrellas. ¿Qué color de filtro le ayudará a resolver las estrellas?
a) azul b) rojo c) ninguno porque los filtros de color no tienen efecto sobre la resolución.

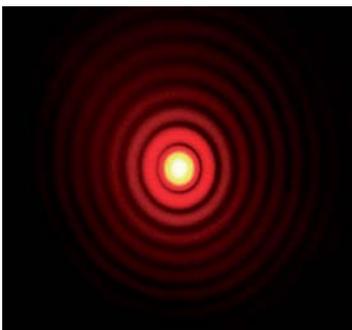


Figura 25.14 El patrón de difracción de una abertura circular consiste en un disco brillante central rodeado por anillos brillantes y oscuros concéntricos.

■ FÍSICA APLICADA 25.2 Ojos de gato BIO

Los ojos de los gatos tienen pupilas verticales en luz débil. De noche, ¿qué resolverían con más éxito los gatos: los faros de un auto distante o las luces separadas verticalmente en el mástil de un bote distante, que tienen la misma separación que los faros del automóvil?

EXPLICACIÓN El ancho de rendija eficaz en la dirección vertical del ojo de un gato es mayor que el de la dirección horizontal. Por ende, tiene más poder de resolución para luces separadas en la dirección vertical y sería más eficaz al resolver las luces del mástil en el bote. ■

■ EJEMPLO 25.6 Resolución de un microscopio

OBJETIVO Estudie las limitaciones en la resolución de un microscopio.

PROBLEMA Para ver un objeto bajo un microscopio se usa luz de sodio con longitud de onda de 589 nm. La abertura del objetivo tiene un diámetro de 0.90 cm. **a)** Encuentre el ángulo de resolución límite para este microscopio. **b)** Con luz visible de cualquier longitud de onda que desee, encuentre el límite máximo de resolución para este microscopio. **c)** Ahora es agua, con índice de refracción 1.33, lo que llena el espacio entre el objeto y el objetivo. ¿Qué efecto tendría el agua sobre el poder de resolución del microscopio, si se usa luz de 589 nm?

ESTRATEGIA Los incisos a) y b) requieren sustitución en la ecuación 25.10. Puesto que la longitud de onda aparece en el numerador, luz violeta, con la longitud de onda visible más corta, da la máxima resolución. En el inciso c) la única diferencia es que la longitud de onda cambia a λ/n , donde n es el índice de refracción del agua.

SOLUCIÓN

a) Encuentre el ángulo de resolución límite para este microscopio.

Sustituya en la ecuación 25.10 para obtener el ángulo de resolución límite.

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{589 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) \\ &= 8.0 \times 10^{-5} \text{ rad}\end{aligned}$$

b) Calcule el límite de resolución máximo del microscopio.

Para obtener la máxima resolución, sustituya la longitud de onda visible más corta disponible, que es luz violeta, con longitud de onda $4.0 \times 10^2 \text{ nm}$:

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{4.0 \times 10^{-7} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) \\ &= 5.4 \times 10^{-5} \text{ rad}\end{aligned}$$

c) ¿Qué efecto tiene sobre la resolución el agua entre el objeto y el objetivo, con luz de 589 nm?

Calcule la longitud de onda de la luz de sodio en el agua:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_a}{n} = \frac{589 \text{ nm}}{1.33} = 443 \text{ nm}$$

Sustituya esta longitud de onda en la ecuación 25.10 para obtener la resolución:

$$\theta_{\min} = 1.22 \left(\frac{443 \times 10^{-9} \text{ m}}{0.90 \times 10^{-2} \text{ m}} \right) = 6.0 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

COMENTARIOS En cada caso, cualesquiera dos puntos sobre el objeto que subtendan un ángulo menor que el ángulo limitante θ_{\min} en el objetivo no pueden distinguirse en la imagen. En consecuencia, es posible ver una célula pero entonces no pueden verse con claridad estructuras más pequeñas dentro de ella. Obtener un aumento en la resolución es la motivación detrás de colocar una gota de aceite sobre el portaobjetos para ciertas lentes objetivos.

PREGUNTA 25.6 ¿Tener dos ojos en lugar de uno mejora la habilidad humana para resolver objetos distantes? En general, ¿ojos más espaciados aumentan el poder de resolución visual? Explique.

EJERCICIO 25.6 Suponga que es aceite, con $n = 1.50$, lo que llena el espacio entre el objeto y el objetivo para este microscopio. Calcule el ángulo limitante θ_{\min} para luz de sodio con longitud de onda de 589 nm en aire.

RESPUESTA $5.3 \times 10^{-5} \text{ rad}$

EJEMPLO 25.7 Resolución de cráteres en la Luna**OBJETIVO** Calcule la resolución de un telescopio.**PROBLEMA** El telescopio espacial Hubble tiene un apertura de 2.40 m de diámetro. **a)** ¿Cuál es su ángulo de resolución limitante a una longitud de onda de 6.00×10^2 nm? **b)** ¿Cuál es el cráter más pequeño que se podría resolver en la Luna? (La distancia Tierra-Luna es 3.84×10^8 m.)**ESTRATEGIA** Después de sustituir en la ecuación 25.10 para encontrar el ángulo limitante, use $s = r\theta$ para calcular el tamaño mínimo de cráter que se puede resolver.**SOLUCIÓN****a)** ¿Cuál es el ángulo de resolución limitante a una longitud de onda de 6.00×10^2 nm?Sustituya $D = 2.40$ m y $\lambda = 6.00 \times 10^{-7}$ m en la ecuación 25.10:

$$\begin{aligned}\theta_{\min} &= 1.22 \frac{\lambda}{D} = 1.22 \left(\frac{6.00 \times 10^{-7} \text{ m}}{2.40 \text{ m}} \right) \\ &= 3.05 \times 10^{-7} \text{ rad}\end{aligned}$$

b) ¿Cuál es el cráter lunar más pequeño que puede resolver el telescopio espacial Hubble?

Los dos lados opuestos del cráter deben subtender el ángulo mínimo. Use la fórmula de longitud de arco:

$$s = r\theta = (3.84 \times 10^8 \text{ m})(3.05 \times 10^{-7} \text{ rad}) = 117 \text{ m}$$

COMENTARIOS La distancia es tan grande y el ángulo tan pequeño que está justificado usar la longitud de arco de un círculo porque el arco circular está muy cerca de una línea recta. El telescopio espacial Hubble produce muchos gigabytes de datos todos los días desde que comenzó su operación.**PREGUNTA 25.7** ¿La resolución de un telescopio es mejor en el extremo rojo del espectro visible o en el extremo violeta?**EJERCICIO 25.7** El telescopio Hale en Monte Palomar tiene un diámetro de 5.08 m (200 pulg). **a)** Encuentre el ángulo de resolución limitante para una longitud de onda de 6.00×10^2 nm. **b)** Calcule el diámetro de cráter más pequeño que puede resolver el telescopio en la Luna. **c)** Las respuestas parecen mejores que lo que puede lograr el Hubble. ¿Por qué las respuestas no concuerdan?**RESPUESTAS** **a)** 1.44×10^{-7} rad **b)** 55.3 m **c)** Aunque los números son mejores que los del Hubble, el telescopio Hale se enfrenta con los efectos de la turbulencia atmosférica, de modo que el telescopio espacial más pequeño en realidad obtiene resultados mucho mejores.

Es interesante comparar la resolución del telescopio Hale con la de un gran radiotelescopio, como el sistema en Arecibo, Puerto Rico, que tiene un diámetro de 1 000 pies (305 m). Este telescopio detecta ondas de radio a una longitud de onda de 0.75 m. El ángulo mínimo de resolución correspondiente se puede calcular como 3.0×10^{-3} rad (10 min 19 s de arco), que es más de 10 000 veces mayor que el ángulo mínimo calculado para el telescopio Hale.

Con tal resolución relativamente pobre, ¿por qué se considera a Arecibo un valioso instrumento astronómico? A diferencia de sus contrapartes ópticas, Arecibo puede ver a través de nubes de polvo. El centro de la galaxia Vía Láctea es oscuro por tales nubes de polvo, que absorben y dispersan la luz visible. Las ondas de radio fácilmente penetran las nubes, de modo que los radiotelescopios permiten observaciones directas del núcleo galáctico.

Poder de resolución de la rejilla de difracción

La rejilla de difracción que estudió en el capítulo 24 es más útil para realizar mediciones precisas de longitud de onda. Como el prisma, se puede usar para dispersar un espectro en sus componentes. De los dos dispositivos, la rejilla es más adecuada para distinguir entre dos longitudes de onda cercanamente espaciadas. Decimos que el espectrómetro de rejilla

tiene una mayor *resolución* que el espectrómetro de prisma. Si λ_1 y λ_2 son dos longitudes de onda casi iguales entre las que el espectrómetro apenas puede distinguir, el **poder de resolución** de la rejilla se define como

$$R \equiv \frac{\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad [25.11]$$

donde $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ y $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. A partir de esta ecuación, es claro que una rejilla con un poder de resolución alto puede distinguir pequeñas diferencias en longitud de onda. Más aún, si N líneas de la rejilla se iluminan, se puede demostrar que el poder de resolución en la difracción de m -ésimo orden está dado por

$$R = Nm \quad [25.12] \quad \leftarrow \text{Poder de resolución de una rejilla}$$

De este modo, el poder de resolución R aumenta con el número de orden m y es grande para una rejilla con un mayor número de rendijas iluminadas. Observe que, para $m = 0$, $R = 0$, lo cual significa que *todas las longitudes de onda son indistinguibles* para el máximo de orden cero. (Todas las longitudes caen en el mismo punto sobre la pantalla.) Sin embargo, considere el patrón de difracción de segundo orden de una rejilla que tiene 5 000 rayados iluminados por la fuente de luz. El poder de resolución de tal rejilla en segundo orden es $R = 5\,000 \times 2 = 10\,000$. Por lo tanto, la *mínima* separación de longitud de onda entre dos líneas espectrales que apenas se pueden resolver, suponiendo una longitud de onda media de 600 nm, se calcula a partir de la ecuación 25.12 como $\Delta\lambda = \lambda/R = 6 \times 10^{-2}$ nm. Para el máximo principal de tercer orden, $R = 15\,000$ y $\Delta\lambda = 4 \times 10^{-2}$ nm, etcétera.

■ EJEMPLO 25.8 Luz de átomos de sodio

OBJETIVO Encuentre el poder de resolución necesario para distinguir líneas espectrales.

PROBLEMA Dos líneas brillantes en el espectro de sodio tienen longitudes de onda de 589.00 nm y 589.59 nm, respectivamente. a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla para distinguir estas longitudes de onda? b) Para resolver estas líneas en el espectro de segundo orden, ¿cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar?

ESTRATEGIA Este problema requiere poco más que sustituir en la ecuación 25.11 y 25.12.

SOLUCIÓN

a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla para poder distinguir las longitudes de onda dadas?

Sustituya en la ecuación 25.11 para encontrar R :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{589.00 \text{ nm}}{589.59 \text{ nm} - 589.00 \text{ nm}} = \frac{589 \text{ nm}}{0.59 \text{ nm}} = 1.0 \times 10^3$$

b) Para resolver estas líneas en el espectro de segundo orden, ¿cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar?

Resuelva la ecuación 25.12 para N y sustituya:

$$N = \frac{R}{m} = \frac{1.0 \times 10^3}{2} = 5.0 \times 10^2 \text{ líneas}$$

COMENTARIOS La capacidad para resolver líneas espectrales es particularmente importante en física atómica experimental.

PREGUNTA 25.8 Verdadero o Falso: Si dos rejillas de difracción son idénticas, excepto por el número de líneas, la rejilla con mayor número de líneas tiene el mayor poder de resolución.

EJERCICIO 25.8 Debido a un fenómeno llamado espín electrónico, cuando las líneas de un espectro se examinan a alta resolución, encontramos que cada línea en realidad son dos líneas cercanamente espaciadas llamadas doblete. Un ejemplo es el doblete en el espectro de hidrógeno, que tiene longitudes de onda de 656.272 nm y 656.285 nm. a) ¿Cuál debe ser el poder de resolución de una rejilla, de modo que se puedan distinguir estas longitudes de onda? b) ¿Cuántas líneas de la rejilla se deben iluminar para resolver estas líneas en el espectro de tercer orden?

RESPUESTAS a) 5.0×10^4 b) 1.7×10^4 líneas

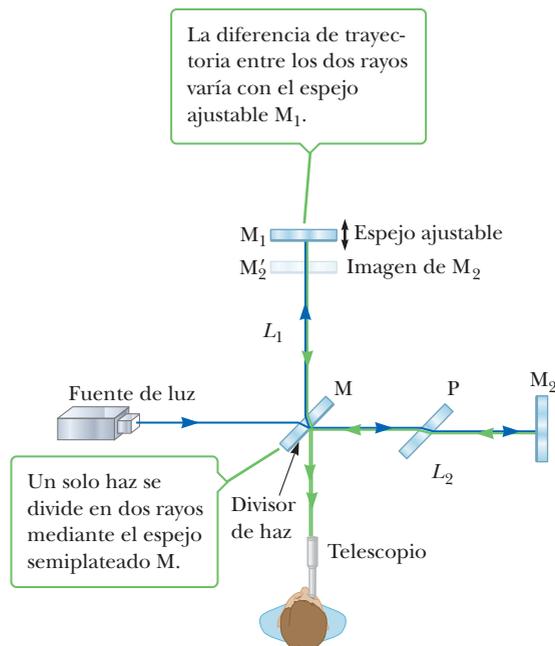
25.7 El interferómetro Michelson

El interferómetro Michelson es un instrumento óptico que tiene gran importancia científica. Inventado por el físico estadounidense A. A. Michelson (1852-1931), es un ingenioso dispositivo que divide un haz de luz en dos partes y luego las recombina para formar un patrón de interferencia. El interferómetro se utiliza para realizar mediciones de longitud precisas.

La figura activa 25.15 es un diagrama esquemático de un interferómetro. Una fuente monocromática proporciona un haz de luz que se divide en dos rayos mediante un espejo semiplatedado M inclinado a un ángulo de 45° en relación con el haz incidente. Un rayo se refleja en forma vertical hacia arriba, hacia el espejo M_1 y el otro rayo se transmite en forma horizontal a través del espejo M hacia el espejo M_2 . Por lo tanto, los dos rayos recorren rutas separadas, L_1 y L_2 . Después de reflejarse de los espejos M_1 y M_2 , los dos rayos eventualmente se recombinan para producir un patrón de interferencia, que se puede ver a través de un telescopio. La placa de vidrio P , igual en grosor al espejo M , se coloca en la trayectoria del rayo horizontal para asegurar que los dos rayos recorren la misma distancia a través del vidrio.

El patrón de interferencia para los dos rayos se determina mediante la diferencia en las longitudes de sus trayectorias. Cuando los dos rayos se ven como se muestra, la imagen de M_2 está en M'_2 , paralela a M_1 . Por lo tanto, el espacio entre M'_2 y M_1 forma el equivalente de una película de aire paralela. El grosor eficaz de la película de aire varía con el uso de un tornillo con rosca fina para mover el espejo M_1 en la dirección indicada por las flechas en la figura 25.15. Si uno de los espejos se inclina ligeramente respecto al otro, la delgada película entre los dos adquiere forma de cuña y se establece un patrón de interferencia que consiste en franjas paralelas, como se describe en el ejemplo 24.4. Ahora suponga que enfoca una de las líneas oscuras con el retículo de un telescopio. Conforme el espejo M_1 se mueve para alargar la trayectoria L_1 , el grosor de la cuña aumenta. Cuando el grosor aumenta por $\lambda/4$, la interferencia destructiva que inicialmente produjo la franja oscura cambia a interferencia constructiva y ahora se observa una franja brillante en la posición del retículo. El término *corrimiento de franja* se usa para describir el cambio en una franja de oscura a clara o de clara a oscura. Cada vez que M_1 se mueve una distancia $\lambda/4$ se forman franjas claras y oscuras sucesivas. La longitud de onda de la luz se puede medir al contar

Figura activa 25.15
Diagrama del interferómetro Michelson.



el número de corrimientos de franja para un desplazamiento medido de M_1 . Por el contrario, si la longitud de onda se conoce con precisión (como con un haz láser), se puede determinar el desplazamiento del espejo hasta dentro de una fracción de la longitud de onda. Puesto que el interferómetro puede medir desplazamientos con precisión, con frecuencia se usa para realizar mediciones enormemente precisas de las dimensiones de componentes mecánicos.

Si los espejos están muy bien alineados, en lugar de inclinados uno respecto del otro, la diferencia de trayectoria difiere ligeramente para diferentes ángulos de visión. Este arreglo resulta en un patrón de interferencia que recuerda los anillos de Newton. El patrón se puede usar en una forma similar a la de los espejos inclinados. Un observador pone atención a la mancha central en el patrón de interferencia. Por ejemplo, suponga que la mancha inicialmente es oscura, lo cual indica que ocurre interferencia destructiva. Si M_1 ahora se mueve a una distancia de $\lambda/4$, esta mancha central cambia a una región clara, que corresponde a un corrimiento de franja.

RESUMEN

25.1 La cámara

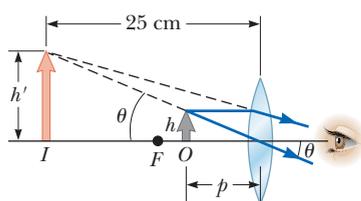
El poder de concentración de luz de una lente con longitud focal f y diámetro D se determina mediante el **número f** , definido como

$$\text{número } f \equiv \frac{f}{D} \quad [25.1]$$

Mientras menor sea el número f de una lente, más brillante será la imagen formada.

25.2 El ojo

La **hiperopia** (hipermetropía) es un defecto del ojo que ocurre cuando el globo ocular es muy corto o cuando el músculo ciliar no puede cambiar la forma del cristalino lo suficiente como para formar una imagen enfocada de manera adecuada. La **miopía** ocurre cuando el ojo es más largo que lo normal o cuando la máxima longitud focal del cristalino es insuficiente para producir una imagen enfocada con claridad sobre la retina.



Un objeto colocado cerca del punto focal de una lente convergente produce una imagen ampliada, que abarca un ángulo de $\theta \approx h'/25$ en el ojo. Tenga en cuenta que en esta situación $q = -25$ cm.

El **poder** de una lente en **dioptrías** es el inverso de la longitud focal en metros.

25.3 El amplificador simple

La **amplificación angular de una lente** se define como

$$m \equiv \frac{\theta}{\theta_0} \quad [25.2]$$

donde θ es el ángulo subtendido por un objeto en el ojo con una lente en uso y θ_0 es el ángulo subtendido por el objeto cuando se coloca en el punto cercano del ojo y no se usa lente. La **máxima amplificación angular de una lente** es

$$m_{\text{máx}} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.5]$$

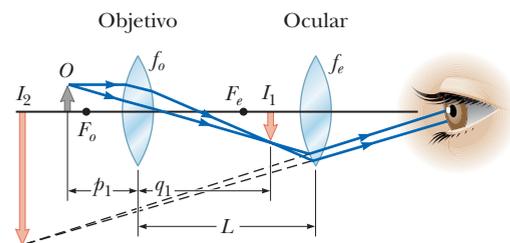
Cuando el ojo está relajado, la amplificación angular es

$$m = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad [25.6]$$

25.4 El microscopio compuesto

La **amplificación global de un microscopio compuesto** de longitud L es el producto de la amplificación producida por el objetivo, con longitud focal f_o , y la amplificación producida por el ocular, con longitud focal f_e :

$$m = -\frac{L}{f_o} \left(\frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right) \quad [25.7]$$



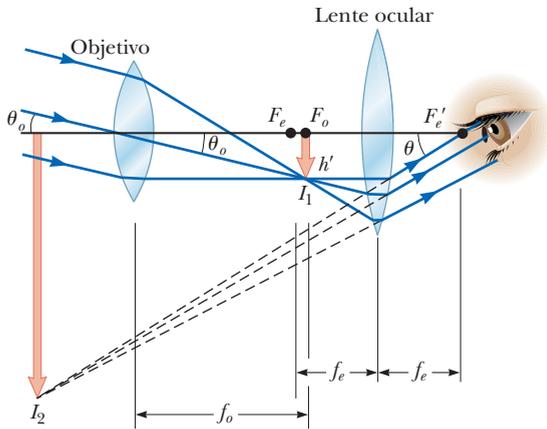
Un diagrama de rayos para un microscopio compuesto, que consiste en un objetivo y un ocular o lente ocular.

25.5 El telescopio

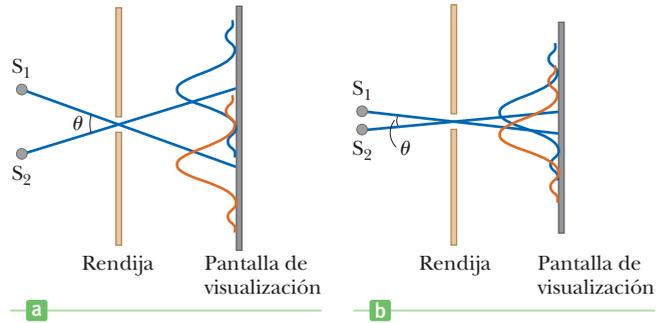
La **amplificación angular de un telescopio** es

$$m = \frac{f_o}{f_e} \quad [25.8]$$

donde f_o es la longitud focal del objetivo y f_e es la longitud focal del ocular.



Un diagrama de rayos para un telescopio de refracción, con el objeto en el infinito.



Dos fuentes puntuales lejos de una estrecha rendija producen cada una un patrón de difracción. a) Las fuentes están separadas por un ángulo grande. b) Las fuentes están separadas por un ángulo pequeño.

El ángulo de resolución limitante de una **abertura circular** es

$$\theta_{\text{mín}} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad [25.10]$$

donde D es el diámetro de la apertura.

Si λ_1 y λ_2 son dos longitudes de onda casi iguales entre las cuales un espectrómetro de rejilla apenas puede distinguir, el **poder de resolución** R de la rejilla se define como

$$R \equiv \frac{\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad [25.11]$$

donde $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ y $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. El **poder de resolución** de una rejilla de difracción en el m -ésimo orden es

$$R = Nm \quad [25.12]$$

donde N es el número de líneas iluminadas en la rejilla.

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

Se dice que dos imágenes están **apenas resueltas** cuando el máximo central del patrón de difracción para una imagen cae sobre el primer mínimo de la otra imagen. Esta condición limitante de la resolución se conoce como **criterio de Rayleigh**. El ángulo de resolución limitante para una **rendija** de ancho a es

$$\theta_{\text{mín}} \approx \frac{\lambda}{a} \quad [25.9]$$

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si el diámetro de apertura de una cámara aumenta por un factor de 3, ¿cómo se afecta la intensidad de la luz que golpea la película? a) Aumenta por un factor de 3. b) Disminuye por un factor de 3. c) Aumenta por un factor de 9. d) Disminuye por un factor de 9. e) Aumentar la apertura no afecta la intensidad.
- Una lente tiene una longitud focal de 25 cm. ¿Cuál es el poder de la lente? a) 2.0 dioptrías b) 4.0 dioptrías c) 6.0 dioptrías d) 8.0 dioptrías e) ninguno de éstos.
- ¿Por qué es ventajoso usar un objetivo de gran diámetro en un telescopio? a) Difracta la luz de manera más eficaz que el objetivo de diámetro más pequeño. b) Aumenta su amplificación. c) Aumenta su resolución. d) Permite ver más objetos en el campo de visión. e) Refleja longitudes de onda indeseadas.
- BIO** Si los ojos de una mujer son más largos de lo normal, ¿cómo se afecta su visión y cómo se puede corregir? a) La mujer es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente divergente. b) La mujer es miope y su visión se puede corregir con una lente divergente. c) La mujer es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente convergente. d) La mujer es miope y su visión se puede corregir con una lente convergente. e) La visión de la mujer no se puede corregir.
- BIO** Si un hombre tiene ojos que son más cortos de lo normal, ¿cómo se afecta su visión y cómo se puede corregir? a) El hombre es hipermetrope y su visión se puede corregir con una lente divergente. b) El hombre es miope y su visión se puede corregir con una lente divergente. c) El hombre es hipermetrope y su visión se puede corregir

- con una lente convergente. d) El hombre es miope y su visión se puede corregir con una lente convergente. e) La visión del hombre no se puede corregir.
6. **BIO** El punto cercano del ojo de un individuo dado es 55 cm. ¿De qué longitud focal se deben prescribir lentes correctivos para que un objeto se vea con claridad cuando se coloca a 25 cm enfrente del ojo? a) -25 cm b) 17 cm c) 46 cm d) 32 cm e) 54 cm.
 7. Un telescopio se puede usar como cámara si la película se coloca en la posición de la imagen del objetivo (o espejo); de modo que el objetivo se convierte en la lente de la cámara. Si la lente objetivo, con longitud focal de 2.00 m, de un telescopio se usa para fotografiar la imagen de dos estrellas que están separadas 20.0 mm sobre la película, ¿cuál es la separación angular de las dos estrellas? a) 0.010° b) 0.10° c) 0.286° d) 0.573° e) 0.353° .
 8. Un microscopio compuesto tiene lentes objetivo y ocular con longitudes focales de 0.80 cm y 4.0 cm, respectivamente. Si la longitud del microscopio es 15 cm, ¿cuál es la amplificación aproximada del microscopio? a) 3.2 b) 6.3 c) 48 d) 120 e) 160.
 9. Una rejilla de difracción debe distinguir longitudes de onda que están separadas 0.1 nm en la banda visible. ¿Qué poder de resolución mínimo debe tener la rejilla? a) 3 000 b) 4 000 c) 5 000 d) 6 000 e) 7 000.
 10. Estime el tamaño de apertura requerido para que un telescopio resuelva dos estrellas que están a 200 años luz (a-l) de la Tierra y orbitan dentro de 10^{-5} a-l una de otra. a) 10 cm b) 1 m c) 10 m d) 50 m e) 100 m.
 11. A lo lejos, observe las luces de un automóvil, pero se distinguen como el faro de una motocicleta. Supongamos que las luces del automóvil ahora cambian de luz de cruce (bajas) a luces de carretera (altas) por lo que la intensidad de la luz que recibe se vuelve tres veces mayor. Por otra parte, desprecie cualquier cambio en las pupilas de sus ojos. Entonces, ¿qué le sucede a su capacidad para resolver las dos fuentes de luz? a) Se incrementa en un factor de 9. b) Se incrementa en un factor de 3. c) Sigue siendo el mismo. d) Se vuelve buena en un tercio. e) Se vuelve buena en un noveno.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

1. Una lente se usa para examinar un objeto a través de una habitación. ¿La lente probablemente se está usando como un amplificador simple?
2. Un rayo láser incide con un ángulo pequeño en una regla horizontal de calculista mecánico que tiene una escala finamente calibrada. Las resoluciones grabadas en la escala dan lugar a un patrón de difracción en una pantalla vertical. Discuta cómo se puede utilizar esta técnica para obtener una medida de la longitud de onda de la luz láser.
3. **BIO** El nervio óptico y el cerebro invierten la imagen formada sobre la retina. ¿Por qué no vemos todo de cabeza?
4. Suponga que observa el patrón de interferencia formado por un interferómetro Michelson en un laboratorio y un colega bromista sostiene un cerillo encendido en la trayectoria de la luz de uno de los brazos del interferómetro. ¿Este cerillo tendrá algún efecto sobre el patrón de interferencia?
5. Si quiere examinar el detalle fino de un objeto con una lupa de +20.0 dioptrías de poder, ¿dónde debe colocar el objeto de modo que observe una imagen ampliada del mismo?
6. **BIO** Compare y contraste el ojo y una cámara. ¿Qué partes de la cámara corresponden al iris, la retina y la córnea del ojo?
7. Si quiere usar una lente convergente para encender fuego a un trozo de papel, ¿por qué la fuente de luz debe estar más lejos de la lente que su punto focal?
8. Los telescopios grandes por lo general reflejan en lugar de refractar. Mencione algunas razones para esta elección.
9. Explique por qué teóricamente es imposible ver un objeto tan pequeño como un átomo, sin importar la calidad del microscopio de luz que se utilice.
10. ¿Qué es más importante en el uso de una unidad de flash de cámara, la intensidad de la luz (la energía por unidad de área por unidad de tiempo), o el producto de la intensidad y el tiempo del flash, suponiendo que el tiempo es menor que la velocidad de obturación?
11. **BIO** Un paciente tiene un punto cercano de 1.25 m. ¿Es miope o hipermetrope? ¿La lente correctiva debe ser convergente o divergente?
12. Una lente con cierta potencia se usa como amplificador simple. Si la potencia de la lente se duplica, ¿la amplificación angular aumenta o disminuye?
13. El láser produce un haz de unos pocos milímetros de ancho, con una intensidad uniforme en toda su anchura. Un cabello se estira verticalmente en la parte delantera del láser para cruzar el haz. a) ¿Cuál es el patrón de difracción que produce en una pantalla distante relacionada con la de una rendija vertical de igual anchura en el cabello? b) ¿Cómo puede determinar el ancho del cabello a partir de las mediciones de su patrón de difracción?
14. **BIO** Durante una cirugía ocular LASIK (queratomileusis *in situ* asistida por láser), la forma de la córnea se modifica al vaporizar parte de su material. Si la cirugía se realiza para corregir la miopía, ¿qué forma debe darse a la córnea?

PROBLEMAS

ENHANCED **WebAssign** Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
 - 3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- 1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C/C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

25.1 La cámara

1. Una lente tiene una longitud focal de 28 cm y un diámetro de 4.0 cm. ¿Cuál es el número f de la lente?
2. Cierta cámara tiene números f que varían de 1.2 a 22. Si la longitud focal de la lente es 55 mm, ¿cuál es el rango de diámetros de apertura para la cámara?
3. La imagen fotográfica de un edificio mide 0.092 0 m de alto. La imagen fue hecha con una lente con longitud focal de 52.0 mm. Si la lente estaba a 100 m del edificio cuando se tomó la fotografía, determine la altura del edificio.
4. El área de imagen de una típica diapositiva de 35 mm es de 23.5 por 35.0 mm. Si la lente de una cámara tiene una longitud focal de 55.0 mm y forma una imagen de la constelación Orión, que abarca 20° , ¿la imagen completa encajará en una diapositiva de 35 mm?
5. Una cámara se usa con la exposición correcta en un número $f/4$ y una velocidad de obturador de $1/15$ s. Además de los números f que figuran en la sección 25.1, esta cámara tiene números $f/1$, $f/1.4$, $f/2$. Para fotografiar un sujeto en movimiento rápido, la velocidad de obturación se cambia a $1/125$ s. Encontrar el nuevo número f de ajuste necesario en esta cámara para mantener una exposición satisfactoria.
6. a) Use argumentos conceptuales para demostrar que la intensidad de la luz (energía por unidad de área por unidad de tiempo) que llega a la película en una cámara es proporcional al cuadrado del recíproco del número f como

$$I \propto \frac{1}{(f/D)^2}$$

- b) El tiempo de exposición correcto para una cámara establecida a $f/1.8$ es $(1/500)$ s. Calcule el tiempo de exposición correcto si el número f cambia a $f/4$ bajo las mismas condiciones de iluminación. *Nota:* “ $f/4$ ” en una cámara significa “un número f de 4”.
7. Cierta tipo de película requiere un tiempo de exposición de 0.010 s con una configuración de lente $f/11$. Otro tipo de película requiere el doble de energía luminosa para producir el mismo nivel de exposición. ¿Qué número f necesita el segundo tipo de película con el tiempo de exposición 0.010 s?
8. La lente de cierta cámara tiene una longitud focal de 175 mm. Su posición se puede ajustar para producir imágenes cuando la lente está entre 180 y 210 mm del plano de la película. ¿Sobre cuál rango de distancias de objeto es útil la lente?

25.2 El ojo

9. BIO El punto cercano del ojo de una persona es 60.0 cm. Para ver objetos con claridad a una distancia de 25.0 cm, ¿cuál debe ser la longitud focal y la potencia de la lente correctiva apropiada? (Desprecie la distancia de la lente al ojo.)
10. BIO PG Un paciente no puede ver objetos más cercanos de 40.0 cm y quiere ver con claridad objetos que estén a 20.0 cm de su ojo. a) ¿El paciente es miope o hipermetrope? b) Si la distancia ojo-lente es 2.00 cm, ¿cuál es la mínima distancia de objeto p desde la lente? c) ¿Qué posición de imagen respecto a la lente permitirá al paciente ver el objeto? d) ¿La imagen es real o virtual? ¿La distancia de imagen q es positiva o negativa? e) Calcule la longitud focal requerida. f) Encuentre la potencia de la lente en dioptrías. g) Si se debe prescribir una lente de contacto, encuentre p , q y f , y el poder de la lente.
11. BIO M Los límites de acomodación para los ojos del *Miope* Nick son 18.0 y 80.0 cm. Cuando usa sus gafas, puede ver objetos lejanos claramente. ¿A qué distancia mínima puede ver objetos con claridad?
12. BIO El punto cercano de cierto niño es 10.0 cm; su punto lejano (con ojos relajados) es 125 cm. El cristalino de cada ojo está a 2.00 cm de la retina. a) ¿Entre cuáles límites, medidos en dioptrías, varía la potencia de esta combinación cristalino-córnea? b) Calcule la potencia de las gafas que debe usar el niño para visión a distancia relajada. ¿La lente es convergente o divergente?
13. BIO Un individuo es miope; su punto cercano es 13.0 cm y su punto lejano es 50.0 cm. a) ¿Qué poder de lente necesita para corregir su miopía? b) Cuando usa las lentes, ¿cuál es el punto cercano de esta persona?
14. BIO C/C Un paciente tiene un punto cercano de 45.0 cm y punto lejano de 85.0 cm. a) ¿Una sola lente puede corregir la visión del paciente? Explique las opciones del paciente. b) Calcule la potencia de lente necesaria para corregir el punto cercano de modo que el paciente pueda ver objetos a 25.0 cm de distancia. Desprecie la distancia ojo-lente. c) Calcule la potencia de la lente necesaria para corregir el punto lejano del paciente y de nuevo desprecie la distancia ojo-lente.
15. BIO Un cristalino artificial se implanta en el ojo de una persona para sustituir un cristalino enfermo. La distancia entre el cristalino artificial y la retina es 2.80 cm. En

ausencia del cristalino, la imagen de un objeto distante (formada por refracción en la córnea) cae 5.33 cm detrás de la retina. El cristalino se diseña para poner la imagen del objeto distante en la retina. ¿Cuál es el poder del cristalino implantado? *Sugerencia:* Considere la imagen formada por la córnea como un objeto virtual.

16. **BIO** Una persona debe usar bifocales. Ella puede ver muy bien cuando el objeto está entre 30 cm y 1.5 m del ojo. a) Las porciones superiores de los bifocales (figura P25.16) se deben diseñar para permitirle ver objetos distantes con claridad. ¿Qué poder deben tener? b) Las porciones inferiores de los bifocales deben permitirle ver objetos cómodamente a 25 cm. ¿Qué poder deben tener?

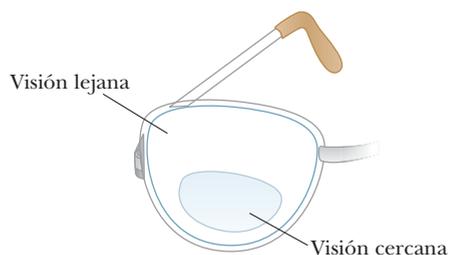


Figura P25.16

17. **BIO** Una mujer miope no puede ver objetos con claridad más allá de 40.0 cm (su punto lejano). Si no tiene astigmatismo y se prescriben lentes de contacto, ¿qué poder y tipo de lente se requieren para corregir su visión?
18. **BIO C/C** Una persona ve con claridad al usar gafas que tienen una potencia de -4.00 dioptrías cuando las lentes están 2.00 cm enfrente de los ojos. a) ¿Cuál es la longitud focal de la lente? b) ¿La persona es miope o hipermetrope? c) Si la persona quiere cambiar a lentes de contacto colocados directamente sobre los ojos, ¿qué poder de lente debe prescribirse?

25.3 El amplificador simple

19. Un coleccionista de estampillas usa una lente con longitud focal de 7.5 cm como un amplificador simple (lupa). La imagen virtual se produce en el punto cercano normal (25 cm). a) ¿Cuán lejos de la lente debe colocarse la estampilla? b) ¿Cuál es la amplificación angular esperada?
20. Una lente que tiene una longitud focal de 5.00 cm se utiliza como una lupa. a) Para obtener la ampliación máxima y una imagen que pueda ser vista claramente por un ojo normal, ¿dónde se debe colocar el objeto? b) ¿Cuál es el aumento angular?
21. Un estudiante de biología usa un amplificador simple (lupa) para examinar las características estructurales del ala de un insecto. El ala se sostiene 3.50 cm enfrente de la lente y la imagen se forma a 25.0 cm del ojo. a) ¿Cuál es la longitud focal de la lente? b) ¿Qué amplificación angular se logra?

22. Una lente de joyero, con longitud focal de 5.0 cm se usa como lupa. Con la lente sostenida cerca del ojo, determine a) la amplificación angular cuando el objeto está en el punto focal de la lente y b) la amplificación angular cuando la imagen formada por la lente está en el punto cercano del ojo (25 cm). c) ¿Cuál es la distancia del objeto que produce la máxima amplificación?
23. Una hoja de longitud h se coloca a 71.0 cm enfrente de una lente convergente con una longitud focal de 39.0 cm. Un observador ve la imagen de la hoja desde una posición 1.26 m detrás de la lente, como se muestra en la figura P25.23. a) ¿Cuál es la magnitud de la amplificación lateral (la razón del tamaño de la imagen al tamaño del objeto) producida por la lente? b) ¿Qué amplificación angular se logra al ver la imagen de la hoja en lugar de ver la hoja directamente?

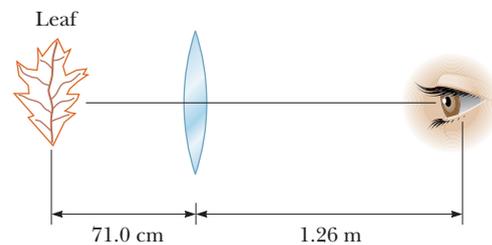


Figura P25.23

24. a) ¿Cuál es la amplificación angular máxima de unas gafas con una longitud focal de 18.0 cm cuando se utilizan como una lupa? b) ¿Cuál es la amplificación de esta lente cuando el ojo se relaja?

25.4 El microscopio compuesto

25.5 El telescopio

25. La amplificación global deseada de un microscopio compuesto es $140\times$. El objetivo solo produce una amplificación lateral de $12\times$. Determine la longitud focal requerida del ocular.
26. La distancia entre el ocular y el objetivo en cierto microscopio compuesto es 20.0 cm. La longitud focal del objetivo es 0.500 cm y la del ocular es 1.70 cm. Encuentre la amplificación global del microscopio.
27. Encuentre la ampliación de un telescopio que usa un objetivo de 2.75 dioptrías y un ocular de 35.0 dioptrías.
28. **BIO** Un microscopio tiene un objetivo con una longitud focal de 16.22 mm y un ocular con una longitud focal de 9.50 mm. Con la longitud del barril establecida en 29.0 cm, el diámetro de la imagen de un eritrocito subtendiendo un ángulo de 1.43 mrad con el ojo. Si la distancia de la imagen final es 29.0 cm desde el ocular, ¿cuál es el diámetro real del eritrocito? *Sugerencia:* Para resolver esta cuestión, vuelva a los fundamentos y use la ecuación de la lente delgada.
29. Un cierto telescopio tiene un espejo objetivo con un diámetro de apertura de 200 mm y una longitud focal de 2000 mm. Se captura la imagen de una nebulosa sobre

- una película fotográfica en su foco primario con un tiempo de exposición de 1.50 min. Para producir la misma energía luminosa por unidad de área en la película, ¿cuál es el tiempo de exposición necesario para fotografiar la misma nebulosa con un telescopio más pequeño que tiene un objetivo con un diámetro de 60.0 mm y una longitud focal de 900 mm?
30. **S** a) Encuentre una ecuación para la longitud L de un telescopio refractor en términos de la longitud focal del objetivo f_o y la amplificación m . b) Una perilla ajusta el ocular adelante y atrás. Suponga que el telescopio está en foco con un ocular que da una amplificación de 50.0. ¿A qué distancia se debe ajustar el ocular cuando éste se sustituye, con una amplificación resultante de 1.00×10^2 ? ¿El ocular se debe ajustar hacia atrás o hacia adelante? Suponga que el objetivo tiene una longitud focal de 2.00 m.
31. Suponga que un telescopio astronómico está siendo diseñado para tener un aumento angular de 34.0. Si la distancia focal de la lente del objetivo que se utiliza es 86.0 cm, halle a) la longitud focal requerida del ocular y b) la distancia entre las dos lentes para vista relajada. *Sugerencia:* Para un ojo relajado, la imagen formada por la lente del objetivo está en el punto focal del ocular.
32. Cierta telescopio tiene un objetivo con longitud focal de 1 500 cm. Si la Luna se usa como objeto, una imagen de 1.0 cm de largo formada por el objetivo corresponde ¿a qué distancia, en millas, en la Luna? Suponga 3.8×10^8 m para la distancia Tierra-Luna.
33. **S** Los astrónomos con frecuencia toman fotografías con el objetivo o espejo de un telescopio solo, sin un ocular. a) Demuestre que el tamaño de la imagen h' para un telescopio que se usa de esta forma está dada por $h' = fh/(f - p)$, donde h es el tamaño del objeto, f la longitud focal del objetivo y p la distancia del objeto. b) Simplifique la expresión en el inciso a) si la distancia del objeto es mucho mayor que la longitud focal del objetivo. c) La “envergadura” de la Estación Espacial Internacional es 108.6 m, el ancho global de su configuración de panel solar. Encuentre el ancho de la imagen formada por el objetivo de un telescopio con longitud focal de 4.00 m, cuando orbita a una altitud de 407 km.
34. **BIO** Un viejo marino naufraga en una isla desierta, pero logra salvar sus gafas. La lente para un ojo tiene una potencia de +1.20 dioptrías y la otra lente una potencia de +9.00 dioptrías. a) ¿Cuál es el poder de amplificación del telescopio que puede construir con estas lentes? b) ¿Cuán separadas están las lentes cuando el telescopio se ajusta para mínima fatiga visual?
35. **M** Una persona decide usar un viejo par de gafas para fabricar algunos instrumentos ópticos. Élla sabe que el punto cercano en su ojo izquierdo es 50.0 cm y el punto cercano en su ojo derecho es 100 cm. a) ¿Cuál es la máxima amplificación angular que puede producir en un telescopio? b) Si coloca las lentes separadas 10.0 cm, ¿cuál es la máxima amplificación global que puede producir en un microscopio? *Sugerencia:* Regrese a los fundamentos y use la ecuación de lente delgada para resolver el inciso b).
36. **CIC** Galileo diseñó un telescopio terrestre simple que produce una imagen derecha. Consiste en un objetivo convergente y un ocular divergente en lados opuestos del tubo del telescopio. Para objetos distantes, la longitud del tubo es la longitud focal del objetivo menos el valor absoluto de la longitud focal del ocular. a) ¿El usuario del telescopio ve una imagen real o virtual? b) ¿Dónde está la imagen final? c) Si un telescopio se debe construir con un tubo de 10.0 cm de longitud y una amplificación de 3.00, ¿cuáles son las longitudes focales del objetivo y el ocular?

25.6 Resolución de aperturas de una sola rendija y circulares

37. Una lente convergente con un diámetro de 30.0 cm forma una imagen de un satélite que pasa justo por encima de ella. El satélite tiene dos luces verdes (longitud de onda de 500 nm) separadas 1.00 m. Si las luces apenas se pueden resolver de acuerdo con el criterio de Rayleigh, ¿cuál es la altitud del satélite?
38. Mientras vuela a una altura de 9.50 km, observa por la ventana varios objetos en el suelo. Si su capacidad de distinguir dos objetos sólo está limitada por la difracción, encuentre la menor distancia entre dos objetos en el suelo que se distinguen. Suponga que su pupila tiene un diámetro de 4.0 mm y tomar de $\lambda = 575$ nm.
39. **M** Para aumentar el poder de resolución de un microscopio, el objeto y el objetivo se sumergen en aceite ($n = 1.5$). Si el ángulo de resolución limitante sin el aceite es $0.60 \mu\text{rad}$, ¿cuál es el ángulo de resolución limitante con el aceite? *Sugerencia:* El aceite cambia la longitud de onda de la luz.
40. **BIO** a) Calcule el ángulo de resolución limitante para el ojo, suponiendo un diámetro de pupila de 2.00 mm, una longitud de onda de 500 nm *en aire* y un índice de refracción para el ojo de 1.33. b) ¿Cuál es la máxima distancia desde el ojo a la cual se pueden resolver dos puntos separados 1.00 cm?
41. Un vehículo con faros separados por 2.00 m se aproxima a un observador que sostiene un detector infrarrojo sensible a la radiación con longitud de onda de 885 nm. ¿Qué diámetro de apertura se requiere en el detector si los dos faros se deben resolver a una distancia de 10.0 km?
42. Dos estrellas situadas a 23 años luz de la Tierra apenas se resuelven utilizando un telescopio reflector con un espejo de 68 cm de diámetro. Suponiendo que $\lambda = 575$ nm y que la resolución está limitada sólo por la difracción, encuentre la distancia entre las estrellas.
43. Suponga que un telescopio de 5.00 m de diámetro se construye en la Luna, donde la ausencia de distorsión atmosférica permitiría excelente visualización. Si las observaciones se realizan usando luz de 500 nm, ¿qué separación mínima entre dos objetos apenas se podría resolver en Marte a máximo acercamiento (cuando Marte está a 8.0×10^7 km de la Luna)?

44. Un satélite espía orbita la Tierra a una altitud de 200 km y realiza topografía con una cámara telescópica especial de alta resolución que tiene un diámetro de lente de 35 cm. Si la resolución angular de esta cámara está limitada por difracción, estime la separación de dos pequeños objetos sobre la superficie de la Tierra que apenas se resuelvan en luz amarilla-verde ($\lambda = 550 \text{ nm}$).

45. Una rejilla de 15.0 cm de largo tiene 6000 rendijas por centímetro. ¿Con esta rejilla se podrían separar dos líneas con longitudes de onda de 600.000 nm y 600.003 nm? Explique.

46. La línea H_α en hidrógeno tiene una longitud de onda de 656.20 nm. Esta línea difiere en longitud de onda de la correspondiente línea espectral en deuterio (el pesado isótopo estable del hidrógeno) por 0.18 nm. a) Determine el número mínimo de líneas que debe tener una rejilla para resolver estas dos longitudes de onda en el primer orden. b) Repita el inciso a) para el segundo orden.

25.7 El interferómetro Michelson

47. Luz con longitud de onda de 550 nm se usa para calibrar un interferómetro Michelson. Con el uso de un tornillo micrométrico, la plataforma sobre la cual se monta un espejo se mueve 0.180 mm. ¿Cuántos corrimientos de franja se cuentan?

48. **CIC** Luz monocromática se envía a un interferómetro Michelson. El espejo móvil se desplaza 0.382 mm, lo que hace que la mancha central en el patrón del interferómetro cambie de brillante a oscuro y de vuelta a brillante $N = 1\,700$ veces. a) Determine la longitud de onda de la luz. ¿De qué color es? b) Si se usa luz roja monocromática y el espejo se mueve la misma distancia, ¿ N debe ser más grande o más pequeño? Explique.

49. **BIO** Un interferómetro se usa para medir la longitud de una bacteria. La longitud de onda de la luz utilizada es 650 nm. Conforme un brazo del interferómetro se mueve de un extremo de la célula al otro, se cuentan 310 corrimientos de franja. ¿Cuán larga es la bacteria?

50. El espejo M_1 en la figura activa 25.15 se desplaza una distancia ΔL . Durante este desplazamiento, se cuentan 250 corrimientos de franja. La luz que se usa tiene una longitud de onda de 632.8 nm. Calcule el desplazamiento ΔL .

51. Una delgada hoja de material transparente tiene un índice de refracción de 1.40 y 15.0 μm de grueso. Cuando se inserta en la trayectoria de luz a lo largo del brazo de un interferómetro, ¿cuántos corrimientos de franja ocurren en el patrón? Suponga que la longitud de onda (en el vacío) de la luz utilizada es 600 nm. *Sugerencia:* La longitud de onda cambiará dentro del material.

52. **M** El interferómetro Michelson se puede usar para medir el índice de refracción de un gas al sustituir un tubo transparente evacuado en la trayectoria de luz a lo largo de un brazo del dispositivo. Corrimientos de franja ocurren conforme el gas se agrega lentamente al tubo. Suponga que se usa luz de 600 nm, que el tubo tiene 5.00 cm de largo y que ocurren 160 corrimientos de franja conforme la

presión del gas en el tubo aumenta a presión atmosférica. ¿Cuál es el índice de refracción del gas? *Sugerencia:* Los corrimientos de franja ocurren porque la longitud de onda de la luz cambia dentro del tubo lleno con gas.

Problemas adicionales

53. El telescopio refractor Yerkes tiene un objetivo de 1.00 m de diámetro, con longitud focal de 20.0 m. Suponga que se usa con un ocular de 2.50 cm de longitud focal. a) Determine la amplificación del planeta Marte como se ve a través del telescopio. b) Los casquetes polares marcianos que se observan, ¿están derechos o de cabeza?

54. Estime el ángulo mínimo subtendido en el ojo de un halcón que vuela a una altura de 50 m necesario para reconocer un ratón en el suelo.

55. La norma estadounidense de imagen de la televisión analógica (no HDTV), también conocida como NTSC, se compone de aproximadamente 485 líneas horizontales visibles de intensidad variable de luz. Suponga que su capacidad para resolver las líneas está limitada sólo por el criterio de Rayleigh, las pupilas de sus ojos tienen 5.00 mm de diámetro y la longitud de onda media de la luz procedente de la pantalla es de 550 nm. Calcule la razón de la distancia mínima de la visión de la dimensión vertical de la imagen de tal manera que usted no sea capaz de resolver las líneas.

56. **BIO** Una persona con un ojo miope tiene puntos cercano y lejano de 16 cm y 25 cm, respectivamente. a) Suponiendo que una lente se coloca a 2.0 cm del ojo, ¿qué poder debe tener la lente para corregir esta condición? b) Suponga que lentes de contacto colocados sobre la córnea se usan para corregir la visión de la persona. ¿Cuál es el poder requerido de la lente en este caso y cuál es el nuevo punto cercano? *Sugerencia:* La lente de contacto y la lente de gafas requieren poderes ligeramente distintos porque están a diferentes distancias del ojo.

57. **BIO** El punto cercano de un ojo es 75.0 cm. a) ¿Cuál debe ser la potencia de una lente correctiva que se prescribe para permitir al ojo ver un objeto muy bien a 25.0 cm? b) Si, al usar la lente correctiva, la persona puede ver un objeto claramente a 26.0 cm pero no a 25.0 cm, ¿en cuántas dioptrías el pulido de la lente pierde la prescripción?

58. **BIO** Si un globo ocular típico mide 2.00 cm de largo y tiene una abertura de pupila que puede abarcar desde aproximadamente 2.00 hasta 6.00 mm, ¿cuáles son a) la longitud focal del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia, b) el menor número f del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia, y c) el mayor número f del ojo cuando se enfoca sobre objetos a 1.00 m de distancia?

59. **BIO M** Un cristalino deteriorado por cataratas en un ojo se puede remover quirúrgicamente y sustituir con un cristalino artificial. La longitud focal requerida por el nuevo cristalino se determina mediante la distancia cristalino-retina, que se mide con un dispositivo parecido a un sonar y por el requisito de que el implante proporcione distancia de visión correcta. a) Si la distancia desde el

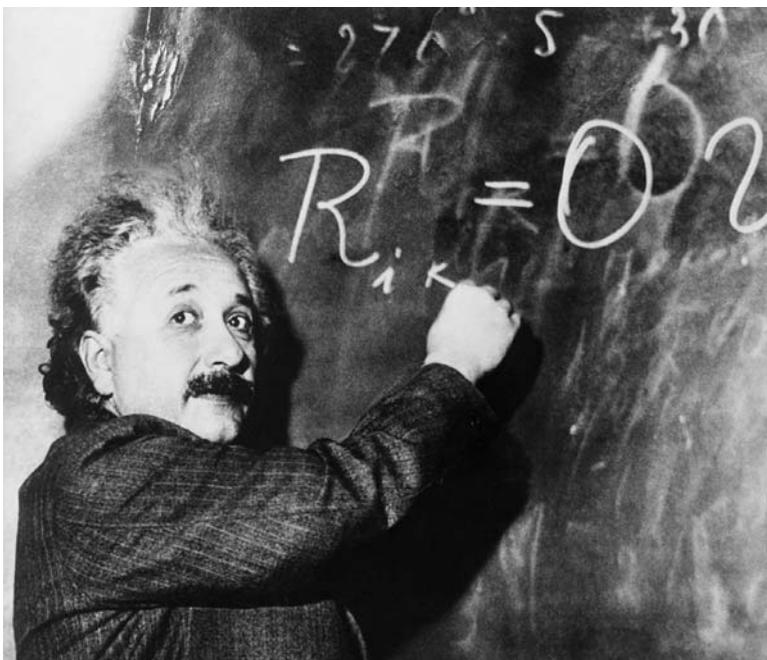
cristalino hasta la retina es 22.4 mm, calcule la potencia del cristalino implantado en dioptrías. b) Dado que no hay acomodación y que el implante permite distancia de visión correcta, se debe usar una lente correctiva para trabajo cercano o lectura. Suponga una distancia de lectura de 33.0 cm y calcule la potencia de la lente en las gafas de lectura.

60. BIO Si el humor acuoso del ojo tiene un índice de refracción de 1.34 y la distancia desde el vértice de la córnea a la retina es 2.00 cm, ¿cuál es el radio de curvatura de la córnea para el cual los objetos distantes se enfocarán sobre la retina? (Por simplicidad, suponga que toda la refracción ocurre en el humor acuoso.)

61. Un boy scout enciende una fogata al usar una lente de sus gafas para enfocar luz solar sobre hojarasca a 5.0 cm

de la lente. El boy scout tiene un punto cercano de 15 cm. Cuando la lente se usa como amplificador simple, a) ¿cuál es la máxima amplificación que se puede lograr y b) cuál es la amplificación cuando el ojo está relajado? *Precaución:* Las ecuaciones deducidas en el texto para un amplificador simple suponen un ojo “normal”.

62. Un telescopio de laboratorio (astronómico) se usa para ver una regla que está a 300 cm del objetivo, que tiene una longitud focal de 20.0 cm; el ocular tiene una longitud focal de 2.00 cm. Calcule la amplificación angular cuando el telescopio se ajusta para mínima fatiga visual. *Nota:* El objeto no está en el infinito, así que la expresión simple $m = f_o/f_e$ no es suficientemente precisa para este problema. Además, suponga ángulos pequeños, de modo que $\tan \theta \approx \theta$.



Albert Einstein revolucionó la física moderna. Explicó el movimiento aleatorio de los granos de polen, lo que probó la existencia de los átomos y el efecto fotoeléctrico, que demostró que la luz era tanto una partícula como una onda. Con Satyendra Nath Bose predijo una nueva forma de materia, el condensado Bose-Einstein, que sólo recientemente se descubrió en el laboratorio. Su teoría de la relatividad especial aclaró los fundamentos de espacio y tiempo, y estableció una relación clave entre masa y energía. Su teoría de gravitación, la relatividad general, condujo a una comprensión más profunda del movimiento planetario, la estructura y evolución de las estrellas, y la expansión del Universo. La ecuación en esta fotografía, traducida libremente, señala que la curvatura promedio del espacio-tiempo es cero en el espacio vacío.

Relatividad

26

La mayor parte de sus experiencias y observaciones cotidianas tienen que ver con objetos que se mueven con velocidades mucho menores que la velocidad de la luz. La mecánica newtoniana se formuló para describir el movimiento de tales objetos y su formalismo es bastante exitoso para describir un amplio rango de fenómenos que ocurren a bajas velocidades. Sin embargo, fracasa cuando se aplica a partículas que tienen velocidades que se aproximan a la de la luz.

Experimentalmente, por ejemplo, es posible acelerar un electrón a una velocidad de $0.99c$ (donde c es la velocidad de la luz) con el uso de una diferencia de potencial de muchos millones de volts. De acuerdo con la mecánica newtoniana, si la diferencia de potencial aumenta por un factor de 4, la energía cinética del electrón es cuatro veces mayor y su velocidad debe duplicarse a $1.98c$. Sin embargo, los experimentos demuestran que la velocidad del electrón, así como la velocidad de cualquiera otra partícula que tenga masa, siempre permanece *menor* que la velocidad de la luz, sin importar el tamaño del voltaje acelerador.

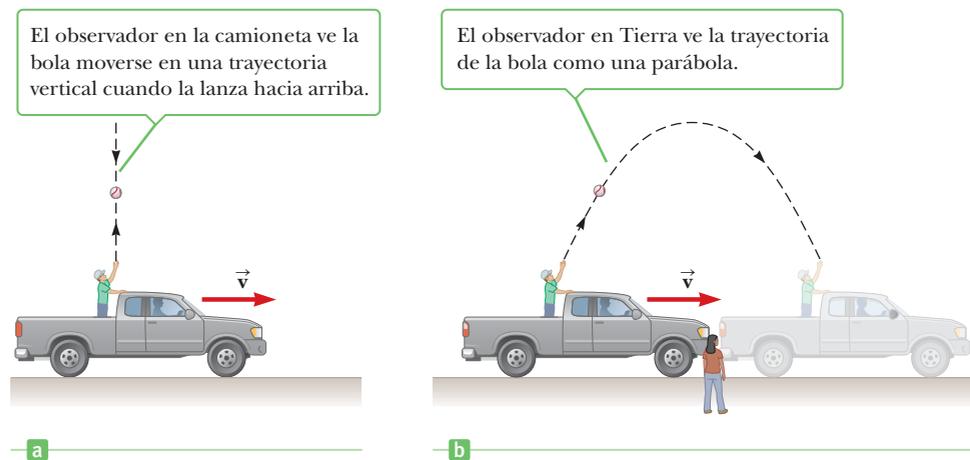
La existencia de un límite de velocidad universal tiene consecuencias de largo alcance. Significa que los conceptos usuales de fuerza, cantidad de movimiento y energía ya no se aplican para objetos que se mueven rápidamente. Una consecuencia menos obvia es que los observadores que se mueven con diferentes velocidades medirán diferentes tiempos y desplazamientos entre los mismos dos eventos. Relacionar las mediciones realizadas por diferentes observadores es el tema de la relatividad.

- 26.1** Relatividad galileana
- 26.2** La velocidad de la luz
- 26.3** Principio de relatividad de Einstein
- 26.4** Consecuencias de la relatividad especial
- 26.5** Cantidad de movimiento relativista
- 26.6** Velocidad relativa en la relatividad especial
- 26.7** Energía relativista y equivalencia de masa y energía
- 26.8** Relatividad general

26.1 Relatividad galileana

Para describir un evento físico, es necesario elegir un *marco de referencia*. Por ejemplo, cuando usted realiza un experimento en un laboratorio, selecciona un sistema de coordenadas o marco de referencia, que está en reposo con respecto al laboratorio. Suponga que, por ejemplo, elige realizar un experimento en la parte de atrás o batea de una camioneta que

Figura 26.1 Dos observadores miran la trayectoria de una bola lanzada y obtienen resultados diferentes.



se mueve con velocidad constante \vec{v} . A continuación, puede seleccionar un marco de referencia en movimiento que está en reposo con respecto a la camioneta. Si descubre que la primera ley de Newton es válida en su marco de referencia, ¿el observador en reposo con respecto a la Tierra estará de acuerdo con usted?

De acuerdo con el principio de relatividad galileana, **las leyes de la mecánica deben ser las mismas en todos los marcos de referencia inerciales**. Los marcos de referencia inerciales son aquellos marcos de referencia en los cuales las leyes de Newton son válidas. En estos marcos, los objetos se mueven en líneas rectas con velocidad constante, a menos que sobre ellos actúe una fuerza neta distinta de cero, de ahí el nombre “marco inercial”, porque los objetos que se observan en estos marcos obedecen a la primera ley de Newton: la ley de la inercia. Para la situación descrita en el párrafo anterior, el sistema coordenado del laboratorio y el sistema coordenado del auto en movimiento son ambos marcos de referencia inerciales. En consecuencia, si se descubre que las leyes de la mecánica son ciertas en el laboratorio, entonces la persona en el auto también debe observar las mismas leyes.

Considere una camioneta en movimiento, que se mueve con una velocidad constante, como en la figura 26.1a. Si un pasajero en la camioneta lanza una bola con trayectoria recta ascendente en el aire, el pasajero observa que la bola se mueve en una trayectoria vertical. El movimiento de la bola es precisamente el mismo que si la bola se lanzara mientras está en reposo sobre la Tierra. La ley de gravedad y las ecuaciones de movimiento bajo aceleración constante se obedecen ya sea que la camioneta esté en reposo o en movimiento uniforme.

Ahora considere el mismo experimento cuando lo ve otro observador en reposo sobre la Tierra. Este observador estacionario ve la trayectoria de la bola en el avión como una parábola, como en la figura 26.1b. Más aún, de acuerdo con este observador, la bola tiene una velocidad hacia la derecha igual a la velocidad del avión. Aunque los dos observadores no están de acuerdo en la forma de la trayectoria de la bola, ambos concuerdan en que el movimiento de la bola obedece a la ley de gravedad y a las leyes de movimiento de Newton, e incluso concuerdan en cuánto tiempo la bola está en el aire. Establecemos la siguiente conclusión importante: **no existe un marco de referencia privilegiado para describir las leyes de la mecánica**.

26.2 La velocidad de la luz

Es natural preguntar si el concepto de relatividad galileana en mecánica también se aplica a experimentos en electricidad, magnetismo, óptica y otras áreas. Los experimentos indican que la respuesta es no. Más aún, suponiendo que las leyes de electricidad y magnetismo son las mismas en todos los marcos inerciales, inmediatamente surge una paradoja en cuanto a la velocidad de la luz. De acuerdo con la teoría electromagnética, la velocidad de la luz siempre tiene el valor fijo de 2.99792458×10^8 m/s en vacío. Sin embargo, de acuerdo con la relatividad galileana, la velocidad del pulso relativo al observador estacionario S afuera del vagón en la figura 26.2 debe ser $c + v$. Por lo tanto, la relatividad galileana es inconsistente con la bien probada teoría de electromagnetismo de Maxwell.

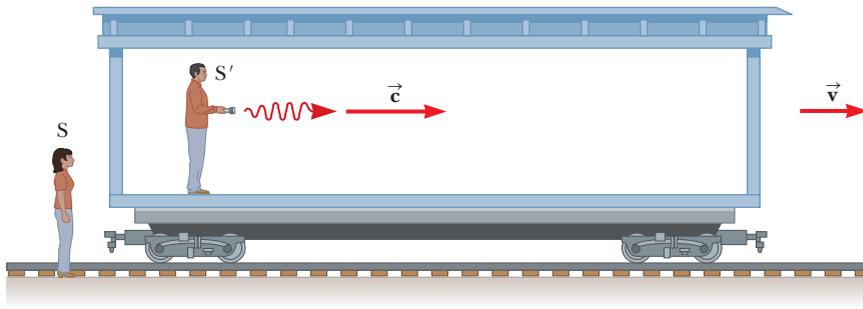


Figura 26.2 Una persona envía un pulso de luz en un vagón en movimiento. De acuerdo con la relatividad galileana, la velocidad del pulso debe ser $\vec{c} + \vec{v}$ en relación con un observador estacionario.

La teoría electromagnética predice que las ondas de luz deben propagarse a través del vacío con una velocidad igual a la velocidad de la luz. No obstante, la teoría no requiere la presencia de un medio para la propagación de la onda. Esto contrasta con otros tipos de ondas, como las olas y las ondas sonoras, que sí requieren un medio para sostener las perturbaciones. En el siglo XIX, los físicos creían que las ondas electromagnéticas también requerían un medio para propagarse. Propusieron que tal medio existía y le dieron el nombre de **éter luminífero**. Se supuso que el éter estaba presente en todas partes, incluso en el espacio vacío y que las ondas de luz se veían como oscilaciones del éter. Más aún, el éter no debería tener masa, por ser un medio rígido sin efecto sobre el movimiento de planetas u otros objetos. Estos conceptos de hecho son extraños. Además, se descubrió que las problemáticas leyes de la electricidad y el magnetismo deberían tomar sus formas más simples en un marco de referencia especial en *reposo* con respecto al éter. Este marco se llamó *marco absoluto*. Las leyes de la electricidad y el magnetismo serían válidas en este marco absoluto, pero tendrían que modificarse en cualquier marco de referencia que se moviera con respecto al marco absoluto.

Como resultado de la importancia dada al éter y al marco absoluto, se volvió de considerable interés para la física probar mediante experimentos que existían. Puesto que se consideraba probable que la Tierra estuviera en movimiento a través del éter, desde la visión de un experimentador en la Tierra, habría un “viento de éter” que soplara a través del laboratorio. Un método directo para detectar el viento de éter usaría un aparato fijo en la Tierra para medir la influencia del viento sobre la velocidad de la luz. Si v es la velocidad del éter en relación con la Tierra, entonces la velocidad de la luz debería tener su valor máximo, $c + v$, cuando se propaga a favor del viento, como se muestra en la figura 26.3a. Del mismo modo, la velocidad de la luz debe tener su valor mínimo, $c - v$, cuando se propaga contra el viento, como en la figura 26.3b y un valor intermedio, $(c^2 - v^2)^{1/2}$, en la dirección perpendicular al viento de éter, como en la figura 26.3c. Si el Sol se supone en reposo en el éter, entonces la velocidad del viento de éter sería igual a la velocidad orbital de la Tierra alrededor del Sol, que tiene una magnitud de aproximadamente 3×10^4 m/s. Puesto que $c = 3 \times 10^8$ m/s, debe ser posible detectar un cambio en la velocidad de alrededor de una parte en 10^4 para mediciones en la dirección en contra o a favor del viento.

El experimento Michelson-Morley

El más famoso experimento diseñado para detectar estos pequeños cambios en la velocidad de la luz lo realizó por primera vez, en 1881, Albert A. Michelson (1852-1931) y más tarde fue repetido bajo varias condiciones por parte de Michelson y Edward W. Morley (1838-1923). El experimento se diseñó para determinar la velocidad de la Tierra en relación con el éter hipotético. La herramienta experimental utilizada fue el interferómetro Michelson, que se muestra en la figura 26.4 (página 888). El brazo 2 está alineado a lo largo de la dirección de movimiento de la Tierra a través del espacio. El movimiento de la Tierra a través del éter con velocidad v es equivalente al éter que fluye por la Tierra en la dirección opuesta con velocidad v . Este viento de éter que sopla en la dirección opuesta a la dirección de movimiento de la Tierra debe hacer que la velocidad de la luz medida en el marco de la Tierra sea $c - v$ conforme la luz se aproxima al espejo M_2 y $c + v$ después de reflejarse, donde c es la velocidad de la luz en el marco del éter.

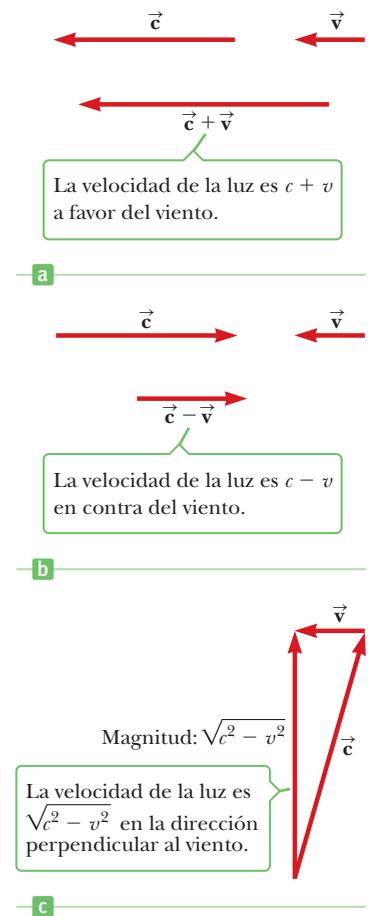
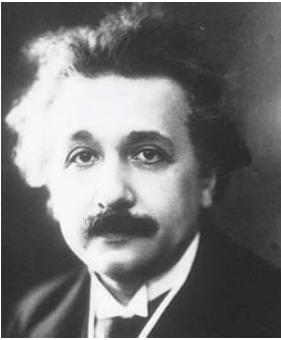


Figura 26.3 Si la velocidad del viento de éter en relación con la Tierra es v y c es la velocidad de la luz en relación con el éter, la velocidad de la luz en relación con la Tierra es a) $c + v$ en la dirección a favor del viento, b) $c - v$ en la dirección contra el viento y c) $\sqrt{c^2 - v^2}$ en la dirección perpendicular al viento. El experimento de Michelson-Morley, sin embargo, refutó la hipótesis del viento de éter, que lleva al postulado de Einstein de que la velocidad de la luz en el vacío tiene el mismo valor independientemente del movimiento del observador inercial.



Albert Einstein
Físico germano-estadounidense
(1879-1955)

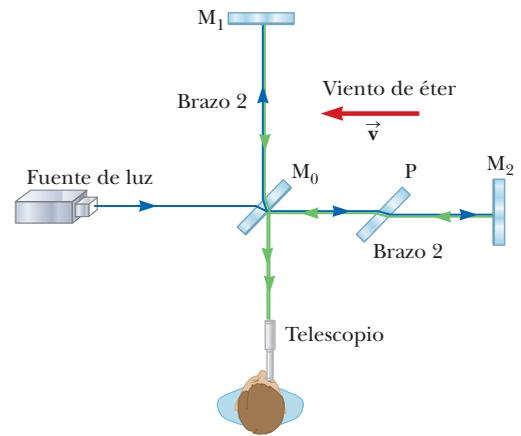
Uno de los más grandes físicos de todos los tiempos, Einstein nació en Ulm, Alemania. En 1905, a la edad de 26 años, publicó cuatro ensayos científicos que revolucionaron la física. Dos de estos ensayos introdujeron la teoría de la relatividad especial, considerada por muchos como su obra más importante. En 1916, en una excitante carrera con el matemático David Hilbert, Einstein publicó su teoría de la gravedad, llamada teoría de la relatividad general. La predicción más espectacular de esta teoría es el grado al cual la luz se desvía mediante un campo gravitacional. Las mediciones realizadas por astrónomos en estrellas brillantes en la vecindad del Sol eclipsado en 1919 confirmaron la predicción de Einstein y como resultado se convirtió en una celebridad mundial. Einstein estuvo profundamente conternado por el desarrollo de la mecánica cuántica en los años 1920, a pesar de su propio papel como revolucionario científico. En particular, nunca pudo aceptar la visión probabilística de los eventos en la naturaleza, que es una característica central de la teoría cuántica. Las últimas décadas de su vida las dedicó sin éxito a la búsqueda de una teoría unificada que combinaría gravitación y electromagnetismo.

Postulados de la relatividad ▶

- 1. El principio de relatividad:** todas las leyes de la física son las mismas en todos los marcos inerciales.
- 2. La constante de la velocidad de la luz:** la velocidad de la luz en un vacío tiene el mismo valor, $c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s, en todos los marcos de referencia inerciales, sin importar la velocidad del observador o la velocidad de la fuente que emite la luz.

Figura activa 26.4

De acuerdo con la teoría del viento de éter, la velocidad de la luz debe ser $c - v$ conforme el haz se aproxima al espejo M_2 y $c + v$ después de la reflexión.



Los dos haces reflejados de M_1 y M_2 se recombinan y se forma un patrón de interferencia que consiste en franjas oscuras y brillantes alternadas. El patrón de interferencia se observó mientras el interferómetro giraba a través de un ángulo de 90° . Esta rotación supuestamente cambiaría la velocidad del viento de éter a lo largo de la dirección del brazo 1. El efecto de tal rotación haría que el patrón de franjas se corriera ligera, pero mensurablemente, ¡mas las mediciones fallaron para demostrar cualquier cambio en el patrón de interferencia! Aun cuando el experimento Michelson-Morley se repitió en diferentes épocas del año cuando el viento de éter se espera que cambie de dirección, los resultados siempre fueron los mismos: **jamás se observó un corrimiento de franjas de la magnitud requerida.**

Los resultados negativos del experimento Michelson-Morley no sólo contradicen la hipótesis del éter, sino también demostraron que era imposible medir la velocidad absoluta de la Tierra con respecto al marco del éter. Sin embargo, como veremos en la siguiente sección, Einstein sugirió un postulado en la teoría de la relatividad especial que otorga una interpretación muy diferente a estos resultados negativos. En años posteriores, cuando se sabía más acerca de la naturaleza de la luz, se descartó la idea de un éter que permea todo el espacio. **Ahora la luz se entiende como una onda electromagnética que no requiere medio para su propagación.**

26.3 Principio de relatividad de Einstein

En 1905 Albert Einstein propuso una teoría que explicaba el resultado del experimento Michelson-Morley y alteraba por completo las nociones de espacio y tiempo. Basó su teoría de la relatividad especial en dos postulados:

El primer postulado afirma que *todas* las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia que se mueven con velocidad constante uno en relación con otro. Este postulado es una generalización radical del principio de relatividad galileano, que sólo se refiere a las leyes de la mecánica. Desde un punto de vista experimental, el principio de relatividad de Einstein significa que *cualquier* tipo de experimento (mecánico, térmico, óptico o eléctrico) realizado en un laboratorio en reposo, debe dar el mismo resultado cuando se realiza en un laboratorio que se mueve con velocidad constante y rebasa al primero. Por lo tanto, no existe marco de referencia inercial privilegiado y es imposible detectar movimiento absoluto.

Aunque el postulado 2 fue una brillante comprensión teórica por parte de Einstein en 1905, desde entonces ha sido confirmado experimentalmente en muchas formas. Acaso la demostración más directa involucra medir la velocidad de los fotones emitidos por partículas que viajan a 99.99% de la velocidad de la luz. La velocidad medida del fotón en este caso concuerda a cinco cifras significativas con la velocidad de la luz en el vacío.

El resultado nulo del experimento Michelson-Morley se puede comprender fácilmente dentro del marco conceptual de la teoría de Einstein. De acuerdo con su principio de relatividad, las premisas del experimento Michelson-Morley fueron incorrectas. En el proceso de intentar explicar los resultados esperados, se afirmó que, cuando la luz viajaba contra el viento de éter, su velocidad era $c - v$. Sin embargo, si el estado de movimiento del observador o la fuente no influye sobre el valor que se encuentra para la velocidad de la luz, el valor medido siempre debe ser c . Del mismo modo, la luz hace el viaje de regreso después de la reflexión en el espejo, con una velocidad de c , no una velocidad de $c + v$. Por ende, el movimiento de la Tierra no influye en el patrón de franjas observado en el experimento Michelson-Morley, y se debe esperar un resultado nulo.

Si se acepta la teoría de la relatividad de Einstein, se debe concluir que el movimiento relativo uniforme no es importante cuando se mide la velocidad de la luz. Al mismo tiempo, se tienen que ajustar las nociones de sentido común del espacio y el tiempo y estar preparado para algunas consecuencias más bien extrañas.

■ Examen rápido

26.1 Verdadero o Falso: Si usted viajara en una nave espacial con una velocidad de $c/2$ relativa a la Tierra y dispara un haz de luz en la dirección del movimiento de la nave espacial, la luz del láser viajaría a una velocidad de $3c/2$ relativa a la Tierra.

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

Casi todos quienes se han instruido con ciencia incluso superficialmente están conscientes de algunas de las sorprendentes predicciones que surgen debido al enfoque de Einstein del movimiento relativo. Conforme usted examine algunas de las consecuencias de la relatividad en esta sección, encontrará que están en conflicto con algunas de las nociones básicas de espacio y tiempo. La discusión se restringe a los conceptos de longitud, tiempo y simultaneidad, que son muy diferentes en mecánica relativista de lo que lo son en la mecánica newtoniana. Por ejemplo, en la mecánica relativista la distancia entre dos puntos y el tiempo entre dos eventos depende del marco de referencia donde se midan. **En la mecánica relativista no hay una cosa tal como longitud o tiempo absolutos. Más aún, los eventos en diferentes ubicaciones, que se observan ocurren simultáneamente en un marco, no se observan como simultáneos en otro marco que se mueve de manera uniforme y pasa al primero.**

◀ Las mediciones de longitud y tiempo dependen del marco de referencia

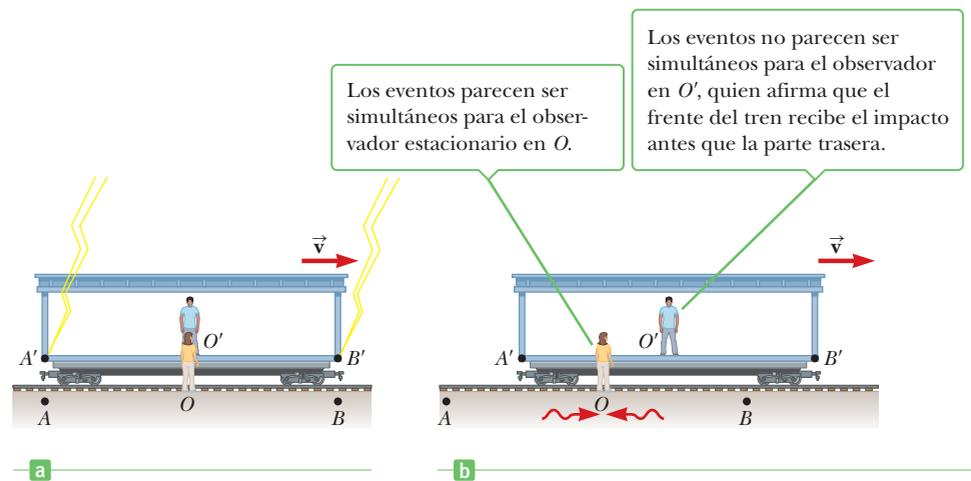
Simultaneidad y la relatividad del tiempo

Una premisa básica de la mecánica newtoniana es que existe una escala de tiempo universal que es la misma para todos los observadores. Newton y sus seguidores simplemente toman la simultaneidad como un hecho. En su teoría de la relatividad especial, Einstein abandonó dicho supuesto.

Einstein diseñó el siguiente experimento mental para ilustrar este punto. Un vagón se mueve con velocidad uniforme y dos relámpagos impactan sus extremos, como en la figura 26.5a (página 890) y dejan marcas en el vagón y el suelo. Las marcas en el vagón se etiquetan A' y B' , y las del suelo se etiquetan A y B . Un observador en O' que se mueve con el vagón está a la mitad entre A' y B' , y un observador en el suelo en O está a la mitad entre A y B . Los eventos registrados por los observadores son el golpe al vagón por los dos relámpagos.

Las señales de luz que registran el instante cuando ocurre el impacto de los dos rayos llegan al observador O al mismo tiempo, como se indica en la figura 26.5b. Este observador se da cuenta de que las señales viajaron con la misma velocidad sobre iguales distancias y, por lo tanto, concluye correctamente que los eventos en A y B ocurrieron simultáneamente.

Figura 26.5 a) Dos relámpagos impactan los extremos de un vagón en movimiento. b) La señal luminosa que viaja hacia la izquierda ya ha pasado O' , pero la señal viajando hacia la derecha todavía no ha alcanzado O' .



Ahora considere los mismos eventos vistos por el observador O' . Para cuando las señales llegan al observador O , el observador O' se movió como se indica en la figura 26.5b. Por ende, la señal de B' ya pasó a O' , pero la señal de A' todavía no llega a O' . En otras palabras, O' ve la señal de B' antes de ver la señal de A' . De acuerdo con Einstein, *los dos observadores deben encontrar que la luz viaja con la misma velocidad*. Por lo tanto, el observador O' concluye que el relámpago golpea el frente del vagón antes de golpear la parte trasera.

Este experimento mental demuestra claramente que los dos eventos que parecen ser simultáneos al observador O no parecen ser simultáneos al observador O' . En otras palabras,

Tip 26.1 ¿Quién tiene razón?

¿Cuál persona tiene la razón en cuanto a la simultaneidad de los dos eventos? Ambas están en lo correcto porque el principio de relatividad afirma que no existe un marco de referencia privilegiado. Aunque los dos observadores pueden llegar a diferentes conclusiones, ambas están en lo correcto en su marco de referencia propio. Cualquier marco de referencia que se mueva de manera uniforme se puede usar para describir eventos y hacer física.

Dos eventos que son simultáneos en un marco de referencia en general no son simultáneos en un segundo marco que se mueve en relación con el primero. La simultaneidad depende del estado de movimiento del observador y, por ende, no es un concepto absoluto.

En este punto, usted debe preguntarse cuál observador está en lo correcto en cuanto a los dos eventos. La respuesta es que *ambos* están en lo correcto porque el principio de relatividad afirma que **no hay un marco de referencia inercial privilegiado**. Aunque los dos observadores llegan a diferentes conclusiones, ambos están en lo correcto en sus propios marcos de referencia porque el concepto de simultaneidad no es absoluto. De hecho, éste es el punto central de la relatividad: cualquier marco de referencia inercial se puede usar para describir eventos y hacer física.

Dilatación del tiempo

Es posible ilustrar que observadores en diferentes marcos inerciales pueden medir diferentes intervalos entre un par de eventos al considerar un vehículo que se mueve hacia la derecha con una velocidad v , como en la figura activa 26.6a. Un espejo se fija al techo del vehículo y un observador O' en reposo en este sistema sostiene un láser a una distancia d abajo del espejo. En algún instante, el láser emite una luz dirigida hacia el espejo (evento 1) y cierto tiempo después, luego de reflejarse en el espejo, el pulso llega de vuelta al láser (evento 2). El observador O' porta un reloj y lo usa para medir el tiempo Δt_p entre esos dos eventos, que él ve que ocurren en el mismo lugar. (El subíndice p significa *propio*, como verá dentro de un momento.) Puesto que el pulso de luz tiene una velocidad c , el tiempo que tarda en viajar del punto A al espejo y de vuelta al punto A es

$$\Delta t_p = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{velocidad}} = \frac{2d}{c} \quad [26.1]$$

El tiempo Δt_p medido por O' requiere un solo reloj ubicado en el mismo lugar que el láser en este marco.

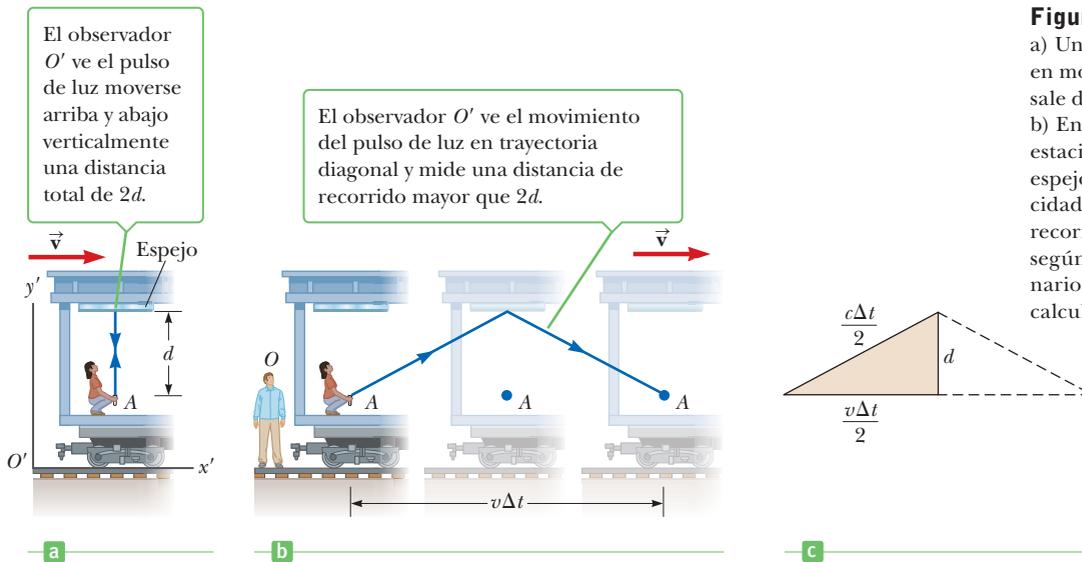


Figura activa 26.6

a) Un espejo se fija a un vehículo en movimiento y un pulso de luz sale de O' en reposo en el vehículo. b) En relación con un observador estacionario sobre la Tierra, el espejo y O' se mueven con una velocidad v . Observe que la distancia que recorre el pulso es mayor que $2d$, según mide el observador estacionario. c) Triángulo rectángulo para calcular la relación entre Δt y Δt_p .

Ahora considere el mismo conjunto de eventos como los ve O en un segundo marco, como se muestra en la figura activa 26.6b. De acuerdo con este observador, el espejo y el láser se mueven hacia la derecha con una velocidad v y, como resultado, la secuencia de eventos parece diferente. Para cuando la luz del láser llega al espejo, el espejo se movió hacia la derecha una distancia $v\Delta t/2$, donde Δt es el tiempo que tarda el pulso de luz en viajar desde el punto A hasta el espejo y de vuelta al punto A , según mide O . En otras palabras, O concluye que, debido al movimiento del vehículo, si la luz golpea el espejo, debe salir del láser a un ángulo con respecto a la dirección vertical. Al comparar las figuras activas 26.6a y 26.6b, se ve que la luz debe recorrer más en b) que en a). (Observe que ningún observador “sabe” que se mueve. Cada uno está en reposo en su propio marco inercial.)

De acuerdo con el segundo postulado de la teoría de la relatividad especial, ambos observadores deben medir c para la velocidad de la luz. Puesto que la luz viaja más lejos en el marco de O , tenemos que el tiempo Δt medido por O es mayor que el intervalo Δt_p medido por O' . Para obtener una relación entre estos dos tiempos, es conveniente examinar el triángulo rectángulo que se muestra en la figura activa 26.6c. El teorema de Pitágoras da

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

Al resolver para Δt se obtiene

$$\Delta t = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2d}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Puesto que $\Delta t_p = 2d/c$, este resultado se puede expresar como

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t_p$$

[26.2] ◀ Dilatación del tiempo

donde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.3]$$

Puesto que γ siempre es mayor que 1, la ecuación 26.2 indica que **el intervalo Δt entre dos eventos medidos por un observador que se mueve con respecto a un reloj¹ es mayor que**

¹En realidad, la figura 26.6 muestra el reloj en movimiento, y no al observador, pero esto es equivalente al observador O en movimiento hacia la izquierda con velocidad \vec{v} con respecto al reloj.

el intervalo Δt_p entre los mismos dos eventos medidos por un observador en reposo con respecto al reloj. En consecuencia, $\Delta t > \Delta t_p$, y el tiempo propio se expande o dilata por el factor γ . Por lo tanto, este efecto se conoce como **dilatación del tiempo**.

Por ejemplo, suponga que el observador en reposo con respecto al reloj mide el tiempo requerido para que el destello de luz salga del láser y regrese. Suponga que el tiempo medido en este marco de referencia, Δt_p , es 1 s. (Esto requeriría un vehículo muy alto.) Ahora encuentre el intervalo medido por el observador O que se mueve con respecto al mismo reloj. Si el observador O viaja a la mitad de la velocidad de la luz ($v = 0.500c$), entonces $\gamma = 1.15$ y, de acuerdo con la ecuación 26.2, $\Delta t = \gamma \Delta t_p = 1.15(1.00 \text{ s}) = 1.15 \text{ s}$. Por lo tanto, cuando el observador O' afirma que ha transcurrido 1.00 s, el observador O afirma que transcurrió 1.15 s. El observador O considera que el reloj de O' lee un valor muy bajo para el tiempo transcurrido entre los dos eventos y dice que el reloj de O' “corre lento”. A partir de este fenómeno, se puede concluir lo siguiente:

Un reloj en movimiento corre más lentamente que un reloj idéntico estacionario

Un reloj que pasa junto a un observador con velocidad v funciona más lentamente que un reloj idéntico en reposo con respecto al observador por un factor de γ^{-1} .

El intervalo Δt_p en las ecuaciones 26.1 y 26.2 se llama **tiempo propio**. En general, el **tiempo propio es el intervalo entre dos eventos según mide un observador quien ve que los eventos ocurren en la misma posición**.

Aunque es posible que ya se haya dado cuenta, es importante manifestar que la relatividad es una democracia científica: la visión de O' de que O es quien en realidad se mueve con velocidad v hacia la izquierda y que el reloj de O funciona más lentamente, es tan válida como la visión de O . El principio de relatividad requiere que las visiones de los dos observadores en movimiento relativo uniforme es igualmente válido y capaz de comprobarse experimentalmente.

Se ha visto que los relojes en movimiento corren más lentamente por un factor de γ^{-1} . Esto es cierto para relojes mecánicos ordinarios así como para el reloj de luz recién descrito. De hecho, estos resultados se pueden generalizar al afirmar que todos los procesos físicos, incluidos los químicos y biológicos, disminuyen su velocidad en relación con un reloj cuando dichos procesos ocurren en un marco que se mueve con respecto al reloj. Por ejemplo, el latido cardiaco de un astronauta que se mueve a través del espacio mantendría su ritmo con un reloj dentro de la nave espacial. Tanto el reloj como el latido cardiaco del astronauta correrían más lentos en relación con un reloj asentado sobre la Tierra (aunque el astronauta no tendría sensación de vivir más lentamente en la nave espacial).

La dilatación del tiempo es un fenómeno muy real que se ha verificado mediante varios experimentos que involucran el tictac de los relojes naturales. Un ejemplo interesante de dilatación del tiempo involucra la observación de *muones*, partículas elementales inestables que son muy similares a electrones y tienen la misma carga, pero 207 veces su masa. Los muones pueden producirse mediante la colisión de radiación cósmica con átomos en la parte superior de la atmósfera. Estas partículas tienen vidas de $2.2 \mu\text{s}$ cuando se miden en un marco de referencia en reposo con respecto a ellos. Si considera $2.2 \mu\text{s}$ como la vida promedio de un muón y supone que su velocidad es cercana a la de la luz, descubre que estas partículas pueden viajar solamente alrededor de 600 m antes de decaer (figura 26.7a). En consecuencia, nunca podrían llegar a la Tierra desde la atmósfera superior donde se producen. Sin embargo, los experimentos muestran que un gran número de muones *sí* llegan a la Tierra y el fenómeno de dilatación del tiempo explica cómo. En relación con un observador en la Tierra, los muones tienen una vida igual a $\gamma\tau_p$, donde $\tau_p = 2.2 \mu\text{s}$ es la vida en un marco de referencia que viaja con los muones. Por ejemplo, para $v = 0.99c$, $\gamma \approx 7.1$ y $\gamma\tau_p \approx 16 \mu\text{s}$. Por lo tanto, la distancia promedio que recorren los muones, medida por un observador en la Tierra, es $\gamma v\tau_p \approx 4800 \text{ m}$, como se indica en la figura 26.7b. En consecuencia, los muones pueden llegar a la superficie de la Tierra.

En 1976 se realizaron experimentos con muones en el laboratorio del Consejo Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra. En un gran anillo de almacenamiento se inyectaron muones, que alcanzaron velocidades de aproximadamente $0.9994c$. Los electrones producidos por los muones en decaimiento se detectaron en contadores alrededor del anillo, lo que permitió a los científicos medir la razón de decaimiento y, por ende, la vida de los muones. La vida de los muones en movimiento se midió en aproximadamente 30 veces

Tip 26.2 Tiempo propio

Usted debe ser capaz de identificar correctamente al observador que mide el tiempo propio. El tiempo propio entre dos eventos es el tiempo medido por un observador para quien los dos eventos tienen lugar en la misma posición.

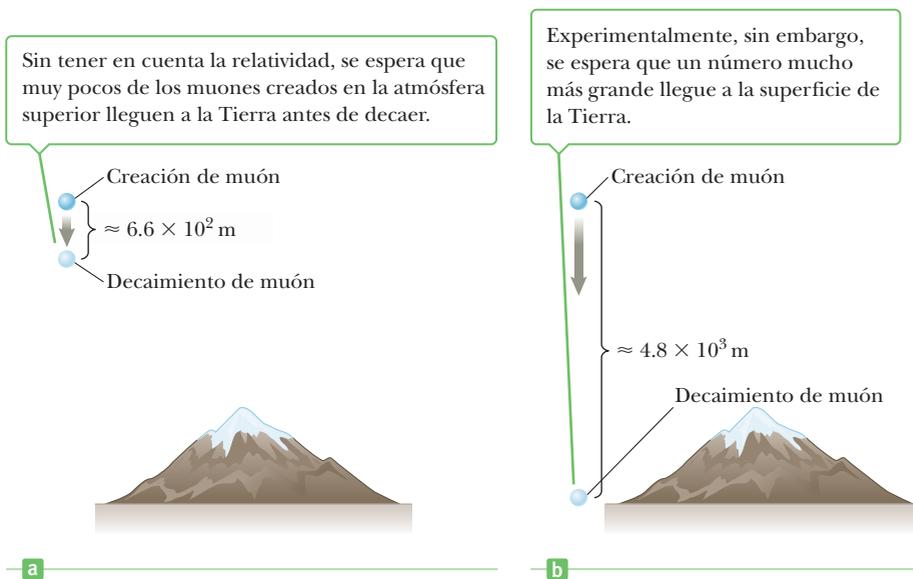


Figura 26.7 a) Un muón creado en la atmósfera superior que se mueve a $0.99c$ en relación con un observador en Tierra recorrería sólo 660 m, en promedio, antes de decaer después de 2.2×10^{-6} s. b) Debido a la dilatación del tiempo, la vida observada es mayor, de modo que tal muón recorre una distancia de aproximadamente 4.80×10^3 m, en promedio, antes de decaer. En consecuencia, se observa que muchos más muones de lo esperado alcanzan la superficie de la Tierra. Desde el punto de vista de los muones, por el contrario, su vida es de sólo 2.2×10^{-6} s en promedio, pero la distancia entre ellos y la Tierra se contrae, haciendo posible otra vez, que más de ellos lleguen a la superficie antes de decaer.

las de los muones estacionarios hasta dentro de dos partes en mil, en concordancia con la predicción de la relatividad.

■ Examen rápido

26.2 Suponga que usted es un astronauta a quien se le paga de acuerdo con el tiempo que pasa viajando en el espacio. Realiza un largo viaje con una velocidad cercana a la de la luz. Al regresar a la Tierra, le preguntan cómo quiere que se le pague: de acuerdo con el tiempo transcurrido en un reloj en la Tierra o de acuerdo con el reloj de su nave. Para maximizar su cheque, ¿cuál elegiría? a) el reloj de la Tierra b) el reloj de la nave c) cualquier reloj porque no hay diferencia.

■ EJEMPLO 26.1 Periodos de péndulo

OBJETIVO Aplicar el concepto de dilatación del tiempo.

PROBLEMA El periodo de un péndulo se mide en 3.00 s en el marco inercial del péndulo en la superficie de la Tierra. ¿Cuál es el periodo medido por un observador que se mueve con una velocidad de $0.950c$ con respecto al péndulo?

ESTRATEGIA Aquí se proporciona el periodo del reloj medido por un observador en el marco en reposo del reloj, de modo que es un tiempo propio Δt_p . Quiere saber cuánto tiempo transcurre según mide un observador en un marco en movimiento relativo al reloj, que es Δt . Al sustituir en la ecuación 26.2 resuelva el problema.

SOLUCIÓN

Sustituya el tiempo propio y la velocidad relativa en la ecuación 26.2:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{3.00 \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0.950c)^2}{c^2}}} = 9.61 \text{ s}$$

COMENTARIOS El observador en movimiento considera al péndulo como en movimiento y los relojes en movimiento se observa que corren más lentamente: mientras el péndulo oscila una vez en 3 s para un observador en el marco en reposo del reloj, tarda casi 10 s en oscilar una vez de acuerdo con el observador en movimiento.

PREGUNTA 26.1 Suponga que un sistema masa-resorte, con el mismo periodo que el péndulo, se coloca en la nave espacial del observador. Cuando la nave viaja con una velocidad de $0.95c$ relativa a un observador en la Tierra, ¿cuál es el periodo del péndulo medido por el observador en la Tierra?

EJERCICIO 26.1 ¿Cuál es el periodo del péndulo medido por un tercer observador que se mueve a $0.900c$?

RESPUESTA 6.88 s

En problemas como el del ejemplo 26.1 surgen confusiones porque el movimiento es relativo: desde el punto de vista de alguien en el marco de referencia en reposo del péndulo, el péndulo está quieto (excepto, desde luego, por el movimiento de balanceo), mientras que para alguien en un marco que se mueve con respecto al péndulo, el péndulo es el que realiza el movimiento. Para mantenerlo directo, siempre enfóquese en el observador que realiza la medición y pregúntese si el reloj a medir se mueve con respecto a dicho observador. Si la respuesta es no, entonces el observador está en el marco en reposo del reloj y mide el tiempo propio del reloj. Si la respuesta es sí, entonces el tiempo medido por el observador estará dilatado, o será mayor que el tiempo propio del reloj. Esta confusión de perspectivas conduce a la famosa “paradoja de los gemelos”.

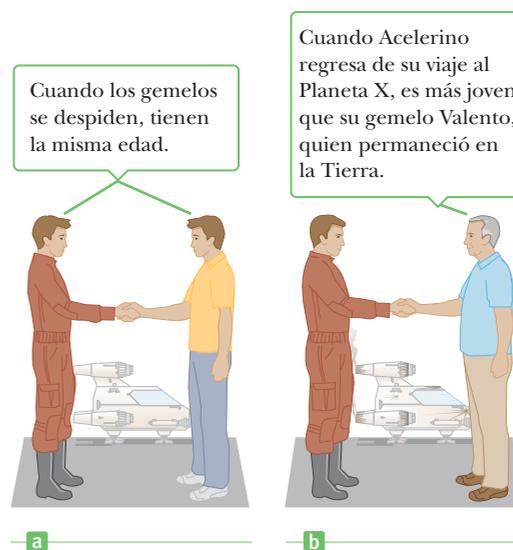
Paradoja de los gemelos

Una intrigante consecuencia de la dilatación del tiempo es la llamada paradoja de los gemelos (figura 26.8). Considere un experimento que involucra un conjunto de gemelos llamados Acelerino y Valento. Cuando tienen 20 años de edad, Acelerino, el más aventurero de los dos, se embarca en un viaje épico al Planeta X, ubicado a 20 años luz de la Tierra. Más aún, su nave espacial es capaz de llegar a una velocidad de $0.95c$ relativa al marco inercial de su hermano gemelo en casa. Después de llegar al Planeta X, Acelerino se siente nostálgico e inmediatamente regresa a la Tierra con la misma velocidad de $0.95c$. Al llegar, Acelerino está consternado al descubrir que Valento envejeció $2D/v = 2(20 \text{ a-l}) / (0.95 \text{ al/año}) = 42$ años y ahora tiene 62 años de edad. Acelerino, por otra parte, envejeció sólo 13 años.

Algunos equivocadamente consideran que *ésta* es la paradoja; que los gemelos puedan envejecer a diferentes razones y terminen después de un periodo de tiempo con edades muy diferentes. Aunque contrario al sentido común, ésta no es la paradoja en absoluto. La paradoja es que, desde el punto de vista de Acelerino, *él* estuvo en reposo mientras Valento (en la Tierra) se alejaba *de él* a $0.95c$ y regresó más tarde. De modo que el reloj de Valento se movía en relación con Acelerino y, en consecuencia, corría lento en comparación con el reloj de Acelerino. La conclusión: Acelerino, no Valento, ¡debe ser el más viejo de los gemelos!

Para resolver esta aparente paradoja, considere un tercer observador que se mueve con una velocidad constante de $0.5c$ en relación con Valento. Para el tercer observador, Valento nunca cambia de marco inercial: su velocidad relativa al tercer observador siempre es la misma. Sin embargo, el tercer observador nota que Acelerino acelera durante su viaje y *en el proceso cambia de marco de referencia*. Desde la perspectiva del tercer observador, es claro que hay algo muy diferente acerca del movimiento de Valento cuando se compara con el de Acelerino. Los roles que juegan Valento y Acelerino no son simétricos, así que no es de sorprender que el tiempo fluya de manera diferente para cada uno. Más aún, puesto que Acelerino acelera, él está en un marco de referencia no inercial y técnicamente está afuera de las fronteras de la relatividad especial (aunque en relatividad hay métodos para lidiar

Figura 26.8 La paradoja de los gemelos. Acelerino hace un viaje al Planeta X a 20 años luz de distancia y vuelve a la Tierra.



con movimiento acelerado). Sólo Valento, quien está en un solo marco inercial, puede aplicar la fórmula simple de dilatación del tiempo al viaje de Acelerino. Valento descubre que, en lugar de envejecer 42 años, Acelerino sólo envejece $(1 - v^2/c^2)^{1/2}(42 \text{ años}) = 13 \text{ años}$. De estos 13 años, Acelerino emplea 6.5 años en viajar al Planeta X y 6.5 años en regresar, para un tiempo de viaje total de 13 años, en concordancia con la afirmación anterior.

■ Examen rápido

26.3 Verdadero o Falso: Las personas que viajan cerca de la velocidad de la luz en relación con la Tierra medirían sus vidas y las encontrarían, en promedio, más largas que la vida humana promedio medida en la Tierra.

Contracción de la longitud

La distancia medida entre dos puntos depende del marco de referencia del observador. La **longitud propia** L_p de un objeto es **la longitud del objeto según mide un observador en reposo relativo con el objeto**. La longitud de un objeto medida en un marco de referencia que se mueve con respecto al objeto siempre es menor que la longitud propia. Este efecto se conoce como **contracción de la longitud**.

Para entender cuantitativamente la contracción de la longitud, considere una nave espacial que viaja con una velocidad v de una estrella a otra según la ven dos observadores, uno en la Tierra y el otro en la nave espacial. El observador en reposo en la Tierra (y también supuesto en reposo con respecto a las dos estrellas) mide la distancia entre las estrellas como L_p . De acuerdo con este observador, el tiempo que tarda la nave espacial en completar el viaje es $\Delta t = L_p/v$. Debido a la dilatación del tiempo, el viajero espacial, que usa el reloj de su nave, mide un tiempo de viaje más pequeño: $\Delta t_p = \Delta t/\gamma$. El viajero espacial afirma estar en reposo y ve la estrella de destino moverse hacia la nave espacial con velocidad v . Puesto que el viajero espacial llega a la estrella en el tiempo Δt_p , concluye que la distancia L entre las estrellas es más corta que L_p . La distancia medida por el viajero espacial es

$$L = v \Delta t_p = v \frac{\Delta t}{\gamma}$$

Dado que $L_p = v \Delta t$, se sigue que

$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} \tag{26.4}$$

De acuerdo con este resultado, que se ilustra en la figura activa 26.9, si un observador en reposo con respecto a un objeto mide su longitud en L_p , un observador que se mueve con una velocidad v relativa al objeto descubrirá que es más corta que su longitud propia por el factor $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Observe que **la contracción de la longitud tiene lugar sólo a lo largo de la dirección de movimiento**.

Los efectos de dilatación del tiempo y contracción de la longitud tienen interesantes aplicaciones para futuros viajes espaciales a estrellas distantes. Para llegar a la estrella en una fracción de una vida humana, el viaje se debe realizar a muy altas velocidades. De acuerdo con un observador en la Tierra, el tiempo para que una nave espacial llegue a la estrella de destino estará dilatado en comparación con el tiempo medido por los viajeros. Como se discutió en el tratamiento de la paradoja de los gemelos, los viajeros serán más jóvenes que sus gemelos cuando regresen a la Tierra. Por lo tanto, para cuando los viajeros lleguen a la estrella, habrán envejecido algún número de años, mientras que sus compañeros en la Tierra envejecerán un mayor número de años y la razón exacta depende de la velocidad de la nave espacial. En una nave espacial con una velocidad de $0.94c$, esta razón es aproximadamente 3:1.

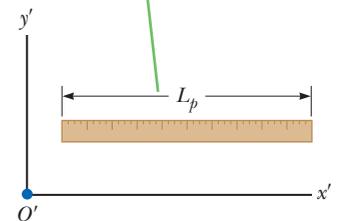
■ Examen rápido

26.4 Usted empaca para un viaje hacia otra estrella y en su recorrido viajará con una velocidad de $0.99c$. ¿Puede dormir en un gabinete más pequeño que lo usual, porque será más corto cuando se acueste? Explique su respuesta.

Tip 26.3 La longitud propia

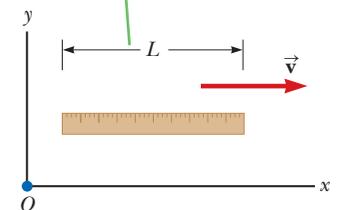
Usted debe ser capaz de identificar correctamente al observador que mide la longitud propia. La longitud propia entre dos puntos en el espacio es la longitud medida por un observador en reposo con respecto a la longitud. Con mucha frecuencia, el tiempo propio y la longitud propia no se miden por el mismo observador.

La regla según la ve un observador O' en reposo con respecto a ésta mide una longitud de un metro.



a

La regla vista por un observador O que se mueve con una velocidad v con respecto a ésta. La regla en movimiento siempre se mide más corta de lo que es en su propio marco en reposo por un factor de $\sqrt{1 - v^2/c^2}$.



b

Figura activa 26.9 La longitud de la regla es medida por dos observadores.

Examen rápido

26.5 Observe un cohete que se mueve alejándose de usted. **i)** Comparada con su longitud cuando está en reposo en el suelo, ¿su longitud la medirá como a) más corta, b) más larga o c) la misma? Comparado con el paso del tiempo medido por el reloj de su muñeca, ¿el paso del tiempo en el reloj del cohete es d) más rápido, e) más lento o f) el mismo? **ii)** Responda las preguntas si el cohete da la vuelta y regresa hacia usted.

EJEMPLO 26.2 Una rápida caída en picada

OBJETIVO Aplicar el concepto de contracción de la longitud a cierta distancia.

PROBLEMA **a)** Un observador sobre la Tierra ve una nave espacial a una altura de 4350 km que se mueve de manera descendente hacia la Tierra con una velocidad de $0.970c$. ¿Cuál es la distancia desde la nave espacial hasta la Tierra, según mide el capitán de la nave espacial? **b)** Después de disparar sus cohetes, el capitán mide la altura de su nave como 267 km, mientras que el observador sobre la Tierra la mide en 625 km. ¿Cuál es la velocidad de la nave espacial en este instante?

ESTRATEGIA Para el capitán, la Tierra se acerca rápidamente hacia su nave a $0.970c$; por lo tanto, la distancia entre su nave y la Tierra se contrae. La sustitución en la ecuación 26.9 produce la respuesta. En el inciso b) use la misma ecuación, sustituya las distancias y resuelva para la velocidad.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la distancia desde la nave hasta la Tierra, según la mide el capitán.

Sustituya en la ecuación 26.4, lo que produce la altura medida por el capitán en la nave:

$$L = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} = (4350 \text{ km}) \sqrt{1 - (0.970c)^2/c^2} \\ = 1.06 \times 10^3 \text{ km}$$

b) ¿Cuál es la velocidad posterior de la nave espacial si el observador en la Tierra mide la distancia de la nave a la Tierra como 625 km y el capitán la mide como 267 km?

Aplique la ecuación de contracción de la longitud:

$$L = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Eleve al cuadrado ambos lados de esta ecuación y resuelva para v :

$$L^2 = L_p^2(1 - v^2/c^2) \rightarrow 1 - v^2/c^2 = \left(\frac{L}{L_p}\right)^2 \\ v = c\sqrt{1 - (L/L_p)^2} = c\sqrt{1 - (267 \text{ km}/625 \text{ km})^2} \\ v = 0.904c$$

COMENTARIOS La longitud propia siempre es la longitud medida por un observador en reposo con respecto a dicha longitud.

PREGUNTA 26.2 A medida que una nave espacial se aproxima a un observador casi a la velocidad de la luz, el capitán dirige un haz de luz amarilla al observador. ¿Qué reportaría el observador al ver la luz? a) Su longitud de onda se correría hacia el infrarrojo del espectro. b) Su longitud de onda correspondería a luz amarilla. c) Su longitud de onda se correría hacia el ultravioleta del espectro.

EJERCICIO 26.2 Suponga que el observador en la nave mide la distancia desde la Tierra como 50.0 km, mientras que el observador en la Tierra mide la distancia como 125 km. ¿A qué velocidad se aproxima la nave a la Tierra?

RESPUESTA $0.917c$.

La contracción de la longitud sólo ocurre en la dirección de movimiento del observador. Ninguna contracción ocurre perpendicular a dicha dirección. Por ejemplo, una nave espacial en reposo relativo con un observador puede tener la forma de un triángulo equilátero, pero si pasa al observador a velocidad relativista en una dirección paralela a su base, la base se acortará, mientras que la altura permanece igual. Por lo tanto, el observador reportará que la nave tiene la forma de un triángulo isósceles. Un observador que viaja con la nave todavía la observará como equilátera.

26.5 Cantidad de movimiento relativista

Describir adecuadamente el movimiento de partículas dentro del marco conceptual de la relatividad especial requiere generalizar las leyes de movimiento de Newton y las definiciones de cantidad de movimiento y energía. Estas definiciones generalizadas se reducen a las definiciones clásicas (no relativistas) cuando v es mucho menor que c .

Primero, recuerde que la conservación de cantidad de movimiento afirma que, cuando dos objetos chocan, la cantidad de movimiento total del sistema permanece constante, suponiendo que los objetos están aislados y sólo reaccionan uno con el otro. Sin embargo, cuando tales colisiones se analizan desde marcos inerciales en movimiento rápido, se descubre que la cantidad de movimiento no se conserva si se usa la definición clásica de cantidad de movimiento, $p = mv$. Para tener conservación de cantidad de movimiento en todos los marcos inerciales, incluso aquellos que se muevan con una fracción considerable de c , la definición de cantidad de movimiento se debe modificar para leer

$$p \equiv \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mv \quad [26.5] \quad \leftarrow \text{Cantidad de movimiento relativista}$$

donde v es la velocidad de la partícula y m es su masa medida por un observador en reposo con respecto a la partícula. Observe que, cuando v es mucho menor que c , el denominador de la ecuación 26.5 tiende a 1, de modo que p tiende a mv . Por lo tanto, la ecuación relativista para la cantidad de movimiento se reduce a la expresión clásica cuando v es pequeña en comparación con c .

EJEMPLO 26.3 Cantidad de movimiento relativista de un electrón

OBJETIVO Contrastar las definiciones clásica y relativista de la cantidad de movimiento.

PROBLEMA Un electrón, que tiene una masa de 9.11×10^{-31} kg, se mueve con una velocidad de $0.750c$. Encuentre la cantidad de movimiento clásica (no relativista) y compárela con su contraparte relativista p_{rel} .

ESTRATEGIA Sustituya en la definición clásica para obtener la cantidad de movimiento clásica y luego multiplique por el factor gamma para obtener la versión relativista.

SOLUCIÓN

Primero, calcule la cantidad de movimiento clásica (no relativista) con $v = 0.750c$:

$$\begin{aligned} p &= mv = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.750 \times 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}) \\ &= 2.05 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Multiplique este resultado por γ para obtener la cantidad de movimiento relativista:

$$\begin{aligned} p_{\text{rel}} &= \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{2.05 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{\sqrt{1 - (0.750c/c)^2}} \\ &= 3.10 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

COMENTARIOS El resultado relativista (correcto) es 50% mayor que el resultado clásico. En cálculos posteriores no se hará distinción de notación entre la cantidad de movimiento clásica y la relativista. Para problemas que involucren velocidades relativas de $0.2c$, la respuesta que usa la expresión clásica está aproximadamente 2% abajo de la respuesta correcta.

PREGUNTA 26.3 Una partícula con cantidad de movimiento inicial p_i duplica su velocidad. ¿Cómo se compara su cantidad de movimiento final p_f con su cantidad de movimiento inicial? a) $p_f > 2p_i$ b) $p_f = 2p_i$ c) $p_f < 2p_i$

EJERCICIO 26.3 Repita el cálculo para un protón que viaja a $0.600c$.

RESPUESTAS $p = 3.01 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, $p_{\text{rel}} = 3.76 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

En la relatividad galileana, si un hombre en una nave espacial que viaja a una velocidad v ilumina hacia adelante con un rayo láser, el haz de luz se esperaría que viajara a una velocidad $c + v$ con respecto a un observador en la Tierra. El resultado nulo del experimento de Michelson-Morley, sin embargo, indica que la luz del láser seguirá viajando a la velocidad c con respecto a que un mismo observador, a pesar de los aumentos de frecuencia de la luz. (Cuando se aumenta la frecuencia de la luz, se dice que la luz “cambió a azul”. Cuando la frecuencia disminuye, se dice que la luz se “cambió a rojo”.) Evidentemente, alguna fórmula nueva debe ser deducida para permitir la comparación de las velocidades por observadores que se mueven a altas velocidades relativistas.

El procedimiento es muy similar al utilizado en el capítulo 3 para la velocidad relativa no relativista. Aquí, un observador en una nave espacial será etiquetado como B y T el observador en la Tierra, con B moviéndose en la dirección x positiva a velocidad v_{BT} con respecto al observador T en la Tierra. El objetivo es encontrar la relación entre sus mediciones independientes de un objeto A. Dada v_{AT} , la velocidad de A de acuerdo con el observador T, ¿cuál es la velocidad v_{AB} de A, con respecto al observador B? De acuerdo con la relatividad galileana, la respuesta deducida en el capítulo 3 es

Velocidad relativa en la relatividad galileana ▶

$$v_{AB} = v_{AT} - v_{BT} \quad [26.6]$$

Para velocidades aproximadas a 10% o más de la velocidad de la luz, la expresión que relaciona correctamente las velocidades relativas es²

Velocidad relativa en la relatividad especial ▶

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.7]$$

Observe que cuando v_{AT} o v_{BT} es mucho menor que c , esta expresión concuerda con la relación galileana (no relativista), como debe ser. La ecuación 26.7 es útil para determinar la velocidad medida por B, en el marco de referencia en movimiento cuando se conoce la velocidad medida por el observador T en el marco de reposo. Por otro lado, cuando la velocidad en cuestión es medida por el observador B y la tarea es encontrar la velocidad medida por el observador T, la ecuación 26.7 debe ser resuelta de forma algebraica para v_{AT} . La expresión resultante es

Suma relativista de velocidades ▶

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.8]$$

Haciendo caso omiso de la expresión en el denominador, la ecuación 26.8 tiene la forma esperada: si el observador B se está moviendo con respecto al observador T a una velocidad v_{BT} y dispara un proyectil con velocidad v_{AB} relativa a sí mismo, entonces, sumar v_{AB} y v_{BT} debe dar la velocidad v_{AT} del proyectil, como la midió el observador en la Tierra. La relatividad especial aporta el denominador de la ecuación 26.8, una ecuación que a menudo se llama suma relativista de velocidades.

Mediante la ecuación 26.8 puede calcularse la velocidad de un objeto proyectado hacia adelante desde un vehículo en movimiento, medida por un observador en la Tierra. Suponga, por ejemplo, que el observador B se mueve a v_{BT} con respecto al observador en la Tierra y dirige el haz de un láser en el frente de su nave espacial que se mueve rápidamente. Aquí v_{AB} es la velocidad de la luz relativa al observador B en la nave espacial. La velocidad de la luz v_{AT} , medida por el observador en la Tierra es, por lo tanto,

² La deducción de la ecuación 26.7 requiere el uso de las transformaciones de Lorentz y no se presentarán en este libro de texto.

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} = \frac{c + v_{BT}}{1 + \frac{cv_{BT}}{c^2}} = \frac{c \left(1 + \frac{v_{BT}}{c}\right)}{1 + \frac{v_{BT}}{c}} = c$$

Este cálculo muestra que la transformación de la velocidad es coherente con el resultado experimental demostrando que la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores.

■ EJEMPLO 26.4 | ¡Se necesita con urgencia una corrección del curso!

OBJETIVO Aplicar el concepto de velocidad relativa de la relatividad.

PROBLEMA Suponga que la nave espacial de Alicia viaja a $0.600c$ en el sentido positivo del eje x , medido por un observador en la Tierra cercano al reposo, mientras que Roberto viaja en su propio vehículo directamente hacia Alicia en la dirección x negativa a velocidad $-0.800c$ relativa al mismo observador en la Tierra. ¿Cuál es la velocidad de Alicia de acuerdo con Roberto?

ESTRATEGIA La nave espacial de Alicia es el objeto de interés que tanto el observador en la Tierra y Roberto están siguiendo. Nos dan las mediciones de la velocidad del observador en la Tierra y se desea encontrar la medición de Roberto. Utilice la ecuación de la velocidad relativa de la relatividad, la ecuación 26.7, con v_{AT} correspondiente a la medición de la velocidad de Alicia hecha por Roberto y v_{AB} la medición de la velocidad de Alicia de acuerdo con el observador en la Tierra. Tenga en cuenta que la velocidad del marco de referencia de Roberto está en la dirección x negativa, por lo que $v_{BT} < 0$.

SOLUCIÓN

Escriba la ecuación 26.7:

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}}$$

Sustituya valores:

$$v_{AB} = \frac{0.600c - (-0.800c)}{1 - \frac{(0.600c)(-0.800c)}{c^2}} = \frac{1.400c}{1 - (-0.480)} = 0.946c$$

COMENTARIOS Observe que se tuvo cuidado de utilizar los signos correctos. El sentido común nos podría llevar a creer que Roberto mediría la velocidad de Alicia como $1.40c$, pero como el cálculo muestra, Roberto mide la velocidad de Alicia como menor que la de la luz.

PREGUNTA 26.4 ¿Cuál es la velocidad de Roberto de acuerdo con Alicia?

EJERCICIO 26.4 Suponga que otro observador, Raymundo, informa que la velocidad de Alicia es sólo $0.400c$. ¿Cuál es la velocidad de Raymundo de acuerdo con el observador en la Tierra?

RESPUESTA $0.263c$

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

Ya vimos que la definición de cantidad de movimiento requiere la generalización para hacerla compatible con el principio de relatividad. Del mismo modo, la definición de energía cinética requiere una modificación en la mecánica relativista. Einstein encontró que la expresión correcta para la **energía cinética** de un objeto es

$$EC = \gamma mc^2 - mc^2 \quad [26.9] \quad \blacktriangleleft \text{Energía cinética}$$

El término constante mc^2 en la ecuación 26.9, que es independiente de la velocidad del objeto, se llama **energía en reposo** del objeto, E_R :

$$E_R = mc^2 \quad [26.10] \quad \blacktriangleleft \text{Energía en reposo}$$

El término γmc^2 en la ecuación 26.9 depende de la velocidad del objeto y es la suma de las energías cinética y en reposo. El término γmc^2 se define como la **energía total** E , de modo que

$$\text{Energía total} = \text{energía cinética} + \text{energía en reposo}$$

o, con la ecuación 26.9,

$$E = EC + mc^2 = \gamma mc^2 \quad [26.11]$$

Puesto que $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, la energía total E también se puede expresar como

Energía total ▶

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.12]$$

Ésta es la famosa ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein.³

La relación $E = \gamma mc^2 = EC + mc^2$ muestra el sorprendente resultado de que **una partícula estacionaria con energía cinética cero tiene una energía proporcional a su masa**. Más aún, una pequeña masa corresponde a una enorme cantidad de energía porque la constante de proporcionalidad entre masa y energía es grande: $c^2 = 9 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$. La ecuación $E_R = mc^2$, como primero sugirió Einstein, indirectamente implica que la masa de una partícula puede convertirse por completo en energía y que esa energía es pura, por ejemplo energía electromagnética, se puede convertir a partículas que tengan masa. De hecho éste es el caso, como se demostró en el laboratorio muchas veces en interacciones que involucran materia y antimateria.

A gran escala, las plantas de energía nuclear producen energía por la fisión de uranio, que involucra la conversión en energía de una pequeña cantidad de masa del uranio. El Sol, también, convierte masa en energía y continuamente pierde masa al emanar una tremenda cantidad de energía electromagnética en todas direcciones.

Es extremadamente interesante que, aunque se habló acerca de la interconversión de masa y energía para partículas, la expresión $E = mc^2$ es universal y se aplica a todos los objetos, procesos y sistemas: un objeto caliente tiene ligeramente más masa y es ligeramente más difícil de acelerar que un objeto idéntico frío porque tiene más energía térmica y un resorte estirado tiene más energía potencial elástica y más masa que un resorte idéntico no estirado. Sin embargo, un punto clave es que estos cambios en masa en ocasiones son mucho muy pequeños para medir. La mejor apuesta para medir cambios de masa está en las transformaciones nucleares, donde una fracción mensurable de la masa se convierte en energía.

■ Examen rápido

26.6 Verdadero o Falso: Puesto que la velocidad de una partícula no puede exceder la velocidad de la luz, hay un límite superior a su cantidad de movimiento y energía cinética.

Energía y cantidad de movimiento relativista

Con frecuencia se mide la cantidad de movimiento o la energía de una partícula, en lugar de su velocidad, de modo que es útil encontrar una expresión que relacione la energía total E con la cantidad de movimiento relativista p . Esto se puede hacer al usar la expresión $E = \gamma mc^2$ y $p = \gamma mv$. Al elevar al cuadrado estas ecuaciones y restar, se puede eliminar v . El resultado, después de algo de álgebra, es

$$E^2 = p^2c^2 + (mc^2)^2 \quad [26.13]$$

Cuando la partícula está en reposo, $p = 0$, de modo que $E = E_R = mc^2$. En este caso especial, la energía total es igual a la energía en reposo. Para el caso de partículas que tienen masa cero, como los fotones (partículas de luz sin masa ni carga), se hace $m = 0$ en la ecuación 26.10 y se encuentra que

$$E = pc \quad [26.14]$$

Esta ecuación es una expresión exacta que relaciona la energía y cantidad de movimiento para los fotones, que siempre viajan a la velocidad de la luz.

³Aunque esta expresión no parece exactamente como la famosa ecuación $E = mc^2$, suele ser común escribir $m = \gamma m_0$ (el mismo Einstein lo escribió de esta forma), donde m es la masa efectiva de un objeto que se mueve con velocidad v y m_0 es la masa de dicho objeto medida por un observador en reposo con respecto al objeto. Entonces $E = \gamma mc^2$ se convierte en la conocida $E = m_0c^2$. En la actualidad está pasado de moda usar $m = \gamma m_0$.

Al tratar con partículas subatómicas, es conveniente expresar su energía en electrón-volts (eV) porque las partículas reciben energía cuando se aceleran a través de la diferencia de potencial electrostático. El factor de conversión es

$$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Por ejemplo, la masa de un electrón es $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$. En consecuencia, la energía en reposo del electrón es

$$m_e c^2 = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8.20 \times 10^{-14} \text{ J}$$

Al convertir a eV se tiene

$$m_e c^2 = (8.20 \times 10^{-14} \text{ J})(1 \text{ eV}/1.60 \times 10^{-19} \text{ J}) = 0.511 \text{ MeV}$$

donde $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$. Puesto que frecuentemente se usa la expresión $E = \gamma m c^2$ en física nuclear y puesto que m por lo general está en unidades de masa atómica, u, es útil tener el factor de conversión $1 \text{ u} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$. Usar este factor facilita, por ejemplo, encontrar la energía en reposo en MeV del núcleo de un átomo de uranio con una masa de 235.043 924 u:

$$E_R = m c^2 = (235.043 \text{ 924 u})(931.494 \text{ MeV/u} \cdot c^2)(c^2) = 2.189 \text{ 42} \times 10^5 \text{ MeV}$$

■ Examen rápido

26.7 Un fotón se refleja desde un espejo. Verdadero o Falso: a) Puesto que un fotón tiene masa cero, no ejerce fuerza sobre el espejo. b) Aunque el fotón tiene energía, no puede transferir energía alguna a la superficie porque tiene masa cero. c) El fotón lleva cantidad de movimiento y, cuando se refleja del espejo, experimenta un cambio en cantidad de movimiento y ejerce una fuerza sobre el espejo. d) Aunque el fotón lleva cantidad de movimiento, su cambio en cantidad de movimiento es cero cuando se refleja del espejo, de modo que no puede ejercer una fuerza sobre el espejo.

■ EJEMPLO 26.5 Un electrón rápido

OBJETIVO Calcular una energía total y una energía cinética relativista.

PROBLEMA Un electrón se mueve con una velocidad $v = 0.850c$. Encuentre su energía total y energía cinética en mega-electrón-volts (MeV) y compare la última con la energía cinética clásica ($10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}$).

ESTRATEGIA Sustituya en la ecuación 26.12 para obtener la energía total y reste la energía de la masa en reposo para obtener la energía cinética.

SOLUCIÓN

Sustituya valores en la ecuación 26.12 para obtener la energía total:

$$\begin{aligned} E &= \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - (0.850c/c)^2}} \\ &= 1.56 \times 10^{-13} \text{ J} = (1.56 \times 10^{-13} \text{ J}) \left(\frac{1.00 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) \\ &= \mathbf{0.975 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

La energía cinética se obtiene al restar la energía en reposo de la energía total:

$$EC = E - m_e c^2 = 0.975 \text{ MeV} - 0.511 \text{ MeV} = \mathbf{0.464 \text{ MeV}}$$

Calcule la energía cinética clásica:

$$\begin{aligned} EC_{\text{clásica}} &= \frac{1}{2} m_e v^2 \\ &= \frac{1}{2} (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.850 \times 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 2.96 \times 10^{-14} \text{ J} = 0.185 \text{ MeV} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Adverta la gran discrepancia entre la energía cinética relativista y la energía cinética clásica.

(continúa)

PREGUNTA 26.5 De acuerdo con un observador, la velocidad v de una partícula con energía cinética EC_i aumenta a $2v$. ¿Cómo se compara la energía cinética final EC_f con la energía cinética inicial? a) $EC_f > 4EC_i$ b) $EC_f = 4EC_i$ c) $EC_f < 4EC_i$

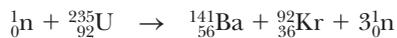
EJERCICIO 26.5 Calcule la energía total y la energía cinética en MeV de un protón que viaja a $0.600c$. (La energía en reposo de un protón es aproximadamente 938 MeV.)

RESPUESTAS $E = 1.17 \times 10^3$ MeV, $EC = 2.3 \times 10^2$ MeV

■ EJEMPLO 26.6 Conversión de masa a energía cinética en la fisión de uranio

OBJETIVO Comprender la producción de energía de fuentes nucleares.

PROBLEMA La fisión o división del uranio la descubrió Lise Meitner en 1938, quien interpretó exitosamente algunos resultados experimentales curiosos descubiertos por Otto Hahn como debidos a la fisión. (Hahn recibió el Premio Nobel.) La fisión de ${}^{235}_{92}\text{U}$ comienza con la absorción de un neutrón de movimiento lento que produce un núcleo inestable de ${}^{236}\text{U}$. El núcleo ${}^{236}\text{U}$ decae rápidamente en dos fragmentos pesados que se mueven a alta velocidad, así como muchos neutrones. La mayor parte de la energía cinética liberada en tal fisión se libera mediante dos fragmentos grandes. **a)** Para el proceso de fisión típico,



SOLUCIÓN

a) Calcule la energía cinética final para el proceso dado.

Aplique la ecuación de conservación de energía relativista y suponga $EC_{\text{inicial}} = 0$:

Resuelva para EC_{final} y sustituya, convierta a MeV en el último paso:

calcule la energía cinética en MeV que se libera mediante los fragmentos de fisión y desprece la energía cinética de los reactantes. **b)** ¿Qué porcentaje de la energía inicial se convierte en energía cinética? Las masas atómicas involucradas, dadas en unidades de masa atómica, son

$$\begin{aligned} {}_0^1\text{n} &= 1.008\,665 \text{ u} & {}_{92}^{235}\text{U} &= 235.043\,923 \text{ u} \\ {}_{56}^{141}\text{Ba} &= 140.903\,496 \text{ u} & {}_{36}^{92}\text{Kr} &= 91.907\,936 \text{ u} \end{aligned}$$

ESTRATEGIA Este problema es una aplicación de la conservación de energía relativista. Escriba la ley de conservación como una suma de energía cinética y energía en reposo, y resuelva para la energía cinética final.

$$\begin{aligned} (EC + mc^2)_{\text{inicial}} &= (EC + mc^2)_{\text{final}} \\ 0 + m_{\text{n}}c^2 + m_{\text{U}}c^2 &= m_{\text{Ba}}c^2 + m_{\text{Kr}}c^2 + 3m_{\text{n}}c^2 + EC_{\text{final}} \\ EC_{\text{final}} &= [(m_{\text{n}} + m_{\text{U}}) - (m_{\text{Ba}} + m_{\text{Kr}} + 3m_{\text{n}})]c^2 \\ EC_{\text{final}} &= (1.008\,665 \text{ u} + 235.043\,923 \text{ u})c^2 \\ &\quad - [140.903\,496 \text{ u} + 91.907\,936 \text{ u} + 3(1.008\,665 \text{ u})]c^2 \\ &= (0.215\,161 \text{ u})(931.494 \text{ MeV/u} \cdot c^2)(c^2) \\ &= \mathbf{200.421 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

b) ¿Qué porcentaje de la energía inicial se convierte en energía cinética?

Calcule la energía total, que es la energía inicial:

$$\begin{aligned} E_{\text{inicial}} &= 0 + m_{\text{n}}c^2 + m_{\text{U}}c^2 \\ &= (1.008\,665 \text{ u} + 235.043\,923 \text{ u})c^2 \\ &= (236.052\,59 \text{ u})(931.494 \text{ MeV/u} \cdot c^2)(c^2) \\ &= 2.198\,82 \times 10^5 \text{ MeV} \end{aligned}$$

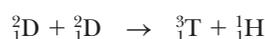
Divida la energía cinética entre la energía total y multiplique por 100%:

$$\frac{200.421 \text{ MeV}}{2.198\,82 \times 10^5 \text{ MeV}} \times 100\% = \mathbf{9.115 \times 10^{-2}\%}$$

COMENTARIOS Este cálculo demuestra que las reacciones nucleares liberan sólo aproximadamente un décimo de 1% de la energía en reposo de las partículas constituyentes. Algunas reacciones de fusión resultan en una producción porcentual muchas veces mayor.

PREGUNTA 26.6 ¿Por qué tan poca masa se convierte en otras formas de energía?

EJERCICIO 26.6 En una reacción de fusión, elementos ligeros se combinan para formar un elemento más pesado. El deuterio, que también se llama hidrógeno pesado, tiene un neutrón adicional en su núcleo. Dos de estas partículas se pueden fusionar en una forma más pesada de hidrógeno, llamada tritio, más un átomo de hidrógeno ordinario. La reacción es



a) Calcule la energía liberada en la forma de energía cinética, suponiendo por simplicidad que la energía cinética inicial es cero. b) ¿Qué porcentaje de la masa en reposo se convierte en energía? Las masas atómicas involucradas son

$${}^2_1\text{D} = 2.014\,102\text{ u} \quad {}^3_1\text{T} = 3.016\,049\text{ u} \quad {}^1_1\text{H} = 1.007\,825\text{ u}$$

RESPUESTAS a) 4.03337 MeV b) 0.1075%

26.8 Relatividad general

La relatividad especial relaciona observaciones de observadores inerciales. Einstein vislumbró una teoría más general que abordaría sistemas acelerados. Su búsqueda estuvo motivada en parte por el siguiente hecho curioso: la masa determina la inercia de un objeto y también la fuerza del campo gravitacional. La masa involucrada en la inercia se llama masa inercial, m_i , mientras que la masa responsable por el campo gravitacional se llama masa gravitacional, m_g . Estas masas aparecen en la ley de gravitación y en la segunda ley de movimiento de Newton:

$$\begin{aligned} \text{Propiedad gravitacional} \quad F_g &= G \frac{m_g m'_g}{r^2} \\ \text{Propiedad inercial} \quad F_i &= m_i a \end{aligned}$$

El valor para la constante gravitacional G se eligió para hacer las magnitudes de m_g y m_i numéricamente iguales. Sin embargo, sin importar cómo se elija G , la estricta proporcionalidad de m_g y m_i se estableció de manera experimental a un grado extremadamente alto: pocas partes en 10^{12} . Parece que la masa gravitacional y la masa inercial de hecho pueden ser exactamente iguales: $m_i = m_g$.

En la visión de Einstein, la notable coincidencia de que m_g y m_i fuesen exactamente iguales era evidencia de una íntima conexión entre los dos conceptos. Él puntualizó que ningún experimento mecánico (como liberar una masa) podría distinguir entre las dos situaciones que se ilustran en las figuras 26.10a y 26.10b. En cada caso una masa liberada por el observador experimenta una aceleración descendente de g en relación con el suelo.

Einstein llevó esta idea más allá y propuso que *ningún* experimento, mecánico o de otro tipo, podría distinguir entre los dos casos. Esta extensión para incluir todos los fenómenos

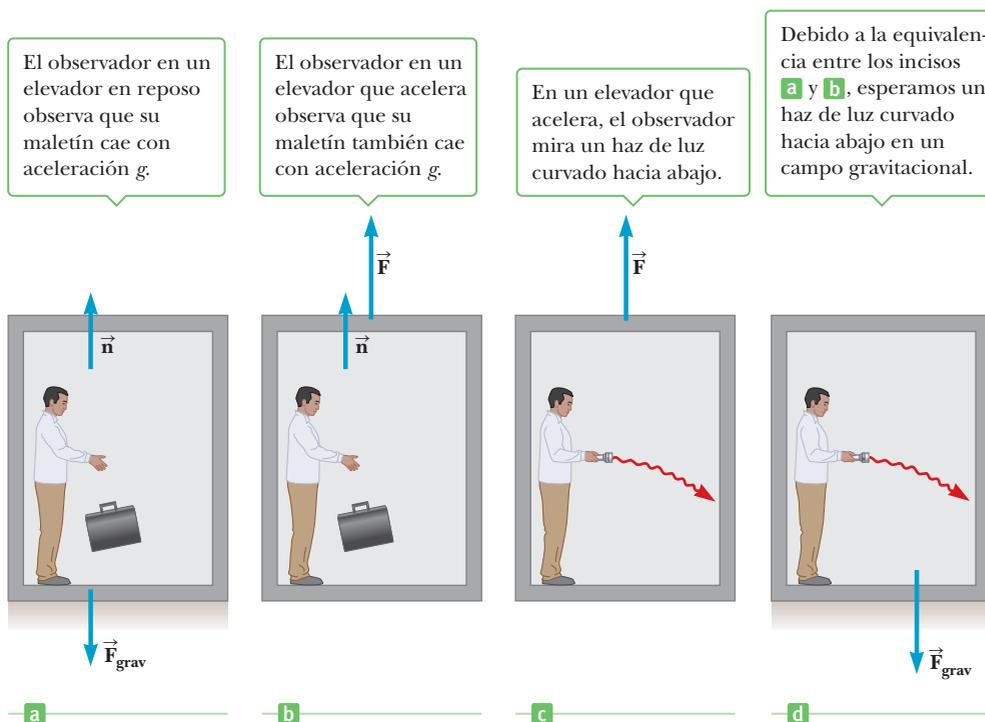


Figura 26.10 a) El observador en el cubículo está en reposo en un campo gravitacional uniforme \vec{g} . Él experimenta una fuerza normal \vec{n} . b) Ahora el observador está en una región donde la gravedad es despreciable, pero una fuerza externa \vec{F} actúa sobre el marco de referencia, lo que produce una aceleración con magnitud g . De nuevo, el hombre experimenta una fuerza normal \vec{n} que lo acelera junto con el cubículo. De acuerdo con Einstein, los marcos de referencia en a) y b) son equivalentes en todos los aspectos. Ningún experimento local podría distinguir entre ellos. c) El observador enciende su linterna de bolsillo. Debido a la aceleración del cubículo, el haz parecería doblarse hacia el suelo, como lo haría una bola lanzada. d) Dada la equivalencia de los marcos, el mismo fenómeno se observaría en presencia de un campo de gravedad.

(no sólo los mecánicos) tiene interesantes consecuencias. Por ejemplo, suponga que un haz de luz se envía horizontalmente a través de la caja, como en la figura 26.10c. La trayectoria del haz de luz se dobla hacia abajo conforme el elevador acelera hacia arriba para encontrarlo. Einstein propuso que el haz de luz también debería doblarse hacia abajo mediante un campo gravitacional (figura 26.10d).

Los dos postulados de la **relatividad general** de Einstein son los siguientes:

1. Todas las leyes de la naturaleza tienen la misma forma para observadores en cualquier marco de referencia, acelerado o no.
2. En la vecindad de cualquier punto dado, un campo gravitacional es equivalente a un marco de referencia acelerado sin un campo gravitacional. (Éste es el *principio de equivalencia*.)

El segundo postulado implica que la masa gravitacional y la masa inercial son completamente equivalentes, no sólo proporcionales. Lo que se creía eran dos tipos diferentes de masa en realidad son idénticas.

Un efecto interesante predicho por la relatividad general es que las escalas de tiempo son alteradas por la gravedad. Un reloj en presencia de gravedad corre más lentamente que uno en el que la gravedad es despreciable. Como consecuencia, la luz emitida de los átomos en un intenso campo de gravedad, como el del Sol, se observa que tienen una frecuencia más baja que la misma luz emitida por los átomos en el laboratorio. Este corrimiento gravitacional se detectó en las líneas espectrales emitidas por los átomos en estrellas masivas. También se verificó en la Tierra al comparar las frecuencias de los rayos gamma emitidos de núcleos separados verticalmente por aproximadamente 20 m.

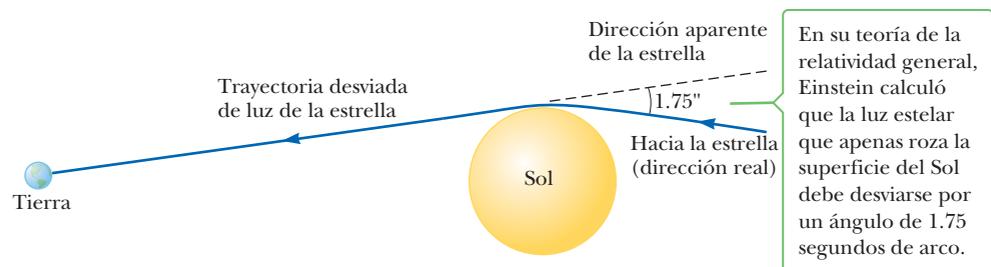
El segundo postulado sugiere que un campo gravitacional se puede “transformar” en cualquier punto si se elige un marco de referencia acelerado adecuado: uno que cae libremente. Einstein desarrolló un ingenioso método para describir la aceleración necesaria para hacer “desaparecer” el campo gravitacional. Él especificó cierta cantidad, la *curvatura del espacio-tiempo*, que describe el efecto gravitacional en todo punto. De hecho, la curvatura del espacio-tiempo sustituye por completo la teoría gravitacional de Newton. De acuerdo con Einstein, no hay una cosa tal como una fuerza gravitacional. En vez de ello, la presencia de una masa causa una curvatura del espacio-tiempo en la vecindad de la masa. Los planetas que giran alrededor del Sol siguen el contorno natural del espacio-tiempo, en forma muy parecida a canicas que ruedan dentro de un tazón. La ecuación fundamental de la relatividad general se puede establecer burdamente como una proporción del modo siguiente:

Curvatura promedio de espacio-tiempo \propto densidad de energía

Einstein buscó una nueva teoría de la gravedad en gran parte debido a una discrepancia en la órbita de Mercurio como se calcula a partir de la segunda ley de Newton. El máximo acercamiento de Mercurio al Sol, llamado perihelio, cambia lentamente de posición con el tiempo. La teoría de Newton explica todo, menos 43 segundos de arco por siglo; la relatividad general de Einstein explicaba la discrepancia.

La prueba más espectacular de la relatividad general llegó poco después del fin de la Primera Guerra Mundial. La teoría de Einstein predecía que una estrella desviaría un rayo de luz en cierta cantidad precisa. Sir Arthur Eddington montó una expedición a África y, durante un eclipse solar, confirmó que la luz estelar se desvía al pasar el Sol en una cantidad que coincidía con la predicción de la relatividad general (figura 26.11). Cuando este descubrimiento se anunció, Einstein se convirtió en celebridad internacional.

Figura 26.11 Desviación de luz estelar que pasa cerca del Sol. Debido a este efecto, el Sol y otros objetos remotos pueden actuar como *lentes gravitacionales*.



La relatividad general también predice que una gran estrella puede agotar su combustible nuclear y colapsar a un volumen muy pequeño, y convertirse en un **hoyo negro**. Aquí la curvatura del espacio-tiempo es tan extrema que toda la materia y la luz dentro de cierto radio quedan atrapadas. Este radio, llamado *radio de Schwarzschild* u *horizonte de eventos*, tiene aproximadamente 3 km para un hoyo negro con la masa del Sol. En el centro del hoyo negro puede merodear una *singularidad*, un punto de densidad infinita y curvatura donde el espacio-tiempo llega a un fin.

Existe fuerte evidencia para la existencia de un hoyo negro que tiene una masa de millones de soles en el centro de la galaxia.

■ FÍSICA APLICADA 26.1 Relojes más rápidos en una "ciudad de una milla de alto"

Los relojes atómicos son extremadamente precisos; de hecho, un error de 1 s en 3 millones de años es típico. Este error se puede describir como aproximadamente una parte en 10^{14} . Por otra parte, el reloj atómico en Boulder, Colorado, con frecuencia es 15 ns más rápido que el reloj atómico en Washington, D. C., después de sólo un día. Este error es aproximadamente una parte en 6×10^{12} , que es más o menos 17 veces mayor que el error típico. Si los relojes atómicos son tan precisos, ¿por qué un reloj en Boulder no permanece sincronizado con uno en Washington, D. C.?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la teoría de la relatividad general, el paso del tiempo depende de la gravedad: los relojes corren más lentamente en fuertes campos gravitacionales. Washington, D. C., está a una elevación muy cercana a nivel del mar, mientras que Boulder está aproximadamente una milla más arriba en altitud, de modo que el campo gravitacional en Boulder es más débil que en Washington, D. C. Como resultado, un reloj atómico corre más rápidamente en Boulder que en Washington, D. C. (Este efecto se comprobó mediante experimentos.) ■

■ RESUMEN

26.3 Principio de relatividad de Einstein

Los dos postulados básicos de la **teoría de la relatividad especial** son los siguientes:

1. Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales.
2. La velocidad de la luz es la misma para todos los observadores inerciales, independientemente de su movimiento o del movimiento de la fuente de luz.

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

Algunas de las consecuencias de la teoría de la relatividad especial son las siguientes:

1. Los relojes en movimiento relativo a un observador dilatan, un fenómeno conocido como **dilatación del tiempo**. La relación entre intervalos en los sistemas en movimiento y en reposo es

$$\Delta t = \gamma \Delta t_p \quad [26.2]$$

donde Δt es el tiempo medido en el sistema en movimiento relativo con respecto al reloj,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.3]$$

y Δt_p es el intervalo propio medido en el sistema que se mueve con el reloj.

2. La longitud de un objeto en movimiento se *contrae* en la dirección de movimiento. La ecuación para la **contracción de la longitud** es

$$L = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad [26.4]$$

donde L es la longitud medida por un observador en movimiento en relación con el objeto y L_p es la longitud

propia medida por un observador para quien el objeto está en reposo.

3. Los eventos que son simultáneos para un observador no son simultáneos para otro observador en movimiento relativo con el primero.

26.5 Cantidad de movimiento relativista

La expresión relativista para la **cantidad de movimiento** de una partícula que se mueve con velocidad v es

$$p \equiv \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mv \quad [26.5]$$

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

Cuando los observadores T y B están en movimiento relativo, medirán velocidades diferentes para un tercer objeto. Esas medidas están relacionadas por

$$v_{AB} = \frac{v_{AT} - v_{BT}}{1 - \frac{v_{AT}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.7]$$

A bajas velocidades relativas en comparación con la de la luz, esta expresión está de acuerdo con la forma galileana, la ecuación 26.6. La ecuación 26.7 se puede invertir para obtener la ecuación de la suma de velocidades relativistas:

$$v_{AT} = \frac{v_{AB} + v_{BT}}{1 + \frac{v_{AB}v_{BT}}{c^2}} \quad [26.8]$$

La ecuación 26.8 nos da la respuesta intuitiva de acuerdo con la experiencia cotidiana, cuando $v \ll c$ (es decir, $v_{AT} = v_{AB} + v_{BT}$).

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

La expresión relativista para la **energía cinética** de un objeto es

$$EC = \gamma mc^2 - mc^2 \quad [26.9]$$

donde mc^2 es la **energía en reposo** del objeto, E_R .

La **energía total** de una partícula es

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad [26.12]$$

Ésta es la famosa ecuación de equivalencia masa-energía de Einstein que resulta cuando $v = 0$.

La cantidad de movimiento relativista se relaciona con la energía total a través de la ecuación

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2 \quad [26.13]$$

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- ¿Cuál de los siguientes enunciados son postulados fundamentales de la teoría de la relatividad especial? a) La luz se mueve a través de una sustancia llamada éter. b) La velocidad de la luz depende del marco de referencia inercial en el cual se mide. c) Las leyes de la física dependen del marco de referencia inercial en el cual se usan. d) Las leyes de la física son las mismas en todos los marcos de referencia inerciales. e) La velocidad de la luz es independiente del marco de referencia inercial en el cual se mide.
- Una nave espacial se mueve a un cuarto la velocidad de la luz en relación con la Tierra en una dirección perpendicular a la línea de visión de un observador en reposo con respecto a la Tierra. Si la nave espacial tiene una longitud L cuando está en reposo, ¿cuál enunciado es cierto en cuanto a la longitud L' de la nave en movimiento, según mide el observador? a) $L' > L$ b) $L' > L$ c) $L' = L$ d) $L' \ll L$ e) $L' \gg L$
- Los faros de un automóvil se aproximan y un observador en el suelo mide la velocidad del haz de luz como $c = 3.00 \times 10^8$ m/s. Conforme el conductor se dirige por la autopista con una velocidad v alejándose del observador en el suelo, ¿cuál de los siguientes enunciados son ciertos acerca de la velocidad medida del haz de luz? a) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como $c + v$. b) El conductor mide la velocidad de la luz como c . c) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como c . d) El conductor mide la velocidad de la luz como ligeramente menor que c . e) El observador en el suelo mide la velocidad de la luz como ligeramente menor que c .
- Un astronauta viaja en un cohete en el espacio exterior en línea recta con una velocidad constante de $0.5c$. ¿Cuál de los siguientes efectos experimentaría? a) Se sentiría más pesado. b) Tendría dificultades para respirar. c) Su ritmo cardíaco cambiaría. d) Algunas de sus dimensiones se acortarían. e) Ninguno de estos efectos ocurriría.
- Un péndulo en una nave espacial, que viaja por el espacio con una velocidad de $0.9c$ en relación con la Tierra, tiene un periodo P según mide un astronauta en la nave espacial. ¿Qué es cierto acerca del periodo T según mide un observador en Tierra? a) $P > T$ b) $P = T$ c) $P < T$ d) $P < T$ o $P > T$ dependiendo de la dirección de movimiento de la nave espacial e) Ninguno de éstos
- Un cubo medido en reposo tiene volumen V . Entonces un observador pasa el cubo paralelo a uno de sus lados a $0.98c$, de modo que $\gamma \approx 5$. ¿Cuál es el volumen del cubo medido por el observador en movimiento? a) $V/125$ b) $V/25$ c) $V/5$ d) V e) $5V$
- Suponga que un fotón, un protón y un electrón tienen todos la misma energía total E . Clasifique sus cantidades de movimiento de menor a mayor. a) fotón, electrón, protón b) protón, fotón, electrón c) electrón, fotón, protón d) electrón, protón, fotón e) protón, electrón, fotón
- Dos relojes idénticos se colocan uno al lado del otro y se sincronizan. Uno se queda en la Tierra. El otro es puesto en órbita alrededor de la Tierra moviéndose rápidamente hacia el este. Medido por un observador en la Tierra, ¿el reloj en órbita a) marcha más rápido que el reloj que está en la Tierra, b) marcha al mismo ritmo o c) marcha más lento?
- Un sistema masa-resorte que se mueve con movimiento armónico simple tiene un periodo T cuando lo mide un observador en tierra. Si luego el mismo sistema se coloca en un marco de referencia inercial que se mueve junto al observador en tierra con una velocidad de $0.50c$, ¿por qué factor se multiplicaría T para dar el periodo del sistema medido por el observador en tierra? a) 0.50 b) 0.87 c) 1.00 d) 1.15 e) 1.35
- Una nave espacial se aleja más allá de la Tierra con una velocidad constante. Un observador en la Tierra detecta que el tictac de un reloj en la nave espacial tiene una tercera parte de la velocidad de un reloj idéntico en la Tierra. ¿Cuál es la velocidad del tictac del reloj con sede en la Tierra medida por un observador en la nave espacial? a) Es más de tres veces más rápido que el de su reloj. b) Es tres veces más rápido que su reloj. c) Funciona a la misma velocidad que su reloj. d) Funciona a un tercio de la velocidad de su reloj. e) Es menos de un tercio de la velocidad de su reloj.
- Un objeto astronómico distante (un cuásar) se está alejando de nosotros a la mitad de la velocidad de la luz. ¿Cuál es la velocidad de la luz que recibimos de este cuásar? a) mayor que c b) c c) entre $c/2$ y c d) $c/2$ e) entre 0 y $c/2$

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED

WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Una nave espacial con la forma de una esfera de diámetro D se mueve junto a un observador en la Tierra con una velocidad de $0.50c$. ¿Qué forma mide el observador para la nave espacial conforme pasa junto a él?
- ¿En cuáles dos mediciones siempre estarán de acuerdo dos observadores en movimiento relativo?
- La velocidad de la luz en el agua es 2.30×10^8 m/s. Suponga que un electrón se mueve a través de agua a 2.50×10^8 m/s. ¿La velocidad de esta partícula viola el principio de relatividad?
- Con respecto a los marcos de referencia, ¿cómo difiere la relatividad general de la relatividad especial?
- Dé un argumento físico que muestre que es imposible acelerar un objeto de masa m a la velocidad de la luz, incluso con una fuerza constante que actúa sobre él.
- Se dice que Einstein, en sus años de adolescencia, planteó la pregunta: “¿Qué vería en un espejo si lo llevo en mis manos y corro con una velocidad cercana a la de la luz?” ¿Cómo respondería esta pregunta?
- Mencione algunas formas en que su vida cotidiana cambiaría si la velocidad de la luz fuese sólo de 50 m/s.
- Dos relojes idénticamente contruidos se sincronizan. Uno se pone en órbita alrededor de la Tierra y el otro permanece en la Tierra. ¿Cuál reloj corre más lentamente? Cuando el reloj en movimiento regresa a la Tierra, ¿los dos relojes todavía estarán sincronizados? Analice desde el punto de vista tanto de la relatividad especial como de la relatividad general.
- Los fotones de luz tienen masa cero. ¿Cómo es posible que tengan cantidad de movimiento?
- Imagine un astronauta en un viaje a Sirio, que se encuentra a 8 años luz de la Tierra. Al llegar a Sirio, el astronauta encuentra que el viaje duró 6 años. Si el viaje se hizo con una velocidad constante de $0.8c$, ¿cómo se puede reconciliar la distancia de 8 años luz con la duración de 6 años?
- Explique por qué, al definir la longitud de una barra, es necesario precisar que las posiciones de los extremos de la barra se van a medir al mismo tiempo.

■ PROBLEMAS

ENHANCED

WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
- denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*
- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

26.4 Consecuencias de la relatividad especial

- Si los astronautas pudieran viajar a $v = 0.950c$, usted en la Tierra diría que tarda $(4.20/0.950) = 4.42$ años en llegar a Alfa Centauri, a 4.20 años luz de distancia. Los astronautas están en desacuerdo. a) ¿Cuánto tiempo pasa en los relojes de los astronautas? b) ¿Cuál es la distancia a Alfa Centauri según miden los astronautas?
- CC** Una regla que se mueve a $0.900c$ en relación con la Tierra se aproxima a un observador en reposo con respecto a la Tierra. a) ¿Cuál es la longitud de la regla, de acuerdo con el observador? b) Cualitativamente, ¿cómo cambiaría la respuesta si el observador se moviera en relación con la Tierra en la dirección opuesta?
- La longitud de una nave espacial en movimiento es 28.0 m de acuerdo con un astronauta en la nave espacial. Si la nave es contraída por 15.0 cm, según un observador en la Tierra, ¿cuál es la velocidad de la nave espacial?
- BIO** Un astronauta en reposo sobre la Tierra tiene un ritmo cardíaco de 70 latidos/min. Cuando el astronauta viaja en una nave espacial a $0.90c$, ¿cuál será este ritmo medido por a) un observador también en la nave y b) un observador en reposo en Tierra?
- M** La vida promedio de un mesón pi en su propio marco de referencia (es decir, el tiempo de vida propio) es 2.6×10^{-8} s. Si el mesón se mueve con una velocidad de $0.98c$, ¿cuál es a) su vida media medida por un observador en la Tierra y b) la distancia promedio que recorre antes de decaer, según mide un observador en Tierra? c) ¿Qué distancia recorrería si la dilatación del tiempo no ocurriera?
- BIO** Un astronauta viaja en un vehículo espacial que tiene una velocidad de $0.500c$ en relación con la Tierra. El astronauta mide su pulso en 75.0 por minuto. Señales generadas por el pulso del astronauta se radian a la Tierra cuando el vehículo se mueve de manera perpendicular a una línea que conecta el vehículo con un observador en Tierra. ¿Qué pulso mide el observador en la Tierra? ¿Cuál debería ser el pulso si la velocidad del vehículo espacial aumenta a $0.990c$?
- PG** Un muón que se forma alto en la atmósfera de la Tierra viaja hacia ella con una velocidad $v = 0.990c$ por

una distancia de 4.60 km según mide un observador en reposo con respecto a la Tierra. Luego decae en un electrón, un neutrino y un antineutrino. a) ¿Cuánto sobrevive el muón de acuerdo con un observador en reposo sobre la Tierra? b) Calcule el factor gamma asociado con el muón. c) ¿Cuánto tiempo transcurre de acuerdo con un observador que viaja con el muón? d) ¿Qué distancia recorre el muón de acuerdo con un observador que viaja con el muón? e) Un tercer observador que viaja hacia el muón a $c/2$ mide la vida de la partícula. De acuerdo con este observador, ¿la vida del muón es más corta o más larga que la vida medida por el observador en reposo con respecto a la Tierra? Explique.

8. Una sonda de espacio profundo se mueve alejándose de la Tierra con una velocidad de $0.80c$. Una antena en la sonda requiere 3.0 s, en tiempo sonda, para rotar a través de 1.0 rev. ¿Cuánto tiempo se requiere para 1.0 rev de acuerdo con un observador en la Tierra?
9. La longitud propia de una nave espacial es tres veces la de la otra. Las dos naves espaciales viajan en la misma dirección y, mientras ambas pasan sobre su cabeza, un observador en la Tierra mide que las dos naves espaciales tienen la misma longitud. Si la nave espacial más lenta tiene una velocidad de $0.350c$ con respecto a la Tierra, determine la velocidad de la nave espacial más rápida.
10. Un automóvil que viaja a 35.0 m/s tiene 26.0 minutos para recorrer una distancia determinada de acuerdo con el reloj del conductor en el coche. ¿Cuánto dura el viaje de acuerdo con un observador en reposo en la Tierra? *Sugerencia:* La siguiente aproximación es útil: $[1 - x]^{-1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}x$ para $x \ll 1$.

11. Un supertren con 100 m de longitud propia viaja con una velocidad de $0.95c$ mientras pasa a través de un túnel que tiene longitud propia de 50 m. Visto por un observador al lado de la pista, ¿el tren alguna vez está completamente adentro del túnel? Si es así, ¿durante cuánto tiempo?

12. Una caja es cúbica, con lados de longitudes propias $L_1 = L_2 = L_3$, como se muestra en la figura P26.12, cuando se ve en su propio marco en reposo. Si este bloque se mueve paralelo a uno de sus vértices con una velocidad de $0.80c$ junto a un observador, a) ¿qué forma parece tener para este observador? b) ¿Cuál es la longitud de cada lado según mide el observador?

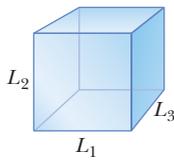


Figura P26.12

26.5 Cantidad de movimiento relativista

13. **CIC** Un electrón tiene una cantidad de movimiento con una magnitud tres veces la magnitud de su cantidad de movimiento clásica. a) Determine la velocidad del electrón. b) ¿Cómo cambiaría su resultado si la partícula fuera un protón?
14. **CIC** a) Calcule la cantidad de movimiento clásica de un protón que viaja a $0.990c$, desprece efectos relativistas. b) Repita el cálculo mientras incluye efectos relativistas. c) ¿Tiene sentido despreciar la relatividad a tales velocidades?
15. Una partícula inestable en reposo se rompe en dos fragmentos de *masas distintas*. La masa del fragmento más ligero es igual a 2.50×10^{-28} kg y la del fragmento más pesado es 1.67×10^{-27} kg. Si el fragmento más ligero tiene una

velocidad de $0.893c$ después del rompimiento, ¿cuál es la velocidad del fragmento más pesado?

26.6 Velocidad relativa en la relatividad especial

16. Una nave espacial R se mueve hacia la derecha a una velocidad de $0.70c$ con respecto a la Tierra. Una segunda nave espacial, L , se mueve hacia la izquierda a la misma velocidad con respecto a la Tierra. ¿Cuál es la velocidad de L con respecto a R ?
17. Un electrón se mueve a la derecha con una velocidad de $0.90c$ relativa al marco del laboratorio. Un protón se mueve a la izquierda a una velocidad de $0.70c$ relativa al electrón. Encuentre la velocidad de los protones en relación con el marco del laboratorio.
18. Una nave espacial viaja a $0.750c$ relativa a la Tierra. Si la nave dispara un pequeño cohete en la dirección de avance, ¿con qué velocidad (en relación con la nave) debe ser disparado para viajar a $0.950c$ en relación a la Tierra?
19. Una nave espacial A se aleja de la Tierra a una velocidad de $0.800c$ (figura P26.19). La nave espacial B la persigue a una velocidad de $0.900c$ relativa a la Tierra. Observadores en la Tierra ven que B adelanta a A a una velocidad relativa de $0.100c$. ¿Con qué velocidad está superando B a A visto por la tripulación de la nave B ?

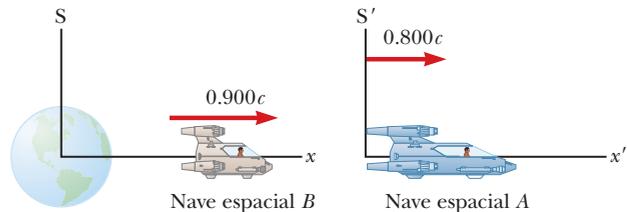


Figura P26.19

20. Un pulsar es un objeto estelar que emite luz en ráfagas cortas. Suponga que un pulsar con una velocidad de $0.950c$ se acerca a la Tierra y un cohete con una velocidad de $0.995c$ se dirige hacia el pulsar. (Ambas velocidades se miden en el marco de referencia de la Tierra.) Si el pulsar emite 10.0 pulsos por segundo en su propio marco de referencia, a qué velocidad son emitidos los impulsos en el marco de referencia del cohete?
21. **M** Un cohete se mueve a una velocidad de $0.92c$ a la derecha con respecto a un observador estacionario A . Un observador B que se mueve con respecto al observador A se encuentra con que el cohete se mueve con una velocidad de $0.95c$ hacia la izquierda. ¿Cuál es la velocidad del observador B en relación con el observador A ? (*Sugerencia:* Considere la velocidad del observador B en el marco de referencia del cohete.)

26.7 Energía relativista y equivalencia de masa y energía

22. Un protón se mueve con una velocidad de $0.950c$. Calcule a) su energía en reposo, b) su energía total y c) su energía cinética.
23. Protones en un acelerador en el Laboratorio Nacional Fermi cerca de Chicago son acelerados a una energía total que es 400 veces su energía en reposo. a) ¿Cuál es la velocidad de los protones en términos de c ? b) ¿Cuál es su energía cinética en MeV?

24. **S** Un protón en un acelerador grande tiene una energía cinética de 175 GeV. a) Compare esta energía cinética con la energía en reposo del protón y encuentre una expresión aproximada para la energía cinética del protón. b) Determine la velocidad del protón.
25. ¿Qué velocidad debe lograr una partícula antes de que su energía cinética duplique el valor predicho por la expresión no relativista $EC = \frac{1}{2}mv^2$?
26. Determine la energía requerida para acelerar un electrón desde a) $0.500c$ hasta $0.900c$ y b) desde $0.900c$ hasta $0.990c$.
27. Una nave espacial de masa 2.40×10^6 kg se acelera a una velocidad de $0.700c$. a) ¿Qué cantidad mínima de energía requiere esta aceleración del combustible de la nave, suponiendo una eficiencia perfecta? b) ¿Cuánto combustible se necesita para proporcionar esta energía si toda la energía del combustible en reposo podría ser transformada en energía cinética de la nave espacial?
28. Una partícula inestable con una masa igual a 3.34×10^{-27} kg inicialmente está en reposo. La partícula decae en dos fragmentos que vuelan con velocidades de $0.987c$ y $-0.868c$, respectivamente. Encuentre las masas de los fragmentos. *Sugerencia:* Conserve tanto masa-energía como cantidad de movimiento.
29. **C/C** A partir de las definiciones de la energía y la cantidad de movimiento relativistas, demuestre que $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ (ecuación 26.10).
30. **PG** Considere la reacción ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{148}_{57}\text{La} + {}^{87}_{35}\text{Br} + {}^1_0\text{n}$
 a) Escriba la ecuación de conservación de energía relativista simbólicamente en términos de la energía en reposo y la energía cinética e iguale la energía total inicial con la energía total final. b) Con valores del apéndice B, encuentre la masa total de las partículas iniciales. c) Con los valores dados abajo, encuentre la masa total de las partículas después de que ocurre la reacción. d) Reste la masa de partícula final de la masa de partícula inicial. e) Convierta la respuesta al inciso d) a MeV y obtenga la energía cinética de las partículas hijas, desprecie la energía cinética de los reactantes. *Nota:* Lantano-148 tiene masa atómica 147.932236 u; bromo-87 tiene masa atómica 86.92071119 u.

Problemas adicionales

31. Considere electrones acelerados a una energía total de 20.0 GeV en el Acelerador Lineal Stanford de 3.00 km de largo. a) ¿Cuál es el factor γ para los electrones? b) ¿Cuán largo parece el acelerador a los electrones? Masa energía del electrón: 0.511 MeV.
32. Un electrón tiene una velocidad de $0.750c$. a) Encuentre la velocidad de un protón que tiene la misma energía cinética que el electrón. b) Encuentre la velocidad de un protón que tenga la misma cantidad de movimiento que el electrón.
33. La energía en reposo de un electrón es 0.511 MeV. La energía en reposo de un protón es 938 MeV. Suponga que ambas partículas tienen energías cinéticas de 2.00 MeV. Encuentre la velocidad de a) el electrón y b) el protón. c) ¿En cuánto supera la velocidad del electrón la del protón? *Nota:* Realice los cálculos en MeV; no convierta las energías a joules. La respuesta es sensible a redondeo.

34. **C/C** Un resorte con constante de fuerza k se comprime una distancia x desde su longitud de equilibrio. a) ¿La masa del resorte cambia cuando el resorte se comprime? Explique. b) Encuentre una expresión para el cambio en masa del resorte en términos de k , x y c . b) ¿Cuál es el cambio en masa si la constante de fuerza es 2.0×10^2 N/m y $x = 15$ cm?
35. Una estrella está a 5.00 años luz de la Tierra. ¿A qué velocidad debe desplazarse una nave espacial en su viaje a la estrella de tal manera que la distancia Tierra-estrella medida en el marco de la nave es de 2.00 años luz?
36. Un electrón tiene una energía total igual a cinco veces su energía en reposo. a) ¿Cuál es su cantidad de movimiento? b) Repita para un protón.
37. **M** Un astronauta quiere visitar la galaxia Andrómeda, al realizar un viaje de ida que tardará 30.0 años en el marco de referencia de la nave espacial. Suponga que la galaxia está a 2.00 millones de años luz de distancia y que su velocidad es constante. a) ¿Cuán rápido debe viajar en relación con la Tierra? b) ¿Cuál será la energía cinética de su nave espacial, que tiene 1.00×10^6 kg de masa? c) ¿Cuál es el costo de esta energía si se compra a un precio típico de consumidor para energía eléctrica, de 13.0 centavos por kWh? La siguiente aproximación resultará útil:

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} \approx 1 - \frac{x}{2} \quad \text{para } x \ll 1$$

38. Un reloj de alarma se programa para sonar a las 10 h. En $t = 0$, el reloj se coloca en una nave espacial que se mueve con una velocidad de $0.75c$ (relativa a la Tierra). ¿Qué distancia, determinada por un observador en la Tierra, recorre la nave antes de que suene la alarma del reloj?
39. Osvaldo y Diana se encuentran en reposo en el sistema S' , que se mueve con una velocidad de $0.600c$ con respecto al sistema S . Ellos juegan un juego de captura, mientras que Eduardo, en reposo en el sistema S , observa la acción (figura P26.39). Osvaldo lanza la pelota a Diana con una velocidad de $0.800c$ (según Osvaldo) y su separación (medida en S') es igual a 1.80×10^{12} m. a) De acuerdo con Diana, ¿a qué velocidad se mueve la pelota? b) De acuerdo con Diana, ¿qué tiempo se requiere para que la pelota esté a su alcance? De acuerdo con Eduardo, c) ¿qué distancia separa a Osvaldo y Diana y d) ¿qué velocidad tiene la pelota en movimiento?

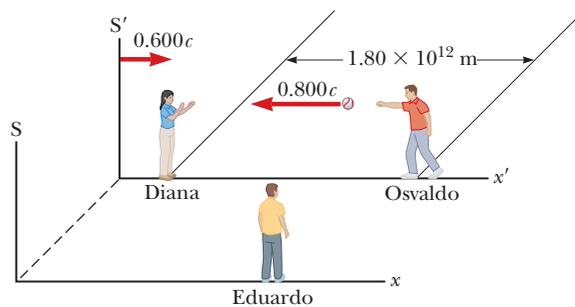


Figura P26.39

40. Un observador se mueve en una nave espacial hacia un espejo a velocidad v con respecto al marco de referencia marcado por S en la figura P26.40. El espejo es estacionario con respecto a S. Un haz de luz emitido por la nave espacial viaja hacia el espejo y se refleja de vuelta a la nave. Ésta se encuentra a una distancia d del espejo (según lo medido por los observadores en S) en el momento en que el haz de luz sale de la nave espacial. ¿Cuál es el tiempo total de viaje del pulso medido por los observadores en a) el sistema S y b) la nave espacial?

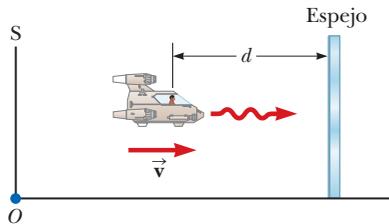


Figura P26.40

41. Una nave espacial, con longitud propia de 300 m, tarda $0.75 \mu\text{s}$ en pasar junto a un observador en la Tierra. Determine la velocidad de esta nave espacial medida por el observador en la Tierra.
42. Los rayos cósmicos de mayor energía son los protones que tienen energía cinética del orden de 10^{13} MeV. a) Desde el punto de vista del protón, ¿cuántos kilómetros tiene de diámetro la galaxia? b) ¿Cuánto tardaría un protón de esta energía en viajar a través de la Vía Láctea, que tiene un diámetro $\sim 10^5$ años luz, medido en el marco del protón?
43. **M** La expresión no relativista para la cantidad de movimiento de una partícula, $p = mv$, se puede usar si $v \ll c$. ¿Para qué velocidad el uso de esta fórmula da un error en la cantidad de movimiento de a) 1.00% y b) 10.0%?
44. a) Demuestre que una diferencia de potencial de 1.02×10^6 V sería suficiente para dar a un electrón una velocidad igual al doble de la velocidad de la luz si la mecánica newtoniana permanece válida a altas velocidades. b) ¿Qué velocidad realmente adquiriría un electrón al caer a través de una diferencia de potencial igual a 1.02×10^6 V?
45. El muón es una partícula inestable que espontáneamente decae en un electrón y dos neutrinos. En un marco de referencia en el cual el muón es estacionario, si el número de muones en $t = 0$ es N_0 , el número en el tiempo t está dado por $N = N_0 e^{-t/\tau}$, donde τ es el tiempo de vida medio, igual a $2.2 \mu\text{s}$. Suponga que los muones se mueven a una velocidad de $0.95c$ y que hay 5.0×10^4 muones en $t = 0$. a) ¿Cuál es el tiempo de vida observado de los muones? ¿Cuántos muones permanecen después de recorrer una distancia de 3.0 km?
46. Imagine que todo el Sol colapsa a una esfera de radio R_g tal que el trabajo requerido para remover una pequeña masa m de la superficie sería igual a su energía en reposo mc^2 . Este radio se llama *radio gravitacional* para el Sol. Encuentre R_g . (Se cree que el destino final de las estrellas masivas es colapsar más allá de sus radios gravitacionales en hoyos negros.)

47. Los gemelos idénticos Acelerino y Valento se unen a una migración desde la Tierra hasta el Planeta X, que está a 20.0 años luz de distancia en un marco de referencia donde ambos planetas están en reposo. Los gemelos, de la misma edad, parten al mismo tiempo en diferentes naves espaciales. La nave de Acelerino viaja de manera estacionaria a $0.950c$ y la de Valento a $0.750c$. Calcule la diferencia de edad entre los gemelos después de que la nave espacial de Valento aterriza en el Planeta X. ¿Cuál gemelo es más viejo?

48. **M** Una sonda espacial interestelar se lanza desde la Tierra. Después de un breve periodo de aceleración, se mueve con una velocidad constante, 70.0% de la velocidad de la luz. Sus baterías de potencia nuclear suministran la energía para mantener activo continuamente su transmisor de datos. Las baterías tienen una vida de 15.0 años, medida en un marco en reposo. a) ¿Cuánto duran la baterías en la sonda espacial, según mide el control de misión en la Tierra? b) ¿Cuán lejos está la sonda de la Tierra cuando sus baterías fallan, según mide el control de misión? c) ¿Cuán lejos está la sonda de la Tierra, según miden sus odómetros de viaje internos, cuando sus baterías fallan? d) ¿Durante cuánto tiempo total, después del lanzamiento, el control de misión recibe datos de la sonda? Observe que las ondas de radio viajan con la velocidad de la luz y llenan el espacio entre la sonda y la Tierra en el tiempo cuando fallan las baterías.

49. Un observador que se mueve con una velocidad de $0.995c$ relativa a una barra (figura P26.49) mide su longitud en 2.00 m y ve su longitud orientada a 30.0° con respecto a su dirección de movimiento. a) ¿Cuál es la longitud propia de la barra? b) ¿Cuál es el ángulo de orientación en un marco de referencia que se mueve con la barra?

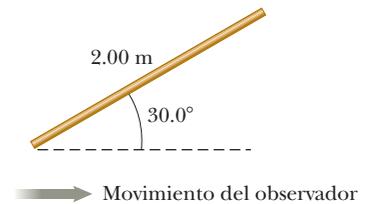
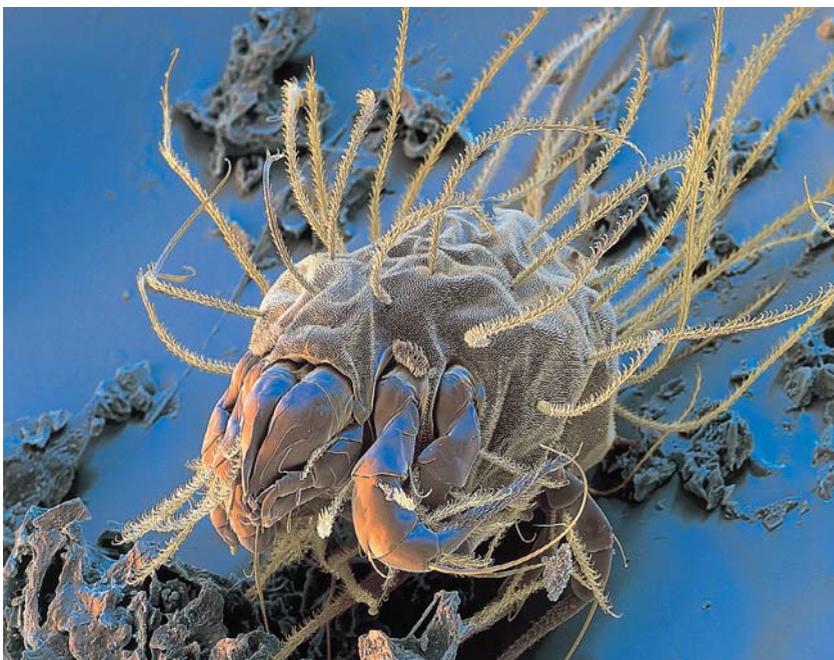


Figura P26.49 Vista de la barra que mira un observador que se mueve hacia la derecha.

50. Una nave espacial extraterrestre viajando a $0.600c$ hacia la Tierra lanza una sonda de desembarco con una guardia avanzada de agentes de compras. La sonda viaja en la misma dirección con una velocidad de $0.800c$ relativa a la nave espacial. Al ser observada en la Tierra, la nave espacial está 0.200 años luz de la Tierra cuando la sonda es lanzada. a) ¿Con qué velocidad se aproxima la sonda observada a los observadores en la Tierra? b) ¿Cuál es la distancia a la Tierra en el momento del lanzamiento de la sonda, según lo observado por los extraterrestres en la nave nodriza? c) ¿Cuánto tiempo tarda la sonda en alcanzar la Tierra según lo observado por los extraterrestres en la nave nodriza? d) Si la nave tiene una masa de 4.00×10^5 kg, ¿cuál es su energía cinética al ser observada en el marco de referencia de la Tierra?



Micrografía electrónica de barrido, mejorada en color, del ácaro *Lepidoglyphus destructor*. Estos ácaros comunes crecen hasta 0.75 mm y se alimentan de moho, harina y arroz. Viven a 25°C y alta humedad y pueden disparar alergias.

Física cuántica

27

Aunque muchos problemas se resolvieron con la teoría de la relatividad en la primera parte del siglo xx, muchos otros permanecieron sin resolverse. Los intentos por explicar el comportamiento de la materia a nivel atómico con las leyes de la física clásica fueron consistentemente fallidos. Varios fenómenos, como la radiación electromagnética emitida por un objeto caliente (radiación de cuerpo negro), la emisión de electrones mediante metales iluminados (el efecto fotoeléctrico) y la emisión de líneas espectrales características de átomos de gas en un tubo de descarga eléctrica, no se podían comprender dentro del marco conceptual de la física clásica. Sin embargo, entre 1900 y 1930, una versión moderna de la mecánica, llamada *mecánica cuántica* o *mecánica ondulatoria*, tuvo enorme éxito para explicar el comportamiento de átomos, moléculas y núcleos.

Las primeras ideas de la teoría cuántica las introdujo Planck y la mayoría de los desarrollos matemáticos posteriores, interpretaciones y mejoras las realizaron muchos físicos distinguidos, incluidos Einstein, Bohr, Schrödinger, de Broglie, Heisenberg, Born y Dirac. En este capítulo se introducen las ideas subyacentes de la teoría cuántica y la naturaleza onda-partícula de la materia y se estudian algunas aplicaciones simples de la teoría cuántica, incluidos el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y los rayos X.

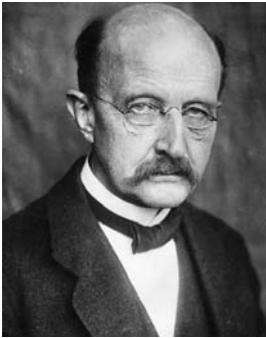
- 27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck
- 27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz
- 27.3 Rayos X
- 27.4 Difracción de rayos X mediante cristales
- 27.5 El efecto Compton
- 27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia
- 27.7 La función de onda
- 27.8 El principio de incertidumbre

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

Un objeto a cualquier temperatura emite radiación electromagnética, llamada **radiación térmica**. La ley de Stefan, que se estudió en la sección 11.5, describe la energía total radiada. El espectro de la radiación depende de la temperatura y las propiedades del objeto. A bajas temperaturas, las longitudes de onda de la radiación térmica están, principalmente,

Tip 27.1 Espera confundirlo

Sus experiencias de vida tienen lugar en el mundo macroscópico, donde los efectos cuánticos no son evidentes. Los efectos cuánticos incluso pueden ser más extraños que los efectos relativistas. Como dijo alguna vez el físico ganador del Premio Nobel, Richard Feynman: “Nadie entiende la mecánica cuántica”.

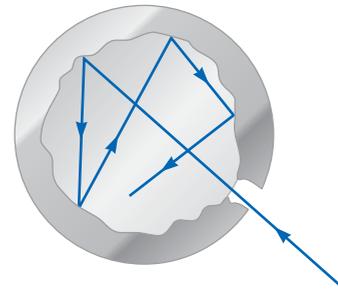


© Bettmann/CORBIS

Max Planck**Físico alemán (1858-1947)**

Planck introdujo el concepto de “cuanto de acción” (constante de Planck h) en un intento por explicar la distribución espectral de la radiación de cuerpo negro, que proporcionó los cimientos de la teoría cuántica. En 1918 recibió el Premio Nobel en Física por este descubrimiento de la naturaleza cuantizada de la energía.

Figura 27.1 Una abertura en la cavidad de un cuerpo es una buena aproximación de un cuerpo negro. Conforme la luz entra a la cavidad a través de la pequeña abertura, parte se refleja y parte es absorbida en cada reflexión desde las paredes interiores. Después de muchas reflexiones, en esencia toda la energía incidente es absorbida.



en la región infrarroja y, por lo tanto, no son observables por el ojo. Conforme la temperatura de un objeto aumenta, el objeto eventualmente comienza a brillar rojo. A temperaturas suficientemente altas, parece ser blanco, como en el brillo del filamento de tungsteno caliente de una bombilla. Un estudio cuidadoso de la radiación térmica demuestra que consiste de una distribución continua de longitudes de onda, desde las porciones infrarroja, visible y ultravioleta del espectro.

Desde un punto de vista clásico, la radiación térmica se origina a partir de partículas cargadas aceleradas cerca de la superficie de un objeto; tales cargas emiten radiación, en gran medida como lo hacen las antenas pequeñas. Las cargas térmicamente agitadas pueden tener una distribución de frecuencias, que explica el espectro continuo de la radiación emitida por el objeto. Hacia finales del siglo XIX, resultó claro que la teoría clásica de la radiación térmica era inadecuada. El problema básico estaba en la comprensión de la distribución de energía observada como función de la longitud de onda en la radiación emitida por un cuerpo negro. Por definición, un **cuerpo negro** es un sistema ideal que absorbe *toda* la radiación que incide sobre él. Una buena aproximación de un cuerpo negro es un pequeño orificio que conduce al interior de un objeto hueco, como se muestra en la figura 27.1. La naturaleza de la radiación emitida a través del pequeño orificio que conduce a la cavidad depende *solamente de la temperatura* de las paredes de la cavidad, y no, en absoluto, de la composición material del objeto, su forma u otros factores.

En la figura activa 27.2 se muestran datos experimentales para la distribución de energía en la radiación de cuerpo negro a tres temperaturas. La energía radiada varía con la longitud de onda y la temperatura. Conforme aumenta la temperatura del cuerpo negro, aumenta la cantidad total de energía (área bajo la curva) que emite. Además, con temperatura creciente, el pico de la distribución se corre hacia longitudes de onda más cortas. Este corrimiento obedece la siguiente relación, llamada **ley de desplazamiento de Wien**,

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad [27.1]$$

donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda la cual tiene pico la curva y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

■ FÍSICA APLICADA 27.1 Colores de las estrellas

Si observa cuidadosamente las estrellas en el cielo nocturno, puede distinguir tres colores principales: rojo, blanco y azul. ¿Qué causa estos colores particulares?

EXPLICACIÓN Estos colores resultan de las diferentes temperaturas superficiales de las estrellas. Una estrella relativamente fría, con una temperatura superficial de 3000 K, tiene una curva de radiación similar a la curva media en la figura

activa 27.2. El pico en esta curva está por arriba de las longitudes de onda visibles, 0.4 a 0.7 μm , más allá de la longitud de onda de la luz roja, de modo que se emite significativamente más radiación dentro del rango visible en el extremo rojo que en el extremo azul del espectro. En consecuencia, la estrella parece de color rojizo, similar al brillo rojo del quemador de una hornilla eléctrica. ■

Una estrella más caliente tiene una curva de radiación más parecida a la curva superior de la figura activa 27.2. En este caso la estrella emite radiación significativa a todo lo largo del rango visible, y la combinación de todos los colores hace que la estrella parezca blanca. Tal es el caso del Sol, con una temperatura superficial de 5800 K. Para estrellas mucho más calientes, el pico puede correrse tanto por abajo del rango visible que se emite significati-

vamente más radiación azul que roja, de modo que la estrella parece de color azulado. Las estrellas más frías que el Sol tienden a mostrar colores anaranjado y rojo. La temperatura superficial de una estrella se puede obtener al encontrar primero la longitud de onda que corresponde al máximo en la curva de intensidad frente a la longitud de onda y luego sustituir dicha longitud de onda en la ley de Wien. Por ejemplo, si la longitud de onda es $2.30 \times 10^{-7} \text{ m}$, la temperatura superficial sería

$$T = \frac{0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}}{\lambda_{\text{máx}}} = \frac{0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}}{2.30 \times 10^{-7} \text{ m}} = 1.26 \times 10^4 \text{ K}$$

Los intentos por usar ideas clásicas para explicar las formas de las curvas que se muestran en la figura activa 27.2 fracasaron. La figura activa 27.3 muestra una gráfica experimental del espectro de radiación de cuerpo negro (curva roja), junto con la imagen teórica de cómo debería verse esta curva con base en teorías clásicas (curva azul). A longitudes de onda largas, la teoría clásica está en buena concordancia con los datos experimentales. Sin embargo, a longitudes de onda cortas, existe mayor desacuerdo entre la teoría clásica y los experimentos. Conforme λ tiende a cero, la teoría clásica erróneamente predice que la intensidad debe tender a infinito, cuando los datos experimentales muestran que debe aproximarse a cero.

En 1900, Planck desarrolló una fórmula para radiación de cuerpo negro que concordaba por completo con los experimentos en todas las longitudes de onda, lo que condujo a una curva que se muestra mediante la línea roja en la figura activa 27.3. Planck supuso que la radiación de cuerpo negro era producto de osciladores cargados submicroscópicos, que llamó *resonadores*. Asumió que las paredes de una cavidad que brilla estaban compuestas de miles de millones de estos resonadores, aunque su naturaleza exacta era desconocida. A los resonadores se les permitió tener sólo ciertas energías discretas E_n , dadas por

$$E_n = nhf \quad [27.2]$$

donde n es un entero positivo llamado **número cuántico**, f es la frecuencia de vibración del resonador y h es una constante conocida como **constante de Planck**, que tiene el valor

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad [27.3]$$

Puesto que la energía de cada resonador puede tener sólo valores discretos dados por la ecuación 27.2, se dice que la energía está *cuantizada*. Cada valor de energía discreta representa un diferente *estado cuántico* y cada valor de n representa un estado cuántico específico. (Cuando el resonador está en el estado cuántico $n = 1$, su energía es hf ; cuando está en el estado cuántico $n = 2$, su energía es $2hf$; etcétera.)

El punto clave en la teoría de Planck es la suposición de los estados de energía cuantizados. Esta separación radical de la física clásica es el “salto cuántico” que condujo a una comprensión totalmente novedosa de la Naturaleza. Es impactante: es como decir que una bola de béisbol lanzada sólo puede tener un número fijo de diferentes velocidades y ninguna velocidad entre dichos valores fijos. El hecho de que la energía puede asumir sólo ciertos valores discretos en lugar de cualquiera de un continuo de valores es la única diferencia principal importante entre la teoría cuántica y las teorías clásicas de Newton y Maxwell.

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

En la parte final del siglo XIX, los experimentos demostraron que la luz que incide sobre ciertas superficies metálicas provoca la emisión de electrones de éstas. Este fenómeno se conoce como **efecto fotoeléctrico** y los electrones emitidos se llaman **fotoelectrones**. El primer descubrimiento de este fenómeno lo realizó Hertz, quien también fue el primero en producir las ondas electromagnéticas predichas por Maxwell.

La figura activa 27.4 (página 914) es un diagrama esquemático de un aparato de efecto fotoeléctrico. Un tubo de vidrio al vacío, conocido como fotocelda, contiene una placa

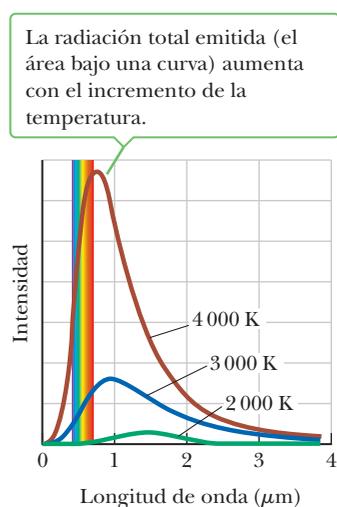


Figura activa 27.2 Intensidad de radiación de cuerpo negro frente a la longitud de onda a tres temperaturas diferentes. El rango visible de la longitud de onda está entre $4 \mu\text{m}$ y $7 \mu\text{m}$. Aproximadamente a 6000 K , el pico está en el centro de la longitud de onda visible y el objeto aparece en blanco.

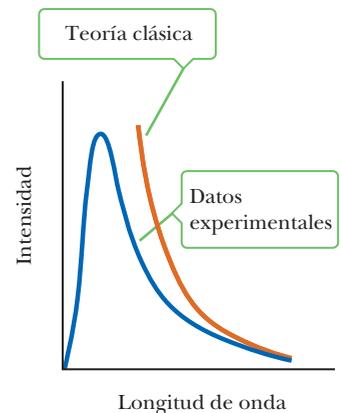


Figura activa 27.3 Comparación de datos experimentales con la teoría clásica de la radiación de cuerpo negro. La teoría de Planck coincide perfectamente con los datos experimentales.

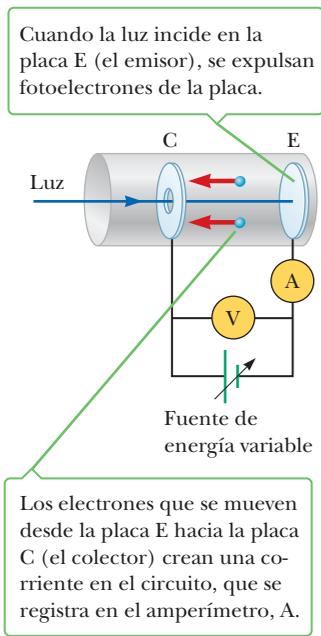


Figura activa 27.4 Diagrama de circuito para estudiar el efecto fotoeléctrico.

metálica E (el emisor) conectado a la terminal negativa de una fuente de energía variable. Otra placa metálica, C (el colector), se mantiene a un potencial positivo mediante la fuente de energía. Cuando el tubo se conserva en la oscuridad, el amperímetro lee cero, lo que indica que no hay corriente en el circuito. Sin embargo, cuando la placa E se ilumina con luz que tiene una longitud de onda más corta que cierta longitud de onda particular que depende del material utilizado para formar la placa E, el amperímetro detecta una corriente, lo que indica un flujo de cargas a través de la diferencia entre E y C. Esta corriente surge de los fotoelectrones emitidos de la placa negativa E y recolectados en la placa positiva C.

La figura 27.5 es una gráfica de la corriente fotoeléctrica frente a la diferencia de potencial ΔV entre E y C para dos intensidades de luz. A grandes valores de ΔV , la corriente alcanza un valor máximo. Además, la corriente aumenta conforme se incrementa la intensidad de la luz incidente, como era de esperarse. Finalmente, cuando ΔV es negativa (esto es, cuando el suministro de electricidad en el circuito se invierte para hacer E positivo y C negativo), la corriente cae a un valor bajo porque la mayoría de los fotoelectrones emitidos los repele a la ahora placa negativa C. En esta situación, sólo aquellos electrones que tienen una energía cinética mayor que la magnitud de $e\Delta V$ llegan a C, donde e es la carga del electrón.

Cuando ΔV es igual a o menor que $-\Delta V_s$, el **potencial de frenado**, ningún electrón llega a C y la corriente es cero. El potencial de frenado es *independiente* de la intensidad de la radiación. La máxima energía cinética de los fotoelectrones se relaciona con el potencial de frenado mediante la relación

$$eC_{\text{máx}} = e\Delta V_s \quad [27.4]$$

Muchas características del efecto fotoeléctrico no se pueden explicar con la física clásica o con la teoría ondulatoria de la luz:

- No se emiten electrones si la frecuencia de la luz incidente cae por abajo de cierta **frecuencia de corte** f_c , también llamada frecuencia umbral, que es característica del material que se ilumina. Este hecho es consistente con la teoría ondulatoria, que predice que el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a *cualquier* frecuencia, siempre que la intensidad de la luz sea suficientemente alta.
- La máxima energía cinética de los fotoelectrones es independiente de la intensidad de la luz. De acuerdo con la teoría ondulatoria, la luz de mayor intensidad debe portar más energía hacia el metal por unidad de tiempo y, en consecuencia, expulsar fotoelectrones que tengan mayores energías cinéticas.
- La máxima energía cinética de los fotoelectrones aumenta con el aumento de la frecuencia de la luz. La teoría ondulatoria no predice relación entre la energía de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz incidente.
- Los electrones se emiten de la superficie casi de manera instantánea (menos de 10^{-9} s después de iluminar la superficie), incluso a bajas intensidades de luz.

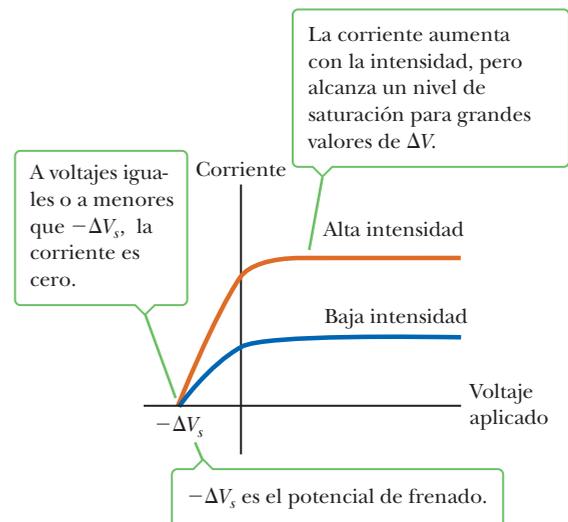


Figura 27.5 Corriente fotoeléctrica frente a la diferencia de potencial aplicado para dos intensidades de luz.

De manera clásica, se espera que los fotoelectrones requieran cierto tiempo para absorber la radiación incidente antes de que adquieran suficiente energía cinética para escapar del metal.

Una explicación exitosa del efecto fotoeléctrico la proporcionó Einstein en 1905, el mismo año que publicó su teoría de la relatividad especial. Como parte de un ensayo general acerca de la radiación electromagnética, por el cual recibió el Premio Nobel de Física en 1921, Einstein extendió el concepto de cuantización de Planck a las ondas electromagnéticas. Sugirió que un pequeño paquete de energía luminosa o **fotón** se emitiría cuando un oscilador cuantizado realizara un salto desde un estado de energía $E_n = nhf$ hacia el siguiente estado más bajo, $E_{n-1} = (n - 1)hf$. La conservación de la energía requeriría la disminución en energía del oscilador, hf , para igualar la energía del fotón E , de modo que

$$E = hf \quad [27.5]$$

donde h es la constante de Planck y f es la frecuencia de la luz, que es igual a la frecuencia del oscilador de Planck.

El punto clave aquí es que la energía luminosa perdida por el emisor, hf , permanece muy localizada en un pequeño paquete o partícula llamada fotón. En el modelo de Einstein, un fotón está tan localizado que puede ceder *toda* su energía hf a un solo electrón en el metal. De acuerdo con Einstein, la máxima energía cinética para estos fotoelectrones liberados es

$$EC_{\text{máx}} = hf - \phi \quad [27.6]$$

donde ϕ se llama **función de trabajo** del metal. La función de trabajo, que representa la mínima energía con la que un electrón se enlaza en el metal, está en el orden de algunos electrón-volts. La tabla 27.1 enlista las funciones de trabajo para varios metales.

Con la teoría fotónica de la luz es posible explicar las características anteriormente mencionadas del efecto fotoeléctrico que no se pueden comprender usando los conceptos de la física clásica:

- Los fotoelectrones se crean por absorción de un solo fotón, de modo que la energía de dicho fotón debe ser mayor que o igual a la función de trabajo, de otro modo no se producirán fotoelectrones. Esto explica la frecuencia de corte.
- A partir de la ecuación 27.6, $EC_{\text{máx}}$ sólo depende de la frecuencia de la luz y el valor de la función de trabajo. La intensidad de la luz es inmaterial porque la absorción de un solo fotón es responsable del cambio en energía cinética del electrón.
- La ecuación 27.6 es lineal en la frecuencia, de modo que $EC_{\text{máx}}$ aumenta con la frecuencia.
- Los electrones se emiten de manera casi instantánea, sin importar la intensidad, porque la energía luminosa está concentrada en paquetes en vez de dispersa en ondas. Si la frecuencia es suficientemente alta, no se necesita tiempo para que el electrón adquiera en forma gradual suficiente energía para escapar del metal.

Experimentalmente, se observa una relación lineal entre f y $EC_{\text{máx}}$, como se bosqueja en la figura 27.6. La intersección con el eje horizontal, que corresponde a $EC_{\text{máx}} = 0$, da la frecuencia de corte por debajo de la cual no se emiten fotoelectrones, sin importar la intensidad de la luz. La *longitud de onda* de corte λ_c se puede derivar de la ecuación 27.6:

$$EC_{\text{máx}} = hf_c - \phi = 0 \quad \rightarrow \quad h \frac{c}{\lambda_c} - \phi = 0$$

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} \quad [27.7]$$

donde c es la velocidad de la luz. Las longitudes de onda *mayores* que λ_c incidentes sobre un material con función de trabajo ϕ no resultan en la emisión de fotoelectrones.

◀ Energía de un fotón

◀ Ecuación del efecto fotoeléctrico

Tabla 27.1 Funciones de trabajo de metales seleccionados

Metal	ϕ (eV)
Ag	4.73
Al	4.08
Cu	4.70
Fe	4.50
Na	2.46
Pb	4.14
Pt	6.35
Zn	4.31

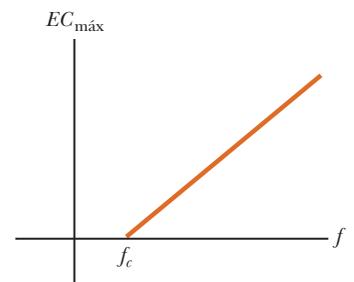


Figura 27.6 Bosquejo de $EC_{\text{máx}}$ frente a la frecuencia de la luz incidente en un experimento típico de efecto fotoeléctrico. Los fotones con frecuencias menores que f_c no tienen suficiente energía para expulsar un electrón del metal.

EJEMPLO 27.1 Fotelectrones del sodio

OBJETIVO Comprender la cuantización de la luz y su papel en el efecto fotoeléctrico.

PROBLEMA Una superficie de sodio se ilumina con luz de $0.300 \mu\text{m}$ de longitud de onda. La función de trabajo para el sodio es 2.46 eV . Calcule **a)** la energía de cada fotón en electrón-volts, **b)** la máxima energía cinética de los fotelectrones expulsados y **c)** la longitud de onda de corte para el sodio.

ESTRATEGIA Los incisos a), b) y c) requieren sustitución de valores en las ecuaciones 27.5, 27.6 y 27.7, respectivamente.

SOLUCIÓN

a) Calcule la energía de cada fotón.

Obtenga la frecuencia a partir de la longitud de onda:

Use la ecuación 27.5 para calcular la energía del fotón:

$$c = f\lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.00 \times 10^8 \text{ m/s}}{0.300 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

$$f = 1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$E = hf = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(1.00 \times 10^{15} \text{ Hz}) \\ = 6.63 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= (6.63 \times 10^{-19} \text{ J}) \left(\frac{1.00 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = \mathbf{4.14 \text{ eV}}$$

b) Encuentre la máxima energía cinética de los fotelectrones.

Sustituya en la ecuación 27.6:

c) Calcule la longitud de onda de corte.

Convierta ϕ de electrón-volts a joules:

$$E_{C_{\text{máx}}} = hf - \phi = 4.14 \text{ eV} - 2.46 \text{ eV} = \mathbf{1.68 \text{ eV}}$$

$$\phi = 2.46 \text{ eV} = (2.46 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) \\ = 3.94 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Encuentre la longitud de onda de corte a partir de la ecuación 27.7.

$$\lambda_c = \frac{hc}{\phi} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{3.94 \times 10^{-19} \text{ J}} \\ = 5.05 \times 10^{-7} \text{ m} = \mathbf{505 \text{ nm}}$$

COMENTARIOS La longitud de onda de corte está en la región amarillo-verde del espectro visible.

PREGUNTA 27.1 Verdadero o Falso: Suponga que en un experimento fotoeléctrico dado, la frecuencia de la luz es mayor que la frecuencia de corte. La magnitud del potencial de frenado, entonces, es mayor que la energía de los fotones incidentes.

EJERCICIO 27.1 a) ¿Cuál es la frecuencia mínima de la luz para expulsar fotelectrones de una superficie de cobre? b) Si esta frecuencia se triplica, encuentre la máxima energía cinética (en eV) de los fotelectrones resultantes.

RESPUESTAS a) $1.13 \times 10^{15} \text{ Hz}$ b) 9.40 eV

APLICACIÓN

Fotoceldas

Fotoceldas

El efecto fotoeléctrico tiene muchas aplicaciones interesantes que usan un dispositivo llamado *fotocelda*. La fotocelda que se muestra en la figura activa 27.4 produce una corriente en el circuito cuando la luz de frecuencia suficientemente alta cae sobre la celda, mas no permite una corriente en la oscuridad. Este dispositivo se utiliza en luminarias: una unidad de control fotoeléctrico en la base de la luminaria activa un interruptor que apaga la lámpara cuando la golpea la luz ambiente. Muchos sistemas de puertas de garaje y elevadores usan un haz de luz y una fotocelda como una característica de seguridad en su diseño. Cuando el haz de luz golpea la fotocelda, la corriente eléctrica generada es suficientemente grande para mantener un circuito cerrado. Cuando un objeto o persona bloquea el haz de luz, la corriente se interrumpe, lo que señala la apertura de la puerta.

27.3 Rayos X

Wilhelm Röntgen descubrió los rayos X en 1895 y más tarde se identificaron como ondas electromagnéticas, por una sugerencia de Max von Laue en 1912. Los rayos X tienen frecuencias más altas que la radiación ultravioleta y pueden penetrar la mayoría de los materiales con relativa facilidad. Las longitudes de onda típicas de los rayos X son de aproximadamente

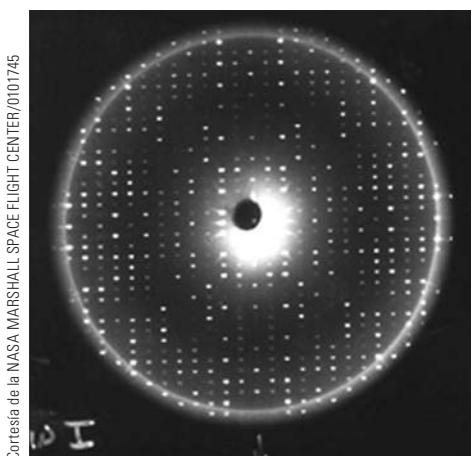


Figura 27.7 Un patrón de difracción de rayos X de un cristal de proteína bien ordenada puede ser analizado matemáticamente con potentes computadoras, lo que lleva a la determinación de la estructura de la proteína. Una vez que la estructura se conoce, las moléculas pueden ser diseñadas para que ajusten en el sitio activo de la proteína. Dichas moléculas se pueden utilizar en el desarrollo de fármacos terapéuticos que desactivan una proteína sin afectar a otros sistemas biológicos.

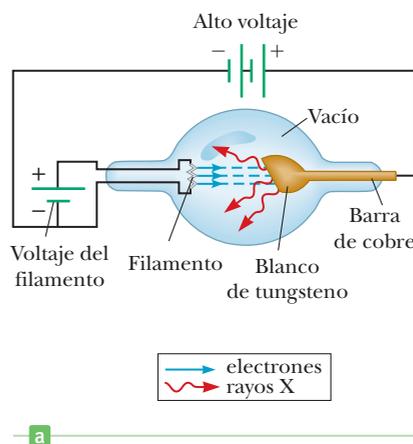
0.1 nm, que está en el orden del espaciamiento atómico en un sólido. Como resultado, se pueden difractar en los espaciamientos atómicos regulares en una red cristalina, que actúa como rejilla de difracción. En la figura 27.7 se muestra el patrón de difracción de rayos X de un cristal de una proteína bien ordenada.

Los rayos X se producen cuando electrones a alta velocidad se frenan súbitamente, por ejemplo como cuando a un blanco metálico lo golpean electrones que se aceleraron a través de una diferencia de potencial de varios miles de volts. La figura 27.8a muestra un diagrama esquemático de un tubo de rayos X. Una corriente en el filamento provoca la emisión de electrones y estos electrones liberados se aceleran hacia un blanco metálico denso, como tungsteno, que se mantiene a un potencial superior que el filamento.

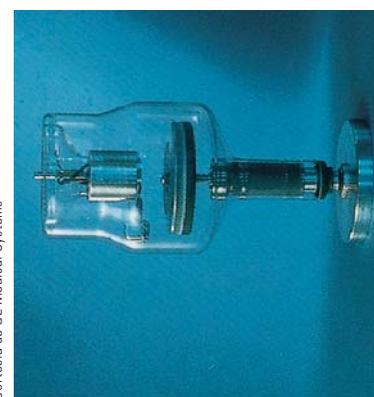
La figura 27.9 representa una gráfica de intensidad de rayos X frente a la longitud de onda para el espectro de radiación emitido por un tubo de rayos X. Observe que el espectro tiene dos componentes distintos. Un componente es un espectro ancho continuo que depende del voltaje aplicado al tubo. Superpuesta sobre este componente hay una serie de estrechas líneas intensas que dependen de la naturaleza del material del blanco. Para observar estas líneas, que representan la radiación emitida por los átomos del blanco conforme los electrones experimentan reordenamientos, el voltaje de aceleración debe superar cierto valor, llamado **voltaje umbral**. En el capítulo 28 se estudia más el voltaje umbral. La radiación continua a veces se llama **bremstrahlung**, palabra alemana que significa “radiación que frena”, porque los electrones emiten radiación cuando experimentan una aceleración dentro del blanco.

La figura 27.10 ilustra cómo se producen rayos X cuando un electrón pasa cerca de un núcleo objetivo cargado. Conforme el electrón pasa cerca de un núcleo con carga positiva contenido en el material objetivo, se desvía de su trayectoria debido a su atracción eléctrica hacia el núcleo; por ende, experimenta una aceleración. Un análisis a partir de la física clásica demuestra que cualquier partícula cargada emitirá radiación electromagnética cuando se acelera. (Un ejemplo de este fenómeno es la producción de ondas electromagnéticas mediante cargas aceleradas en una antena de radio, como se describe en el capítulo 21.) De acuerdo con la teoría cuántica, esta radiación debe aparecer en la forma de fotones. Puesto que el fotón radiado que se muestra en la figura 27.10 porta energía, el electrón debe perder energía cinética debido a su encuentro con el núcleo objetivo. Un ejemplo extremo consiste del electrón que pierde toda su energía en una sola colisión. En este caso la energía inicial del electrón ($e \Delta V$) se transforma por completo en la energía del fotón ($hf_{\text{máx}}$). En forma de ecuación,

$$e \Delta V = hf_{\text{máx}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{mín}}} \quad [27.8]$$



a



b

Figura 27.8 a) Diagrama de un tubo de rayos X. b) Fotografía de un tubo de rayos X.

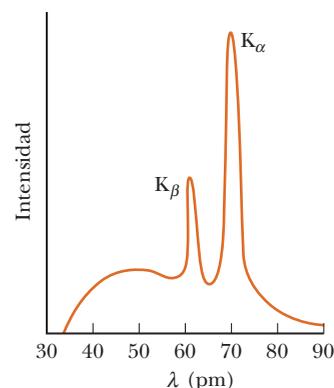


Figura 27.9 El espectro de rayos X de un blanco metálico consiste de un espectro continuo ancho más algunas líneas estrechas, que se deben a rayos X característicos. Los datos que se muestran se obtuvieron cuando electrones de 35 keV bombardearon un objetivo de molibdeno. Observe que $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 10^{-3} \text{ nm}$.

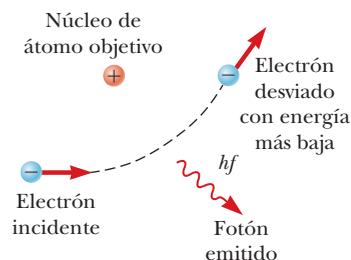


Figura 27.10 Un electrón que pasa cerca de un átomo objetivo cargado experimenta una aceleración y en el proceso se emite un fotón.

donde $e\Delta V$ es la energía del electrón después de que se aceleró a través de una diferencia de potencial de ΔV volts y e es la carga del electrón. Esta ecuación dice que la radiación con longitud de onda más corta que se puede producir es

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{e\Delta V} \quad [27.9]$$

No toda la radiación producida tiene esta longitud de onda particular porque muchos de los electrones no se detienen en una sola colisión. El resultado es la producción del espectro continuo de longitudes de onda.

Los rayos X proporcionan interesantes perspectivas del proceso de pintura y la revisión de obras maestras. Algunas pinturas, como las que tienen plomo, cadmio, cromo o cobalto como base, absorben en grados variables rayos X con longitud de onda larga. Las interacciones de los rayos X con las pinturas proporcionan contraste porque los diferentes elementos en las pinturas tienen distintas densidades de electrones. Además, las capas más gruesas absorberán más que las capas delgadas. Para examinar una pintura de un antiguo maestro, se coloca una película detrás mientras se expone a rayos X desde el frente. Cuando se revela la película, en ocasiones aparecen los contornos fantasmales de las pinturas anteriores y las formas primigenias de la obra maestra final.

APLICACIÓN

Uso de rayos X para estudiar la obra de pintores maestros

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

En el capítulo 24 se describió cómo se puede usar una rejilla de difracción para medir la longitud de onda de la luz. En principio, la longitud de onda de *cualquier* onda electromagnética se puede medir si se encuentra una rejilla con un espaciamento lineal adecuado. El espaciamento entre líneas debe ser aproximadamente igual a la longitud de onda de la radiación a medir. Los rayos X son ondas electromagnéticas con longitudes de onda del orden de 0.1 nm. Sería imposible construir una rejilla con un espaciamento tan pequeño. Sin embargo, como se anotó en la sección anterior, el arreglo regular de átomos en un cristal podría actuar como una rejilla tridimensional para observar la difracción de rayos X.

En la figura 27.11 se muestra un arreglo experimental para observar rayos X. Un haz estrecho de rayos X, con un rango de longitud de onda continuo, incide sobre un cristal como el cloruro de sodio. La radiación difractada es muy intensa en ciertas direcciones, lo que corresponde a interferencia constructiva a partir de ondas reflejadas desde capas de átomos en el cristal. La radiación difractada se detecta mediante una película fotográfica y forma un arreglo de puntos conocido como *patrón de Laue*. La estructura cristalina se determina al analizar las posiciones e intensidades de los puntos en el patrón.

En la figura 27.12 se muestra el arreglo de átomos en un cristal de NaCl. Las esferas rojas más pequeñas representan iones Na^+ y las esferas azules más grandes representan iones Cl^- . El espaciamento entre iones Na^+ (o Cl^-) sucesivos en esta estructura cúbica, que se denota mediante el símbolo a en la figura 27.12, es aproximadamente 0.563 nm.

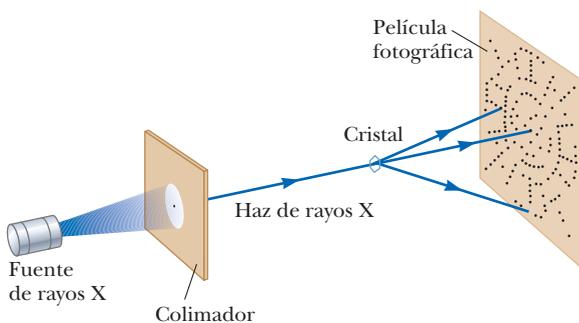


Figura 27.11 Diagrama esquemático de la técnica utilizada para observar la difracción de rayos X por un solo cristal. El conjunto de puntos formados en la película por los haces difractados se llama patrón de Laue. (Véase la figura 27.7.)

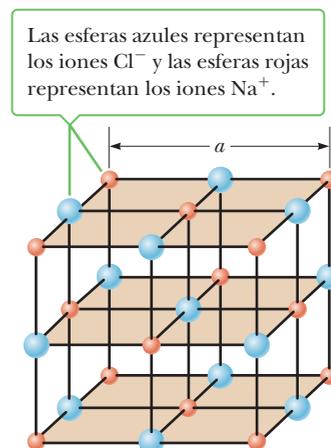


Figura 27.12 Modelo de la estructura cristalina cúbica del cloruro de sodio. La longitud de la arista del cubo es $a = 0.563$ nm.

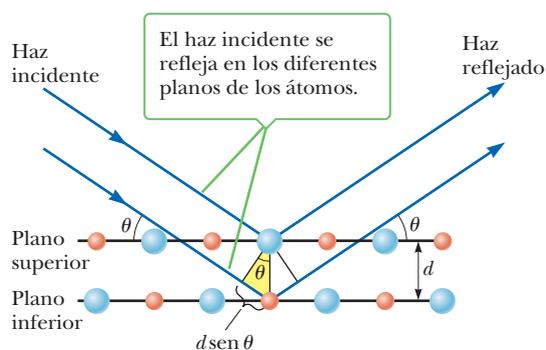


Figura 27.13 Bosquejo bidimensional de la reflexión de un haz de rayos X desde dos planos cristalinos paralelos separados una distancia d . El haz reflejado del plano inferior viaja más lejos que el que se refleja del plano superior por una cantidad igual a $2d \sin \theta$.

Un examen cuidadoso de la estructura de NaCl muestra que los iones se encuentran en varios planos. Las áreas sombreadas en la figura 27.12 representan un ejemplo en el cual los átomos yacen en planos igualmente espaciados. Ahora suponga que un haz de rayos X incide en un ángulo rasante θ sobre uno de los planos, como en la figura 27.13. El haz se puede reflejar tanto del plano superior como del inferior de los átomos. Sin embargo, la construcción geométrica en la figura 27.13 muestra que el haz reflejado de la superficie inferior viaja más lejos que el haz reflejado de la superficie superior por una distancia de $2d \sin \theta$. Las dos porciones del haz reflejado se combinarán para producir interferencia constructiva cuando esta diferencia de trayectoria iguale cierto múltiplo entero de la longitud de onda λ . La condición para interferencia constructiva está dada por

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad [27.10]$$

◀ Ley de Bragg

Esta condición se conoce como **ley de Bragg**, en honor a W. L. Bragg (1890-1971), quien fue el primero en derivar la relación. Si se miden la longitud de onda y el ángulo de difracción, se puede usar la ecuación 27.10 para calcular el espaciamiento entre planos atómicos.

La técnica de difracción de rayos X se usa para determinar el arreglo atómico de moléculas orgánicas complejas como las proteínas. Las proteínas son moléculas grandes que contienen miles de átomos que ayudan a regular y acelerar los procesos químicos de la vida en las células. Algunas proteínas son sorprendentes catalizadores, que aceleran las lentas reacciones a temperatura ambiente en las células por 17 órdenes de magnitud. Para comprender esta increíble reactividad química, es importante determinar la estructura de estas intrincadas moléculas.

La principal técnica que se utiliza para determinar la estructura molecular de las proteínas, el ADN y el ARN es la difracción de rayos X que usan rayos X con longitud de onda de aproximadamente 1 \AA ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$). Esta técnica permite al experimentador “ver” átomos individuales que están separados por más o menos esta distancia en las moléculas. Puesto que la muestra bioquímica para difracción de rayos X se prepara en forma cristalina, la *geometría* (posición de los puntos brillantes en el espacio) del patrón de difracción se determina mediante el arreglo reticular cristalino tridimensional de las moléculas en la muestra. Las *intensidades* de los puntos de difracción brillantes se determinan por los átomos y sus distribuciones electrónicas en los bloques constructores fundamentales del cristal: la célula individual. Con el uso de complicadas técnicas computacionales, los investigadores en esencia pueden deducir la estructura molecular al relacionar las intensidades observadas de haces difractados con una serie de posiciones atómicas supuestas que determinan la estructura atómica y la densidad de electrones de la molécula.

Cristalizar una molécula grande como el ADN y obtener su patrón de difracción de rayos X es enormemente desafiante. En el caso del ADN, obtener cristales suficientemente puros es en especial difícil porque existen dos formas cristalinas, A y B, que surgen en forma mixta durante la preparación. Estas dos formas resultan en patrones de difracción que no se pueden descifrar fácilmente. En 1951, Rosalind Franklin, una investigadora en el King’s College de Londres, desarrolló un ingenioso método de separación para las dos formas y pudo obtener excelentes imágenes de difracción de rayos X de ADN cristalino puro en forma B. Con estas imágenes determinó que la forma helicoidal del ADN consistía de dos hélices entrelazadas, con el esqueleto de azúcar fosfato en el exterior de la molécula, lo que refutaba modelos previos que tenían el esqueleto en el interior. En la figura 27.14 se muestra una de sus imágenes.

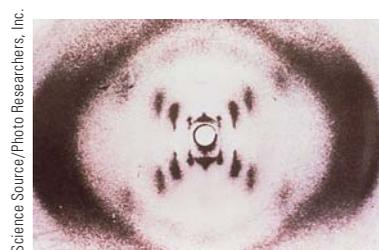


Figura 27.14 Fotografía de difracción de rayos X de ADN tomada por Rosalind Franklin. El patrón en cruz de las manchas fue una pista de que el ADN tenía una estructura helicoidal.



James Watson y Francis Crick usaron el trabajo de Franklin para descubrir mayores detalles de la molécula y su función en la herencia, en particular en cuanto a la estructura interna. Junto a cada unidad de azúcar-fosfato de cada hélice hay una de cuatro bases moleculares: adenina, citosina, guanina o timina. Las bases están ordenadas en secuencia a lo largo de la hélice, con patrones en la secuencia de bases que actúan como códigos para proteínas que realizan varias funciones para un organismo dado. Las bases en una hélice se enlazan a las de la otra hélice, lo que forma una doble hélice. En la figura 27.15 se muestra un modelo de la doble hélice. En 1962, Watson, Crick y un colega de Franklin, Maurice Wilkins, recibieron el Premio Nobel de Fisiología y Medicina por su trabajo para comprender la estructura y función del ADN. Franklin habría compartido el premio, pero murió en 1958 de cáncer a la edad de 38 años. (El premio no se otorga de manera póstuma.)

Figura 27.15 La estructura de doble hélice del ADN.

■ EJEMPLO 27.2 Difracción de rayos X de la calcita

OBJETIVO Comprender la ley de Bragg y aplicarla a un cristal.

PROBLEMA Si el espaciamiento entre ciertos planos en un cristal de calcita (CaCO_3) es 0.314 nm, encuentre los ángulos rasantes a los que ocurrirá interferencia de primero y tercer orden para rayos X con longitud de onda de 0.070 0 nm.

ESTRATEGIA Resuelva la ley de Bragg para $\sin \theta$ y sustituya, y aplique la función seno inverso para obtener el ángulo.

SOLUCIÓN

Encuentre el ángulo rasante que corresponde a $m = 1$, para interferencia de primer orden:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{(0.070\ 0\ \text{nm})}{2(0.314\ \text{nm})} = 0.111$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.111) = 6.37^\circ$$

Repita el cálculo para interferencia de tercer orden ($m = 3$):

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2d} = \frac{3(0.070\ 0\ \text{nm})}{2(0.314\ \text{nm})} = 0.334$$

$$\theta = \sin^{-1}(0.334) = 19.5^\circ$$

COMENTARIOS Advierta que hay poca diferencia entre este tipo de problema y el experimento de rendija de Young.

PREGUNTA 27.2 Verdadero o Falso: Un ángulo rasante pequeño implica una menor distancia entre planos en la red cristalina.

EJERCICIO 27.2 Rayos X, con 0.060 0 nm de longitud de onda, se dispersan de un cristal con un ángulo de roce de 11.7° . Suponga $m = 1$ para este proceso. Calcule el espaciamiento entre los planos del cristal.

RESPUESTA 0.148 nm

27.5 El efecto Compton

Más justificación para la naturaleza fotónica de la luz provino de un experimento que realizó Arthur H. Compton en 1923. En su experimento, Compton dirigió un haz de rayos X con longitud de onda λ_0 hacia un bloque de grafito. Descubrió que los rayos X dispersados tenían una longitud de onda λ ligeramente mayor que los rayos X incidentes y, por lo tanto, las energías de los rayos dispersados era menor. La cantidad de reducción de energía dependió del ángulo al cual se dispersaron los rayos X. El cambio en longitud de onda $\Delta\lambda$ entre un rayo X disperso y un rayo X incidente se llamó **corrimiento Compton**.

Para explicar este fenómeno, Compton supuso que si un fotón se comporta como una partícula, su colisión con otras partículas es similar a una colisión entre dos bolas de billar. Por lo tanto, el fotón de rayos X lleva tanto *energía* como *cantidad de movimiento* mensurables, y estas dos cantidades se deben conservar en una colisión. Si el fotón incidente choca



Cortesía de AIP, Niels Bohr Library

Arthur Holly Compton Físico estadounidense (1892-1962)

Compton asistió al Wooster College y a Princeton University. Fue director del laboratorio en la Universidad de Chicago, donde realizó trabajo experimental relacionado con las reacciones en cadena sostenidas. Este trabajo fue de gran importancia para la construcción de la primera bomba atómica. Debido a su descubrimiento del efecto Compton y su trabajo con rayos cósmicos, compartió el Premio Nobel de Física, en 1927, con Charles Wilson.

con un electrón inicialmente en reposo, como en la figura 27.16, el fotón transfiere parte de su energía y cantidad de movimiento al electrón. Como consecuencia, la energía y la frecuencia del fotón disperso se reducen y su longitud de onda aumenta. Al aplicar la conservación de energía y cantidad de movimiento relativistas a la colisión descrita en la figura 27.16, el corrimiento en longitud de onda del fotón disperso está dada por

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad [27.11]$$

donde m_e es la masa del electrón y θ es el ángulo entre las direcciones de los fotones dispersado e incidente. La cantidad $h/m_e c$ se llama **longitud de onda de Compton** y tiene un valor de 0.002 43 nm. La longitud de onda de Compton es muy pequeña en relación con las longitudes de onda de la luz visible, de modo que el corrimiento en longitud de onda sería difícil de detectar si se usara luz visible. Más aún, observe que el corrimiento Compton depende del ángulo de dispersión θ y no de la longitud de onda. Resultados experimentales para dispersión de rayos X en varios blancos obedecen la ecuación 27.11 y apoyan fuertemente el concepto de fotón.

Examen rápido

27.1 Verdadero o Falso: Cuando un fotón se dispersa de un electrón, el fotón pierde energía.

27.2 Un fotón de rayos X se dispersa mediante un electrón. ¿La frecuencia del fotón dispersado en relación con la del fotón incidente a) aumenta, b) disminuye o c) permanece igual?

27.3 Un fotón de energía E_0 golpea un electrón libre y el fotón dispersado con energía E se mueve en la dirección opuesta a la del fotón incidente. En esta interacción de efecto Compton, ¿cuál es la energía cinética resultante del electrón? a) E_0 , b) E , c) $E_0 - E$, d) $E_0 + E$

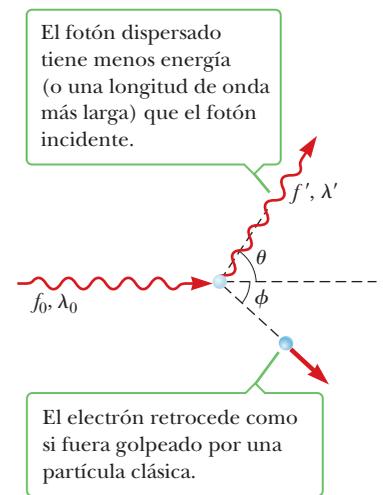


Figura 27.16 Diagrama que representa la dispersión Compton de un fotón por un electrón.

◀ Fórmula de corrimiento Compton

EJEMPLO 27.3 Dispersión de rayos X

OBJETIVO Comprender la dispersión Compton y su efecto sobre la energía del fotón.

PROBLEMA Rayos X con longitud de onda $\lambda_1 = 0.200\,000$ nm se dispersan de un bloque de material. Los rayos X dispersados se observan a un ángulo de 45.0° con el haz incidente. **a)** Calcule la longitud de onda de los rayos X dispersos a este ángulo. **b)** Calcule el cambio fraccional en la energía de un fotón en la colisión.

ESTRATEGIA Para encontrar la longitud de onda de los fotones de rayos X dispersados, sustituya en la ecuación 27.11 para obtener el corrimiento de la longitud de onda, luego sume el resultado a la longitud de onda inicial, λ_i . En el inciso b), calcule el cambio fraccional en energía involucrada al calcular la energía del fotón de rayos X antes y después, a partir de $E = hf = hc/\lambda$. Al tomar la diferencia y dividir entre la energía inicial produce el cambio fraccional deseado en energía. Sin embargo, aquí se deriva una expresión simbólica que relaciona términos de energía y longitudes de onda.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Calcule la longitud de onda de los rayos X.

Sustituya en la ecuación 27.11 para obtener el corrimiento en la longitud de onda:

$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \\ &= \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})} (1 - \cos 45.0^\circ) \\ &= 7.11 \times 10^{-13} \text{ m} = 0.000 711 \text{ nm}\end{aligned}$$

Suma este corrimiento a la longitud de onda original para obtener la longitud de onda del fotón dispersado:

$$\lambda_f = \Delta\lambda + \lambda_i = 0.200 711 \text{ nm}$$

b) Encuentre la fracción de energía que pierde el fotón en la colisión.

Reescriba la energía E en términos de longitud de onda, use $c = f\lambda$:

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

Calcule $\Delta E/E$ usando esta expresión:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_f - E_i}{E_i} = \frac{hc/\lambda_f - hc/\lambda_i}{hc/\lambda_i}$$

Cancele hc y reordene términos:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1/\lambda_f - 1/\lambda_i}{1/\lambda_i} = \frac{\lambda_i}{\lambda_f} - 1 = \frac{\lambda_i - \lambda_f}{\lambda_f} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_f}$$

Sustituya valores del inciso a):

$$\frac{\Delta E}{E} = -\frac{0.000 711 \text{ nm}}{0.200 711 \text{ nm}} = -3.54 \times 10^{-3}$$

COMENTARIOS También es posible encontrar esta respuesta al sustituir en la expresión de energía en una etapa anterior, pero la derivación algebraica es más elegante e instructiva porque muestra cómo los cambios en energía se relacionan con los cambios en longitud de onda.

PREGUNTA 27.3 El fotón incidente pierde energía. ¿A dónde va?

EJERCICIO 27.3 Repita el ejemplo para un fotón con longitud de onda de 3.00×10^{-2} nm que se dispersa a un ángulo de 60.0° .

RESPUESTAS a) 3.12×10^{-2} nm b) $\Delta E/E = -3.88 \times 10^{-2}$

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

Fenómenos como el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton ofrecen evidencia de que, cuando la luz (u otras formas de radiación electromagnética) y la materia interactúan, la luz se comporta como si estuviese compuesta de partículas que tienen energía hf y cantidad de movimiento h/λ . Sin embargo, en otros contextos, la luz actúa como una onda y exhibe efectos de interferencia y difracción. Esta aparente dualidad se puede explicar en parte al considerar las energías de los fotones en diferentes contextos. Por ejemplo, los fotones con frecuencias en las longitudes de onda de radio portan muy poca energía y pueden requerirse 10^{10} de tales fotones para crear una señal en una antena. En consecuencia, éstos actúan en conjunto como una onda para crear el efecto. Los rayos gamma, por otra parte, son tan energéticos que es posible detectar un solo fotón de rayo gamma.

Hipótesis de De Broglie ►

En su disertación doctoral en 1924, Louis de Broglie postuló que, **dado que los fotones tienen características de onda y partícula, acaso todas las formas de materia tienen ambas propiedades**. Esta idea enormemente revolucionaria no tuvo confirmación experimental en aquella época. De acuerdo con De Broglie, los electrones, como la luz, tienen una naturaleza dual partícula-onda.

En el capítulo 26 encontramos que la relación entre energía y cantidad de movimiento para un fotón, que tiene una energía en reposo de cero, es $p = E/c$. También sabemos, de la ecuación 27.5, que la energía de un fotón es

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

[27.12]

En consecuencia, la cantidad de movimiento de un fotón se puede expresar como

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hc}{c\lambda} = \frac{h}{\lambda} \quad [27.13]$$

◀ Cantidad de movimiento de un fotón

A partir de esta ecuación, vemos que la longitud de onda del fotón se puede especificar mediante su cantidad de movimiento, o $\lambda = h/p$. De Broglie sugirió que *todas* las partículas materiales con cantidad de movimiento p deben tener una longitud de onda característica $\lambda = h/p$. Puesto que la cantidad de movimiento de una partícula de masa m y velocidad v es $mv = p$, la **longitud de onda de De Broglie** de una partícula es

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad [27.14]$$

◀ Longitud de onda de De Broglie

Más aún, De Broglie postuló que las frecuencias de las ondas de materia (ondas asociadas con partículas que tienen energía en reposo distinta de cero) obedecen la relación de Einstein para fotones, $E = hf$, de modo que

$$f = \frac{E}{h} \quad [27.15]$$

◀ Frecuencia de ondas de materia

La naturaleza dual de la materia es bastante aparente en las ecuaciones 27.14 y 27.15 porque cada una contiene ambas propiedades de partícula (mv y E) como propiedades de onda (λ y f). El hecho de que estas relaciones se establecieran experimentalmente para fotones hizo que la hipótesis de De Broglie se aceptara con más facilidad. El experimento Davisson-Germer en 1927 confirmó la hipótesis de De Broglie al demostrar que los electrones que se dispersan de cristales forman un patrón de difracción. Los planos regularmente espaciados de los átomos en regiones cristalinas de un blanco de níquel actúan como una rejilla de difracción para ondas de materia de electrones.



Cortesía de AIP Niels Bohr Library

Louis de Broglie
Físico francés (1892-1987)

De Broglie asistió a la Sorbona, en París, donde cambió su especialidad de historia a física teórica. Recibió el Premio Nobel de Física en 1929 por su descubrimiento de la naturaleza ondulatoria de los electrones.

■ **Examen rápido**

27.4 Verdadero o Falso: Conforme aumenta la cantidad de movimiento de una partícula de masa m , su longitud de onda se incrementa.

27.5 Un electrón no relativista y un protón no relativista se mueven y tienen la misma longitud de onda de De Broglie. ¿Cuáles de las siguientes también son las mismas para las dos partículas? a) velocidad, b) energía cinética, c) cantidad de movimiento, d) frecuencia

■ **EJEMPLO 27.4** El electrón frente a la bola de béisbol

OBJETIVO Aplicar la hipótesis de De Broglie a un objeto cuántico y a uno clásico.

PROBLEMA **a)** Compare la longitud de onda de De Broglie para un electrón ($m_e = 9.11 \times 10^{-31}$ kg) que se mueve con una velocidad igual a 1.00×10^7 m/s, con la de una bola de béisbol de 0.145 kg de masa que se lanza a 45.0 m/s. **b)** Compare estas longitudes de onda con la de un electrón que viaja a $0.999c$.

ESTRATEGIA Este problema es cuestión de sustituir en la ecuación 27.14 para la longitud de onda de De Broglie. En el inciso b) debe usar la cantidad de movimiento relativista.

SOLUCIÓN

a) Compare las longitudes de onda de De Broglie del electrón y la bola de béisbol.

Sustituya datos para el electrón en la ecuación 27.14:

$$\begin{aligned} \lambda_e &= \frac{h}{m_e v} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.00 \times 10^7 \text{ m/s})} \\ &= 7.28 \times 10^{-11} \text{ m} \end{aligned}$$

Repita el cálculo con los datos de la bola de béisbol:

$$\lambda_b = \frac{h}{m_b v} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(0.145 \text{ kg})(45.0 \text{ m/s})} = 1.02 \times 10^{-34} \text{ m}$$

(continúa)

b) Encuentre la longitud de onda para un electrón que viaja a $0.999c$.

Sustituya la cantidad de movimiento en la ecuación 27.14 con la cantidad de movimiento relativista:

Sustituya:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v / \sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{h\sqrt{1 - v^2/c^2}}{m_e v}$$

$$\lambda_e = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})\sqrt{1 - (0.999c)^2/c^2}}{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(0.999 \cdot 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}$$

$$= 1.09 \times 10^{-13} \text{ m}$$

COMENTARIOS La longitud de onda del electrón corresponde a la de los rayos X en el espectro electromagnético. La bola de béisbol, en contraste, tiene una longitud de onda mucho menor que cualquier abertura a través de la cual posiblemente pudiera pasar la bola, de modo que no se podrían observar efectos de difracción. Por lo general es cierto que las propiedades ondulatorias de los objetos a gran escala no se pueden observar. Advierta que, incluso a velocidades relativistas extremas, la longitud de onda del electrón todavía es mucho más grande que la de la bola de béisbol.

PREGUNTA 27.4 ¿Cómo es que el duplicar la velocidad de una partícula afecta su longitud de onda? ¿Su respuesta siempre es verdadera? Explique.

EJERCICIO 27.4 Encuentre la longitud de onda de De Broglie de un protón ($m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) que se mueve con una velocidad de $1.00 \times 10^7 \text{ m/s}$.

RESPUESTA $3.97 \times 10^{-14} \text{ m}$

Aplicación: el microscopio electrónico

BIO APLICACIÓN

Microscopios electrónicos

Un dispositivo práctico que se apoya en las características ondulatorias de los electrones es el **microscopio electrónico**. En la figura 27.17 se muestra un microscopio electrónico de *transmisión*, que se usa para ver delgadas muestras planas. En muchos aspectos es similar a un

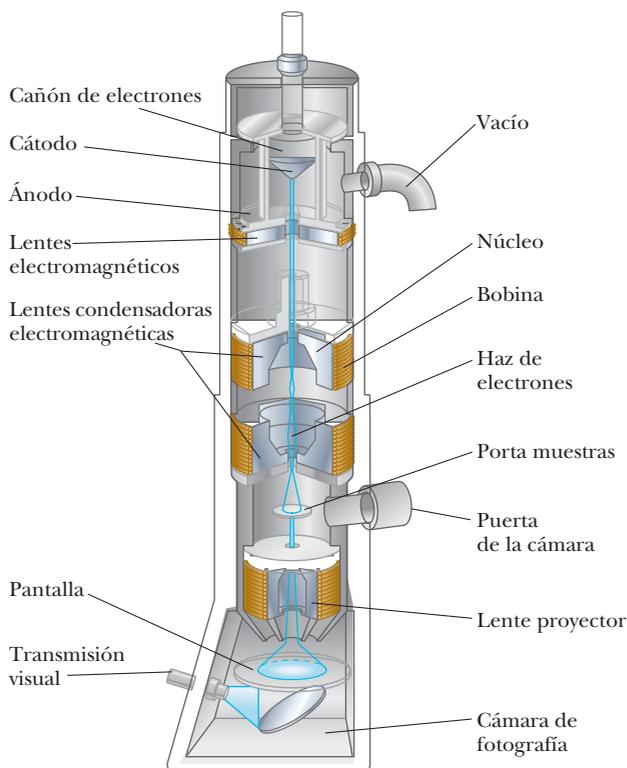


Figura 27.17 a) Diagrama de un microscopio electrónico de transmisión para ver una delgada muestra seccionada. Las “lentes” que controlan el haz de electrones son bobinas de desviación magnéticas. b) Microscopio electrónico.

microscopio óptico, pero el microscopio electrónico tiene un poder de resolución mucho mayor porque puede acelerar electrones a energías cinéticas muy altas, lo que les da longitudes de onda muy cortas. Ningún microscopio puede resolver detalles que sean significativamente menores que la longitud de onda de la radiación que se usa para iluminar el objeto. Por lo general, las longitudes de onda de los electrones en un microscopio electrónico son menores que las longitudes de onda visibles por un factor de más o menos 10^{-5} .

El haz de electrones en un microscopio electrónico se controla mediante desviación electrostática o magnética, que actúa sobre los electrones para enfocar el haz a una imagen. Sin embargo, debido a limitaciones en las lentes electromagnéticas utilizadas, la mejora en resolución sobre los microscopios ópticos sólo es de un factor aproximado de 1000, dos órdenes de magnitud menor que el implicado por la longitud de onda del electrón. En lugar de examinar la imagen a través de un ocular como en un microscopio óptico, el observador mira una imagen formada sobre una pantalla fluorescente. (La pantalla de visualización debe ser fluorescente porque de otro modo la imagen producida no sería visible.)

■ FÍSICA APLICADA 27.2 ¿Microscopios de rayos X?

Los microscopios electrónicos (figura 27.17) sacan ventaja de la naturaleza ondulatoria de las partículas. Los electrones se aceleran a altas velocidades, lo que les da una corta longitud de onda de De Broglie. Imagine un microscopio electrónico que usa electrones con una longitud de onda de De Broglie de 0.2 nm. ¿Por qué no se diseña un microscopio que use fotones de 0.2 nm para hacer el mismo?

EXPLICACIÓN Puesto que los electrones son partículas cargadas, interactúan eléctricamente con la muestra en el microscopio y dispersan de acuerdo con la forma y densidad de varias porciones de la muestra, lo que proporciona un medio para visualizar la muestra. Los fotones con 0.2 nm de longitud de onda no tienen carga y están en la región de rayos X del espectro. Simplemente tenderían a pasar a través de la delgada muestra sin interactuar. ■

27.7 La función de onda

La revolucionaria idea de De Broglie de que las partículas tendrían una naturaleza ondulatoria pronto pasó del reino del escepticismo al punto donde se vio como un concepto necesario para entender el mundo subatómico. En 1926, el físico austro-alemán Erwin Schrödinger propuso una ecuación de onda que describía cómo las ondas de materia cambian en espacio y tiempo. La ecuación de onda de Schrödinger representa un elemento clave en la teoría de la mecánica cuántica. Es tan importante en la mecánica cuántica como las leyes de Newton en la mecánica clásica. La ecuación de Schrödinger se aplica con éxito al átomo de hidrógeno y a muchos otros sistemas microscópicos.

Al resolver la ecuación de Schrödinger (algo que está más allá del nivel de este curso) se determina una cantidad Ψ llamada **función de onda**. Cada partícula se representa mediante una función de onda Ψ que depende tanto de la posición como del tiempo. Una vez que se encuentra Ψ , Ψ^2 proporciona información acerca de la **probabilidad** (por unidad de volumen) de encontrar la partícula en alguna región dada. Para comprender esto, regrese al experimento de Young que involucra luz coherente que pasa a través de una doble rendija.

Primero, recuerde del capítulo 21 que la intensidad de un haz de luz es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico E asociado con el haz: $I \propto E^2$. De acuerdo con el modelo ondulatorio de la luz, existen ciertos puntos en la pantalla de visualización donde el campo eléctrico neto es cero como resultado de interferencia destructiva de las ondas provenientes de las dos rendijas. Puesto que E es cero en estos puntos, la intensidad también es cero y la pantalla es oscura en ese lugar. Del mismo modo, en puntos sobre la pantalla donde ocurre interferencia constructiva, E es grande, como la intensidad; por lo tanto, dichas posiciones son brillantes.

Ahora considere el mismo experimento cuando la luz se ve como poseedora de una naturaleza corpuscular. El número de fotones que llegan por segundo a un punto sobre la pantalla aumenta conforme la intensidad (brillo) aumenta. En consecuencia, el número de fotones que golpean un área unitaria sobre la pantalla cada segundo es proporcional al cuadrado del campo eléctrico, o $N \propto E^2$. Desde un punto de vista probabilístico, un fotón tiene una alta probabilidad de golpear la pantalla en un punto donde la intensidad (y E^2) es alta y una baja probabilidad de golpear la pantalla donde la intensidad es baja.



AIP - Emilio Segre Visual Archives

Erwin Schrödinger
Físico teórico austriaco
(1887-1961)

Schrödinger es mejor conocido como el creador de la mecánica ondulatoria, una teoría menos complicada que la equivalente mecánica matricial desarrollada por Werner Heisenberg. En 1933, Schrödinger dejó Alemania y eventualmente se asentó en el Instituto Dublín de Estudios Avanzados, donde pasó 17 felices años creativos trabajando en problemas acerca de relatividad general, cosmología y la aplicación de la física cuántica a la biología. En 1956 regresó a su hogar en Austria y a sus amadas montañas tirolesas, donde murió en 1961.

Cuando se describen partículas en lugar de fotones, Ψ en vez de E juega el papel de la amplitud. Al usar una analogía con la descripción de la luz, se hace la siguiente interpretación de Ψ para partículas: si Ψ es una función de onda que se usa para describir una sola partícula, el valor de Ψ^2 en alguna posición en un tiempo dado es proporcional a la probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en dicha ubicación en dicho tiempo. Sumar todos los valores de Ψ^2 en una región dada proporciona la probabilidad de encontrar la partícula en dicha región.

27.8 El principio de incertidumbre

Si usted fuese a medir la posición y la velocidad de una partícula en algún instante, siempre se enfrentaría con incertidumbres experimentales en sus mediciones. De acuerdo con la mecánica clásica, no existe una barrera fundamental para un refinamiento último del aparato o procedimiento experimental. En otras palabras, es posible, en principio, realizar tales mediciones con incertidumbres arbitrariamente pequeñas. Sin embargo, la teoría cuántica predice que tal barrera sí existe. En 1927, Werner Heisenberg (1901-1976) introdujo esta noción, que ahora se conoce como **principio de incertidumbre**:

Si una medición de la posición de una partícula se realiza con una precisión Δx y una medición simultánea de la cantidad de movimiento lineal se efectúa con una precisión Δp_x , el producto de las dos incertidumbres nunca puede ser menor a $h/4\pi$:

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.16]$$

En otras palabras, **es físicamente imposible medir simultáneamente la posición exacta y la cantidad de movimiento lineal exacta de una partícula**. Si Δx es muy pequeña, entonces Δp_x es grande, y viceversa.

Para comprender el origen físico del principio de incertidumbre, considere el siguiente experimento mental introducido por Heisenberg. Suponga que quiere medir la posición y la cantidad de movimiento lineal de un electrón de manera tan precisa como sea posible. Tal vez quiera hacerlo al ver el electrón con un poderoso microscopio óptico. Para que vea el electrón y determine su posición, al menos un fotón de luz debe rebotar del electrón, como se muestra en la figura 27.18a y pasar a través del microscopio hacia su ojo, como se muestra en la figura 27.18b. Sin embargo, cuando golpea al electrón, el fotón transfiere alguna cantidad desconocida de su cantidad de movimiento al electrón. Por ende, en el proceso de ubicar al electrón con mucha precisión (esto es,

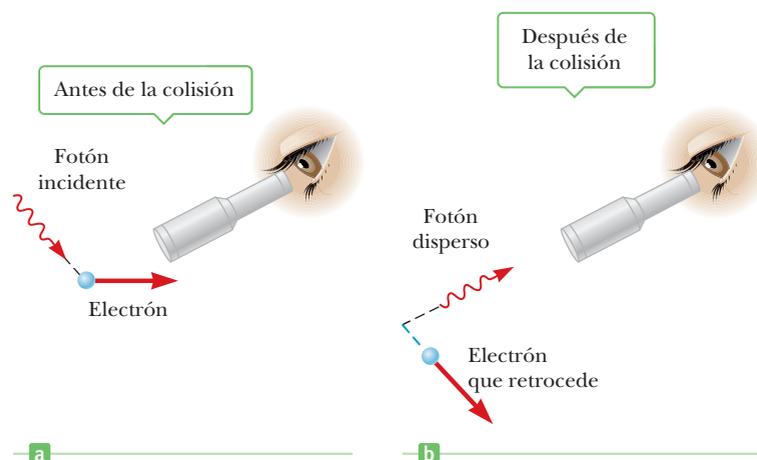


AIP Emilio Segre Visual Archives, Segre Collection

Werner Heisenberg Físico teórico alemán (1901-1976)

Heisenberg obtuvo su doctorado en 1923, en la Universidad de Munich, donde estudió bajo la dirección de Arnold Sommerfeld. Mientras que físicos como De Broglie y Schrödinger intentaban desarrollar modelos físicos del átomo, Heisenberg desarrolló un modelo matemático abstracto llamado *mecánica matricial* para explicar las longitudes de onda de las líneas espectrales. Heisenberg realizó muchas otras aportaciones significativas a la física, incluido su famoso principio de incertidumbre, por el cual recibió el Premio Nobel de Física en 1932; la predicción de dos formas de hidrógeno molecular y modelos teóricos del núcleo de un átomo.

Figura 27.18 Un experimento mental para ver un electrón con un poderoso microscopio. a) El electrón se ve antes de chocar con el fotón. b) El electrón retrocede (se perturba) como resultado de la colisión con el fotón.



al hacer Δx muy pequeña), la luz que le permite a usted triunfar en su medición, cambia la cantidad de movimiento del electrón en cierta medida indeterminable (lo que hace a Δp_x muy grande).

El fotón entrante tiene cantidad de movimiento h/λ . Como resultado de la colisión, el fotón transfiere parte o toda su cantidad de movimiento a lo largo del eje x hacia el electrón. Por lo tanto, la *incertidumbre* en la cantidad de movimiento del electrón después de la colisión es tan grande como la cantidad de movimiento del fotón entrante: $\Delta p_x = h/\lambda$. Más aún, dado que el fotón también tiene propiedades ondulatorias, se espera poder determinar la posición del electrón hasta dentro de una longitud de onda de la luz que se usa para verlo, de modo que $\Delta x = \lambda$. Al multiplicar estas dos incertidumbres obtenemos

$$\Delta x \Delta p_x = \lambda \left(\frac{h}{\lambda} \right) = h$$

El valor h representa el mínimo en el producto de las incertidumbres. Puesto que la incertidumbre siempre puede ser mayor que este mínimo, tenemos

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

Aparte del factor numérico $1/4\pi$ introducido por el análisis más preciso de Heisenberg, esta desigualdad concuerda con la ecuación 27.16.

Otra forma de la relación de incertidumbre establece un límite sobre la precisión con la que se puede medir la energía E de un sistema en un intervalo de tiempo finito Δt :

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.17]$$

Se puede inferir a partir de esta relación que la energía de una partícula no se puede medir con completa precisión en un intervalo de tiempo muy corto. Por ende, cuando un electrón se ve como partícula, el principio de incertidumbre dice que a) su posición y velocidad no se pueden conocer ambas con precisión al mismo tiempo y b) su energía puede ser incierta para un periodo dado por $\Delta t = h/(4\pi \Delta E)$.

■ EJEMPLO 27.5 Localización de un electrón

OBJETIVO Aplicar el principio de incertidumbre posición-cantidad de movimiento de Heisenberg.

PROBLEMA La velocidad de un electrón se mide en 5.00×10^3 m/s a una precisión de 0.003 00%. Encuentre la incertidumbre mínima al determinar la posición de este electrón.

ESTRATEGIA Después de calcular la cantidad de movimiento y su incertidumbre, sustituya en el principio de incertidumbre de Heisenberg, ecuación 27.16.

SOLUCIÓN

Calcule la cantidad de movimiento del electrón:

$$\begin{aligned} p_x &= m_e v = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5.00 \times 10^3 \text{ m/s}) \\ &= 4.56 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

La incertidumbre en p_x es 0.003 00% de este valor:

$$\begin{aligned} \Delta p_x &= 0.000 \ 030 \ 0 p_x = (0.000 \ 030 \ 0)(4.56 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}) \\ &= 1.37 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

Ahora calcule la incertidumbre en la posición usando este valor de Δp_x y la ecuación 27.17:

$$\begin{aligned} \Delta x \Delta p_x &\geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x \geq \frac{h}{4\pi \Delta p_x} \\ \Delta x &\geq \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{4\pi(1.37 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot \text{m/s})} = 0.385 \times 10^{-3} \text{ m} \\ &= \mathbf{0.385 \text{ mm}} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Adverta que éste no es un cálculo exacto: la incertidumbre en la posición puede tomar cualquier valor en tanto sea mayor que o igual al valor dado por el principio de incertidumbre.

(continúa)

PREGUNTA 27.5 Verdadero o Falso: La incertidumbre en la posición de un protón en el núcleo de helio es, en promedio, menor que la incertidumbre de un protón en un átomo de uranio.

EJERCICIO 27.5 Suponga que un electrón se encuentra en alguna parte en un átomo de 1.25×10^{-10} m. Estime la incertidumbre en la cantidad de movimiento del electrón (en una dimensión).

RESPUESTA $\Delta p \geq 4.22 \times 10^{-25}$ kg · m/s

■ **RESUMEN**

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

Las características de la **radiación de cuerpo negro** no se pueden explicar con los conceptos clásicos. El pico de una curva de radiación de cuerpo negro está dado por la **ley de desplazamiento de Wien**,

$$\lambda_{\text{máx}} T = 0.2898 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K} \quad [27.1]$$

donde $\lambda_{\text{máx}}$ es la longitud de onda a la cual la curva tiene un pico y T es la temperatura absoluta del objeto que emite la radiación.

Planck fue el primero en introducir el concepto cuántico cuando supuso que los osciladores subatómicos responsables de la radiación de cuerpo negro podían tener sólo cantidades discretas de energía dada por

$$E_n = nhf \quad [27.2]$$

donde n es un entero positivo llamado **número cuántico** y f es la frecuencia de vibración del resonador.

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

El **efecto fotoeléctrico** es un proceso mediante el cual se expulsan electrones de una superficie metálica cuando sobre dicha superficie incide luz. Einstein proporcionó una explicación exitosa de este efecto al extender la hipótesis cuántica de Planck a las ondas electromagnéticas. En este modelo, la luz se ve como una corriente de partículas llamadas fotones, cada una con energía $E = hf$, donde f es la frecuencia de la luz y h es la **constante de Planck**. La máxima energía cinética de los fotoelectrones expulsados es

$$EC_{\text{máx}} = hf - \phi \quad [27.6]$$

donde ϕ es la **función de trabajo** del metal.

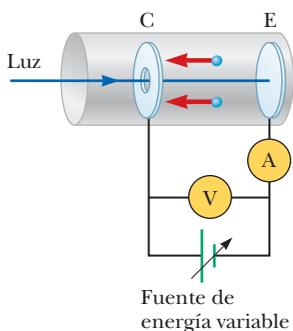


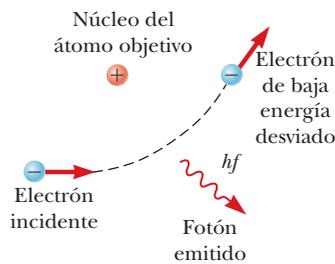
Diagrama de un circuito para el estudio del efecto fotoeléctrico.

27.3 Rayos X

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

Los **rayos X** se producen cuando electrones de alta velocidad se desaceleran súbitamente. Cuando los electrones se aceleran a través de un voltaje V , la radiación con longitud de onda más corta que se puede producir es

$$\lambda_{\text{mín}} = \frac{hc}{e\Delta V} \quad [27.9]$$

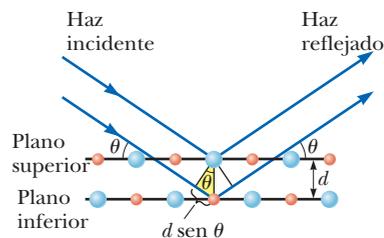


Un electrón pasando cerca de un átomo objetivo cargado experimenta aceleración y se emite un fotón en el proceso.

El arreglo regular de átomos en un cristal puede actuar como rejilla de difracción para rayos X y para electrones. La condición para interferencia constructiva de los rayos difractados está dada por la **ley de Bragg**:

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad [27.10]$$

La ley de Bragg tiene similitud con la ecuación para el patrón de difracción de una doble rendija.



Representación en dos dimensiones de la reflexión de un haz de rayos X de dos planos cristalinos paralelos separados por una distancia d . El rayo reflejado desde el plano inferior viaja más lejos que el reflejado desde el plano superior por una cantidad igual a $2d \sin \theta$.

27.5 El efecto Compton

Los rayos X de un haz incidente se dispersan a varios ángulos por los electrones en un blanco como el carbono. En tal evento

de dispersión, se observa un corrimiento en longitud de onda para los rayos X dispersos. Este fenómeno se conoce como **corrimiento Compton**. La conservación de cantidad de movimiento y energía aplicada a una colisión fotón-electrón produce la siguiente expresión para el corrimiento en longitud de onda de los rayos X dispersos:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad [27.11]$$

Aquí, m_e es la masa del electrón, c es la velocidad de la luz y θ es el ángulo de dispersión.

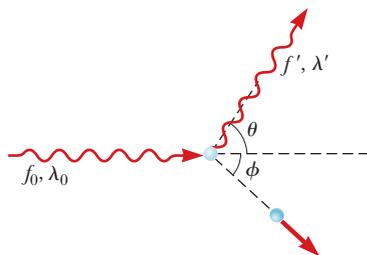


Diagrama que representa la dispersión Compton de un fotón debido a un electrón.

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

La luz muestra naturaleza tanto de partícula como de onda. De Broglie propuso que *toda* la materia tenía naturaleza tanto de partícula como de onda. La **longitud de onda de De Broglie** de cualquier partícula de masa m y velocidad v es

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad [27.14]$$

De Broglie también propuso que las frecuencias de las ondas asociadas con las partículas obedecen la relación de Einstein $E = hf$.

27.7 La función de onda

En la teoría de la **mecánica cuántica**, cada partícula se describe mediante una cantidad Ψ llamada **función de onda**. La probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en un punto específico en algún instante es proporcional a Ψ^2 . La mecánica cuántica ha sido enormemente exitosa para describir el comportamiento de los sistemas atómicos y moleculares.

27.8 El principio de incertidumbre

De acuerdo con el **principio de incertidumbre** de Heisenberg, es imposible medir simultáneamente la posición exacta y la cantidad de movimiento exacta de una partícula. Si Δx es la incertidumbre en la posición medida y Δp_x la incertidumbre en la cantidad de movimiento, el producto $\Delta x \Delta p_x$ está dado por

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.16]$$

Además,

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} \quad [27.17]$$

donde ΔE es la incertidumbre en la energía de la partícula y Δt es la incertidumbre en el tiempo que tarda medir la energía.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED

WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En un experimento fotoeléctrico, un metal es irradiado con luz de 3.56 eV de energía. Si se requiere un potencial de frenado de 1.10 V, ¿cuál es la función de trabajo del metal? a) 1.83 eV, b) 2.46 eV, c) 3.20 eV, d) 4.66 eV, e) 0.644 eV.
- ¿Cuál es la temperatura superficial de una estrella distante que tiene un pico con una longitud de onda de 475 nm? a) 6 100 K, b) 5 630 K, c) 5 510 K, d) 6 350 K, e) 6 560 K.
- ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie de un electrón que acelera desde el reposo a través de una diferencia de potencial de 50.0 V? a) 0.100 nm, b) 0.174 nm, c) 0.139 nm, d) 0.834 nm, e) 0.435 nm.
- Un electrón se acelera a través de una diferencia de potencial de 3.00 V antes de chocar con un blanco metálico. ¿Cuál es la longitud de onda mínima de la luz para expulsar tal electrón? a) 204 nm, b) 352 nm, c) 414 nm, d) 536 nm, e) 612 nm.
- ¿Cuáles de los siguientes enunciados son ciertos de acuerdo con el principio de incertidumbre? a) Es imposible determinar simultáneamente tanto la posición como la cantidad de movimiento de una partícula con precisión arbitraria. b) Es imposible determinar simultáneamente tanto la energía como la cantidad de movimiento de una partícula con una precisión arbitraria. c) Es imposible determinar la energía de una partícula con precisión arbitraria en una cantidad finita de tiempo. d) Es imposible medir la posición de una partícula con precisión arbitraria en una cantidad finita de tiempo. e) Es imposible medir simultáneamente tanto la energía como la posición de una partícula con precisión arbitraria.
- Un fotón se dispersa de un electrón a un ángulo de $1.80 \times 10^2^\circ$ con respecto a su movimiento inicial. ¿Cuál es el cambio en la longitud de onda del fotón? a) 0.002 43 nm, b) 0.243 nm, c) 0.001 72 nm, d) 0.004 85 nm, e) 0.121 nm.
- Un protón, un electrón y un núcleo de helio se mueven con velocidad v . Clasifique sus longitudes de onda de De Broglie de mayor a menor. a) protón, núcleo de helio, electrón, b) núcleo de helio, protón, electrón, c) protón, electrón, núcleo de helio, d) núcleo de helio, electrón, protón, e) electrón, protón, núcleo de helio.
- El ángulo de dispersión de rayos X de primer orden del cristal A es mayor que el correspondiente ángulo de dispersión del cristal B para rayos X de una energía dada.

- ¿Qué se puede decir de la distancia de separación d_A de los planos cristalinos en el cristal A en comparación con la distancia de separación d_B en B ? a) $d_A = d_B$ b) $d_A > d_B$ c) $d_A < d_B$ d) La respuesta depende de la energía de los rayos X. e) La respuesta depende de la intensidad de los rayos X.
9. ¿Cuál de los siguientes fenómenos demuestra con más claridad la naturaleza corpuscular de la luz? a) difracción, b) el efecto fotoeléctrico, c) polarización, d) interferencia, e) refracción.
10. ¿Cuál de los siguientes fenómenos demuestra con más claridad la naturaleza ondulatoria de los electrones?
- a) el efecto fotoeléctrico, b) la ley de Wien, c) la radiación de cuerpo negro, d) el efecto Compton, e) la difracción de electrones mediante cristales.
11. Un fotón de rayos X es dispersado por un electrón inicialmente estacionario. En relación con la frecuencia del fotón incidente, la frecuencia del fotón disperso es a) menor, b) mayor o igual, c) no cambia
12. Un electrón y un protón, moviéndose en direcciones opuestas, se aceleran desde el reposo a través de la misma diferencia de potencial. ¿Qué partícula tiene la mayor longitud de onda? a) El electrón. b) El protón. c) Ambos son lo mismo. d) Ninguno tiene una longitud de onda.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si observa objetos dentro de un horno muy caliente, ¿por qué es difícil discernir sus formas?
- ¿Por qué un microscopio electrónico es más adecuado que un microscopio óptico para “ver” objetos de tamaño atómico?
- ¿Los cuerpos negros son negros?
- ¿Por qué es imposible medir simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula con precisión infinita?
- Todos los objetos radian energía. ¿Por qué, entonces, no puede ver todos los objetos en una habitación oscura?
- ¿La luz es una onda o una partícula? Apoye su respuesta con la mención de evidencia experimental específica.
- En el efecto fotoeléctrico, explique por qué el potencial de frenado depende de la frecuencia de la luz mas no de la intensidad.
- ¿Cuál tiene más energía, un fotón de radiación ultravioleta o un fotón de luz amarilla?
- ¿Por qué la existencia de una frecuencia de corte en el efecto fotoeléctrico favorece una teoría corpuscular de la luz en lugar de una teoría ondulatoria?
- ¿Qué efecto, si hay alguno, esperaría usted que tuviera la temperatura de un material sobre la facilidad con la cual se pueden expulsar electrones de él a través del efecto fotoeléctrico?
- La frecuencia de corte de un material es f_0 . ¿Se emiten electrones del material cuando a) luz con frecuencia mayor que f_0 incide sobre el material? b) ¿Menor que f_0 ?
- La estrella más brillante en la constelación de Lyra es la estrella azulosa Vega, mientras que la estrella más brillante en Boötes es la estrella rojiza Arcturus. ¿Cómo explica la diferencia en color de las dos estrellas?
- Si el efecto fotoeléctrico se observa en un metal, ¿puede concluir que el efecto también se observará en otro metal bajo las mismas condiciones? Explique.
- Los átomos en un cristal yacen en planos separados por algunas décimas de nanómetro. ¿Se puede usar un cristal para producir un patrón de difracción con luz visible, como para los rayos X? Explique su respuesta con referencia a la ley de Bragg.
- ¿Un electrón es una onda o una partícula? Justifique su respuesta citando algunos resultados experimentales.
- Si la materia tiene una naturaleza de onda, ¿por qué esta característica no se observa en nuestras experiencias diarias?

■ PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*
- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- C|C denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

27.1 Radiación de cuerpo negro e hipótesis de Planck

- a) ¿Cuál es la temperatura superficial de Betelgeuse, una estrella gigante roja en la constelación de Orión, que radia con una longitud de onda con un máximo de aproximadamente 970 nm? b) Rigel, una estrella blanca-azulada en Orión, radia con una longitud de onda con un máximo de 145 nm. Encuentre la temperatura de la superficie de Rigel.

2. a) Los relámpagos producen una máxima temperatura de aire en el orden de 10^4 K, mientras que b) una explosión nuclear produce una temperatura en el orden de 10^7 K. Use la ley de desplazamiento de Wien para encontrar el orden de magnitud de la longitud de onda de los fotones producidos térmicamente que se radian con mayor intensidad por cada una de estas fuentes. Mencione la parte del espectro electromagnético donde esperaría que cada una radiara con mayor intensidad.
3. **BIO** La temperatura de la piel de un estudiante es 33.0° C. ¿Con qué longitud de onda la radiación emitida por la piel alcanza su punto máximo?
4. El radio del Sol es 6.96×10^8 m, y su potencia de salida total es 3.85×10^{26} W. a) Suponiendo que la superficie del Sol emite como un cuerpo negro, calcule la temperatura de su superficie. b) Usando el resultado del inciso a), encuentre $\lambda_{\text{máx}}$ para el Sol.
5. Calcule la energía en electrón-volts de un fotón que tiene una longitud de onda a) en el rango de microondas, 5.00 cm, b) en el rango de luz visible, 500 nm y c) en el rango de rayos X, 5.00 nm.
6. Suponga que una estrella con 8.50×10^8 m de radio tiene una longitud de onda con un máximo en 685 nm en el espectro de su radiación emitida. a) Encuentre la energía de un fotón con esta longitud de onda. b) ¿Cuál es la temperatura superficial de la estrella? c) ¿Con qué intervalo se emite energía de la estrella en la forma de radiación? Suponga que la estrella es un cuerpo negro ($e = 1$). d) Con la respuesta al inciso a), estime el intervalo con el que los fotones salen de la superficie de la estrella.
7. **M** Calcule la energía, en electrón-voltios, de un fotón cuya frecuencia es a) 620 THz, b) 3.10 GHz y c) 46.0 MHz.
8. **BIO** El umbral de visión adaptada a la oscuridad (escotopía) es 4.0×10^{-11} W/m² con una longitud de onda central de 500 nm. Si la luz con esta intensidad y longitud de onda entra al ojo cuando la pupila está abierta a su diámetro máximo de 8.5 mm, ¿cuántos fotones por segundo entran al ojo?

27.2 El efecto fotoeléctrico y la teoría corpuscular de la luz

9. Cuando luz con 350 nm de longitud de onda cae sobre una superficie de potasio, se emiten electrones que tienen una energía cinética máxima de 1.31 eV. Encuentre a) la función de trabajo del potasio, b) la longitud de onda de corte y c) la frecuencia correspondiente a la longitud de onda de corte.
10. La función de trabajo para el zinc es 4.1 eV. a) Encuentre la longitud de onda de corte para el zinc. b) ¿Cuál es la frecuencia más baja de la luz incidente sobre el zinc que libera fotoelectrones de su superficie? c) Si los fotones de energía 5.50 eV inciden sobre el zinc, cuál es la energía cinética máxima de los fotoelectrones expulsados?
11. **PG** La función de trabajo para el platino es 6.35 eV. a) Convierta el valor de la función de trabajo, de electrón-volts a joules. b) Encuentre la frecuencia de corte para el

platino. c) ¿Qué longitud de onda máxima de luz incidente sobre platino libera fotoelectrones de la superficie del platino? d) Si luz con 8.50 eV de energía incide sobre el zinc, ¿cuál es la máxima energía cinética de los fotoelectrones expulsados? Proporcione su respuesta en electrón-volts. e) Para fotones de 8.50 eV de energía, ¿qué potencial de frenado se requeriría para detener la corriente de fotoelectrones?

12. **CIC** Litio, berilio y mercurio tienen funciones de trabajo de 2.30 eV, 3.90 eV y 4.50 eV, respectivamente. Luz con longitud de onda de 4.00×10^2 nm incide sobre cada uno de estos metales. a) ¿Cuál de estos metales emite fotoelectrones en respuesta a la luz? ¿Por qué? b) Encuentre la máxima energía cinética para los fotoelectrones en cada caso.
13. Cuando luz con longitud de onda de 254 nm cae sobre cesio, el potencial de frenado requerido es 3.00 V. Si se usa luz con 436 nm de longitud de onda, el potencial de frenado es 0.900 V. Use esta información para trazar una gráfica como la que se muestra en la figura 27.6 y a partir de la gráfica determine la frecuencia de corte para el cesio y su función de trabajo.
14. Dos fuentes de luz son utilizadas en un experimento fotoeléctrico para determinar la función de trabajo para una superficie de metal en particular. Cuando se usa la luz verde de una lámpara de mercurio ($\lambda = 546.1$ nm), un potencial de frenado de 0.376 V reduce la fotocorriente a cero. a) Con base en esta medida, ¿cuál es la función de trabajo de este metal? b) ¿Qué potencial de frenado se puede observar cuando se utiliza la luz amarilla de un tubo de descarga de helio ($\lambda = 587.5$ nm)?

27.3 Rayos X

15. Los extremos de la porción de rayos X del espectro electromagnético varían de aproximadamente 1.0×10^{-8} m a 1.0×10^{-13} m. Encuentre el máximo voltaje de aceleración que se requiere para producir longitudes de onda en estos dos extremos.
16. **CIC** Calcule la longitud de onda mínima de rayos X que se puede producir cuando un blanco se golpea con un electrón que se aceleró a través de una diferencia de potencial de 1) 15.0 kV y b) 1.00×10^2 kV. c) ¿Qué ocurre con la longitud de onda mínima conforme aumenta la diferencia de potencial?
17. ¿Qué voltaje de aceleración mínimo se requiere para producir un rayo X con una longitud de onda de 70.0 pm?

27.4 Difracción de rayos X mediante cristales

18. Cuando rayos X con longitud de onda de 0.129 nm inciden sobre la superficie de un cristal que tiene una estructura similar a la del NaCl, a 8.15° se observa un máximo de primer orden. Con base en esta información, calcule el espaciamiento entre los planos del cristal.
19. **M** El yoduro de potasio tiene un espaciamiento entre planos de $d = 0.296$ nm. Un haz de rayos X monocromático muestra un máximo de difracción de primer orden cuando el ángulo rasante es 7.6° . Calcule la longitud de onda de los rayos X.

20. **CIC** El máximo de difracción de primer orden se observa en 12.6° para un cristal que tiene un espaciamiento entre planos de 0.240 nm . ¿Cuántos otros órdenes se pueden observar en el patrón de difracción y a qué ángulos aparecen? ¿Por qué hay un límite superior al número de órdenes observados?
21. Rayos X con longitud de onda de 0.140 nm se reflejan de cierto cristal y el máximo de primer orden ocurre a un ángulo de 14.4° . ¿Qué valor produce esto para el espaciamiento entre planos del cristal?

27.5 El efecto Compton

22. Rayos X se dispersan de un objetivo a un ángulo de 55.0° con la dirección del haz incidente. Encuentre el corrimiento de la longitud de onda de los rayos X dispersos.
23. **M** Un fotón de 0.00160 nm se dispersa de un electrón libre. ¿Para qué ángulo de dispersión (fotón) el electrón que retrocede y el fotón dispersado tendrán la misma energía cinética?
24. **S** Un fotón con longitud de onda λ se dispersa de un electrón libre en A (figura P27.24), produciendo un segundo fotón con longitud de onda de λ' . Este fotón se dispersa fuera de otro electrón libre en B , generando un tercer fotón de longitud de onda λ'' y moviéndose en una dirección directamente opuesta a la del fotón original como se muestra en la figura. Determinar el valor de $\Delta\lambda = \lambda'' - \lambda$.

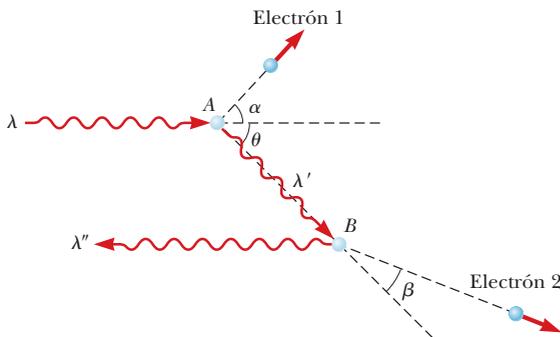


Figura P27.24

25. Un fotón de 0.110 nm choca con un electrón en reposo. Después de la colisión, el electrón se mueve hacia adelante y el fotón retrocede. Encuentre la cantidad de movimiento y la energía cinética del electrón.
26. En un experimento de dispersión de Compton, un haz de rayos X dispersa fotones a un ángulo de 17.4° a partir de un electrón libre que está inicialmente en reposo. El electrón retrocede a una velocidad de 2180 km/s . Calcule a) la longitud de onda del fotón incidente y b) el ángulo a través del cual los electrones se dispersan.

27.6 La naturaleza dual de la luz y la materia

27. a) Si la longitud de onda de un electrón es $5.00 \times 10^{-7} \text{ m}$, ¿cuán rápido se mueve? b) Si el electrón tiene una velocidad igual a $1.00 \times 10^7 \text{ m/s}$, ¿cuál es su longitud de onda?
28. Calcule la longitud de onda de De Broglie de un protón que se mueve a a) $2.00 \times 10^4 \text{ m/s}$ y b) $2.00 \times 10^7 \text{ m/s}$.

29. De Broglie postuló que la relación $\lambda = h/p$ es válida para partículas relativistas. ¿Cuál es la longitud de onda de De Broglie para un electrón (relativista) que tiene una energía cinética de 3.00 MeV ?
30. a) Un electrón tiene una energía cinética de 3.00 eV . Encuentre su longitud de onda. b) Un fotón tiene una energía 3.00 eV . Encuentre su longitud de onda.
31. El poder de resolución de un microscopio es proporcional a la longitud de onda empleada. Para “ver” un átomo se requeriría una resolución de $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}$ (0.010 nm). a) Si se usaran electrones (microscopio electrónico), ¿qué energía cinética mínima requerirían los electrones? b) Si se usaran fotones, ¿qué energía mínima de fotón se necesitaría para obtener una resolución de $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}$?
32. **CIC** Una partícula no relativista de masa m y carga q se acelera desde el reposo a través de una diferencia de potencial ΔV . a) Use la conservación de energía para encontrar una expresión simbólica para la cantidad de movimiento de la partícula en términos de m , q y ΔV . Suponga que la velocidad de la partícula no es relativista. b) Escriba una expresión simbólica para la longitud de onda de De Broglie, con el resultado del inciso a). c) Si un electrón y un protón pasan a través de la misma diferencia de potencial, pero en direcciones opuestas, ¿cuál partícula tendrá la longitud de onda más corta?

27.7 La función de onda

27.8 El principio de incertidumbre

33. En el estado base del hidrógeno, la incertidumbre en la posición del electrón es aproximadamente 0.10 nm . Si la velocidad del electrón es aproximadamente la misma que la incertidumbre en su velocidad, ¿cuán rápido se mueve?
34. Un electrón se encuentra en la punta de un alfiler que tiene un diámetro de $2.5 \mu\text{m}$. ¿Cuál es el mínimo de incertidumbre en la velocidad del electrón?
35. **M** Un electrón y una bala de 0.020 kg cada uno, tienen una rapidez de 500 m/s y una precisión de 0.010% . ¿Dentro de qué límite menor podemos determinar la posición de cada objeto a lo largo de la dirección de la velocidad?
36. Suponga que Borrosito, un pato mecánico-cuántico, vive en un mundo donde $\hbar = 2\pi \text{ J} \cdot \text{s}$. Borrosito tiene una masa de 2.00 kg e inicialmente se sabe que está dentro de un lago de 1.00 m de ancho. a) ¿Cuál es la incertidumbre mínima en la velocidad del pato? b) Suponiendo que esta incertidumbre en velocidad prevalece durante 5.00 s , determine la incertidumbre en la posición de Borrosito después de este tiempo.
37. La vida promedio de un muón es aproximadamente $2 \mu\text{s}$. Estime la incertidumbre mínima en la energía de un muón.
38. **CIC** a) Demuestre que la energía cinética de una partícula no relativista se puede escribir en términos de su cantidad de movimiento como $EC = p^2/2m$. b) Use los resultados del inciso a) para encontrar la energía cinética mínima de un protón confinado dentro de un núcleo que tiene un diámetro de $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}$.

Problemas adicionales

39. Un fotón de microondas en la región de la banda X tiene una longitud de onda de 3.00 cm. Encuentre a) la cantidad de movimiento, b) la frecuencia y c) la energía del fotón en electrón-volts.
40. Encuentre la velocidad de un electrón que tiene una longitud de onda de De Broglie igual a su longitud de onda Compton. *Sugerencia:* Este electrón es relativista.
41. Un objeto de 2.0 kg cae desde una altura de 5.0 m hasta el suelo. Si toda la energía potencial gravitacional de esta masa se pudiera convertir a luz visible de 5.0×10^{-7} m de longitud de onda, ¿cuántos fotones se producirían?
42. Un tubo de rayos X opera a 50 000 V. a) Encuentre la longitud de onda mínima de la radiación emitida por este tubo. b) Si la radiación se dirige a un cristal, el máximo de primer orden en la radiación reflejada ocurre cuando el ángulo de roce es 2.5° . ¿Cuál es el espaciamiento entre los planos que reflejan en el cristal?
43. **C|C** La figura P27.43 muestra el espectro de luz emitido por una luciérnaga. Determine la temperatura de un cuerpo negro que emitiría radiación con un máximo en la misma frecuencia. Con base en sus resultados, ¿diría que la radiación de la luciérnaga es radiación de cuerpo negro?

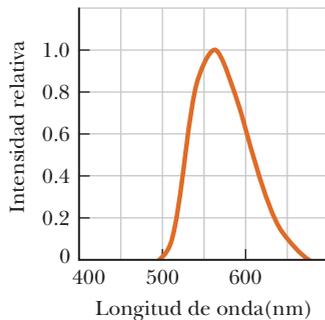


Figura P27.43

44. El truco favorito de Johnny el saltarín es saltar desde su ventana del piso 16 y caer 50.0 m en una alberca. Un reportero toma una fotografía de Johnny, de 75.0 kg, justo antes de dar el chapuzón y usa un tiempo de exposición de

5.00 ms. Encuentre a) la longitud de onda de De Broglie de Johnny en este momento, b) la incertidumbre de la medición de su energía cinética durante tal periodo y c) el error porcentual causado por tal incertidumbre.

45. **M** Fotones con 450 nm de longitud de onda inciden sobre un metal. Los electrones más energéticos que se expulsan del metal se desvían en un arco circular de 20.0 cm de radio mediante un campo magnético con una magnitud de 2.00×10^{-5} T. ¿Cuál es la función de trabajo del metal?
46. Un electrón inicialmente en reposo retrocede después de un choque frontal con un fotón de 6.20 keV. Determine la energía cinética adquirida por el electrón.
47. Una fuente de luz con longitud de onda λ ilumina un metal y expulsa fotoelectrones con una energía cinética máxima de 1.00 eV. Una segunda fuente de luz, con longitud de onda $\lambda/2$, expulsa fotoelectrones con una energía cinética máxima de 4.00 eV. ¿Cuál es la función de trabajo del metal?
48. Luz roja con longitud de onda de 670 nm produce fotoelectrones de cierto material fotoemisivo. Luz verde con longitud de onda de 520 nm produce fotoelectrones del mismo material con 1.50 veces la máxima energía cinética. ¿Cuál es la función de trabajo del material?
49. ¿Cuán rápido se debe mover un electrón si toda su energía cinética se pierde en un solo fotón de rayo X a) en el extremo superior del espectro electromagnético de rayos X, con una longitud de onda de 1.00×10^{-8} m y b) en el extremo inferior del espectro electromagnético de rayos X, con una longitud de onda de 1.00×10^{-13} m?
50. **C|C** A partir de la dispersión de la luz del Sol, J. J. Thomson calculó el radio clásico del electrón que tiene el valor de $2.82 \text{ m} \times 10^{-15}$ m. La luz del Sol con una intensidad de 500 W/m^2 cae en un disco con este radio. Suponga que la luz es una onda mecánica y la luz que incide sobre el disco es absorbida completamente. a) Calcule el tiempo necesario para acumular 1.00 eV de energía. b) Explique cómo su resultado para el inciso a) se compara con la observación de que fotoelectrones son emitidos con prontitud (en 10^{-9} s).

La quema de pólvora transfiere energía a los átomos de los químicos que producen color, lo que excita sus electrones a estados de energía superiores. Al regresar al estado base, los electrones emiten luz de colores específicos, lo que resulta en espectaculares despliegues pirotécnicos. El estroncio produce rojo y el sodio produce amarillo/anaranjado.



© Sunnybeach/istockphoto.com

28

Física atómica

- 28.1 Primeros modelos del átomo
- 28.2 Espectros atómicos
- 28.3 El modelo de Bohr
- 28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno
- 28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica
- 28.6 Rayos X característicos
- 28.7 Transiciones atómicas y láseres

Un gas caliente emite luz de ciertas longitudes de onda características que se pueden usar para identificarlo, así como una huella digital puede identificar a una persona. Para un átomo dado, estas longitudes de onda características emitidas se pueden comprender con el uso de cantidades físicas llamadas números cuánticos. El átomo más simple es el hidrógeno y entenderlo puede conducir a comprender la estructura de otros átomos y sus combinaciones. El hecho de que dos electrones en un átomo no puedan tener el mismo conjunto de números cuánticos, el principio de exclusión de Pauli, es extremadamente importante para comprender las propiedades de los átomos complejos y el orden de los elementos en la tabla periódica. Conocer la estructura atómica se puede usar para describir los mecanismos involucrados en la producción de rayos X y la operación de un láser, entre muchas otras aplicaciones.

28.1 Primeros modelos del átomo

El modelo del átomo en la época de Newton era una pequeña esfera dura e indestructible. Aunque este modelo fue una buena base para la teoría cinética de los gases, se tuvieron que desarrollar nuevos modelos cuando experimentos posteriores revelaron la naturaleza electrónica de los átomos. J. J. Thomson (1856-1940) sugirió un modelo del átomo como un volumen de carga positiva con electrones incrustados a través de todo su volumen, en forma muy parecida a las semillas en una sandía (figura 28.1).

En 1911, Ernest Rutherford (1871-1937) y sus estudiantes Hans Geiger y Ernest Marsden realizaron un experimento crítico que demostró que el modelo de Thomson no podía ser correcto. En este experimento, un haz de **partículas alfa** con carga positiva se proyectó contra una delgada hoja metálica, como en la figura 28.2a. La mayoría de las partículas alfa pasaba a través de la hoja como si fuese espacio vacío, pero algunas partículas se dispersaban a través de grandes ángulos e incluso algunas viajaban de regreso.

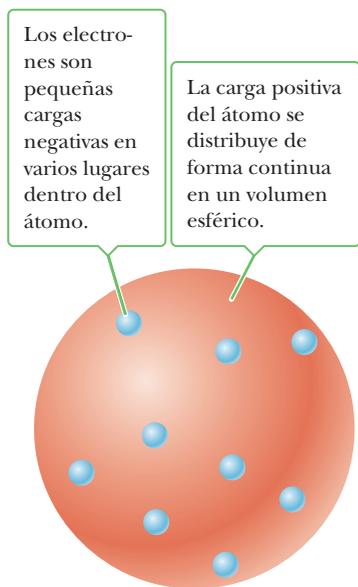


Figura 28.1 Modelo de Thomson del átomo.

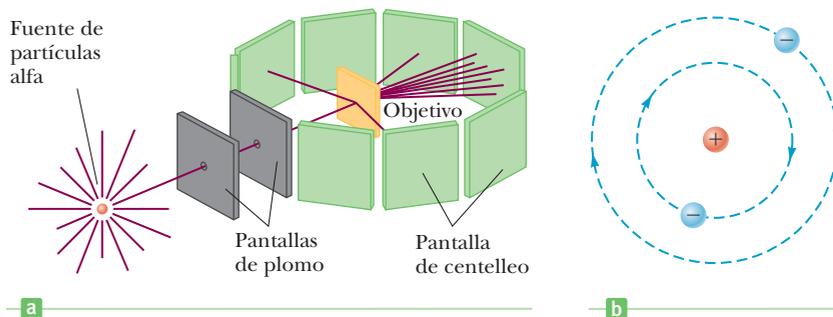


Figura 28.2 a) Técnica de Geiger y Marsden para observar la dispersión de partículas alfa en un delgado objetivo de hoja metálica. La fuente es una sustancia radioactiva natural, como el radio. b) Modelo planetario del átomo de Rutherford.

No se esperaban desviaciones tan grandes. En el modelo de Thomson una partícula alfa con carga positiva nunca se acercaría lo suficiente a una gran carga positiva para causar alguna desviación con un ángulo grande. Rutherford explicó estos resultados al suponer que la carga positiva en un átomo estaba concentrada en una región llamada **núcleo**, que era pequeño en relación con el tamaño del átomo. Cualquier electrón que pertenezca al átomo se visualiza como en órbita alrededor del núcleo, en forma muy parecida a los planetas que orbitan al Sol, como se muestra en la figura 28.2b. Las partículas alfa que se usaron en los experimentos de Rutherford se identificaron posteriormente como núcleos de átomos de helio.

Con el modelo planetario de Rutherford había dos dificultades básicas. Primera, un átomo emite ciertas frecuencias características discretas de radiación electromagnética y ninguna otra; el modelo de Rutherford era incapaz de explicar este fenómeno. Segunda, los electrones en el modelo de Rutherford experimentan una aceleración centrípeta. De acuerdo con la teoría de electromagnetismo de Maxwell, las cargas con aceleración centrípeta que giran con frecuencia f deben radiar ondas electromagnéticas de la misma frecuencia. Conforme el electrón radia energía, el radio de su órbita disminuye de manera estable y su frecuencia de revolución aumenta. Este proceso conduce a una frecuencia cada vez más creciente de radiación emitida y un rápido colapso del átomo conforme el electrón cae en espiral hacia el núcleo.

El modelo de Rutherford del átomo dio lugar al de Niels Bohr, que explicaba la radiación característica emitida por los átomos. A su vez, la teoría de Bohr fue sustituida por la mecánica cuántica. Las dos últimas teorías se basan en estudios de espectros atómicos: el patrón característico en las longitudes de onda de la luz emitida que es único para cada elemento diferente.

28.2 Espectros atómicos

Suponga que un tubo de vidrio vacío se llena con hidrógeno (o algún otro gas) a baja presión. Si entre los electrodos metálicos del tubo se aplica un voltaje lo suficientemente grande como para producir una corriente eléctrica en el gas, el tubo emite luz que tiene un color que depende del gas en el interior. (Así es como funciona una señal de neón.) Cuando la luz emitida se analiza con un espectrómetro, se observan líneas brillantes tenues y cada una tiene una longitud de onda o color diferente. Tal serie de líneas espectrales se llama **espectro de emisión**. Las longitudes de onda contenidas en tal espectro son características del elemento que emite la luz. Puesto que ningún par de elementos emite el mismo

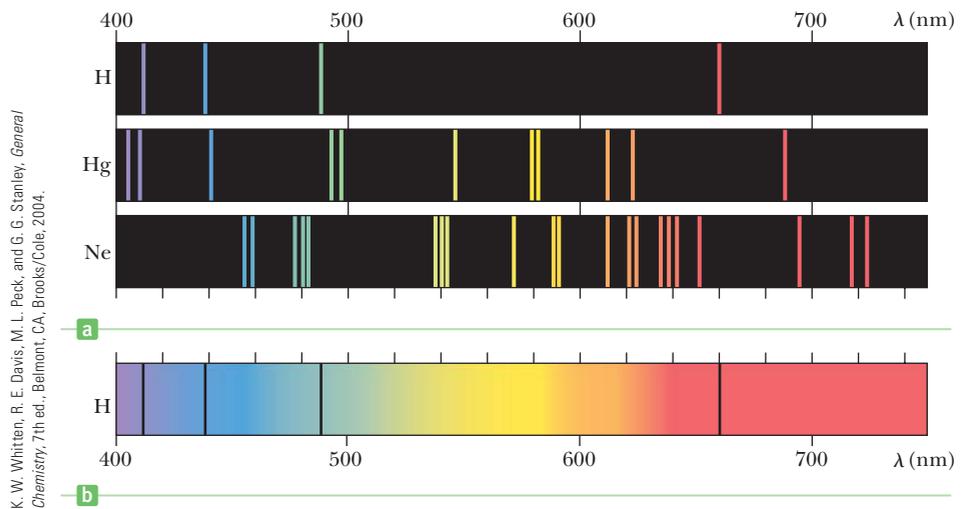


Stock Montage, Inc.

Sir Joseph John Thomson Físico inglés (1856-1940)

Thomson, generalmente conocido como el descubridor del electrón, abrió el campo de la física de partículas subatómicas con su extenso trabajo acerca de la desviación de rayos catódicos (electrones) en un campo eléctrico. Recibió el Premio Nobel de Física en 1906 por su descubrimiento del electrón.

Figura 28.3 Espectros visibles. a) Espectros de línea producidos por emisión en el rango visible para los elementos hidrógeno, mercurio y neón. b) Espectro de absorción para hidrógeno. Las líneas de absorción oscuras ocurren a las mismas longitudes de onda que las líneas de emisión para el hidrógeno que se muestra en a).



espectro de líneas, este fenómeno representa una técnica confiable para identificar elementos en una sustancia gaseosa. Varios espectros de emisión se muestran en la figura 28.3a.

El espectro de emisión del hidrógeno que se muestra en la figura 28.4 incluye cuatro líneas prominentes que ocurren a longitudes de onda de 656.3 nm, 486.1 nm, 434.1 nm y 410.2 nm. En 1885, Johann Balmer (1825-1898) descubrió que las longitudes de onda de éstas y de líneas menos prominentes pueden describirse mediante la simple ecuación empírica

Serie de Balmer ▶

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad [28.1]$$

donde n puede tener valores enteros de 3, 4, 5, ..., y R_H es una constante llamada **constante de Rydberg**. Si la longitud de onda está en metros, entonces R_H tiene el valor

Constante de Rydberg ▶

$$R_H = 1.097\,373\,2 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad [28.2]$$

La primera línea en la serie de Balmer, a 656.3 nm, corresponde a $n = 3$ en la ecuación 28.1, la línea a 486.1 nm corresponde a $n = 4$, etcétera. Además de la serie de Balmer de líneas espectrales, tiempo después se descubrió la serie de Lyman en el ultravioleta lejano y las longitudes radiadas se describen mediante una ecuación similar, pero con 1^2 en lugar de 2^2 en la ecuación 28.1 y el entero n mayor que 1. La serie de Paschen corresponde a longitudes de onda mayores que la serie de Balmer, pero con 3^2 en lugar de 2^2 en la ecuación 28.1 y $n > 3$. Estos modelos, junto con muchas otras observaciones, se pueden combinar para producir la ecuación de Rydberg,

Ecuación de Rydberg ▶

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad [28.3]$$

donde m y n son enteros positivos y $n > m$.

Además de emitir luz a longitudes de onda específicas, un elemento puede absorber luz a longitudes de onda específicas. Las líneas espectrales que corresponden a este proceso forman lo que se conoce como un **espectro de absorción**. Un espectro de absorción se puede obtener al pasar un espectro de radiación continuo (uno que contenga todas las longitudes de onda) a través de un vapor del elemento a analizar. El espectro de absorción consiste en una serie de líneas oscuras superpuestas sobre el espectro de otro modo brillante y continuo. Cada línea en el espectro de absorción de un elemento dado coincide con una línea en el espectro de emisión del elemento. Si el hidrógeno es el vapor que absorbe, por ejemplo, las líneas oscuras aparecerán a las longitudes de onda visibles 656.3 nm, 486.1 nm, 434.1 nm y 410.2 nm, como se muestra en las figuras 28.3b y 28.4.

El espectro de absorción de un elemento tiene muchas aplicaciones prácticas. Por ejemplo, el espectro continuo de la radiación emitida por el Sol debe pasar a través de los gases más fríos de la atmósfera solar antes de llegar a la Tierra. Las diversas líneas de absorción que se observan en el espectro solar sirvieron para identificar elementos en la atmósfera solar, incluido el helio, que anteriormente se desconocía.

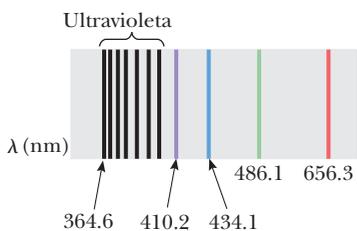


Figura 28.4 Serie de Balmer de líneas espectrales para hidrógeno atómico, con varias líneas marcadas con la longitud de onda en nanómetros. La línea marcada 364.6 es la línea de longitud de onda más corta y está en la región ultravioleta del espectro electromagnético. Las otras líneas marcadas están en la región visible.

■ FÍSICA APLICADA 28.1 Térmico o espectral

Al observar la flama amarilla de una vela, su compañero de laboratorio afirma que la luz proveniente de la flama se origina a partir de átomos de sodio excitados en la flama. Usted no está de acuerdo y postula que, dado que la flama de la vela está caliente, la radiación debe tener origen térmico. Antes de que el desacuerdo se vuelva más intenso, ¿cómo podría determinar quién está en lo correcto?

EXPLICACIÓN Podría realizar una determinación simple al observar la luz de la flama de la vela a través de un

espectrómetro, que es una combinación de rendija y rejilla de difracción, analizado en el capítulo 25. Si el espectro de la luz es continuo, probablemente tiene origen térmico. Si el espectro muestra líneas discretas, tiene origen atómico. Los resultados del experimento demuestran que la luz de hecho tiene origen térmico y se produce a partir de movimiento aleatorio en la flama de la vela. ■

■ FÍSICA APLICADA 28.2 Auroras

En el norte, a latitudes extremas, las auroras boreales proporcionan un hermoso y colorido despliegue en el cielo nocturno. Un despliegue similar, llamado aurora austral, ocurre cerca de la región polar del sur. ¿Cuál es el origen de los diversos colores que se ven en las auroras?

EXPLICACIÓN La aurora es el resultado de la interacción de partículas de alta velocidad con el campo magnético de la Tierra y entran a la atmósfera. Cuando estas partículas cho-

can con las moléculas en la atmósfera, excitan las moléculas tal como lo hace el voltaje en los tubos de espectro que se estudiaron anteriormente en esta sección. En respuesta, las moléculas emiten colores de luz de acuerdo con los espectros característicos de sus constituyentes atómicos. Para la atmósfera terrestre, los constituyentes principales son nitrógeno y oxígeno, que proporcionan los colores rojo, azul y verde de la aurora. ■

28.3 El modelo de Bohr

A comienzos del siglo XX, no se entendía por qué los átomos de un elemento dado emitían y absorbían sólo ciertas longitudes de onda. En 1913, Bohr proporcionó una explicación de los espectros de hidrógeno que incluye algunas características de la teoría actualmente aceptada. Su modelo del átomo de hidrógeno incluyó las siguientes suposiciones básicas:

1. El electrón se mueve en órbitas circulares en torno al protón bajo la influencia de la fuerza de atracción de Coulomb, como en la figura 28.5. La fuerza de Coulomb produce la aceleración centrípeta del electrón.
2. Sólo ciertas órbitas son estables y permitidas. En estas órbitas no se emite energía en forma de radiación electromagnética, de modo que la energía total del átomo permanece constante.
3. El átomo de hidrógeno emite radiación cuando el electrón “salta” de un estado inicial más energético a un estado menos energético. El “salto” no se puede visualizar o tratar de manera clásica. La frecuencia f de la radiación emitida en el salto se relaciona con el cambio en la energía del átomo, dada por

$$E_i - E_f = hf \quad [28.4]$$

donde E_i es la energía del estado inicial, E_f es la energía del estado final, h es la constante de Planck y $E_i > E_f$. La frecuencia de la radiación es *independiente de la frecuencia del movimiento orbital del electrón*.

4. La circunferencia de la órbita de un electrón debe contener un número entero de longitudes de onda de De Broglie,

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(véase la figura 28.6). Puesto que la longitud de onda de De Broglie de un electrón es $\lambda = h/m_e v$, la ecuación anterior se puede escribir como

$$m_e v r = n\hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.5]$$

donde $\hbar = h/2\pi$.

El electrón sólo puede estar en órbitas específicas de radios discretos.

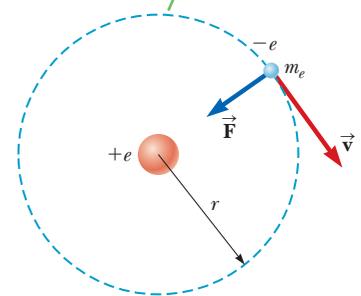


Figura 28.5 Diagrama que representa el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno.

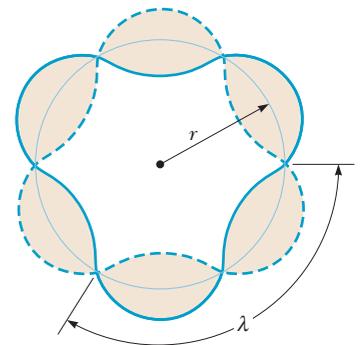


Figura 28.6 Patrón de onda estacionaria para una onda de electrones en una órbita estable del hidrógeno. Existen cuatro longitudes de onda completas en esta órbita.

Niels Bohr Archive



Niels Bohr

Físico danés (1885-1962)

Bohr fue un participante activo en el desarrollo temprano de la mecánica cuántica y proporcionó mucho de su marco filosófico. Durante las décadas de 1920 y 1930, encabezó el Instituto para Estudios Avanzados en Copenhague, donde muchos de los mejores físicos del mundo llegaron para intercambiar ideas. Bohr recibió el Premio Nobel de Física en 1922 por su investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que emana de ellos.

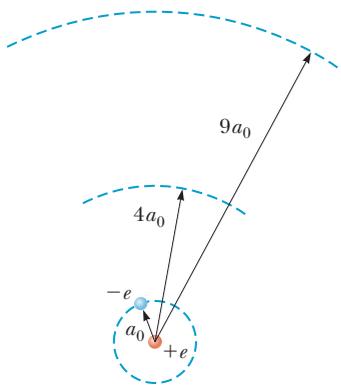


Figura activa 28.7

Las primeras tres órbitas circulares predichas por el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno. El electrón se muestra en órbita en su estado base.

Con estas cuatro suposiciones, se pueden calcular las energías permitidas y las longitudes de onda de emisión del átomo de hidrógeno usando el modelo que se representa en la figura 28.5, en el cual el electrón viaja en una órbita circular de radio r con una velocidad orbital v . La energía potencial eléctrica del átomo es

$$EP = k_e \frac{q_1 q_2}{r} = k_e \frac{(-e)(e)}{r} = -k_e \frac{e^2}{r}$$

donde k_e es la constante de Coulomb. Suponiendo que el núcleo está en reposo, la energía total E del átomo es la suma de la energía cinética y potencial:

$$E = EC + EP = \frac{1}{2} m_e v^2 - k_e \frac{e^2}{r} \tag{28.6}$$

Por la segunda ley de Newton, la fuerza de atracción eléctrica sobre el electrón, $k_e e^2 / r^2$, debe ser igual a $m_e a_r$, donde $a_r = v^2 / r$ es la aceleración centrípeta del electrón, de modo que

$$m_e \frac{v^2}{r} = k_e \frac{e^2}{r^2} \tag{28.7}$$

Multiplique ambos lados de esta ecuación por $r/2$ para obtener una expresión para la energía cinética:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{k_e e^2}{2r} \tag{28.8}$$

Al combinar este resultado con la ecuación 28.6 obtenemos una expresión para la energía del átomo,

$$E = - \frac{k_e e^2}{2r} \tag{28.9}$$

donde el valor negativo de la energía indica que el electrón está enlazado al protón.

Al resolver las ecuaciones 28.5 y 28.7 para v^2 e igualar los resultados se obtiene una expresión para r :

$$v^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2} = \frac{k_e e^2}{m_e r}$$

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e e^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{28.10}$$

Esta ecuación se basa en la suposición de que **el electrón puede existir solamente en ciertas órbitas permitidas determinadas por el entero n** .

La órbita con el radio más pequeño, llamado **radio de Bohr**, a_0 , corresponde a $n = 1$ y tiene el valor

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m k_e e^2} = 0.0529 \text{ nm} \tag{28.11}$$

Una expresión general para el radio de cualquier órbita en el átomo de hidrógeno se obtiene al sustituir la ecuación 28.11 en la ecuación 28.10:

$$r_n = n^2 a_0 = n^2 (0.0529 \text{ nm}) \tag{28.12}$$

En la figura activa 28.7 se muestran las primeras tres órbitas de Bohr para el hidrógeno.

La ecuación 28.10 se puede sustituir entonces en la ecuación 28.9 para dar como resultado la siguiente expresión para las energías de los estados cuánticos:

$$E_n = - \frac{m_e k_e^2 e^4}{2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \tag{28.13}$$

Si se sustituyen valores numéricos en la ecuación 28.13, se obtiene

$$E_n = - \frac{13.6}{n^2} \text{ eV} \tag{28.14}$$

Niveles de energía del hidrógeno ▶

El estado de energía más bajo o **estado base**, corresponde a $n = 1$ y tiene una energía $E_1 = -m_e k_e^2 e^4 / 2\hbar^2 = -13.6$ eV. El siguiente estado, que corresponde a $n = 2$, tiene una energía $E_2 = E_1/4 = -3.40$ eV, etcétera. En la figura activa 28.8 se proporciona un diagrama de niveles de energía que muestra las energías de dichos estados estacionarios y los correspondientes números cuánticos. El nivel superior, que corresponde a $E = 0$ y $n \rightarrow \infty$, representa el estado para el cual el electrón se libera por completo del átomo. En este estado las EC y EP del electrón son ambas cero, lo cual significa que el electrón está en reposo infinitamente lejos del protón. La energía mínima requerida para ionizar el átomo (esto es, para removerlo por completo del electrón) se llama **energía de ionización**. La energía de ionización para el hidrógeno es 13.6 eV.

Las ecuaciones 28.4 y 28.13 y el tercer postulado de Bohr muestran que, si el electrón salta de una órbita con número cuántico n_i a una segunda órbita con número cuántico n_f , emite un fotón de frecuencia f dada por

$$f = \frac{E_i - E_f}{\hbar} = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad [28.15]$$

donde $n_f < n_i$.

Para convertir esta ecuación en una análoga a la ecuación de Rydberg, sustituya $f = c/\lambda$ y divida ambos lados por c , para obtener

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad [28.16]$$

donde

$$R_H = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \quad [28.17]$$

Al sustituir los valores conocidos de m_e , k_e , e , c y \hbar se comprueba que este valor teórico para la constante de Rydberg está en excelente concordancia con el valor derivado experimentalmente en las ecuaciones de la 12.1 a la 12.3. Cuando Bohr demostró esta concordancia, se reconoció como un gran logro de su teoría.

Es posible usar la ecuación 28.16 para evaluar las longitudes de onda para las diversas series en el espectro del hidrógeno. Por ejemplo, en la serie de Balmer, $n_f = 2$ y $n_i = 3, 4, 5, \dots$ (ecuación 28.1). El diagrama de niveles de energía para el hidrógeno que se muestra en la figura activa 28.8 indica el origen de las líneas espectrales. Las transiciones entre niveles se representan mediante flechas verticales. Observe que, siempre que una transición ocurra entre un estado designado por n_i a uno designado por n_f (donde $n_i > n_f$), se emite un fotón con una frecuencia $(E_i - E_f)/h$. Este proceso se puede interpretar del modo siguiente: las líneas en la parte visible del espectro de hidrógeno surgen cuando el electrón salta de la órbita tercera, cuarta o incluso superior, a la segunda órbita. La teoría de Bohr predice exitosamente las longitudes de onda de todas las líneas espectrales observadas del hidrógeno.

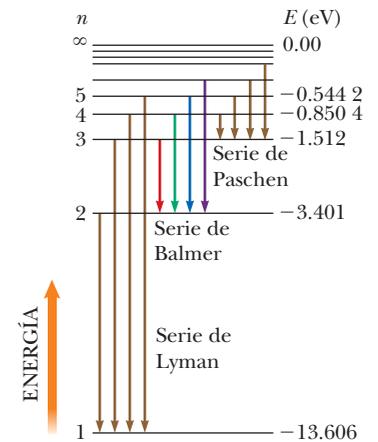


Figura activa 28.8 Diagrama de niveles de energía para el hidrógeno. A la izquierda se proporcionan los números cuánticos y a la derecha las energías (en electrón-volts). Las flechas verticales representan las cuatro transiciones de menor energía para cada una de las series espectrales que se muestran. Las flechas de colores para la serie de Balmer indican que esta serie resulta en luz visible.

Tip 28.1 La energía depende de n sólo para hidrógeno

Puesto que todas las otras cantidades en la ecuación 28.13 son constantes, los niveles de energía de un átomo de hidrógeno sólo dependen del número cuántico n . Para átomos más complicados, los niveles de energía también dependen de otros números cuánticos.

■ EJEMPLO 28.1 La serie de Balmer para el hidrógeno

OBJETIVO Calcular la longitud de onda, frecuencia y energía de un fotón emitido durante una transición electrónica en un átomo.

PROBLEMA La serie de Balmer para el átomo de hidrógeno corresponde a transiciones electrónicas que terminan en el estado con número cuántico $n = 2$, como se muestra en la figura 28.9. **a)** Encuentre el fotón con longitud de onda más larga emitida en la serie de Balmer y determine su frecuencia y energía. **b)** Encuentre el fotón con longitud de onda más corta emitido en la misma serie.

ESTRATEGIA Este problema es asunto de sustituir valores en la ecuación 28.16. Entonces la frecuencia se puede obtener a partir de $c = f\lambda$ y la energía de $E = hf$. El fotón con longitud de onda más largo corresponde al que se emite cuando el electrón salta del estado $n_i = 3$ al estado $n_f = 2$. El fotón con longitud de onda más corta corresponde al que se emite cuando el electrón salta de $n_i = \infty$ al estado $n_f = 2$.

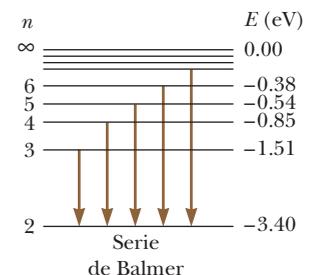


Figura 28.9 (Ejemplo 28.1) Transiciones responsables de la serie de Balmer para el átomo de hidrógeno. Todas las transiciones terminan en el nivel $n = 2$.

(continúa)

SOLUCIÓN

a) Encuentre el fotón con longitud de onda más larga emitido en la serie de Balmer y determine su frecuencia y energía.

Sustituya en la ecuación 28.16, con $n_i = 3$ y $n_f = 2$:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = \frac{5R_H}{36}$$

Tome el recíproco y sustituya, y encuentre la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{36}{5R_H} = \frac{36}{5(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})} = 6.563 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= \mathbf{656.3 \text{ nm}}$$

Ahora use $c = f\lambda$ para obtener la frecuencia:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2.998 \times 10^8 \text{ m/s}}{6.563 \times 10^{-7} \text{ m}} = \mathbf{4.568 \times 10^{14} \text{ Hz}}$$

Calcule la energía del fotón al sustituir en la ecuación 27.5:

$$E = hf = (6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(4.568 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 3.027 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$= 3.027 \times 10^{-19} \text{ J} \left(\frac{1 \text{ eV}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = \mathbf{1.892 \text{ eV}}$$

b) Encuentre el fotón con longitud de onda más corta emitido en la serie de Balmer.

Sustituya en la ecuación 28.16, con $1/n_i \rightarrow 0$ conforme $n_i \rightarrow \infty$ y $n_f = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{2^2} - 0 \right) = \frac{R_H}{4}$$

Tome el recíproco y sustituya, y encuentre la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{4}{R_H} = \frac{4}{(1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})} = 3.646 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= \mathbf{364.6 \text{ nm}}$$

COMENTARIOS La primera longitud de onda está en la región roja del espectro visible. También podría obtener la energía del fotón al usar la ecuación 28.4 en la forma $h_f = E_3 - E_2$, donde E_2 y E_3 son los niveles de energía del átomo de hidrógeno, calculado a partir de la ecuación 28.14. Observe que este fotón es el que tiene la energía más baja en la serie de Balmer porque involucra el menor cambio de energía. El segundo fotón, el más energético, está en la región ultravioleta.

PREGUNTA 28.1 ¿Cuál es el límite de energía superior de un fotón que se puede emitir del hidrógeno debido a la transición de un electrón entre niveles de energía? Explique.

EJERCICIO 28.1 a) Calcule la energía del fotón con longitud de onda más corta emitido en la serie de Balmer para el hidrógeno. b) Calcule la longitud de onda del fotón que se emite cuando un electrón transita de $n = 4$ a $n = 2$.

RESPUESTAS a) 3.40 eV b) 486 nm

Principio de correspondencia de Bohr

En el estudio de la relatividad en el capítulo 26, descubrimos que la mecánica newtoniana no se puede usar para describir fenómenos que ocurren a velocidades que se aproximan a la rapidez de la luz. La mecánica newtoniana es un caso especial de mecánica relativista y se aplica solamente cuando v es mucho menor que c . De igual modo, **la mecánica cuántica está en concordancia con la física clásica cuando las diferencias de energía entre niveles cuantizados son muy pequeñas**. Este principio, que primero estableció Bohr, se llama **principio de correspondencia**.

Átomos hidrogenoides

El análisis que se usa en la teoría de Bohr también es exitoso cuando se aplica a átomos *hidrogenoides*. Se dice que un átomo es hidrogenoide cuando sólo contiene un electrón. Son ejemplos el helio ionizado individualmente, el litio doblemente ionizado y el berilio triplemente ionizado. Los resultados de la teoría de Bohr para el hidrógeno se pueden extender para los átomos hidrogenoides al sustituir Ze^2 por e^2 en las ecuaciones de hidrógeno,

donde Z es el número atómico del elemento. Por ejemplo, las ecuaciones 28.13 y de la 28.16 a la 28.17 se convierten en

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.18]$$

y

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{4\pi c \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad [28.19]$$

Aunque se han hecho muchos intentos por extender la teoría de Bohr a átomos multielectrones más complejos, los resultados no han sido exitosos. Incluso en la actualidad, sólo están disponibles métodos aproximados para tratar a los átomos de muchos electrones.

Examen rápido

28.1 Considere un átomo de hidrógeno y un átomo de helio individualmente ionizado. ¿Cuál átomo tiene la menor energía de estado base? a) Hidrógeno b) Helio c) La energía del estado base es la misma para ambos.

EJEMPLO 28.2 Helio individualmente ionizado

OBJETIVO Aplicar la teoría de Bohr modificada a un átomo hidrogenoide.

PROBLEMA El helio individualmente ionizado, He^+ , es un sistema hidrogenoide, tiene un electrón en la órbita correspondiente a $n = 1$ cuando el átomo está en su estado base. Encuentre a) la energía del sistema en el estado base en electrón-volts y b) el radio de la órbita del estado base.

ESTRATEGIA El inciso a) requiere sustitución en el modelo de Bohr modificado, la ecuación 28.18. En el inciso b), modifique la ecuación 28.10 para el radio de las órbitas de Bohr al sustituir e^2 por Ze^2 , donde Z es el número de protones en el núcleo.

SOLUCIÓN

a) Encuentre la energía del sistema en el estado base. Escriba la ecuación 28.18 para las energías de un sistema hidrogenoide:

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 Z^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2}\right)$$

Sustituya las constantes y convierta a electrón-volts:

$$E_n = -\frac{Z^2(13.6 \text{ eV})}{n^2}$$

Sustituya $Z = 2$ (el número atómico del helio) y $n = 1$ para obtener la energía del estado base:

$$E_1 = -4(13.6 \text{ eV}) = -54.4 \text{ eV}$$

b) Encuentre el radio del estado base.

Generalice la ecuación 28.10 a un átomo hidrogenoide mediante la sustitución de e^2 por Ze^2 :

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e Z e^2} = \frac{n^2}{Z} (a_0) = \frac{n^2}{Z} (0.0529 \text{ nm})$$

Para el caso presente, $n = 1$ y $Z = 2$:

$$r_1 = 0.0265 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Observe que, para Z superiores, la energía de un átomo hidrogenoide es menor, lo cual significa que el electrón está fuertemente enlazado como en el hidrógeno. El resultado es un átomo más pequeño, como se ve en el inciso b).

PREGUNTA 28.2 Cuando un electrón experimenta una transición de un estado superior a uno inferior en helio individualmente ionizado, ¿cómo se comparará la energía del fotón emitido con la transición análoga en hidrógeno? Explique.

EJERCICIO 28.2 Repita el problema para el primer estado excitado del litio doblemente ionizado ($Z = 3$, $n = 2$).

RESPUESTAS a) $E_2 = -30.6 \text{ eV}$ b) $r_2 = 0.0705 \text{ nm}$

La teoría de Bohr se extendió en forma *ad hoc* de modo que incluyera mayores detalles de los espectros atómicos. Todas estas modificaciones se sustituyeron con la teoría de la mecánica cuántica, que desarrollaron de manera independiente Werner Heisenberg y Erwin Schrödinger.

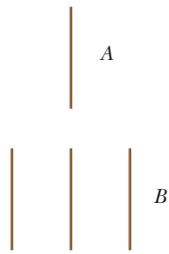


Figura 28.10 Una sola línea A) se puede dividir en tres líneas separadas B) en un campo magnético.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

Uno de los primeros logros de la mecánica cuántica fue la solución de la ecuación de onda para el átomo de hidrógeno. Aunque los detalles de la solución están más allá del nivel de este libro, se pueden describir la solución y sus implicaciones para la estructura atómica.

De acuerdo con la mecánica cuántica, las energías de los estados permitidos están en exacta concordancia con los valores obtenidos por la teoría de Bohr (ecuación 28.13) cuando las energías permitidas sólo dependen del número cuántico principal n .

Además del número cuántico principal, a partir de la solución de la ecuación de onda de Schrödinger surgieron otros dos números cuánticos: el **número cuántico orbital** ℓ y el **número cuántico magnético orbital** m_ℓ .

El efecto del número cuántico magnético m_ℓ se puede observar en los espectros cuando hay campos magnéticos presentes, lo que resulta en la división de las líneas espectrales individuales en varias líneas. Esta división se llamó *efecto Zeeman*. La figura 28.10 muestra una sola línea espectral que se divide en tres líneas cercanamente espaciadas. Esto indica que la energía de un electrón se modifica ligeramente cuando el átomo se sumerge en un campo magnético.

Los rangos permitidos de los valores de estos números cuánticos son los siguientes:

- El valor de n puede variar de 1 a ∞ en incrementos enteros.
- El valor de ℓ puede variar de 0 a $n - 1$ en incrementos enteros.
- El valor de m_ℓ puede variar de $-\ell$ a ℓ en incrementos enteros.

A partir de estas reglas, podemos ver que para un valor dado de n , existen n posibles valores de ℓ , mientras que para un valor dado de ℓ , existen $2\ell + 1$ valores posibles de m_ℓ . Por ejemplo, si $n = 1$, existe solamente un valor de ℓ , $\ell = 0$. Dado que $2\ell + 1 = 2 \cdot 0 + 1 = 1$, sólo hay un valor de m_ℓ , que es $m_\ell = 0$. Si $n = 2$, el valor de ℓ puede ser 0 o 1; si $\ell = 0$, entonces $m_\ell = 0$; pero si $\ell = 1$, entonces m_ℓ puede ser 1, 0 o -1 . La tabla 28.1 resume las reglas para determinar los valores permitidos de ℓ y m_ℓ para un valor dado de n .

Por razones históricas, **se dice que todos los estados con el mismo número cuántico principal n forman una capa**. Las capas se identifican mediante las letras K, L, M, . . . , que designan los estados para los cuales $n = 1, 2, 3$, etcétera. **Se dice que los estados con valores dados de n y ℓ forman una subcapa**. Las letras s, p, d, f, g, \dots , se usan para designar los estados para los cuales $\ell = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$. Estas notaciones se resumen en la tabla 28.2.

No pueden existir estados que violen las reglas dadas en la tabla 28.1. Un estado que no puede existir, por ejemplo, es el estado $2d$, que tendría $n = 2$ y $\ell = 2$. Este estado no está permitido porque el valor más alto permitido de ℓ es $n - 1$, o 1 en este caso. De modo que para $n = 2$, $2s$ y $2p$ son estados permitidos, mas no lo son $2d, 2f, \dots$. Para $n = 3$, los estados permitidos son $3s, 3p$ y $3d$.

En general, para un valor dado de n , existen n^2 estados con distintos pares de valores de ℓ y m_ℓ .

Tabla 28.1 Tres números cuánticos para el átomo de hidrógeno

Número cuántico	Nombre	Valores permitidos	Número de estados permitidos
n	Número cuántico principal	1, 2, 3, . . .	Cualquier número
ℓ	Número cuántico orbital	0, 1, 2, . . . , $n - 1$	n
m_ℓ	Número cuántico magnético orbital	$-\ell, -\ell + 1, \dots, 0, \dots, \ell - 1, \ell$	$2\ell + 1$

Tabla 28.2 Notación de capa y subcapa

n	Símbolo de capa	ℓ	Símbolo de subcapa
1	K	0	s
2	L	1	p
3	M	2	d
4	N	3	f
5	O	4	g
6	P	5	h
.	

Examen rápido

28.2 Cuando el número cuántico principal es $n = 5$, ¿cuántos diferentes valores de a) ℓ y b) m_ℓ son posibles? c) ¿Cuántos estados tienen distintos pares de valores de ℓ y m_ℓ ?

Espín

En los espectrómetros de alta resolución, la visualización cercana de una de las líneas prominentes del vapor de sodio muestra que, de hecho, se trata de dos líneas espaciadas muy cercanamente. Las longitudes de onda de estas líneas ocurren en la región amarilla del espectro, en 589.0 y 589.6 nm. Este tipo de división se conoce como **estructura fina**. En 1925, cuando se apreció por primera vez este doblete, la teoría atómica no podía explicarlo, así que Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, a partir de una sugerencia del físico austriaco Wolfgang Pauli, propusieron la introducción de un cuarto número cuántico para describir los niveles de energía atómica, m_s , llamado **número cuántico magnético de espín**. El espín (del inglés *spin*, girar) no se encuentra en las soluciones de las ecuaciones de Schrödinger; en vez de ello surge de manera natural en la ecuación de Dirac, que dedujo Paul Dirac en 1927. Esta ecuación es importante en la teoría cuántica relativista.

Al describir el número cuántico espín, es conveniente (mas técnicamente incorrecto) pensar en un electrón que gira sobre su eje conforme orbita el núcleo, tal como la Tierra gira sobre su eje conforme orbita al Sol. Sin embargo, a diferencia del espín de un mundo, sólo existen dos formas en las cuales el electrón puede girar mientras orbita el núcleo, como se muestra en la figura 28.11. Si la dirección de giro es como se muestra en la figura 28.11a, decimos que el electrón tiene “espín arriba”. Si la dirección de giro se invierte como en la figura 28.11b, decimos que el electrón tiene “espín abajo”. La energía del electrón es ligeramente diferente para las dos direcciones de espín y esta diferencia de energía explica el doblete del sodio. Los números cuánticos asociados con el espín del electrón son $m_s = \frac{1}{2}$ para el estado de espín arriba y $m_s = -\frac{1}{2}$ para el estado de espín abajo. Como verá en el ejemplo 28.3, este nuevo número cuántico duplica el número de estados permitidos que especifican los números cuánticos n , ℓ y m_ℓ .

Para cada electrón existen dos estados de espín. Una subcapa que corresponde a un factor dado de ℓ puede contener no más de $2(2\ell + 1)$ electrones. Este número se usa porque los electrones en una subcapa deben tener pares únicos de los números cuánticos (m_ℓ , m_s). Existen $2\ell + 1$ diferentes números cuánticos magnéticos m_ℓ y dos diferentes números cuánticos de espín m_s , lo que produce $2(2\ell + 1)$ pares únicos (m_ℓ , m_s). Por ejemplo, la subcapa p ($\ell = 1$) está llena cuando contiene $2(2 \cdot 1 + 1) = 6$ electrones. Este hecho se puede extender para incluir los cuatro números cuánticos, lo que será importante más adelante cuando se estudie el *principio de exclusión de Pauli*.

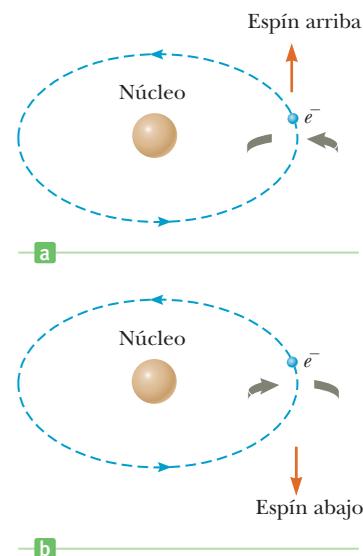


Figura 28.11 Conforme un electrón se mueve en su órbita alrededor del núcleo, su espín puede ser o a) arriba o b) abajo.

Tip 28.2 En realidad el electrón no gira

El electrón *no* gira físicamente. El espín del electrón es un efecto meramente cuántico que da al electrón una cantidad de movimiento angular *como si* girase físicamente.

EJEMPLO 28.3 El nivel $n = 2$ del hidrógeno

OBJETIVO Contar y tabular distintos estados cuánticos y determinar su energía con base en el nivel de energía atómica.

PROBLEMA a) Determine el número de estados con un conjunto único de valores para ℓ , m_ℓ y m_s en el átomo de hidrógeno para $n = 2$. b) Tabule los distintos estados cuánticos posibles, incluido el espín. c) Calcule las energías de estos estados en ausencia de un campo magnético, sin importar pequeñas diferencias causadas por el espín.

ESTRATEGIA Este problema es cuestión de contar, siguiendo las reglas cuánticas para n , ℓ , m_ℓ y m_s . “Único” significa que ningún otro estado cuántico tiene el mismo conjunto de números. Las energías, sin importar espín o desdoblamiento Zeeman en campos magnéticos, son todas las mismas porque todos los estados tienen el mismo número cuántico principal, $n = 2$.

SOLUCIÓN

a) Determine el número de estados con un conjunto único de valores para ℓ y m_ℓ en el átomo de hidrógeno para $n = 2$.

Determine los diferentes posibles valores de ℓ para $n = 2$.

$$0 \leq \ell \leq n - 1, \text{ de modo que para } n = 2, 0 \leq \ell \leq 1 \text{ y } \ell = 0 \text{ o } 1$$

Encuentre los diferentes posibles valores de m_ℓ para $\ell = 0$:

$$-\ell \leq m_\ell \leq \ell, \text{ de modo que } -0 \leq m_\ell \leq 0 \text{ implica que } m_\ell = 0$$

(continúa)

Mencione los distintos pares de (ℓ, m_ℓ) para $\ell = 0$:

Encuentre los diferentes posibles valores de m_ℓ para $\ell = 1$:

Mencione los distintos pares de (ℓ, m_ℓ) para $\ell = 1$:

Sume los resultados para $\ell = 0$ y $\ell = 1$ y multiplique por 2 para explicar los dos posibles espines de cada estado:

b) Tabule los diferentes posibles conjuntos de números cuánticos.

Use los resultados del inciso a) y recuerde que el número cuántico de espín siempre es $+\frac{1}{2}$ o $-\frac{1}{2}$.

c) Calcule las energías de estos estados.

La energía común de todos los estados, sin importar el desdoblamiento Zeeman y espín, se puede encontrar con la ecuación 28.14:

Sólo existe uno: $(\ell, m_\ell) = (0, 0)$.

$-\ell \leq m_\ell \leq \ell$, de modo que $-1 \leq m_\ell \leq 1$ implica que $m_\ell = -1, 0$ o 1

Existen tres $(\ell, m_\ell) = (1, -1), (1, 0)$ y $(1, 1)$.

Número de estados = $2(1 + 3) = 8$

n	ℓ	m_ℓ	m_s
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$\frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \rightarrow E_2 = -\frac{13.6 \text{ eV}}{2^2} = -3.40 \text{ eV}$$

COMENTARIOS Aunque estos estados por lo general tienen la misma energía, la aplicación de un campo magnético hace que tengan energías ligeramente diferentes centradas en torno a la energía correspondiente a $n = 2$. Además, se despreció la ligera diferencia en energía debida al estado del espín.

PREGUNTA 28.3 ¿Cuál de los cuatro números cuánticos nunca es negativo?

EJERCICIO 28.3 a) Determine el número de estados con un par único de valores para ℓ, m_ℓ y m_s en el nivel $n = 3$ del hidrógeno. b) Determine las energías de dichos estados, sin importar cualquier efecto de desdoblamiento.

RESPUESTAS a) 18 b) $E_3 = -1.51 \text{ eV}$

Nubes de electrones

La solución de la ecuación de onda, como se discutió en la sección 27.7, produce una función de onda Ψ que depende de los números cuánticos n, ℓ y m_ℓ . Recuerde que, si p es un punto y V_p un volumen muy pequeño que contiene dicho punto, entonces $\Psi^2 V_p$ es aproximadamente la probabilidad de encontrar el electrón dentro del volumen V_p . La figura 28.12 proporciona la probabilidad por unidad de longitud de encontrar el electrón a varias distancias desde el núcleo en el estado $1s$ del hidrógeno ($n = 1, \ell = 0$ y $m_\ell = 0$). Observe que la curva tiene un máximo en un valor de $r = 0.0529 \text{ nm}$, el radio de Bohr para la primera órbita de electrón ($n = 1$) en el hidrógeno. Este máximo significa que hay una probabilidad máxima de encontrar el electrón en un pequeño intervalo de una longitud fija dada con centro en dicha distancia desde el núcleo. Sin embargo, como la curva indica, también existe una probabilidad de encontrar el electrón en tal pequeño intervalo centrado en cualquiera otra distancia desde el núcleo. En mecánica cuántica el electrón no está confinado a una distancia orbital particular desde el núcleo, como se supuso en el modelo de Bohr. El electrón se puede encontrar a varias distancias del núcleo, pero encontrarlo en un pequeño intervalo con centro en el radio de Bohr tiene la mayor probabilidad. La mecánica cuántica también predice que la función de onda para el átomo de hidrógeno en el estado base tiene simetría esférica; por lo tanto, el electrón se puede encontrar en una región esférica que rodea al núcleo. Esto está en contraste con la teoría de Bohr, que confina la posición del electrón a puntos en un plano. El resultado mecánico cuántico con frecuencia se interpreta al ver al electrón como una nube que rodea al núcleo. En la figura 28.13 se muestra un intento por bosquejar este comportamiento parecido a una nube. Las regiones más densas de la nube representan aquellas posiciones donde el electrón tiene más probabilidad de encontrarse.

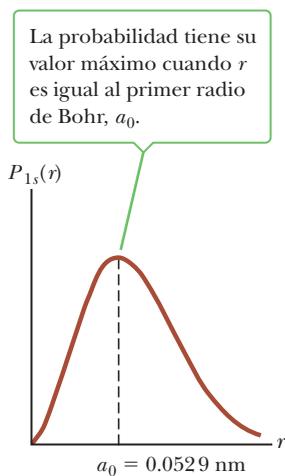


Figura 28.12 Probabilidad por unidad de longitud de encontrar el electrón contra la distancia desde el núcleo para el átomo de hidrógeno en el estado $1s$ (base).

Si un análisis similar se realiza para el estado $n = 2$, $\ell = 0$ del hidrógeno, un máximo de la curva de probabilidad se encuentra en $4a_0$, mientras que para el estado $n = 3$, $\ell = 0$, el máximo de la curva está en $9a_0$. En general, la mecánica cuántica predice una distancia del electrón más probable hacia el núcleo que concuerda con la posición descrita por la teoría de Bohr.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

El estado de un electrón en un átomo de hidrógeno se especifica mediante cuatro números cuánticos: n , ℓ , m_ℓ y m_s . Como se evidencia, el estado de cualquier electrón en cualquier otro átomo también se puede especificar mediante este mismo conjunto de números cuánticos.

¿Cuántos electrones en un átomo pueden tener un conjunto particular de números cuánticos? Esta importante cuestión la respondió Pauli en 1925 en un poderoso enunciado conocido como **principio de exclusión de Pauli**:

Ningún par de electrones en un átomo puede tener jamás el mismo conjunto de valores para el conjunto de números cuánticos n , ℓ , m_ℓ y m_s .

El principio de exclusión de Pauli explica la estructura electrónica de átomos complejos como una sucesión de niveles llenos con diferentes números cuánticos que aumentan en energía, donde los electrones más externos son los principales responsables de las propiedades químicas del elemento. Si este principio no fuese válido, todo electrón terminaría en el estado energético más bajo del átomo y el comportamiento químico de los elementos sería enormemente diferente. La naturaleza como la conoce no existiría, ¡y usted no existiría para preguntar por qué!

Como regla general, el orden en el que los electrones llenan las subcapas de un átomo es el siguiente. Una vez que una subcapa está llena, el siguiente electrón pasa a la subcapa vacía que es más baja en energía. Si el átomo no estuviese en el estado energético más bajo disponible, radiaría energía hasta llegar a dicho estado. Una subcapa se llena cuando contiene $2(2\ell + 1)$ electrones. Esta regla se basa en el análisis de los números cuánticos que se describirá más adelante. Al seguir la regla, las capas y subcapas pueden contener números de electrones de acuerdo con el patrón dado en la tabla 28.3.

El principio de exclusión se puede ilustrar al examinar el arreglo electrónico en algunos de los átomos más ligeros. El *hidrógeno* tiene sólo un electrón, que, en su estado base, se puede describir mediante dos conjuntos de números cuánticos: $1, 0, 0, \frac{1}{2}$ o $1, 0, 0, -\frac{1}{2}$. La configuración electrónica de este átomo con frecuencia se designa como $1s^1$. La notación $1s$ se refiere a un estado para el cual $n = 1$ y $\ell = 0$, y el superíndice indica que un electrón está presente en este nivel.

Tabla 28.3 Número de electrones en subcapas y capas llenas

Capa	Subcapa	Número de electrones en subcapa llena	Número de electrones en capa llena
K ($n = 1$)	$s(\ell = 0)$	2	2
L ($n = 2$)	$s(\ell = 0)$	2	8
	$p(\ell = 1)$	6	
M ($n = 3$)	$s(\ell = 0)$	2	18
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
N ($n = 4$)	$s(\ell = 0)$	2	32
	$p(\ell = 1)$	6	
	$d(\ell = 2)$	10	
	$f(\ell = 3)$	14	

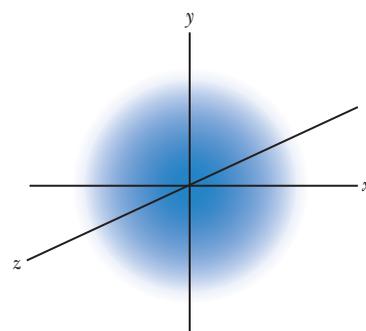


Figura 28.13 Nube de electrones esférica para el átomo de hidrógeno en su estado 1s.

◀ Principio de exclusión de Pauli

Tip 28.3 El principio de exclusión es más general

El principio de exclusión que se enuncia aquí es una forma limitada del principio de exclusión más general, que afirma que ningún par de *fermiones* (partículas con espín $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$) puede estar en el mismo estado cuántico.



CERN, cortesía de AIP, Emilio Segre Visual Archives

Wolfgang Pauli Físico teórico austriaco (1900-1958)

El extremadamente talentoso Pauli ganó reconocimiento público por primera vez a los 21 años de edad, con un magistral artículo de revisión acerca de la relatividad. En 1945 recibió el Premio Nobel de Física por su descubrimiento del principio de exclusión. Entre sus otras grandes aportaciones se encuentran la explicación de la conexión entre espín de partícula y estadística, la teoría de la electrodinámica cuántica relativista, la hipótesis del neutrino y la hipótesis del espín nuclear.

El *helio* neutro tiene dos electrones. En el estado base, los números cuánticos para estos dos electrones son 1, 0, 0, $\frac{1}{2}$ y 1, 0, 0, $-\frac{1}{2}$. Para este nivel no existen otras posibles combinaciones de números cuánticos y se dice que la capa K está llena. La configuración electrónica del helio se designa $1s^2$.

El *litio* neutro tiene tres electrones. En el estado base, dos de ellos están en la subcapa $1s$ y el tercero está en la subcapa $2s$ porque la última subcapa es más baja en energía que la subcapa $2p$. Por lo tanto, la configuración electrónica para el litio es $1s^2 2s^1$.

En la tabla 28.4 se proporciona una lista de configuraciones de estado base para algunos átomos. En 1871, Dmitry Mendeleev (1834-1907), químico ruso, ordenó los elementos conocidos en esa época en una tabla de acuerdo con sus masas atómicas y similitudes químicas. La primera tabla que propuso Mendeleev contenía muchos espacios en blanco y él afirmó con decisión que las brechas estaban ahí sólo porque dichos elementos todavía no se habían descubierto. Al observar la columna en la que se deben ubicar dichos elementos faltantes, pudo realizar predicciones burdas acerca de sus propiedades químicas. De hecho, se descubrieron tales elementos 20 años después de su anuncio.

Los elementos en la versión actual de la tabla periódica todavía se ordenan de modo que todos los que están en una columna vertical tienen propiedades químicas similares. Por ejemplo, considere los elementos en la última columna: He (helio), Ne (neón), Ar (argón), Kr (kriptón), Xe (xenón) y Rn (radón). La característica destacada de estos elementos es que por lo general no toman parte en reacciones químicas, no se unen con otros átomos para formar moléculas y por lo tanto se clasifican como inertes. Se llaman *gases nobles*. Su comportamiento se puede explicar en parte al observar las configuraciones electrónicas que se muestran en la tabla 28.4. El elemento helio tiene la configuración electrónica $1s^2$. En otras palabras, una capa está llena. Los electrones en esta capa llena están considerablemente separados en energía del siguiente nivel disponible, el nivel $2s$.

La configuración electrónica para el neón es $1s^2 2s^2 2p^6$. De nuevo, la capa exterior está llena y hay una gran diferencia en energía entre el nivel $2p$ y el nivel $3s$.

Tabla 28.4 Configuraciones electrónicas de algunos elementos

Z	Símbolo	Configuración de estado	Energía de ionización (eV)	Z	Símbolo	Configuración de estado	Energía de ionización (eV)
1	H	$1s^1$	13.595	19	K	[Ar] $4s^1$	4.339
2	He	$1s^2$	24.581	20	Ca	$4s^2$	6.111
3	Li	[He] $2s^1$	5.390	21	Sc	$3d4s^2$	6.54
4	Be	$2s^2$	9.320	22	Ti	$3d^2 4s^2$	6.83
5	B	$2s^2 2p^1$	8.296	23	V	$3d^3 4s^2$	6.74
6	C	$2s^2 2p^2$	11.256	24	Cr	$3d^5 4s^1$	6.76
7	N	$2s^2 2p^3$	14.545	25	Mn	$3d^5 4s^2$	7.432
8	O	$2s^2 2p^4$	13.614	26	Fe	$3d^6 4s^2$	7.87
9	F	$2s^2 2p^5$	17.418	27	Co	$3d^7 4s^2$	7.86
10	Ne	$2s^2 2p^6$	21.559	28	Ni	$3d^8 4s^2$	7.633
11	Na	[Ne] $3s^1$	5.138	29	Cu	$3d^{10} 4s^1$	7.724
12	Mg	$3s^2$	7.644	30	Zn	$3d^{10} 4s^2$	9.391
13	Al	$3s^2 3p^1$	5.984	31	Ga	$3d^{10} 4s^2 4p^1$	6.00
14	Si	$3s^2 3p^2$	8.149	32	Ge	$3d^{10} 4s^2 4p^2$	7.88
15	P	$3s^2 3p^3$	10.484	33	As	$3d^{10} 4s^2 4p^3$	9.81
16	S	$3s^2 3p^4$	10.357	34	Se	$3d^{10} 4s^2 4p^4$	9.75
17	Cl	$3s^2 3p^5$	13.01	35	Br	$3d^{10} 4s^2 4p^5$	11.84
18	Ar	$3s^2 3p^6$	15.755	36	Kr	$3d^{10} 4s^2 4p^6$	13.996

Nota: La notación entre corchetes se utiliza como un método abreviado para evitar repetición al indicar electrones de capa interior. Por ende, [He] representa $1s^2$, [Ne] representa $1s^2 2s^2 2p^6$, [Ar] representa $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$, etcétera.

El argón tiene la configuración $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. Aquí, la subcapa $3p$ está llena y hay una gran brecha en energía entre la subcapa $3p$ y la subcapa $3d$. A lo largo de todos los gases nobles el patrón permanece igual: un gas noble se forma cuando o una capa o una subcapa está llena y hay una gran brecha en energía antes de encontrar el siguiente nivel posible.

Los elementos en la primera columna de la tabla periódica se llaman *metales alcalinos* y químicamente son muy activos. Si consulta la tabla 28.4, podrá entender por qué estos elementos interactúan tan fuertemente con otros elementos. Todos estos metales alcalinos tienen un solo electrón exterior en una subcapa s . Este electrón está blindado del núcleo por todos los electrones en las capas interiores. En consecuencia, sólo está ligeramente enlazado al átomo y otros átomos lo pueden aceptar fácilmente, enlazándolo más firmemente para formar moléculas.

Los elementos en la séptima columna de la tabla periódica se llaman *halógenos* y también son químicamente muy activos. Todos estos elementos carecen de un electrón en una subcapa, de modo que fácilmente aceptan electrones de otros átomos para formar moléculas.

Examen rápido

28.3 ¿Cuántos electrones tiene el kriptón (número atómico 36) en su penúltima capa exterior ($n = 3$)? a) 2 b) 4 c) 8 d) 18

28.6 Rayos X característicos

Los rayos X se emiten cuando un blanco metálico se bombardea con electrones de alta energía. El espectro de rayos X por lo general consiste de una amplia banda continua y una serie de intensas líneas estrechas que dependen del tipo de metal utilizado para el blanco, como muestra la figura 28.14. Estas líneas discretas, llamadas **rayos X característicos**, se descubrieron en 1908, pero su origen permaneció sin explicar hasta que se desarrollaron los detalles de la estructura atómica.

El primer paso en la producción de rayos X característicos ocurre cuando se bombardea un electrón, éste choca con otro en una capa interior de un átomo blanco con suficiente energía para remover el electrón del átomo. La vacancia creada en la capa se llena cuando un electrón en un nivel superior cae hacia el nivel de menor energía que contiene la vacante. El tiempo que transcurre para que esto ocurra es muy corto, menor que 10^{-9} s. La transición se acompaña mediante la emisión de un fotón con energía que iguala la diferencia en energía entre los dos niveles. Por lo general, la energía de tales transiciones es mayor que 1000 eV y los fotones de rayos X emitidos tienen longitudes de onda en el rango de 0.01 a 1 nm.

Suponga que el electrón incidente desalojó un electrón atómico de la capa más interna, la capa K. Si la vacancia se llena con un electrón que cae de la siguiente capa superior, la capa L, el fotón emitido en el proceso se le conoce como línea K_α sobre la curva de la figura 28.14. Si la vacancia se llena con un electrón que cae de la capa M, la línea producida se llama línea K_β .

Otras líneas de rayos X característicos se forman cuando los electrones caen desde niveles superiores a vacancias distintas a las de la capa K. Por ejemplo, las líneas L se producen cuando las vacantes en la capa L se llenan con electrones que caen desde capas superiores. Una línea L_α se produce cuando un electrón cae desde la capa M hacia la capa L y una línea L_β se produce mediante una transición desde la capa N hacia la capa L.

La energía de los rayos X emitidos se puede estimar del modo siguiente. Considere dos electrones en la capa K de un átomo cuyo número atómico es Z . Cada electrón blindado parcialmente la otra forma de carga del núcleo, Ze , de modo que está sujeto a una carga nuclear efectiva $Z_{\text{eff}} = (Z - 1)e$. Ahora puede usar una forma modificada de la ecuación 28.18 para estimar la energía de cualquier electrón en la capa K (con $n = 1$). Tenemos

$$E_K = -m_e Z_{\text{eff}}^2 \frac{k_e^2 e^4}{2\hbar^2} = -Z_{\text{eff}}^2 E_0$$

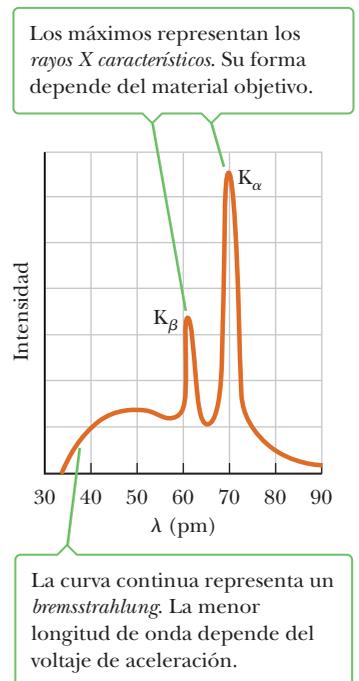


Figura 28.14 El espectro de rayos X de un objetivo metálico. Los datos que se muestran se obtuvieron cuando electrones de 35 keV bombardearon un blanco de molibdeno. Observe que $1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} = 0.001 \text{ nm}$.

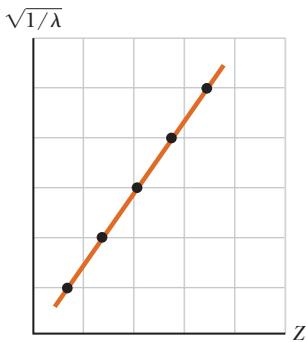


Figura 28.15 Gráfica de Moseley de $\sqrt{1/\lambda}$ frente a Z , donde λ es la longitud de onda de la línea de rayos X K_α del elemento con número atómico Z .

donde E_0 es la energía del estado base. Al sustituir $Z_{\text{ef}} = Z - 1$ obtenemos

$$E_K = -(Z - 1)^2(13.6 \text{ eV}) \quad [28.20]$$

Como muestra el ejemplo 28.4, es posible estimar la energía de un electrón en una capa L o M en forma similar. Al tomar la diferencia de energía entre estos dos niveles, se puede calcular entonces la energía y la longitud de onda del fotón emitido.

En 1914, Henry G. J. Moseley graficó los valores Z para algunos elementos contra $\sqrt{1/\lambda}$, donde λ es la longitud de onda de la línea K_α para cada elemento. Descubrió que tal gráfica producía una línea recta, como en la figura 28.15, que es consistente con los cálculos burdos de los niveles de energía basados en la ecuación 28.20. A partir de esta gráfica, Moseley pudo determinar los valores Z de otros elementos, lo que proveyó un gráfico periódico en excelente concordancia con las propiedades químicas de los elementos.

EJEMPLO 28.4 Rayos X característicos

OBJETIVO Calcular la energía y longitud de onda de rayos X característicos.

PROBLEMA Estime la energía y la longitud de onda de los rayos X característicos emitidos de un blanco de tungsteno cuando un electrón cae de una capa M (estado $n = 3$) a una vacancia en la capa K (estado $n = 1$).

ESTRATEGIA Desarrolle dos estimaciones, una para el electrón en la capa K ($n = 1$) y una para el electrón en la capa M ($n = 3$). Para la estimación de la capa K, puede usar la ecuación 28.20. Para la estimación de la capa M, necesita una nueva ecuación. Hay 1 electrón en la capa K (porque uno está perdido) y hay 8 en la capa L, lo que hace 9 electrones que blindan la carga nuclear. Por lo tanto, $Z_{\text{ef}} = 74 - 9$ y $E_M = -Z_{\text{ef}}^2 E_3$, donde E_3 es la energía del nivel $n = 3$ en hidrógeno. La diferencia $E_M - E_K$ es la energía del fotón.

SOLUCIÓN

Use la ecuación 28.20 para estimar la energía de un electrón en la capa K del tungsteno, número atómico $Z = 74$:

$$E_K = -(74 - 1)^2(13.6 \text{ eV}) = -72500 \text{ eV}$$

Estime la energía de un electrón en la capa M en la misma forma:

$$E_M = -Z_{\text{ef}}^2 E_3 = -(Z - 9)^2 \frac{E_0}{3^2} = -(74 - 9)^2 \frac{(13.6 \text{ eV})}{9} = -6380 \text{ eV}$$

Calcule la diferencia en energía entre las capas M y K:

$$E_M - E_K = -6380 \text{ eV} - (-72500 \text{ eV}) = 66100 \text{ eV}$$

Encuentre la longitud de onda del rayo X emitido:

$$\Delta E = hf = h \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(6.61 \times 10^4 \text{ eV})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 1.88 \times 10^{-11} \text{ m} = 0.0188 \text{ nm}$$

COMENTARIOS Estas estimaciones dependen de la cantidad de blindaje de la carga nuclear, que puede ser difícil de determinar.

PREGUNTA 28.4 ¿Una transición de la capa L a la capa K podría resultar alguna vez en un fotón más energético que una transición desde la capa M a la capa K? Analice.

EJERCICIO 28.4 Repita el problema para un electrón $2p$ que transita de la capa L a la capa K. (Por razones técnicas, el electrón de capa L debe tener $\ell = 1$, de modo que un solo electrón $1s$ y dos electrones $2s$ blindan el núcleo.)

RESPUESTAS a) $5.54 \times 10^4 \text{ eV}$ b) 0.0224 nm

28.7 Transiciones atómicas y láseres

Ya vimos que un átomo emitirá radiación sólo a ciertas frecuencias que correspondan a la separación de energía entre los varios estados permitidos. Considere un átomo con muchos estados de energía permitidos, marcados E_1, E_2, E_3, \dots , como en la figura 28.16. Cuando incide luz sobre el átomo, éste sólo puede absorber aquellos fotones con energía hf que coincide con la separación de energía ΔE entre dos niveles que puede ser absorbida por el átomo. En la figura 28.17 se muestra un diagrama esquemático que representa este **proceso de absorción estimulada**. A temperaturas ordinarias, la mayoría de los átomos en una muestra están en el estado base. Si un recipiente que contiene muchos átomos de un gas se ilumina con un haz de luz que contenga todas las posibles frecuencias de fotón (esto es, un espectro continuo), sólo aquellos fotones con energías $E_2 - E_1, E_3 - E_1, E_4 - E_1, \dots$, pueden absorberse. Como resultado de esta absorción, algunos átomos se elevan a varios niveles permitidos de mayor energía, llamados **estados excitados**.

Una vez que un átomo está en un estado excitado, hay una probabilidad constante de que saltará de vuelta a un nivel inferior mediante la emisión de un fotón, como se muestra en la figura 28.18. Este proceso se conoce como **emisión espontánea**. Por lo general, un átomo permanecerá en un estado excitado sólo durante aproximadamente 10^{-8} s.

Un tercer proceso que es importante en láseres, la **emisión estimulada**, lo predijo Einstein en 1917. Suponga que un átomo está en el estado excitado E_2 , como en la figura 28.19 y un fotón con energía $hf = E_2 - E_1$ incide sobre él. El fotón incidente aumenta la probabilidad de que el átomo excitado regresará al estado base y por ende emite un segundo fotón que tiene la misma energía hf . Observe que dos fotones idénticos resultan de la emisión estimulada: el fotón incidente y el fotón emitido. *El fotón emitido está exactamente en fase con el fotón incidente*. Estos fotones pueden estimular otros átomos para emitir fotones en una cadena de procesos similares.

La intensa luz coherente (en fase) en un láser (acrónimo del inglés para amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación) es resultado de emisión estimulada. En un láser, se pueden usar voltajes para poner más electrones en estados excitados que en el estado base. Este proceso se llama **inversión de población**. El estado excitado del sistema debe ser un *estado metaestable*, lo cual significa que su tiempo de vida debe ser relativamente largo. Cuando este es el caso, ocurrirá emisión estimulada antes que emisión espontánea. Finalmente, los fotones producidos se deben retener en el sistema durante un rato para que puedan estimular la producción de todavía más fotones. Este paso se puede realizar con espejos, uno de los cuales es parcialmente transparente.

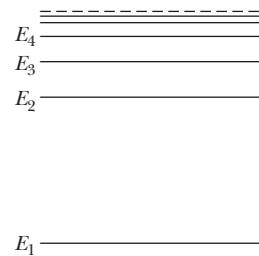
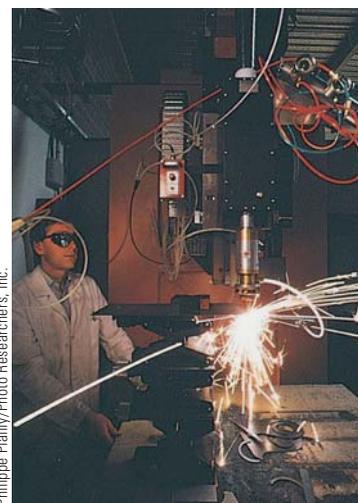


Figura 28.16 Diagrama de niveles de energía de un átomo con varios estados permitidos. El estado de energía más bajo, E_1 , es el estado base. Todos los demás son estados excitados.



Un científico comprueba el desempeño de un dispositivo experimental de láser montado en un brazo robótico. El láser se usa para cortar a través de una placa metálica.

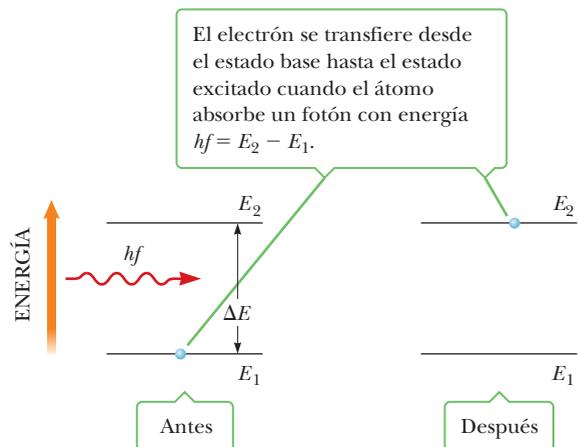


Figura activa 28.17

Diagrama que representa el proceso de *absorción estimulada* de un fotón por un átomo.

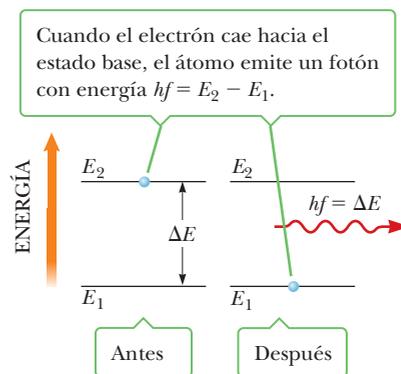


Figura 28.18 Diagrama que representa el proceso de *emisión espontánea* de un fotón por un átomo que inicialmente está en el estado excitado E_2 .

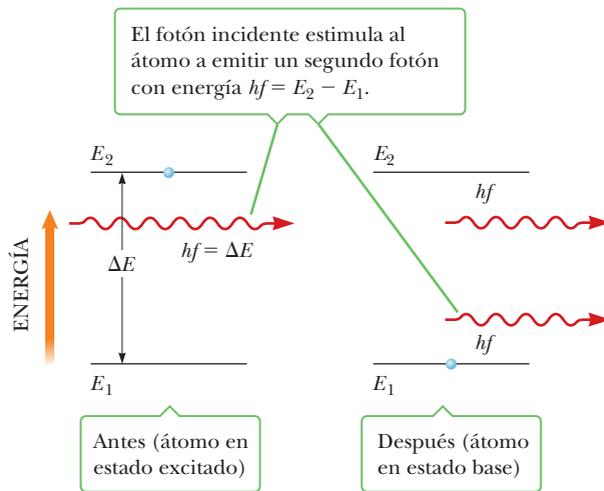


Figura 28.19 Diagrama que representa el proceso de *emisión estimulada* de un fotón mediante un fotón entrante con energía hf . Inicialmente, el átomo está en el estado excitado.

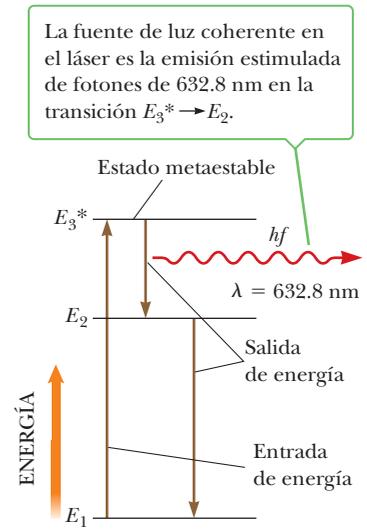


Figura 28.20 Diagrama de niveles de energía para el átomo de neón en un láser helio-neón.

La figura 28.20 es un diagrama de niveles de energía para el átomo de neón en un láser de gas helio-neón. La mezcla de helio y neón está confinada a un tubo de vidrio sellado en los extremos con espejos. Un alto voltaje aplicado al tubo hace que los electrones pasen rápidamente a través de él, choquen con los átomos del gas y los eleven a estados excitados. Los átomos de neón se excitan al estado E_3^* mediante este proceso y también como resultado de colisiones con átomos de helio excitados. Cuando un átomo de neón realiza una transición al estado E_2^* , estimula emisión mediante átomos excitados vecinos. El resultado es la producción de luz coherente con una longitud de onda de 632.8 nm. La figura 28.21 resume los pasos en la producción de un haz de láser.

APLICACIÓN
Tecnología láser

Ahora hay láseres disponibles que cubren longitudes de onda en las regiones infrarroja, visible y ultravioleta del espectro. Sus aplicaciones incluyen el “soldado” quirúrgico de retinas desprendidas, cirugía “lasik”, valoración de precisión y medición de longitud, una fuente potencial para inducir reacciones de fusión nuclear, corte de precisión de metales y otros materiales, y comunicación telefónica a lo largo de fibras ópticas.

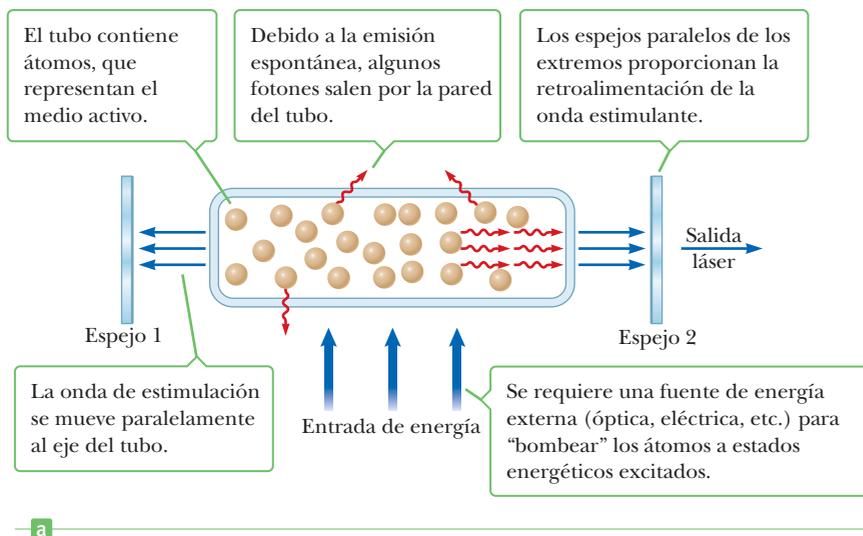


Figura 28.21 a) Pasos en la producción de un haz de láser. b) Fotografía del primer láser de rubí, que muestra la lámpara de destello que rodea la barra de rubí.

RESUMEN

28.3 El modelo de Bohr

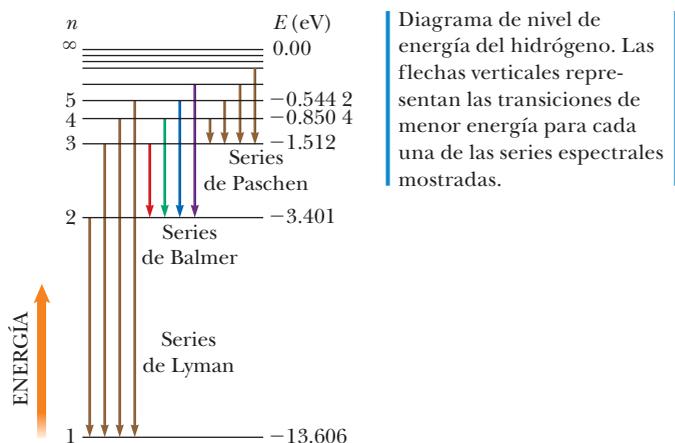
El **modelo de Bohr** del átomo describe exitosamente los espectros del hidrógeno atómico y de iones hidrogenoides. Una suposición básica del modelo es que el electrón sólo puede existir en ciertas órbitas tales que su cantidad de movimiento angular mvr es un múltiplo entero de \hbar , donde \hbar es la constante de Planck dividida entre 2π . Si supone órbitas circulares y una fuerza atractiva de Coulomb entre electrón y protón, las energías de los estados cuánticos para el hidrógeno son

$$E_n = -\frac{m_e k_e^2 e^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [28.13]$$

donde k_e es la constante de Coulomb, e es la carga del electrón y n es un entero llamado **número cuántico**.

Si el electrón en el átomo de hidrógeno salta de una órbita que tenga número cuántico n_i a una órbita que tenga número cuántico n_f emite un fotón con frecuencia f , dado por

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{m_e k_e^2 e^4}{4\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad [28.15]$$



El **principio de correspondencia** de Bohr afirma que la mecánica cuántica está en concordancia con la física clásica cuando los números cuánticos para un sistema son muy grandes.

La teoría de Bohr se puede generalizar a átomos hidrogenoides como el helio individualmente ionizado o el litio doblemente ionizado. Esta modificación consiste en sustituir e^2 por Ze^2 dondequiera que ocurra.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

Uno de los muchos éxitos de la mecánica cuántica es que los números cuánticos n , ℓ y m_ℓ asociados con la estructura atómica surgen directamente de la matemática de la teoría. El

número cuántico n se llama **número cuántico principal**, ℓ es el **número cuántico orbital** y m_ℓ es el **número cuántico magnético orbital**. Estos números cuánticos pueden tomar sólo ciertos valores: $1 \leq n < \infty$ en incrementos enteros, $0 \leq \ell \leq n - 1$, y $-\ell \leq m_\ell \leq \ell$. Además, para explicar un desdoblamiento de líneas en los espectros atómicos se necesita un cuarto número cuántico, llamado **número cuántico magnético de espín**, con $m_s = \pm \frac{1}{2}$.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

La comprensión de la tabla periódica de los elementos fue posible cuando Pauli formuló el **principio de exclusión**, el cual afirma que ningún par de electrones en el mismo átomo puede tener los mismos valores para el conjunto de números cuánticos n , ℓ , m_ℓ y m_s . Un conjunto particular de estos números cuánticos se llama estado cuántico. El principio de exclusión explica cómo se llenan los diferentes niveles de energía. Una vez que se llena una subcapa, el siguiente electrón se dirige hacia la subcapa vacante que es más baja en energía. Los átomos con configuraciones similares en su capa exterior tienen propiedades químicas similares y se encuentran en la misma columna de la tabla periódica.

28.6 Rayos X característicos

Los rayos X característicos se producen cuando en un bombardeo, un electrón choca con otro en una capa interior de un átomo con suficiente energía para remover el electrón del átomo. La vacancia se llena cuando un electrón de un nivel superior cae hacia el nivel que contiene la vacancia y en el proceso emite un fotón en la parte de rayos X del espectro.

28.7 Transiciones atómicas y láseres

Cuando luz de todas las diferentes longitudes de onda irradia un átomo, solamente absorberá longitudes de onda iguales a la diferencia en energía de dos de sus niveles de energía. Este fenómeno, llamado **absorción estimulada**, coloca los electrones de un átomo en **estados excitados**. Los átomos en un estado excitado tienen una probabilidad de regresar a un nivel inferior de excitación mediante **emisión espontánea**. Las longitudes de onda que se pueden emitir son las mismas que las longitudes de onda que se pueden absorber. Si un átomo está en un estado excitado y un fotón con energía $hf = E_2 - E_1$ incide sobre él, la probabilidad de emisión de un segundo fotón de esta energía aumenta enormemente. El fotón emitido está exactamente en fase con el fotón incidente. Este proceso se llama **emisión estimulada**. Entonces los fotones emitido y original pueden estimular más emisiones, lo que crea un efecto de amplificación.

Los **láseres** son fuentes de luz monocromática coherente que funciona bajo el principio de **emisión estimulada** de radiación de un sistema de átomos.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un átomo de berilio se despoja de sus electrones, menos de uno. ¿Cuál es la energía del estado base? a) -13.6 eV b) -218 eV c) -122 eV d) -40.8 eV e) 0
- Un electrón en el nivel de energía $n = 5$ del hidrógeno experimenta una transición hacia el nivel de energía $n = 3$. ¿Qué longitud de onda de fotón emite el átomo en este proceso? a) 1.28×10^{-6} m b) 2.37×10^{-6} m c) 4.22×10^{-7} m d) 3.04×10^{-6} m e) 5.92×10^{-5} m
- Considere un átomo que tiene cuatro distintos niveles de energía. Si un electrón puede realizar transiciones entre cualesquiera dos niveles, ¿cuántas diferentes longitudes de onda de radiación podría emitir el átomo? a) 2 b) 3 c) 4 d) 5 e) 6
- Un electrón en un átomo de hidrógeno está en el nivel de energía $n = 3$. ¿Cuántos diferentes estados cuánticos están a su disposición? a) 1 b) 2 c) 8 d) 9 e) 18
- ¿En cuál de los siguientes principios se basa principalmente la tabla periódica? a) Se basa en el principio de incertidumbre b) Todos los electrones en un átomo deben tener el mismo conjunto de números cuánticos. c) Ningún par de electrones en un átomo puede tener el mismo conjunto de números cuánticos. d) Todos los electrones en un átomo están en orbitales que tienen la misma energía. e) La energía se conserva en todas las interacciones.
- ¿Cuáles de las siguientes configuraciones electrónicas no están permitidas para un átomo? a) $2s^2 2p^6$ b) $3s^2 3p^7$ c) $3d^7 4s^2$ d) $3d^{10} 4s^2 4p^6$ e) $1s^2 2s^2 2d^1$
- Si un electrón en un átomo tiene los números cuánticos $n = 3$, $\ell = 2$, $m_\ell = 1$ y $m_s = \frac{1}{2}$, ¿en cuál estado está? a) $3s$ b) $3p$ c) $3d$ d) $4d$ e) $3f$
- Si un electrón tiene un espín de $\frac{3}{2}$, su número cuántico de espín podría tener los siguientes cuatro valores: $m_s = +\frac{3}{2}$, $+\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$ y $-\frac{3}{2}$. Si eso fuese cierto, ¿cuál de los siguientes elementos con una capa llena se convertiría en el primero de los gases nobles? a) He con 2 electrones b) Li con 3 electrones c) Be con 4 electrones d) B con 5 electrones e) C con 6 electrones
- ¿Qué se puede concluir acerca de un átomo de hidrógeno con un electrón en el estado d ? a) El átomo está ionizado. b) La cantidad de movimiento angular del átomo es cero. c) La cantidad de movimiento angular del átomo no es cero. d) El átomo está en su estado base. e) El número cuántico principal es $n = 2$.
- Al relacionar la teoría de Bohr con la longitud de onda de De Broglie de los electrones, ¿por qué la circunferencia de la órbita de un electrón se vuelve nueve veces más grande cuando el electrón se mueve del nivel $n = 1$ al nivel $n = 3$? a) En la nueva órbita existen nueve veces más longitudes de onda. b) La longitud de onda del electrón se vuelve nueve veces mayor. c) Existen tres veces más longitudes de onda y cada longitud de onda es tres veces mayor. d) El electrón se mueve nueve veces más rápido. e) El átomo está parcialmente ionizado.
- Cuando un electrón choca con un átomo, se puede transferir toda o parte de su energía al átomo. Un átomo de hidrógeno se encuentra en su estado base. En el átomo inciden varios electrones, cada uno con una energía cinética de 10.5 eV. ¿Cuál es el resultado? a) El átomo puede ser excitado a un mayor estado permitido. b) El átomo es ionizado. c) Los electrones pasan por el átomo sin interacción.
- ¿Cuál de los siguientes *no* es uno de los supuestos básicos del modelo de Bohr del hidrógeno? a) Sólo ciertas órbitas de los electrones son estables y permitidas. b) El electrón se mueve en órbitas circulares alrededor del protón bajo la influencia de la fuerza de Coulomb. c) La carga del electrón está cuantificada. d) La radiación es emitida por el átomo cuando un electrón pasa de un estado de energía superior a un estado energético más bajo. e) El momento angular asociado con el movimiento orbital del electrón está cuantificado.
- Cuando un átomo emite un fotón, ¿qué pasa? a) Uno de sus electrones deja al átomo. b) El átomo se mueve a un estado de mayor energía. c) El átomo se mueve a un estado de menor energía. d) Uno de sus electrones choca con otra partícula. e) Ninguno de dichos eventos ocurre.

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En el átomo de hidrógeno, el número cuántico n puede aumentar sin límite. Debido a este hecho, ¿la frecuencia de las posibles líneas espectrales del hidrógeno también aumenta sin límite?
- ¿La luz emitida por una señal de neón constituye un espectro continuo o sólo algunos colores? Defienda su respuesta.
- En un tubo de rayos X, si aumenta la energía con la que los electrones golpean el blanco metálico, las longitudes de onda de los rayos X característicos no cambia. ¿Por qué no?
- Una energía de alrededor de 21 eV es necesaria para excitar un electrón en un átomo de helio del estado $1s$ al estado $2s$. La misma transición para el ion He^+ requiere de aproximadamente el doble de energía. Explique.

- ¿Es posible que el espectro de un tubo de rayos X muestre el espectro continuo de rayos X sin la presencia de los rayos X característicos?
- Suponga que el electrón en el átomo de hidrógeno obedece la mecánica clásica en lugar de la mecánica cuántica. ¿Por qué tal átomo hipotético debe emitir un espectro continuo en vez del espectro de líneas observado?
- Cuando se produce un holograma, el sistema (incluidos fuente de luz, objeto, divisor de haz, etc.) se deben mantener sin movimiento dentro de un cuarto de la longitud de onda de la luz. ¿Por qué?
- ¿Por qué son necesarios tres números cuánticos para describir el estado de un átomo de un electrón (desprecie el spin)?
- Describa cómo sería diferente la estructura de los átomos si el principio de exclusión de Pauli no es válido. ¿Qué consecuencias tendría a nivel atómico y en el mundo en general?
- ¿El electrón en el estado base del hidrógeno puede absorber un fotón de energía menor que 13.6 eV? ¿Puede absorber un fotón de energía mayor que 13.6 eV? Explique.
- ¿Por qué litio, potasio y sodio exhiben propiedades químicas similares?
- Mencione algunas formas en las cuales la mecánica cuántica alteró la visión del átomo que presentaba la teoría de Bohr.
- Es fácil comprender cómo dos electrones (uno con espín arriba, uno con espín abajo) pueden llenar la capa 1s para un átomo de helio. ¿Cómo es posible que ocho electrones más puedan encajar en el nivel 2s, 2p para completar la capa $1s^2 2s^2 2p^6$ para un átomo de neón?
- Las energías de ionización para Li, Na, K, Rb y Cs son 5.390, 5.138, 4.339, 4.176 y 3.893 eV, respectivamente. Explique por qué se esperan estos valores en términos de las estructuras atómicas.
- ¿Por qué la emisión estimulada es tan importante en la operación de un láser?

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch it.

- 1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
- 3. denota problema de alto reto
- 1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- I. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

28.1 Primeros modelos del átomo

28.2 Espectros atómicos

- CIC** Las longitudes de onda de la serie de Lyman para el hidrógeno están dadas por

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

a) Calcule las longitudes de onda de las primeras tres líneas en esta serie. b) Identifique la región del espectro electromagnético en el cual aparecen estas líneas.

- CIC** Las longitudes de onda de la serie de Paschen para el hidrógeno están dadas por

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

a) Calcule las longitudes de onda de las primeras tres líneas en esta serie. b) Identifique la región del espectro electromagnético en el cual aparecen estas líneas.

- El “tamaño” del átomo en el modelo de Rutherford es de aproximadamente 1.0×10^{-10} m. a) Determine la fuerza electrostática atractiva entre un electrón y un protón separados por esta distancia. b) Determine (en eV) la energía potencial electrostática del átomo.

- Un átomo aislado de un determinado elemento emite luz de longitud de onda de 520 nm cuando el átomo cae de su estado excitado a un segundo estado excitado. El átomo emite un fotón de longitud de onda de 410 nm cuando cae de su sexto estado de excitación a su segundo estado excitado. Encuentre la longitud de onda de la luz irradiada cuando el átomo hace una transición de su sexto a su quinto estado excitado.

- CIC** El “tamaño” del átomo en el modelo de Rutherford es de aproximadamente 1.0×10^{-10} m. a) Determine la velocidad de un electrón que se mueve en torno al protón usando la fuerza electrostática atractiva entre un electrón y un protón separados por esta distancia. b) ¿Esta velocidad sugiere que se debe considerar la relatividad einsteiniana al estudiar el átomo? c) Calcule la longitud de onda de De Broglie del electrón conforme se mueve en torno al protón. d) ¿Esta longitud de onda sugiere que se deben considerar efectos ondulatorios, como difracción e interferencia, al estudiar el átomo?

- En un experimento de dispersión de Rutherford, una partícula α (carga = $+2e$) se dirige directamente hacia un núcleo de oro (carga = $+79e$). La partícula α tiene una energía cinética de 5.0 MeV cuando está muy lejos ($r \rightarrow \infty$) del núcleo. Suponiendo que el núcleo de oro

está fijo en el espacio, determine la distancia de máximo acercamiento. *Sugerencia:* Use la conservación de la energía con $EP = k_e q_1 q_2 / r$.

28.3 El modelo de Bohr

7. **M** Un átomo de hidrógeno está en su primer estado excitado ($n = 2$). Con la teoría del átomo de Bohr, calcule: a) el radio de la órbita, b) la cantidad de movimiento lineal del electrón, c) la cantidad de movimiento angular del electrón, d) la energía cinética, e) la energía potencial y f) la energía total.
8. Para un átomo de hidrógeno en su estado base, use el modelo de Bohr para calcular a) la velocidad orbital del electrón, b) la energía cinética del electrón y c) la energía potencial eléctrica del átomo.
9. **S** Demuestre que la velocidad del electrón en la n -ésima órbita de Bohr en el hidrógeno está dada por

$$v_n = \frac{k_e e^2}{n\hbar}$$

10. Cuando un átomo de hidrógeno experimenta una transición del estado $n = 5$ al estado $n = 3$, se emite un fotón. Calcule a) la longitud de onda, b) la frecuencia y c) la energía (en electrón-volts) del fotón emitido.
11. Un átomo de hidrógeno emite un fotón con 656 nm de longitud de onda. ¿Desde cuál órbita energética hacia cuál órbita de menor energía salta el electrón?
12. A continuación se presentan cuatro posibles transiciones para un átomo de hidrógeno
 - I. $n_i = 2; n_f = 5$ II. $n_i = 5; n_f = 3$
 - III. $n_i = 7; n_f = 4$ IV. $n_i = 4; n_f = 7$
 a) ¿Cuál transición emitirá el fotón con longitud de onda más corta? b) ¿Para cuál transición el átomo ganará más energía? c) ¿Para cuál(es) transición(es) el átomo pierde energía?
13. **M** ¿Cuál es la energía de un fotón que, cuando lo absorbe un átomo de hidrógeno, podría causar una transición electrónica desde a) el estado $n = 2$ al estado $n = 5$, y b) el estado $n = 4$ al estado $n = 6$?
14. Un átomo de hidrógeno inicialmente en su estado base ($n = 1$) absorbe un fotón y termina en el estado para el cual $n = 3$. a) ¿Cuál es la energía del fotón absorbido? b) Si el átomo eventualmente regresa al estado base, ¿qué energías de fotón podría emitir el átomo?
15. La serie de Balmer del átomo de hidrógeno corresponde a transiciones electrónicas que terminan en el estado con número cuántico $n = 2$ como se muestra en la figura P28.15. Considere que el fotón de mayor longitud de onda corresponde a la transición que se muestra en la figura. Determine a) su energía y b) la longitud de onda. Considere que la línea espectral de menor longitud de onda corresponde a la transición que se muestra en la figura. Determine c) la energía de sus fotones y d) su

longitud de onda. e) ¿Cuál es la longitud de onda más corta posible en la serie de Balmer?

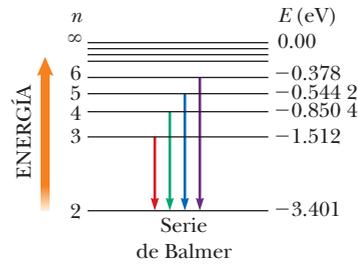


Figura P28.15

16. **S** Una partícula con carga q y masa m , que se mueve con una velocidad constante v , perpendicular a un campo magnético constante B , sigue una trayectoria circular. Si en este caso la cantidad de movimiento angular en torno al centro de este círculo está cuantizada de modo que $mvr = 2n\hbar$, demuestre que los radios permitidos para la partícula son

$$r_n = \sqrt{\frac{2n\hbar}{qB}}$$

donde $n = 1, 2, 3, \dots$

17. **M** a) Si un electrón realiza una transición desde la órbita de Bohr $n = 4$, hacia la órbita $n = 2$, determine la longitud de onda del fotón creada en el proceso. b) Suponiendo que el átomo inicialmente estaba en reposo, determine la velocidad de retroceso del átomo de hidrógeno cuando se emite este fotón.
18. Considere un gran número de átomos de hidrógeno, con todos los electrones inicialmente en el estado $n = 4$. a) ¿Cuántas diferentes longitudes de onda se observarían en el espectro de emisión de estos átomos? b) ¿Cuál es la longitud de onda más larga que se podría observar? c) ¿A qué serie pertenece la longitud de onda encontrada en (b)?
19. Un fotón con una energía 2.28 eV es absorbido por un átomo de hidrógeno. Encuentre a) el valor mínimo de n en un átomo de hidrógeno que puede ser ionizado por un fotón y b) la velocidad de los electrones liberados en el estado en el inciso a) cuando están lejos del núcleo.
20. a) Calcule la cantidad de movimiento angular de la Luna debida a su movimiento orbital en torno a la Tierra. En su cálculo use 3.84×10^8 m como la distancia promedio Tierra-Luna y 2.36×10^6 s como el periodo de la Luna en su órbita. b) Si la cantidad de movimiento angular de la Luna obedece la regla de cuantización de Bohr ($L = n\hbar$), determine el valor del número cuántico n . c) ¿En qué fracción tendría que aumentar el radio Tierra-Luna para aumentar el número cuántico en 1?
21. Un electrón está en la segunda órbita excitada del hidrógeno, que corresponde a $n = 3$. Encuentre a) el radio de la órbita y b) la longitud de onda del electrón en su órbita.
22. **S** a) Escriba una expresión que relacione la energía cinética EC del electrón y la energía potencial EP en el modelo

de Bohr del átomo de hidrógeno. b) Suponga que un átomo de hidrógeno absorbe un fotón con energía E , lo que resulta en la transferencia del electrón a un nivel de energía superior. Expresé el cambio resultante en la energía potencial del sistema en términos de E . c) ¿Cuál es el cambio en la energía cinética del electrón durante este proceso?

23. Los radios orbitales de un átomo hidrogenoide están dados por la ecuación

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Z m_e k_e e^2}$$

¿Cuál es el radio de la primera órbita de Bohr en a) He^+ , b) Li^{2+} y c) Be^{3+} ?

24. **PG** Considere un modelo de Bohr de litio doblemente ionizado. a) Escriba una expresión similar a la ecuación 28.14 para los niveles de energía del único electrón restante. b) Encuentre la energía que corresponde a $n = 4$. c) Encuentre la energía que corresponde a $n = 2$. d) Calcule la energía del fotón que se emite cuando el electrón transita del cuarto nivel energético al segundo nivel energético. Expresé la respuesta tanto en electrón-volts como en joules. e) Encuentre la frecuencia y longitud de onda del fotón emitido. f) ¿En qué parte del espectro está la luz emitida?

25. Una expresión general para los niveles de energía de los electrones y los iones de un átomo es

$$E_n = -\frac{\mu k_e^2 q_1^2 q_2^2}{2 \hbar^2 n^2}$$

Aquí μ es la masa reducida del átomo, dada por $\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$, donde m_1 es la masa del electrón y m_2 es la masa del núcleo, k_e es la constante de Coulomb, y q_1 y q_2 son las cargas de los electrones y el núcleo, respectivamente. La longitud de onda para la transición de $n = 3$ a $n = 2$ del átomo de hidrógeno es 656.3 nm (luz roja visible). ¿Cuáles son las longitudes de onda de la misma transición en a) un positrón, que consiste en un electrón y un positrón, y b) el helio simplemente ionizado? *Nota:* Un positrón es un electrón con carga positiva.

26. **S** Con el concepto de onda estacionaria, De Broglie pudo deducir el postulado de órbita estacionaria de Bohr. De Broglie supuso que un electrón confinado sólo podría existir en estados donde sus ondas de De Broglie forman patrones de onda estacionaria, como en la figura 28.6. Considere que una partícula confinada en una caja de longitud L es equivalente a una cuerda de longitud L y fija en ambos extremos. Aplique el concepto de De Broglie para demostrar que a) la cantidad de movimiento lineal de esta partícula está cuantizada con $p = mv = nh/2L$ y b) los estados permitidos corresponden a energías de partícula de $E_n = n^2 E_0$, donde $E_0 = \hbar^2 / (8mL^2)$.

28.4 Mecánica cuántica y el átomo de hidrógeno

27. Mencione los posibles conjuntos de números cuánticos para electrones en la subcapa $3d$.

28. Cuando el número cuántico principal es $n = 4$, ¿cuántos diferentes valores de a) ℓ y b) m_ℓ son posibles?

29. El mesón ρ tiene una carga de $-e$, un número cuántico de espín de 1 y una masa 1 507 veces la del electrón. Si los electrones en los átomos se sustituyeran por mesones ρ , mencione los posibles conjuntos de números cuánticos para mesones ρ en la subcapa $3d$.

28.5 El principio de exclusión y la tabla periódica

30. a) Escriba la configuración electrónica del estado base para el nitrógeno ($Z = 7$). b) Escriba los valores para el posible conjunto de números cuánticos n , ℓ , m_ℓ y m_s para los electrones en el nitrógeno.

31. Un cierto elemento tiene su electrón más exterior en una subcapa $3p$. Posee valencia +3, ya que tiene tres electrones más que un cierto gas noble. ¿Qué elemento es?

32. Dos electrones en el mismo átomo tienen $n = 3$ y $\ell = 1$. a) Mencione los números cuánticos para los posibles estados del átomo. b) ¿Cuántos estados serían posibles si el principio de exclusión no se aplicara al átomo?

33. El circonio ($Z = 40$) tiene dos electrones en una subcapa d incompleta. a) ¿Cuáles son los valores de n y ℓ para cada electrón? b) ¿Cuáles son los posibles valores de m_ℓ y m_s ? c) ¿Cuál es la configuración electrónica en el estado base del circonio?

28.6 Rayos X característicos

34. Un objetivo de tungsteno es golpeado por electrones que se han acelerado desde el reposo a través de una diferencia de potencial de 40.0 kV. Encuentre la menor longitud de onda de la radiación emitida.

35. Un objetivo de bismuto es golpeado por electrones y emite rayos X. Estime a) la energía de transición de la capa M a la capa L del bismuto y b) la longitud de onda de los rayos X emitidos cuando un electrón cae de la capa M a la capa L.

36. Cuando un electrón cae de la capa M ($n = 3$) a una vacancia en la capa K ($n = 1$), la longitud de onda medida del rayo X emitido es de 0.101 nm. Identifique al elemento.

37. **M** La serie K del espectro discreto del tungsteno contiene longitudes de onda de 0.0185 nm, 0.0209 nm y 0.0215 nm. La energía de ionización de la capa K es 69.5 keV. Determine las energías de ionización de las capas L, M y N.

Problemas adicionales

38. En un átomo de hidrógeno, ¿cuál es el número cuántico principal de la órbita del electrón con un radio más cercano a 1.0 μm ?

39. a) ¿Cuánta energía se requiere para hacer que un electrón en hidrógeno se mueva desde el estado $n = 1$ hasta el estado $n = 2$? b) Si los electrones ganan esta energía mediante colisiones entre átomos de hidrógeno en un gas a alta temperatura, encuentre la temperatura mínima

ma del gas hidrógeno caliente. La energía térmica de los átomos calentados está dada por $3k_B T/2$, donde k_B es la constante de Boltzmann.

40. Un láser de rubí pulsátil emite luz a 694.3 nm. Para un pulso de 14.0 ps que contiene 3.00 J de energía, encuentre a) la longitud física del pulso mientras viaja a través del espacio y b) el número de fotones en él. c) Si el haz tiene una sección transversal circular de 0.600 cm de diámetro, ¿cuál es el número de fotones por milímetro cúbico?
41. Un electrón en cromo se mueve desde el estado $n = 2$ hasta el estado $n = 1$ sin emitir un fotón. En vez de ello, la energía en exceso se transfiere a un electrón exterior (uno en el estado $n = 4$), que entonces expulsa el átomo. En este proceso Auger, el electrón expulsado se conoce como un electrón Auger. a) Encuentre el cambio en energía asociado con la transición desde $n = 2$ hacia el estado vacante $n = 1$, usando la teoría de Bohr. Suponga que sólo un electrón en la capa K blindará parte de la carga nuclear. b) Encuentre la energía necesaria para ionizar un electrón $n = 4$, suponiendo 22 electrones que blindan el núcleo. c) Encuentre la energía cinética del electrón expulsado (Auger). (Todas las respuestas deben estar en electrón-volts.)
42. **CIC S** A medida que la Tierra se mueve alrededor del Sol, sus órbitas están cuantizadas. a) Siga los pasos del análisis de Bohr del átomo de hidrógeno para demostrar que el radio permitido de la órbita de la Tierra está dado por

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{GM_S M_T^2}$$

donde n es un número entero cuántico, M_S es la masa del Sol, y M_T es la masa de la Tierra. b) Calcule el valor

numérico de n para el sistema Sol-Tierra. c) Determine la distancia entre la órbita para el número cuántico n y la siguiente órbita fuera del Sol que corresponde al número cuántico $n + 1$. d) Discuta la importancia de los resultados de los incisos b) y c).

43. **BIO M** Un láser que se usa en cirugía ocular emite un pulso de 3.00 Jm en 1.00 ns, enfocado sobre una mancha de $3.00 \mu\text{m}$ de diámetro sobre la retina. a) Encuentre (en unidades SI) la potencia por unidad de área en la retina. (Esta cantidad se llama *irradiancia*.) b) ¿Qué energía se entrega por pulso a un área de tamaño molecular (por decir, un área circular de 0.600 nm de diámetro)?
44. Un electrón tiene una longitud de onda de De Broglie igual al diámetro de un átomo de hidrógeno en su estado base. a) ¿Cuál es la energía cinética del electrón? b) ¿Cómo se compara esta energía con la energía del estado base del átomo de hidrógeno?
45. **S** Use el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno para demostrar que, cuando el átomo realiza una transición del estado n al estado $n - 1$, la frecuencia de la luz emitida está dada por

$$f = \frac{2\pi^2 m k_e^2 e^4}{h^3} \left[\frac{2n - 1}{(n - 1)^2 n^2} \right]$$

46. Suponga que la energía de ionización de un átomo es 4.100 eV. En este mismo átomo, se observan líneas de emisión que tienen longitudes de onda de 310.0, 400.0 y 1378 nm. Use esta información para construir el diagrama de niveles de energía con el menor número de niveles. Suponga que los niveles de energía más altos están muy juntos.



Los técnicos preparan la cámara de vacío del reactor de fusión mejorada ASDEX (Experimento Divertor de Simetría Axial), donde se calienta plasma a más de 60 millones de grados, dando lugar a la fusión del deuterio y el tritio y la liberación de energía. Tal tokamak experimental puede llevar a los reactores al trabajo de fusión.

Física nuclear

29

En este capítulo estudiamos las propiedades y estructura de los núcleos atómicos. Comenzamos por describir las propiedades básicas de los núcleos y continuamos con un análisis del fenómeno de la radiactividad. Finalmente, exploramos las reacciones nucleares y los diversos procesos mediante los cuales decaen los núcleos.

29.1 Algunas propiedades del núcleo

Todos los núcleos están compuestos de dos tipos de partículas: protones y neutrones. La única excepción es el núcleo de hidrógeno ordinario, que es un solo protón. Al describir algunas de las propiedades de los núcleos, como su carga, masa y radio, se utilizan las siguientes cantidades:

- el **número atómico** Z , que es igual al número de protones en el núcleo
- el **número de neutrones** N , que es igual al número de neutrones en el núcleo
- el **número de masa** A , que es igual al número de nucleones en el núcleo (*nucleón* es un término genérico que se usa para referirse a un protón o a un neutrón)

El símbolo que se usa para representar el núcleo es A_ZX , donde X representa el símbolo químico del elemento. Por ejemplo, ${}^{27}_{13}\text{Al}$ tiene el número de masa 27 y el número atómico 13; por lo tanto, contiene 13 protones y 14 neutrones. Cuando no hay probabilidad de que surja confusión, con frecuencia se omite el subíndice Z porque el símbolo químico siempre se puede usar para determinar Z .

29.1 Algunas propiedades del núcleo

29.2 Energía de enlace

29.3 Radiactividad

29.4 Los procesos de decaimiento

29.5 Radiactividad natural

29.6 Reacciones nucleares

29.7 Aplicaciones médicas de la radiación



Ernest Rutherford
Físico neozelandés (1871-1937)

Rutherford recibió el Premio Nobel de Química en 1908, por su estudio de la radiactividad y por descubrir que los átomos se pueden romper mediante rayos alfa. “Al considerarlo, me doy cuenta de que esta dispersión hacia atrás debe ser resultado de una sola colisión y cuando hice cálculos, vi que era imposible obtener algo de ese orden de magnitud a menos que se tomara un sistema en el cual la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un núcleo diminuto. Entonces fue que tuve la idea de un átomo con un diminuto centro masivo que porta una carga.”

Definición de la unidad de masa unificada, u ▶

Tabla 29.1 Masas del protón, neutrón y electrón en varias unidades

Partícula	Masa		
	kg	u	MeV/c ²
Protón	$1.672\ 6 \times 10^{-27}$	1.007 276	938.28
Neutrón	$1.675\ 0 \times 10^{-27}$	1.008 665	939.57
Electrón	9.109×10^{-31}	5.486×10^{-4}	0.511

Los núcleos de todos los átomos de un elemento particular deben contener el mismo número de protones, pero pueden contener diferentes números de neutrones. Los núcleos que se relacionan de esta forma se llaman **isótopos**. **Los isótopos de un elemento tienen el mismo valor Z, pero diferentes valores N y A.** Las abundancias naturales de isótopos pueden diferir de manera sustancial. Por ejemplo, $^{11}_6\text{C}$, $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ y $^{14}_6\text{C}$ son cuatro isótopos del carbono. La abundancia natural del isótopo es de aproximadamente 98.9%, mientras que el del isótopo $^{13}_6\text{C}$ sólo es de más o menos 1.1%. Algunos isótopos no ocurren de manera natural, pero se pueden producir en el laboratorio mediante reacciones nucleares. Incluso el elemento más simple, hidrógeno, tiene isótopos: ^1_1H , hidrógeno; ^2_1H , deuterio, y ^3_1H , tritio.

Carga y masa

El protón porta una sola carga positiva $+e = 1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19}\text{C}$, el electrón porta una sola carga negativa $-e$ y el neutrón es eléctricamente neutro. Puesto que el neutrón no tiene carga, es difícil de detectar. El protón es aproximadamente 1 836 veces más masivo que el electrón, y las masas del protón y el neutrón casi son iguales (tabla 29.1).

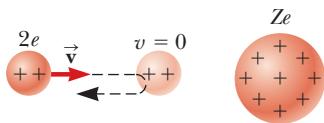
Para masas atómicas, es conveniente definir la **unidad de masa unificada, u**, en tal forma que la masa de un átomo del isótopo ^{12}C es exactamente 12 u, donde $1\text{ u} = 1.660\ 559 \times 10^{-27}\text{kg}$. El protón y el neutrón tienen cada uno una masa de aproximadamente 1 u y el electrón tiene una masa que sólo es una pequeña fracción de una unidad de masa atómica.

Puesto que la energía en reposo de una partícula está dada por $E_R = mc^2$, con frecuencia es conveniente expresar la masa de la partícula en términos de su energía equivalente. Para una unidad de masa atómica, se tiene una energía equivalente de

$$E_R = mc^2 = (1.660\ 559 \times 10^{-27}\text{ kg})(2.997\ 92 \times 10^8\text{ m/s})^2 = 1.492\ 431 \times 10^{-10}\text{ J} = 931.494\text{ MeV}$$

En sus cálculos, los físicos nucleares usualmente expresan la masa en términos de la unidad MeV/c^2 , donde

$$1\text{ u} = 931.494\text{ MeV}/c^2$$



Debido a la repulsión de Coulomb entre cargas iguales, la partícula alfa se detendrá instantáneamente a una distancia d del núcleo, llamada distancia de máximo acercamiento.

El tamaño del núcleo

El tamaño y estructura del núcleo se investigó primero en experimentos de dispersión por parte de Rutherford, que se analiza en la sección 28.1. Al usar el principio de conservación de la energía, Rutherford encontró una expresión para cuán cerca una partícula alfa que se mueve directamente hacia el núcleo puede llegar a éste antes de ser repelido por la repulsión de Coulomb.

En tal colisión frontal, la energía cinética de la partícula alfa entrante se debe convertir por completo en energía potencial eléctrica cuando la partícula se detiene en el punto de máximo acercamiento y da la vuelta (figura activa 29.1). Si la energía cinética inicial de la partícula alfa se iguala con la máxima energía potencial eléctrica del sistema (partícula alfa más núcleo blanco), se tiene

$$\frac{1}{2}mv^2 = k_e \frac{q_1q_2}{r} = k_e \frac{(2e)(Ze)}{d}$$

Figura activa 29.1 Una partícula alfa en un curso de colisión frontal con un núcleo de carga Ze .

donde d es la distancia de máximo acercamiento. Al resolver para d obtenemos

$$d = \frac{4k_e Z e^2}{mv^2}$$

A partir de esta expresión, Rutherford descubrió que las partículas alfa se aproximaban hasta 3.2×10^{-14} m dentro de un núcleo cuando la hoja está hecha de oro, lo que implica que el radio del núcleo de oro debe ser menor que este valor. Para átomos de plata, la distancia de máximo acercamiento era 2×10^{-14} m. A partir de estos resultados, Rutherford concluyó que la carga positiva en un átomo está concentrada en una pequeña esfera, a la que llamó núcleo, con radios no mayores que aproximadamente 10^{-14} m. Puesto que tales longitudes son comunes en física nuclear, una conveniente unidad de longitud es el *femtómetro* (fm), en ocasiones llamado **fermi** y que se define como

$$1 \text{ fm} \equiv 10^{-15}$$

Desde la época de los experimentos de dispersión de Rutherford, una multitud de otros experimentos demostraron que la mayoría de los núcleos son aproximadamente esféricos y tienen un radio promedio dado por

$$r = r_0 A^{1/3} \quad [29.1]$$

donde r_0 es una constante igual a 1.2×10^{-15} m y A es el número total de nucleones. Puesto que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su radio, de la ecuación 29.1 se tiene que el volumen de un núcleo (supuesto esférico) es directamente proporcional a A , el número total de nucleones. Entonces esta relación sugiere que **todos los núcleos tienen casi la misma densidad**. Los nucleones se combinan para formar un núcleo *como si* fuesen esferas fuertemente empaquetadas (figura 29.2).

Estabilidad nuclear

Dado que el núcleo consiste en una colección de protones y neutrones fuertemente empaquetados, tal vez le sorprenda que alguna vez puedan existir. Las grandes fuerzas electrostáticas repulsivas entre protones deben hacer que el núcleo se separe. Sin embargo, los núcleos son estables debido a la presencia de otra fuerza de corto alcance (aproximadamente 2 fm): la **fuerza nuclear**, una fuerza atractiva que actúa entre todas las partículas nucleares. Los protones se atraen mutuamente vía la fuerza nuclear y al mismo tiempo se repelen mutuamente mediante la fuerza de Coulomb. La fuerza nuclear atractiva también actúa entre pares de neutrones y entre neutrones y protones.

La fuerza nuclear atractiva es más fuerte que la fuerza repulsiva de Coulomb dentro del núcleo (a distancias cortas). Si no fuese así, los núcleos estables no existirían. Más aún, la fuerza nuclear fuerte es casi independiente de la carga. En otras palabras, las fuerzas nucleares asociadas con las interacciones protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son aproximadamente iguales, aparte de la adicional fuerza de Coulomb repulsiva para la interacción protón-protón.

Hay alrededor de 260 núcleos estables, otros cientos han sido observados, pero son inestables. Una gráfica de N contra Z para una serie de núcleos estables se da en la figura 29.3 (página 960). Observe que los núcleos ligeros son más estables si contienen igual número de protones y neutrones, de modo que $N = Z$, pero los núcleos pesados son más estables si $N > Z$. Esta diferencia se puede entender en parte al reconocer que, conforme aumenta el número de protones, aumenta la intensidad de la fuerza de Coulomb, que tiende a romper al núcleo. Como resultado, se necesitan más neutrones para mantener al núcleo estable porque a los neutrones sólo los afecta la fuerza nuclear atractiva. En efecto, los neutrones adicionales “disminuyen” la densidad de carga nuclear. Eventualmente, cuando $Z = 83$, las fuerzas repulsivas entre los protones no se pueden compensar mediante la adición de neutrones. Los elementos que contienen más de 83 protones no tienen núcleos estables sino que, más bien, decaen o se desintegran en otras partículas en varios periodos. En el apéndice B se proporcionan las masas y algunas otras propiedades de isótopos seleccionados.

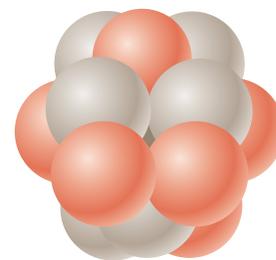


Figura 29.2 Un núcleo se puede visualizar como un cúmulo de esferas fuertemente empaquetadas, cada una de las cuales es un nucleón.

Tip 29.1 El número de masa no es la masa atómica

No confunda el número de masa A con la masa atómica. El número de masa es un entero que especifica un isótopo y no tiene unidades; simplemente es igual al número de nucleones. La masa atómica es un promedio de las masas de los isótopos de un elemento dado y tiene unidades de u.

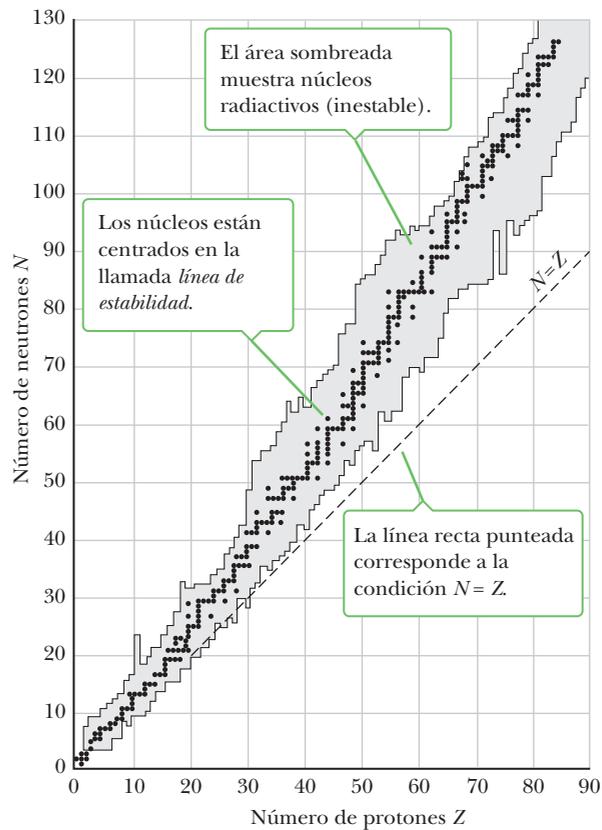


Cortesía de Louise Barker/API Niels Bohr Library

María Goeppert-Mayer Física alemana (1906-1972)

Goeppert-Mayer es mejor conocida por su desarrollo del modelo de capas del núcleo, publicado en 1950. Un modelo similar se desarrolló simultáneamente por parte de Hans Jensen, un científico alemán. María Goeppert-Mayer y Hans Jensen recibieron el Premio Nobel de Física en 1963, por su extraordinario trabajo para comprender la estructura del núcleo.

Figura 29.3 Una gráfica del número de neutrones N contra el número de protones Z para los núcleos estables (puntos sólidos).



29.2 Energía de enlace

La masa total de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones. Además, dado que la masa es otra manifestación de energía, **la energía total del sistema enlazado (el núcleo) es menor que la energía combinada de los nucleones separados**. Esta diferencia en energía se llama **energía de enlace** del núcleo y se puede considerar como la energía que se debe agregar a un núcleo para romperlo en sus neutrones y protones separados.

EJEMPLO 29.1 La energía de enlace del deuterón

OBJETIVO Calcular la energía de enlace de un núcleo.

PROBLEMA El núcleo del átomo de deuterio, llamado deuterón, consiste en un protón y un neutrón. Calcule la energía de enlace del deuterón en MeV, dado que su masa atómica, *la masa de un núcleo de deuterio más un electrón*, es 2.014 102 u.

ESTRATEGIA Calcule la suma de las masas de las partículas individuales y reste la masa de la partícula combinada. Se pueden usar las masas de los átomos neutros en lugar de los núcleos porque las masas del electrón se cancelan. Use los valores del apéndice B. La masa de un átomo dado en el apéndice B incluye la masa de Z electrones, donde Z es el número atómico del átomo.

SOLUCIÓN

Para encontrar la energía de enlace, primero sume las masas del átomo de hidrógeno y el neutrón y reste la masa del deuterón:

$$\begin{aligned} \Delta m &= (m_p + m_n) - m_d \\ &= (1.007\,825\text{ u} + 1.008\,665\text{ u}) - 2.014\,102\text{ u} \\ &= 0.002\,388\text{ u} \end{aligned}$$

Convierta esta diferencia de masa a su equivalente en MeV:

$$E_b = (0.002\,388\text{ u}) \frac{931.5\text{ MeV}}{1\text{ u}} = 2.224\text{ MeV}$$

COMENTARIOS Este resultado dice que, para separar un deuterón en un protón y un neutrón, es necesario agregar 2.224 MeV de energía al deuterón para superar la fuerza nuclear atractiva entre el protón y el neutrón. Una forma de suministrar al deuterón con esta energía es bombardearlo con partículas energéticas.

Si la energía de enlace de un núcleo fuese cero, el núcleo se separaría en sus protones y neutrones constituyentes sin la adición de energía alguna; es decir, se separaría espontáneamente.

PREGUNTA 29.1 Tritio y helio-3 tienen el mismo número de nucleones, pero el tritio tiene un protón y dos neutrones mientras que el helio-3 tiene dos protones y un neutrón. Sin hacer un cálculo, ¿cuál núcleo tiene mayor energía de enlace? Explique.

EJERCICIO 29.1 Calcule la energía de enlace de ${}^3_2\text{He}$.

RESPUESTA 7.718 MeV

Es interesante examinar una gráfica de energía de enlace por nucleón, E_b/A , como función del número de masa para varios núcleos estables (figura 29.4). Excepto por los núcleos más ligeros, la energía de enlace promedio por nucleón es aproximadamente 8 MeV. Observe que la curva tiene picos en la vecindad de $A = 60$, lo cual significa que los núcleos con números de masa mayor o menor que 60 no se enlazan tan fuertemente como los que están cerca de la mitad de la tabla periódica. Como verá más adelante, este hecho permite que se libere energía en las reacciones de fisión y fusión. La curva varía lentamente para $A > 40$, lo cual sugiere que la fuerza nuclear se satura. En otras palabras, un nucleón particular puede interactuar sólo con un número limitado de otros nucleones, que se pueden ver como los “vecinos más cercanos” en la estructura empaquetada que se ilustra en la figura 29.2.

■ FÍSICA APLICADA 29.1 Enlace de nucleones y electrones

La figura 29.4 muestra una gráfica de la cantidad de energía requerida para remover un nucleón del núcleo. La figura indica que se necesita una cantidad de energía aproximadamente constante para remover un nucleón arriba de $A = 40$, mientras que en el capítulo 28 vimos que se requieren can-

tidades de energía enormemente variables para remover un electrón del átomo. ¿Qué explica esta diferencia?

EXPLICACIÓN En el caso de la figura 29.4, el valor aproximadamente constante de la energía de enlace nuclear es

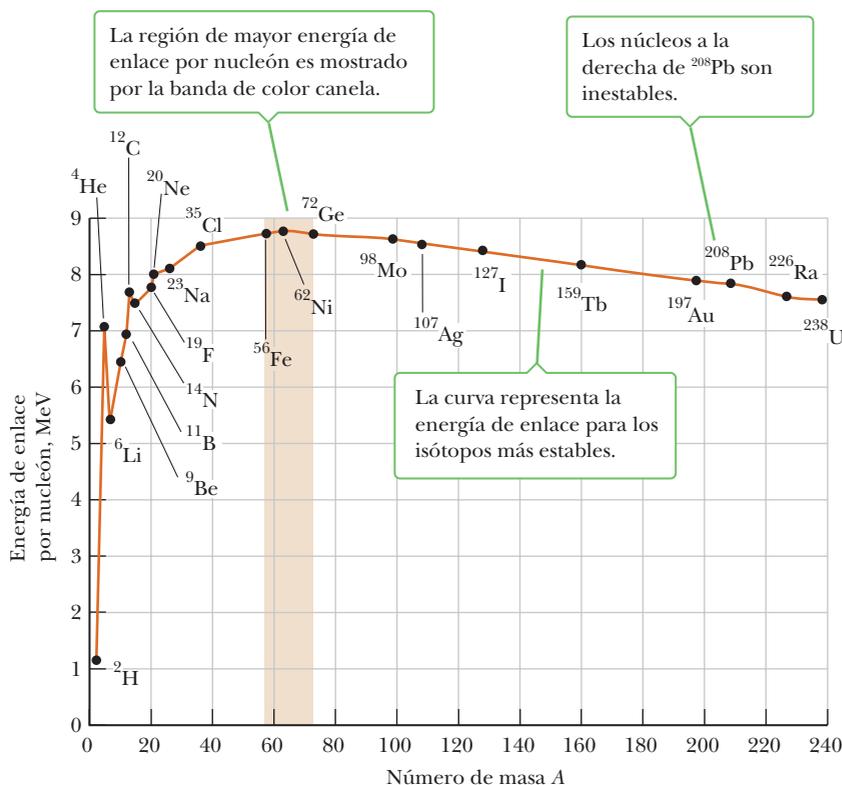


Figura 29.4 Energía de enlace por nucleón contra el número de masa A para núcleos que están a lo largo de la línea de estabilidad que se muestra en la figura 29.3. Algunos núcleos representativos aparecen como puntos negros con etiquetas.

resultado de la naturaleza de corto alcance de la fuerza nuclear. Un nucleón dado sólo interactúa con sus pocos vecinos más cercanos en lugar de hacerlo con todos los nucleones en el núcleo. En consecuencia, sin importar cuántos nucleones estén presentes en el núcleo, remover cualquier nucleón involucra separarlo sólo de sus vecinos más cercanos. Por lo tanto, la energía para hacerlo es aproximada e independiente de cuántos nucleones están presentes. Para la comparación más clara con el electrón, piense en promediar las energías requeridas para remover todos los electrones de

un átomo, desde el electrón de valencia más externo, hasta el electrón de la capa K más interno. Este promedio aumenta con el aumento en número atómico. La fuerza eléctrica que enlaza los electrones al núcleo en un átomo es una fuerza de largo alcance. Un electrón en un átomo interactúa con todos los protones en el núcleo. Cuando las cargas nucleares aumentan, hay una interacción más fuerte entre el núcleo y los electrones. En consecuencia, conforme aumenta la carga nuclear, se necesita más energía para remover un electrón promedio. ■

29.3 Radiactividad

En 1896, Becquerel descubrió accidentalmente que los cristales de sal de uranio emiten una radiación invisible que puede oscurecer una placa fotográfica incluso si la placa se cubre para excluir la luz. Después de muchas de estas observaciones bajo condiciones controladas, concluyó que la radiación emitida por los cristales era de un nuevo tipo, uno que no requería estimulación externa. Esta emisión espontánea de radiación pronto se llamó **radiactividad**. Experimentos posteriores de otros científicos demostraron que otras sustancias también eran radiactivas.

Las investigaciones más significativas de este tipo las desarrollaron Marie y Pierre Curie. Luego de varios años de cuidadosos y laboriosos procesos de separación química sobre toneladas de pechblenda, un material radiactivo, los Curie reportaron el descubrimiento de dos elementos anteriormente desconocidos, ambos radiactivos. Estos elementos recibieron los nombres de polonio y radio. Experimentos posteriores, incluido el famoso trabajo de Rutherford sobre dispersión de partículas alfa, sugirió que la radiactividad era resultado del decaimiento o desintegración, de núcleos inestables.

Una sustancia radiactiva puede emitir alguno de tres tipos de radiación: partículas alfa (α), en la que las partículas emitidas son núcleos $\frac{4}{2}\text{He}$; partículas beta (β), en la que las partículas emitidas son electrones o positrones; y rayos gamma (γ), en la que los “rayos” emitidos son fotones de alta energía. Un **positrón** es una partícula similar al electrón en todos aspectos, excepto que tiene una carga de $+e$. (Se dice que el positrón es la **antipartícula** del electrón.) El símbolo e^- se usa para designar un electrón y e^+ designa un positrón.

Es posible distinguir estas tres formas de radiación con el uso del esquema descrito en la figura 29.5. La radiación de una muestra radiactiva se dirige hacia una región con un campo magnético y el haz se divide en tres componentes, dos que se doblan en direcciones opuestas y la tercera que no cambia de dirección. A partir de esta simple observación, se puede concluir que la radiación del haz sin desviar (el rayo gamma) no porta carga, el componente que se desvía hacia arriba contiene partículas con carga positiva (partículas alfa) y el componente que se desvía hacia abajo contiene partículas con carga negativa (e^-). Si el haz incluye un positrón (e^+), se desvía hacia arriba.



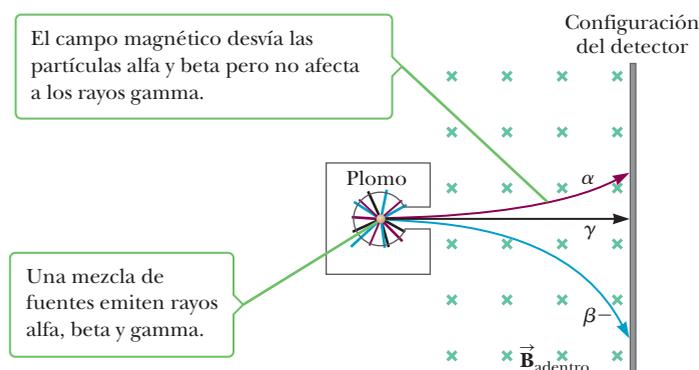
Time Life Pictures/Mansell/Time Life Pictures/Getty Images

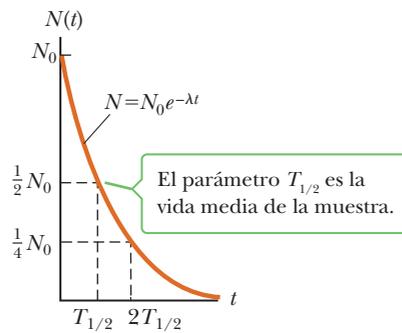
Marie Curie

Científica polaca (1867-1934)

En 1903 Marie Curie compartió el Premio Nobel de Física con su esposo, Pierre y con Antoine Henri Becquerel por sus estudios de las sustancias radiactivas. En 1911 recibió un segundo Premio Nobel, esta vez en química, por el descubrimiento del radio y el polonio. Marie Curie murió de leucemia causada por años de exposición a sustancias radiactivas. “Sigo creyendo que las ideas que nos guiaron entonces, son las únicas que pueden conducir al verdadero progreso social. No podemos esperar construir un mundo mejor sin mejorar lo individual. Para este fin, cada uno de nosotros debe trabajar hacia su más alto desarrollo y aceptar al mismo tiempo su parte de responsabilidad en la vida general de la humanidad.”

Figura 29.5 La radiación de una fuente radiactiva, como el radio, se puede separar en tres componentes con el uso de un campo magnético para desviar las partículas cargadas. El detector a la derecha registra los eventos.



**Figura activa 29.6**

Gráfica de la ley de decaimiento exponencial para núcleos radiactivos. El eje vertical representa el número de núcleos radiactivos presente en cualquier tiempo t , y el eje horizontal es tiempo.

Los tres tipos de radiación tienen energías de penetración muy diferentes. Las partículas alfa apenas penetran una hoja de papel, las partículas beta pueden penetrar algunos milímetros de aluminio y los rayos gamma pueden penetrar varios centímetros de plomo.

La constante de decaimiento y vida media

Las observaciones demuestran que si una muestra radiactiva contiene N núcleos radiactivos en algún instante, el número de núcleos, ΔN , que decaen en un pequeño intervalo de tiempo Δt es proporcional a N ; matemáticamente

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

o

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad [29.2]$$

donde λ es una constante llamada **constante de decaimiento**. El signo negativo significa que N disminuye con el tiempo; esto es, ΔN es negativo. El valor de λ para cualquier isótopo determina la razón a la que dicho isótopo decaerá. **La razón de decaimiento o actividad R , de una muestra se define como el número de decaimientos por segundo.** A partir de la ecuación 29.2, se ve que la razón de decaimiento es

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N \quad [29.3]$$

◀ Razón de decaimiento

Los isótopos con un gran valor λ decaen rápidamente; los que tienen pequeña λ decaen lentamente.

En la figura activa 29.6 se muestra una curva de decaimiento general para una muestra radiactiva. A partir de la ecuación 29.2 se puede demostrar (usando cálculo) que el número de núcleos presente varía con el tiempo de acuerdo con la ecuación

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [29.4a]$$

donde N es el número de núcleos radiactivos presente en un tiempo t , N_0 es el número presente en el tiempo $t = 0$ y $e = 2.718 \dots$ es la constante de Euler. Los procesos que obedecen la ecuación 29.4a en ocasiones se dice que experimentan **decaimiento exponencial**.¹

Otro parámetro que es útil para caracterizar el decaimiento radiactivo es **la vida media $T_{1/2}$** . **La vida media de una sustancia radiactiva es el tiempo que tarda en decaer la mitad de un número dado de núcleos radiactivos.** Al usar el concepto de vida media, se puede demostrar que la ecuación 29.4a también se puede escribir como

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^n \quad [29.4b]$$

donde n es el número de vidas medias. El número n puede tomar cualquier valor no negativo y no necesita ser entero. A partir de la definición, se sigue que n se relaciona con el tiempo t y la vida media $T_{1/2}$ por

¹En el capítulo 18 se estudian otros ejemplos de decaimiento exponencial, en conexión con los circuitos RC y en el capítulo 20 en conexión con los circuitos RL .

$$n = \frac{t}{T_{1/2}} \quad [29.4c]$$

Haciendo $N = N_0/2$ y $t = T_{1/2}$ en la ecuación 29.4a tenemos

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Al escribir esta expresión en la forma $e^{\lambda T_{1/2}} = 2$ y tomar el logaritmo natural de ambos lados se tiene

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad [29.5]$$

La ecuación 29.5 es una expresión conveniente que relaciona la vida media con la constante de decaimiento. Observe que, después de transcurrido un tiempo de una vida media, permanecen $N_0/2$ núcleos radiactivos (por definición); después de dos vidas medias, decaerá la mitad de éstos y quedarán $N_0/4$ núcleos radiactivos; después de tres vidas medias, restarán $N_0/8$; etcétera.

Tip 29.2 Dos vidas medias no hacen una vida entera

Una vida media es el tiempo que transcurre para que decaiga la mitad de un número dado de núcleos. Durante una segunda vida media, la mitad de los núcleos restantes decae, de modo que en dos vidas medias decayeron tres cuartos del material original, no todo el material.

La unidad de actividad R es el **curie** (Ci), que se define como

$$1 \text{ Ci} \equiv 3.7 \times 10^{10} \text{ decaimientos/s} \quad [29.6]$$

Esta unidad se seleccionó como la unidad de actividad original porque es la actividad aproximada de 1 g de radio. La unidad SI de actividad es el **becquerel** (Bq):

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ decaimiento/s} \quad [29.7]$$

Por lo tanto, $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. Las unidades de actividad de uso más común son el millicurie (10^{-3} Ci) y el microcurie (10^{-6} Ci).

Examen rápido

29.1 Verdadero o Falso: Un átomo radiactivo siempre decae después de transcurridas dos vidas medias.

29.2 ¿Qué fracción de una muestra radiactiva decae después de transcurridas tres vidas medias? a) $1/8$ b) $3/4$ c) $7/8$ d) ninguno de éstos

29.3 Suponga que la constante de decaimiento de la sustancia radiactiva A es el doble que la constante de decaimiento de la sustancia radiactiva B. Si la sustancia B tiene una vida media de 4 h, ¿cuál es la vida media de la sustancia A? a) 8 h b) 4 h c) 2 h

EJEMPLO 29.2 La actividad del radio

OBJETIVO Calcular la actividad de una sustancia radiactiva en diferentes tiempos.

PROBLEMA La vida media del núcleo radiactivo $^{226}_{88}\text{Pa}$ es 1.6×10^3 años. Si una muestra inicialmente contiene 3.00×10^{16} de tal núcleo, determine **a)** la actividad inicial en curies, **b)** el número de núcleos que permanecen después de 4.8×10^3 años y **c)** la actividad en este último tiempo.

ESTRATEGIA Para los incisos a) y c), encuentre la constante de decaimiento y multiplíquela por el número de núcleos. El inciso b) requiere de multiplicar el número inicial del núcleo por un medio de cada vida media transcurrida. (En esencia, ésta es una aplicación de la ecuación 29.4b.)

SOLUCIÓN

a) Determine la actividad inicial en curies.

Convierta la vida media a segundos:

$$T_{1/2} = (1.6 \times 10^3 \text{ años})(3.156 \times 10^7 \text{ s/años}) = 5.0 \times 10^{10} \text{ s}$$

Sustituya este valor en la ecuación 29.5 para obtener la constante de decaimiento:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{5.0 \times 10^{10} \text{ s}} = 1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

Calcule la actividad de la muestra en $t = 0$ y use $R_0 = \lambda N_0$, donde R_0 es la razón de decaimiento en $t = 0$ y N_0 es el número de núcleos radiactivos presente en $t = 0$:

$$\begin{aligned} R_0 &= \lambda N_0 = (1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(3.0 \times 10^{16} \text{ núcleos}) \\ &= 4.2 \times 10^5 \text{ decaimientos/s} \end{aligned}$$

Convierta a curies para obtener la actividad en $t = 0$ y use $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ decaimientos/s:

$$R_0 = (4.2 \times 10^5 \text{ decaimientos/s}) \left(\frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10} \text{ decaimientos/s}} \right) \\ = 1.1 \times 10^{-5} \text{ Ci} = \mathbf{11 \mu\text{Ci}}$$

b) ¿Cuántos núcleos de radio permanecen después de 4.8×10^3 años? Calcule el número de vidas medias, n :

$$n = \frac{4.8 \times 10^3 \text{ años}}{1.6 \times 10^3 \text{ años/vidas medias}} = 3.0 \text{ vidas medias}$$

Multiplique el número inicial de núcleos por el número de factores de un medio:

$$(1) \quad N = N_0 \left(\frac{1}{2} \right)^n$$

Sustituya $N_0 = 3.0 \times 10^{16}$ y $n = 3.0$:

$$N = (3.0 \times 10^{16} \text{ núcleos}) \left(\frac{1}{2} \right)^{3.0} = \mathbf{3.8 \times 10^{15} \text{ núcleos}}$$

c) Calcule la actividad después de 4.8×10^3 años.

Multiplique el número de núcleos restantes por la constante de decaimiento para encontrar la actividad R :

$$R = \lambda N = (1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(3.8 \times 10^{15} \text{ núcleos}) \\ = 5.3 \times 10^4 \text{ decaimientos/s} \\ = \mathbf{1.4 \mu\text{Ci}}$$

COMENTARIOS La actividad se reduce a la mitad cada vida media, lo que es naturalmente el caso porque la actividad es proporcional al número del núcleo restante. El número preciso del núcleo en cualquier tiempo nunca es exacto porque las partículas decaen de acuerdo con una probabilidad. Sin embargo, mientras mayor sea la muestra, más precisas serán las predicciones de la ecuación 29.4.

PREGUNTA 29.2 ¿Cómo es que el duplicar la masa inicial del material radiactivo afectaría la actividad inicial? ¿Cómo afectaría la vida media?

EJERCICIO 29.2 Encuentre a) el núcleo de radio restante después de 3.2×10^3 años y b) la actividad en este tiempo.

RESPUESTAS a) 7.5×10^{15} núcleos b) $2.8 \mu\text{Ci}$

29.4 Los procesos de decaimiento

Como se afirmó en la sección anterior, los núcleos radiactivos decaen espontáneamente vía decaimiento alfa, beta y gamma. Como verá en esta sección, estos procesos son muy diferentes uno de otro.

Decaimiento alfa

Si un núcleo emite una partícula alfa (${}^4_2\text{He}$), pierde dos protones y dos neutrones. Por lo tanto, el número de neutrones N de un solo núcleo disminuye por 2, Z disminuye por 2 y A disminuye por 4. El decaimiento puede escribirse simbólicamente como



donde X se llama **núcleo padre** y Y se conoce como **núcleo hijo**. Como ejemplos, ${}^{238}\text{U}$ y ${}^{226}\text{Ra}$ son emisores alfa y decaen de acuerdo con los esquemas



y



La vida media para decaimiento de ${}^{238}\text{U}$ es 4.47×10^9 años y la vida media de decaimiento de ${}^{226}\text{Ra}$ es 1.60×10^3 años. En ambos casos, observe que el número de masa A del núcleo

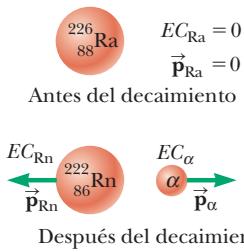


Figura activa 29.7

Decaimiento alfa de radio-226. El núcleo de radio inicialmente está en reposo. Después del decaimiento, el núcleo de radón tiene energía cinética EC_{Rn} y cantidad de movimiento \vec{p}_{Rn} , y la partícula alfa tiene energía cinética EC_α y cantidad de movimiento \vec{p}_α .

hijo es cuatro menos que el del núcleo padre y el número atómico Z se reduce por dos. Las diferencias se explican en la partícula alfa emitida (el núcleo ${}^4\text{He}$).

El decaimiento de ${}^{226}\text{Ra}$ se muestra en la figura activa 29.7. Cuando un elemento cambia en otro, como ocurre en el decaimiento alfa, el proceso se llama **decaimiento espontáneo** o transmutación. Como regla general, 1) la suma de los números de masa A debe ser la misma en ambos lados de la ecuación y 2) la suma de los números atómicos Z debe ser la misma en ambos lados de la ecuación.

Para que ocurra emisión alfa, la masa del padre debe ser mayor que la masa combinada del hijo y la partícula alfa. En el proceso de decaimiento, este exceso de masa se convierte en energía de otras formas y aparece en forma de energía cinética en el núcleo hijo y la partícula alfa. La mayor parte de la energía cinética se retira mediante la partícula alfa porque es mucho menos masiva que el núcleo hijo. Esto se puede entender al notar primero que la energía cinética y la cantidad de movimiento p de una partícula se relacionan del modo siguiente:

$$EC = \frac{p^2}{2m}$$

Puesto que la cantidad de movimiento se conserva, las dos partículas emitidas en el decaimiento de un núcleo en reposo deben tener cantidades iguales de movimiento, pero con dirección opuesta. Como resultado, la partícula más ligera, con la masa más pequeña en el denominador, tiene más energía cinética que la partícula más masiva.

■ FÍSICA APLICADA 29.2 **Energía y vida media**

Al comparar las energías de decaimiento alfa de algunos núclidos radiactivos, ¿por qué se encuentra que la vida media del decaimiento baja conforme la energía del decaimiento sube?

EXPLICACIÓN Debe parecer razonable que mientras más alta sea la energía de la partícula alfa, más probabilidad hay

de que escape a los confines del núcleo. La mayor probabilidad de escape se traduce a una razón de decaimiento más rápida, que aparece como una vida media más corta. ■

■ EJEMPLO 29.3 **Decaimiento de radio**

OBJETIVO Calcular la energía liberada durante un decaimiento alfa.

PROBLEMA Se demostró que el núcleo ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ experimenta decaimiento alfa a ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (ecuación 29.10). Calcule la cantidad de energía liberada en este decaimiento. Considere que la masa de ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ es 226.025 402 u, que la ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ de es 222.017 571 u y que la de ${}^4_2\text{He}$ es 4.002 602 u, como se detalla en el apéndice B.

ESTRATEGIA La solución es cuestión de restar las masas neutras de las partículas hijas de la masa original del átomo de radón.

SOLUCIÓN

Calcule la suma de la masa de la partícula hija, m_d , y la masa de la partícula alfa, m_α :

$$m_d + m_\alpha = 222.017\,571\text{ u} + 4.002\,602\text{ u} = 226.020\,173\text{ u}$$

Calcule la pérdida de masa, Δm , durante el decaimiento al restar el resultado previo de M_p , la masa de la partícula original:

$$\Delta m = M_p - (m_d + m_\alpha) = 226.025\,402\text{ u} - 226.020\,173\text{ u} = 0.005\,229\text{ u}$$

Convierta la pérdida de masa Δm a su energía equivalente en MeV:

$$E = (0.005\,229\text{ u})(931.494\text{ MeV/u}) = 4.871\text{ MeV}$$

COMENTARIOS La barrera de potencial por lo general es mayor que este valor de la energía, pero tuyenamiento cuántico permite que el evento ocurra de cualquier forma.

PREGUNTA 29.3 Convierta la respuesta final a joules y estime la energía producida por un número de Avogadro de tales decaimientos.

EJERCICIO 29.3 Calcule la energía liberada cuando ${}^8_4\text{Be}$ se separa en dos partículas alfa. El berilio-8 tiene una masa atómica de 8.005 305 u.

RESPUESTA 0.094 1 MeV

Decaimiento beta

Cuando un núcleo radiactivo experimenta decaimiento beta, el núcleo hijo tiene el mismo número de nucleones que el núcleo padre, pero el número atómico cambia por 1:



De nuevo, observe que el número de nucleones y la carga total se conservan ambos en estos decaimientos. Sin embargo, como verá dentro de poco, estos procesos no se describen por completo mediante estas expresiones. Un evento típico de decaimiento beta es



La emisión de electrones de un *núcleo* es sorprendente porque, en todos los análisis anteriores, se afirmó que el núcleo está compuesto solamente de protones y neutrones. Esta aparente discrepancia se puede explicar al notar que el electrón emitido se crea en el núcleo mediante un proceso en el cual un neutrón se transforma en un protón. Este proceso se puede representar mediante

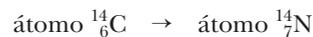


Considere la energía del sistema de la ecuación 29.13 antes y después del decaimiento. Como con el decaimiento alfa, la energía se debe conservar en el decaimiento beta. El siguiente ejemplo ilustra cómo calcular la cantidad de energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}_6\text{C}$.

■ EJEMPLO 29.4 Decaimiento beta de carbono-14

OBJETIVO Calcular la energía liberada en un decaimiento beta.

PROBLEMA Encuentre la energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}_6\text{C}$ a ${}^{14}_7\text{N}$, como se representa mediante la ecuación 29.13. Esta ecuación se refiere al núcleo, mientras que el apéndice B proporciona las masas de átomos neutros. Agregar seis electrones a ambos lados de la ecuación 29.13 produce



ESTRATEGIA Como en problemas precedentes, encontrar la energía liberada involucra calcular la diferencia en masa entre la partícula resultante y la partícula inicial y convertirla a MeV.

SOLUCIÓN

Obtenga las masas de ${}^{14}_6\text{C}$ y ${}^{14}_7\text{N}$ del apéndice B y calcule la diferencia entre ellas: $\Delta m = m_{\text{C}} - m_{\text{N}} = 14.003\,242\text{ u} - 14.003\,074\text{ u} = 0.000\,168\text{ u}$

Convierta la diferencia de masa a MeV: $E = (0.000\,168\text{ u})(931.494\text{ MeV/u}) = 0.156\text{ MeV}$

COMENTARIOS La energía calculada por lo general es más que la energía observada en este proceso. La discrepancia condujo a una crisis en la física porque parecía que la energía no se conservaba. Como se analizó anteriormente, esta crisis se resolvió mediante el descubrimiento de que en la reacción también se producía otra partícula.

PREGUNTA 29.4 ¿La energía de enlace por nucleón del núcleo de nitrógeno-14 es mayor o menor que la energía de enlace por nucleón para el núcleo de carbono-14? Justifique su respuesta.

EJERCICIO 29.4 Calcule la máxima energía liberada en el decaimiento beta del potasio radiactivo a calcio: ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + e^-$.

RESPUESTA 1.31 MeV

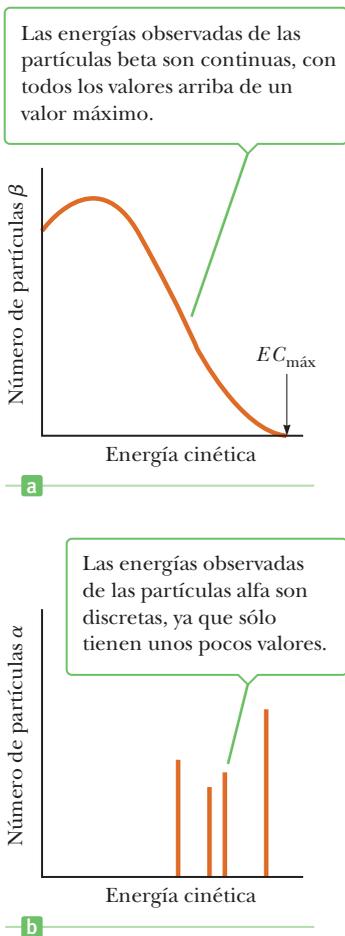


Figura 29.8 a) Distribución de energías de partícula beta en un decaimiento beta típico. Todas las energías se observan hasta un valor máximo. b) Distribución de energías de las partículas alfa en una desintegración alfa típica.

Tip 29.3 Número de masa del electrón

Otra notación que a veces se utiliza para un electrón es ${}^0_{-1}e$. Esta notación no implica que el electrón tenga energía en reposo cero. La masa del electrón es mucho menor que la del nucleón más ligero, de modo que se puede aproximar a cero cuando se estudien decaimientos nucleares y reacciones.

A partir del ejemplo 29.4, vemos que la energía liberada en el decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$ es aproximadamente 0.16 MeV. Como con el decaimiento alfa, se espera que el electrón se lleve virtualmente toda esta energía como energía cinética porque, en apariencia, es la partícula más ligera producida en el decaimiento. Sin embargo, como muestra la figura 29.8, sólo un pequeño número de electrones tienen esta energía cinética máxima, representada como $EC_{\text{máx}}$ en la gráfica; la mayoría de los electrones emitidos tienen energías cinéticas menores que este valor predicho. Si el núcleo hijo y el electrón no se llevan esta energía liberada, ¿a dónde va la energía? Como una complicación adicional, ¡mayor análisis del decaimiento beta muestra que los principios de conservación de la cantidad de movimiento tanto angular como lineal parecen haberse violado!

En 1930, Pauli propuso que una tercera partícula debe estar presente para llevarse la energía “faltante” y conservar la cantidad de movimiento. Más tarde, Enrico Fermi desarrolló una teoría completa del decaimiento beta y llamó a esta partícula **neutrino** (“el pequeño neutro”) porque debía ser eléctricamente neutro y tener poca o ninguna masa. Aunque eludió la detección durante muchos años, el neutrino (ν) finalmente se detectó de manera experimental en 1956. El neutrino tiene las siguientes propiedades:

- Carga eléctrica cero
- Una masa mucho menor que la del electrón, pero probablemente no cero. (Experimentos recientes sugieren que el neutrino definitivamente tiene masa, mas el valor es incierto, acaso menor que $1 \text{ eV}/c^2$)
- Un espín de $\frac{1}{2}$
- Interacción muy débil con la materia, lo que lo hace difícil de detectar

Con la introducción del neutrino, ahora el proceso de decaimiento beta de la ecuación 29.13 se puede representar en su forma correcta:



La barra en el símbolo $\bar{\nu}$ indica un **antineutrino**. Para explicar qué es un antineutrino, primero considere el siguiente decaimiento:



Aquí se ve que, cuando ${}^{12}\text{N}$ decae a ${}^{12}\text{C}$, se produce una partícula que es idéntica al electrón, excepto que tiene una carga positiva de $+e$. Esta partícula se llama **positrón**. Puesto que es como el electrón en todos los aspectos, excepto en carga, se dice que el positrón es la **antipartícula** del electrón. En el capítulo 30 se analizan con más profundidad las antipartículas; por ahora, es suficiente decir que, **en el decaimiento beta, se emiten un electrón y un antineutrino o un positrón y un neutrino.**

A diferencia del decaimiento beta, que resulta en una partícula hija con una variedad de posibles energías cinéticas, los decaimientos alfa vienen en cantidades discretas, como se ve en la figura 29.8b. Esto se debe a que las dos partículas hijas tienen cantidades de movimiento iguales en magnitud y opuestas en dirección y cada una está compuesta de un número fijo de nucleones.

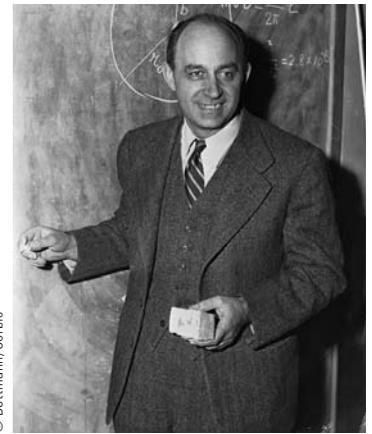
Decaimiento gamma

Con mucha frecuencia un núcleo que experimenta decaimiento radiactivo se deja en un estado de energía excitado. Entonces el núcleo puede experimentar un segundo decaimiento a un estado energético más bajo, acaso incluso al estado base, al emitir uno o más fotones de alta energía. El proceso es similar a la emisión de luz mediante un átomo. Un átomo emite radiación para liberar algo de energía adicional cuando un electrón “salta” desde un estado de alta energía hasta un estado de menor energía. Del mismo modo, el núcleo usa esencialmente el mismo método para liberar cualquier energía adicional que pudiera tener después de un decaimiento o algún otro evento nuclear. En la des-excitación nuclear, los “saltos” que liberan energía se realizan mediante protones o neutrones en el núcleo conforme se mueven desde un nivel de energía más alto a un nivel más bajo. Los fotones emitidos en el proceso se llaman **rayos gamma**, que tienen muy alta energía en relación con la energía de la luz visible.

Un núcleo puede alcanzar un estado excitado como resultado de una violenta colisión con otra partícula. Sin embargo, es más común que un núcleo esté en un estado excitado como resultado de decaimiento alfa o beta. La siguiente secuencia de eventos tipifica los procesos de decaimiento alfa:



La ecuación 29.17 representa un decaimiento beta en el cual ${}^{12}\text{B}$ decae a ${}^{12}\text{C}^*$, donde el asterisco indica que el núcleo de carbono queda en un estado excitado después del decaimiento. El núcleo de carbono excitado decae entonces al estado base mediante la emisión de un rayo gamma, como se indica mediante la ecuación 29.18. Observe que la emisión gamma no resulta en algún cambio en Z o en A .



© Bettmann/Corbis

Enrico Fermi Físico italiano (1901-1954)

Fermi recibió el Premio Nobel de Física en 1938 por producir los elementos transuránicos mediante irradiación de neutrones y por su descubrimiento de las reacciones nucleares producidas por neutrones lentos. Hizo muchas otras aportaciones sobresalientes a la física, incluida su teoría del decaimiento beta, la teoría de electrones libres de los metales y el desarrollo del primer reactor de fisión del mundo en 1942. Fermi fue verdaderamente un físico teórico y experimental dotado. También fue bien conocido por su habilidad para presentar la física en una forma clara y excitante. "Cualquier cosa que la Naturaleza tenga guardada para la humanidad, por desagradable que parezca, el hombre debe aceptarla, pues la ignorancia nunca es mejor que el conocimiento."

Usos prácticos de la radiactividad

Datación con carbono El decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$ dado por la ecuación 29.15 comúnmente se utiliza para datar muestras orgánicas. Los rayos cósmicos (partículas de alta energía del espacio exterior) en la parte superior de la atmósfera provocan reacciones nucleares que crean ${}^{14}\text{C}$ a partir de ${}^{14}\text{N}$. De hecho, la proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ (por números de núcleos) en las moléculas de dióxido de carbono de la atmósfera tiene un valor constante de aproximadamente 1.3×10^{-12} , según se determina a partir de mediciones de las proporciones de carbono en los anillos de los árboles. Todos los organismos vivos tienen la misma proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ porque continuamente intercambian dióxido de carbono con sus alrededores. Sin embargo, cuando un organismo muere, ya no absorbe ${}^{14}\text{C}$ de la atmósfera, de modo que la proporción de ${}^{14}\text{C}$ a ${}^{12}\text{C}$ disminuye como resultado del decaimiento beta de ${}^{14}\text{C}$. Por lo tanto, es posible determinar la edad de un material al medir su actividad por unidad de masa como resultado del decaimiento de ${}^{14}\text{C}$. A través de la datación con carbono, se han identificado muestras de madera, carbón, hueso y concha que vivieron hace 1000 a 25000 años. Este conocimiento ayudó a los investigadores a reconstruir la historia de los organismos vivos, incluidos los humanos, durante dicho lapso.

Detectores de humo Los detectores de humo se usan frecuentemente en hogares e industrias para protección contra incendios. La mayoría de los detectores comunes son de tipo ionización, que usan materiales radiactivos. (Véase la figura 29.9.) Un detector de humo consiste de una cámara de ionización, un detector sensible a la corriente y una alarma. Una débil fuente radiactiva ioniza el aire en la cámara del detector, lo que crea partículas cargadas. Entre las placas dentro de la cámara se mantiene un voltaje, que establece una pequeña corriente detectable en el circuito externo. En tanto se mantenga la corriente, la alarma se desactiva. Sin embargo, si el humo entra a la cámara, los iones se unen a las partículas de humo. Estas partículas más pesadas no derivan tan fácilmente como los iones más ligeros y generan una disminución en la corriente del detector. El circuito externo percibe esta disminución en la corriente y activa la alarma.

Detección de radón La radiactividad también puede afectar su vida diaria en forma dañina. Poco después del descubrimiento del radio por los Curie, se descubrió que el aire en contacto con compuestos de radio se volvía radiactivo. Entonces se demostró que esta radiactividad proviene del mismo radio y en consecuencia al producto se le llamó "emanación de radio". Rutherford y Frederick Soddy tuvieron éxito al condensar esta "emanación", lo que confirmó que era una sustancia real: el elemento gaseoso inerte ahora llamado **radón** (Rn). Más tarde se descubrió que el aire en las minas de uranio es radiactivo debido a la presencia de gas radón. Por lo tanto, las minas deben estar bien ventiladas para ayudar a proteger a los mineros. Finalmente, el miedo a la contaminación por radón se movió de las minas de uranio hacia las casas. Puesto que ciertos tipos de rocas, suelo, ladrillos y concreto contienen pequeñas cantidades de radio, parte del gas radón resultante encuentra su camino hacia las casas y otros edificios. El problema más serio surge de la fuga de radón del suelo hacia la estructura. Un remedio práctico es expulsar el aire a través de una

APLICACIÓN

Detectores de humo

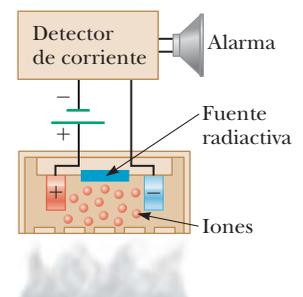


Figura 29.9 Detector de humo del tipo ionización. El humo que entra a la cámara reduce la corriente detectada, lo que hace sonar la alarma.

APLICACIÓN

Contaminación con radón

tubería justo sobre el suelo o grava subyacente directamente hacia el exterior mediante un pequeño ventilador o fuelle.

Para usar técnicas de datación radiactiva es necesario remodelar algunas de las ecuaciones ya introducidas. Comience por multiplicar ambos lados de la ecuación 29.4 por λ :

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

A partir de la ecuación 29.3 se tiene $\lambda N = R$ y $\lambda N_0 = R_0$. Sustituya estas expresiones en la ecuación anterior y divida entre R_0 :

$$\frac{R}{R_0} = e^{-\lambda t}$$

donde R es la actividad presente y R_0 era la actividad cuando el objeto en cuestión era parte de un organismo viviente. Es posible resolver para el tiempo al tomar el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación precedente:

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \ln(e^{-\lambda t}) = -\lambda t$$

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda}$$

[29.19]**EJEMPLO 29.5** ¿Debes reportar este esqueleto a homicidios?

OBJETIVO Aplicar la técnica de datación con carbono-14.

PROBLEMA Una muestra de 50.0 g de carbono tomada del hueso pélvico de un esqueleto tiene una razón de decaimiento de carbono-14 de 200.0 decaimientos/min. Se sabe que el carbono de un organismo viviente tiene una razón de decaimiento de 15.0 decaimientos/min · g y que ^{14}C tiene una vida media de 5730 años = 3.01×10^9 min. Encuentre la edad del esqueleto.

ESTRATEGIA Calcule la actividad original y la constante de decaimiento y luego sustituya estos números y la actividad actual en la ecuación 29.19.

SOLUCIÓN

Calcule la actividad original R_0 a partir de la razón de decaimiento y la masa de la muestra:

$$R_0 = \left(15.0 \frac{\text{decaimientos}}{\text{min} \cdot \text{g}}\right)(50.0 \text{ g}) = 7.50 \times 10^2 \frac{\text{decaimientos}}{\text{min}}$$

Encuentre la constante de decaimiento a partir de la ecuación 29.5:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{3.01 \times 10^9 \text{ min}} = 2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}$$

R está dada, de modo que ahora se sustituyen todos los valores en la ecuación 29.19 para encontrar la edad del esqueleto:

$$\begin{aligned} t &= -\frac{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}{\lambda} = -\frac{\ln\left(\frac{200.0 \text{ decaimientos/min}}{7.50 \times 10^2 \text{ decaimientos/min}}\right)}{2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}} \\ &= \frac{1.32}{2.30 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}} \\ &= 5.74 \times 10^9 \text{ min} = 1.09 \times 10^4 \text{ años} \end{aligned}$$

COMENTARIOS Para periodos mucho más largos, se deben usar otras sustancias radiactivas con vidas medias más largas para realizar estimaciones.

PREGUNTA 29.5 ¿Los resultados de la datación con carbono dependen de la masa de la muestra original?

EJERCICIO 29.5 Una muestra de carbono de 7.60 g de masa tomada de una mandíbula animal tiene una actividad de 4.00 decaimientos/min. ¿Cuán antigua es la mandíbula?

RESPUESTA 2.77×10^4 años

Tabla 29.2 Las cuatro series radiactivas

Series	Isótopo de partida	Vida media (años)	Producto estable final
Uranio	${}_{92}^{238}\text{U}$	4.47×10^9	${}_{82}^{206}\text{Pb}$
Actinio	${}_{92}^{235}\text{U}$	7.04×10^8	${}_{82}^{207}\text{Pb}$
Torio	${}_{90}^{232}\text{Th}$	1.41×10^{10}	${}_{82}^{208}\text{Pb}$
Neptunio	${}_{93}^{237}\text{Np}$	2.14×10^6	${}_{82}^{209}\text{Pb}$

29.5 Radiactividad natural

Los núcleos radiactivos por lo general se clasifican en dos grupos: 1) núcleos inestables que se encuentran en la naturaleza, que dan lugar a lo que se llama **radiactividad natural** y 2) núcleos producidos en el laboratorio a través de reacciones nucleares, que muestran **radiactividad artificial**.

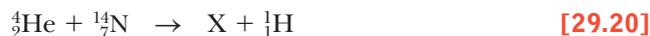
Existen tres series de núcleos que ocurren en la naturaleza (tabla 29.2). Cada una comienza con un isótopo radiactivo específico de larga duración, con vida media que supera la de cualquiera de sus descendientes. La cuarta serie en la tabla 29.2 comienza con ${}^{237}\text{Np}$, un elemento transuránico (un elemento que tiene un número atómico mayor que el del uranio) que no se encuentra en la naturaleza. Este elemento tiene una vida media de “solamente” 2.14×10^6 años.

Las dos series del uranio son un poco más complejas que la serie de ${}^{232}\text{Th}$ (figura 29.10). Además, existen muchos otros isótopos radiactivos que ocurren de manera natural, como ${}^{14}\text{C}$ y ${}^{40}\text{K}$, que no son parte de alguna serie de decaimiento.

La radiactividad natural constantemente suministra elementos radiactivos al ambiente, que de otra forma habrían desaparecido hace mucho tiempo. Por ejemplo, puesto que el sistema solar tiene aproximadamente 5×10^9 años de antigüedad, el suministro de ${}^{226}\text{Ra}$ (con una vida media de sólo 1 600 años) se habría agotado hace mucho mediante decaimiento radiactivo de no ser por las series de decaimiento que comienzan con ${}^{238}\text{U}$, con una vida media de 4.47×10^9 años.

29.6 Reacciones nucleares

Es posible cambiar la estructura de los núcleos al bombardearlos con partículas energéticas. Tales cambios se llaman **reacciones nucleares**. Rutherford fue el primero en observar reacciones nucleares, usando fuentes radiactivas de la naturaleza para el bombardeo de partículas. Descubrió que se liberaban protones cuando se permitía que partículas alfa chocaran con átomos de nitrógeno. El proceso se puede representar simbólicamente como



Esta ecuación dice que una partícula alfa (${}^4_2\text{He}$) golpea un núcleo de nitrógeno y produce un núcleo producto desconocido (X) y un protón (${}^1_1\text{H}$). Balancear los números atómicos y los números de masa, como se hizo para decaimiento radiactivo, permite concluir que el desconocido se caracteriza como ${}^{17}_8\text{X}$. Puesto que el elemento con número atómico 8 es oxígeno, se ve que la reacción es



Esta reacción nuclear comienza con dos isótopos estables, helio y nitrógeno y produce dos diferentes isótopos estables, hidrógeno y oxígeno.

Desde la época de Rutherford se han observado miles de reacciones nucleares, en particular después del desarrollo de los aceleradores de partículas cargadas en 1930. Con el avance tecnológico actual en aceleradores y detectores de partículas, es posible lograr energías de partícula de al menos $1\,000\text{ GeV} = 1\text{ TeV}$. Estas partículas de alta energía se usan para crear nuevas partículas cuyas propiedades ayudan a resolver los misterios del núcleo (y, de hecho, del Universo en sí).

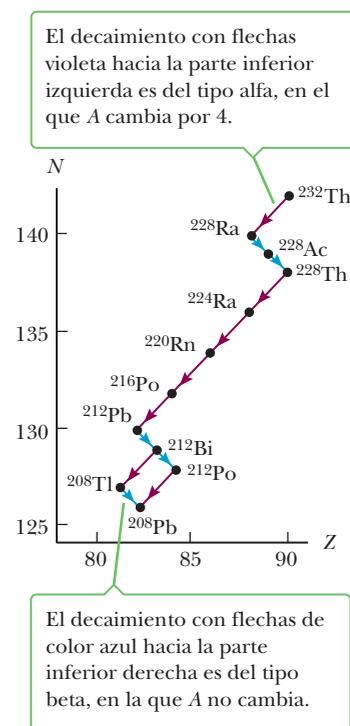
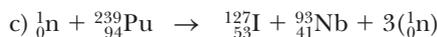
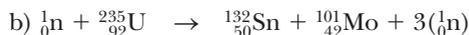
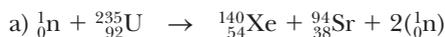
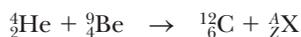
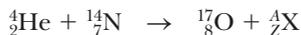


Figura 29.10 Serie de decaimiento que comienza con ${}^{232}\text{Th}$.

Examen rápido**29.4** ¿Cuáles de las siguientes reacciones son posibles?**EJEMPLO 29.6** El descubrimiento del neutrón**OBJETIVO** Balancear una reacción nuclear para determinar un producto de decaimiento desconocido.**PROBLEMA** Una reacción nuclear de particular importancia ocurrió en 1932, cuando Robert Chadwick, en Inglaterra, bombardeó un blanco de berilio con partículas alfa. El análisis del experimento indicó la ocurrencia de la siguiente reacción:¿Cuál es ${}_Z^AX$ en esta reacción?**ESTRATEGIA** Balancear los números de masa y los números atómicos produce la respuesta.**SOLUCIÓN**Escriba una ecuación que relacione las masas atómicas en cualquier lado: $4 + 9 = 12 + A \rightarrow A = 1$ Escriba una ecuación que relacione los números atómicos: $2 + 4 = 6 + Z \rightarrow Z = 0$ Identifique la partícula: ${}_Z^AX = {}_0^1\text{n}$ (un neutrón)**COMENTARIOS** Éste fue el primer experimento que arrojó pruebas positivas de la existencia de los neutrones.**PREGUNTA 29.6** ¿Dónde, en la naturaleza, se encuentra comúnmente la reacción entre helio y berilio?**EJERCICIO 29.6** Identifique la partícula desconocida en la reacción**RESPUESTA** ${}_Z^AX = {}_1^1\text{H}$ (un átomo de hidrógeno neutro)**Valores Q**

Acaba usted de examinar algunas reacciones nucleares para las cuales se deben balancear los números de masa y los números atómicos en las ecuaciones. Ahora considerará la energía involucrada en estas reacciones, porque la energía es otra cantidad importante que se debe conservar.

Este procedimiento se ilustra al analizar la reacción nuclear



La masa total en el lado izquierdo de la ecuación es la suma de la masa de ${}_1^2\text{H}$ (2.014 102 u) y la masa de ${}_7^{14}\text{N}$ (14.003 074 u), que es igual a 16.017 176 u. De igual modo, la masa en el lado derecho de la ecuación es la suma de la masa de ${}_6^{12}\text{C}$ (12.000 000 u) más la masa de ${}_2^4\text{He}$ (4.002 602 u), para un total de 16.002 602 u. Por ende, la masa total antes de la reacción es mayor que la masa total después de la reacción. La diferencia de masa en la reacción es igual a $16.017 176 \text{ u} - 16.002 602 \text{ u} = 0.014 574 \text{ u}$. Esta “pérdida” de masa se convierte en energía cinética de los núcleos presentes después de la reacción. En unidades de energía, 0.014 574 u es equivalente a 13.576 MeV de energía cinética transportada por los núcleos de carbono y helio.

La energía requerida para balancear la ecuación se llama valor Q de la reacción. En la ecuación 29.22, el valor Q es 13.576 MeV. Las reacciones nucleares en las que hay liberación de energía (esto es, valores Q positivos) se llaman **reacciones exotérmicas**.

Sin embargo, el balance de energía no está completo, porque también se debe considerar la energía cinética de la partícula incidente antes de la colisión. Como ejemplo, suponga que el deuterón en la ecuación 29.22 tiene una energía cinética de 5 MeV. Al sumar este valor al valor Q se encuentra que los núcleos de carbono y helio tienen una energía cinética total de 18.576 MeV después de la reacción.

Ahora considere la reacción



Antes de la reacción, la masa total es la suma de las masas de la partícula alfa y el núcleo de nitrógeno: $4.002\,602\text{ u} + 14.003\,074\text{ u} = 18.005\,676\text{ u}$. Después de la reacción, la masa total es la suma de las masas del núcleo de oxígeno y el protón: $16.999\,133\text{ u} + 1.007\,825\text{ u} = 18.006\,958\text{ u}$. En este caso, la masa total después de la reacción es *mayor* que la masa total antes de la reacción. El déficit de masa es $0.001\,282\text{ u}$, equivalente a un déficit de energía de 1.194 MeV . Este déficit se expresa mediante el valor Q negativo de la reacción, -1.194 MeV . Las reacciones con valores Q negativo se llaman **reacciones endotérmicas**. Tales reacciones no tendrán lugar a menos que la partícula entrante tenga al menos suficiente energía cinética para superar el déficit de energía.

Al principio puede parecer que la reacción en la ecuación 29.23 puede tener lugar si la partícula alfa entrante tiene una energía cinética de 1.194 MeV . Sin embargo, en la práctica, la partícula alfa debe tener más energía que esto. Si tiene una energía de sólo 1.194 MeV , la energía se conserva; no obstante, un análisis cuidadoso muestra que la cantidad de movimiento no se conserva, lo que se puede entender al reconocer que la partícula alfa entrante tiene cierta cantidad de movimiento antes de la reacción. Sin embargo, si su energía cinética sólo es de 1.194 MeV , los productos (oxígeno y un protón) se crearían con energía cinética cero y por ende cantidad de movimiento cero. Se puede demostrar que, para conservar tanto la energía como la cantidad de movimiento, la partícula entrante debe tener una energía cinética mínima dada por

$$EC_{\min} = \left(1 + \frac{m}{M}\right)|Q| \quad [29.24]$$

donde m es la masa de la partícula incidente, M es la masa del blanco y se usa el valor absoluto del valor Q . Para la reacción dada por la ecuación 29.23, se encuentra que

$$EC_{\min} = \left(1 + \frac{4.002\,602}{14.003\,074}\right)|-1.194\text{ MeV}| = 1.535\text{ MeV}$$

Este valor mínimo de la energía cinética de la partícula entrante se llama **energía umbral**. La reacción nuclear que se muestra en la figura 29.23 no ocurrirá si la partícula alfa entrante tiene una energía cinética menor que 1.535 MeV , pero puede ocurrir si su energía cinética es igual a o mayor que 1.535 MeV .

■ Examen rápido

29.5 Si el valor Q de una reacción endotérmica es -2.17 MeV , la mínima energía cinética necesaria en los núcleos reactantes para que ocurra la reacción debe ser a) igual a 2.17 MeV , b) mayor que 2.17 MeV , c) menor que 2.17 MeV o d) exactamente la mitad de 2.17 MeV .

29.7 Aplicaciones médicas de la radiación **BIO**

Daño por radiación en la materia

La radiación absorbida por la materia puede causar daño severo. El grado y tipo de daño depende de varios factores, incluidos el tipo y la energía de la radiación y las propiedades del material absorbente. El daño por radiación en los organismos biológicos se debe prin-

cialmente a los efectos de ionización en las células. La función normal de una célula se puede perturbar cuando se forman iones o radicales enormemente reactivos como resultado de la radiación ionizante. Por ejemplo, los radicales hidrógeno e hidroxilo producidos de las moléculas de agua pueden inducir reacciones químicas que pueden romper enlaces en las proteínas y otras moléculas vitales. Las grandes dosis agudas de radiación son especialmente peligrosas porque el daño a un gran número de moléculas en una célula puede hacer que la célula muera. Además, las células que sobreviven a la radiación pueden volverse defectuosas, lo que puede conducir a cáncer.

En los sistemas biológicos es común separar el daño por radiación en dos categorías: el daño somático y el daño genético. El **daño somático** es el daño por radiación a cualquier célula, excepto las células reproductivas. Tal daño puede conducir a cáncer a altos niveles de radiación o alterar seriamente las características de organismos específicos. El **daño genético** afecta sólo a las células reproductivas. El daño a los genes en las células reproductivas puede conducir a descendencia defectuosa. Claramente, uno debe preocuparse por el efecto de los tratamientos diagnósticos, como los rayos X y otras formas de exposición a la radiación.

Para cuantificar la exposición y dosis de radiación se usan varias unidades. El **roentgen (R)** se define como **la cantidad de radiación ionizante que producirá 2.08×10^9 pares de iones en 1 cm^3 de aire bajo condiciones estándar**. De manera equivalente, el roentgen es **la cantidad de radiación que deposita $8.76 \times 10^{-3} \text{ J}$ de energía en 1 kg de aire**.

Para la mayoría de las aplicaciones, el roentgen se sustituye por el **rad** (acrónimo en inglés para *dosis de radiación absorbida*), que se define del modo siguiente: **un rad es la cantidad de radiación que deposita 10^{-2} J de energía en 1 kg de material absorbente**.

Aunque el rad es una unidad física perfectamente buena, no es la mejor unidad para medir el grado de daño biológico producido por la radiación, porque el grado de daño no sólo depende de la dosis, sino también del *tipo* de radiación. Por ejemplo, una dosis dada de partículas alfa causa aproximadamente 10 veces más daño biológico que una dosis igual de rayos X. El factor **EBR** (acrónimo en inglés de *eficacia biológica relativa*) se define como **el número de rads de radiación X o radiación gamma que produce el mismo daño biológico que 1 rad de la radiación que se usa**. En la tabla 29.3 se proporcionan los factores EBR para diferentes tipos de radiación. Observe que los valores sólo son aproximados porque varían con la energía de la partícula y la forma de daño.

Finalmente, el **rem** (acrónimo en inglés de *roentgen equivalente en masculino*) se define como el producto de la dosis en rads y el factor EBR:

$$\text{Dosis en rem} = \text{dosis en rads} \times \text{EBR}$$

De acuerdo con esta definición, 1 rem de cualesquiera dos tipos de radiación producirá la misma cantidad de daño biológico. A partir de la tabla 29.3, vemos que una dosis de 1 rad de neutrones rápidos representa una dosis efectiva de 10 rem y que 1 rad de radiación X es equivalente a una dosis de 1 rem.

BIO APLICACIÓN
Límites de la exposición ocupacional a la radiación

La radiación de bajo nivel de las fuentes naturales, como los rayos cósmicos y las rocas y suelos radiactivos, aportan una dosis de más o menos 0.13 rem/año por persona. El límite superior de la dosis de radiación recomendado por el gobierno estadounidense (además de la radiación de fondo y la exposición relacionada a procedimientos médicos) es 0.5 rem/año. Muchas ocupaciones involucran niveles superiores de exposición a la radiación y para los individuos en estas ocupaciones, se estableció un límite superior

Tabla 29.3 Factores EBR para varios tipos de radiación

Radiación	Factor EBR
Rayos X y rayos gamma	1.0
Partículas beta	1.0-1.7
Partículas alfa	10-20
Neutrones lentos	4-5
Neutrones rápidos y protones	10
Iones pesados	20

de 5 rem/año para exposición de todo el cuerpo. Límites superiores más altos son permisibles para ciertas partes del cuerpo, como las manos y antebrazos. Una dosis aguda en todo el cuerpo de 400 a 500 rem resulta en una tasa de mortalidad de aproximadamente 50%. La forma más peligrosa de exposición es la ingestión o inhalación de isótopos radiactivos, en especial aquellos elementos que el cuerpo retiene y concentra, como ^{90}Sr . En algunos casos, una dosis de 1000 rem pueden resultar de ingerir 1 mCi de material radiactivo.

Durante muchos años se han esterilizado objetos al exponerlos a la radiación, pero en años recientes los métodos empleados son más seguros en su utilización y más económicos. La mayoría de las bacterias, gusanos e insectos se destruyen fácilmente al exponerlos a radiación gamma de cobalto radiactivo. En tales procesos no hay ingesta de núcleos radiactivos por parte de un organismo, como la hay al usar trazadores radiactivos. El proceso es enormemente efectivo para destruir gusanos *Trichinella* en cerdos, bacterias salmonella en pollos, huevos de insecto en trigo y bacterias superficiales en frutas y vegetales que pueden conducir a rápida descomposición. Recientemente, el procedimiento se expandió para incluir la esterilización de equipo médico mientras está en su cubierta protectora. Los guantes quirúrgicos, esponjas, suturas, etcétera, se irradian mientras están empaquetados. Además, hueso, cartílago y piel que se utilizan para injertos con frecuencia se irradian para reducir la posibilidad de infección.

BIO APLICACIÓN

Irradiación para alimentos y equipo médico

Trazadores

Las partículas radiactivas se pueden usar para trazar químicos que participan en varias reacciones. Uno de los usos más valiosos de los trazadores radiactivos está en la medicina. Por ejemplo, ^{131}I es un isótopo de yodo producido artificialmente. (El isótopo natural no radiactivo es ^{127}I .) El yodo, un nutriente necesario para el cuerpo, se obtiene principalmente a través de la ingesta de alimentos marinos y sal yodada. La glándula tiroides tiene un importante papel en la distribución del yodo a todo el cuerpo. Para evaluar el desempeño de la tiroides, el paciente bebe una pequeña cantidad de yoduro de sodio radiactivo. Dos horas después, la cantidad de yodo en la glándula tiroides se determina al medir la intensidad de la radiación en el área del cuello.

Una aplicación médica del uso de los trazadores radiactivos en situaciones de emergencia es la de localizar una hemorragia dentro del cuerpo. Con frecuencia la ubicación del sitio no se puede determinar con facilidad, pero el cromo radiactivo puede identificar la ubicación con un alto grado de precisión. Los eritrocitos capturan el cromo y lo llevan uniformemente a todo el cuerpo. Sin embargo, la sangre se acumulará en un sitio de hemorragia y la radiactividad de dicha región aumentará considerablemente.

Las técnicas de trazado son tan amplias como puede vislumbrar el ingenio humano. Las aplicaciones actuales varían desde comprobar la absorción de flúor en los dientes, hasta comprobar la contaminación de equipo de procesamiento de alimentos con limpiadores, e incluso monitorear el deterioro dentro del motor de un automóvil. En el último caso, se usa un material radiactivo en la fabricación de los pistones y se comprueba la radiactividad del aceite para determinar la cantidad de uso en los pistones.

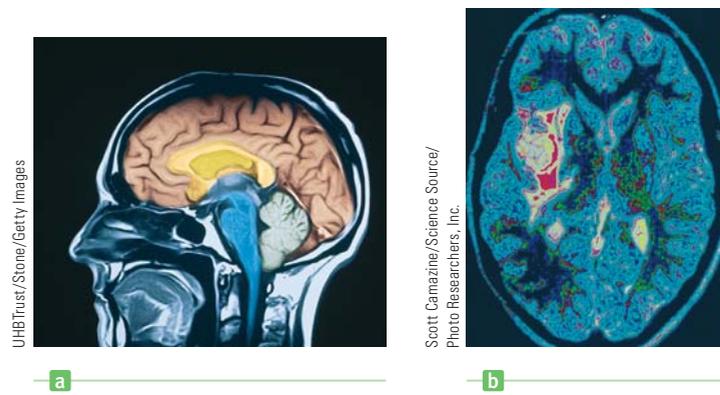
BIO APLICACIÓN

Trazadores radiactivos en medicina

Imágenes por resonancia magnética (IRM)

El punto central de la formación de imágenes por resonancia magnética (IRM) es que, cuando un núcleo que tiene un momento magnético se coloca en un campo magnético externo, su momento tiene precesión en torno al campo magnético con una frecuencia que es proporcional al campo. Por ejemplo, un protón, con un espín de $\frac{1}{2}$, puede ocupar uno de dos estados de energía cuando se coloca en un campo magnético externo. El estado de menor energía corresponde al caso donde el espín se alinea con el campo, mientras que el estado de mayor energía corresponde al caso donde el espín se opone al campo. Las transiciones entre estos dos estados se pueden observar con una técnica conocida como **resonancia magnética nuclear**. Para alinear los momentos magnéticos, se aplica un campo magnético CD y un segundo campo magnético oscilatorio débil se aplica perpendicular al campo CD. Cuando la frecuencia del campo oscilatorio se ajusta para coincidir con la frecuencia de precesión de los momentos magnéticos, los núcleos se “voltarán” entre los

Figura 29.11 Imágenes de IRM mejoradas en computadora de a) un cerebro humano normal y b) un cerebro humano con un glioma.



BIO APLICACIÓN

Formación de imágenes por resonancia magnética (IRM)

dos estados de espín. Estas transiciones resultan en una absorción neta de energía por el sistema de espín, lo cual se puede detectar electrónicamente.

En la IRM, la reconstrucción de las imágenes se obtiene con el uso de campos magnéticos que varían espacialmente y un procedimiento para codificar cada punto en la muestra a observar. En la figura 29.11 se muestran dos imágenes IRM tomadas en un cuerpo humano. En la práctica, se usa una técnica de secuenciación de pulso controlada por computadora para producir señales que se capturan mediante un dispositivo de procesamiento adecuado. Luego las señales se someten a manipulaciones matemáticas apropiadas para proporcionar datos para la imagen final. La ventaja principal de la IRM sobre otras técnicas de formación de imágenes en un diagnóstico médico es que causan mínimo daño a las estructuras celulares. Los fotones asociados con las señales de radiofrecuencia que se usan en IRM tienen energías de sólo aproximadamente 10^{-7} eV. Dado que la intensidad de los enlaces moleculares es mucho mayor (en el orden de 1 eV), los fotones de rf causan poco daño celular. En comparación, los rayos X o los rayos γ tienen energías que varían de 10^4 a 10^6 eV y pueden provocar considerable daño celular.

RESUMEN

29.1 Algunas propiedades del núcleo

29.2 Energía de enlace

Los núcleos se representan simbólicamente como A_ZX , donde X representa el símbolo químico para el elemento. La cantidad A es el **número de masa**, que es igual al número total de nucleones (neutrones más protones) en el núcleo. La cantidad Z es el **número atómico**, que es igual al número de protones en el núcleo. Los núcleos que contienen el mismo número de protones pero diferentes números de neutrones se llaman **isótopos**. En otras palabras, los isótopos tienen los mismos valores Z pero diferentes valores A.

La mayoría de los núcleos son aproximadamente esféricos, con un radio promedio dado por

$$r = r_0 A^{1/3} \quad [29.1]$$

donde r_0 es una constante igual a 1.2×10^{-15} m y A es el número de masa.

La masa total de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones individuales. Esta diferencia de masa Δm , multiplicada por c^2 , proporciona la **energía de enlace** del núcleo.

29.3 Radiactividad

La emisión espontánea de radiación por ciertos núcleos se llama **radiactividad**. Existen tres procesos mediante los cuales

una sustancia puede decaer: decaimiento alfa (α), en el cual las partículas emitidas son núcleos ${}^4_2\text{He}$; decaimiento beta (β), en el cual las partículas emitidas son electrones o positrones; y decaimiento gamma (γ), en el cual las partículas emitidas son fotones de alta energía.

La **razón de decaimiento** o **actividad**, R , de una muestra está dada por

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N \quad [29.3]$$

donde N es el número del núcleo radiactivo en cierto instante y λ es una constante para una sustancia dada llamada **constante de decaimiento**.

El núcleo en una sustancia radiactiva decae en tal forma que el número de núcleo presente varía con el tiempo de acuerdo con la expresión

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [29.4a]$$

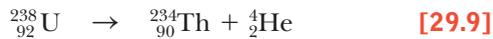
donde N es el número del núcleo radiactivo presente en el tiempo t, N_0 es el número en el tiempo $t = 0$ y $e = 2.718 \dots$ es la base de los logaritmos naturales.

La **vida media** $T_{1/2}$ de una sustancia radiactiva es el tiempo requerido para que decaiga la mitad de un número dado de núcleos radiactivos. La vida media se relaciona con la constante de decaimiento mediante

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad [29.5]$$

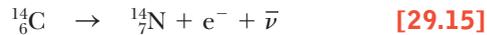
29.4 Los procesos de decaimiento

Si un núcleo decae mediante emisión alfa, pierde dos protones y dos neutrones. Un decaimiento alfa típico es



Observe que, en este decaimiento, como en todos los procesos de decaimiento radiactivo, la suma de los valores Z a la izquierda es igual a la suma de los valores Z a la derecha; lo mismo es cierto para los valores A .

Un decaimiento beta típico es



Cuando un núcleo experimenta decaimiento beta, se emite un **antineutrino** junto con un electrón o un **neutrino** junto con un positrón. Un neutrino tiene carga eléctrica cero y una masa pequeña (que puede ser cero) e interactúa débilmente con la materia.

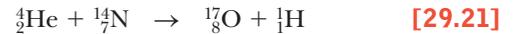
Con frecuencia, el núcleo se encuentra en un estado excitado después de decaimiento radiactivo y libera su energía adicional al emitir un fotón de alta energía llamado **rayo gamma** (γ). Una emisión típica de rayo gamma es



donde el asterisco indica que el núcleo de carbono estaba en un estado excitado antes de la emisión gamma.

29.6 Reacciones nucleares

Las **reacciones nucleares** pueden ocurrir cuando una partícula bombardeada golpea a otro núcleo. Una reacción nuclear típica es



En esta reacción, una partícula alfa golpea un núcleo de nitrógeno, lo que produce un núcleo de oxígeno y un protón. Como en decaimiento radiactivo, los números atómicos y los números de masa se balancean en los dos lados de la flecha.

Las reacciones nucleares en las cuales se libera energía se dice que son **reacciones exotérmicas** y se caracterizan por valores Q positivos. Las reacciones con valores Q negativos, llamadas **reacciones endotérmicas**, no pueden ocurrir a menos que la partícula entrante tenga al menos suficiente energía cinética para superar el déficit de energía. Para conservar tanto la energía como la cantidad de movimiento, la partícula entrante debe tener una energía cinética mínima, llamada **energía umbral**, dada por

$$EC_{\min} = \left(1 + \frac{m}{M}\right)|Q| \quad [29.24]$$

donde m es la masa de la partícula incidente y M es la masa del átomo objetivo.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Estime la razón del volumen de un núcleo de neón, a la de un núcleo de helio. a) 1 b) 2 c) 4 d) 5 e) 7
- Convierta la masa atómica de un átomo de oxígeno a unidades de MeV/c^2 . a) $1.88 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$ b) $2.47 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$ c) $7.37 \times 10^3 \text{ MeV}/c^2$ d) $9.21 \times 10^5 \text{ MeV}/c^2$ e) $1.49 \times 10^4 \text{ MeV}/c^2$
- La masa atómica del oxígeno es 15.999 u. Convierta esta masa a kilogramos. a) $1.28 \times 10^{-26} \text{ kg}$ b) $3.37 \times 10^{-26} \text{ kg}$ c) $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ d) $4.72 \times 10^{-26} \text{ kg}$ e) $2.66 \times 10^{-26} \text{ kg}$
- Clasifique cloro, níquel y oro por energía de enlace por nucleón, de menor a mayor. a) oro, cloro, níquel b) cloro, oro, níquel c) níquel, oro, cloro d) oro, níquel, cloro e) cloro, níquel, oro
- ¿Un átomo neutro designado como ${}_{18}^{40}\text{X}$ contiene a) 20 neutrones y 20 protones, b) 22 protones y 18 neutrones, c) 18 protones y 22 neutrones, d) 18 protones y 40 neutrones o e) 40 protones y 18 neutrones?
- La vida media del radio-224 es aproximadamente 3.6 días. ¿Qué fracción aproximada de una muestra permanece sin decaer después de dos semanas? a) $\frac{1}{2}$ b) $\frac{1}{4}$ c) $\frac{1}{8}$ d) $\frac{1}{16}$ e) $\frac{1}{32}$
- La sustancia A tiene una constante de decaimiento λ que es tres veces la de B. Encuentre la razón de la vida media de la sustancia A, a la vida media de la sustancia B. a) $\frac{1}{3}$ b) 1 c) 3 d) 2 e) $\frac{1}{2}$
- Cuando el núcleo ${}_{36}^{95}\text{Kr}$ experimenta decaimiento beta, ¿el núcleo hijo (Rb) contiene a) 58 neutrones y 37 protones, b) 58 protones y 37 neutrones, c) 54 neutrones y 41 protones, d) 59 neutrones y 36 protones o e) 55 neutrones y 40 protones?
- Cuando ${}_{15}^{32}\text{P}$ decae a ${}_{16}^{32}\text{S}$, ¿cuál de las siguientes partículas se emite? a) un protón b) una partícula alfa c) un electrón d) un rayo gamma e) un antineutrino
- En el decaimiento ${}_{90}^{234}\text{Th} \rightarrow {}_Z\text{Ra} + {}_2^4\text{He}$, identifique el número de masa y el número atómico del núcleo Ra. a) $A = 230$, $Z = 92$ b) $A = 238$, $Z = 88$ c) $A = 230$, $Z = 88$ d) $A = 234$, $Z = 88$ e) $A = 238$, $Z = 86$
- ¿Cuál de los siguientes enunciados es cierto al considerar un isótopo radiactivo ${}_Z^AX$ que decae por emisión de rayo gamma? a) El isótopo resultante tiene un valor Z diferente. b) El isótopo resultante tiene el mismo valor A y el mismo valor Z . c) El isótopo resultante tiene un valor A diferente. d) Tanto A como Z son diferentes. e) El átomo salta a un estado de mayor energía.
- ¿Cuál es el valor Q para la reacción ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$? a) 8.4 MeV b) 7.3 MeV c) 6.2 MeV d) 5.7 MeV e) 4.2 MeV

PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Un estudiante afirma que una forma pesada de hidrógeno decae mediante emisión alfa. ¿Cómo responde usted?
- Si un núcleo pesado que inicialmente está en reposo experimenta decaimiento alfa, ¿cuál tiene más energía cinética después del decaimiento, la partícula alfa o el núcleo hijo?
- ¿Por qué los isótopos de un elemento dado tienen diferentes propiedades físicas, como la masa, pero las mismas propiedades químicas?
- ¿Por qué casi todos los isótopos naturales están por encima de la línea $N = Z$ en la figura 29.3?
- Considere dos núcleos pesados X e Y con un número parecido de masa. Si X tiene la mayor energía de unión, ¿cuál núcleo tiende a ser más inestable? Explique su respuesta.
- Explique las principales diferencias entre alfa, beta y rayos gamma.
- En el decaimiento beta, la energía del electrón o positrón emitido del núcleo se encuentra en algún lugar en un rango relativamente grande de posibilidades. Sin embargo, en el decaimiento alfa, la energía de la partícula alfa sólo puede tener valores discretos. ¿Por qué existe esta diferencia?
- ¿Qué fracción de una muestra radiactiva se ha deteriorado después de que han pasado dos vidas medias?
- Escoja cualquier proceso de decaimiento beta y demuestre que el neutrino debe tener carga cero.
- Si la película se mantiene en una caja, las partículas alfa de una fuente radiactiva afuera de la caja no pueden velar la película, pero las partículas alfa sí pueden. Explique.
- En el decaimiento de un positrón, un protón en el núcleo se convierte en un neutrón y la carga positiva se la lleva el positrón. No obstante, un neutrón tiene una mayor energía en reposo que un protón. ¿Cómo es esto posible?
- Una partícula alfa tiene el doble de carga que una partícula beta. ¿Por qué la primera se desvía menos que la última cuando pasan entre placas con carga eléctrica, suponiendo que ambas tienen la misma velocidad?
- ¿La datación con carbono-14 se puede usar para medir la edad de una piedra? Explique

PROBLEMAS

ENHANCED WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch It.

- denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio, 3. denota problema de alto reto
- denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

- denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign
- BIO denota problemas biomédicos
- PG denota problemas guiados
- M denota tutorial Master It disponible en Enhanced WebAssign
- CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual
- S denota problema de razonamiento simbólico

Una lista de las masas atómicas se da en el apéndice B.

29.1 Algunas propiedades del núcleo

- Determine los radios nucleares de los siguientes núclidos: a) ${}^2_1\text{H}$ b) ${}^{60}_{27}\text{Co}$ c) ${}^{197}_{79}\text{Au}$ d) ${}^{239}_{94}\text{Pu}$.
- Determine el radio de un núcleo de a) ${}^4_2\text{He}$ y b) ${}^{238}_{92}\text{U}$.
- Con $2.3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ como la densidad de la materia nuclear, encuentre el radio de una esfera de tal materia que tendría una masa igual a la de la Tierra. La Tierra tiene una masa igual a $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ y radio promedio de $6.37 \times 10^6 \text{ m}$.
- Considere el núcleo ${}^{65}_{29}\text{Cu}$. Encuentre valores aproximados para su a) radio, b) volumen y c) densidad.
- M** Una partícula alfa ($Z = 2$, masa = $6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$) se aproxima hasta dentro de $1.00 \times 10^{-14} \text{ m}$ de un núcleo de carbono ($Z = 6$). ¿Cuáles son a) la máxima fuerza de Coulomb sobre la partícula alfa, b) la aceleración de la partícula alfa en este tiempo y c) la energía potencial de la partícula alfa en el mismo tiempo?
- CIC** Átomos de carbono individualmente ionizados se aceleran a través de 1000 V y pasan hacia un espectró-

metro de masas para determinar los isótopos presentes. (Véase el capítulo 19.) La intensidad del campo magnético en el espectrómetro es 0.200 T. a) Determine los radios orbitales para los isótopos ${}^{12}\text{C}$ y ${}^{13}\text{C}$ conforme pasan a través del campo. b) Demuestre que la razón de los radios se puede escribir en la forma

$$\frac{r_1}{r_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}}$$

y verifique que sus radios en el inciso a) satisfacen esta fórmula.

- a) Encuentre la velocidad que requiere una partícula alfa para llegar hasta dentro de $3.2 \times 10^{-14} \text{ m}$ de un núcleo de oro. b) Encuentre la energía de la partícula alfa en MeV.
- Al final de su vida, una estrella con una masa de dos veces la masa del Sol se espera que colapse, al combinar sus protones y neutrones para formar una estrella de neutrones. Tal estrella podría considerarse como un núcleo atómico gigante. Si una estrella de $2 \times 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$ de masa colapsa en neutrones ($m_n = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$), ¿cuál sería su radio? Suponga $r = r_0 A^{1/3}$.

29.2 Energía de enlace

9. Calcule la energía de enlace promedio por nucleón de a) ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ y b) ${}^{85}_{37}\text{Rb}$.
10. Calcule la energía de enlace por nucleón para a) ${}^2\text{H}$, b) ${}^4\text{He}$, c) ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ y d) ${}^{238}_{92}\text{U}$.
11. Un par de núcleos para los cuales $Z_1 = N_2$ y $Z_2 = N_1$ se llaman *isobaros espejo*. (Los números atómico y neutrónico son intercambiables.) Las mediciones de energía de enlace en tales pares se pueden usar para obtener evidencia de la independencia de la carga de las fuerzas nucleares. Independencia de la carga significa que las fuerzas protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son aproximadamente iguales. Calcule la diferencia en energía de enlace para los dos núcleos espejo ${}^{15}_8\text{O}$ y ${}^{15}_7\text{N}$.
12. El pico de la curva de estabilidad ocurre en ${}^{56}_{26}\text{Fe}$, motivo por el que el hierro destaca en el espectro del Sol y las estrellas. Demuestre que ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ tiene una energía de enlace superior por nucleón que sus vecinos ${}^{55}_{25}\text{Mn}$ y ${}^{59}_{27}\text{Co}$. Compare sus resultados con la figura 29.4.
13. **CIC** Dos núcleos que tienen el mismo número de masa se conocen como *isobaros*. a) Calcule la diferencia en energía de enlace por nucleón para los isobaros ${}^{23}_{11}\text{Na}$ y ${}^{23}_{12}\text{Mg}$. b) ¿Cómo explica esta diferencia? (La masa de ${}^{23}_{12}\text{Mg} = 22.994\,127$ u.)
14. Calcule la energía de enlace del último neutrón en el núcleo ${}^{43}_{20}\text{Ca}$. *Sugerencia:* Debe comparar la masa de ${}^{43}_{20}\text{Ca}$ con la masa de ${}^{42}_{20}\text{Ca}$, más la masa de un neutrón. La masa de ${}^{42}_{20}\text{Ca} = 41.958\,622$ u, mientras que la masa de ${}^{43}_{20}\text{Ca} = 42.958\,770$ u.

29.3 Radiactividad

15. El gas radón tiene una vida media de 3.83 días. Si 3.00 g de gas radón está presente en el tiempo $t = 0$, ¿qué masa de radón permanecerá después de que han pasado 1.50 días?
16. **BIO** Un medicamento marcado con ${}^{99}_{43}\text{Tc}$ (vida media = 6.05 h) se prepara para un paciente. Si la actividad original de la muestra fue de 1.1×10^4 Bq, ¿cuál es su actividad después de estar en el anaquel durante 2.0 h?
17. **PG** La vida media de ${}^{131}_{53}\text{I}$ es 8.04 días. a) Convierta la vida media a segundos. b) Calcule la constante de decaimiento para este isótopo. c) Convierta $0.500 \mu\text{Ci}$ a la unidad SI de becquerel. d) Encuentre el número de núcleos ${}^{131}_{53}\text{I}$ necesarios para producir una muestra con una actividad de $0.500 \mu\text{Ci}$. e) Suponga que la actividad de cierta muestra de ${}^{131}_{53}\text{I}$ es 6.40 mCi en un momento dado. Encuentre el número de vidas medias por las que pasará la muestra en 40.2 días y la actividad al final de dicho periodo.
18. **CIC** El tritio tiene una vida media de 12.33 años. a) ¿Qué fracción de los núcleos en una muestra de tritio permanecerán después de 5.00 años? b) ¿10.0 años? c) ¿123.3 años? d) De acuerdo con la ecuación 29.4a, se requiere una cantidad infinita de tiempo para que toda la muestra decaiga. ¿Esto es real? Analice.
19. Después de 2.00 días, la actividad de una muestra de un tipo de material radiactivo desconocido ha disminuido

a 84.2% de la actividad inicial. ¿Cuál es la vida media de este material?

20. **BIO** Después de que una planta o animal muere, su contenido de ${}^{14}\text{C}$ disminuye con una vida media de 5730 años. Si un arqueólogo descubre una antigua fogata que contiene madera parcialmente consumida y el contenido de ${}^{14}\text{C}$ de la madera es de sólo 12.5% el de una muestra igual de carbono contenido en un árbol actual, ¿cuál es la edad del sitio antiguo?
21. **M** Una muestra recientemente preparada de cierto isótopo radiactivo tiene una actividad de 10.0 mCi. Después de 4.00 h, la actividad es 8.00 mCi. a) Encuentre la constante de decaimiento y la vida media del isótopo. b) ¿Cuántos átomos del isótopo estaban contenidos en la muestra recientemente preparada? c) ¿Cuál es la actividad de la muestra 30 h después de preparada?
22. Un edificio accidentalmente se contaminó con radiactividad. El material de más larga vida en el edificio es estroncio-90. (La masa atómica de ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ es 89.907 7 u.) Si inicialmente el edificio contenía 5.0 kg de esta sustancia y el nivel seguro es menor que 10.0 conteos/min, ¿cuánto tiempo el edificio será inseguro?

29.4 Los procesos de decaimiento

23. Identifique los núclidos faltantes (?) en los siguientes decaimientos:
 - a) ${}^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ? + {}^4_2\text{He}$
 - b) ${}^{95}_{36}\text{Kr} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$
 - c) $? \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{140}_{58}\text{Ce}$
24. Complete las siguientes fórmulas de decaimiento:
 - a) ${}^{12}_5\text{B} \rightarrow ? + e^- + \bar{\nu}$
 - b) ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{230}_{88}\text{Ra} + ?$
 - c) $? \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$
25. La masa de ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ es 55.934 9 u, y la masa de ${}^{56}_{27}\text{Co}$ es 55.939 9 u. ¿Cuál isótopo decae en el otro y mediante cuál proceso?
26. Encuentre la energía liberada en el decaimiento alfa de ${}^{238}_{92}\text{U}$. El siguiente valor de masa será útil: ${}^{234}_{90}\text{Th}$ tiene una masa de 234.043 583 u.
27. Determine cuál de los siguientes decaimientos sugeridos puede ocurrir espontáneamente:
 - a) ${}^{40}_{20}\text{Ca} \rightarrow e^+ + {}^{40}_{19}\text{K}$
 - b) ${}^{144}_{60}\text{Nd} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{140}_{58}\text{Ce}$
28. ${}^{66}_{28}\text{Ni}$ (masa = 65.929 1 u) experimenta decaimiento beta a ${}^{66}_{29}\text{Cu}$ (masa = 65.928 9 u). a) Escriba la fórmula de decaimiento completa para este proceso. b) Encuentre la máxima energía cinética de los electrones salientes.
29. Un núcleo de ${}^3_1\text{H}$ (tritio) tiene decaimiento beta a ${}^3_2\text{He}$ mediante la creación de un electrón y un antineutrino de acuerdo con la reacción

$${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}$$
 Use el apéndice B para determinar la energía total liberada en esta reacción.
30. En los restos de un antiguo campamento se encuentra un trozo de carbón usado para cocinar. Una muestra de

1.00 kg de carbón de la madera tiene una actividad de 5.00×10^2 decaimientos por minuto. Encuentre la edad del carbón. *Sugerencia:* El material vivo tiene un actividad de 15.0 decaimientos/minuto por gramo de carbono presente.

31. **M** En una antigua tumba se encuentra un artefacto de madera. Su actividad de carbono-14 ($^{14}_6\text{C}$) se mide en 60.0% de la de una muestra fresca de madera de la misma región. Suponiendo que la misma cantidad de $^{14}_6\text{C}$ inicialmente estaba presente en la madera de la cual se fabricó el artefacto, determine la edad del artefacto.

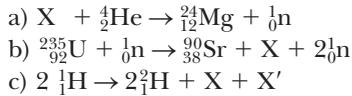
29.6 Reacciones nucleares

32. Un haz de protones de 6.61 MeV incide sobre un blanco de $^{27}_{13}\text{Al}$. Aquellos protones que chocan con el objetivo producen la reacción



($^{27}_{14}\text{Si}$ tiene una masa de 26.986 721 u.) Si desprecia cualquier retroceso del núcleo producto, determine la energía cinética de los neutrones salientes.

33. Identifique las partículas desconocidas X y X' en las siguientes reacciones nucleares:



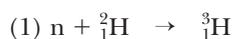
34. **PG** Un método de producción de neutrones para uso experimental es bombardear ${}^7_3\text{Li}$ con protones. Los neutrones se emiten de acuerdo con la reacción



a) Calcule la masa en unidades de masa atómica de las partículas en el lado izquierdo de la ecuación. b) Calcule la masa (en unidades de masa atómica) de las partículas en el lado derecho de la ecuación. c) Reste la respuesta al inciso b) a la del inciso a) y convierta el resultado de megaelectrón-volts y obtenga el valor Q para esta reacción. d) Suponiendo que el litio inicialmente está en reposo, el protón se mueve con velocidad v, y que el berilio y el neutrón resultantes se mueven ambos con velocidad V después de la colisión, escriba una expresión que describa la conservación de la cantidad de movimiento para esta reacción en términos de las masas m_p , m_{Be} , m_n y las velocidades. e) Escriba una expresión que relacione las energías cinéticas de las partículas antes y después junto con Q. f) ¿Qué energía cinética mínima debe tener el protón incidente si debe ocurrir esta reacción?

35. a) Suponga que una partícula alfa golpea a $^{10}_5\text{B}$, lo que libera un protón y un núcleo producto en la reacción. ¿Cuál es el núcleo producto? b) Una partícula alfa y un núcleo producto se producen cuando un protón golpea $^{13}_6\text{C}$. ¿Cuál es el núcleo producto?

36. **C/C** Considere dos reacciones:



a) Calcule los valores Q para estas reacciones. Identifique si cada reacción es exotérmica o endotérmica. b) ¿Cuáles reacciones resultan en más energía liberada? ¿Por qué? c) Suponiendo que la diferencia se debe principalmente al trabajo realizado por la fuerza eléctrica, calcule la distancia entre los dos protones en helio-3.

37. El oro natural tiene solamente un isótopo, $^{197}_{79}\text{Au}$. Si el oro se bombardea con neutrones lentos, se emiten partículas e^- . a) Escriba la ecuación de reacción adecuada. b) Calcule la máxima energía de las partículas beta emitidas. La masa de $^{198}_{80}\text{Hg}$ es 197.966 75 u.

38. Complete las siguientes reacciones nucleares:



39. a) Determine el valor de la reacción ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ? + n$
 b) ¿Cuál es el valor Q de la reacción?

29.7 Aplicaciones médicas de la radiación

40. **BIO** En términos de daño biológico, ¿cuántos rad de iones pesados son equivalentes a 100 rad de rayos X?

41. **BIO M** Una persona cuya masa es de 75.0 kg se expone a una dosis de todo el cuerpo de 25.0 rad. ¿Cuántos joules de energía se depositan en el cuerpo de la persona?

42. **BIO** Con la finalidad de combatir un crecimiento canceroso, a un paciente se le administra una dosis de 200 rad de radiación. Suponiendo que toda la energía depositada la absorbe el crecimiento canceroso, a) Calcule la cantidad de energía entregada por unidad de masa. b) Suponiendo que el crecimiento tiene una masa de 0.25 kg y un calor específico igual al del agua, calcule su aumento de temperatura.

43. Un "astuto" técnico decide calentar algo de agua para su café con una máquina de rayos X. Si la máquina produce 10 rad/s, ¿cuánto tardará en elevar la temperatura de una taza de agua en 50 °C? Ignore las pérdidas de calor durante este tiempo.

44. **BIO** Un técnico de rayos X trabaja 5 días a la semana, 50 semanas por año. Suponga que el técnico toma un promedio de ocho rayos X por día y recibe una dosis de 5.0 rem/año como resultado. a) Estime la dosis en rem por rayo X tomado. b) ¿Cómo se compara este resultado con la cantidad de radiación de fondo de bajo nivel a la que está expuesto el técnico?

45. **BIO** Un paciente ingiere un radiofármaco marcado con fósforo-32 ($^{32}_{15}\text{P}$), un emisor β^- con una vida media de 14.3 días. La energía cinética promedio de los electrones emitidos es 700 keV. Si la actividad inicial de la muestra es 1.31 MBq, determine a) el número de electrones emitidos en un periodo de 10 días, b) la energía total depositada en el cuerpo durante los 10 días y c) la dosis absorbida si los electrones se absorben por completo en 100 g de tejido.

46. **BIO** Una fuente radiactiva particular produce 100 mrad de rayos gamma de 2 MeV por hora a una distancia de 1.0 m. a) ¿Cuánto tiempo se podría parar una persona a esta distancia antes de acumular una dosis intolerable de

1 rem? b) Suponiendo que la radiación gamma se emite de manera uniforme en todas direcciones, ¿a qué distancia una persona recibiría una dosis de 10 mrad/h de esta fuente?

Problemas adicionales

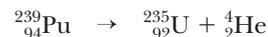
- 47. Una muestra radiactiva contiene 3.50 μg de ^{11}C puro, que tiene una vida media de 20.4 min. a) ¿Cuántos moles de ^{11}C están presentes inicialmente? b) Determine el número de núcleos presentes inicialmente. ¿Cuál es la actividad de la muestra c) inicialmente y d) después de 8.00 h?
- 48. Determine el umbral de energía que el neutrón incidente debe tener para producir la reacción: $^1_0\text{n} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^2_1\text{H} + ^3_1\text{H}$.
- 49. **M** Una casa de suministros médicos compra una muestra de 200.0 mCi de un isótopo radiactivo. Si la muestra tiene una vida media de 14.0 días, ¿cuánto tiempo se mantendrá antes de que su actividad se reduzca a 20.0 mCi?
- 50. El isótopo ^{14}C sufre decaimiento beta de acuerdo con el proceso dado por la ecuación 29.15. Encuentre el valor de Q para este proceso.
- 51. **CIC** En un trozo de roca de la Luna, el contenido de ^{87}Rb se analiza en 1.82×10^{10} átomos por gramo de material y el contenido de ^{87}Sr es de 1.07×10^9 átomos por gramo. (El decaimiento relevante es $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + e^-$. La vida media del decaimiento es 4.8×10^{10} años.) a) Determine la edad de la roca. b) ¿El material en la roca realmente podría ser mucho más antiguo? ¿Qué suposición está implícita en el uso del método de datación radiactivo?
- 52. Un gran número de radioisótopos tienen importantes aplicaciones industriales, médicas y de investigación. Uno de ellos es ^{60}Co , que tiene una vida media de 5.2 años y se desintegra por la emisión de una partícula beta (0.31 MeV de energía) y dos fotones gamma (1.17 MeV y energías MeV 1.33). Un científico quiere preparar una fuente de ^{60}Co sellado que tendrá una actividad de al menos 10 Ci después de 30 meses de uso. ¿Cuál es la masa mínima inicial de ^{60}Co que requiere?

53. BIO Una solución almacenada en un laboratorio médico se prepara con una actividad inicial debida a ^{24}Na de 2.5 mCi/mL, y 10.0 mL de la solución almacenada se diluye en $t_0 = 0$ a una solución operativa cuyo volumen total es 250 mL. Después de 48 h, una muestra de 5.0 mL de la solución operativa se monitoriza con un contador. ¿Cuál es la actividad medida? *Nota:* 1 mL = 1 mililitro.

54. Después de la súbita liberación de radiactividad del accidente del reactor nuclear de Chernobyl en 1986, la radiactividad de la leche en Polonia se elevó a 2 000 Bq/L debido a yodo-131, con una vida media de 8.04 días. El yodo radiactivo es particularmente peligroso porque la glándula tiroides concentra yodo. El accidente de Chernobyl provocó un aumento mensurable en cáncer de tiroides entre niños de Bielorrusia. a) Para comparación, encuentre la actividad de la leche debida a potasio. Suponga que 1 litro de leche contiene 2.00 g de potasio, de los cuales 0.011 7% es el isótopo ^{40}K , que tiene una vida media de 1.28×10^9 años. b) Después de qué intervalo de tiempo la actividad debida a yodo caería por abajo de la debida al potasio?

55. La teoría de la astrofísica nuclear es que todos los elementos pesados como el uranio se forman en el interior de estrellas masivas. Estas estrellas eventualmente explotan, liberando los elementos en el espacio. Si asumimos que en el momento de la explosión no había la misma cantidad de ^{235}U y ^{238}U , ¿hace cuánto tiempo fueron liberados los elementos que forman nuestro planeta, dado que la actual relación $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ es de 0.007? (La vida media de ^{235}U y ^{238}U es 0.70×10^9 años y años 4.47×10^9 , respectivamente.)

56. Un subproducto de algunos reactores de fisión es el isótopo $^{239}_{94}\text{Pu}$, que es un emisor alfa con una vida media de 24 000 años:



Considere una muestra de 1.0 kg de $^{239}_{94}\text{Pu}$ pura en $t = 0$. Calcule a) el número del núcleo de $^{239}_{94}\text{Pu}$ presentes en $t = 0$ y b) la actividad inicial de la muestra. c) ¿Cuánto tiempo tiene que ser almacenada la muestra si un nivel “seguro” de actividad es de 0.10 Bq?

Luz de alta intensidad de 24 láseres se concentró en una pastilla combustible hecha de deuterio y tritio, provocando la explosión de las capas exteriores de la pastilla. Entonces, una poderosa fuerza de reacción derrumba la parte interior de la pastilla, comprimiéndola y calentándola. Las ondas de choque desarrolladas y reunidas en el centro, encienden las reacciones de fusión y liberan energía. Una exitosa prueba reciente en la Instalación Nacional de Ignición (NIF, por sus siglas en inglés) disparó un millón de joules de energía sobre un objetivo en unas pocas millonésimas de segundo.



Roger Ressmeyer/CORBIS

30

Energía nuclear y partículas elementales

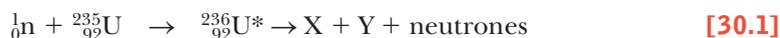
- 30.1 Fisión nuclear
- 30.2 Fusión nuclear
- 30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales
- 30.4 Positrones y otras antipartículas
- 30.5 Clasificación de partículas
- 30.6 Leyes de conservación
- 30.7 El método óctuple
- 30.8 Quarks y color
- 30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar
- 30.10 La conexión cósmica
- 30.11 Preguntas sin respuesta en cosmología
- 30.12 Problemas y perspectivas

En este capítulo final estudiamos los medios por los cuales se puede derivar energía de las reacciones nucleares: fisión, en la que un núcleo con número de masa grande se divide en dos núcleos más pequeños, y la fusión, en la que dos núcleos ligeros se funden para formar un núcleo más pesado. En cualquier caso, existe una liberación de grandes cantidades de energía que se puede usar de manera destructiva a través de bombas o constructivamente mediante la producción de energía eléctrica. El estudio de la física termina al examinar las partículas subatómicas conocidas y las interacciones fundamentales que gobiernan su comportamiento. También estudiamos la teoría actual de las partículas elementales, que afirma que toda la materia en la Naturaleza se construye a partir de sólo dos familias de partículas: quarks y leptones. Finalmente, analizamos cómo tales modelos ayudan a entender la evolución del Universo.

30.1 Fisión nuclear

La **fisión nuclear** ocurre cuando un núcleo pesado, como ^{235}U , se divide o fisiona en dos núcleos más pequeños. En tal reacción, **la masa total de los productos es menor que la masa original del núcleo pesado**.

La fisión de ^{235}U mediante neutrones lentos (baja energía) se puede representar mediante la secuencia de eventos



donde $^{236}\text{U}^*$ es un estado intermedio que dura sólo aproximadamente 10^{-12} s antes de dividirse en los núcleos X y Y, llamados **fragmentos de fisión**. Muchas combinaciones de X y Y satisfacen los requerimientos de conservación de energía y carga. En la fisión del uranio, se pueden formar alrededor de 90 diferentes núcleos hijo. El proceso también resulta en

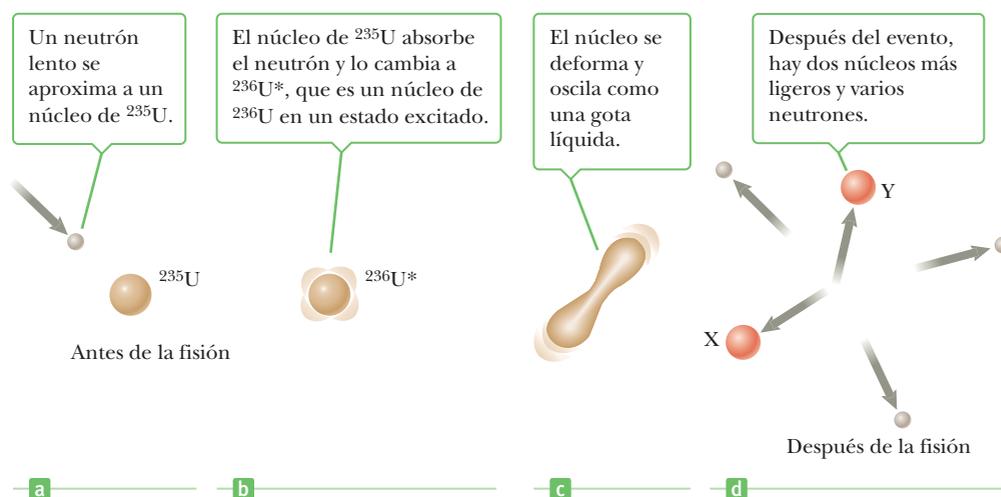
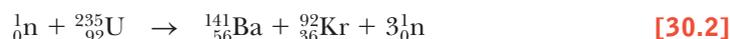


Figura 30.1 Un evento de fisión nuclear como lo describe el modelo de la gota líquida del núcleo.

la producción de muchos neutrones (por lo general dos o tres) por evento de fisión. En promedio, se liberan 2.47 neutrones por evento.

Una reacción típica de este tipo es



Los fragmentos de fisión, bario y criptón, y los neutrones liberados tienen una mayor cantidad de energía cinética después del evento de fisión. Observe que la suma de los números de masa, o número de nucleones, a la izquierda ($1 + 235 = 236$) es la misma que el número total de nucleones a la derecha ($141 + 92 + 3 = 236$). El número total de protones (92) también es el mismo en ambos lados. La energía Q liberada a través de la desintegración en la ecuación 30.2 se puede calcular fácilmente usando los datos del apéndice B. Los detalles de este cálculo se pueden encontrar en el capítulo 26 (ejemplo 26.5), con una respuesta de $Q = 200.422$ MeV.

El rompimiento del núcleo de uranio se puede comparar con lo que ocurre a una gota de agua cuando se le agrega energía en exceso. Todos los átomos en la gota tienen energía, pero no suficiente para romper la gota. Sin embargo, si se agrega suficiente energía para hacer que la gota vibre, experimentará elongación y compresión hasta que la amplitud de la vibración se vuelve suficientemente grande como para hacer que la gota se rompa. En el núcleo de uranio ocurre un proceso similar (figura 30.1). La secuencia de eventos es la siguiente:

1. El núcleo ^{235}U captura un neutrón térmico (movimiento lento).
2. La captura resulta en la formación de $^{236}\text{U}^*$ y la energía en exceso de este núcleo hace que experimente violentas oscilaciones.
3. El núcleo de $^{236}\text{U}^*$ se vuelve enormemente elongado y la fuerza de repulsión entre protones en las dos mitades del núcleo con forma de mancuerna tiende a aumentar la distorsión.
4. El núcleo se divide en dos fragmentos, lo que emite varios neutrones en el proceso.

◀ Secuencia de eventos en un proceso de fisión nuclear.

Por lo general, la cantidad de energía liberada por la fisión de un solo átomo radiactivo pesado es de aproximadamente 100 millones de veces la energía liberada en la combustión de una molécula del octano que se usa en los motores de gasolina.

■ FÍSICA APLICADA 30.1 Productos inestables

Si un núcleo pesado se fisionara sólo en dos núcleos producidos, serían muy inestables. ¿Por qué?

EXPLICACIÓN De acuerdo con la figura 29.3, la razón del número de neutrones al número de protones aumenta con Z . Como resultado, en una reacción de fisión, cuando un núcleo

pesado se divide en dos núcleos más ligeros, los núcleos más ligeros tienden a tener demasiados neutrones. El resultado es la inestabilidad porque los núcleos regresan a la curva en la figura 29.3 mediante los procesos de decaimiento que reducen el número de neutrones ■

EJEMPLO 30.1 | Un mundo impulsado por fisión

OBJETIVO Relacionar material bruto con salida de energía.

PROBLEMA a) Calcule la energía total liberada si 1.00 kg de ^{235}U experimenta fisión y considere que la energía de desintegración por evento es $Q = 208 \text{ MeV}$. b) ¿Cuántos kilogramos de ^{235}U se necesitarían para satisfacer el consumo de energía anual mundial (aproximadamente $4 \times 10^{20} \text{ J}$)?

ESTRATEGIA En el inciso a), use el concepto de mol y el número de Avogadro para obtener el número total de núcleos. Multiplicar por la energía por reacción produce entonces la energía total liberada. El inciso b) requiere algo de álgebra simple.

SOLUCIÓN

a) Calcule la energía total liberada de 1.00 kg de ^{235}U .

Encuentre el número total de núcleos en 1.00 kg de uranio:

$$N = \left(\frac{6.02 \times 10^{23} \text{ núcleos/mol}}{235 \text{ g/mol}} \right) (1.00 \times 10^3 \text{ g})$$

$$= 2.56 \times 10^{24} \text{ núcleos}$$

Multiplique N por la energía producida por núcleos y obtenga la energía de desintegración total:

$$E = NQ = (2.56 \times 10^{24} \text{ núcleos}) \left(208 \frac{\text{MeV}}{\text{núcleo}} \right)$$

$$= 5.32 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

b) ¿Cuántos kilogramos suministrarían las necesidades de energía anual del mundo?

Establezca la energía por kilogramo, E_{kg} , por el número de kilogramos, N_{kg} , igual al consumo de energía anual total. Resuelva para N_{kg} :

$$E_{\text{kg}} N_{\text{kg}} = E_{\text{tot}}$$

$$N_{\text{kg}} = \frac{E_{\text{tot}}}{E_{\text{kg}}} = \frac{4 \times 10^{20} \text{ J}}{(5.32 \times 10^{32} \text{ eV/kg})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}$$

$$= 5 \times 10^6 \text{ kg}$$

COMENTARIOS El cálculo supone implícitamente la conversión perfecta a potencia útil, lo que nunca es el caso en sistemas reales. Se conocen suficientes depósitos de uranio como para satisfacer los requisitos de energía actuales del mundo durante algunos cientos de años. La tecnología de reactores reproductores puede aumentar enormemente dichas reservas.

PREGUNTA 30.1 Estime la masa promedio de ^{235}U necesaria para proporcionar energía para una familia durante un año.

EJERCICIO 30.1 ¿Cuánto tiempo puede mantener encendido un foco de 100 vatios 1 kg de uranio-235, si toda su energía liberada se convierte en energía eléctrica?

RESPUESTA ~30 000 años

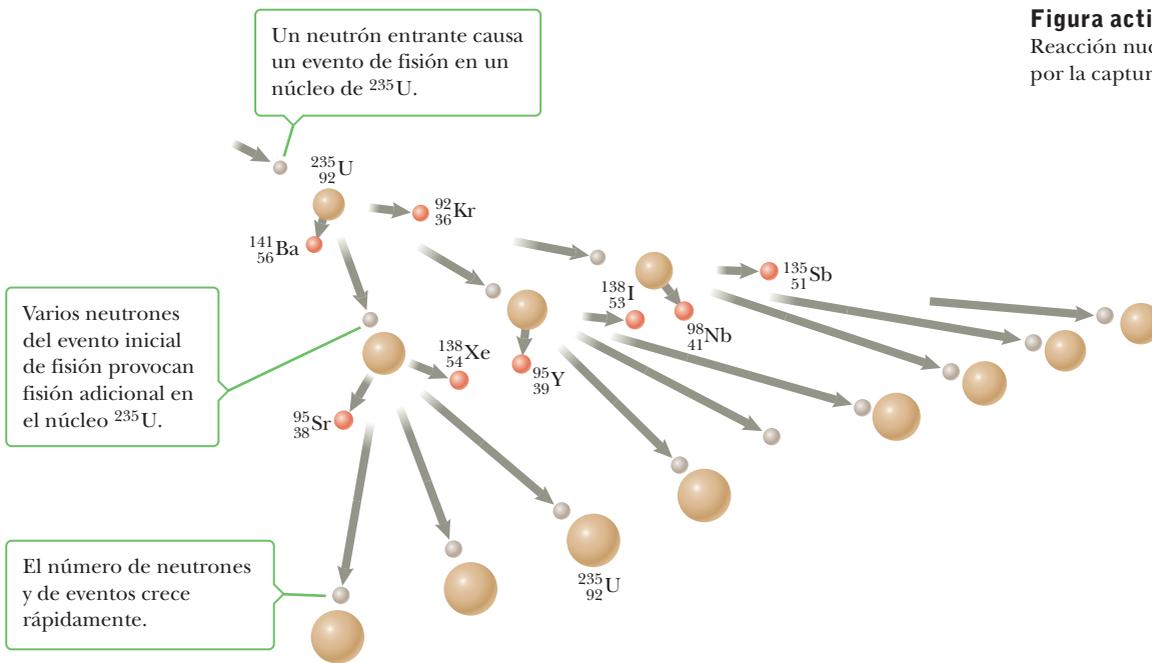
Reactores nucleares

Los neutrones emitidos cuando ^{235}U experimenta fisión a su vez pueden hacer que otros núcleos experimenten fisión, con la posibilidad de una reacción en cadena (figura activa 30.2). Los cálculos demuestran que si la reacción en cadena no se controla, procederá muy rápido y posiblemente resultará en la súbita liberación de una enorme cantidad de energía (una explosión), incluso a partir de un solo gramo de ^{235}U . Si la energía en 1 kg de ^{235}U se liberara, ¡sería igual a la liberada por la detonación de aproximadamente 20 000 toneladas de TNT! Desde luego, una reacción de fisión descontrolada es el principio detrás de la primera bomba nuclear.

Un reactor nuclear es un sistema diseñado para mantener lo que se llama **reacción en cadena autosostenida**, que logró por primera vez Enrico Fermi en 1942. La mayoría de los reactores en operación actual también usan uranio como combustible. El uranio natural contiene sólo alrededor de 0.7% del isótopo ^{235}U y el restante 99.3% es el isótopo ^{238}U . Este hecho es importante para la operación de un reactor porque ^{238}U casi nunca experimenta fisión. En vez de ello, tiende a absorber neutrones, lo que produce neptunio y plutonio. Por esta razón, los combustibles de reactor se deben enriquecer artificialmente de modo que contengan un gran porcentaje del isótopo ^{235}U .

Figura activa 30.2

Reacción nuclear en cadena iniciada por la captura de un neutrón.



En promedio, en cada evento de fisión de ^{235}U se emiten alrededor de 2.5 neutrones. Para lograr una reacción en cadena autosostenida, uno de estos neutrones se debe capturar mediante otro núcleo de ^{235}U y hacer que experimente fisión. Un parámetro útil para describir el nivel de operación del reactor es la **constante de reproducción K** , que se define como el número promedio de neutrones de cada evento de fisión que causará otro evento.

Una reacción en cadena autosostenida se logra cuando $K = 1$. Bajo esta condición, se dice que el reactor es **crítico**. Cuando K es menor que 1, el reactor es subcrítico y la reacción muere. Cuando K es mayor que 1, se dice que el reactor es supercrítico y ocurre una reacción de escape. En un reactor nuclear que se usa para suministrar potencia a una compañía eléctrica, es necesario mantener un valor K cercano a 1.

En la figura 30.3 se muestra el diseño básico de un reactor nuclear. Los elementos de combustible consisten de uranio enriquecido. El tamaño del reactor es importante para reducir la fuga de neutrones: un reactor grande tiene una razón superficie a volumen más pequeña y menor fuga que un reactor más pequeño.

También es importante regular las energías de neutrón porque los neutrones lentos tienen más probabilidad de generar fisiones que los neutrones rápidos en ^{235}U . Más aún, ^{238}U no absorbe neutrones lentos. En consecuencia, para que la reacción en cadena continúe, deben frenarse los neutrones. Este frenado se logra al rodear el combustible con una sustancia llamada **moderador**, como el grafito (carbono) o agua pesada (D_2O). La mayoría de los reactores modernos usan agua pesada. Las colisiones en el moderador frenan los neutrones y mejoran la fisión de ^{235}U .

La salida de potencia de un reactor de fisión se controla mediante las barras de control que se bosquejan en la figura 30.3. Estas barras están hechas con materiales como cadmio, que fácilmente absorben neutrones.

Las fisiones en un reactor nuclear calientan sodio fundido (o agua, dependiendo del sistema), que se bombea a través de un intercambiador de calor. Ahí, la energía térmica se transfiere al agua en un sistema secundario. El agua se convierte en vapor, que impulsa un generador de turbina para crear potencia eléctrica.

Los reactores de fisión son extremadamente seguros. De acuerdo con la *Oak Ridge National Laboratory Review*, "El riesgo a la salud de vivir a 8 km de un reactor nuclear durante 50 años no es mayor que el riesgo de fumar 1.4 cigarrillos, beber 0.5 L de vino, viajar 240 km en auto, volar 9600 km en *jet* o tomar rayos X de pecho en un hospital. Cada actividad, por sí misma, se estima aumenta la posibilidad de una persona de morir en cualquier año dado por uno en un millón".

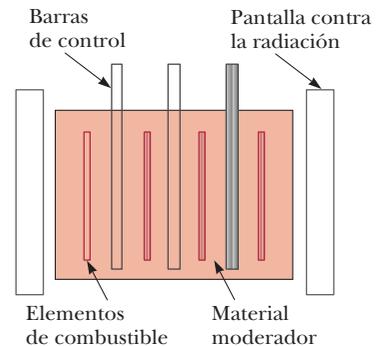


Figura 30.3 Sección transversal del núcleo de un reactor que muestra las barras de control, los elementos de combustible que contienen combustible enriquecido y el material moderador, todo rodeado por una pantalla contra la radiación.

APLICACIÓN

Diseño de un reactor nuclear

El costo es un factor importante; el costo por kilovatio-hora de energía nuclear es ligeramente menor que la de carbón y mucho menos que el petróleo o el gas. Con el tiempo, el menor costo de la energía nuclear por kilovatio-hora y un menor impacto sobre el medio compensan con creces los costos iniciales más altos. Los temas de seguridad asociados con los reactores de potencia nuclear son complejos y con frecuencia subjetivos. Todas las fuentes de energía tienen riesgos asociados. El carbón, por ejemplo, expone a los trabajadores a peligros a la salud (incluido radón radiactivo) y produce contaminación atmosférica (incluidos gases invernadero). En cada caso los riesgos se deben ponderar contra los beneficios y la disponibilidad de la fuente de energía.

Las fuentes conocidas de mineral de uranio son suficientes para satisfacer todos los requerimientos energéticos de la Humanidad por varios años a la razón actual de uso si se quemara en reactores convencionales. (Véase el problema 8.) Los reactores reproductores, por otro lado, convierten los residuos nucleares en combustible nuclear y también pueden cambiar el torio en un isótopo de uranio apto para un reactor. Utilizando esta tecnología, las reservas actuales probablemente serían suficientes para más de mil años, aun sin el descubrimiento o explotación de nuevas fuentes de uranio o torio. La mayor fuente sin explotar son los 4.5 miles de millones de toneladas métricas de uranio disuelto en los océanos de la Tierra. Existen varios métodos para extraer uranio económicamente que se encuentran actualmente en estudio. El uranio disuelto es alimentado en forma constante por los ríos de la Tierra y en potencia podría proporcionar combustible para el reactor casi de manera indefinida. (Véase el problema 10.)

30.2 Fusión nuclear

Cuando dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado, el proceso se llama fusión nuclear. Puesto que la masa del núcleo final es menor que la suma de las masas de los núcleos originales, hay una pérdida de masa, acompañada por la liberación de energía. Aunque todavía no se desarrollan plantas de energía de fusión, hay en marcha un esfuerzo mundial para aprovechar la energía de las reacciones de fusión en el laboratorio.

Fusión en el Sol

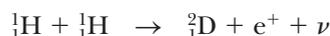
Todas las estrellas generan su energía a través de procesos de fusión. Alrededor de 90% de las estrellas, incluido el Sol, fusionan hidrógeno, mientras que algunas estrellas más viejas fusionan helio u otros elementos más pesados. La energía producida por fusión aumenta la presión dentro de la estrella y evita su colapso debido a la gravedad.

Antes de que las reacciones de fusión en la estrella puedan sostener sus necesidades de energía, se deben satisfacer dos condiciones. Primera: la temperatura debe ser suficientemente alta (alrededor de 10^7 K para el hidrógeno) para permitir que la energía cinética de los núcleos de hidrógeno con carga positiva supere su repulsión coulombiana mutua mientras chocan. Segunda: la densidad de los núcleos debe ser suficientemente alta para asegurar una alta proporción de colisiones.

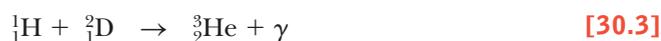
Es interesante observar que un efecto cuántico es clave en la formación del brillo solar. Las temperaturas dentro de las estrellas como el Sol no son suficientemente elevadas como para permitir que las colisiones de los protones superen la repulsión coulombiana. Sin embargo, en cierto porcentaje de colisiones, los núcleos pasan de cualquier forma a través de la barrera, un ejemplo de *tunelamiento cuántico*.

El **ciclo protón-protón** es una serie de tres reacciones nucleares que se cree son las etapas en la liberación de energía en el Sol y otras estrellas ricas en hidrógeno. Una visión global del ciclo protón-protón es que cuatro protones se combinan para formar una partícula alfa y dos positrones, con la liberación de 25 MeV de energía en el proceso.

Los pasos específicos en el ciclo protón-protón son



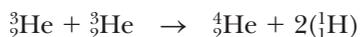
y



donde D representa deuterio, el isótopo de hidrógeno que tiene un protón y un neutrón en el núcleo. (También se puede escribir como ${}^2_1\text{H}$.) La segunda reacción se sigue por la fusión hidrógeno-helio o por la fusión helio-helio:



o

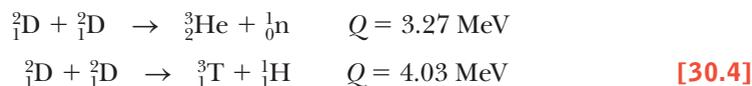


La energía liberada se transporta principalmente mediante rayos gamma, positrones y neutrinos, como se puede ver a partir de las reacciones. Los rayos gamma se absorben pronto en el denso gas, lo que eleva su temperatura. Los positrones se combinan con electrones para producir rayos gamma, que a su vez también se absorben en el gas dentro de pocos centímetros. Sin embargo, los neutrinos casi nunca interactúan con la materia; en consecuencia, escapan de la estrella y se llevan consigo alrededor de 2% de la energía generada. Estas reacciones de fusión liberadoras de energía se llaman **reacciones de fusión termonucleares**. La bomba de hidrógeno (fusión), que explotó por primera vez en 1952, es un ejemplo de una reacción de fusión termonuclear incontrolada.

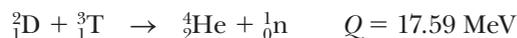
Reactores de fusión

Actualmente se realiza un gran esfuerzo por desarrollar un reactor de energía de fusión sostenida y controlable. La fusión controlada con frecuencia se llama fuente máxima de energía, debido a la disponibilidad de agua, su fuente de combustible. Por ejemplo, si el deuterio, el isótopo de hidrógeno que consiste de un protón y un neutrón, se usara como combustible, 0.06 g del mismo se podría extraer de 1 gal de agua a un costo de más o menos cuatro centavos de dólar. Por lo tanto, los costos de combustible de incluso un reactor ineficiente serían casi insignificantes. Una ventaja adicional de los reactores de fusión es que, comparativamente, se producen pocos subproductos radiactivos. Como se observa en la ecuación 30.3, el producto final de la fusión de núcleos de hidrógeno es seguro, helio no radiactivo. Por desgracia, un reactor termonuclear que pueda entregar una salida de potencia neta sobre un intervalo de tiempo razonable todavía no es una realidad y se deben resolver muchos problemas antes de construir un dispositivo exitoso.

Las reacciones de fusión que parecen más prometedoras en la construcción de un reactor de energía de fusión involucran deuterio (D) y tritio (T), que son isótopos de hidrógeno. Estas reacciones son



y



donde los valores Q se refieren a la cantidad de energía liberada por reacción. Como se notó anteriormente, el deuterio está disponible en cantidades casi ilimitadas en lagos y océanos, y es muy barato de extraer. Sin embargo, el tritio es radiactivo ($T_{1/2} = 12.3$ años) y experimenta decaimiento beta a ${}^3\text{He}$. Por esta razón, el tritio no existe en la naturaleza en gran cantidad y se debe producir de manera artificial.

El reto fundamental de la energía de fusión nuclear es dar a los núcleos suficiente energía cinética para superar la fuerza coulombiana repulsiva entre ellos en cercana proximidad. Este paso se puede lograr al calentar el combustible a temperaturas extremadamente elevadas (alrededor de 10^8 K, muy por arriba de la temperatura interior del Sol). Tales temperaturas no son fáciles de obtener en un laboratorio o una planta. A estas altas temperaturas, los átomos se ionizan y entonces el sistema consiste en una colección de electrones y núcleos, comúnmente conocida como *plasma*.

Además de los requisitos de alta temperatura, otros dos factores cruciales determinan si funcionará o no el reactor termonuclear: la **densidad de iones en el plasma** n y el **tiempo de confinamiento del plasma** τ , el tiempo que los iones en interacción se mantienen a una temperatura igual o mayor que la requerida para que se produzca la reacción. La densidad y el tiempo de confinamiento deben ser suficientemente grandes para asegurar que se liberará más energía de fusión de la que se requiere para calentar el plasma.

APLICACIÓN

Reactores de fusión

Criterio de Lawson ▶

El **criterio de Lawson** afirma que es posible una salida de potencia neta en un reactor de fusión bajo las siguientes condiciones:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-tritio} \quad [30.5]$$

$$n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-deuterio}$$

El problema del tiempo de confinamiento del plasma todavía no se resuelve. ¿Cómo se puede confinar un plasma a una temperatura de 10^8 K por tiempos del orden de 1 s? La mayoría de los experimentos de fusión usan confinamiento de campo magnético para contener un plasma. Un dispositivo, llamado **tokamak**, tiene una geometría con forma de dona (un toroide), como se muestra en la figura 30.4. Este dispositivo usa una combinación de dos campos magnéticos para confinar el plasma dentro de la dona. La corriente en los devanados produce un fuerte campo magnético y la corriente en el toroide produce un campo magnético más débil. Las líneas de campo magnético resultante son helicoidales, como se muestra en la figura. En esta configuración las líneas de campo forman espirales alrededor del plasma y evitan que toque las paredes de la cámara de vacío.

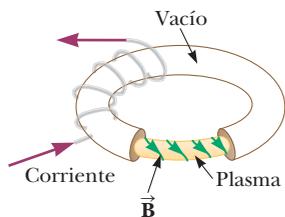


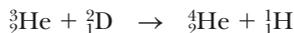
Figura 30.4 Diagrama de un tokamak utilizado en el esquema de confinamiento magnético. El plasma está atrapado dentro de las líneas del campo magnético en espiral, como se muestra.

En la fusión por confinamiento de láser inercial, el combustible, por lo general deuterio y tritio, se pone en la forma de una pequeña píldora. Directa o indirectamente, el láser de gran alcance entrega energía rápidamente a la píldora, la explosión de las capas externas e implosión del resto de la pastilla, la calientan y se comprimen. Las ondas de choque se forman y se encuentran en el centro, aumentando la densidad y la presión y provocando reacciones de fusión. La energía liberada entonces causa más reacciones de fusión. La fusión también puede tener lugar en un dispositivo del tamaño de un televisor y, de hecho, lo inventó Philo Farnsworth, uno de los padres de la televisión electrónica. En este método, llamado confinamiento electrostático inercial, partículas con carga positiva son atraídas rápidamente hacia una rejilla con carga negativa. Entonces algunas de las partículas positivas chocan y se funden.

EJEMPLO 30.2 Astrocombustible en la Luna

OBJETIVO Calcular la energía liberada en una reacción de fusión.

PROBLEMA Encuentre la energía liberada en la reacción de helio-3 con deuterio:



ESTRATEGIA La energía liberada es la diferencia entre la energía masa de los reactantes y los productos.

SOLUCIÓN

Suma las masas en el lado izquierdo y reste las masas en la derecha y obtenga Δm en unidades de masa atómica:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{\text{He-3}} + m_{\text{D}} - m_{\text{He-4}} - m_{\text{H}} \\ &= 3.016\,029 \text{ u} + 2.014\,102 \text{ u} - 4.002\,603 \text{ u} - 1.007\,825 \text{ u} \\ &= 0.019\,703 \text{ u} \end{aligned}$$

Convierta la diferencia de masa en una cantidad equivalente de energía en MeV:

$$E = (0.019\,703 \text{ u}) \left(\frac{931.5 \text{ MeV}}{1 \text{ u}} \right) = 18.35 \text{ MeV}$$

COMENTARIOS El resultado es una gran cantidad de energía por reacción. El helio-3 es raro en la Tierra, pero abundante en la Luna, donde quedó atrapado en el fino polvo del suelo lunar. El helio-3 tiene la ventaja de producir más protones que neutrones (algunos neutrones todavía se producen mediante reacciones laterales, como D-D), pero tiene la desventaja de una muy alta temperatura de ignición. Si las plantas de energía de fusión que usan helio-3 se vuelven realidad, los estudios indican que sería económicamente ventajoso minar helio-3 de manera robótica y traerlo a la Tierra. ¡El beneficio en energía por dólar sería mucho mayor que minar carbón o extraer petróleo!

PREGUNTA 30.2 ¿Cuánta energía, en joules, se podría obtener de un número de Avogadro de reacciones de fusión de helio-3-deuterio?

EJERCICIO 30.2 Encuentre la energía que se produce en la fusión de dos núcleos de helio-3:



RESPUESTA 12.9 MeV

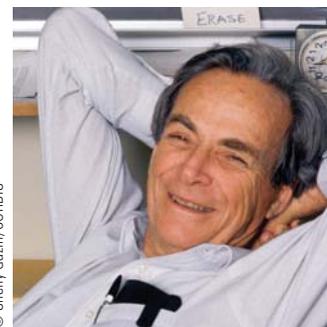
30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales

Además de los constituyentes de los átomos (protones, electrones y neutrones), muchas otras partículas se pueden encontrar en los experimentos de alta energía u observarse en la Naturaleza, posteriores a las colisiones que involucran rayos cósmicos. A diferencia de los protones y electrones enormemente estables, estas partículas decaen con rapidez, con vidas medias que varían de 10^{-23} s a 10^{-6} s. Existe evidencia indirecta muy fuerte de que la mayoría de estas partículas, incluidos neutrones y protones, son combinaciones de partículas más elementales llamadas quarks. Los quarks, los leptones (el electrón es un ejemplo) y las partículas que transportan fuerzas (el fotón es un ejemplo) ahora se consideran como las verdaderas partículas fundamentales. La clave para entender las propiedades de las partículas elementales es la descripción de las fuerzas de la naturaleza en las que participan.

Todas las partículas en la naturaleza están sujetas a cuatro fuerzas fundamentales: las fuerzas fuerte, electromagnética, débil y gravitacional. La **fuerza fuerte** es responsable del firme enlace de los quarks para formar neutrones y protones y de la fuerza nuclear, una especie de fuerza fuerte residual, que enlaza neutrones y protones en núcleos. Esta fuerza representa el “pegamento” que mantiene unidos los nucleones y es la más fuerte de todas las fuerzas fundamentales. Es una fuerza de muy corto alcance y es despreciable para separaciones mayores que aproximadamente 10^{-15} m (el tamaño aproximado del núcleo). La **fuerza electromagnética**, que es más o menos 10^{-2} veces la intensidad de la fuerza fuerte, es responsable del enlace de átomos y moléculas. Es una fuerza de largo alcance que disminuye en intensidad como el cuadrado inverso de la separación entre partículas en interacción. La **fuerza débil** es una fuerza nuclear de corto alcance que se muestra en la inestabilidad de ciertos núcleos. Está involucrada en el mecanismo de decaimiento beta y tiene una intensidad de sólo 10^{-6} veces la fuerza fuerte. Finalmente, la **fuerza gravitacional** es una fuerza de largo alcance, con una intensidad de sólo aproximadamente 10^{-43} veces la de la fuerza fuerte. Aunque esta interacción conocida es la fuerza que mantiene unidos los planetas, estrellas y galaxias, su efecto sobre las partículas elementales es despreciable. La fuerza gravitacional es con mucho la más débil de todas las fuerzas fundamentales.

Con frecuencia, la física moderna describe las fuerzas entre partículas en términos de las acciones de las partículas de campo o cuantos. En el caso de la conocida interacción electromagnética, las partículas de campo son los fotones. En el lenguaje de la física moderna, la fuerza electromagnética está *mediada* (transportada) por los fotones, que son los cuantos del campo electromagnético. La fuerza fuerte está medida por partículas de campo llamadas *gluones*, la fuerza débil está medida por partículas llamadas *bosones W y Z*, y se cree que la fuerza gravitacional está mediada por cuantos del campo gravitacional llamados *gravitones*. Las fuerzas entre dos partículas se transportan mediante un intercambio de cuantos de campo. Este proceso es análogo al enlace covalente entre dos átomos creado por un intercambio o compartición de electrones. La interacción electromagnética, por ejemplo, involucra un intercambio de fotones.

La fuerza entre dos partículas se puede comprender en general con una ilustración simple llamada *diagrama de Feynman*, que desarrolló Richard P. Feynman (1918-1988). La figura 30.5 es un diagrama de Feynman para la interacción electromagnética entre dos electrones. En este caso simple, un fotón es la partícula de campo que media la fuerza electromagnética entre los electrones. El fotón transfiere energía y cantidad de movimiento de un electrón al otro en la interacción. Tal fotón, llamado *fotón virtual*, nunca se puede detectar directamente porque el segundo electrón lo absorbe muy poco tiempo después de que lo emite el primer electrón. Se esperaría que la existencia de un fotón virtual viole la ley de la conservación de la energía, pero no lo hace debido al principio de incertidumbre tiempo-energía. Recuerde que el principio de incertidumbre dice que la energía es incierta o no se conserva por una cantidad ΔE durante un tiempo Δt tal que $\Delta E \Delta t \approx \hbar$. Si el intercambio del fotón virtual sucede con suficiente rapidez, la breve discrepancia en la conservación de energía es menor que la mínima incertidumbre en energía y el intercambio es un proceso físicamente aceptable.



© Shelly Gazim/CORBIS

Richard Feynman

Físico estadounidense (1918-1988)

Feynman, junto con Julian S. Schwinger y Shinichiro Tomonaga, ganaron el Premio Nobel de Física en 1965, por su trabajo fundamental en los principios de la electrodinámica cuántica. Sus importantes y numerosas aportaciones a la física incluyen trabajo en la primera bomba atómica en el proyecto Manhattan, la invención de diagramas simples para representar gráficamente las interacciones de partículas, la teoría de la interacción débil de las partículas subatómicas, una reformulación de la mecánica cuántica y la teoría del helio superfluido. Más tarde trabajó en la comisión que investigó la tragedia del *Challenger*, que demostró el problema con los anillos O del transbordador espacial al sumergir un modelo a escala del anillo O en su vaso con agua helada y luego hacerlo añicos con un martillo. También contribuyó con la enseñanza de la física a través del magnífico texto en tres volúmenes *The Feynman Lectures on Physics*.

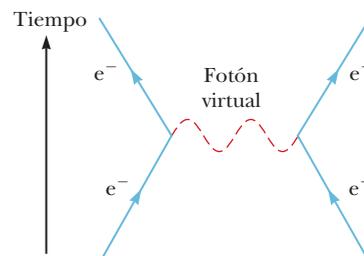


Figura 30.5 Diagrama de Feynman que representa un fotón que media la fuerza electromagnética entre dos electrones.

Tabla 30.1 Interacciones de partículas

Interacción (fuerza)	Intensidad relativa ^a	Rango de la fuerza	Partícula de campo mediadora
Fuerte	1	Corto (≈ 1 fm)	Gluón
Electromagnética	10^{-2}	Largo ($\propto 1/r^2$)	Fotón
Débil	10^{-6}	Corto ($\approx 10^{-3}$ fm)	Bosones W^\pm y Z
Gravitacional	10^{-43}	Largo ($\propto 1/r^2$)	Gravitón

^aPara dos quarks separados 3×10^{-17} m.

Todos los cuantos de campo se han detectado, excepto el gravitón, que tal vez nunca se pueda detectar de manera directa debido a la debilidad del campo gravitacional. En la tabla 30.1 se resumen estas interacciones, sus rangos y sus intensidades relativas.

30.4 Positrones y otras antipartículas

En la década de 1920, el físico teórico Paul Dirac (1902-1984) desarrolló una versión de mecánica cuántica que incorpora la relatividad especial. La teoría de Dirac explica el espín del electrón y su momento magnético, pero tiene un fallo aparente en que predijo estados de energía negativos. La teoría se rescató al plantear la existencia de un antielectrón que tiene la misma masa que un electrón, más la carga opuesta, llamado *positrón*. La general y profunda implicación de la teoría de Dirac es que, **para toda partícula, existe una antipartícula con la misma masa que la partícula, pero con carga opuesta**. Una antipartícula por lo general se designa mediante una barra sobre el símbolo de la partícula. Por ejemplo, \bar{p} denota el antiprotón y $\bar{\nu}$ el antineutrino. En este libro se prefiere la notación e^+ para el positrón. Prácticamente toda partícula elemental conocida tiene una antipartícula distintiva. Entre las excepciones están el fotón y el pión neutro (π^0), que son sus propias antipartículas.

Tip 30.1 Antipartículas

Una antipartícula no se identifica exclusivamente sobre la base de carga opuesta. Incluso las partículas neutras tienen antipartículas.

En 1932, Carl Anderson descubrió el positrón en un experimento de cámara de niebla. Para discriminar entre cargas positiva y negativa, colocó la cámara de niebla en un campo magnético, lo que hizo que las cargas en movimiento siguieran trayectorias curvas. Él notó que algunas de las trazas parecidas a electrón se desviaban en una dirección que correspondía a una partícula con carga positiva: los positrones.

Cuando una partícula se topa con su antipartícula, ambas partículas se aniquilan, lo que resulta en fotones de alta energía. El proceso de aniquilación electrón-positrón se usa en la técnica de diagnóstico médico de tomografía por emisión de positrón (TEP o PET, por sus siglas en inglés). Al paciente se le inyecta una solución de glucosa que contiene una sustancia radiactiva que decae por emisión de positrones. Ejemplos de tales sustancias son oxígeno-15, nitrógeno-13, carbono-11 y flúor-18. El material radiactivo se transporta al cerebro. Cuando ocurre un decaimiento, el positrón emitido se aniquila con un electrón en el tejido cerebral, lo que resulta en dos fotones de rayos gamma. Con la ayuda de una computadora se puede crear una imagen de los sitios en el cerebro donde se acumula glucosa.

BIO APLICACIÓN

Tomografía por emisión de positrones (TEP)

Las imágenes de un escaneo TEP pueden apuntar a una amplia variedad de trastornos en el cerebro, incluida la enfermedad de Alzheimer. Además, puesto que la glucosa se metaboliza más rápidamente en áreas activas del cerebro que en otras partes del cuerpo, una exploración TEP puede indicar cuáles áreas del cerebro se involucran en varios procesos como lenguaje, música y visión.

30.5 Clasificación de partículas

Todas las partículas distintas a las que transmiten fuerzas se pueden clasificar en dos amplias categorías, hadrones y leptones, de acuerdo con sus interacciones. Los hadrones están compuestos de quarks, mientras que los leptones se consideran como verdaderamente elementales, aunque hay sugerencias de que también pueden tener estructura interna.

Hadrones

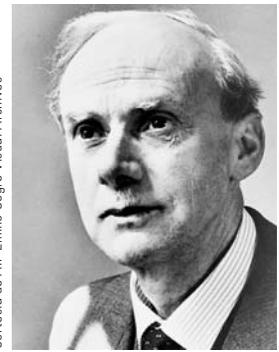
Las partículas que interactúan a través de la fuerza fuerte se llaman *hadrones*. Las dos clases de hadrones, conocidos como *mesones* y *bariones*, se distinguen por sus masas y espines.

Se sabe que todos los mesones decaen finalmente a electrones, positrones, neutrinos y fotones. Un buen ejemplo de un mesón es el pión (π), el más ligero de los mesones conocidos, con una masa aproximada de $140 \text{ MeV}/c^2$ y un espín de 0. Como se ve en la tabla 30.2, el pión viene en tres variedades, que corresponden a tres estados de carga: π^+ , π^- y π^0 . Los piones son partículas enormemente inestables. Por ejemplo, el π^- , que tiene una vida de aproximadamente $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, decae en un muón y un antineutrino. El muón μ^- , en esencia un electrón pesado con una vida de $2.2 \mu\text{s}$, decae entonces en un electrón, un neutrino y un antineutrino. La secuencia de decaimientos es



Los bariones tienen masas iguales a o mayores que la masa del protón (el nombre *barión* significa “pesado” en griego) y su espín siempre es un valor no entero ($\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$). Protones y neutrones son bariones, pero hay muchas otras partículas. Con excepción del protón, todos los bariones decaen en tal forma que los productos finales incluyen un protón. Por ejemplo, el barión llamado hiperón Ξ decae primero a Λ^0 en aproximadamente 10^{-10} s . Luego Λ^0 decae a un protón y un π^- en alrededor de $3 \times 10^{-10} \text{ s}$.

En la actualidad se cree que los hadrones están compuestos de quarks. En la tabla 30.2 se citan algunas de las propiedades importantes de los hadrones.



Cortesía de AIP Emilio Segre Visual Archives

Paul Adrien Maurice Dirac Físico inglés (1902-1984)

Dirac tuvo un papel decisivo en la comprensión de la antimateria y en la unificación de la mecánica cuántica y la relatividad. Realizó numerosas aportaciones al desarrollo de la física cuántica y la cosmología. En 1933 ganó el Premio Nobel de Física.

Tabla 30.2 Algunas partículas y sus propiedades

Categoría	Nombre de la partícula	Símbolo	Anti-partícula	Masa (MeV/c ²)	B	L _e	L _μ	L _τ	S	Vida(s)	Principal modo de decaimiento ^a		
Leptones	Electrón	e ⁻	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	Estable			
	Neutrino electrónico	ν _e	ν̄ _e	< 7eV/c ²	0	+1	0	0	0	Estable			
	Muón	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	2.20 × 10 ⁻⁶	e ⁻ ν̄ _e ν _μ		
	Neutrino muónico	ν _μ	ν̄ _μ	< 0.3	0	0	+1	0	0	Estable			
	Tau	τ ⁻	τ ⁺	1784	0	0	0	+1	0	< 4 × 10 ⁻¹³	μ ⁻ ν̄ _μ ν _τ , e ⁻ ν̄ _e ν _τ		
	Neutrino tauónico	ν _τ	ν̄ _τ	< 30	0	0	0	+1	0	Estable			
Hadrones	Mesones	Pión	π ⁺	π ⁻	139.6	0	0	0	0	2.60 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ		
			π ⁰	Mismo	135.0	0	0	0	0	0.83 × 10 ⁻¹⁶	2γ		
		Kaón	K ⁺	K ⁻	493.7	0	0	0	0	+1	1.24 × 10 ⁻⁸	μ ⁺ ν _μ , π ⁺ π ⁰	
			K _S ⁰	K _S ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	0.89 × 10 ⁻¹⁰	π ⁺ π ⁻ , 2π ⁰	
	K _L ⁰		K _L ⁰	497.7	0	0	0	0	+1	5.2 × 10 ⁻⁸	π [±] e [∓] ν̄ _e , 3π ⁰		
	Eta		η	Mismo	548.8	0	0	0	0	0	< 10 ⁻¹⁸	2γ, 3π	
			η'	Mismo	958	0	0	0	0	0	2.2 × 10 ⁻²¹	ηπ ⁺ π ⁻	
		Bariones	Protón	p	p̄	938.3	+1	0	0	0	0	Estable	
			Neutrón	n	n̄	939.6	+1	0	0	0	0	920	pe ⁻ ν̄ _e
			Lambda	Λ ⁰	Λ̄ ⁰	1115.6	+1	0	0	0	-1	2.6 × 10 ⁻¹⁰	pπ ⁻ , nπ ⁰
Sigma				Σ ⁺	Σ̄ ⁻	1189.4	+1	0	0	0	-1	0.80 × 10 ⁻¹⁰	pπ ⁰ , nπ ⁺
		Σ ⁰	Σ̄ ⁰	1192.5	+1	0	0	0	-1	6 × 10 ⁻²⁰	Λ ⁰ γ		
		Σ ⁻	Σ̄ ⁺	1197.3	+1	0	0	0	-1	1.5 × 10 ⁻¹⁰	nπ ⁻		
Xi		Ξ ⁰	Ξ̄ ⁰	1315	+1	0	0	0	-2	2.9 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁰		
		Ξ ⁻	Ξ ⁺	1321	+1	0	0	0	-2	1.64 × 10 ⁻¹⁰	Λ ⁰ π ⁻		
	Omega	Ω ⁻	Ω ⁺	1672	+1	0	0	0	-3	0.82 × 10 ⁻¹⁰	Ξ ⁰ π ⁻ , Λ ⁰ K ⁻		

^aLa notación en esta columna, como pπ⁻, nπ⁰, significan dos posibles modos de decaimiento. En este caso, los dos posibles decaimientos son Λ⁰ → p + π⁻ y Λ⁰ → n + π⁰.

Leptones

Los leptones (del griego *leptos*, que significa “pequeño” o “ligero”) son un grupo de partículas que participan en la interacción débil. Todos los leptones tienen un espín de $\frac{1}{2}$. En este grupo se incluyen electrones, muones y neutrinos, que son todos menos masivos que el hadrón más ligero. Un muón es idéntico a un electrón, excepto que su masa es 207 veces la masa del electrón. Aunque los hadrones tienen tamaño y estructura, los leptones parecen ser verdaderamente elementales, sin estructura hasta el límite de resolución experimental (más o menos 10^{-19} m).

A diferencia de los hadrones, el número de leptones conocidos es pequeño. En la actualidad, los científicos creen que sólo existen seis leptones (cada uno con una antipartícula), el electrón, el muón, el tau y un neutrino asociado con cada uno:

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

El leptón *tavónico*, descubierto en 1975, tiene una masa aproximada del doble de la del protón.

Aunque los neutrinos tienen masas aproximadas de cero, hay fuerte evidencia indirecta de que el neutrino electrónico tiene una masa distinta de cero de alrededor de $3 \text{ eV}/c^2$, o $1/180\,000$ de la masa del electrón. Un firme conocimiento de la masa del neutrino podría tener gran significado en los modelos cosmológicos y en la comprensión del futuro del Universo.

30.6 Leyes de conservación

Algunas leyes de conservación son importantes en el estudio de las partículas elementales. Aunque las que se describen aquí no tienen fundamento teórico, se sostienen mediante abundante evidencia empírica.

Número bariónico

La ley de conservación del número bariónico significa que, siempre que en una reacción o decaimiento se crea un barión, también se crea un antibarión. Esta información se puede cuantificar al asignar un número bariónico: $B = 1$ para todos los bariones, $B = -1$ para todos los antibariones y $B = 0$ para todas las otras partículas. Por ende, la **ley de conservación del número bariónico** afirma que, siempre que ocurre una reacción o decaimiento nuclear, la suma de los números bariónicos antes del proceso es igual a la suma de los números bariónicos después del proceso.

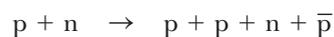
Observe que si el número bariónico se conserva por completo, el protón debe ser absolutamente estable: si esto no fuera así por la ley de conservación del número bariónico, el protón puede decaer en un positrón y un pión neutro. Sin embargo, tal decaimiento nunca se ha observado. En el presente, sólo se puede decir que el protón tiene una vida media de al menos 10^{31} años. (La edad estimada del Universo es de alrededor de 10^{10} años.) En una versión de la llamada gran teoría unificada, GTU, los físicos predicen que el protón en realidad es inestable. De acuerdo con esta teoría, el número bariónico (a veces llamada *carga bariónica*) no se conserva de manera absoluta, mientras que la carga eléctrica siempre se conserva.

Conservación del número bariónico ►

■ EJEMPLO 30.3 Comprobación del número bariónico

OBJETIVO Usar la conservación del número bariónico para determinar si puede ocurrir una reacción dada.

PROBLEMA Determine si la siguiente reacción puede ocurrir con base en la ley de conservación del número bariónico:



ESTRATEGIA Cuente los bariones en ambos lados de la reacción y recuerde que $B = 1$ para los bariones y $B = -1$ para los antibariones.

SOLUCIÓN

Cuenta los bariones a la izquierda:

El neutrón y el protón son bariones; por lo tanto,
 $1 + 1 = 2$.

Cuenta los bariones a la derecha:

Existen tres bariones y un antibarión, de modo que
 $1 + 1 + 1 + (-1) = 2$.

COMENTARIOS El número bariónico se conserva en esta reacción, de modo que puede ocurrir siempre que el fotón entrante tenga suficiente energía.

PREGUNTA 30.3 Verdadero o Falso: Un protón no puede decaer en un positrón más un neutrino.

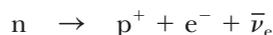
EJERCICIO 30.3 ¿Puede ocurrir la siguiente reacción, con base en la ley de la conservación del número bariónico?



RESPUESTA No. (Calcule los números bariónicos en ambos lados y demuestre que no son iguales.)

Número leptónico

Existen tres leyes de conservación que involucran números leptónicos, uno para cada variedad de leptón. La **ley de conservación del número leptón-electrón** afirma que la suma de los números leptón-electrón antes de una reacción o decaimiento debe ser igual a la suma de los números leptón-electrón después de la reacción o decaimiento. Al electrón y al neutrino electrón se les asigna un número leptón-electrón positivo $L_e = 1$, a los antileptones e^+ y $\bar{\nu}_e$ se les asigna un número leptón-electrón $L_e = -1$, y todas las otras partículas tienen $L_e = 0$. Por ejemplo, considere el decaimiento de neutrón:



Antes del decaimiento, el número leptón-electrón es $L_e = 0$; después del decaimiento, es $0 + 1 + (-1) = 0$, de modo que el número leptón-electrón se conserva. Es importante reconocer que también se debe conservar el número bariónico. Esto se puede ver fácilmente al observar que, antes del decaimiento, $B = 1$, mientras que después del decaimiento $B = 1 + 0 + 0 = 1$.

De igual modo, cuando un decaimiento involucra muones, el número leptón-muón L_μ se conserva. A μ^- y ν_μ se les asigna $L_\mu = +1$, a los antimuones μ^+ y $\bar{\nu}_\mu$ se les asigna $L_\mu = -1$, y todas las demás partículas tienen $L_\mu = 0$. Finalmente, el número leptón tau L_τ se conserva y asignaciones similares se pueden hacer para el leptón τ y su neutrino.

◀ Conservación del número leptón

◀ Decaimiento del neutrón

■ EJEMPLO 30.4 Comprobación del número leptónico

OBJETIVO Usar la conservación del número leptónico para determinar si es posible un proceso dado.

PROBLEMA Determine cuál de los siguientes esquemas de decaimiento puede ocurrir sobre la base de la conservación del número leptónico:



ESTRATEGIA Cuente los leptones en cada lado y vea si los números son iguales.

SOLUCIÓN

Puesto que el decaimiento 1 involucra tanto un muón como un electrón, L_μ y L_e ambos se deben conservar. Antes del decaimiento, $L_\mu = +1$ y $L_e = 0$. Después del decaimiento, $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$ y $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$. Ambos números leptónicos se conservan y, sobre esta base, el modo de decaimiento es posible.

Antes de que ocurra el decaimiento 2, $L_\mu = 0$ y $L_e = 0$. Después del decaimiento, $L_\mu = -1 + 1 + 0 = 0$, pero $L_e = +1$. Este decaimiento no es posible porque el número leptón-electrón no se conserva.

PREGUNTA 30.4 ¿Un neutrón puede decaer en un positrón y un electrón? Explique.

EJERCICIO 30.4 Determine si puede ocurrir el decaimiento $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$.

RESPUESTA No. (Calcule los números leptónicos a ambos lados y demuestre que no son iguales en este caso.)

Cortesía de Lawrence Berkeley Laboratory, Universidad de California

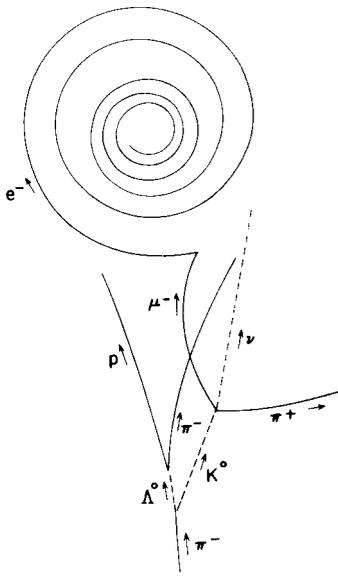


Figura 30.6 Este dibujo representa trazas de muchos eventos obtenidos al analizar una fotografía de cámara de burbujas. Las partículas extrañas Λ^0 y K^0 se forman (en el fondo) conforme π^- interactúa con un protón, de acuerdo con la interacción $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$. (Observe que las partículas neutras no dejan traza, como se indica mediante las líneas rayadas.) Λ^0 y K^0 decaen entonces de acuerdo con las interacciones $\Lambda^0 \rightarrow \pi + p$ y $K^0 \rightarrow \pi + \mu^- + \nu_\mu$.

Examen rápido

30.1 ¿Cuál de las siguientes reacciones no puede ocurrir?

- a) $p + p \rightarrow p + p + \bar{p}$
- b) $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- c) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- d) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

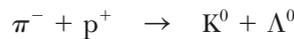
30.2 ¿Cuál de las siguientes reacciones no puede ocurrir?

- a) $p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$
- b) $\gamma + p \rightarrow n + \pi^0$
- c) $\pi^0 + n \rightarrow K^+ + \Sigma^-$
- d) $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$

Conservación de extrañeza

Las partículas K , Λ y Σ muestran propiedades inusuales en su producción y decaimiento y, por lo tanto, se llaman *partículas extrañas*.

Una propiedad inusual de las partículas extrañas es que siempre se producen en pares. Por ejemplo, cuando un pión choca con un protón, se producen dos partículas extrañas neutras con alta probabilidad (figura 30.6) después de la reacción:



Por otra parte, la reacción $\pi^- + p^+ \rightarrow K^0 + n$ nunca ha ocurrido, aun cuando no viola las leyes de conservación conocidas y la energía del pión es suficiente para iniciar la reacción.

La segunda característica peculiar de las partículas extrañas es que, aunque se producen mediante la interacción fuerte a razones altas, no decaen en partículas que interactúan vía la fuerza fuerte a una razón muy alta. En vez de ello, decaen muy lentamente, lo que es característico de la interacción débil. Sus vidas medias están en el rango de 10^{-10} s a 10^{-8} s; la mayoría de las demás partículas que interactúan vía la fuerza fuerte tienen vidas mucho más cortas en el orden de 10^{-23} s.

Para explicar estas inusuales propiedades de las partículas extrañas, se introdujo una ley llamada *conservación de extrañeza*, junto con un nuevo número cuántico S llamado **extrañeza**. En la tabla 30.2 se proporcionan los números extraños para algunas partículas. La producción de partículas extrañas en pares se explica al asignar $S = +1$ a una de las partículas y $S = -1$ a la otra. A todas las partículas no extrañas se les asigna extrañeza $S = 0$. El **ley de conservación de extrañeza** afirma que, siempre que ocurre una reacción nuclear o decaimiento, la suma de los números de extrañeza antes del proceso debe ser igual a la suma de los números de extrañeza después del proceso.

El lento decaimiento de las partículas extrañas se puede explicar al suponer que las interacciones fuerte y electromagnética obedecen a la ley de conservación de extrañeza, mientras que la interacción débil no lo hace. Puesto que la reacción de decaimiento involucra la pérdida de una partícula extraña, viola la conservación de extrañeza y, por lo tanto, avanza lentamente mediante la interacción débil.

Al verificar las reacciones para la adecuada conservación de extrañeza, se sigue el mismo procedimiento que con la conservación de los números bariónico y leptónico. Con la tabla 30.2, cuente la extrañeza de cada lado. Si los dos resultados son iguales, la reacción conserva extrañeza.

FÍSICA APLICADA 30.2 | **Rompimiento de las leyes de conservación**

Un estudiante afirma haber observado un decaimiento de un electrón en dos neutrinos que viajan en direcciones opuestas. ¿Qué leyes de conservación violaría este decaimiento?

EXPLICACIÓN Se violarían varias leyes de conservación. Se violaría la conservación de la carga eléctrica porque la carga negativa del electrón desaparece. La conservación del número leptón-electrón también se violaría porque hay un

leptón antes del decaimiento y dos después de él. Si ambos neutrinos fuesen neutrón-electrón, la conservación del número leptón-electrón se violaría en el estado final. Sin embargo, si uno de los neutrinos producto fuese distinto a un neutrón-electrón, se violaría otra ley de conservación leptónica porque no habría otros leptones en el estado inicial. En este decaimiento se obedecerían otras leyes de conservación. La energía se puede conservar; la energía en reposo del

electrón aparece como la energía cinética (y posiblemente alguna pequeña energía en reposo) de los neutrinos. Las direcciones opuestas de las velocidades de los dos neutrinos permiten la conservación de la cantidad de movimiento.

La conservación del número bariónico y la conservación de otros números leptónicos también se mantendría en este decaimiento. ■

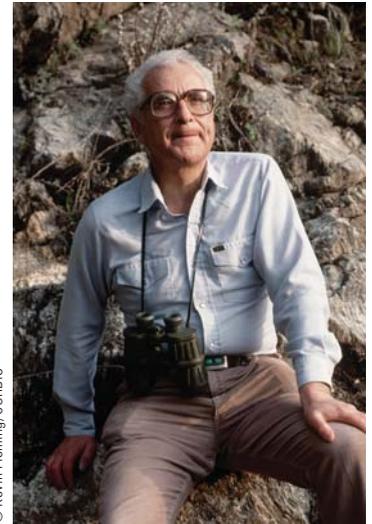
30.7 El método óctuple

Las cantidades como espín, número bariónico, número leptónico y extrañeza son etiquetas que se asocian con partículas. Se han propuesto muchos esquemas de clasificación que agrupan las partículas en familias con base en tales etiquetas. Primero, considere los primeros ocho bariones que se mencionan en la tabla 30.2, donde todos tienen espín $\frac{1}{2}$. La familia consiste del protón, el neutrón y otras seis partículas. Si grafica su extrañeza contra su carga en un sistema coordenado inclinado, como en la figura 30.7a, surge un patrón fascinante: seis de los bariones forman un hexágono y los dos restantes están en el centro del hexágono. (Las partículas con número cuántico de espín $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$ se llaman *fermiones*.)

Ahora considere la familia de mesones que se menciona en la tabla 30.2 con espines cero. (Las partículas con número cuántico de espín 0 o 1 se llaman *bosones*.) Si cuenta tanto partículas como antipartículas, existen nueve de tales mesones. La figura 30.7b es una gráfica de extrañeza contra carga para esta familia. De nuevo, surge un fascinante patrón hexagonal. En este caso las partículas en el perímetro del hexágono yacen opuestas a sus antipartículas y las tres restantes (que forman sus propias antipartículas) están en su centro. Éstos y otros patrones simétricos relacionados, llamados **método óctuple**, se propusieron de manera independiente en 1961 por parte de Murray Gell-Mann y Yuval Ne'eman.

Los grupos de bariones y mesones se pueden desplegar en muchos otros patrones simétricos dentro del marco del método óctuple. Por ejemplo, la familia de bariones de espín $\frac{3}{2}$ contiene diez partículas ordenadas en un patrón como los diez pinos en una línea de boliche. Después de proponer el patrón, faltaba una de las partículas; tenía que descubrirse. Gell-Mann predijo que la partícula faltante, que él llamó *omega menos* (Ω^-), debe tener un espín de $\frac{3}{2}$, una carga de -1 , una extrañeza de -3 y una masa aproximada de $1680 \text{ MeV}/c^2$. Poco después, en 1964, científicos en el Brookhaven National Laboratory descubrieron la partícula faltante a través de un cuidadoso análisis de fotografías de cámara de burbujas y confirmaron todas sus propiedades predichas.

Los patrones del método óctuple en el campo de la física de partículas tienen mucho en común con la tabla periódica. Siempre que ocurre una vacante (una partícula o elemento faltante) en los patrones organizados, los experimentadores tienen una guía para sus investigaciones.



Murray Gell-Mann
Físico estadounidense (n. 1929)

Gell-Mann ganó el Premio Nobel de Física en 1969 por sus estudios teóricos que tratan con partículas subatómicas.

30.8 Quarks y color

Aunque los leptones parecen ser partículas verdaderamente elementales, sin tamaño o estructura mensurable, los hadrones son más complejos. Existe fuerte evidencia, incluida la dispersión de electrones del núcleo, de que los hadrones están compuestos de partículas más elementales llamadas quarks.

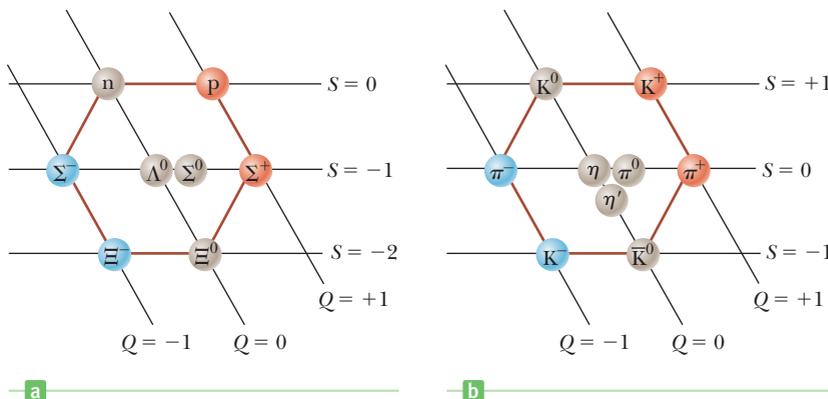


Figura 30.7 a) Patrón óctuple hexagonal para los ocho bariones de espín $\frac{1}{2}$. Esta gráfica de extrañeza contra carga usa un eje horizontal para los valores de extrañeza S , más un eje inclinado para el número de carga Q . b) El patrón óctuple para los nueve mesones de espín 0.

Tabla 30.3 Propiedades de los quarks y antiquarks

Quarks								
Nombre	Símbolo	Espín	Carga	Número bariónico	Extrañeza	Encanto	Bottomness	Topness
Up (arriba)	u	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Down (abajo)	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Strange (extraño)	s	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
Charmed (encanto)	c	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
Bottom (fondo)	b	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
Top (cima)	t	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

Antiquarks								
Nombre	Símbolo	Espín	Carga	Número bariónico	Extrañeza	Encanto	Bottomness	Topness
Anti-up (antiarriba)	\bar{u}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-down (antiabajo)	\bar{d}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
Anti-strange (antiextraño)	\bar{s}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	+1	0	0	0
Anti-charmed (antiencanto)	\bar{c}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	-1	0	0
Anti-bottom (antifondo)	\bar{b}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
Anti-top (anticima)	\bar{t}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1

Tabla 30.4 Composición de quarks de varios hadrones

Partícula	Composición de quarks
Mesones	
π^+	$\bar{d}u$
π^-	$\bar{u}d$
K^+	$\bar{s}u$
K^-	$\bar{u}s$
K^0	$\bar{s}d$
Bariones	
p	uud
n	udd
Λ^0	uds
Σ^+	uus
Σ^0	uds
Σ^-	dds
Ξ^0	uss
Ξ^-	dss
Ω^-	sss

El modelo de quarks

De acuerdo con el modelo de quarks, todos los hadrones son sistemas compuestos de dos o tres de seis constituyentes fundamentales llamados **quarks**. Estos seis quarks reciben los nombres arbitrarios *up* (arriba), *down* (abajo), *strange* (extraño), *charmed* (encanto), *bottom* (fondo) y *top* (cima), que se designan mediante las letras u, d, s, c, b y t.

Los quarks tienen cargas eléctricas fraccionarias, junto con otras propiedades, como se muestra en la tabla 30.3. Asociado con cada quark hay un antiquark con carga, número bariónico y extrañeza opuestos. Los mesones consisten de un quark y un antiquark, mientras que los bariones consisten de tres quarks.

La tabla 30.4 menciona las composiciones de quark de varios mesones y bariones. Observe que sólo dos de los quarks, u y d, están contenidos en todos los hadrones que se encuentran en la materia ordinaria (protones y neutrones). El tercer quark, s, sólo se necesita para construir partículas extrañas con una extrañeza de +1 o de -1. La figura 30.8 es una representación gráfica de las composiciones de quarks de varias partículas.

Los quarks encanto, fondo y cima son más masivos que los otros quarks y ocurren en interacciones de mayor energía. Cada uno tiene su propio número cuántico, llamado encanto, *bottomness* y *topness*, respectivamente. Un ejemplo de un hadrón formado a partir de estos quarks es la partícula J/Ψ , también llamada *charmonium* (algo así como “encantonio”), que está compuesta de un quark encanto y un quark antiencanto, $c\bar{c}$.

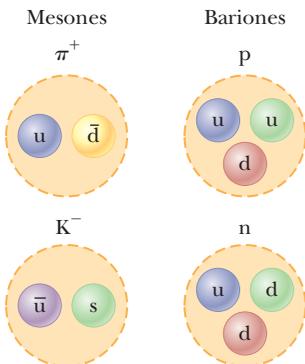


Figura activa 30.8 Composiciones de quarks de dos mesones y dos bariones. Observe que los mesones a la izquierda contienen dos quarks y que los bariones a la derecha contienen tres quarks.

■ FÍSICA APLICADA 30.3 Conservación de número mesónico

Usted ya estudió una ley de conservación del número leptónico y una ley de conservación del número bariónico. ¿Por qué no hay una ley de conservación del número mesónico?

EXPLICACIÓN Esta pregunta se puede responder desde el punto de vista de la reacción de partes partículas-antipartículas a partir de la energía disponible. Si la energía se convierte a energía en reposo de un par leptón-antileptón, no hay un cambio neto en el número leptónico porque el leptón tiene

un número leptónico de +1 y el antileptón de -1. La energía también se podría transformar en la energía en reposo de un par barión-antibarión. El barión tiene número bariónico +1, el antibarión -1 y no hay cambio neto en el número bariónico.

Ahora suponga que la energía se transforma en energía en reposo de un par quark-antiquark. Por definición, en la teoría de los quarks, un par quark-antiquark es un mesón. Por lo tanto, en esta reacción, el número de mesones aumenta de cero a uno, de modo que el número mesónico no se conserva. ■

Color

Los quarks tienen otra propiedad llamada **color** o **carga de color**. Esta propiedad no es color en el sentido visual; más bien, sólo es una etiqueta para algo análogo a la carga eléctrica. Se dice que los quarks vienen en tres colores: rojo, verde y azul. Los antiquarks tienen las propiedades antirrojo, antivermde y antiazul.

El color se definió porque algunas combinaciones de quarks parecían violar el principio de exclusión de Pauli. Un ejemplo es la partícula omega menos (Ω^-), que consiste de tres quarks extraños, sss, que tienen todos espín arriba, lo que da un espín de $\frac{3}{2}$. Se supone que cada quark extraño tiene un color diferente y, por ende, está en un estado cuántico distinto, lo que satisface el principio de exclusión.

En general, las combinaciones de quarks deben ser “incolores”. Un mesón consiste en un quark de un color y un antiquark del anticolor correspondiente. Los bariones deben consistir de un quark rojo, uno verde y uno azul, o sus anticolores.

La teoría de cómo interactúan los quarks unos con otros mediante la carga de color se llama **Cromodinámica Cuántica**, o QCD, por sus siglas en inglés, para hacer paralelo a la electrodinámica cuántica (la teoría de interacción entre cargas eléctricas). La fuerza fuerte entre quarks con frecuencia se denomina **fuerza de color**. La fuerza se transporta mediante partículas sin masa llamadas **gluones** (que son análogas a fotones para la fuerza electromagnética). De acuerdo con la QCD, existen ocho gluones, todos con carga de color y sus antigluones. Cuando un quark emite o absorbe un gluón, cambia su color. Por ejemplo, un quark azul que emite un gluón puede convertirse en un quark rojo y un quark rojo que absorbe este gluón se convierte en un quark azul. La fuerza de color entre quarks es análoga a la fuerza eléctrica entre cargas: colores iguales se repelen y colores opuestos se atraen. Por lo tanto, dos quarks rojos se repelen mutuamente, pero un quark rojo atraerá un quark antirrojo. La atracción entre quarks de color opuesto para formar un mesón ($q\bar{q}$) se indica en la figura 30.9a.

Quarks de colores diferentes también se atraen mutuamente, pero con menos intensidad que colores opuestos de quark y antiquark. Por ejemplo, un cúmulo de quarks rojo, azul y verde se atraen todos unos a otros para formar bariones, como se indica en la figura 30.9b. Todo barión contiene tres quarks de tres colores diferentes.

Aunque la fuerza de color entre dos hadrones de color neutro (como un protón y un neutrón) es despreciable a grandes separaciones, la fuerza fuerte de color entre sus quarks constituyentes no se cancela exactamente a separaciones pequeñas de más o menos 1 fm. **Esta fuerza fuerte residual de hecho está en la fuerza nuclear que enlaza protones y neutrones para formar núcleos.** Es similar a la fuerza electromagnética residual que enlaza átomos neutros en las moléculas.

Tip 30.2 El color realmente no es color

Cuando se usa la palabra *color* para describir un quark, no tiene nada que ver con la sensación visual de la luz. Simplemente es un nombre conveniente para una propiedad análoga a la carga eléctrica.

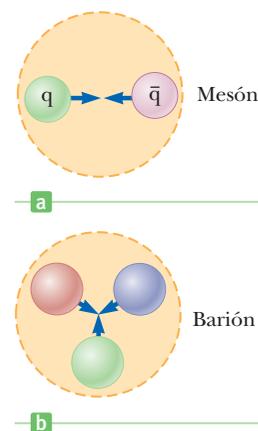


Figura 30.9 a) Un quark verde ha atraído a un quark antivermde para formar un mesón con estructura de quark ($q\bar{q}$). b) Quarks de tres colores diferentes se atraen mutuamente para formar un barión.

30.9 Teoría electrodébil y el modelo estándar

Recuerde que la interacción débil es una fuerza de rango extremadamente corto que tiene una distancia de interacción de aproximadamente 10^{-18} m. Tal interacción de corto alcance implica que las partículas cuantizadas que portan el campo débil (los bosones W^+ , W^- y Z^0 de espín 1) son extremadamente masivas, como de hecho es el caso. ¡Estos sorprendentes bosones se pueden considerar como partículas puntuales sin estructura tan masiva como átomos de kriptón! La interacción débil es responsable del decaimiento de los quarks c, s, b y t en los quarks u y d más ligeros y más estables, así como del decaimiento de los masivos leptones μ y τ en electrones (más ligeros). **La interacción débil es muy importante porque gobierna la estabilidad de las partículas básicas de la materia.**

Una misteriosa característica de la interacción débil es su falta de simetría, en especial cuando se le compara con el alto grado de simetría que muestran las interacciones fuerte, electromagnética y gravitacional. Por ejemplo, la interacción débil, a diferencia de la interacción fuerte, no es simétrica bajo reflexión especular o intercambio de carga. (*Reflexión especular* significa que todas las cantidades en una reacción de partículas dada se

CERN



Un ingeniero prueba la electrónica asociada a un imán superconductor en el Gran Colisionador de Hadrones en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, dirigido por el CERN. (El acrónimo de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, y se ha mantenido a pesar de que “Conseil”, o “Consejo”, ha sido sustituido por “Organización”.)

intercambian como si se reflejaran en un espejo: izquierda por derecha, un movimiento hacia el espejo para un movimiento hacia afuera y así por el estilo. *Intercambio de carga* significa que todas las cargas eléctricas en una reacción de partículas se convierten en sus opuestas: todas las positivas en negativas, y viceversa.) Sin simetría significa que la reacción con todas las cantidades cambiadas ocurre con menos frecuencia que la reacción directa. Por ejemplo, el decaimiento de K^0 , que está gobernado por la interacción débil, no es simétrico bajo intercambio de carga porque la reacción $K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \bar{\nu}_e$ ocurre con mucha más frecuencia que la reacción $K^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$.

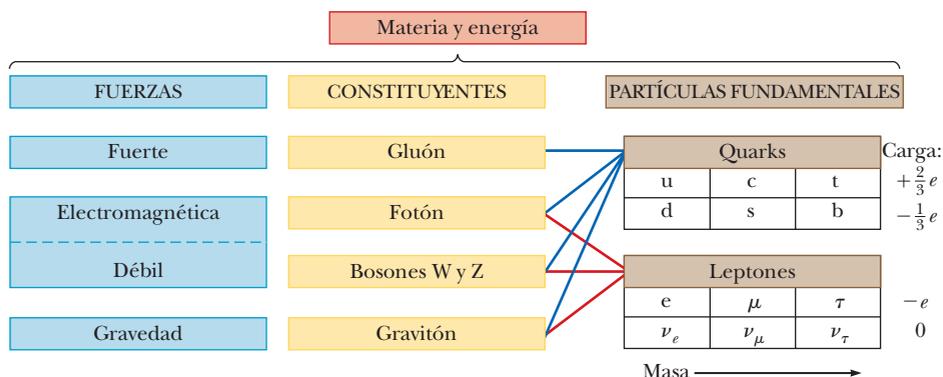
La **teoría electrodébil** unifica las interacciones electromagnética y débil. Esta teoría postula que las interacciones débil y electromagnética tienen la misma intensidad a energías de partícula muy altas y son diferentes manifestaciones de una sola interacción electrodébil unificadora. El fotón y los tres bosones masivos (W^\pm y Z^0) juegan papeles clave en la teoría electrodébil. La teoría realiza muchas predicciones concretas, como la predicción de las masas de las partículas W y Z en aproximadamente 82 y $93 \text{ GeV}/c^2$, respectivamente. Estas predicciones se han comprobado en forma experimental.

La combinación de la teoría electrodébil y la QCD para la interacción fuerte forma lo que se conoce en física de altas energías como **Modelo estándar**. Aunque los detalles del Modelo estándar son complejos, sus ingredientes esenciales se pueden resumir con la ayuda de la figura 30.10. La fuerza fuerte, mediada por gluones, mantiene unidos a los quarks para formar partículas compuestas como protones, neutrones y mesones. Los leptones sólo participan en las interacciones electromagnética y débil. La fuerza electromagnética está medida por fotones, y la fuerza débil está medida por los bosones W y Z. Observe que todas las fuerzas fundamentales están mediadas por bosones (partículas con espín 1) que tienen propiedades dadas, en gran medida, por las simetrías involucradas en las teorías.

Sin embargo, el Modelo estándar no responde todas las preguntas. Una gran pregunta es por qué el fotón no tiene masa, aunque los bosones W y Z sí la tienen. Debido a esta diferencia de masa, las fuerzas electromagnética y débil son muy diferentes a bajas energías, pero se vuelven similares en naturaleza a energías muy altas, donde las energías en reposo de los bosones W y Z son fracciones insignificantes de sus energías totales. Este comportamiento durante la transición de energías altas a bajas, llamado **rompimiento de simetría**, no responde la pregunta del origen de las masas de las partículas. Para resolver este problema, se ha propuesto una partícula hipotética, llamada **bosón de Higgs**, que proporciona un mecanismo para romper la simetría electrodébil y conferir diferentes masas de partícula a diferentes partículas. El Modelo estándar, incluido el mecanismo de Higgs, proporciona una explicación lógicamente consistente de la naturaleza masiva de los bosones W y Z. Por desgracia, el bosón de Higgs todavía no se descubre, pero los físicos predicen que su masa debe ser menor que $1 \text{ TeV}/c^2$ (10^{12} eV).

A partir del éxito de la teoría electrodébil, los científicos intentaron combinarla con la QCD en una **gran teoría unificada** (GTU). En este modelo, la fuerza electrodébil surgió con la fuerza de color fuerte para formar una gran fuerza unificada. Una versión de la teoría considera a leptones y quarks como miembros de la misma familia que pueden cambiar uno en otro mediante el intercambio de una partícula adecuada. Muchas teorías GTU

Figura 30.10 El Modelo estándar de la física de partículas.



predicen que los protones son inestables y decaerán con una vida de aproximadamente 10^{31} años, un periodo mucho mayor que la edad del Universo. Sin embargo, todavía no se observan decaimientos de protón.

30.10 La conexión cósmica

De acuerdo con la teoría del Big Bang, el Universo explotó a partir de una singularidad infinitamente densa hace aproximadamente 15 mil a 20 mil millones de años. Los primeros minutos después del Big Bang vieron tales extremos de energía que se cree que las cuatro interacciones de la física estaban unificadas y toda la materia estaba contenida en una “sopa de quarks” indiferenciada.

En la figura 30.11 se muestra la evolución de las cuatro fuerzas fundamentales desde el Big Bang hasta el presente. Durante los primeros 10^{-43} s (la época ultracaliente, con $T < 10^{32}$ K), las fuerzas fuerte, electrodébil y gravitacional se unieron para formar una fuerza completamente unificada. En los primeros 10^{-35} s después del Big Bang (la época caliente, con $T < 10^{29}$ K), la gravedad se liberó de esta unificación y las fuerzas fuerte y electrodébil permanecieron como una, descritas por una gran teoría unificada. Durante este periodo las energías de las partículas eran tan grandes ($> 10^{16}$ GeV) que existían partículas muy masivas, así como quarks, leptones y sus antipartículas. Luego, después de 10^{-8} s, el Universo se expandió rápidamente y se enfrió (la época tibia, con $T < 10^{10}$ a 10^{15} K), las fuerzas fuerte y electrodébil se separaron y el esquema de gran unificación se rompió. Conforme el Universo continuó enfriándose, la fuerza electrodébil se dividió en la fuerza débil y la fuerza electromagnética aproximadamente 10^{-10} s después del Big Bang.



Cortesía de AIP, Emilio Segre Visual Archives

George Gamow Físico ruso (1904-1968)

Gamow y dos de sus estudiantes, Ralph Alpher y Robert Herman, fueron los primeros en tomar en serio la primera media hora del Universo. En un artículo publicado en 1948, que en su mayor parte se pasó por alto, realizaron predicciones cosmológicas verdaderamente notables. Calcularon correctamente la abundancia de hidrógeno y helio después de la primera media hora (75% H y 25% He) y predijeron que la radiación del Big Bang todavía debe estar presente y tener una temperatura aparente de más o menos 5 K.

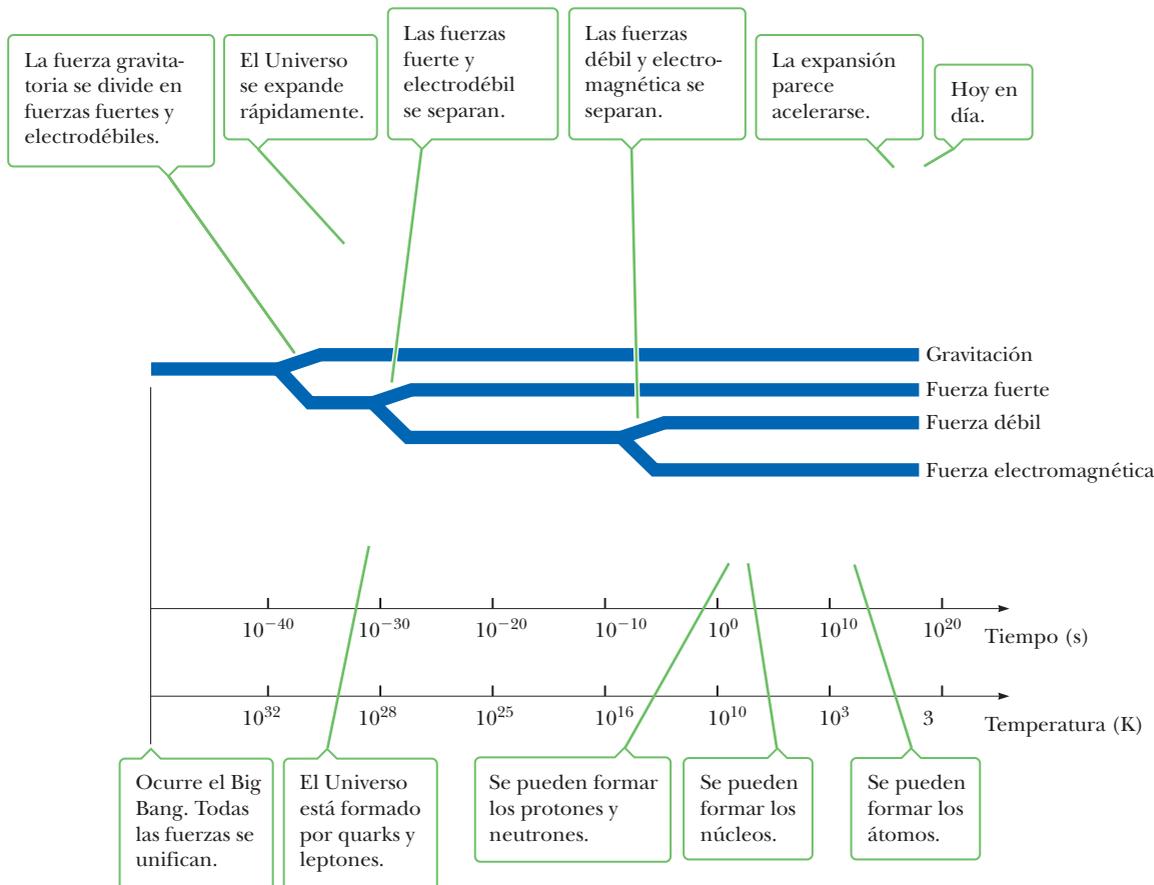


Figura 30.11 Breve historia del Universo, desde el Big Bang hasta el presente. Las cuatro fuerzas se volvieron distinguibles durante el primer microsegundo. Luego, todos los quarks se combinaron para formar partículas que interactuaron vía la fuerza fuerte. Sin embargo, los leptones permanecieron separados y hasta este día existen como partículas observables de manera individual.

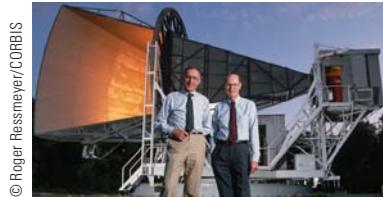


Figura 30.12 Robert W. Wilson (izquierda) y Arno A. Penzias (derecha), con la antena corno-reflector de los Bell Telephone Laboratories.

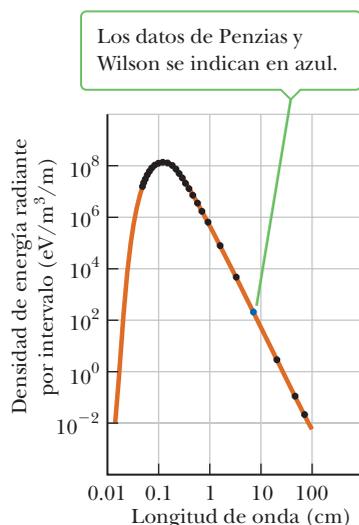


Figura 30.13 Espectros de radiación de cuerpo negro teórico (curva café) y medido (puntos negros) del Big Bang. La mayoría de los datos se recolectaron del satélite Cosmic Background Explorer (COBE, Explorador de Fondo Cósmico). Se indican los datos de Wilson y Penzias.

Después de algunos minutos, los protones se condensaron a partir de la sopa caliente. Durante media hora, el Universo experimentó detonación termonuclear y explotó como una bomba de hidrógeno y produjo la mayoría de los núcleos de helio presentes en la actualidad. El Universo continuó expandiéndose y su temperatura cayó. Hasta alrededor de 700 000 años después del Big Bang, el Universo estuvo dominado por radiación. La radiación energética evitó que la materia formara átomos de hidrógeno individuales porque las colisiones instantáneamente ionizarían cualquier átomo que pudiera formarse. Los fotones experimentaron continua dispersión Compton a partir del gran número de electrones libres, lo que resultó en un Universo que era opaco a la radiación. Para cuando el Universo tenía más o menos 700 000 años de antigüedad, se había expandido y enfriado a aproximadamente 3000 K. Ahora los protones se podían enlazar a los electrones para formar átomos de hidrógeno neutros y súbitamente el Universo se volvió transparente a los fotones. La radiación ya no dominó el Universo y aglomeraciones de materia neutra crecieron de manera estable: primero átomos, después moléculas, nubes de gas, estrellas y finalmente galaxias.

Observación de la radiación de la bola de fuego primordial

En 1965, Arno A. Penzias (n. 1933) y Robert W. Wilson (n. 1936), de los Laboratorios Bell, hicieron un sorprendente descubrimiento mientras probaban un sensible receptor de microondas. Una molesta señal que producía un débil siseo de fondo interfería con sus experimentos de satélites de comunicaciones. A pesar de todos sus esfuerzos, la señal permanecía. A final de cuentas, se volvió claro que estaban observando radiación de microondas de fondo (a una longitud de onda de 7.35 cm) que representa el “brillo” remanente del Big Bang.

En la figura 30.12 se muestra el “cuerno” de microondas que sirvió como su antena receptora. La intensidad de la señal detectada permaneció sin variar conforme la antena se apuntaba en diferentes direcciones. La radiación tenía igual intensidad en todas direcciones, lo que sugirió que todo el Universo era la fuente de esta radiación.

Experimentos posteriores de otros grupos agregaron datos de intensidad a diferentes longitudes de onda, como se muestra en la figura 30.13. Los resultados confirmaron que la radiación era la de un cuerpo negro a 2.9 K. Esta cifra acaso es la evidencia más clara para la teoría del Big Bang.

Se descubrió que la radiación de fondo cósmico era demasiado uniforme para conducir al desarrollo de las galaxias. En 1992, después de un estudio que utilizó el Explorador de Fondo Cósmico, o COBE, por sus siglas en inglés, se descubrieron ligeras irregularidades en el fondo cósmico. Se cree que dichas irregularidades son las semillas de la formación de las galaxias.

30.11 Preguntas sin respuesta en cosmología

En la última década, los nuevos datos han planteado preguntas que muchos consideran como las más importantes de la ciencia de hoy. El tema es la composición del Universo, que está estrechamente ligada a su destino final. Una de estas preguntas se refiere a la velocidad a la que orbitan las estrellas de la galaxia, explicada por un material postulado llamado **materia oscura**. Aunque la evidencia de su existencia fue descubierta por Fritz Zwicky en 1933, sólo recientemente se ha vuelto un campo dominante de la investigación. La otra pregunta implica la expansión acelerada del Universo descubierta en 1998, atribuida a un material igualmente misterioso llamado **energía oscura**.

Materia oscura

Cuando se miden las velocidades de las estrellas de nuestra galaxia, se encuentra que están viajando demasiado rápido como para mantenerse unidas por la gravedad de la Vía Láctea si la masa de la galaxia es debida a que se encuentra en estrellas luminosas. La figura 30.14a muestra la comparación de la velocidad con la curva de distancia radial de los cuerpos orbitando al Sol. A medida que la distancia desde el Sol aumenta, la velocidad de los cuerpos planetarios disminuye, a consecuencia de la ley del cuadrado inverso de la gravitación. La figura 30.14b, por el contrario, muestra la curva de velocidad de las

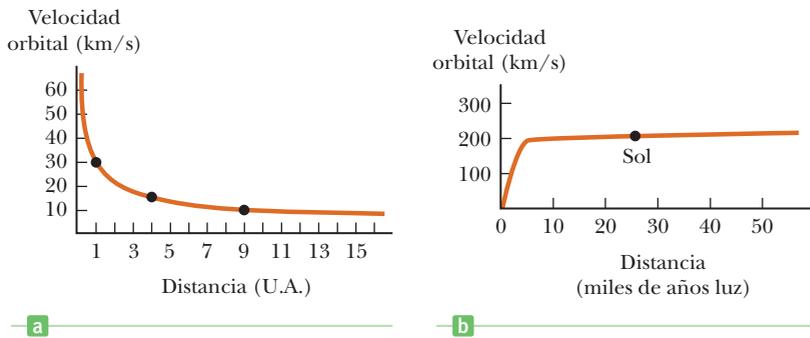


Figura 30.14 a) Velocidad frente a la curva de distancia radial de los cuerpos orbitando alrededor del Sol. b) Curva de velocidad de las estrellas en la Vía Láctea.

estrellas en la Vía Láctea. La curva aumenta y se aplanan, pero no decrece, lo que significa que las estrellas están viajando mucho más rápido de lo esperado, principalmente bajo la influencia de la gravedad de las estrellas visibles. Viajando más rápido de lo esperado que la velocidad de escape galáctico, las estrellas deben salir de la galaxia, sin embargo, permanecen en sus órbitas. Observaciones similares se han hecho de estrellas en otras galaxias.

Dos teorías generales se han propuesto para explicar el comportamiento de las estrellas moviéndose demasiado rápido: o hay una nueva forma de materia oscura que no ha sido observada directamente, o la ley de la gravedad debe ser más fuerte que el inverso de la distancia al cuadrado. A partir del perfil de velocidad de las estrellas, 90% de la materia de la galaxia estaría compuesto por la materia oscura hipotética. Entre los candidatos a materia oscura están los neutrinos, que debido a “la oscilación de neutrinos”, la espontánea evolución de un tipo de neutrino en otro, ahora se piensa que tienen masa. Todas las estrellas emiten enormes cantidades de neutrinos por segundo, así que si los neutrinos tenían incluso una pequeña masa, podrían explicar la materia oscura. Otro candidato hipotético es un WIMP, una partícula masiva de interacción débil (*weakly interacting massive particle*) dejada por el Big Bang. Dado que las otras galaxias tienen curvas de rotación similares a la de la Vía Láctea, es muy posible que la materia oscura predomine sobre la materia ordinaria del Universo en general.

La principal explicación alternativa para las curvas de rotación galáctica es que la ley de gravitación de Newton no se cumple a través de distancias grandes. Esa teoría, llamada Dinámica Newtoniana Modificada (MOND, por sus siglas en inglés), ha recibido una gran atención, pero hasta ahora no ha funcionado lo suficientemente bien como para ganar la aceptación generalizada. Algunos investigadores también han tratado de dar cuenta de las curvas de rotación de las galaxias mediante el uso de la teoría de la relatividad de Einstein, la relatividad general. Por último, es muy posible que la teoría correcta pueda requerir dos nuevos tipos de materia y una modificación de la teoría de la gravedad.

La energía oscura y la aceleración del Universo

En 1998 dos grupos de astrónomos, uno liderado por Brian Schmidt y Adam Riess y el otro por Saul Perlmutter, habían hecho nuevas mediciones de alta precisión de las distancias a otras galaxias usando supernovas de Tipo Ia. Estas observaciones demostraron que el Universo se expande y acelera al mismo tiempo. La expansión acelerada no puede ser causada por la materia normal, ni por la materia oscura, ya que ejercen una fuerza gravitacional de atracción. En su lugar, se cree que un nuevo tipo de materia, llamada **energía oscura**, ejerce una fuerza repulsiva que hace que el Universo se expanda más rápidamente de lo predicho por la teoría de la relatividad general de Einstein. La figura 30.15 muestra las proporciones de la teoría de la materia, la materia y energía oscuras. Los átomos normales, el tipo del que estamos hechos, sólo representan alrededor de 4% del Universo, mientras que aproximadamente 23% es materia oscura y 73% es energía oscura.

Einstein introdujo una constante cosmológica en su teoría de la relatividad general con el fin de explicar por qué el Universo parece no cambiar con el tiempo. La constante cosmológica siempre es una fuerza de repulsión suficiente para evitar que la materia del Universo se derrumbe bajo la influencia atractiva de la gravedad. Cuando las observaciones de Edwin Hubble del corrimiento de las galaxias hacia el rojo lo llevaron a la noción

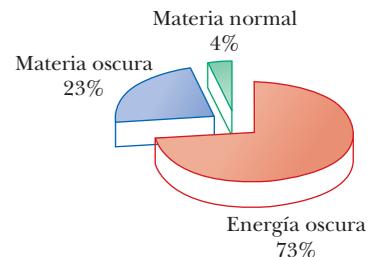


Figura 30.15 La teoría de la composición del Universo. La materia normal, que se encuentra en la Tierra y el Sol, representa sólo el 4% de la materia en el Universo. El material desconocido que causa mayor atracción gravitatoria en la escala de la galaxia es llamada materia oscura, mientras que el material desconocido que de manera similar causa la expansión acelerada del Universo es llamada energía oscura.

de un Universo de expansión dinámica, Einstein llamó la constante cosmológica como “el mayor error” de su vida. La misma constante cosmológica ahora puede producir un buen modelo del Universo en aceleración, convirtiendo su “error” en una especie de triunfo. Sin embargo, la constante cosmológica no resuelve completamente el misterio, debido a que no se ha explicado el origen de ésta. Como en el caso de las curvas de rotación galáctica, no se sabe si la aceleración del Universo es una consecuencia de una nueva forma de materia o energía, o una indicación de que las teorías estándar de la cosmología derivada de la relatividad general necesitan modificarse.

La evolución y el destino del Universo

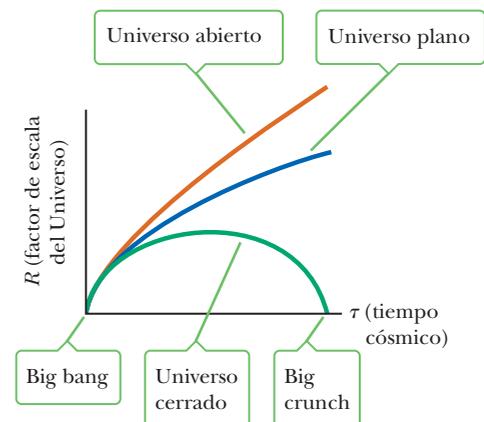
Existen preguntas que permanecen sin responder sobre el origen y la evolución temprana del Universo. Aunque el modelo del Big Bang explica por qué las galaxias parecen estar alejándose de nosotros, varios problemas han surgido de observaciones que no pueden ser completamente explicadas sólo por la hipótesis del Big Bang.

En primer lugar, el Universo, medido por la temperatura de fondo de microondas, es muy uniforme. Es como si el Universo entero se encontrara en equilibrio. Para que un sistema esté en equilibrio, sus componentes deben ser capaces de intercambiar energía, llegando después de un cierto tiempo a una temperatura uniforme. ¿Cómo podría lograrse este equilibrio, sin embargo, cuando las diferentes partes del Universo están tan separadas una de otra que no es posible el intercambio de energía? Este misterio se llama el problema del horizonte.

En segundo lugar, las medidas del fondo cósmico de microondas sugieren que el Universo tiene una geometría plana. La figura 30.16 muestra el estándar de tres destinos del Universo, que se derivan de la teoría de la relatividad general de Einstein, al graficar el factor de expansión, R , en función del tiempo cósmico. El factor de expansión puede ser pensado para dar una medida del tamaño del Universo, igual que un radio cósmico. Un Universo plano se expandirá para siempre, aunque en el límite cuando el tiempo tiende a infinito, la velocidad de expansión disminuye gradualmente a cero. Un Universo plano, sin embargo, es un estado de equilibrio inestable, como un lápiz parado en su punta. Con una pequeña desviación de un modo u otro, el Universo se colapsaría de nuevo como en la curva inferior de la figura 30.16, o se expandiría para siempre como en la curva superior de la figura 30.16. Para ser plano ahora, el Universo tuvo que ser plano también al principio con una precisión extremadamente alta. Es un extremo improbable que el Universo fuera tan finamente sintonizado al principio de su evolución. Esa puesta a punto se le llama el problema de la planitud.

Un tercer problema surge cuando las teorías de partículas se combinan con la cosmología. Los estudios sobre el modelo estándar de física de partículas en el Universo temprano muestran que un gran número de monopolos magnéticos se crearon en los inicios del Universo, por lo que muchos cientos de miles de ellos pasan a través de nuestros cuerpos

Figura 30.16 Los tres destinos del Universo, de acuerdo con la teoría de la relatividad general de Einstein. Con una cantidad suficiente de la materia atractiva, el Universo se expandiría al principio, pero eventualmente colapsará en un “big crunch”. Un Universo plano se expandiría para siempre, con la expansión desacelerando a cero en el límite cuando τ tiende a infinito. El Universo hiperbólico (o abierto) se acelera para siempre. Un Universo de energía oscura, o equivalente, debido a una constante cosmológica positiva, sería similar al Universo hiperbólico, pero la curva iría hacia arriba.



cada segundo. Los monopolos magnéticos son pequeños imanes que consisten en un aislado Norte o el Polo Sur, y a pesar de los cálculos de la predicción de que sean comunes, que nunca han sido observados. Eso se llama el problema monopolo.

En 1981, Alan Guth, ahora en el MIT, propuso el modelo inflacionario del Universo para resolver estos tres problemas, con un solo mecanismo. En este modelo, un campo aún no identificado llamado **campo de inflación**, es causado por el Universo al entrar en una inflación exponencial muy rápida, aumentando 10^{32} veces el tamaño de una pequeña fracción de segundo.

Esta expansión acelerada del Universo muy temprano resolvería el problema del monopolo, haciéndolo tan diluido que muy pocos existirían en el Universo observable. Además, debido a que el Universo era mucho más pequeño justo antes de la inflación, estaría en equilibrio térmico y, en consecuencia, después de la expansión seguirá siendo similar en todos los lugares y en todas las direcciones, resolviendo el problema del horizonte. Por último, la rápida inflación podría causar que la curvatura del espacio-tiempo pareciera volverse plana, al igual que la Tierra parece plana a aquéllos que están en su superficie debido a que sólo una porción muy pequeña de toda la Tierra es visible en una determinada localidad. Esto resuelve el problema de la planitud.

Después de la breve época inflacionaria del Universo podría continuar expandiéndose con normalidad. Considerando que no hay pruebas definitivas de que el Universo inflacionario es correcto, actualmente es la hipótesis de trabajo más aceptada para saber cómo evolucionó el Universo temprano. Algunos investigadores han tratado de combinar la inflación y la energía oscura en una única teoría llamada “quinta esencia”. Hasta la fecha, sin embargo, ninguna teoría que explique los orígenes de la inflación temprana o la aceleración universal tardía ha encontrado un apoyo general entre los cosmólogos.

30.12 Problemas y perspectivas

Mientras que los físicos de partículas exploran el reino de lo muy pequeño, los cosmólogos exploran la historia cósmica de vuelta al primer microsegundo del Big Bang. La observación de los eventos que ocurren cuando dos partículas chocan en un acelerador es esencial para reconstruir los primeros momentos de la historia cósmica. Acaso la clave para comprender el Universo temprano sea primero entender el mundo de las partículas elementales.

La comprensión de la física a distancias cortas y grandes está lejos de ser completa. Los físicos de partículas enfrentan muchas preguntas sin responder. ¿Por qué hay tan poca antimateria en el Universo? ¿Los neutrinos tienen una masa pequeña y, si es así, cuánto aportan a la “materia oscura” que mantiene unido gravitacionalmente al Universo? ¿Cómo se pueden entender las más recientes mediciones astronómicas, que muestran que la expansión del Universo es acelerada y que acaso exista un tipo de “fuerza antigravedad”, o energía oscura, que actúa entre galaxias enormemente separadas? ¿Es posible unificar las teorías fuerte y electrodébil en una forma lógica y consistente? ¿Por qué los quarks y los leptones forman tres familias similares pero distintas? ¿Los muones son lo mismo que los electrones (aparte de sus masas diferentes), o tienen sutiles diferencias que no se han detectado? ¿Por qué algunas partículas tienen carga y otras son neutras? ¿Por qué los quarks portan una carga fraccional? ¿Qué determina las masas de las partículas elementales? Las preguntas siguen y siguen. Debido al rápido avance y los nuevos descubrimientos en los campos relacionados de física de partículas y cosmología, para cuando usted lea este libro acaso algunas de estas preguntas se hayan resuelto y otras hayan surgido.

Una pregunta importante que continúa es si los leptones y los quarks tienen una subestructura. Muchos físicos creen que las cantidades fundamentales no son puntos infinitesimales, sino cuerdas vibratorias extremadamente pequeñas. Sin embargo, a pesar de más de tres décadas de investigación en teoría de cuerdas por parte de miles de físicos, todavía no se encuentra una Teoría final del Todo. Si hay un límite al conocimiento, es una pregunta abierta.

RESUMEN**30.1 Fisión nuclear**

En la **fisión nuclear** la masa total de los productos siempre es menor que la masa original de los reactantes. La fisión nuclear ocurre cuando un núcleo pesado se divide, o fisiona, en dos núcleos más pequeños. La masa perdida se transforma en energía, radiación electromagnética y la energía cinética de las partículas hijas.

Un **reactor nuclear** es un sistema diseñado para mantener una reacción en cadena autosostenida. Los reactores nucleares que usan eventos de fisión controlados en la actualidad se utilizan para generar energía eléctrica. Un parámetro útil para describir el nivel de operación del reactor es la constante de reproducción K , que es el número promedio de neutrones de cada evento de fisión que causará otro evento. Una reacción autosostenida se logra cuando $K = 1$.

30.2 Fusión nuclear

En la fusión nuclear dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado. Este tipo de reacción nuclear ocurre en el Sol, asistido por un proceso de tunelamiento cuántico que ayuda a las partículas a pasar a través de la barrera de Coulomb.

Los eventos de fusión controlados ofrecen la esperanza de abundante suministro de energía en el futuro. El reactor de fusión nuclear es considerado por muchos científicos como la fuente máxima de energía, porque su combustible es el agua. El **criterio de Lawson** afirma que un reactor de fusión proporcionará una salida de potencia neta si el producto de la densidad de iones en el plasma n y el tiempo de confinamiento del plasma τ satisfacen las siguientes relaciones:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-tritio}$$

$$n\tau \geq 10^{16} \text{ s/cm}^3 \quad \text{Interacción deuterio-deuterio} \quad [30.5]$$

30.3 Partículas elementales y las fuerzas fundamentales

Existen cuatro fuerzas fundamentales de la Naturaleza: las fuerzas **fuerte** (hadrónica), **electromagnética**, **débil** y **gravitatoria**. La fuerza fuerte es aquella entre nucleones que mantiene unidos los núcleos. La fuerza débil es responsable del decaimiento beta. Las fuerzas electromagnética y débil ahora se consideran como manifestaciones de una sola fuerza llamada fuerza **electrodébil**.

Se dice que toda interacción fundamental está medida por el intercambio de partículas de campo. La interacción electromagnética está medida por el fotón, la interacción débil por los bosones W^\pm y Z^0 , la interacción gravitacional por los gravitones y la interacción fuerte por los gluones.

30.4 Positrones y otras antipartículas

Una antipartícula y una partícula tienen la misma masa, pero carga opuesta, y también pueden tener otras propiedades con valores opuestos, como el número leptónico y el número bariónico. En las reacciones nucleares es posible producir pares partícula-antipartícula si la energía disponible es mayor que $2mc^2$, donde m es la masa de la partícula (o antipartícula).

30.5 Clasificación de partículas

Las partículas distintas de los fotones se clasifican como hadrones o leptones. Los **hadrones** interactúan principalmente a través de la fuerza fuerte. Tienen tamaño y estructura y, en consecuencia, no son partículas elementales. Existen dos tipos de hadrones: *bariones* y *mesones*. Los mesones tienen un número bariónico de cero y tienen espín o cero o entero. Los bariones, que por lo general son las partículas más masivas, tienen números bariónicos distintos de cero y espines de $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$. El neutrón y el protón son ejemplos de bariones.

Los **leptones** no tienen estructura conocida, hasta los límites de la resolución actual (aproximadamente 10^{-19} m). Los leptones sólo interactúan a través de las fuerzas débil y electromagnética. Existen seis leptones: el electrón, e^- ; el muón, μ^- ; el tau, τ^- ; y sus neutrinos asociados, ν_e , ν_μ y ν_τ .

30.6 Leyes de conservación

En todas las reacciones y decaimientos, cantidades como energía, cantidad de movimiento lineal, cantidad de movimiento angular, carga eléctrica, número bariónico y número leptónico se conservan estrictamente. Ciertas partículas tienen propiedades llamadas **extrañeza** y **encanto**. Estas partículas inusuales se conservan sólo en aquellas reacciones y decaimientos que ocurren vía la fuerza fuerte.

30.8 Quarks y color

Teorías recientes postulan que todos los hadrones están compuestos por unidades más pequeñas conocidas como **quarks**, que tienen cargas eléctricas fraccionales y números bariónicos de $\frac{1}{3}$ y vienen en seis "sabores": arriba (*up*), abajo (*down*), extraño (*strange*), encanto (*charmed*), cima (*top*) y fondo (*bottom*). Cada barión contiene tres quarks, y cada mesón contiene un quark y un antiquark.

De acuerdo con la teoría de la **Cromodinámica cuántica**, los quarks tienen una propiedad llamada **color** y la fuerza fuerte entre quarks se conoce como **fuerza de color**. La fuerza de color aumenta conforme la distancia entre las partículas se incrementa, de modo que los quarks están confinados y nunca se observan en aislamiento. Cuando dos quarks enlazados se separan ampliamente, se forma un nuevo par quark-antiquark entre ellos, y la partícula individual se rompe en dos nuevas partículas, cada una compuesta de un par quark-antiquark.

30.10 La conexión cósmica

La observación de la radiación de microondas de fondo por parte de Penzias y Wilson confirmó fuertemente que el Universo comenzó con un Big Bang hace aproximadamente 15 mil millones de años y desde entonces se expande. La radiación de fondo es equivalente a la de un cuerpo negro a una temperatura de más o menos 3 K.

El fondo cósmico de microondas tiene muy pocas irregularidades, lo que corresponde a variaciones de temperatura de 0.0003 K. Sin estas irregularidades que actúan como sitios de nucleación, las partículas nunca se habrían agrupado para formar galaxias y estrellas.

■ PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

ENHANCED WebAssign Las preguntas de opción múltiple en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- En la primera bomba atómica, una prueba realizada en Nuevo México, llamada Trinity, la energía liberada fue equivalente a aproximadamente 17 kilotones de TNT. Estime la masa convertida en energía en este evento. *Nota:* Una tonelada de TNT tiene una energía equivalente a 4.0×10^9 J. a) 20 kilotones b) 0.1 kilotones c) 1 kg d) 1 g e) 1 mg
- Cuando un neutrón decae a un protón, electrón y neutrino, ¿cuánta energía se libera? (Desprecie la energía del neutrino.) a) 0.784 MeV b) 0.352 MeV c) 4.31 MeV d) 2.22 MeV e) 1.70 MeV
- La partícula Ω^- es un barión con espín $\frac{3}{2}$. ¿Cuál de las siguientes situaciones es cierta acerca de esta partícula? a) Tiene tres posibles estados de espín en un campo magnético. b) Tiene cuatro posibles estados de espín. c) Tiene tres veces la carga de una partícula de espín $\frac{1}{2}$. d) Tiene tres veces la masa de una partícula de espín $\frac{1}{2}$. e) No puede decaer a una partícula de espín $\frac{1}{2}$.
- ¿Por qué un protón no puede decaer en un positrón y un neutrino? a) Se viola la conservación de carga. b) Se viola la conservación de número bariónico. c) Se viola la conservación de la energía. d) Se viola la conservación del número leptónico. e) Se viola la conservación de extrañeza.
- ¿Cuál partícula es más probable que capture un núcleo ^{235}U y haga que experimente fisión? a) un protón energético b) un neutrón energético c) una partícula alfa de movimiento lento d) un neutrón de movimiento lento e) un electrón de movimiento rápido
- Si el moderador se removiera súbitamente de un reactor nuclear en una estación de generación de electricidad, ¿cuál es la consecuencia más probable? a) El reactor se volvería supercrítico y ocurriría una reacción de escape. b) Las reacciones nucleares procederían como antes, pero el reactor se sobrecalentaría. c) El reactor se volvería subcrítico y la rapidez a la que las reacciones ocurren disminuiría. d) No ocurrirían cambios en la operación del reactor. e) La rapidez a la que ocurren las reacciones aumentaría, pero el reactor no se volvería supercrítico.
- Cuando un electrón y un positrón se encuentran a baja rapidez en espacio vacío, se aniquilan mutuamente para producir dos rayos gamma de 0.511 MeV. ¿Qué ley se violaría si produjeran un rayo gamma con una energía de 1.02 MeV? a) conservación de energía b) conservación de cantidad de movimiento c) conservación de carga d) conservación de número bariónico e) conservación de número leptónico electrónico
- En una reacción de fisión un núcleo ^{235}U captura un neutrón, lo que divide el núcleo en ^{137}I y ^{96}Y . ¿Cuántos neutrones libres resultan de este proceso? a) 1 b) 2 c) 3 d) 4 e) 5
- ¿Cuál de las siguientes reacciones de partículas no puede ocurrir?
 - $p + p \rightarrow 2\gamma$
 - $\pi^0 + n \rightarrow K_s^0 + \Sigma^0$
 - $\gamma + p \rightarrow n + \pi^0$
 - $\Omega^- \rightarrow 2\Xi^- + e^+ + \nu_e$
 - $\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$
- ¿Cuál de las siguientes reacciones de partículas no puede ocurrir?
 - $p + n \rightarrow p + p + \bar{p}$
 - $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
 - $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
 - $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 - $\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\tau + \bar{\nu}_e$
- ¿Cuál de las siguientes condiciones del combustible se requieren en la operación de un reactor de fusión auto-sostenida controlada? a) El combustible debe estar a una temperatura suficientemente alta. b) El combustible debe ser radiactivo. c) El combustible debe estar a una densidad suficientemente alta. d) El combustible debe confinarse a un periodo suficientemente largo. e) El combustible debe constar solamente de los isótopos de hidrógeno.
- Si una partícula alfa y un electrón tienen la misma energía cinética, ¿cuál sufre la desviación más grande cuando pasa a través de un campo magnético? a) La partícula alfa. b) El electrón. c) Se someten a la misma desviación. d) Ninguno se desvía.

■ PREGUNTAS CONCEPTUALES

ENHANCED WebAssign Las preguntas conceptuales en este capítulo pueden ser asignadas en línea en Enhanced WebAssign.

- Si electrones de alta energía, con longitudes de onda de De Broglie menores que el tamaño del núcleo, se dispersan de los núcleos, el comportamiento de los electrones es consistente con la dispersión de estructuras muy masivas mucho menores en tamaño que el núcleo, llamadas quarks. ¿Cómo es que este comportamiento es similar a un experimento clásico que detectó pequeñas estructuras en un átomo?
- ¿Qué factores hacen difícil lograr una reacción de fusión?
- Se sabe que existen bariones con carga doble. ¿Por qué no hay mesones con carga doble?
- ¿Por qué un reactor de fusión produciría menos desecho radiactivo que un reactor de fisión?
- ¿Por qué los átomos no existieron sino hasta cientos de miles de años después del Big Bang?
- Partículas conocidas como resonancias tienen vidas medias muy cortas, en el orden de 10^{-23} s. ¿Supondría que son hadrones o leptones? Explique.

7. Describa el modelo de quark de hadrones, incluidas las propiedades de los quarks.
8. En la teoría de la cromodinámica cuántica, los quarks vienen en tres colores. ¿Cómo justificaría el enunciado “todos los bariones y mesones son incoloros”?
9. Describa las propiedades de bariones y mesones y las diferencias importantes entre ellos.
10. Identifique la partícula que decae en la tabla 30.2 que ocurre mediante la interacción electromagnética. Justifique su respuesta.
11. Los kaones decaen en estados finales que no contienen protones o neutrones. ¿Cuál es el número bariónico de los kaones?
12. ¿Por qué un neutrón es estable dentro del núcleo? (En el espacio libre el neutrón decae en 900 s.)
13. Analice las ventajas y desventajas de los reactores de fisión desde el punto de vista de la seguridad, la contaminación y los recursos. Haga una comparación con la energía generada por la quema de combustibles fósiles.

PROBLEMAS

ENHANCED
WebAssign Los problemas para este capítulo se pueden asignar en línea en Enhanced WebAssign. Los problemas seleccionados también tienen soluciones en los videos Watch it.

1. denota problemas sencillos, 2. denota problema intermedio,
3. denota problema de alto reto
1. denota solución completa disponible en *Student Solutions Manual/Study Guide*

1. denota problemas asignados con más frecuencia en Enhanced WebAssign

BIO denota problemas biomédicos

PG denota problemas guiados

M denota tutorial Master it disponible en Enhanced WebAssign

CIC denota petición de razonamiento cuantitativo y conceptual

S denota problema de razonamiento simbólico

30.1 Fisión nuclear

1. **M** Si el promedio de energía liberada en un evento de fisión es 208 MeV, calcule el número total de eventos de fisión necesarios para operar un foco de 100 W durante 1.0 h.
2. Encuentre la energía liberada en la reacción de fisión

$$n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{98}_{40}\text{Zr} + {}^{135}_{52}\text{Te} + 3n$$
 Las masas atómicas de los productos de fisión son 97.9120 u para ${}^{98}_{40}\text{Zr}$ y 134.9087 u para ${}^{135}_{52}\text{Te}$.
3. Encuentre la energía liberada en la reacción de fisión

$${}_0^1n + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{88}_{38}\text{Sr} + {}^{136}_{54}\text{Xe} + 12{}_0^1n$$
4. Según una estimación, la primera bomba atómica liberó una energía equivalente a 20 kilotonnes de TNT. Si una tonelada de TNT libera aproximadamente 4.0×10^9 J, ¿qué cantidad de uranio se perdió a través de la fisión de esta bomba? (Suponga que 208 MeV fueron liberados por la fisión.)
5. **M** Suponga que el suelo ordinario contiene uranio natural en cantidades de una parte por millón por masa. a) ¿Cuánto uranio hay en la parte superior de 1.00 m de suelo en un terreno con una superficie de un acre (43560 pies^2), suponiendo que la gravedad específica del suelo es 4.00? b) ¿Cuánto del isótopo ${}^{235}\text{U}$, adecuado para combustible de reactor nuclear, hay en este suelo? *Sugerencia:* Véase el apéndice B para la abundancia porcentual de ${}^{235}_{92}\text{U}$.
6. Una planta eléctrica de fisión nuclear típica produce alrededor de 1.00 GW de potencia eléctrica. Suponga que la planta tiene una eficiencia global de 40.0% y cada fisión produce 200 MeV de energía térmica. Calcule la masa de ${}^{235}\text{U}$ consumida cada día.
7. Con el fin de minimizar la fuga de neutrones de un reactor, la proporción de la superficie con el volumen debe ser lo más pequeña posible. Suponga que una esfera de radio a y un cubo tienen el mismo volumen. Encuentre la relación entre superficie y volumen para a) la esfera y

b) el cubo. c) ¿Cuál de estas formas de reactor tendría la fuga mínima?

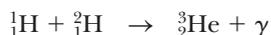
8. **PG** De acuerdo con una estimación, existen 4.4×10^6 toneladas métricas de reservas de uranio mundiales extraíbles a \$130/kg o menos. Alrededor de 0.7% del uranio que ocurren de manera natural es el isótopo fisionable ${}^{235}\text{U}$. a) Calcule la masa de ${}^{235}\text{U}$ en esta reserva, en gramos. b) Encuentre el número de moles de ${}^{235}\text{U}$ y conviértela a un número de átomos. c) Suponiendo que de cada reacción se obtiene 208 MeV y que toda esta energía se captura, calcule la energía total que se puede extraer de las reservas, en joules. d) Suponiendo que el consumo de potencia mundial es constante en 1.5×10^{13} J/s, ¿durante cuántos años las reservas de uranio podrían abastecer todas las necesidades de energía del mundo? e) ¿Qué conclusión se puede extraer?
9. **M** Una casa completamente eléctrica usa aproximadamente 2000 kWh de energía eléctrica por mes. ¿Cuánto uranio-235 se requeriría para abastecer esta casa con sus necesidades de energía durante un año? Suponga 100% de eficiencia de conversión y 208 MeV liberados por fisión.
10. **CIC** El agua de mar contiene 3 mg de uranio por metro cúbico. a) Dado que la profundidad promedio del océano es de alrededor de 4 km y el agua cubre dos tercios de la superficie de la Tierra, estime la cantidad de uranio disuelta en el océano. b) Estime cuánto tiempo este uranio podría abastecer las necesidades de energía del mundo al uso actual de 1.5×10^{13} J/s. c) ¿De dónde proviene el uranio disuelto? ¿Es una fuente de energía renovable? ¿El uranio del océano puede satisfacer los requerimientos de energía? Analice. *Nota:* Los reactores reproductores aumentan la eficiencia del combustible nuclear utilizado en aproximadamente dos órdenes de magnitud.

30.2 Fusión nuclear

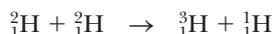
11. Cuando una estrella agota su combustible de hidrógeno, puede fundir otros combustibles nucleares. A temperaturas

por arriba de 1.0×10^8 K, puede ocurrir fusión de helio. Escriba las ecuaciones para los siguientes procesos. a) Dos partículas alfa se fusionan para producir un núcleo *A* y un rayo gamma. ¿Cuál es el núcleo *A*? b) El núcleo *A* absorbe una partícula alfa para producir un núcleo *B* y un rayo gamma. ¿Cuál es el núcleo *B*? c) Encuentre la energía total liberada en las reacciones dadas en los incisos a) y b). *Nota:* La masa de ${}^4_2\text{Be} = 8.005\,305$ u.

12. Encuentre la energía liberada en la reacción de fusión



13. Encuentre la energía liberada en la reacción de fusión



14. **PG** Otra serie de reacciones nucleares que pueden producir energía en el interior de las estrellas es el ciclo descrito a continuación. Este ciclo es más eficiente cuando la temperatura central en una estrella está por arriba de 1.6×10^7 K. Dado que la temperatura en el centro del Sol sólo es de 1.5×10^7 K, el siguiente ciclo produce menos de 10% de la energía del Sol. a) ${}^{12}_6\text{C}$ absorbe un protón de alta energía. Otro núcleo, *A*, se produce en la reacción, junto con un rayo gamma. Identifique el núcleo *A*. b) El núcleo *A* decae mediante emisión de positrón para formar el núcleo *B*. Identifique el núcleo *B*. c) El núcleo *B* absorbe un protón para producir el núcleo *C* y un rayo gamma. Identifique el núcleo *C*. d) El núcleo *C* absorbe un protón para producir el núcleo *D* y un rayo gamma. Identifique el núcleo *D*. e) El núcleo *D* decae mediante emisión de positrón para producir el núcleo *E*. Identifique el núcleo *E*. f) El núcleo *E* absorbe un protón para producir el núcleo *F* más una partícula alfa. ¿Cuál es el núcleo *F*? *Nota:* Si el núcleo *F* no es ${}^{12}_6\text{C}$ (esto es, el núcleo con el que comenzó), cometió un error y debe revisar la secuencia de eventos.

15. Suponga que un deuterón y un tritón están en reposo cuando se fusionan de acuerdo con la reacción



Si desprecia correcciones relativistas, determine la energía cinética que adquiere el neutrón.

16. **C/C** Una reacción que se ha considerado como fuente de energía es la absorción de un protón por parte de un núcleo de boro-11, para producir tres partículas alfa:



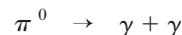
Esta reacción es una atractiva posibilidad porque el boro se obtiene fácilmente de la corteza terrestre. Una desventaja es que los protones y los núcleos de boro deben tener grandes energías cinéticas para que tenga lugar la reacción. Este requisito contrasta con la iniciación de la fisión de uranio mediante neutrones lentos. a) ¿Cuánta energía se libera en cada reacción? b) ¿Por qué las partículas reactantes deben tener altas energías cinéticas?

30.4 Positrones y otras antipartículas

17. Un fotón produce un par protón-antiprotón de acuerdo con la reacción $\gamma \rightarrow \text{p} + \bar{\text{p}}$. ¿Cuál es la mínima frecuencia posible del fotón? ¿Cuál es su longitud de onda?

18. **M** Un fotón, con una energía de 2.09 GeV, crea un par protón-antiprotón en el cual el protón tiene una energía cinética de 95.0 MeV. ¿Cuál es la energía cinética del antiprotón?

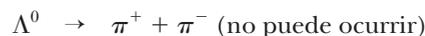
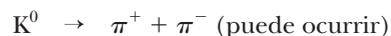
19. Un pión neutro en reposo decae en dos fotones de acuerdo con



Encuentre la energía, cantidad de movimiento y frecuencia de cada fotón.

30.6 Leyes de conservación

20. Para las siguientes dos reacciones, la primera puede ocurrir pero la segunda no. Explique.



21. Cada una de las siguientes reacciones está prohibida. Determine una ley de conservación que es violada por cada reacción.

- a) $\text{p} + \bar{\text{p}} \rightarrow \mu^+ + e^-$
- b) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \text{p} + \pi^+$
- c) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \pi^+$
- d) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \text{n}$
- e) $\gamma + \text{p} \rightarrow \text{n} + \pi^0$

22. Determine cuál de las reacciones puede ocurrir a continuación. Para aquellas que no pueden ocurrir, determine la ley de la conservación (o leyes) que cada una viola.

- a) $\text{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^0$
- b) $\text{p} + \text{p} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \pi^0$
- c) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
- d) $\text{n} \rightarrow \text{p} + e^- + \bar{\nu}_e$
- e) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \text{n}$

23. ¿Cuál de los siguientes procesos son permitidos por la interacción fuerte, la interacción electromagnética, la interacción débil o ninguna interacción en absoluto?

- a) $\pi^- + \text{p} \rightarrow 2\eta^0$
- b) $\text{K}^- + \text{n} \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
- c) $\text{K}^- \rightarrow \pi^- + \pi^0$
- d) $\Omega^- \rightarrow \Xi^- + \pi^0$
- e) $\eta^0 \rightarrow 2\gamma$

24. **C/C** a) Demuestre que el número bariónico y la carga se conservan en las siguientes reacciones de un pión con un protón:

- (1) $\pi^+ + \text{p} \rightarrow \text{K}^+ + \Sigma^+$
- (2) $\pi^+ + \text{p} \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+$

b) La primera reacción se observa, pero la segunda nunca ocurre. Explique estas observaciones. c) ¿La segunda reacción podría ocurrir si se crea una tercera partícula? Si es así, ¿cuáles partículas en la tabla 30.2 pueden posibilitarla? ¿La reacción requeriría menos energía o más energía que la reacción de la ecuación 1)? ¿Por qué?

25. Determine si la extrañeza se conserva en las siguientes desintegraciones y reacciones.

- a) $\Lambda^0 \rightarrow \text{p} + \pi^-$
- b) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \Lambda^0 + \text{K}^0$
- c) $\bar{\text{p}} + \text{p} \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \Lambda^0$
- d) $\pi^- + \text{p} \rightarrow \pi^- + \Sigma^+$
- e) $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$
- f) $\Xi^0 \rightarrow \text{p} + \pi^-$

30.8 Quarks y color

26. La composición de quarks del protón es uud, mientras que la del neutrón es udd. Demuestre que la carga, número bariónico y extrañeza de estas partículas es igual a las sumas de estos números para sus quarks constituyentes.
27. **M** Encuentre el número de electrones y de cada especie de quark, en 1 L de agua.
28. Las composiciones de quarks de las partículas K^0 y Λ^0 son $d\bar{s}$ y uds , respectivamente. Demuestre que la carga, número bariónico y extrañeza de estas partículas es igual a la suma de estos números para sus quarks constituyentes.
29. Identifique las partículas que corresponden a los quarks a) suu , b) $\bar{u}d$, c) $\bar{s}d$ y d) ssd .
30. ¿Cuál es la carga eléctrica de los bariones con las composiciones de quarks a) $\bar{u}\bar{u}d$ y b) $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$? ¿Cómo se llaman estos bariones?

Problemas adicionales

31. Una partícula Σ^0 que viaja a través de la materia golpea un protón y una Σ^+ un rayo gamma, así como una tercera partícula aparecen. Use el modelo de quark de cada uno para determinar la identidad de la tercera partícula.
32. Nombre al menos una ley de conservación que evita la realización de cada una de las siguientes reacciones.
- a) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$
 b) $\mu^- \rightarrow \pi^- + \nu_e$
 c) $p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$
33. Encuentre la energía que se libera en la reacción de fusión
- $${}^1_1\text{H} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + e^+ + \nu$$
34. Ocasionalmente, muones de alta energía chocan con electrones y producen dos neutrinos, de acuerdo con la reacción $\mu^+ + e^- \rightarrow 2\nu$. ¿Qué tipo de neutrinos son?
35. Escriba en (?) la partícula que falta. Suponga que a) se produce a través de la interacción fuerte, mientras que b) y c) implican la interacción débil.
- a) $K^+ + p \rightarrow ? + p$
 b) $\Omega^- \rightarrow ? + \pi^-$
 c) $K^+ \rightarrow ? + \mu^+ + \nu_\mu$
36. Dos protones se aproximan uno hacia el otro con 70.4 MeV de energía cinética y se involucran en una reacción en la que un protón y un pión positivo salen en reposo. ¿Cuál tercera partícula, obviamente sin carga y, por lo tanto, difícil de detectar, se debió crear?
37. Un neutrón de 2.0 MeV se emite en un reactor de fisión. Si el neutrón pierde la mitad de su energía cinética en cada colisión con un átomo moderador, ¿cuántas colisiones debe experimentar para llegar a una energía asociada con un gas a temperatura ambiente de 20.0 °C?
38. **CIC** La reacción de fusión ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ libera 3.27 MeV de energía. Si un reactor de fusión opera

estrictamente sobre la base de esta reacción, a) ¿cuánta energía podría producir al reaccionar por completo 1 kg de deuterio? b) A ocho centavos el kilovatio-hora, ¿cuánto costaría la energía producida? c) El agua pesada (D_2O) cuesta alrededor de \$300 por kilogramo. Si desprecia el costo de separar el deuterio del oxígeno vía electrólisis, ¿cuánto cuesta 1 kg de deuterio, si se deriva de D_2O ? d) ¿Sería efectivo en costo utilizar deuterio como fuente de energía? Analice y suponga que el costo de la producción de energía es nueve décimos el valor de la energía generada.

39. a) Demuestre que alrededor de 1.0×10^{10} J se liberarían de la fusión de los deuterones en 1.0 gal de agua. Observe que 1 de cada 6500 átomos de hidrógeno es un deuterón. b) El promedio de consumo de energía de una persona que vive en Estados Unidos es de más o menos 1.0×10^4 J/s (una potencia promedio de 10 kW). A esta razón, ¿durante cuánto tiempo se abastecerían las necesidades de energía de una persona por la fusión de los deuterones en 1.0 g de agua? Suponga que la energía liberada por deuterón es 1.64 MeV.
40. Los océanos tienen un volumen de 317 millones de kilómetros cúbicos y contienen 1.32×10^{21} kg de agua. De todos los núcleos de hidrógeno en el agua, 0.0156% son de deuterio. a) Si todos estos núcleos de deuterio se fusionan en helio a través de la primera reacción en la ecuación 30.4, determine la cantidad total de energía que podría ser liberada. b) El consumo mundial actual de energía eléctrica es de aproximadamente 7.00×10^{12} W. Si el consumo fuera 100 veces mayor, ¿para cuántos años sería la fuente de energía calculada en el inciso a)?

41. Un mesón π en reposo decae de acuerdo con

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

¿Cuál es la energía que se lleva el neutrino? Suponga que el neutrino no tiene masa y se mueve con la rapidez de la luz. Considere $m_\pi c^2 = 139.6$ MeV y $m_\mu c^2 = 105.7$ MeV. *Nota:* Use la relatividad; vea la ecuación 26.13.

42. La reacción $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ ocurre con alta probabilidad, mientras que la reacción $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ nunca ocurre. Analice estas reacciones a nivel del quark. Demuestre que la primera reacción conserva el número total de cada tipo de quark y la segunda reacción no lo hace.
43. El Sol radia energía a razón de 3.85×10^{26} W. Suponga que la reacción neta

$$4p + 2e^- \rightarrow \alpha + 2\nu_e + 6\gamma$$

representa toda la energía liberada. Calcule el número de protones fusionados por segundo. *Nota:* Recuerde que una partícula alfa es un núcleo de helio-4.

44. Una partícula K^0 en reposo se desintegra en un π^+ y un π^- . La masa del K^0 es 497.7 MeV/ c^2 y la masa de cada pión es 139.6 MeV/ c^2 . ¿Cuál será la velocidad de cada uno de los piones?

A.1 Notación matemática

A lo largo de este libro se utilizan muchos símbolos matemáticos que aquí se describen ejemplificando su uso.

El signo de igual: =

En matemáticas, el signo = denota la igualdad de dos cantidades. En Física, establece una relación entre diferentes conceptos físicos. Un ejemplo es la famosa ecuación $E = mc^2$ que dice que una masa m dada, *medida en kilogramos*, es equivalente a cierta cantidad de energía, E , *medida en joules*. El cuadrado de la velocidad de la luz, c^2 , puede considerarse una constante de proporcionalidad necesaria, porque las unidades se eligen para cantidades dadas, de manera arbitraria por razones históricas.

Proporcionalidad: \propto

El símbolo \propto denota una proporcionalidad. Este símbolo se utiliza cuando se establece una relación más que una igualdad matemática exacta. Por ejemplo, podríamos escribir $E \propto m$, que dice en palabras que “la energía E asociada con un objeto es proporcional a la masa m del objeto.” Otro ejemplo se encuentra en la energía cinética, en la que la energía asociada al movimiento de un objeto, definida por $EC = \frac{1}{2}mv^2$, donde m es otra vez la masa y v es la velocidad. Ambas, m y v , son variables en esta expresión. Aquí, la energía cinética EC es proporcional a m , $EC \propto m$, y al mismo tiempo EC , es proporcional al cuadrado de la velocidad, $EC \propto v^2$. Otro término usado aquí es “directamente proporcional.” La densidad ρ de un objeto se relaciona con su masa y volumen por $\rho = m/V$. Por lo tanto, se dice que la densidad es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional al volumen.

Desigualdades

El símbolo $<$ significa “es menor que”, y $>$ “mayor que”. Por ejemplo, $\rho_{\text{Fe}} > \rho_{\text{Al}}$ significa que la densidad del hierro, ρ_{Fe} , es mayor que la densidad de aluminio, ρ_{Al} . Si hay una línea debajo del símbolo, existe la posibilidad de igualdad: \leq “menor que o igual a”, mientras que \geq significa “mayor que o igual a”; cualquier velocidad v de una partícula, por ejemplo, es menor o igual a la velocidad de la luz, c : $v \leq c$.

A veces el tamaño de una cantidad determinada difiere considerablemente del tamaño de otra cantidad. Un simple signo de desigualdad no representa enormes diferencias. Para tales casos, el símbolo \ll significa “es mucho menor que” y \gg significa “mucho mayor que”. La masa del Sol, M_{Sol} es mucho mayor que la masa de la tierra, M_{T} : $M_{\text{Sol}} \gg M_{\text{T}}$. La masa de un electrón, m_e , es mucho menor que la masa de un protón, m_p : $m_e \ll m_p$.

Aproximadamente igual: \approx

El símbolo \approx indica que dos cantidades son aproximadamente iguales entre sí. La masa de un protón, m_p , es aproximadamente la misma que la masa de un neutrón, m_n . Esta relación se puede escribir $m_p \approx m_n$.

Equivalencia: \equiv

El símbolo \equiv significa “está definido como”, que es una afirmación diferente que un simple =. Significa que la cantidad de la izquierda —usualmente una simple cantidad— es

otra manera de expresar la cantidad o cantidades de la derecha. La clásica cantidad de movimiento de un objeto, p , está definida como la masa del objeto m veces su velocidad v , de ahí que $p \equiv mv$. Como esta equivalencia es por definición, no hay posibilidad de que p sea igual a alguna otra cosa. En contraste, se puede ver la velocidad v de un objeto bajo aceleración constante, $v = at + v_0$. Esta ecuación no podría escribirse con un signo de equivalencia porque v , en este contexto, no es una cantidad definida ya que se sostiene sólo bajo la condición de que la aceleración sea constante. Sin embargo, la expresión para la cantidad de movimiento es siempre cierta por definición, por lo que es apropiado escribir $p \equiv mv$ para la primera vez que se introduce el concepto. Después que se ha introducido el concepto, un signo de igual ordinario es suficiente.

Diferencias: Δ

La letra griega Δ (delta mayúscula) es un símbolo utilizado para indicar la diferencia en una medición de una cantidad física, usualmente en dos diferentes momentos. El mejor ejemplo, es un desplazamiento a lo largo del eje x , indicado por Δx (que se lee “delta x ”). Observe que Δx no significa el “producto de Δ por x ”. Suponga que una persona que sale a un paseo matinal mide la distancia que recorre a partir de 10 m de la puerta de su casa. Continúa caminando en línea recta y se detiene a 50 m de la puerta. Su cambio de posición durante la caminata es $\Delta x = 50 \text{ m} - 10 \text{ m} = 40 \text{ m}$. Simbólicamente, este desplazamiento se puede escribir como

$$\Delta x = x_f - x_i$$

En esta ecuación x_f es la posición final y x_i es la posición inicial. Hay otros numerosos ejemplos de diferencias en física, tales como la diferencia (o cambio) en la cantidad de movimiento $\Delta p = p_f - p_i$; el cambio en energía cinética $\Delta K = K_f - K_i$ y el cambio de temperatura $\Delta T = T_f - T_i$.

Sumas: Σ

En Física hay a menudo contextos en los cuales es necesario sumar varias cantidades. Una abreviatura útil para representar tal suma es la letra griega Σ (sigma mayúscula). Suponga que deseamos sumar un conjunto de cinco números representados por x_1, x_2, x_3, x_4 y x_5 . En la notación abreviada, escribiríamos la suma como

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = \sum_{i=1}^5 x_i$$

donde el subíndice i de x representa cualquiera de los números del conjunto. Por ejemplo, si hay cinco masas en un sistema m_1, m_2, m_3, m_4 y m_5 , la masa total del sistema $M = m_1, m_2, m_3, m_4, m_5$, podría expresarse como

$$M = \sum_{i=1}^5 m_i$$

La coordenada en x del centro de masa de las cinco masas, por tanto, podría escribirse como

$$x_{CM} = \frac{\sum_{i=1}^5 m_i x_i}{M}$$

con expresiones similares para las coordenadas y y z del centro de masa.

Valor absoluto: $||$

La magnitud de una cantidad x , escrita como $|x|$, es simplemente el valor absoluto de esta cantidad. El signo $|x|$ es siempre positivo, sin tener en cuenta el signo de x . Por ejemplo,

si $x = -5$, entonces $|x| = 5$; si $x = 8$, entonces $|x| = 8$. En Física este signo es útil siempre que la magnitud de una cantidad sea más importante que cualquier dirección que pueda estar implicada por un signo.

A.2 Notación científica

Muchas cantidades en ciencia tienen valores muy grandes o muy pequeños. La velocidad de la luz es cerca de 300 000 000 m/s, y la tinta requerida para hacer el punto de una *i* en este libro de texto tiene una masa de cerca de 0.000 000 001 kilogramos. Es muy incómodo leer, escribir, y no perder de vista tales números porque los lugares decimales tienen que ser contados y porque un número con un dígito significativo puede requerir una gran cantidad de ceros. La notación científica es una manera de representar estos números sin tener que poner tantos ceros en el escrito, que, en general, se utilizan solamente para establecer la magnitud del número, no su exactitud. La clave es utilizar potencias de 10. Las potencias no negativas de 10 son:

$$\begin{aligned}10^0 &= 1 \\10^1 &= 10 \\10^2 &= 10 \times 10 = 100 \\10^3 &= 10 \times 10 \times 10 = 1\,000 \\10^4 &= 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 10\,000 \\10^5 &= 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 = 100\,000\end{aligned}$$

y así sucesivamente. El número de lugares decimales del primer dígito en el número y a la izquierda del punto decimal, corresponde a la potencia a la que el 10 está elevado y se le denomina **exponente** de 10. La velocidad de la luz, 300 000 000 m/s, se puede expresar como 3×10^8 m/s. Observe que hay ocho lugares decimales a la derecha del dígito principal, 3, y a la izquierda de donde el punto decimal estaría escrito.

Para números menores que 1, se observa lo siguiente:

$$\begin{aligned}10^{-1} &= \frac{1}{10} = 0.1 \\10^{-2} &= \frac{1}{10 \times 10} = 0.01 \\10^{-3} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10} = 0.001 \\10^{-4} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.000\,1 \\10^{-5} &= \frac{1}{10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10} = 0.000\,01\end{aligned}$$

En estos casos, el número de lugares decimales a la derecha del punto decimal aumenta e incluye sólo el primer dígito diferente de cero igual al valor del exponente (negativo).

En cuanto a los números que se expresan como potencias de 10 multiplicada por otro número entre 1 y 10, se dice que están en **notación científica**. Por ejemplo, la constante de Coulomb asociada con las fuerzas eléctricas, está dada por $8\,987\,551\,789\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, y su escritura en notación científica es $8.987\,551\,789 \times 10^9\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$. La constante de Newton de gravitación está dada por $0.000\,000\,000\,066\,731\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$, que escrita en notación científica es $6.6731 \times 10^{-11}\text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$.

Cuando se realizan multiplicaciones con números expresados en notación científica, la siguiente regla es muy útil:

$$10^n \times 10^m = 10^{n+m} \quad \text{[A.1]}$$

donde n y m pueden ser cualquier número (no necesariamente entero). Por ejemplo, $10^2 \times 10^5 = 10^7$. La regla también se aplica si uno de los exponentes es negativo: $10^3 \times 10^{-8} = 10^{-5}$.

Observe que, cuando se efectúan divisiones con números expresados en notación científica,

$$\frac{10^n}{10^m} = 10^n \times 10^{-m} = 10^{n-m} \quad \text{[A.2]}$$

Ejercicios

Con ayuda de las reglas anteriores, verifique las siguientes respuestas:

1. $86\,400 = 8.64 \times 10^4$
2. $9\,816\,762.5 = 9.816\,762\,5 \times 10^6$
3. $0.000\,000\,039\,8 = 3.98 \times 10^{-8}$
4. $(4 \times 10^8)(9 \times 10^9) = 3.6 \times 10^{18}$
5. $(3 \times 10^7)(6 \times 10^{-12}) = 1.8 \times 10^{-4}$
6. $\frac{75 \times 10^{-11}}{5 \times 10^{-3}} = 1.5 \times 10^{-7}$
7. $\frac{(3 \times 10^6)(8 \times 10^{-2})}{(2 \times 10^{17})(6 \times 10^5)} = 2 \times 10^{-18}$

A.3 Álgebra

A. Algunas reglas básicas

Cuando se realizan operaciones algebraicas, se aplican las leyes de la aritmética. Símbolos tales como x , y y z se utilizan generalmente para representar cantidades que no se especifican, y que se conocen como **incógnitas**.

Primero, considere la ecuación

$$8x = 32$$

Si deseamos resolver para x , podemos dividir (o multiplicar) cada lado de la ecuación por el mismo factor sin destruir la igualdad. En este caso, si dividimos ambos lados entre 8, tenemos

$$\begin{aligned} \frac{8x}{8} &= \frac{32}{8} \\ x &= 4 \end{aligned}$$

Luego, considere la ecuación

$$x + 2 = 8$$

En este tipo de expresión, podemos sumar o restar la misma cantidad de cada lado. Si restamos 2 de cada lado, obtenemos

$$\begin{aligned} x + 2 - 2 &= 8 - 2 \\ x &= 6 \end{aligned}$$

En general, si $x + a = b$, entonces, $x = b - a$.

Ahora considere la ecuación

$$\frac{x}{5} = 9$$

Si multiplicamos cada lado por 5, nos queda x del lado izquierdo y 45 en el lado derecho:

$$\begin{aligned} \left(\frac{x}{5}\right)(5) &= 9 \times 5 \\ x &= 45 \end{aligned}$$

En todos los casos, **siempre que se lleve a cabo una operación en el lado izquierdo de la igualdad, la misma debe realizarse en el lado derecho.**

Recuerde las siguientes reglas para la multiplicación, división, suma y resta de fracciones, donde a , b y c son tres números:

	Regla	Ejemplo
Multiplicación	$\left(\frac{a}{b}\right)\left(\frac{c}{d}\right) = \frac{ac}{bd}$	$\left(\frac{2}{3}\right)\left(\frac{4}{5}\right) = \frac{8}{15}$
División	$\frac{(a/b)}{(c/d)} = \frac{ad}{bc}$	$\frac{2/3}{4/5} = \frac{(2)(5)}{(4)(3)} = \frac{10}{12} = \frac{5}{6}$
Suma	$\frac{a}{b} \pm \frac{c}{d} = \frac{ad \pm bc}{bd}$	$\frac{2}{3} - \frac{4}{5} = \frac{(2)(5) - (4)(3)}{(3)(5)} = -\frac{2}{15}$

En Física, muy a menudo necesitamos manipular expresiones algebraicas simbólicas, un proceso que para la mayoría de los estudiantes debe ser poco familiar. Sin embargo, comprender este proceso es muy importante porque sólo sustituir números en una ecuación puede oscurecer demasiado los significados. Los dos ejemplos siguientes ilustran cómo se realizan estas clases de manipulaciones algebraicas.

■ EJEMPLO

Una bola cae desde la parte superior de un edificio de 50.0 m de altura. ¿Cuánto tiempo le toma a la bola caer a una altura de 25.0 m?

SOLUCIÓN Primero, escriba la ecuación para esta situación:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

Aquí, $a = -9.80 \text{ m/s}^2$ es la aceleración de la gravedad que causa la caída de la bola, $v_0 = 0$ es la velocidad inicial y $x_0 = 50.0 \text{ m}$ es la posición inicial. Sustituya sólo la velocidad inicial $v_0 = 0$ para obtener la siguiente ecuación:

$$x = \frac{1}{2}at^2 + x_0$$

Esta ecuación debe ser resuelta para t . Reste x_0 de ambos lados de la ecuación:

$$x - x_0 = \frac{1}{2}at^2 + x_0 - x_0 = \frac{1}{2}at^2$$

Multiplique ambos lados por $2/a$:

$$\left(\frac{2}{a}\right)(x - x_0) = \left(\frac{2}{a}\right)\frac{1}{2}at^2 = t^2$$

Se acostumbra tener al valor deseado en el lado izquierdo, así que escribiremos a t de ese lado, después de sacar la raíz cuadrada de ambos lados:

$$t = \pm \sqrt{\left(\frac{2}{a}\right)(x - x_0)}$$

donde sólo la raíz positiva tiene sentido. Ahora, puede sustituir los valores para obtener la respuesta final.

■ EJEMPLO

Un bloque de masa m se desliza sobre una superficie sin fricción en la dirección positiva de x . Se encuentra en un pedazo de tela rugosa que tiene un coeficiente de fricción cinética, μ_k . Si ella tela rugosa tiene longitud Δx , encuentre la rapidez del bloque después de abandonar la tela.

SOLUCIÓN Utilizando el teorema del trabajo y la energía, tenemos

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -\mu_k mg \Delta x$$

Sumando $\frac{1}{2}mv_0^2$ a ambos lados:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv_0^2 - \mu_k mg \Delta x$$

(continúa)

Multiplicando ambos lados por $2/m$:

$$v^2 = v_0^2 - 2\mu_k g \Delta x$$

Finalmente, tomamos la raíz cuadrada de ambos lados. Como el bloque se está deslizando en la dirección positiva de x , se elige la raíz cuadrada positiva:

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2\mu_k g \Delta x}$$

Ejercicios

En los ejercicios 1–4 resuelva para x :

1. $a = \frac{1}{1+x}$

2. $3x - 5 = 13$

3. $ax - 5 = bx + 2$

4. $\frac{5}{2x+6} = \frac{3}{4x+8}$

Respuestas

$x = \frac{1-a}{a}$

$x = 6$

$x = \frac{7}{a-b}$

$x = -\frac{11}{7}$

5. Resuelva la siguiente ecuación para v_1 :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Respuesta: $v_1 = \pm \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_1) + v_2^2}$

B. Potencias

Cuando se multiplican potencias de una cantidad dada x , se aplica la siguiente regla:

$$x^n x^m = x^{n+m} \quad \text{[A.3]}$$

Por ejemplo, $x^2 x^4 = x^{2+4} = x^6$.

Cuando se dividen las potencias de una cantidad dada, la regla es:

$$\frac{x^n}{x^m} = x^{n-m} \quad \text{[A.4]}$$

Por ejemplo, $x^8/x^2 = x^{8-2} = x^6$.

Una potencia fraccionaria, como $\frac{1}{3}$, corresponde a una raíz como sigue:

$$x^{1/n} = \sqrt[n]{x} \quad \text{[A.5]}$$

Por ejemplo, $4^{1/3} = \sqrt[3]{4} = 1.587\ 4$. (Una calculadora científica es útil para cálculos como estos.)

Finalmente, cualquier cantidad x^n elevada a la m -ésima potencia es

$$(x^n)^m = x^{nm} \quad \text{[A.6]}$$

La tabla A.1 resume las reglas de los exponentes.

TABLA A.1 Reglas de los exponentes

$$\begin{aligned} x^0 &= 1 \\ x^1 &= x \\ x^n x^m &= x^{n+m} \\ x^n/x^m &= x^{n-m} \\ x^{1/n} &= \sqrt[n]{x} \\ (x^n)^m &= x^{nm} \end{aligned}$$

Ejercicios

Verifique lo siguiente:

1. $3^2 \times 3^3 = 243$

2. $x^5 x^{-8} = x^{-3}$

3. $x^{10}/x^{-5} = x^{15}$

4. $5^{1/3} = 1.709\ 975$ (Use su calculadora).

5. $60^{1/4} = 2.783\ 158$ (Use su calculadora).

6. $(x^4)^3 = x^{12}$

C. Factorización

Algunas fórmulas útiles para factorizar una ecuación son:

$$\begin{aligned} ax + ay + az &= a(x + y + z) && \text{factor común} \\ a^2 + 2ab + b^2 &= (a + b)^2 && \text{cuadrado perfecto} \\ a^2 - b^2 &= (a + b)(a - b) && \text{diferencia de cuadrados} \end{aligned}$$

D. Ecuaciones cuadráticas

La forma general de una ecuación cuadrática es:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad \text{[A.7]}$$

donde x es la cantidad desconocida y a , b y c , son factores numéricos que se conocen como coeficientes de la ecuación. Esta ecuación tiene dos raíces dadas por

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{[A.8]}$$

Si $b^2 - 4ac > 0$, las raíces serán reales.

■ EJEMPLO

La ecuación $x^2 + 5x + 4 = 0$ tiene las siguientes raíces que corresponden a los dos signos del término de la raíz cuadrada:

$$\begin{aligned} x &= \frac{-5 \pm \sqrt{5^2 - (4)(1)(4)}}{2(1)} = \frac{-5 \pm \sqrt{9}}{2} = \frac{-5 \pm 3}{2} \\ x_1 &= \frac{-5 + 3}{2} = -1 \quad x_2 = \frac{-5 - 3}{2} = -4 \end{aligned}$$

donde x_1 se refiere a la raíz correspondiente al signo positivo y x_2 a la raíz correspondiente al signo negativo.

■ EJEMPLO

Una bola se lanza hacia arriba a 16.0 m/s. Utilice la fórmula cuadrática para determinar el tiempo necesario para que alcance una altura de 8.00 m por arriba del punto de lanzamiento.

SOLUCIÓN Del estudio de balística en el capítulo 2, podemos escribir

$$(1) \quad x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$$

La aceleración se debe a la gravedad, dada por $a = -9.80 \text{ m/s}^2$; la velocidad inicial es $v_0 = 16.0 \text{ m/s}$; y la posición inicial en el punto de lanzamiento es $x_0 = 0$. Sustituya estos valores en la ecuación (1) con $x = 8.00 \text{ m}$, para obtener

$$x = -4.90t^2 + 16.00t = 8.00$$

donde se ha suprimido las unidades por razones de facilidad matemática. Reacomodando esta expresión en la forma estándar de la ecuación A.7:

$$-4.90t^2 + 16.00t - 8.00 = 0$$

La ecuación es cuadrática en t , con $a = -4.9$; $b = 16$ y $c = -8.00$. Sustituya estos valores en la ecuación A.8:

$$\begin{aligned} t &= \frac{-16.0 \pm \sqrt{16^2 - 4(-4.90)(-8.00)}}{2(-4.90)} = \frac{-16.0 \pm \sqrt{99.2}}{-9.80} \\ &= 1.63 \mp \frac{\sqrt{99.2}}{9.80} = 0.614 \text{ s}, 2.65 \text{ s} \end{aligned}$$

Ambas soluciones son válidas en este caso, ya que el punto de interés se alcanza en dos momentos: uno al subir y el otro al bajar.

Ejercicios

Resuelva las siguientes ecuaciones cuadráticas:

Respuestas

1. $x^2 + 2x - 3 = 0$ $x_1 = 1$ $x_2 = -3$
2. $2x^2 - 5x + 2 = 0$ $x_1 = 2$ $x_2 = \frac{1}{2}$
3. $2x^2 - 4x - 9 = 0$ $x_1 = 1 + \sqrt{22}/2$ $x_2 = 1 - \sqrt{22}/2$

4. Repita el ejemplo balístico para una altura de 10.0 m por encima del punto de lanzamiento.
Respuestas: $t_1 = 0.842$ s $t_2 = 2.42$ s

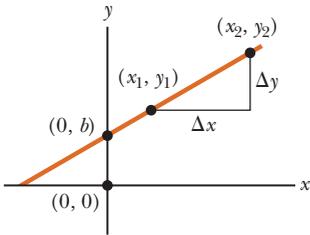


Figura A.1

E. Ecuaciones lineales

Una ecuación lineal tiene la forma

$$y = mx + b \quad \text{[A.9]}$$

donde m y b son constantes. Esta clase de ecuación se llama lineal porque el gráfico de y contra x es una línea recta, como se ve en la figura A.1. La constante b , llamada la intersección con y , representa el valor de y en el cual la línea recta corta al eje y . La constante m es igual a la pendiente de la línea recta. Si dos puntos en la línea recta son especificados por las coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) , como en la figura A.1, la pendiente de la línea recta puede ser expresada como

$$\text{Pendiente} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad \text{[A.10]}$$

Observe que m y b pueden tener valores positivos o negativos. Si $m > 0$, la línea recta tiene una pendiente positiva, como en la figura A.1. Si $m < 0$, la línea recta tiene una pendiente negativa. En la figura A.1, m y b son positivos. Otras tres posibles situaciones se muestran en la figura A.2.

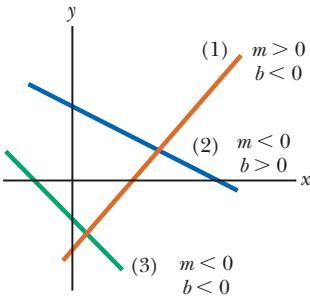


Figura A.2

EJEMPLO

Suponga que la resistencia eléctrica de un alambre de metal es 5.00Ω a una temperatura de 20.0°C y 6.14Ω a 80.0°C . Si se supone que la resistencia cambia linealmente, ¿cuál es la resistencia del alambre a 60.0°C ?

SOLUCIÓN Encuentre la ecuación de la línea recta que describe la resistencia R y después sustituya la nueva temperatura en él. Dos puntos en el gráfico de la resistencia contra temperatura, $(20.0^\circ\text{C}, 5.00 \Omega)$ y $(80.0^\circ\text{C}, 6.14 \Omega)$, permiten el cálculo de la pendiente:

$$(1) \quad m = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{6.14 \Omega - 5.00 \Omega}{80.0^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C}} = 1.90 \times 10^{-2} \Omega/^\circ\text{C}$$

Ahora utilice la ecuación punto pendiente de una recta, con la pendiente m y $(20.0^\circ\text{C}, 5.00 \Omega)$:

$$(2) \quad R - R_0 = m(T - T_0)$$

$$(3) \quad R - 5.00 \Omega = (1.90 \times 10^{-2} \Omega/^\circ\text{C})(T - 20.0^\circ\text{C})$$

Finalmente, sustituya $T = 60.0^\circ\text{C}$ en la ecuación (3) y resuelva para R , obteniendo $R = 5.76 \Omega$.

Ejercicios

1. Dibuje las gráficas de las siguientes líneas rectas:
a) $y = 5x + 3$ b) $y = -2x + 4$ c) $y = -3x - 6$
2. Encuentre las pendientes de las líneas rectas descritas en el ejercicio 1.
Respuestas: a) 5 b) -2 c) -3

3. Encuentre las pendientes de las líneas rectas que pasan a través de los siguientes conjuntos de puntos: **a)** $(0, -4)$ y $(4, 2)$ **b)** $(0, 0)$ y $(2, -5)$ **c)** $(-5, 2)$ y $(4, -2)$.
Respuestas: **a)** $3/2$ **b)** $-5/2$ **c)** $-4/9$
4. Suponga que en un experimento se obtienen las medidas de los siguientes desplazamientos (en metros) del equilibrio de un resorte vertical debido a la adadura de cargas (en newtons): $(0.025 \text{ m}, 22.0 \text{ N})$, $(0.075 \text{ m}, 66.0 \text{ N})$. Encuentre la constante del resorte, que es la pendiente de la línea recta en la gráfica del peso contra el desplazamiento.
Respuesta: 880 N/m

F. Solución de ecuaciones lineales simultáneas

Considere la ecuación $3x + 5y = 15$, con dos incógnitas, x y y . Esta ecuación no tiene una solución única. Por ejemplo, observe que $(x = 0, y = 3)$, $(x = 5, y = 0)$ y $(x = 2, y = 9/5)$ son soluciones de esta ecuación.

Si un problema tiene dos incógnitas, una solución única es posible solamente si tenemos dos ecuaciones. Generalmente si un problema tiene n incógnitas, su solución requiere de n ecuaciones. Para resolver dos ecuaciones simultáneas que involucran dos incógnitas, x y y , resolvemos una de las ecuaciones para x en términos de y , y sustituimos esta expresión en la otra ecuación.

EJEMPLO

Resuelva las dos siguientes ecuaciones simultáneas:

$$(1) \quad 5x + y = -8 \quad (2) \quad 2x - 2y = 4$$

SOLUCIÓN De la ecuación (2) encontramos que $x = y + 2$. Sustituyendo en la ecuación (1) se obtiene

$$\begin{aligned} 5(y + 2) + y &= -8 \\ 6y &= -18 \\ y &= -3 \\ x = y + 2 &= -1 \end{aligned}$$

SOLUCIÓN ALTERNATIVA Multiplique cada término en la ecuación (1) por el factor 2 y sume el resultado a la ecuación (2):

$$\begin{array}{r} 10x + 2y = -16 \\ 2x - 2y = 4 \\ \hline 12x = -12 \\ x = -1 \\ y = x - 2 = -3 \end{array}$$

Dos ecuaciones lineales que contienen dos incógnitas también se pueden resolver por un método gráfico. Si las líneas rectas que corresponden a las dos ecuaciones se trazan en un sistema coordenado convencional, la intersección de las dos líneas representa la solución. Por ejemplo, considere las dos ecuaciones

$$\begin{aligned} x - y &= 2 \\ x - 2y &= -1 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones se trazan en la figura A.3. La intersección de las dos rectas tiene los coordenadas $x = 5$, $y = 3$, que representa la solución de las ecuaciones. Usted debe comprobar esta solución por la técnica analítica discutida arriba.

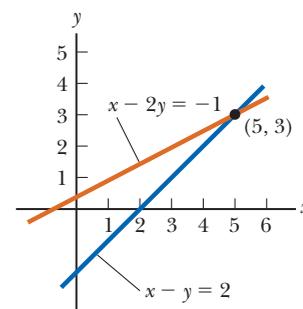


Figura A.3

EJEMPLO

Un bloque de masa $m = 2.00$ kg se desplaza en la dirección positiva de x a $v_i = 5.00$ m/s, mientras que un segundo bloque de masa $M = 4.00$ kg choca con el primer bloque viajando en la dirección x positiva a 2.00 m/s. La superficie es sin fricción. ¿Cuáles son las velocidades de los bloques después de la colisión, si ésta es perfectamente elástica?

SOLUCIÓN Como puede observar en el capítulo 6, una colisión perfectamente elástica implica las ecuaciones para la cantidad de movimiento y la energía. Con álgebra, la ecuación de la energía, que es cuadrática en v , se puede modificar como ecuación lineal. Las dos ecuaciones están dadas por

$$(1) \quad mv_i + MV_i = mv_f + MV_f$$

$$(2) \quad v_i - V_i = -(v_f - V_f)$$

Sustituya las cantidades conocidas $v_i = 5.00$ m/s y $V_i = 2.00$ m/s en las ecuaciones (1) y (2):

$$(3) \quad 18 = 2v_f + 4V_f$$

$$(4) \quad 3 = -v_f + V_f$$

Multiplique la ecuación (4) por 2 y sume a la ecuación (3):

$$\begin{array}{r} 18 = 2v_f + 4V_f \\ 6 = -2v_f + 2V_f \\ \hline 24 = 6V_f \quad \rightarrow \quad V_f = 4.00 \text{ m/s} \end{array}$$

Sustituyendo la solución para V_f regresando a la ecuación (4) nos conduce a $v_f = 1.00$ m/s.

Ejercicios

Resuelva los siguientes pares de ecuaciones simultáneas que involucran dos incógnitas:

Respuestas

- | | |
|------------------------------------|----------------------|
| 1. $x + y = 8$
$x - y = 2$ | $x = 5, y = 3$ |
| 2. $98 - T = 10a$
$T - 49 = 5a$ | $T = 65.3, a = 3.27$ |
| 3. $6x + 2y = 6$
$8x - 4y = 28$ | $x = 2, y = -3$ |

G. Logaritmos y exponenciales

Suponga que una cantidad x está expresada como una potencia de alguna cantidad a :

$$x = a^y \quad \text{[A.11]}$$

El número a se llama **base**. El **logaritmo** de x con respecto a la base a es igual al exponente al cual debe elevarse la base a fin de satisfacer la expresión $x = a^y$:

$$y = \log_a x \quad \text{[A.12]}$$

Inversamente, el **antilogaritmo** de y es el número x :

$$x = \text{antilog}_a y \quad \text{[A.13]}$$

La expresión antilog es de hecho, idéntica a la expresión exponencial de la ecuación A.11, la cual es preferida por razones prácticas.

En la práctica, las dos bases de uso más frecuente son la base 10, llamada base del logaritmo **común**, y base $e = 2.718 \dots$, llamada base *natural* de los logaritmos. Cuando se utilizan logaritmos comunes,

$$y = \log_{10} x \quad (\text{o } x = 10^y) \quad \text{[A.14]}$$

Cuando se utilizan logaritmos naturales

$$y = \ln x \quad (\text{o } x = e^y) \quad \text{[A.15]}$$

Por ejemplo, $\log_{10} 52 = 1.716$, así que $\text{antilog}_{10} 1.716 = 10^{1.716} = 52$. Asimismo, $\ln_e 52 = 3.951$, así que $\text{antiln}_e 3.951 = e^{3.951} = 52$.

En general, observe que usted puede hacer conversiones entre la base 10 y la base e con la igualdad

$$\ln x = (2.302\ 585)\log_{10} x \quad \text{[A.16]}$$

Finalmente, algunas propiedades útiles de los logaritmos son:

$$\begin{aligned} \log(ab) &= \log a + \log b & \ln e &= 1 \\ \log(a/b) &= \log a - \log b & \ln e^a &= a \\ \log(a^n) &= n \log a & \ln\left(\frac{1}{a}\right) &= -\ln a \end{aligned}$$

Los logaritmos en la física universitaria se utilizan frecuentemente en la definición del nivel de decibeles. La intensidad del sonido varía a través de varios órdenes de magnitud, dificultando la comparación de diversas intensidades. El nivel de decibeles se convierte a estas intensidades con una escala logarítmica más manejable.

■ EJEMPLO (Logs)

Suponga que un jet que prueba sus motores produce una intensidad de sonido $I = 0.750 \text{ W}$ en una cierta localización en un hangar. ¿Qué nivel de decibeles corresponde a esta intensidad de sonido?

SOLUCIÓN El nivel de decibeles β está definido por

$$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

donde $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ es la referencia de intensidad estándar. Sustituya la información dada:

$$\beta = 10 \log\left(\frac{0.750 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2}\right) = 119 \text{ dB}$$

■ EJEMPLO (Antilog)

Una colección de cuatro máquinas idénticas crea un nivel de decibeles de $\beta = 87.0 \text{ dB}$ en una tienda de máquinas. ¿Qué intensidad de sonido sería creado por solamente una máquina?

SOLUCIÓN Utilizamos la ecuación del nivel de decibeles para encontrar la intensidad de sonido total de las cuatro máquinas, y después dividimos por 4. De la ecuación (1):

$$87.0 \text{ dB} = 10 \log\left(\frac{I}{10^{-12} \text{ W/m}^2}\right)$$

Dividimos ambos lados por 10 y tomamos el antilogaritmo de ambos lados, lo que significa, de manera equivalente, que la forma exponencial es:

$$\begin{aligned} 10^{8.7} &= 10^{\log(I/10^{-12})} = \frac{I}{10^{-12}} \\ I &= 10^{-12} \cdot 10^{8.7} = 10^{-3.3} = 5.01 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Hay cuatro máquinas, así que el resultado debe dividirse por 4 para obtener la intensidad de una máquina:

$$I = 1.25 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

■ EJEMPLO (Exponenciales)

La vida media del tritio es 12.33 años. (El tritio es el isótopo más pesado del hidrógeno, con un núcleo que consiste de un protón y dos neutrones.) Si una muestra contiene 3.0 g de tritio inicialmente, ¿cuánto permanece después de 20.0 años?

SOLUCIÓN La ecuación que da el número de núcleos de una sustancia radiactiva como función del tiempo es:

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

donde N es el número de los núcleos restantes, N_0 es el número inicial de núcleos y n es el número de vida media. Observe que esta ecuación es una expresión exponencial con base de $\frac{1}{2}$. El número de vida media está dada por $n = t/T_{1/2} = 20.0 \text{ años}/12.33 \text{ años} = 1.62$. La cantidad fraccionaria de tritio que permanece después de 20.0 años es, por lo tanto

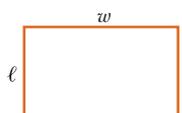
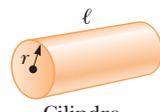
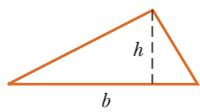
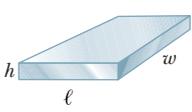
$$\frac{N}{N_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1.62} = 0.325$$

Por lo tanto, de los 3.00 g originales de tritio, permanecen $0.325 \times 3.00 \text{ g} = 0.975 \text{ g}$.

A.4 Geometría

La tabla A.2 da las áreas y los volúmenes para varias formas geométricas usadas a través de este texto. Estas áreas y volúmenes son importantes en numerosas aplicaciones de la física. Un buen ejemplo es el concepto de presión P , que es la fuerza por unidad de superficie. Como ecuación, se escribe $P = F/A$. También se deben calcular áreas en problemas que implican la razón de volumen de un fluido que pasa por un tubo, utilizando la ecuación de continuidad, la tensión de expansión ejercida sobre un cable por un peso, la razón de transferencia de energía térmica a través de una barra, y la densidad de corriente a través de un alambre. Hay otros numerosos usos. Los volúmenes son importantes en el cálculo de la fuerza de empuje ejercida por el agua sobre un objeto sumergido, en cálculo de densidades y en la determinación de la tensión volumétrica del líquido o del gas en un objeto, que afecta su volumen. Una vez más, hay otros numerosos usos.

TABLA A.2 Información útil en geometría

Forma	Área o volumen	Forma	Área o volumen
 Rectángulo	Área = ℓw	 Esfera	Área = $4\pi r^2$ Volumen = $\frac{4\pi r^3}{3}$
 Círculo	Área = πr^2 Circunferencia = $2\pi r$	 Cilindro	Área lateral = $2\pi r\ell$ Volumen = $\pi r^2\ell$
 Triángulo	Área = $\frac{1}{2}bh$	 Caja rectangular	Área = $2(\ell h + \ell w + hw)$ Volumen = ℓwh

A.5 Trigonometría

Algunos de los hechos básicos referentes a la trigonometría se presentan en el capítulo 1, y le sugerimos que estudie el material allí presentado si usted está teniendo dificultades con esta rama de las matemáticas. Los conceptos trigonométricos más importantes incluyen el teorema de Pitágoras:

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad [\text{A.17}]$$

Esta ecuación establece que el cuadrado de la distancia a lo largo de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los catetos. También puede ser utilizado para encontrar distancias entre los puntos en coordenadas cartesianas y la longitud de un vector, donde Δx es sustituida por la componente x del vector y Δy es sustituido por la componente y del vector. Si el vector \vec{A} tiene componentes A_x y A_y , la magnitud A del vector satisface

$$A^2 = A_x^2 + A_y^2 \quad [\text{A.18}]$$

lo cual tiene una forma totalmente análoga a la del teorema de Pitágoras. También son altamente útiles las funciones coseno y seno porque relacionan la longitud de un vector con sus componentes x y y :

$$A_x = A \cos \theta \quad [\text{A.19}]$$

$$A_y = A \sin \theta \quad [\text{A.20}]$$

La dirección θ de un vector en un plano se puede determinar por medio de la función tangente:

$$\tan \theta = \frac{A_y}{A_x} \quad [\text{A.21}]$$

Una identidad obtenida del teorema de Pitágoras que también es con frecuencia muy útil:

$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1 \quad [\text{A.22}]$$

Los detalles en los conceptos anteriores se pueden encontrar en las extensas discusiones de los capítulos 1 y 3. Las siguientes son algunas otras identidades trigonométricas que pueden a veces ser útiles:

$$\sin \theta = \cos(90^\circ - \theta)$$

$$\cos \theta = \sin(90^\circ - \theta)$$

$$\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$$

$$\cos 2\theta = \cos^2 \theta - \sin^2 \theta$$

$$\sin(\theta \pm \phi) = \sin \theta \cos \phi \pm \cos \theta \sin \phi$$

$$\cos(\theta \pm \phi) = \cos \theta \cos \phi \pm \sin \theta \sin \phi$$

Las relaciones siguientes se aplican a cualquier triángulo, según se muestra en la figura A.4:

$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \beta \quad \text{ley de los cosenos}$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \gamma$$

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} \quad \text{ley de los senos}$$

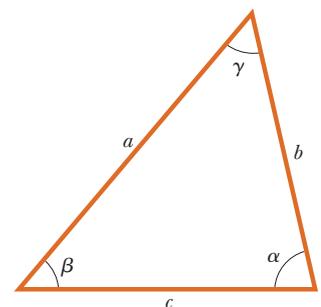


Figura A.4

■ Apéndice B

Tabla abreviada de isótopos

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) $T_{1/2}$
0	(Neutrón)	n		1*	1.008 665		10.4 min
1	Hidrógeno	H	1.007 94	1	1.007 825	99.988 5	
	Deuterio	D		2	2.014 102	0.011 5	
	Tritio	T		3*	3.016 049		12.33 años
2	Helio	He	4.002 602	3	3.016 029	0.000 137	
				4	4.002 603	99.999 863	
3	Litio	Li	6.941	6	6.015 122	7.5	
				7	7.016 004	92.5	
4	Berilio	Be	9.012 182	7*	7.016 929		53.3 días
				9	9.012 182	100	
5	Boro	B	10.811	10	10.012 937	19.9	
6	Carbono	C	12.010 7	11	11.009 306	80.1	
				10*	10.016 853		19.3 s
				11*	11.011 434		20.4 min
				12	12.000 000	98.93	
				13	13.003 355	1.07	
7	Nitrógeno	N	14.006 7	14*	14.003 242		5 730 años
				13*	13.005 739		9.96 min
				14	14.003 074	99.632	
				15	15.000 109	0.368	
8	Oxígeno	O	15.999 4	15*	15.003 065		122 s
				16	15.994 915	99.757	
				18	17.999 160	0.205	
9	Flúor	F	18.998 403 2	19	18.998 403	100	
10	Neón	Ne	20.179 7	20	19.992 440	90.48	
				22	21.991 385	9.25	
				22*	21.994 437		2.61 años
11	Sodio	Na	22.989 77	23	22.989 770	100	
				24*	23.990 963		14.96 h
				24	23.985 042	78.99	
				25	24.985 837	10.00	
12	Magnesio	Mg	24.305 0	26	25.982 593	11.01	
				27	26.981 539	100	
				28	27.976 926	92.229 7	
13	Aluminio	Al	26.981 538	31	30.973 762	100	
14	Silicio	Si	28.085 5	32*	31.973 907		14.26 días
15	Fosforo	P	30.973 761	32	31.972 071	94.93	
				35*	34.969 032		87.5 días
				35	34.968 853	75.78	
16	Azufre	S	32.066	37	36.965 903	24.22	
				40	39.962 383	99.600 3	
17	Cloro	Cl	35.452 7	39	38.963 707	93.258 1	
18	Argón	Ar	39.948	40*	39.963 999	0.011 7	1.28 × 10 ⁹ años
				40	39.962 591	96.941	
19	Potasio	K	39.098 3	45	44.955 910	100	
20	Calcio	Ca	40.078	48	47.947 947	73.72	
21	Escandio	Sc	44.955 910				
22	Titanio	Ti	47.867				

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) $T_{1/2}$
23	Vanadio	V	50.941 5	51	50.943 964	99.750	
24	Cromo	Cr	51.996 1	52	51.940 512	83.789	
25	Manganeso	Mn	54.938 049	55	54.938 050	100	
26	Hierro	Fe	55.845	56	55.934 942	91.754	
27	Cobalto	Co	58.933 200	59	58.933 200	100	
				60*	59.933 822		5.27 años
28	Níquel	Ni	58.693 4	58	57.935 348	68.076 9	
				60	59.930 790	26.223 1	
29	Cobre	Cu	63.546	63	62.929 601	69.17	
				65	64.927 794	30.83	
30	Zinc	Zn	65.39	64	63.929 147	48.63	
				66	65.926 037	27.90	
				68	67.924 848	18.75	
31	Galio	Ga	69.723	69	68.925 581	60.108	
				71	70.924 705	39.892	
32	Germanio	Ge	72.61	70	69.924 250	20.84	
				72	71.922 076	27.54	
				74	73.921 178	36.28	
33	Arsénico	As	74.921 60	75	74.921 596	100	
34	Selenio	Se	78.96	78	77.917 310	23.77	
				80	79.916 522	49.61	
35	Bromo	Br	79.904	79	78.918 338	50.69	
				81	80.916 291	49.31	
36	Criptón	Kr	83.80	82	81.913 485	11.58	
				83	82.914 136	11.49	
				84	83.911 507	57.00	
				86	85.910 610	17.30	
37	Rubidio	Rb	85.467 8	85	84.911 789	72.17	
				87*	86.909 184	27.83	4.75×10^{10} años
38	Estroncio	Sr	87.62	86	85.909 262	9.86	
				88	87.905 614	82.58	
				90*	89.907 738		29.1 años
39	Itrio	Y	88.905 85	89	88.905 848	100	
40	Circonio	Zr	91.224	90	89.904 704	51.45	
				91	90.905 645	11.22	
				92	91.905 040	17.15	
				94	93.906 316	17.38	
41	Niobio	Nb	92.906 38	93	92.906 378	100	
42	Molibdeno	Mo	95.94	92	91.906 810	14.84	
				95	94.905 842	15.92	
				96	95.904 679	16.68	
				98	97.905 408	24.13	

(continúa)

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) $T_{1/2}$
43	Tecnecio	Tc		98*	97.907 216		4.2×10^6 años
				99*	98.906 255		2.1×10^5 años
44	Rutenio	Ru	101.07	99	98.905 939	12.76	
				100	99.904 220	12.60	
				101	100.905 582	17.06	
				102	101.904 350	31.55	
				104	103.905 430	18.62	
				103	102.905 504	100	
45	Rodio	Rh	102.905 50	103	102.905 504	100	
46	Paladio	Pd	106.42	104	103.904 035	11.14	
				105	104.905 084	22.33	
				106	105.903 483	27.33	
				108	107.903 894	26.46	
				110	109.905 152	11.72	
				107	106.905 093	51.839	
47	Plata	Ag	107.868 2	107	106.905 093	51.839	
				109	108.904 756	48.161	
48	Cadmio	Cd	112.411	110	109.903 006	12.49	
				111	110.904 182	12.80	
				112	111.902 757	24.13	
				113*	112.904 401	12.22	9.3×10^{15} años
				114	113.903 358	28.73	
				115*	114.903 878	95.71	4.4×10^{14} años
49	Indio	In	114.818	116	115.901 744	14.54	
50	Estaño	Sn	118.710	116	115.901 744	14.54	
				118	117.901 606	24.22	
				120	119.902 197	32.58	
				121	120.903 818	57.21	
51	Antimonio	Sb	121.760	121	120.903 818	57.21	
				123	122.904 216	42.79	
				126	125.903 306	18.84	
52	Telurio	Te	127.60	126	125.903 306	18.84	
				128*	127.904 461	31.74	$> 8 \times 10^{24}$ años
				130*	129.906 223	34.08	$\leq 1.25 \times 10^{21}$ años
53	Yodo	I	126.904 47	127	126.904 468	100	
				129*	128.904 988		1.6×10^7 años
54	Xenón	Xe	131.29	129	128.904 780	26.44	
				131	130.905 082	21.18	
				132	131.904 145	26.89	
				134	133.905 394	10.44	
				136*	135.907 220	8.87	$\geq 2.36 \times 10^{21}$ años
				133	132.905 447	100	
55	Cesio	Cs	132.905 45	137	136.905 821	11.232	
56	Bario	Ba	137.327	137	136.905 821	11.232	
				138	137.905 241	71.698	
57	Lantano	La	138.905 5	139	138.906 349	99.910	
58	Cerio	Ce	140.116	140	139.905 434	88.450	
				142*	141.909 240	11.114	$> 5 \times 10^{16}$ años
59	Praseodimio	Pr	140.907 65	141	140.907 648	100	
60	Neodimio	Nd	144.24	142	141.907 719	27.2	
				144*	143.910 083	23.8	2.3×10^{15} años
				146	145.913 112	17.2	

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) $T_{1/2}$
61	Prometio	Pm		145*	144.912 744		17.7 años
62	Samario	Sm	150.36	147*	146.914 893	14.99	1.06×10^{11} años
				149*	148.917 180	13.82	$> 2 \times 10^{15}$ años
				152	151.919 728	26.75	
				154	153.922 205	22.75	
				151	150.919 846	47.81	
63	Europio	Eu	151.964	153	152.921 226	52.19	
				156	155.922 120	20.47	
64	Gadolinio	Gd	157.25	158	157.924 100	24.84	
				160	159.927 051	21.86	
				159	158.925 343	100	
65	Terbio	Tb	158.925 34	162	161.926 796	25.51	
66	Disproσιο	Dy	162.50	163	162.928 728	24.90	
				164	163.929 171	28.18	
				165	164.930 320	100	
				166	165.930 290	33.61	
67	Holmio	Ho	164.930 32	167	166.932 045	22.93	
				168	167.932 368	26.78	
				169	168.934 211	100	
				172	171.936 378	21.83	
68	Erbio	Er	167.6	173	172.938 207	16.13	
				174	173.938 858	31.83	
				175	174.940 768	97.41	
				177	176.943 220	18.60	
69	Tulio	Tm	168.934 21	178	177.943 698	27.28	
				179	178.945 815	13.62	
				180	179.946 549	35.08	
				181	180.947 996	99.988	
70	Iterbio	Yb	173.04	182	181.948 206	26.50	
				183	182.950 224	14.31	
				184*	183.950 933	30.64	$> 3 \times 10^{17}$ años
				186	185.954 362	28.43	
71	Lutecio	Lu	174.967	185	184.952 956	37.40	
				187*	186.955 751	62.60	4.4×10^{10} años
72	Hafnio	Hf	178.49	188	187.955 836	13.24	
				189	188.958 145	16.15	
				190	189.958 445	26.26	
				192	191.961 479	40.78	
				191	190.960 591	37.3	
73	Tantalio	Ta	180.947 9	193	192.962 924	62.7	
				194	193.962 664	32.967	
				195	194.964 774	33.832	
74	Tungsteno (Wolframio)	W	183.84	196	195.964 935	25.242	
				197	196.966 552	100	
				199	198.968 262	16.87	
				200	199.968 309	23.10	
75	Renio	Re	186.207	201	200.970 285	13.18	
				202	201.970 626	29.86	
				199	198.968 262	16.87	
				200	199.968 309	23.10	
76	Osmio	Os	190.23	201	200.970 285	13.18	
				202	201.970 626	29.86	
77	Iridio	Ir	192.217	202	201.970 626	29.86	
				191	190.960 591	37.3	
				193	192.962 924	62.7	
78	Platino	Pt	195.078	194	193.962 664	32.967	
				195	194.964 774	33.832	
				196	195.964 935	25.242	
79	Oro	Au	196.966 55	197	196.966 552	100	
				199	198.968 262	16.87	
80	Mercurio	Hg	200.59	200	199.968 309	23.10	
				201	200.970 285	13.18	
				202	201.970 626	29.86	
				202	201.970 626	29.86	

Número atómico Z	Elemento	Símbolo	Masa atómica química (u)	Número de masa (*Indica que es radiactivo) A	Masa atómica (u)	Porcentaje de abundancia	Vida media (si es radiactivo) T _{1/2}				
81	Talio	Tl	204.383 3	203	202.972 329	29.524					
				205	204.974 412	70.476					
				(Th C'')	208*	207.982 005		3.053 min			
				(Ra C'')	210*	209.990 066		1.30 min			
82	Plomo	Pb	207.2	204*	203.973 029	1.4	≥ 1.4 × 10 ¹⁷ años				
				206	205.974 449	24.1					
				207	206.975 881	22.1					
				208	207.976 636	52.4					
				(Ra D)	210*	209.984 173		22.3 años			
				(Ac B)	211*	210.988 732		36.1 min			
				(Th B)	212*	211.991 888		10.64 h			
				(Ra B)	214*	213.999 798		26.8 min			
				83	Bismuto	Bi	208.980 38	209	208.980 383	100	
								(Th C)	211*	210.987 258	
84	Polonio	Po									
				(Ra F)	210*	209.982 857		138.38 días			
		(Ra C')		214*	213.995 186		164 μs				
85	Astato	At		218*	218.008 682		1.6 s				
86	Radón	Rn		222*	222.017 570		3.823 días				
87	Francio	Fr									
				(Ac K)	223*	223.019 731		22 min			
88	Radio	Ra		226*	226.025 403		1 600 años				
				(Ms Th ₁)	228*	228.031 064		5.75 años			
				227*	227.027 747		21.77 años				
89	Actinio	Ac		227*	227.027 747		21.77 años				
90	Torio	Th	232.038 1								
				(Rd Th)	228*	228.028 731		1.913 años			
				(Th)	232*	232.038 050	100	1.40 × 10 ¹⁰ años			
				231*	231.035 879		32.760 años				
91	Protactinio	Pa	231.035 88	232*	232.037 146		69 años				
92	Uranio	U	238.028 9	233*	233.039 628		1.59 × 10 ⁵ años				
				(Ac U)	235*	235.043 923	0.720 0	7.04 × 10 ⁸ años			
				236*	236.045 562		2.34 × 10 ⁷ años				
				238*	238.050 783	99.274 5	4.47 × 10 ⁹ años				
				(UI)	237*	237.048 167		2.14 × 10 ⁶ años			
				239*	239.052 156		2.412 × 10 ⁴ años				
93	Neptunio	Np		242*	242.058 737		3.73 × 10 ⁶ años				
				244*	244.064 198		8.1 × 10 ⁷ años				
				243*	243.061 323		2.14 × 10 ⁵ años				
94	Plutonio	Pu		239*	239.052 156		2.412 × 10 ⁴ años				
				242*	242.058 737		3.73 × 10 ⁶ años				
				244*	244.064 198		8.1 × 10 ⁷ años				

Fuentes: Las masas atómicas químicas son de T. B. Coplen, "Atomic Weights of the Elements 1999", un informe técnico a la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, y publicado en *Pure and Applied Chemistry*, 73 (4), 667-683, 2001. Las masas atómicas de los isótopos son de C. Audi y A. H. Wapstra, "The 1995 Update to the Atomic Mass Evaluation", *Nuclear Physics*, A595, vol. 4, 409-480, 25 de diciembre de 1995. Los valores de los porcentajes de abundancia son de K. J. R. Rosman y P. D. P. Taylor, "Isotopic Compositions of the Elements 1999", un informe técnico a la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada, y publicado en *Pure and Applied Chemistry*, 70 (1), 217-236, 1998.

Algunas tablas útiles

TABLA C.1 Símbolos matemáticos utilizados en el texto y su significado

Símbolo	Significado
=	es igual a
≠	no es igual a
≡	se define como
∝	es proporcional a
>	es mayor que
<	es menor que
>>	es mucho mayor que
<<	es mucho menor que
≈	es aproximadamente igual a
~	está en el orden de magnitud de
Δx	cambio en x o incertidumbre en x
$\sum x_i$	suma de todas las cantidades x_i
$ x $	valor absoluto de x (una cantidad siempre positiva)

TABLA C.2 Símbolos comunes para unidades

Símbolo	Unidad	Símbolo	Unidad
A	ampere	kcal	kilocaloría
Å	angstrom	kg	kilogramo
atm	atmósfera	km	kilómetro
Bq	bequerel	kmol	kilomol
Btu	unidad térmica Británica	L	litro
C	coulomb	lb	libra
°C	grado Celsius	ly	año luz
cal	caloría	m	metro
cm	centímetro	min	minuto
Ci	curie	mol	mol
d	día	N	newton
deg	grado (ángulo)	nm	nanómetro
eV	electronvolt	Pa	pascal
°F	grado Fahrenheit	rad	radián
F	farad	rev	revolución
ft	pie	s	segundo
G	Gauss	T	tesla
g	gramo	n	unidad de masa atómica
H	henry	V	volt
h	hora	W	watt
hp	caballo de fuerza	Wb	weber
Hz	hertz	yr	año
in.	pulgada	μm	micrómetro
J	joule	Ω	ohm
K	kelvin		

TABLA C.3 Alfabeto griego

Alfa	A	α	Nu	N	ν
Beta	B	β	Xi	Ξ	ξ
Gamma	Γ	γ	Omicrón	O	o
Delta	Δ	δ	Pi	Π	π
Epsilon	E	ϵ	Rho	P	ρ
Zeta	Z	ζ	Sigma	Σ	σ
Eta	H	η	Tau	T	τ
Theta	Θ	θ	Upsilon	Y	υ
Iota	I	ι	Phi	Φ	ϕ
Kappa	K	κ	Chi	X	χ
Lambda	Λ	λ	Psi	Ψ	ψ
Mu	M	μ	Omega	Ω	ω

TABLA C.4 Datos físicos usados con frecuencia^a

Distancia promedio Tierra-Luna	3.84×10^8 m
Distancia promedio Tierra-Sol	1.496×10^{11} m
Radio ecuatorial de la Tierra	6.38×10^6 m
Densidad del aire (20°C y 1 atm)	1.20 kg/m^3
Densidad del agua (20°C y 1 atm)	$1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
Aceleración en caída libre	9.80 m/s^2
Masa de la Tierra	5.98×10^{24} kg
Masa de la Luna	7.36×10^{22} kg
Masa del Sol	1.99×10^{30} kg
Presión atmosférica normal	1.013×10^5 Pa

^a Éstos son los valores de las constantes usados en este texto.

TABLA C.5 Algunas constantes fundamentales

Cantidad	Símbolo	Valor ^a
Unidad de masa atómica	u	1.660 538 782 (83) × 10 ⁻²⁷ kg 931.494 028 (23) MeV/c ²
Número de Avogadro	N _A	6.022 141 79 (30) × 10 ²³ partículas/mol
Magnetón de Bohr	$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$	9.274 009 15 (23) × 10 ⁻²⁴ J/T
Radio de Bohr	$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e e^2 k_e}$	5.291 772 085 9 (36) × 10 ⁻¹¹ m
Constante de Boltzmann	$k_B = \frac{R}{N_A}$	1.380 650 4 (24) × 10 ⁻²³ J/K
Longitud de onda de Compton	$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$	2.426 310 217 5 (33) × 10 ⁻¹² m
Constante de Coulomb	$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$	8.987 551 788 . . . × 10 ⁹ N·m ² /C ² (exacto)
Masa del deuterón	m _d	3.343 583 20 (17) × 10 ⁻²⁷ kg 2.013 553 212 724 (78) u
Masa del electrón	m _e	9.109 382 15 (45) × 10 ⁻³¹ kg 5.485 799 094 3 (23) × 10 ⁻⁴ u 0.510 998 910 (13) MeV/c ²
Electron volt	eV	1.602 176 487 (40) × 10 ⁻¹⁹ J
Carga elemental	e	1.602 176 487 (40) × 10 ⁻¹⁹ C
Constante de gases	R	8.314 472 (15) J/mol·K
Constante gravitacional	G	6.674 28 (67) × 10 ⁻¹¹ N·m ² /kg ²
Masa del neutrón	m _n	1.674 927 211 (84) × 10 ⁻²⁷ kg 1.008 664 915 97 (43) u 939.565 346 (23) MeV/c ²
Magnetón nuclear	$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p}$	5.050 783 24 (13) × 10 ⁻²⁷ J/T
Permeabilidad del espacio libre	μ ₀	4π × 10 ⁻⁷ T·m/A (exacto)
Permitividad del espacio libre	$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2}$	8.854 187 817 . . . × 10 ⁻¹² C ² /N·m ² (exacto)
Constante de Planck	h	6.626 068 96 (33) × 10 ⁻³⁴ J·s
	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$	1.054 571 628 (53) × 10 ⁻³⁴ J·s
Masa del protón	m _p	1.672 621 637 (83) × 10 ⁻²⁷ kg 1.007 276 466 77 (10) u 938.272 013 (23) MeV/c ²
Constante de Rydberg	R _H	1.097 373 156 852 7 (73) × 10 ⁷ m ⁻¹
Velocidad de la luz en el vacío	c	2.997 924 58 × 10 ⁸ m/s (exacto)

Nota: Estas constantes son los valores recomendados por CODATA en 2006, basados en ajustes de datos por mínimos cuadrados a partir de diferentes mediciones. Para una lista más completa ver P. J. Mohr y B. N. Taylor, "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2006". *Rev. Mod. Phys.* **80**: 2, 633-730, 2008.

^aLos números que están entre paréntesis para los valores siguientes representan los valores inciertos de los dos últimos dígitos.

Unidades SI

TABLA D.1 Unidades fundamentales SI

Cantidad fundamental	Unidad fundamental SI	
	Nombre	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Corriente eléctrica	ampere	A
Temperatura	kelvin	K
Cantidad de una sustancia	mole	mol
Intensidad luminosa	candela	cd

TABLA D.2 Unidades derivadas SI

Cantidad	Nombre	Símbolo	Expresión en términos de unidades fundamentales	Expresión en términos de otras unidades SI
Ángulo plano	radián	rad	m/m	
Frecuencia	hertz	Hz	s ⁻¹	
Fuerza	newton	N	kg · m/s ²	J/m
Presión	pascal	Pa	kg/m · s ²	N/m ²
Energía: trabajo	joule	J	kg · m ² /s ²	N · m
Potencia	watt	W	kg · m ² /s ³	J/s
Carga eléctrica	coulomb	C	A · s	
Potencial eléctrico (fem)	volt	V	kg · m ² /A · s ³	W/A, J/C
Capacitancia	farad	F	A ² · s ⁴ /kg · m ²	C/V
Resistencia eléctrica	ohm	Ω	kg · m ² /A ² · s ³	V/A
Flujo magnético	weber	wb	kg · m ² /A · s ²	V · s, T · m ²
Intensidad de campo magnético	tesla	T	kg/A · s ²	Wb/m ²
Inductancia	henry	H	kg · m ² /A ² · s ²	Wb/A

Vectores

■ EJEMPLO 1

Un caminante se dirige directo al norte a 4.00 kilómetros por hora de su campamento. Un oso, comenzando 3.00 kilómetros al este del campamento, camina a 7.00 kilómetros por hora en una dirección 30° al noroeste. Después de una hora, ¿qué tanto se apartaron?

SOLUCIÓN

Escriba las componentes del vector de posición del caminante después de una hora, eligiendo el campamento como origen:

$$H_x = 0 \quad H_y = 4.00 \text{ m}$$

El oso se desplaza a un ángulo de $30^\circ + 90^\circ = 120^\circ$ con respecto a la dirección este, donde esta dirección corresponde a la x positiva. Escriba las componentes del vector de posición del oso después de una hora, otra vez en relación con el campamento:

$$B_x = 3.00 \text{ km} + (7.00 \text{ km}) \cos 120^\circ = -0.500 \text{ km}$$

$$B_y = (7.00 \text{ km}) \sin 120^\circ = 6.06 \text{ km}$$

Reste el vector de posición del oso del caminante, lo que resultará en un vector \vec{R} que apunta del oso al caminante:

$$R_x = H_x - B_x = 0 - (-0.500 \text{ km}) = 0.500 \text{ km}$$

$$R_y = H_y - B_y = 4.00 \text{ km} - 6.06 \text{ km} = -2.06 \text{ km}$$

Calcule la magnitud del vector resultante, obteniendo la distancia entre el caminante y el oso:

$$R = (R_x^2 + R_y^2)^{1/2} = [(0.500 \text{ km})^2 + (-2.06 \text{ km})^2]^{1/2}$$

$$= 2.12 \text{ km}$$

■ EJEMPLO 2

Dos vectores \vec{A} y \vec{B} no paralelos uno con relación al otro (no “antiparalelos” —que apuntan en dirección opuesta—). Si $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$, ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta para las magnitudes A , B y R ? a) $R > A + B$ b) $R = A + B$ c) $R < A + B$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Como los vectores \vec{A} y \vec{B} no son paralelos, pueden ser arreglados para formar dos lados de un triángulo. Por la ley geométrica de la adición de vectores, el vector resultante \vec{R} forma el tercer lado del mismo triángulo. La distancia más corta entre dos puntos es una línea recta, así que la distancia a lo largo de R es más corta que la suma de las longitudes de A y de B . Por lo tanto, la respuesta correcta es c).

Problemas de opción múltiple

- Un automóvil viaja en dirección este a una distancia de 3 millas y después en dirección norte 4 millas adicionales antes de parar. ¿Cuál es la distancia en línea recta más corta entre el punto de comienzo y el punto final de este viaje? a) 3 millas b) 4 millas c) 5 millas d) 7 millas.
- En el problema anterior, ¿cuál es el ángulo α de la trayectoria más corta en relación con el norte? a) $\alpha = \arccos 3/5$ b) $\alpha = \arcsin 5/3$ c) $\alpha = \arcsin 4/3$ d) $\alpha = \arctan 3/4$
- Un vector \vec{A} forma un ángulo de 60° con el eje x de un sistema coordenado cartesiano. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera para las magnitudes indicadas? a) $A_x > A_y$ b) $A_y > A_x$ c) $A_a > A$ d) $A_x > A$
- La fuerza es una cantidad vectorial medida en newtons, N. ¿Cuál debe ser el ángulo entre dos fuerzas concurrentes de 5 N y 3 N, respectivamente, si el vector resultante tiene una magnitud de 8 N? a) 0° b) 45° c) 90° d) 180°

5. Dos fuerzas actúan concurrentemente sobre un objeto. Ambos vectores tienen la misma magnitud de 10 N y actúan perpendicularmente uno con el otro. ¿Cuál es la estimación más cercana de la magnitud de su resultante? a) 0 N b) 14 N c) 20 N d) 100 N

RESPUESTAS

1. **c).** Los dos catetos correspondientes al viaje son perpendiculares; por lo tanto, la distancia más corta está dada por la hipotenusa del triángulo rectángulo correspondiente. El valor está dado por el teorema de Pitágoras: $R = (3^2 + 4^2)^{1/2} = 5$ mi.
2. **d).** El ángulo α que da la dirección de la hipotenusa concierne al eje y está dado por $\tan \alpha = \text{lado opuesto/lado adyacente} = 3/4 \rightarrow \alpha = \text{arco tan } 3/4$
3. **b).** Las opciones c) y d) pueden ser eliminadas inmediatamente porque la proyección de un vector puede nunca ser mayor que la magnitud del vector mismo. Mientras que el ángulo entre el vector y el eje aumenta hacia 90° , la magnitud de la proyección disminuye hacia cero. El ángulo entre el vector y el eje x es 60° , lo que significa que el ángulo entre el vector y el eje y debe ser 30° . Como el ángulo entre el vector y el eje y es más pequeño que el ángulo entre el vector y el eje x , la proyección sobre el eje y , A_y , debe ser mayor que la proyección sobre el eje x , A_x .
4. **a).** La única manera que la suma de vectores correspondientes a fuerzas de 3 N y 5 N puede ser igual a 8 N es si ambas fuerzas actúan en la misma dirección. El ángulo entre ellos necesariamente es de cero grados.
5. **b).** Los dos vectores forman los catetos de un triángulo rectángulo. El vector resultante es la hipotenusa. Las opciones a) y c) pueden ser eliminadas inmediatamente porque requieren que las dos fuerzas sean antiparalelas o paralelas respectivamente. La opción d) puede también ser eliminada porque es demasiado grande para ser la hipotenusa. La magnitud de la resultante se puede calcular con el teorema Pitágoras:

$$R = (10^2 + 10^2)^{1/2} = (200)^{1/2} = 10(2)^{1/2} = 10(1.41) \approx 14 \text{ N}$$

Movimiento

EJEMPLO 1

Un conductor que viaja a 24.0 m/s aplica de golpe los frenos hasta detenerse a los 6.00 s. ¿Cuál es la aceleración del coche, suponiendo que es constante, y hasta dónde llega el automóvil durante este tiempo?

SOLUCIÓN

Aplice la ecuación de la cinemática para la velocidad:

$$(1) \quad v = at + v_0$$

Resuelva la ecuación (1) para la aceleración a , y sustituya $v = 0$; $t = 6.00$ s y $v_0 = 24.0$ m/s:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{0 - 24.0 \text{ m/s}}{6.00 \text{ s}} = -4.00 \text{ m/s}^2$$

El desplazamiento puede entonces ser encontrado con la ecuación independiente del tiempo:

$$(2) \quad v^2 - v_0^2 = 2a \Delta x$$

Resuelva la ecuación (2) para Δx y sustituya valores:

$$\Delta x = \frac{v^2 - v_0^2}{2a} = \frac{0 - (24.0 \text{ m/s})^2}{2(-4.00 \text{ m/s}^2)} = 72.0 \text{ m}$$

EJEMPLO 2

Un estudiante en la azotea de un edificio deja caer una roca desde el reposo. Cuando la roca está a la mitad del camino al suelo, deja caer una pelota de golf desde el reposo. Mientras que caen ambos objetos ¿la distancia entre ellos aumenta, disminuye o permanece igual?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

En el instante que la pelota de golf se suelta la roca está viajando más rápidamente, por lo tanto viajará siempre más rápidamente antes de que alcance la tierra porque las velocidades de ambos objetos están cambiando en la misma razón. Como está cayendo la roca siempre más rápidamente, la distancia entre ella y la pelota de golf aumentará.

EJEMPLO 3

Un jugador del béisbol lanza una bola en ángulo θ con la horizontal y a una velocidad v_0 . Despreciando la fricción del aire, ¿cuál es la velocidad de la bola cuando regresa a la misma altura en la que fue lanzada? a) La velocidad de la bola será la misma. b) La rapidez de la bola será mayor. c) La velocidad de la bola será más menor.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La velocidad de la bola será la misma, así que la respuesta correcta es a). Como no hay aceleración en la dirección horizontal, la velocidad en la dirección x es constante, y solamente la dirección y necesita ser considerada. Por simetría, el tiempo que toma llegar a la altura máxima es el mismo tiempo que le toma caer de nuevo a la altura original. Si la velocidad de la bola en la dirección y cambia de v_{0y} a 0 en el rumbo a la altura máxima, entonces cambiará a partir de 0 a $-v_{0y}$, al volver a su altura original. Por lo tanto los componentes de la velocidad de la bola serán las mismas que antes, a excepción de un cambio de signo en la componente y , que no afecta la velocidad.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Sea $x = 0$, $y = 0$ el punto de lanzamiento. Utilice la ecuación del desplazamiento en la dirección de y igual a cero:

$$(1) \quad \Delta y = \frac{1}{2}at^2 + v_{0y}t = 0$$

Resuelva la ecuación (1) para obtener los tiempos $\Delta y = 0$ (es decir, al principio y al final de la trayectoria):

$$t = 0; t = \frac{-2v_{0y}}{a}$$

Sustituya estas dos soluciones en la ecuación para la velocidad en la dirección y :

$$v_y = at + v_{0y}$$

Caso 1: $t = 0$

$$v_y = a \cdot 0 + v_{0y} = v_{0y}$$

$$\text{Caso 2: } t = \frac{-2v_{0y}}{a}$$

$$v_y = a \cdot \left(\frac{-2v_{0y}}{a} \right) + v_{0y} = -v_{0y}$$

La velocidad en cualquier tiempo está dada por la expresión siguiente:

$$v = (v_{0x}^2 + v_{0y}^2)^{1/2}$$

Como la componente y es cuadrática, el signo negativo en el caso 2 no hace diferencia y la velocidad en los dos momentos en cuestión es la misma, dando otra vez, la respuesta a).

EJEMPLO 4

Un tiovivo tiene un radio de 2.00 m y da una vuelta cada 5.00 s. ¿Cuál es la magnitud la fuerza neta necesaria para sostener a un muchacho de 35.0 kg en el borde?

SOLUCIÓN

Primero, calcule la velocidad de un objeto en el borde, lo cual es la distancia alrededor del borde dividida por el tiempo para una rotación:

$$v = \frac{d}{t} = \frac{2\pi r}{t} = \frac{2\pi(2.00 \text{ m})}{5.00 \text{ s}} = 2.51 \text{ m/s}$$

Un cuerpo desplazándose en un círculo a velocidad uniforme requiere de una aceleración centrípeta de $a_c = v^2/r$. La fuerza que produce esta aceleración puede encontrarse sustituyendo esta expresión en la segunda ley de Newton:

$$F = ma_c = m \frac{v^2}{r} = (35.0 \text{ kg}) \frac{(2.51 \text{ m/s})^2}{2.00 \text{ m}} = 1.10 \times 10^2 \text{ N}$$

Problemas de opción múltiple

- Un pájaro vuela 4.0 m al norte en 2.0 s y después vuela 2.0 m al oeste en 1.0 s. ¿Cuál es la velocidad media del pájaro? a) 2.0 m/s b) 4.0 m/s c) 8.0 m/s d) $2\sqrt{5}/3$ m/s
- La aplicación de los frenos a un coche que viaja a 45 kilómetros por hora proporciona una aceleración de 5.0 m/s^2 en la dirección opuesta. ¿Cuánto tiempo llevará el coche detenerse? a) 0.40 s b) 2.5 s c) 5.0 s d) 9.0 s
- Una bola rueda hacia abajo a lo largo de un plano inclinado con una aceleración uniforme de magnitud 1.0 m/s^2 . Si su velocidad en un cierto instante de tiempo es 10 m/s, ¿cuál será su velocidad 5.0 segundos después? a) 5 m/s b) 10 m/s c) 15 m/s d) 16 m/s

4. Una bola rueda hacia abajo de un plano inclinado con una aceleración uniforme de 1.00 m/s^2 . Si su velocidad inicial es 1.00 m/s abajo de la pendiente, ¿hasta dónde viajará a lo largo de la pendiente en 10.0 s ? a) 10.0 m b) 12.0 m c) 60.0 m d) 1.00×10^2
5. Un objeto con una velocidad inicial de 25.0 m/s acelera uniformemente por 10.0 s a una velocidad final de 75.0 m/s . ¿Cuál es la magnitud de su aceleración? a) 3.00 m/s^2 b) 5.00 m/s^2 c) 25.0 m/s^2 d) 50.0 m/s^2
6. Una roca cae desde una altura de 19.6 m sobre el suelo. ¿Cuánto tiempo le toma a la roca para golpear la tierra? a) 2.0 s b) 4.0 s c) 4.9 s d) 9.8 s
7. Una nave espacial que permanece sobre la superficie de un planeta distante, lanza una punta de prueba para explorar la superficie del planeta. La punta de prueba cae libremente una distancia de 40.0 m durante los primeros 4.00 s después de su lanzamiento. ¿Cuál es la magnitud de la aceleración debida a la gravedad en este planeta? a) 4.00 m/s^2 b) 5.00 m/s^2 c) 10.0 m/s^2 d) 16.0 m/s^2
8. Una bola cae desde la azotea de un edificio muy alto. ¿Cuál es su velocidad después de caer por 5.00 s ? a) 1.96 m/s b) 9.80 m/s c) 49.0 m/s d) 98.0 m/s
9. Un *quarterback* lanza un balón con una velocidad de 7.00 m/s en un ángulo de 15.0° con la horizontal. ¿Qué tan lejos debe desplazarse el receptor para atrapar el balón con éxito? a) 1.25 m b) 2.50 m c) 5.00 m d) 6.25 m
10. Un bombardero vuela en trayectoria paralela a la tierra a una velocidad de 500 kilómetros por hora a una altitud de 1960 m cuando deja caer una bomba. ¿Cuánto tiempo le toma la bomba en llegar a la tierra? a) 0.500 s b) 20.0 s c) 50.0 s d) $2.00 \times 10^2 \text{ s}$
11. Una bola se lanza horizontalmente con una velocidad de 6.0 m/s . ¿Cuál es su velocidad después de 3.0 segundos de vuelo? a) 30.0 m/s b) 15.8 m/s c) 18 m/s d) 4.9 m/s
12. Una mujer de 70 kilogramos que está parada en el ecuador rota con la Tierra alrededor de su eje a una velocidad tangencial de cerca de $5 \times 10^2 \text{ m/s}$. Si el radio de la tierra es aproximadamente $6 \times 10^6 \text{ m}$, ¿cuál es la mejor estimación de la aceleración centrípeta que experimenta la mujer? a) $4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ b) 4 m/s^2 c) 10^{-4} m/s^2 d) 24 m/s^2
13. Una bola rueda con velocidad uniforme alrededor de una pista plana, horizontal, circular. Si la velocidad de la bola se duplica, su aceleración centrípeta es a) cuadruplicada b) duplicada c) la mitad d) no cambia

RESPUESTAS

1. a). La velocidad media es la distancia total recorrida dividida por el tiempo transcurrido.

$$v = d/\Delta t = 6.0 \text{ m}/3.0 \text{ s} = 2.0 \text{ m/s}$$

2. b). $t = (v_f - v_i)/a$. La velocidad final es 0 kilómetros por hora, y la aceleración es -5.0 m/s^2 . (El signo negativo aparece porque la aceleración es antiparalela a la velocidad). No olvide convertir de kilómetros a metros y horas a segundos.

$$t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{0 - (45 \text{ km/h})(10^3 \text{ m}/1 \text{ km})(1 \text{ h}/3600 \text{ s})}{-5.0 \text{ m/s}^2} = 2.5 \text{ s}$$

3. c). $v_f = v_i + at = 10 \text{ m/s} + (1.0 \text{ m/s}^2)(5.0 \text{ s}) = 15 \text{ m/s}$
4. c). $d = v_i t + \frac{1}{2}at^2 = (1.00 \text{ m/s})(10.0 \text{ s}) + \frac{1}{2}(1.00 \text{ m/s}^2)(10.0 \text{ s})^2 = 60.0 \text{ m}$
5. b). $a = \Delta v/\Delta t = (75.0 \text{ m/s} - 25.0 \text{ m/s})/10.0 \text{ s} = 5.00 \text{ m/s}^2$
6. a). La roca está en caída libre con la velocidad inicial cero y la altura inicial $y_0 = 19.6 \text{ m}$. La ecuación de desplazamiento se convierte en $\Delta y = y - y_0 = -\frac{1}{2}gt^2$. Resolviendo para el tiempo t con $y = 0$ da

$$t = (2y_0/g)^{1/2} = (2 \times 19.6 \text{ m}/9.8 \text{ m/s}^2)^{1/2} = (4.0 \text{ s}^2)^{1/2} = 2.0 \text{ s}$$

7. b). Esta pregunta es un problema de caída libre. El objeto empieza a partir del reposo, $v_0 = 0$. Reacomode $\Delta y = -\frac{1}{2}gt^2$ y resuelva para la aceleración de la gravedad, g :

$$g = -2(y - y_0)/t^2 = -2(-40.0 \text{ m} - 0)/16.0 \text{ s}^2 = 5.00 \text{ m/s}^2$$

8. c). La velocidad en caída libre comenzando con una velocidad inicial de cero es $v = -gt = -(9.8 \text{ m/s}^2)(5.00 \text{ s}) = -49 \text{ m/s}$

9. **b).** La velocidad inicial en la dirección y es $v_{0y} = v_0 \sin \theta = (7.00 \text{ m/s}) \sin 15.0^\circ = 1.81 \text{ m/s}$. Se alcanza la altura máxima cuando la velocidad en la dirección y es cero: $v = 0 = -gt + v_{0y} \rightarrow 0 = -(9.80 \text{ m/s}^2)t + 1.81 \text{ m/s} \rightarrow t = 0.185 \text{ s}$. Duplicando este resultado, da el tiempo total de vuelo. El alcance es $\Delta x = (v_0 \cos \theta)t = (7.00 \text{ m/s})(\cos 15.0^\circ)(0.370 \text{ s}) = 2.50 \text{ m}$.
10. **b).** Las componentes horizontal y vertical de la velocidad son independientes. La componente vertical es debida solamente a la aceleración de la gravedad:

$$y = \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow t = (2y/g)^{1/2}$$

$$t = [2(1960 \text{ m})/(9.80 \text{ m/s}^2)]^{1/2} = (4.00 \times 10^2 \text{ s}^2)^{1/2} = 20.0 \text{ s}$$

11. **a).** La componente horizontal de la velocidad es $v_x = 6.00 \text{ m/s}$ y la componente vertical es $v_y = gt = (9.80 \text{ m/s}^2)(3.00 \text{ s}) = 29.4 \text{ m/s}$, así que

$$v = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2} = [(6.00 \text{ m/s})^2 + (29.4 \text{ m/s})^2]^{1/2} = 30.0 \text{ m/s}$$

12. **a).** La mujer se está moviendo con igual velocidad constante a la rotación de la Tierra en su eje en una circunferencia igual al radio de la tierra. La aceleración centrípeta es

$$a_c = v^2/R = (500 \text{ m/s})^2/6 \times 10^6 \text{ m} = (25 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}^2)/6 \times 10^6 \text{ m} \approx 4 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

13. **a).** $a_c = v^2/R$. La aceleración y el cuadrado de la velocidad son directamente proporcionales. Como la velocidad es cuadrática, al duplicar la velocidad se cuadruplica la aceleración.

Fuerza

EJEMPLO 1

Una fuerza neta F acelera a un objeto de masa m a 6 m/s^2 . La misma fuerza neta se aplica a un cuerpo de $3m$. ¿Cuál es la aceleración del cuerpo de mayor masa?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Según la segunda ley del Newton, la aceleración impartida a un objeto por una fuerza es inversamente proporcional a la masa del objeto. La aceleración de un objeto de tres veces más masa es por lo tanto $\frac{1}{3}(6 \text{ m/s}^2) = 2 \text{ m/s}^2$.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la segunda ley de Newton para cada uno de los objetos:

$$(1) \quad ma_m = F$$

$$(2) \quad Ma_M = F$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1):

$$(3) \quad \frac{Ma_M}{ma_m} = \frac{F}{F} = 1$$

Sustituya $M = 3m$ en la ecuación (3) y resuelva para a_M :

$$\frac{(3m)a_M}{ma_m} = 1 \rightarrow a_M = \frac{1}{3}a_m = \frac{1}{3} \cdot (6 \text{ m/s}^2)$$

$$a_M = 2 \text{ m/s}^2$$

EJEMPLO 2

Un bloque de masa m está unido por una cuerda horizontal de masa insignificante, al lado izquierdo de un segundo bloque de masa M , con $m < M$. Una segunda cuerda se une al lado derecho de la masa M , y el sistema es jalado en la dirección x positiva por una fuerza constante F si la superficie es sin fricción, ¿qué se puede decir sobre la tensión en la cuerda que conecta los dos bloques? a) $T = F$ b) $T < F$ c) $T > F$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta es **b)**. La aceleración del bloque m es igual que la del sistema de ambos, que tiene masa total $m + M$. La tensión T debe acelerar solamente a la masa m , mientras que la fuerza F debe proporcionar la misma aceleración a un sistema de la mayor masa, $m + M$. Por lo tanto $F > T$.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

En este problema la componente y de la segunda ley del Newton da solamente las fuerzas normales que actúan sobre los bloques en términos de la fuerza de gravedad. Como no hay fricción, estas fuerzas no afectan la aceleración. Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para el sistema:

$$(1) \quad (m + M)a = F$$

Escriba la componente x de la segunda ley de Newton para el bloque de menor masa:

$$(2) \quad ma = T$$

Divida la ecuación (1) por la ecuación (2), cancelando la aceleración, que es la misma para ambos:

$$(3) \quad \frac{(m + M)a}{ma} = \frac{F}{T} \rightarrow \frac{(m + M)}{m} = \frac{F}{T}$$

Revisando la ecuación (3), es claro que $F > T$ porque $m + M > m$, y otra vez la respuesta es **b**.

EJEMPLO 3

Un bloque con masa m empieza a moverse desde la parte superior de una pendiente con coeficiente de fricción cinética μ_k y se deja resbalar hacia la parte de abajo. Un segundo bloque con masa $M = 2m$ también se le permite resbalar por la pendiente. Si, μ_k es el mismo para ambos bloques, ¿cómo se compara la aceleración a_M del segundo bloque con la aceleración a_m del primer bloque? a) $a_M = 2a_m$ b) $a_M = a_m$ c) $a_M = \frac{1}{2}a_m$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Las aceleraciones son iguales porque la fuerza de la gravedad, la fuerza de fricción y el lado ma de la segunda ley de Newton, cuando está aplicada en este contexto físico, son todas proporcionales a la masa. Por lo tanto, una masa diferente no debe afectar la aceleración del cuerpo, y la respuesta es **b**.

EJEMPLO 4

El planeta A tiene dos veces la masa y dos veces el radio del planeta B. ¿En qué planeta un astronauta tendría un mayor peso? a) El planeta A b) el planeta B c) el peso del astronauta no sería afectado.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El peso como medición en un planeta dado es la magnitud de la fuerza gravitacional en la superficie de ese planeta. En la ley de Newton de la gravitación, la fuerza gravitacional es directamente proporcional a la masa de cada uno de dos cuerpos pero inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. Por lo tanto, considerando solamente las masas, el planeta A ejerce dos veces la fuerza gravitacional del planeta B. El planeta A también tiene dos veces el radio del planeta B, sin embargo, el cuadrado inverso de 2 es $\frac{1}{4}$. Total, por lo tanto, el planeta A tiene una aceleración gravitacional más débil en su superficie que el planeta B por un factor de una mitad, y el peso de un astronauta será mayor en el planeta B [respuesta **b**].

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ley de Newton de la gravitación para el peso de un astronauta de masa m sobre el planeta A:

$$(1) \quad w_A = \frac{mM_A G}{r_A^2}$$

Escriba la misma ley para el peso del astronauta sobre el planeta B:

$$(2) \quad w_B = \frac{mM_B G}{r_B^2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1):

$$\frac{w_B}{w_A} = \frac{\frac{mM_B G}{r_B^2}}{\frac{mM_A G}{r_A^2}} = \frac{M_B r_A^2}{M_A r_B^2}$$

Ahora sustituya $r_A = 2r_B$ y $M_A = 2M_B$:

$$\frac{w_B}{w_A} = \frac{M_B (2r_B)^2}{(2M_B) r_B^2} = 2$$

Resuelva para w_B :

$$w_B = 2w_A \text{ [respuesta b)]}$$

Problemas de opción múltiple

- ¿Cuál de los siguientes resultará de la aplicación de una fuerza neta no cero sobre un objeto? a) La velocidad del objeto seguirá siendo constante. b) La velocidad del objeto seguirá siendo constante, pero la dirección en la cual se mueve el objeto cambiará. c) La velocidad del objeto cambiará. d) Ninguna de las anteriores.
- El cuerpo A tiene una masa dos veces más grande que la del cuerpo B. Si una fuerza que actúa en el cuerpo A es la mitad del valor de una fuerza que actúa en el cuerpo B, ¿cuál declaración es verdadera? a) La aceleración de A será dos veces la de B. b) La aceleración de A será la mitad de la de B. c) La aceleración de A será igual a la B. d) La aceleración de A será un cuarto de la B.
- ¿Cuál de las siguientes es una afirmación de la segunda ley de Newton del movimiento? a) Para cada acción hay una reacción igual y opuesta. b) Fuerza y aceleración son directamente proporcionales, con la masa como constante de proporcionalidad. c) Un cuerpo en reposo tiende a permanecer en ese estado a menos que actúe sobre él una fuerza. d) Ninguno de éstos.
- Si un cuerpo tiene una aceleración cero, ¿qué declaración es más cierta? a) El cuerpo debe estar en reposo. b) El cuerpo puede estar en reposo. c) El cuerpo debe retrasarse. d) El cuerpo puede acelerarse.
- ¿Cuál es el peso de un cuerpo de 2.00 kilogramos sobre o cerca de la superficie de la Tierra? a) 4.90 N b) 16.0 libras c) 19.6 N d) 64.0 kg m/s²
- Dos objetos de masa igual son separados por una distancia de 2 m. Si la masa de un objeto se duplica, la fuerza de gravedad entre los dos objetos será a) la mitad más grande b) dos veces más grande c) un cuarto más grande d) cuatro veces más grande
- La distancia entre una nave espacial y el centro de la Tierra aumenta de un radio de la Tierra a tres radios de la Tierra. ¿Qué sucede con la fuerza de gravedad que actúa en la nave espacial? a) Resulta 1/9 más grande. b) Resulta 9 veces más grande. c) Resulta 1/3 más grande. d) Resulta 3 veces más grande.
- Un astronauta de 100 kg aterriza en un planeta con un radio tres veces el de la Tierra y una masa nueve veces la de la Tierra. La aceleración debida a la gravedad, g , experimentada por el astronauta es a) nueve veces el valor de g en la Tierra. b) Tres veces el valor de g en la Tierra. c) El mismo valor de g que en la Tierra. d) La mitad del valor de g en la Tierra.
- El peso medido de una persona que está parada en una báscula y que monta en un elevador será más grande cuando a) el elevador suba con una velocidad constante. b) el elevador acelere hacia arriba. c) el elevador baje a una velocidad constante. d) ninguno de éstos, porque el peso es constante.
- Un bloque con masa de 25.0 kg está en reposo sobre una superficie llana áspera. Una fuerza horizontal de 1.50×10^2 N se aplica sobre él, y le proporciona una aceleración de 4.00 m/s². ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de la fricción que actúa en el bloque? a) 25.0 N b) 1.00×10^2 N c) 75.0 N d) 50.0 N

RESPUESTAS

- c). La fuerza produce la aceleración, lo que da lugar a un cambio de velocidad.
- d). Obtenga el cociente de las aceleraciones de la segunda ley de Newton, $F = ma$:

$$\frac{m_A a_A}{m_B a_B} = \frac{F_A}{F_B} \rightarrow \frac{(2m_B) a_A}{m_B a_B} = \frac{(\frac{1}{2}F_B)}{F_B} \rightarrow \frac{a_A}{a_B} = \frac{1}{4}$$

- b). La opción a) es una declaración de la tercera ley, y la opción c) es una declaración de la primera ley.
- b). Las opciones c) y d) pueden ser eliminadas inmediatamente porque la velocidad que cambia (su magnitud o dirección) requiere del uso de una fuerza. La opción a) puede ser eliminada porque la primera ley se aplica a ambos cuerpos en reposo y a los que se mueven con velocidad uniforme.

5. c). $w = F = mg = (2.00 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) = 19.6 \text{ N}$
6. b). En la ley de la gravitación universal, la fuerza gravitacional es directamente proporcional al producto de las masas. Duplicar una de las masas duplica su producto y por lo tanto duplica la fuerza.
7. a). Las opciones b) y d) pueden ser eliminadas porque la fuerza de la atracción gravitacional debe disminuir con el aumento de distancia. Como $F_{\text{grav}} = Gm_1m_2/r^2$, la fuerza disminuye por un factor de 9 cuando se triplica r .
8. c). Vea el ejemplo 4. La fuerza gravitacional es proporcional a la masa e inversamente proporcional al cuadrado del radio, así que nueve veces la masa y tres veces el radio dan un factor de $9/3^2 = 1$. No hay diferencia perceptible en peso porque los dos efectos se cancelan mutuamente.
9. b). El peso medido en la báscula es esencialmente la magnitud de la fuerza normal. Aplique la segunda ley de Newton al pasajero y resuelva para la fuerza normal:

$$ma = n - mg \rightarrow n = ma + mg$$

Examinando la ecuación para la fuerza normal, está claro que una aceleración positiva da lugar a una fuerza normal más grande, por lo tanto una lectura más grande en la báscula.

10. d). Utilice la segunda ley de Newton:

$$\begin{aligned} ma &= F_{\text{ap}} - F_{\text{fric}} \\ (25.0 \text{ kg})(4.00 \text{ m/s}^2) &= 1.50 \times 10^2 \text{ N} - F_{\text{fric}} \\ F_{\text{fric}} &= 50.0 \text{ N} \end{aligned}$$

Equilibrio

EJEMPLO 1

Una viga de acero uniforme con longitud L y masa $M = 60.0 \text{ kg}$ descansa en dos pivotes. El primer pivote está situado en el extremo izquierdo de la viga y ejerce una fuerza normal n_1 en ese punto. Un segundo pivote está dos tercios de la distancia del extremo izquierdo al extremo derecho. ¿Cuál es la fuerza normal n_2 ejercida en la viga por el segundo pivote? a) 441 N b) 264 N c) 372 N d) 188 N

ESTRATEGIA

En equilibrio, la suma de los torques es cero. Sea τ_{n_1} el torque ejercido por la fuerza normal n_1 asociada al primer pivote, τ_{n_2} el torque ejercido por la fuerza normal n_2 asociado con el segundo pivote y τ_M el torque ejercido por la fuerza de gravedad sobre la viga. Elija el pivote en el extremo izquierdo como el punto alrededor del cual se han de calcular los torques. Utilice $\tau = rF \sin \theta$ para cada torque, donde θ es el ángulo que está entre el vector de posición \vec{r} y la fuerza \vec{F} . El signo de un torque dado es positivo si la fuerza tiende a rotar la viga a la izquierda y negativo si la fuerza tiende a rotar la viga a la derecha.

SOLUCIÓN

En equilibrio, la suma de los torques es cero:

$$(1) \quad \sum \tau_i = \tau_{n_1} + \tau_{n_2} + \tau_M = 0$$

El torque debido a la fuerza normal n_1 es cero porque su brazo de palanca es cero. El peso de la viga uniforme se puede considerar que actúa en el centro de ésta, su centro de gravedad. La ecuación (1) se convierte:

$$(2) \quad n_2(2L/3) \sin 90^\circ - Mg(L/2) \sin 90^\circ = 0$$

Note que para n_2 , el torque es positivo, mientras que el torque gravitacional es negativo (véase la estrategia). Cancele los factores de L en la ecuación (2) y resuélvalos para n_2 :

$$\begin{aligned} n_2 &= \frac{3}{4}Mg = \frac{3}{4}(60.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \\ &= 441 \text{ N} \quad [\text{respuesta a}] \end{aligned}$$

EJEMPLO 2

Una patinadora de hielo A tiene una masa M y está en reposo sobre una charca congelada, llevando en la espalda una mochila de masa m . Ella lanza la mochila a una patinadora B, que también tiene masa M y que inicialmente está en reposo. Si la

(continúa)

superficie de la charca se considera sin fricción, ¿cuál patinador tiene la velocidad subsecuente más grande? (Los cambios de la cantidad de movimiento en la dirección vertical se pueden ignorar aquí.) a) La patinadora A. b) La patinadora B. c) Ambas patinadoras tienen la misma velocidad subsecuente.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Por la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento final de la patinadora A es igual y opuesta a la cantidad de movimiento de la mochila. La patinadora B adquiere este mismo ímpetu cuando **toma** la mochila, pero también aumenta su masa de m a $M + m$. Como la cantidad de movimiento es proporcional a la masa y la velocidad, la patinadora B, con mayor masa, tiene una velocidad más pequeña. Así, la respuesta es **a**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique la conservación de la cantidad de movimiento de la patinadora A. La cantidad de movimiento inicial es igual a la cantidad de movimiento final:

$$p_i = p_f$$

La cantidad de movimiento total inicial es cero. La cantidad de movimiento final de la patinadora A es MV_A , mientras que la mochila tiene una cantidad de movimiento mv :

$$0 = MV_A + mv$$

Resuelva para la velocidad V_A de la patinadora A:

$$(1) \quad V_A = -\frac{mv}{M}$$

Aplique la conservación de la cantidad de movimiento a la patinadora B. La cantidad de movimiento inicial de la mochila, mv , es igual a la cantidad de movimiento final del sistema patinadora-mochila:

$$mv = (m + M)V_B$$

Resuelva para la velocidad V_B del sistema mochila-patinadora B:

$$(2) \quad V_B = \frac{mv}{m + M}$$

Divida la magnitud de la ecuación (1) por la ecuación (2):

$$(3) \quad \frac{|V_A|}{|V_B|} = \frac{\left| -\frac{mv}{M} \right|}{\left| \frac{mv}{m + M} \right|} = \frac{m + M}{M} > 1$$

Por la ecuación (3), $|V_A|/|V_B| > 1$, así que $|V_A| > |V_B|$ [respuesta **a**].

Problemas de opción múltiple

- Una barra no uniforme de 8.00 m de largo se coloca en un pivote a 2.00 m del extremo derecho de la barra, que es también el extremo más ligero. El centro de gravedad de la barra se localiza a 2.00 m del extremo izquierdo más pesado. Si un peso de $W = 5.00 \times 10^2$ N en el extremo derecho balancea la barra, ¿cuál debe ser el peso W de la barra? a) 1.25×10^2 N b) 2.50×10^2 N c) 5.00×10^2 N d) 1.00×10^3 N
- Una barra de masa insignificante tiene 10 m de longitud. Si un objeto de 30 kilogramos se suspende del extremo izquierdo de la barra y un objeto de 20 kilogramos del extremo derecho, ¿dónde se debe poner el punto pivote para asegurar el equilibrio? a) 4 m del objeto de 30 kilogramos b) 4 m del objeto de 20 kilogramos c) 8 m adentro del objeto de 30 kilogramos d) 5 m del objeto de 20 kilogramos
- Un coche con una masa de 8.00×10^2 kilogramos se atasca en un camino. Un camión con una masa de 1200 kilogramos viene alrededor de una curva a 20.0 m/s y golpea el coche. Los dos vehículos siguen trabados juntos después de la colisión. ¿Cuál es su velocidad combinada después de impacto? a) 3.0 m/s b) 6.0 m/s c) 12 m/s d) 24 m/s
- Un coche de masa 1.00×10^3 kilogramos que viaja a 5.00 m/s alcanza y choca con un camión de masa 3.00×10^3 kilogramos que viaja en la misma dirección a 1.00 m/s. Durante la colisión, los dos vehículos permanecen en contacto y continúan moviéndose como una unidad. ¿Cuál es la velocidad de los vehículos juntos justo después del impacto? a) 2.00 m/s b) 4.00 m/s c) 5.00 m/s d) 6.00 m/s
- Una pistola con una masa de 0.20 kilogramos dispara una bala de 0.50 gramos con una velocidad inicial de 1.0×10^2 m/s. ¿Cuál es la magnitud de la velocidad del retroceso de la pistola? a) 0.25 m/s b) 0.50 m/s c) 1.0 m/s d) 10 m/s

6. Una bola de 0.20 kilogramos se rebota contra una pared. Golpea la pared con una velocidad de 20.0 m/s y rebota en una colisión elástica. ¿Cuál es la magnitud del cambio en la cantidad de movimiento de la bola? a) 0 kg · m/s b) 4.0 kg · m/s c) 8.0 kg · m/s d) 10 kg · m/s
7. Una pelota de tenis se golpea con una raqueta y el cambio en la cantidad de movimiento de la bola es 4.0 kg · m/s. Si el momento de la colisión de la bola y la raqueta es 0.01 s, ¿cuál es la magnitud de la fuerza ejercida por la bola sobre la raqueta? a) 2.5 × 10⁻³ N b) 4 × 10⁻² N c) 4.0 N d) 400 N
8. Un carro de 30 kilogramos que viaja al norte a 5 m/s choca con un carro de 50 kilogramos que se venía moviendo al sur. Ambos carros inmediatamente se reclinan después de la colisión. ¿Cuál debe haber sido la velocidad del carro del que se dirigía al sur? a) 3 m/s b) 5 m/s c) 6 m/s d) 10 m/s

RESPUESTAS

1. b) En equilibrio

$$(1) \quad \sum \vec{\tau}_i = \vec{\tau}_p + \vec{\tau}_B + \vec{\tau}_W = 0$$

El torque $\vec{\tau}_p$ ejercido por el pivote es cero porque los torques se calculan alrededor de ese punto, significando un brazo de palanca cero para la fuerza ejercida por el pivote. El centro de gravedad está a 4.00 m del punto pivote, y la fuerza gravitacional ejerce un torque $\vec{\tau}_B$ en sentido contrario a las manecillas del reloj sobre la barra como si toda la masa fuera concentrada en ese punto. El esfuerzo de torsión debido al peso de la barra es por lo tanto igual a $+rF = +(4.00 \text{ m})w_B$. El peso W en el lado derecho da un torque en el sentido de las manecillas del reloj $\vec{\tau}_W = 2(2.00 \text{ m})W$. Por lo tanto, de la ecuación (1),

$$0 + w_B(4.00 \text{ m}) - (5.00 \times 10^2 \text{ N})(2.00 \text{ m}) = 0 \quad \rightarrow \quad w_B = 2.50 \times 10^2 \text{ N}$$

2. a). El punto pivote debe estar más cercano al peso mayor; si no, los torques debido a los pesos no podían ser iguales en magnitud y contrarios en dirección. Dada esta información, las opciones b) y c) se pueden eliminar inmediatamente. La opción d) puede también ser eliminada porque pone el pivote en el centro de la barra, que daría solamente equilibrio si los dos pesos fueran idénticos. La opción debe ser a), que se puede confirmar usando la segunda condición del equilibrio. Si x es la distancia del pivote de la masa de 30 kilogramos, entonces $10 - x$ es la distancia del pivote a la masa de 20 kilogramos. Aplique la segunda condición del equilibrio, $\sum \tau_i = 0$:

$$(30 \text{ kg})g(x) - (20 \text{ kg})g(10 - x) = 0 \quad \rightarrow \quad x = 4 \text{ m}$$

3. c). La conservación de la cantidad de movimiento se asegura de que la cantidad de movimiento total después de la colisión debe ser igual a la cantidad de movimiento total antes de la colisión. Si A es el coche de masa $8.00 \times 10^2 \text{ kg}$ y B es el camión de 1200 kilogramos, entonces

$$m_A v_{A \text{ inicial}} + m_B v_{B \text{ inicial}} = m_A v_{A \text{ final}} + m_B v_{B \text{ final}}$$

Como se atasca el coche, su velocidad inicial es cero y $m_A v_{A \text{ inicial}}$ es cero. Después de la colisión de los vehículos se ensamblan y $v_{A \text{ final}} = v_{B \text{ final}} = v_{\text{final}}$. La ecuación se convierte

$$m_B v_{B \text{ inicial}} = (m_A + m_B) v_{\text{final}}$$

Resolver para v_{final} :

$$v_{\text{final}} = m_B v_{B \text{ inicial}} / (m_A + m_B) = (1200 \text{ kg}) (20.0 \text{ m/s}) / (1200 \text{ kg} + 8.00 \times 10^2 \text{ kg}) = 12 \text{ m/s}$$

4. a). La conservación de la cantidad de movimiento ímpetu da $p_{\text{antes}} = p_{\text{después}}$. La cantidad de movimiento total antes de que la colisión es la suma de las cantidades de movimiento para los dos vehículos. Después de la colisión, p es la cantidad de movimiento asociado a sus masas acopladas:

$$(1.00 \times 10^3 \text{ kg})(5.00 \text{ m/s}) + (3.00 \times 10^3 \text{ kg})(1.00 \text{ m/s}) = (4.00 \times 10^3 \text{ kg})v_{\text{final}}$$

$$v_{\text{final}} = (5.00 \times 10^3 + 3.00 \times 10^3)(\text{kg} \cdot \text{m/s}) / (4.00 \times 10^3 \text{ kg}) = 2.00 \text{ m/s}$$

5. a). Se conserva la cantidad de movimiento porque no hay fuerzas externas que actúan en el sistema de la pistola-bala durante el disparo. La cantidad de movimiento inicial, sin embargo, es cero. La cantidad de movimiento final es la suma de la cantidad de movimiento de la bala y de la cantidad de movimiento del retroceso de la pistola:

$$p_{\text{antes}} = p_{\text{después}} \quad \rightarrow \quad 0 = m_{\text{pistola}} v_{\text{pistola}} + m_{\text{bala}} v_{\text{bala}}$$

$$v_{\text{pistola}} = -(0.50 \text{ g}) (1.0 \times 10^2 \text{ m/s}) / 0.20 \times 10^3 \text{ g} = -0.25 \text{ m/s}$$

6. c). El cambio en la cantidad de movimiento está dado por $\Delta p = mv_f - mv_i$, donde v_i es la velocidad inicial y v_f es la velocidad del rebote. Como la colisión es elástica, la bola rebota en la dirección opuesta pero con la misma velocidad con la cual golpeó la pared. Por lo tanto, $v_f = -v_i$ y el cambio en cantidad de movimiento es

$$\Delta p = m(-v_i) - mv_i = -2mv_i = -2(0.20 \text{ kg})(20.0 \text{ m/s}) = -8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

La magnitud de un número es su valor absoluto: $|-8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}| = 8.0 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

7. d). La fuerza está relacionada con la cantidad de movimiento por la ecuación impulso-cantidad de movimiento, $F \Delta t = \Delta p$. Por lo tanto

$$F = \Delta p / \Delta t = (8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) / 0.02 \text{ s} = 400 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 400 \text{ N}$$

8. a). Se conserva la cantidad de movimiento. Como ambos carros vienen unificados, la cantidad de movimiento total después de la colisión debe ser cero, lo que significa que la cantidad de movimiento total antes de la colisión era también cero. Si los dos carros se etiquetan A y B, entonces

$$m_A v_A + m_B v_B = 0 \rightarrow v_B = -(30 \text{ kg})(5 \text{ m/s}) / 50 \text{ kg} = -3 \text{ m/s}$$

Trabajo

EJEMPLO 1

Un coche que viaja con rapidez v puede parar una distancia d debido a la fricción cinética. A dos veces la velocidad ¿qué distancia se requiere para detenerse? a) d b) $2d$ c) $4d$ d) $8d$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta es c). La respuesta a) puede ser eliminada inmediatamente porque en el doble de velocidad, la energía del coche debe ser mayor que antes y por lo tanto la distancia a la que para debe ser mayor. Como la energía cinética es proporcional a v^2 , al duplicar la velocidad se cuadruplica la energía. El trabajo hecho por la fricción es lineal en la distancia d , así que se requiere cuatro veces la distancia. Este resultado puede verse más fácilmente con una proporción.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique el teorema del trabajo y la energía:

$$(1) \quad W = \Delta EC = EC_f - EC_i$$

Suponga que el coche está viajando en la dirección positiva de x . Sustituya las expresiones para el trabajo hecho por una fuerza de fricción cinética de magnitud F_k realizada sobre un desplazamiento Δx y para una energía cinética, considerando que $EC_f = 0$:

$$(2) \quad -F_k \Delta x = 0 - \frac{1}{2}mv^2$$

Multiplique ambos lados por -1 y haga cero al término:

$$(3) \quad F_k \Delta x = \frac{1}{2}mv^2$$

Denote los dos posibles diferentes desplazamientos por d_1 y d_2 , las dos velocidades por v_1 y v_2 . Sustituya en la ecuación (3), creando una ecuación para el primer caso y una ecuación similar para el segundo caso:

$$(4) \quad F_k d_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$(5) \quad F_k d_2 = \frac{1}{2}mv_2^2$$

Ahora divida la ecuación (5) por la ecuación (4), cancelando los términos F_k , m y $\frac{1}{2}$:

$$\frac{F_k d_2}{F_k d_1} = \frac{\frac{1}{2}mv_2^2}{\frac{1}{2}mv_1^2} \rightarrow \frac{d_2}{d_1} = \frac{v_2^2}{v_1^2} = \frac{(2v)^2}{v^2} = 4$$

Se sigue entonces, que la respuesta c) es la correcta:

$$d_2 = 4d_1$$

EJEMPLO 2

Un camión de masa M y un coche de masa m están viajando a la misma velocidad. Ambos accionan de golpe los frenos, trabándolos y patinándose a lo largo del camino, que tiene un coeficiente de fricción μ_k . El coche para después de una distancia d . Suponiendo que μ_k es igual para ambos vehículos, ¿cuál de lo siguiente es verdad de la distancia D que el camión viaja antes de parar? a) $D = d$ b) $D > d$ c) $D < d$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La energía cinética es directamente proporcional a la masa, y como el camión tiene mayor masa que el coche, su energía cinética es mayor y por lo tanto puede pensarse que se requeriría una mayor distancia para frenar. La fuerza de fricción, como siempre, es también directamente proporcional a la masa, así que la fuerza de fricción es proporcionalmente mayor para el camión que para el coche. En igualdad de circunstancias, el camión y el coche paran en la misma distancia, $D = d$, que es la respuesta **a**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la expresión para la fuerza de fricción, donde n es la fuerza normal:

$$(1) \quad F_k = \mu_k n = \mu_k mg$$

Ahora, utilice la ecuación (4) del ejemplo 1:

$$(2) \quad \frac{F_{k,\text{camión}} D}{F_{k,\text{coche}} d} = \frac{\frac{1}{2} M v^2}{\frac{1}{2} m v^2}$$

Sustituya la expresión para la fuerza de fricción cinética de la ecuación (1):

$$\frac{(\mu_k M g) D}{(\mu_k m g) d} = \frac{\frac{1}{2} M v^2}{\frac{1}{2} m v^2} \rightarrow \frac{MD}{md} = \frac{M}{m} \rightarrow \frac{D}{d} = 1$$

La respuesta es **a**), como se esperaba:

$$D = d$$

EJEMPLO 3

Un coche experimenta una aceleración uniforme a partir del reposo. ¿Qué se puede decir sobre la potencia instantánea entregada por el motor? a) Hay aumentos instantáneos de potencia con el aumento de velocidad. b) La potencia instantánea sigue siendo igual. c) La potencia instantánea disminuye con el aumento de velocidad.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La respuesta correcta es **a**). Puesto que la aceleración es uniforme, la fuerza es constante. La potencia instantánea está dada por $P = Fv$, así que con el aumento de velocidad la potencia entregada debe también aumentar.

EJEMPLO 4

Un cirquero experto es lanzado hacia arriba desde un cañón. Si la resistencia del aire es insignificante, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera acerca de su energía mecánica total en la subida? a) Aumenta. b) Sigue siendo igual. c) Disminuye.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

En ausencia de fuerzas no conservativas, la energía mecánica se conserva, así que seguirá siendo igual, y la respuesta **b**) es la correcta.

APLICACIÓN

Si el cirquero tiene masa 65.0 kg y su velocidad inicial es 8.00 m/s, encuentre la altura máxima alcanzada.

SOLUCIÓN

Aplice la conservación de la energía mecánica:

$$\Delta EC + \Delta EP = 0$$

$$\frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 + m g h_f - m g h_i = 0$$

La velocidad final es cero, y la altura inicial puede tomarse como cero:

$$0 - \frac{1}{2} m v_i^2 + m g h_f - 0 = 0$$

Resuelva para h_f y sustituya valores:

$$h_f = \frac{v_i^2}{2g} = \frac{(8.00 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)} = 3.27 \text{ m}$$

Problemas de opción múltiple

- Si la velocidad a la que un coche está viajando es triplicada, ¿por qué factor aumenta su energía cinética? a) $3^{1/2}$ b) 3 c) 6 d) 9
- ¿Cuál es la magnitud de la fuerza ejercida por el aire sobre un avión si son necesarios 500 kilovatios de potencia para mantener una velocidad constante de 100 metros por segundo? a) 5 N b) 50 N c) 500 N d) 5000 N

3. ¿Qué sucede con la velocidad de un cuerpo si se duplica su energía cinética? a) Aumenta en un factor de $2^{1/2}$. b) Se duplica. c) Se parte en dos. d) Aumenta en un factor de 4.
4. Una bola con una masa de 1.0 kg se asienta en la parte superior de un plano inclinado de pendiente 30° y que tiene 20.0 metros de largo. Si la energía potencial de la bola en relación con el fondo de la pendiente, es 98 J en la cima, ¿cuál es su energía potencial una vez que rueda a la mitad de la pendiente? a) 0 J b) 49 J c) 98 J d) 196 J
5. ¿Cuánto trabajo es hecho por una fuerza horizontal de 20.0 N cuando es aplicada a una masa de 0.500 kilogramos en una distancia de 10.0 m? a) 5.00 J b) 10.0 J c) 49.0 J d) 2.00×10^2 J
6. Un cuerpo localizado a 10.0 metros sobre la superficie de la Tierra tiene una energía potencial gravitacional de 4.90×10^2 J relativa a esta superficie. ¿Cuál es la nueva energía potencial gravitacional si el cuerpo cae desde una altura de 7.00 m sobre la Tierra? a) 70.0 J b) 147 J c) 281 J d) 343 J
7. Un carro A tiene una masa de 1.0 kilogramo y una velocidad constante de 3.0 m/s. Un carro B tiene una masa de 1.5 kilogramos y una velocidad constante de 2.0 m/s. ¿Cuál de las declaraciones siguientes es verdadera? a) El carro A tiene mayor energía cinética. b) El carro B tiene mayor energía cinética. c) El carro A tiene la mayor aceleración. d) El carro B tiene la mayor aceleración.
8. El trabajo hecho en levantar un cuerpo debe: a) Aumentar la energía cinética del cuerpo. b) Disminuir la energía mecánica total del cuerpo. c) Disminuir la energía interna del cuerpo. d) Aumentar la energía potencial gravitacional.
9. ¿Cuál es la potencia de salida promedio de una mujer de 50.0 kilogramos que sube una escalera de 2.00 m a una velocidad constante en 10.0 segundos? a) 10.0 W b) 49.0 W c) 98.0 W d) 2.50×10^2 W

RESPUESTAS

1. **d).** La energía cinética es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad. Si se triplica la velocidad, su cuadrado se convierte en $(3v)^2 = 9v^2$ y la EC debe aumentar en un factor de nueve.
2. **d).** La potencia instantánea es el producto de la fuerza que actúa en el avión y la velocidad, $P = Fv$. Resolviendo para la fuerza requerida da

$$F = P/v = 500 \times 10^3 \text{ W} / (100 \text{ m/s}) = 5 \times 10^3 \text{ N}$$

3. **a).** Sea EC_i la energía cinética inicial, y EC_f la energía cinética final. Haga una proporción:

$$\frac{EC_f}{EC_i} = \frac{\frac{1}{2}mv_f^2}{\frac{1}{2}mv_i^2} \rightarrow \frac{(2EC_i)}{EC_i} = \frac{\frac{1}{2}mv_f^2}{\frac{1}{2}mv_i^2} \rightarrow 2 = \frac{v_f^2}{v_i^2}$$

Resuelva para v_f para obtener $v_f = \sqrt{2}v_i$.

4. **b).** Como la altura está disminuyendo, la energía potencial gravitacional está disminuyendo y debe tener un valor menor que su lectura inicial de 98 J. La opción d) se puede eliminar porque su valor es más alto que el valor inicial de la energía potencial, al igual que la opción c) porque su valor es igual que el valor inicial de la energía potencial. La opción a) puede ser eliminada porque, por la declaración del problema, la energía potencial gravitacional es cero en el fondo de la rampa. Esto deja b) como la única opción.

Cuantitativamente: $EP = mgh = (1.0 \text{ kg})(9.8 \text{ m/s}^2)[(10.0 \text{ m}) \cdot \text{sen}(30^\circ)] = 49 \text{ J}$

5. **d).** $W = F\Delta s = (20.0 \text{ N})(10.0 \text{ m}) = 2.00 \times 10^2 \text{ J}$
6. **d).** La energía potencial gravitacional y la altura del cuerpo sobre la Tierra son directamente proporcionales: $EP = mgh$. La reducción de la altura por un factor de $7/10$ debe reducir la energía potencial gravitacional por el mismo factor: $(4.90 \times 10^2 \text{ J})(0.700) = 343 \text{ J}$.
7. **a).** Puesto que la velocidad es constante, la aceleración debe ser cero por lo que podemos eliminar las opciones c) y d). Resolviendo $EC = \frac{1}{2}mv^2$ para las dos carros

$$EC_A = \frac{1}{2}(1.0 \text{ kg})(3.0 \text{ m/s})^2 = 4.5 \text{ J} \quad EC_B = \frac{1}{2}(1.5 \text{ kg})(4.0 \text{ m/s})^2 = 3.0 \text{ J}$$

8. d). Por definición, la energía potencial gravitacional cambia con la altura de un cuerpo sobre la tierra.
9. c). La potencia media es el trabajo hecho sobre un objeto dividido por la longitud del intervalo del tiempo, $P = W/\Delta t$. El trabajo hecho aquí está contra la gravedad. Del periodo bajo consideración, la mujer debe aumentar su energía mecánica en una cantidad igual a su cambio en la energía potencial gravitacional,

$$P = mgh/\Delta t = (50.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m})/10.0 \text{ s} = 98.0 \text{ W}$$

Materia

EJEMPLO 1

Un tanque A se llena de agua y, en un tanque idéntico B, la mitad inferior se llena de agua y la mitad superior con aceite. ¿Para qué tanque la presión en el fondo de éstos es más grande? a) tanque A b) tanque B c) la presión en ambos tanques es igual.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El aceite en el tanque B flota encima del agua porque es menos denso que el agua. El peso total del líquido en el tanque B debe, por lo tanto, ser menor que un volumen igual de agua solamente. Por lo tanto, el peso del fluido por unidad de área es mayor en el fondo del tanque A, y la respuesta es a).

EJEMPLO 2

Un cable de acero con área de sección transversal A y longitud L se estira una longitud ΔL_1 , al suspenderle un peso dado. Una sección de cable de acero con mitad del área de sección transversal y tres veces la longitud se utiliza para apoyar el mismo peso, y estira por una cantidad ΔL_2 . ¿Cuál es la razón $\Delta L_2/\Delta L_1$? a) 2 b) 4 c) 6 d) 8

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El esfuerzo de tensión, una fuerza por unidad de área, es proporcional a la deformación por tensión, que es el cambio fraccionario en longitud de un objeto o el cambio en la longitud dividida por la longitud original. La cantidad de estiramiento del cable es así, inversamente proporcional al área de sección transversal y directamente proporcional a la longitud. Por lo tanto, el segundo cable, siendo tres veces más largo, debe estirar tres veces más lejos de la carga dada. Con solamente la mitad del área de sección transversal, debe estirar más lejos por un factor de $(\frac{1}{2})^{-1}$, o 2. Tomados juntos, el segundo cable debe estirar seis veces más lejos que el primer cable más corto y más grueso, así que $\Delta L_2/\Delta L_1 = 6$, por lo que la respuesta es c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ecuación que relaciona la tensión y la tensión de extensión para el primer cable:

$$(1) \quad \frac{F_1}{A_1} = Y \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

Reescriba la ecuación (1) para el segundo cable, notando que Y , módulo de Young, es constante para un material dado:

$$(2) \quad \frac{F_2}{A_2} = Y \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1), cancelando Y :

$$(3) \quad \frac{\frac{F_2}{A_2}}{\frac{F_1}{A_1}} = \frac{\frac{\Delta L_2}{L_2}}{\frac{\Delta L_1}{L_1}} \rightarrow \frac{F_2 A_1}{F_1 A_2} = \frac{\Delta L_2 L_1}{\Delta L_1 L_2}$$

Cancele F_2 y F_1 en la ecuación (3) porque son iguales en este caso, reacomodando la ecuación, y sustituyendo $L_2 = 3L_1$ y $A_2 = \frac{1}{2}A_1$.

$$\frac{\Delta L_2}{\Delta L_1} = \frac{A_1 L_2}{A_2 L_1} = \frac{A_1 3L_1}{\frac{1}{2}A_1 L_1} = \frac{3}{\frac{1}{2}} = 6$$

La respuesta es c) como se esperaba.

EJEMPLO 3

Un objeto flota con tres cuartos de su volumen sumergido en agua. ¿Cuál es su densidad? ($\rho_{\text{agua}} = 1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) a) $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ b) $8.70 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ c) $7.50 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$ d) $1.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La opción d) puede ser eliminada inmediatamente porque el objeto se hundiría si fuera más denso que el agua. Si la opción a) fuera verdad, el objeto estaría flotando pero sumergido totalmente. Estas consideraciones dejan solamente las opciones b) y c). La fuerza de empuje depende de la cantidad de líquido desplazado, y esta fuerza debe balancear exactamente a la fuerza gravitacional, o peso. Puesto que el objeto está solamente tres cuartos sumergido, su peso debe ser solamente tres cuartos el de un volumen similar de agua. Se sigue entonces que la densidad del objeto debe ser tres cuartos el del agua, que es la respuesta c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Despreciando la fuerza de empuje del aire, dos fuerzas actúan sobre el objeto: la fuerza de empuje, que es igual al peso del líquido desplazado, y la fuerza gravitacional:

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_B + \vec{F}_{\text{grav}} = 0$$

Sustituya la expresión para las fuerzas de empuje y gravitacional:

$$(1) F_B - mg = 0$$

Por definición, la masa del objeto está dada por $m = \rho_{\text{objeto}} V$, donde ρ_{objeto} es la densidad del objeto y V su volumen. La fuerza de empuje es el peso del agua desplazada: $F_B = \rho_{\text{objeto}} V_{\text{sub}} g$ donde V_{sub} es el volumen del agua desplazada. Sustituya estas expresiones en la ecuación (1):

$$(2) \rho_{\text{agua}} V_{\text{sub}} g - \rho_{\text{objeto}} V g = 0$$

Resuelva la ecuación (2) para ρ_{objeto} , obteniendo la respuesta c):

$$\begin{aligned} \rho_{\text{obj}} &= \frac{V_{\text{sub}}}{V} \rho_{\text{agua}} = (0.750)(1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) \\ &= 7.50 \times 10^2 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

EJEMPLO 4

En el punto 1, el agua fluye suavemente a velocidad v_1 a través de un tubo horizontal con radio r_1 . Después, el tubo se angosta a la mitad de ese radio en el punto 2. ¿Qué puede decirse de la velocidad v_1 del agua en el punto 1 comparado con su velocidad v_2 en el punto 2? a) $v_1 = v_2$ b) $v_1 > v_2$ c) $v_1 < v_2$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El volumen de flujo es proporcional a la velocidad y al área de sección transversal del tubo. Un radio más grande en el punto 1 significa un área de sección transversal más grande. Puesto que el agua es esencialmente incompresible, el caudal debe ser igual en ambas secciones del tubo, así que la sección representativa más grande en el punto 1 conduce a una menor velocidad del líquido y la respuesta es c).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplice la ecuación de continuidad para un fluido incompresible:

$$(1) A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Sustituya una expresión para el área en cada lado de la ecuación (1):

$$(2) \pi r_1^2 v_1 = \pi r_2^2 v_2$$

Resuelva la ecuación (2) para v_1 , y sustituya $r_2 = \frac{1}{2} r_1$ para obtener la respuesta c).

$$v_1 = \frac{r_2^2}{r_1^2} v_2 = \frac{r_2^2}{(2r_2)^2} v_2 = \frac{1}{4} v_2$$

Problemas de opción múltiple

- Un buzo está nadando 10.0 m debajo de la superficie del agua en un depósito. No hay corriente, el aire tiene una presión de 1.00 atmósfera, y la densidad del agua es 1.00×10^3 kilogramos por metro cúbico. ¿Cuál es la presión según lo medido por el buzo? a) 1.10 atmósferas b) $1.99 \times 10^5 \text{ Pa}$ c) 11.0 atmósferas d) $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$
- La aorta de un hombre de 70.0 kilogramos tiene un área de sección transversal de 3.00 cm^2 y lleva sangre con una velocidad de 30.0 cm/s . ¿Cuál es el caudal promedio? a) $10.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ b) $33.0 \text{ cm}^3/\text{s}$ c) $10.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ d) $90.0 \text{ cm}^3/\text{s}$

- A 20.0°C la densidad del agua es 1.00 g/cm^3 . ¿Cuál es la densidad de un cuerpo que tiene un peso de 0.980 N en el aire, pero registra un peso aparente de sólo 0.245 N sobre una báscula de resorte completamente inmersa en el agua? a) 0.245 g/cm^3 b) 0.735 g/cm^3 c) 1.33 g/cm^3 d) 4.00 g/cm^3
- Dos cuerpos insolubles, A y B, aparentan perder la misma cantidad de peso cuando se sumergen en alcohol. ¿Cuál de las siguientes declaraciones es más aplicable? a) Ambos cuerpos tienen la misma masa de aire. b) Ambos cuerpos tienen el mismo volumen. c) Ambos cuerpos tienen la misma densidad. d) Ambos cuerpos el mismo peso en el aire.
- La planta de cada pie de un hombre de 80 kilogramos tiene un área de cerca de 400 cm^2 . ¿Cuál es el efecto de sus raquetas para nieve que usa con un área de cerca de 0.400 m^2 ? a) La presión ejercida en la nieve se convierte en 10 veces más grande. b) La presión ejercida en la nieve se convierte en $1/10$ más grande. c) La presión ejercida en la nieve sigue siendo igual. d) La fuerza ejercida en la nieve es $1/10$ más grande.
- En una prensa hidráulica, la superficie del pistón de entrada es 10 cm^2 y el del pistón de salida es $3\,000\text{ cm}^2$. ¿Cuál es el trabajo hecho si una fuerza de 100 N aplicada al pistón de entrada levanta el pistón de salida por 2.0 m ? a) 20 kJ b) 30 kJ c) 40 kJ d) 60 kJ
- El módulo de Young para el acero es $2.0 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$. ¿Cuál es la tensión en una barra de acero de 100 centímetros de largo y 20 milímetros de diámetro cuando es estirado por una fuerza de $6.3 \times 10^3\text{ N}$? a) $2.01 \times 10^7\text{ N/m}^2$ b) $12.6 \times 10^{12}\text{ N/m}^2$ c) $3.15 \times 10^8\text{ N/m}^2$ d) $4.0 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$

RESPUESTAS

- b).** El líquido está en reposo (sin corrientes), así que este problema es un cálculo de presión hidrostática. En unidades SI, $1\text{ atmósfera} = 1.01 \times 10^5\text{ Pa}$. La opción d) puede ser eliminada porque la presión debajo del agua debe ser mayor que la presión en la superficie.

$$P_{\text{buzo}} = P_{\text{atm}} + \rho gh = (1.01 \times 10^5\text{ Pa}) + (1.00 \times 10^3\text{ kg/m}^3)(9.80\text{ m/s}^2)(10.0\text{ m}) \\ = 1.99 \times 10^5\text{ Pa}$$

- d).** La respuesta sigue de la definición:

$$\text{Caudal} = vA = (30\text{ cm/s})(3\text{ cm}^2) = 90\text{ cm}^3/\text{s}$$

- c).** Este problema es una aplicación del principio de Arquímedes. La aparente pérdida de peso de un cuerpo sumergido es igual el peso del líquido desplazado. El peso w del agua desplazada es $w = 0.980\text{ N} - 0.245\text{ N} = 0.735\text{ N}$. Utilizando la definición de densidad $\rho_{\text{agua}}g = w/V$, así que el volumen ocupado por este peso de agua es $V = 0.735\text{ N}/\rho_{\text{agua}}g$. El volumen del cuerpo debe ser igual al volumen del agua desplazada. La densidad del cuerpo es $\rho = m/V = (0.980\text{ N}/0.735\text{ N})\rho_{\text{agua}} = 1.33\text{ g/cm}^3$.
- b).** Según el principio de Arquímedes, la pérdida aparente de peso es igual al peso del líquido desplazado; por lo tanto, ambos deben tener el mismo volumen porque el volumen del líquido es igual al volumen del cuerpo.
- b).** La fuerza ejercida por el hombre es su peso y se supone constante, lo que elimina la opción d). Para una fuerza constante, la presión y el área son inversamente. El área de las raquetas es 10 veces el área del pie, así que la presión asociada con las raquetas es el recíproco de 10, o $1/10$ de la presión ejercida por el pie.
- d).** Por el principio de Pascal, la presión en los pistones de la entrada y de la salida es la misma, así que

$$\frac{F_{\text{entrada}}}{A_{\text{entrada}}} = \frac{F_{\text{salida}}}{A_{\text{salida}}} \rightarrow F_{\text{salida}} = \frac{A_{\text{salida}}}{A_{\text{entrada}}} F_{\text{entrada}} \\ = \left(\frac{3\,000\text{ cm}^2}{10\text{ cm}^2} \right) 100\text{ N} = 3 \times 10^4\text{ N}$$

El trabajo es fuerza por desplazamiento:

$$W = F\Delta s = (3 \times 10^4\text{ N})(2\text{ m}) = 6 \times 10^4\text{ J} = 60\text{ kJ}$$

- a).** La tensión es fuerza por unidad de superficie, así que ni el módulo de Young ni la longitud de la barra son necesarios para solucionar el problema.

$$\text{Tensión} = F/A = (6.30 \times 10^3\text{ N}) / \pi (1 \times 10^{-2}\text{ m})^2 = 2.01 \times 10^7\text{ N/m}^2$$

Ondas

EJEMPLO 1

Una onda transversal viaja a la velocidad v_1 y tiene dos veces la frecuencia y un cuarto de la longitud de onda de una segunda onda transversal. (Podrían ser ondas en dos diferentes cuerdas, por ejemplo.) ¿Cómo se compara velocidad v_1 de la primera onda con la velocidad v_2 de la segunda onda? a) $v_1 = v_2$ b) $v_1 = 2v_2$ c) $v_1 = \frac{1}{2}v_2$

SOLUCIÓN

La velocidad de una onda es proporcional a la frecuencia y la longitud de onda:

$$(1) \quad v = f\lambda$$

Plantee la razón v_2 a v_1 utilizando la ecuación (1) y sustituya $f_1 = 2f_2$ y $\lambda_1 = \lambda_2/4$:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{f_1\lambda_1}{f_2\lambda_2} = \frac{(2f_2)(\lambda_2/4)}{f_2\lambda_2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$$

Resuelva para v_1 , para obtener la respuesta c):

$$v_1 = \frac{1}{2}v_2$$

EJEMPLO 2

Un bloque de la masa m oscila en el extremo de un resorte horizontal en una superficie sin fricción. En la extensión máxima, un bloque idéntico cae de sobre la tapa del primer bloque y se le pega. ¿Cómo es el nuevo periodo T_{nuevo} comparado al periodo original, T_0 ? a) $T_{\text{nuevo}} = \sqrt{2} T_0$ b) $T_{\text{nuevo}} = T_0$ c) $T_{\text{nuevo}} = 2 T_0$ d) $T_{\text{nuevo}} = \frac{1}{2}T_0$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Una masa creciente aumentaría la inercia del sistema sin aumentar la energía mecánica, así que una masa de $2m$ debe moverse más lentamente que una masa m . Eso alternadamente alargaría el periodo, eliminando las opciones b) y d). El periodo es proporcional a la raíz cuadrada de la masa, así que duplicar los incrementos de la masa incrementa el periodo por un factor de la raíz cuadrada de 2, que es la respuesta a).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Aplique la ecuación para el periodo de un sistema masa-resorte:

$$(1) \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Utilizando la ecuación (1), plantee la razón del nuevo periodo T_{nuevo} al viejo periodo, T_0 , cancelando los términos comunes y sustituyendo $m_{\text{nuevo}} = 2m_0$:

$$(2) \quad \frac{T_{\text{nuevo}}}{T_0} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{m_{\text{nuevo}}}{k}}}{2\pi\sqrt{\frac{m_0}{k}}} = \frac{\sqrt{m_{\text{nuevo}}}}{\sqrt{m_0}} = \sqrt{\frac{2m_0}{m_0}} = \sqrt{2}$$

Resuelva la ecuación (2) para el nuevo periodo T_{nuevo} para caer en la respuesta a):

$$T_{\text{nuevo}} = \sqrt{2} T_0 \quad [\text{respuesta a)]}$$

EJEMPLO 3

Un péndulo simple en movimiento de vaivén oscila 36 veces en 68 s. ¿Cuál es su longitud si la aceleración local de la gravedad es de 9.80 m/s^2 ? a) 0.067 m b) 0.356 m c) 1.25 m d) 0.887 m

SOLUCIÓN

Primero, calcule el periodo T del movimiento:

$$T = \frac{68 \text{ s}}{36} = 1.89 \text{ s}$$

Escriba la ecuación para el periodo de un péndulo y resuelva para la longitud L , para obtener la respuesta d):

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \rightarrow L = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{(9.80 \text{ m/s}^2)(1.89 \text{ s})^2}{4\pi^2} = 0.887 \text{ m} \quad [\text{respuesta d)]}$$

Problemas de opción múltiple

- Un péndulo simple tiene un periodo de 4.63 s en un lugar en la Tierra donde la aceleración de la gravedad es 9.82 m/s^2 . En una diferente localización, el periodo aumenta a 4.64 s .

- ¿Cuál es el valor del g en este segundo punto? a) 9.78 m/s^2 b) 9.82 m/s^2 c) 9.86 m/s^2 d) no puede ser determinada sin saber la longitud del péndulo.
- ¿Cuál es la longitud de onda de una onda transversal que tiene una velocidad de 15 m/s y una frecuencia de 5.0 hertz ? a) 3.0 m b) 10 m c) 20 m d) 45 m
 - ¿Cuál es la diferencia óptima en la fase para interferencia destructiva máxima entre dos ondas de la misma frecuencia? a) 360° b) 270° c) 180° d) 90°
 - Se pueden formar ondas estacionarias si ondas coincidentes tienen a) la misma dirección de propagación. b) la misma frecuencia. c) diferentes amplitudes. d) diferentes longitudes de onda.
 - Un péndulo simple con una longitud L tiene un periodo de 2 s . Para que el péndulo tenga un periodo de 4 s , debemos a) partir en dos la longitud. b) un cuarto de la longitud. c) duplicar la longitud. d) cuadruplicar la longitud.
 - Si un péndulo simple de largo 12 m tiene una frecuencia de 0.25 hertzios , ¿cuál será el periodo de un segundo péndulo en la misma localización si su longitud es 3.0 m ? a) 2.0 s b) 3.0 s c) 4.0 s d) 6.0 s
 - Un reloj de péndulo moviéndose lentamente (es decir, atrasando el tiempo). ¿Cuál de las siguientes propuestas podría rectificar el problema? a) El peso de la lenteja debe ser disminuido de modo que pueda moverse más rápidamente. b) La longitud del alambre que sostiene la lenteja debe ser acortada. c) La amplitud de oscilación debe ser reducida de modo que la trayectoria cubierta sea más corta. d) Ninguno de los anteriores.
 - Un objeto de 20.0 kg puesto en un piso sin fricción se une a una pared por un resorte. Una fuerza 5.00 N desplaza horizontalmente el objeto 1.00 m de su posición del equilibrio. ¿Cuál es el periodo de la oscilación del objeto? a) 2.00 s b) 6.08 s c) 12.6 s d) 46.4 s

RESPUESTAS

- a).** La respuesta puede ser determinada sin hacer una solución numérica. Cambie $T = 2\pi(L/g)^{1/2}$ a $Tg^{1/2} = \text{constante}$. El periodo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la aceleración debida a la gravedad. Puesto que T ha aumentado, $g^{1/2}$, g debe disminuir. La opción a) es el único valor de g que es menor que los 9.82 m/s^2 originales. Cuantitativamente:

$$g_2 = (T_1^2 g_1 / T_2^2) = (4.63 \text{ s})^2 (9.82 \text{ m/s}^2) / (4.64 \text{ s})^2 = 9.78 \text{ m/s}^2$$

- a).** La longitud de onda es la velocidad dividida por la frecuencia. La fórmula no depende del tipo de onda implicado.

$$\lambda = v/f = (15 \text{ m/s}) / 5.0 \text{ s}^{-1} = 3.0 \text{ m}$$

- c).** Dos ondas están totalmente fuera de fase cuando coinciden sus antinodos de modo que cada cresta en una onda coincide con un valle en la otra. Esta situación ocurre cuando las ondas se diferencian en fase por 180° .
- b).** En ondas estacionarias, los nodos son estacionarios, que pueden ser acoplados cuando dos ondas con la misma frecuencia viajan en direcciones opuestas.
- d).** En un péndulo el periodo y la raíz cuadrada de la longitud son directamente proporcionales:

$$T = 2\pi(L/g)^{1/2} \text{ así que } T/L^{1/2} = \text{constante}$$

Para duplicar el periodo, usted debe duplicar la raíz cuadrada de la longitud. Para duplicar la raíz cuadrada de la longitud, usted debe cuadruplicar la longitud:

$$(4L)^{1/2} = 4^{1/2} L^{1/2} = 2L^{1/2}$$

- a).** La frecuencia es el recíproco del periodo, $f = 1/T$, así que el primer péndulo tiene periodo $T_1 = 4.0 \text{ s}$. Para los péndulos, el periodo y la raíz cuadrada de la longitud son directamente proporcionales, así que el cociente de los dos periodos es

$$T_2/T_1 = (L_2/L_1)^{1/2} = (12/3)^{1/2} = (4.0)^{1/2} = 2.0$$

Por lo que sigue que $T_2 = 2.0 \text{ s}$.

7. **b).** El periodo de un péndulo se relaciona directamente con la raíz cuadrada de la longitud de la cuerda que sostiene la lenteja. Es independiente de la masa y de la amplitud.
8. **c).** La constante de la fuerza es $k = F/\Delta x = 5.0 \text{ N}/1.0 \text{ m} = 5.0 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. El periodo es

$$T = 2\pi(m/k)^{1/2} = 2\pi(20.0 \text{ kg}/5.00 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})^{1/2} = 12.6 \text{ s}$$

Sonido

EJEMPLO 1

Cuando una intensidad de sonido dada se duplica ¿por cuánto se incrementa el nivel de intensidad de sonido (o nivel de decibeles)?

SOLUCIÓN

Escriba la expresión para una diferencia en nivel de decibeles $\Delta\beta$:

Factorice y aplique la regla de logaritmos $\log a - \log b = \log(a/b) = \log(a \cdot b^{-1})$:

Sustituya $I_2 = 2I_1$ y evalúe la expresión:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

$$\Delta\beta = 10 \left[\log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \right] = 10 \log\left(\frac{I_2}{I_0} \cdot \frac{I_0}{I_1}\right)$$

$$= 10 \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$$\Delta\beta = 10 \log\left(\frac{2I_1}{I_1}\right) = 10 \log(2) = 3.01 \text{ dB}$$

EJEMPLO 2

Una onda acústica pasa del aire al agua. ¿Qué puede decirse de su longitud de onda en el agua comparada con la del aire?
a) Las longitudes de onda son iguales. b) La longitud de onda en aire es mayor que en agua. c) La longitud de onda en aire es menor que en agua.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La frecuencia del sonido no cambia al ir de un tipo de medio al siguiente porque es causado por variaciones periódicas de la presión al transcurrir el tiempo. La longitud de onda debe cambiar, sin embargo, como la velocidad del sonido cambia y durante un solo periodo la onda acústica viajará una diferente distancia, que corresponde a una sola longitud de onda. La velocidad del sonido en agua es mayor que en aire, así que en un solo periodo la onda acústica viajará una mayor distancia. Por lo tanto, la longitud de onda de una onda acústica dada es mayor en agua que en el aire, que es c). Este resultado puede ser cuantitativo usando $v = f\lambda$, donde v es la velocidad de la onda, f la frecuencia y λ la longitud de onda.

EJEMPLO 3

Una onda acústica emitida desde un aparato de sonar se refleja en un submarino que viaja lejos de la fuente del sonar. ¿Cómo es la frecuencia de la onda reflejada, f_R , comparada con la frecuencia de la fuente, f_s ? a) $f_R = f_s$ b) $f_R < f_s$ c) $f_R > f_s$

SOLUCIÓN

La onda reflejada tendrá una frecuencia más baja [respuesta **b**)]. Para ver por qué, considere los máximos de presión que afectan secuencialmente al submarino. El primer máximo de presión golpea al submarino y se refleja, pero el segundo alcanza al submarino cuando se ha alejado. La distancia entre los máximos consecutivos en las ondas reflejadas aumenta; por lo tanto la longitud de onda también aumenta. Puesto que $v = f\lambda$ y la velocidad no se afecta, la frecuencia debe disminuir.

Problemas de opción múltiple

- La sirena de niebla de un barco rebota como eco en un iceberg a la distancia. Si el eco se oye 5.00 segundos después de que la sirena se suena y la temperatura del aire es -15.0°C , ¿qué tan lejos está el iceberg? a) 224 m b) 805 m c) 827 m d) 930 m
- ¿Cuál es el nivel de sonido de una onda con una intensidad de $10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2$? a) 30 dB b) 60 dB c) 90 dB d) 120 dB

- A 0°C , aproximadamente ¿cuánto tiempo lleva al sonido recorrer 5.00 kilómetros a través del aire? a) 15 s b) 30 s c) 45 s d) 60 s
- Si la velocidad de una onda transversal de una cuerda de violín es 12.0 m/s y la frecuencia tocada es de 4.00 hertz, ¿cuál es la longitud de onda del sonido en el aire? (Utilice 343 m/s para la velocidad del sonido.) a) 48.0 m b) 12.0 m c) 3.00 m d) 85.8 m
- Si dos ondas acústicas idénticas interactúan en fase, la onda que resulta tendrá a) un periodo más corto. b) una amplitud más grande. c) una frecuencia más alta. d) mayor velocidad.
- ¿Cuál es la velocidad de una onda acústica longitudinal en una barra de acero si el módulo de Young para el acero es $2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ y la densidad del acero es $8.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$? a) $4.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ b) $5.0 \times 10^3 \text{ m/s}$ c) $25 \times 10^6 \text{ m/s}$ d) $2.5 \times 10^9 \text{ m/s}$
- ¿Si dos frecuencias emitidas a partir de dos fuentes son 48 hertz y 54 hertz, cuántas pulsaciones por segundo se oyen? a) 3 b) 6 c) 9 d) 12
- La frecuencia registrada por un detector es más alta que la frecuencia emitida por la fuente. ¿Cuál de las siguientes declaraciones *debe* ser verdadera? a) La fuente debe estar alejándose del detector. b) La fuente debe moverse hacia el detector. c) La distancia entre la fuente y el detector debe disminuir. d) El detector debe alejarse de la fuente.

RESPUESTAS

- b).** La velocidad del sonido normal a 0°C en el aire es 331 m/s. La velocidad del sonido en el aire a las varias temperaturas está dada por

$$v = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{T}{273 \text{ K}}} = (331 \text{ m/s}) \sqrt{\frac{273 \text{ K} - 15.0 \text{ K}}{273 \text{ K}}}$$

$$= 322 \text{ m/s}$$

Calcule la distancia recorrida en la mitad de 5 segundos:

$$d = vt = (322 \text{ m/s})(2.50 \text{ s}) = 805 \text{ m}$$

- c).** Sustituya: $\beta = 10 \log I/I_0 = 10 \log (1 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/10^{-12} \text{ W/m}^2) = 90 \text{ dB}$.
- a).** A 0°C , la velocidad del sonido en el aire es 331 m/s, así que $t = (500 \times 10^3 \text{ m})/(331 \text{ m/s}) \sim 15 \text{ s}$.
- d).** La frecuencia es igual para la cuerda que para la onda acústica producida por la cuerda en el aire circundante, pero de diferente longitud de onda. La velocidad del sonido es igual al producto de la frecuencia y de la longitud de onda, así que $\lambda = v/f = (343 \text{ m/s})/4.00 \text{ s}^{-1} = 85.8 \text{ m}$.
- b).** Dos ondas están en fase si coinciden sus crestas y valles. La amplitud de la onda que resulta es la suma algebraica de las amplitudes de las dos ondas superpuestas en ese punto, así que se duplica la amplitud.
- b).** La solución requiere sustituir en una expresión para la velocidad del sonido a través de una barra de material sólido que tiene módulo de Young Y .

$$v = (Y/\rho)^{1/2} = (2.0 \times 10^{11} \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2)/(8.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)^{1/2}$$

$$= 25 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2)^{1/2} = 5.0 \times 10^3 \text{ m/s}$$

- b).** $f_{\text{pulsación}} = f_1 - f_2 = 54 - 48 = 6 \text{ pulsaciones}$
- c).** El movimiento de una fuente de sonido con relación a un observador da lugar al efecto Doppler. Como la frecuencia tiene un corrimiento a un valor más alto, la fuente y el detector deben, por consiguiente, estar más cerca, acortando la longitud de onda desde el punto de vista del observador. Esta observación elimina las opciones a) y d). La opción b) puede ser eliminada porque no es necesariamente verdad: la misma clase de efecto ocurre cuando la fuente se lleva a cabo constantemente y el detector se mueve hacia él.

Luz

EJEMPLO 1

¿Qué sustancia tendrá un ángulo crítico más pequeño para la reflexión interna total, el vidrio con índice de refracción de 1.50 o el diamante con índice de refracción de 2.42? a) el vidrio b) el diamante c) los ángulos críticos son iguales para ambos.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

El índice de refracción más grande indica una velocidad de la luz más reducida dentro del material, que alternadamente significa un ángulo más grande de refracción, o una flexión más grande hacia la normal al entrar al material desde el aire y una flexión más lejos de la normal al pasar del material al aire. (Recuerde que una recta normal es perpendicular a la superficie del material). Para que la reflexión interna total ocurra, debe ser posible un ángulo de refracción de 90° , que ocurre siempre que el medio que refracta tenga índice de refracción más bajo que el medio del incidente. El diamante desvía más la luz más que el vidrio, así que el rayo incidente puede estar más cercano a la normal y todavía desviar suficiente el ángulo de refracción resultante de la reflexión interna total. Más cercano a la normal significa un ángulo crítico más pequeño, así que la respuesta es **b**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ley de Snell para la interface diamante-aire:

$$n_D \sin \theta_D = n_A \sin \theta_A$$

Calcule el ángulo crítico para el diamante, utilizando $n_A = 1.00$ para el aire y $\theta_A = 90^\circ$ junto con $n_D = 2.42$:

$$2.42 \sin \theta_D = 1.00 \rightarrow \theta_D = \sin^{-1} \left(\frac{1.00}{2.42} \right) = 24.4^\circ$$

Repita el cálculo para el vidrio:

$$1.50 \sin \theta_G = 1.00 \rightarrow \theta_G = \sin^{-1} \left(\frac{1.00}{1.50} \right) = 41.8^\circ$$

El cálculo muestra explícitamente que el diamante tiene un menor ángulo crítico que el vidrio [respuesta **b**].

EJEMPLO 2

La vista cercana de un paciente de un punto es 85.0 centímetros. ¿Qué prescripción de longitud focal para la lente permitirá que el paciente vea los objetos claramente a una distancia de 25.0 centímetros del ojo? Desprecie la distancia ojo-lente.

SOLUCIÓN

Utilice la ecuación para lentes delgadas:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

Un objeto a la distancia $p = 25.0$ centímetros debe formar una imagen en el paciente cerca de punto de 85.0 centímetros. La imagen debe ser virtual, así que $q = -85.0$ centímetros:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{25.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-85.0 \text{ cm}} = 2.82 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$$

$$f = 35.4 \text{ cm}$$

EJEMPLO 3

Dos fotones que viajan en vacío tienen diversas longitudes de onda. ¿Cuál de las afirmaciones siguientes es verdad? a) El fotón con una longitud de onda más pequeña tiene mayor energía. b) El fotón con mayor longitud de onda tiene mayor energía. c) La energía de todos los fotones es igual. d) El fotón con la mayor longitud de onda viaja a una poca velocidad.

SOLUCIÓN

La respuesta d) puede ser eliminada inmediatamente porque la velocidad de la luz en vacío es igual para todas las longitudes de onda de la luz. La energía de un fotón, o la partícula de luz, está dada por $E = hf$ y por lo tanto es proporcional a la frecuencia f e inversamente proporcional a la longitud de onda porque $f = c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz. Un fotón de longitud de onda más pequeña tiene una mayor frecuencia y por lo tanto una mayor energía, así que la respuesta **a**) es la correcta.

Problemas de opción múltiple

1. El vidrio tiene un índice de refracción de 1.50. ¿Cuál es la frecuencia de la luz que tiene una longitud de onda de 5.00×10^2 nanómetros en vidrio? a) 1.00 hertz b) 2.25 hertz c) 4.00×10^{14} hertz d) 9.00×10^{16} hertz.

2. El agua tiene índice de refracción de 1.33. Si un espejo plano se sumerge en agua, ¿qué puede decirse del ángulo de reflexión θ si la luz choca en el espejo con un ángulo incidente de 30° ? a) $\theta < 30^\circ$ b) $\theta = 30^\circ$ c) $30^\circ < \theta$ d) no se refleja ninguna luz porque 30° es el ángulo crítico para el agua.
3. El índice de refracción para el agua es 1.33 y para el cristal es de 1.50. Un rayo ligero cruza el límite del vidrio soluble con un ángulo del incidente de 30.0° en el lado del agua. ¿Cuál del siguiente es el ángulo de la refracción en el cristal? a) 26.3° b) 34.7° c) 30.0° d) 60.0°
4. La luz es incidente en un prisma en ángulo de 90° en relación con su superficie. El índice de refracción del material del prisma es 1.50. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es la más exacta sobre el ángulo de la refracción θ ? a) $0^\circ < \theta < 45^\circ$ b) $45^\circ < \theta < 90^\circ$ c) $\theta = 0^\circ$ d) $90^\circ < \theta$
5. Luz blanca incide en un interfaz aire-vidrio está partido dentro de un espectro en vidrio. ¿Qué color de la luz tiene el ángulo de refracción más grande? a) la luz roja b) la luz ámbar c) la luz violeta d) el ángulo es igual para todas las longitudes de onda.
6. Un objeto real se pone a 10.0 centímetros de una lente convergente que tiene una longitud focal de 6.00 centímetros. ¿Qué afirmación es más exacta? a) La imagen es real, derecha y agrandada. b) La imagen es real, invertida y agrandada. c) La imagen es real, derecha y reducida. d) La imagen es real, invertida y reducida.
7. ¿Cuál es la longitud focal de una lente que forma una imagen virtual a 30.0 centímetros de la lente cuando un objeto real se pone a 15.0 centímetros de la lente? a) 10.0 centímetros b) 15.0 centímetros c) 30.0 centímetros d) 45.0 centímetros
8. ¿Cuál es la ampliación de una lente que forma una imagen 20.0 centímetros a la derecha cuando un objeto real se pone 10.0 centímetros a su izquierda? a) 0.500 b) 1.00 c) 1.50 d) -2.00
9. El ojo humano puede responder a la luz con una energía total de tanto como 10^{-18} j. Si la luz roja tiene una longitud de onda de 600 nanómetros, ¿cuál es el número mínimo de fotones de luz roja que el ojo puede percibir? a) 1 b) 2 c) 3 d) 5
10. ¿Qué fenómeno ocurre para las ondas transversales pero no para las ondas longitudinales? a) reflexión b) refracción c) difracción d) polarización

RESPUESTAS

1. c). La velocidad de la luz en el vidrio se puede encontrar de la definición del índice de refracción, $n = c/v$; la longitud de onda y la frecuencia están relacionadas con la velocidad por la relación general de la onda, $v = f\lambda$. Por lo tanto

$$f = v/\lambda = c/n\lambda = (3.00 \times 10^8 \text{ m/s})/(1.50)(5.00 \times 10^{-7} \text{ m}) = 4.00 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

2. b). La ley de la reflexión es independiente del medio implicado. El ángulo de reflexión es siempre igual al ángulo de la incidencia.
3. a). La ley de Snell está dada por $n_1 \sin \theta = n_2 \sin \theta$; por lo tanto, $1.33 \sin 30.0^\circ = 1.50 \sin \theta_2$. De esta expresión, vemos que $\sin \theta_2 < \sin 30.0^\circ$, así que θ_2 debe ser menor que 30.0° . Por lo tanto, a) es la única opción razonable.
4. c). La ley de Snell es $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$. Como los rayos del incidente son normales a la superficie del prisma, $\theta_1 = 0^\circ$ y $\sin 0^\circ = 0$. Por lo tanto, $0 = n_2 \sin \theta_2 \rightarrow \theta_2 = 0^\circ$.
5. b). Cuanto mayor es la frecuencia de la luz, es mayor su energía y más rápido su velocidad a través de cualquier medio material. De la ley de Snell, la velocidad y el $\sin \theta$ con respecto al normal son inversamente proporcionales. De las opciones, la luz violeta tiene la frecuencia más alta y, por lo tanto, la velocidad más alta y el ángulo de refracción más grande.
6. b). Por la ecuación de una lente delgada, $1/f = 1/p + 1/q$; por lo tanto, con $p = 10.0$ centímetros y $f = 6.00$ centímetros, la sustitución da lugar a $q = 15.0$ centímetros. La distancia de la imagen es positiva; por lo tanto, la imagen es real. La ampliación está dada por $M = -q/p = -15.0 \text{ cm}/10 = -1.50$. Como M es negativa, se invierte la imagen, mientras que $|M| > 1$ significa que la imagen está agrandada.

7. **c).** La longitud focal está dada por la ecuación de la lente delgada, $1/f = 1/p + 1/q$ porque la imagen formada es virtual, el signo de q es negativo. Por lo tanto

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{15.0 \text{ cm}} + \frac{1}{-30.0 \text{ cm}} = \frac{1}{30.0 \text{ cm}} \rightarrow f = 30.0 \text{ cm}$$

8. **d).** La ampliación se da por $M = -q/p = -20.0 \text{ cm}/10.0 \text{ cm} = -2.00$. El signo de q es positivo porque la imagen es real. El valor negativo de M significa que la imagen está invertida.
9. **c).** $E = hc/\lambda = (6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})/(6.00 \times 10^{-7} \text{ m}) = 3.31 \times 10^{-19} \text{ J}$. Este resultado es la energía de cada fotón rojo. El número de fotones necesario para producir un total de 10^{-18} J de energía es

$$(10^{-18} \text{ J})/(3.31 \times 10^{-19} \text{ J/fotones}) \sim 3 \text{ fotones}$$

10. **d).** La polarización puede ocurrir solamente con las ondas transversales porque el movimiento debe ser perpendicular a la dirección de la propagación.

Electrostática

EJEMPLO 1

Dos protones, cada uno de carga $q_p = e$, ejercen una fuerza eléctrica de magnitud F_{p-p} uno sobre el otro cuando están apartados una distancia r_p . Un par de partículas alfa, cada una de carga $q_\alpha = 2e$, ejerce una fuerza eléctrica $F_{\alpha-\alpha} = \frac{1}{4} F_{p-p}$ uno sobre la otra. ¿Cuál es la distancia entre las partículas alfa, r_α , en términos de la distancia entre los protones, r_p ? a) $r_\alpha = 4r_p$ b) $r_\alpha = 2r_p$ c) $r_\alpha = r_p$ d) Se necesita más información.

SOLUCIÓN

Utilice la ley de Coulomb para encontrar una expresión para la fuerza entre los protones:

$$(1) F_{p-p} = \frac{k_e q_p q_p}{r_p^2} = \frac{k_e e^2}{r_p^2}$$

Utilice la ley del Coulomb para encontrar una expresión para la fuerza entre las partículas alfa:

$$(2) F_{\alpha-\alpha} = \frac{k_e q_\alpha q_\alpha}{r_\alpha^2} = \frac{k_e (2e)^2}{r_\alpha^2} = \frac{4k_e e^2}{r_\alpha^2}$$

Divida la ecuación (2) por la ecuación (1) y cancele los términos comunes:

$$(3) \frac{F_{p-p}}{F_{\alpha-\alpha}} = \frac{\frac{k_e e^2}{r_p^2}}{\frac{4k_e e^2}{r_\alpha^2}} = \frac{r_\alpha^2}{4r_p^2}$$

Ahora sustituya $F_{\alpha-\alpha} = \frac{1}{4} F_{p-p}$ y resuelva para F_α^2 :

$$\frac{r_\alpha^2}{4r_p^2} = \frac{F_{p-p}}{F_{\alpha-\alpha}} = \frac{F_{p-p}}{\frac{1}{4} F_{p-p}} = 4 \rightarrow r_\alpha^2 = 16r_p^2$$

Tome las raíces cuadradas, obteniendo r_α en términos de r_p : $r_\alpha = 4r_p$

La distancia entre las partículas alfa es cuatro veces la distancia entre los protones, que es la respuesta **a**).

EJEMPLO 2

Una esfera A tiene dos veces el radio de una segunda, muy distante esfera B . Sea el potencial eléctrico en el infinito considerado como cero. Si el potencial eléctrico en la superficie de la esfera A es igual que en la superficie de la esfera B , ¿qué puede decirse de la carga Q_A en la esfera A comparada con la carga Q_B sobre B ? a) $Q_A = 2Q_B$ b) $Q_A = Q_B$ c) $Q_A = Q_B/2$

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

Por la ley de Gauss, una distribución de carga esférica crea un campo eléctrico fuera de la esfera como si toda la carga estuviera concentrada en un punto en el centro de la esfera. El potencial eléctrico debido a una carga puntual es proporcional a la carga Q e inversamente proporcional a la distancia a esa carga. El radio reduce dos veces el potencial eléctrico en la superficie de A por un factor de una mitad. La carga de la esfera A debe ser dos veces la de B de modo que los potenciales eléctricos sean iguales para ambas esferas. Por lo tanto, la respuesta es **a**).

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Escriba la ecuación para el potencial eléctrico de una carga puntual q :

$$(1) \quad V = \frac{k_e Q}{r}$$

Haga un cociente de la ecuación (1) para la carga A y para la carga B , respectivamente:

$$(2) \quad \frac{V_A}{V_B} = \frac{\frac{k_e Q_A}{r_A}}{\frac{k_e Q_B}{r_B}} = \frac{Q_A r_B}{Q_B r_A}$$

Sustituya $V_A = V_B$ y $r_A = 2r_B$ en la ecuación (2) y resuelva para Q_A , obteniendo otra vez la respuesta **a)**:

$$1 = \frac{Q_A r_B}{Q_B (2r_B)} \rightarrow Q_A = 2Q_B \text{ [respuesta a)]}$$

EJEMPLO 3

¿Cuánto trabajo se requiere para traer un protón con la carga $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ y una partícula alfa con la carga $3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ del resto en una gran distancia (que tiende al infinito) a las posiciones de resto una distancia de $1.00 \times 10^{-15} \text{ m}$ lejos uno de otro?

SOLUCIÓN

Utilice el teorema del trabajo-energía:

$$W = \Delta EC + \Delta EP = EC_f - EC_i + EP_f - EP_i$$

Las velocidades son cero al inicio y al final, así que las energías cinéticas son cero. Sustituya los valores en la energía potencial y encuentre el trabajo necesario para montar la configuración:

$$\begin{aligned} W &= 0 - 0 + \frac{k_e q_p q_\alpha}{r} - 0 \\ &= \frac{(9.00 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^3/\text{C}^2 \cdot \text{s}^2)(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(3.20 \times 10^{-19} \text{ C})}{1.00 \times 10^{-15} \text{ m}} \\ &= 4.61 \times 10^{-13} \text{ J} \end{aligned}$$

EJEMPLO 4

Un campo eléctrico fijo, constante E acelera un protón desde el reposo un desplazamiento Δs . Un átomo completamente ionizado del litio con tres veces la carga del protón acelera a través del mismo campo eléctrico constante y desplazamiento. ¿Cuál de lo siguiente es verdadero para las energías cinéticas de las partículas? a) Las energías cinéticas de las dos partículas son iguales. b) La energía cinética del protón es más grande. c) La energía cinética del ion de litio es más grande.

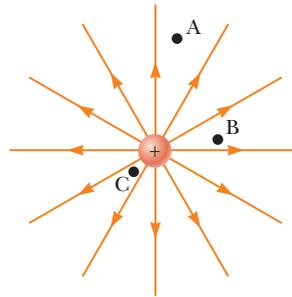
SOLUCIÓN

El trabajo hecho por el campo eléctrico sobre una partícula de carga q está dado por $W = F\Delta s = qE\Delta s$. El campo eléctrico E y el desplazamiento Δs son iguales para ambas partículas, así que el campo hace tres veces más trabajo sobre el ion de litio. El teorema del trabajo-energía para este contexto físico es $W = \Delta EC$, así que la energía cinética del ion de litio es tres veces que del protón y la respuesta es **c)**.

Problemas de opción múltiple

- ¿Cuál es la diferencia potencial entre el punto A y el punto B si se requieren 10.0 J de trabajo para mover una carga de 4.00 C de un punto al otro? a) 0.400 V b) 2.50 V c) 14.0 V d) 40.0 V
- ¿Cuánto trabajo tendría que ser hecho por una fuerza no conservativa para mover un electrón con una diferencia potencial positiva de $2.0 \times 10^6 \text{ V}$? Suponga que el electrón está en reposo inicialmente y en su posición final. a) $3.2 \times 10^{-13} \text{ J}$ b) $-8.0 \times 10^{-26} \text{ J}$ c) $1.25 \times 10^{-5} \text{ J}$ d) $-3.2 \times 10^{-13} \text{ J}$
- Dos materiales eléctricamente neutros se frotran juntos. Uno adquiere una carga positiva neta. El otro debe tener a) electrones perdidos. b) electrones ganados. c) protones perdidos. d) protones ganados.
- ¿Cuál es la magnitud de la carga en un cuerpo que tiene un exceso de 20 electrones? a) $3.2 \times 10^{-18} \text{ C}$ b) $1.6 \times 10^{-18} \text{ C}$ c) $3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ d) $2.4 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Dos cargas puntuales, A y B , con cargas de $2.00 \times 10^{-4} \text{ C}$ y $-4.00 \times 10^{-4} \text{ C}$, respectivamente, están separadas por una distancia de 6.00 m . ¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática ejercida sobre la carga A ? a) $2.20 \times 10^{-9} \text{ N}$ b) 1.30 N c) 20.0 N d) 36.0 N

- Dos cargas puntuales, A y B, están separadas 10.0 m. Si la distancia entre ellos se reduce a 5.00 m, la fuerza ejercida sobre cada una a) disminuye la mitad de su valor original. b) aumenta dos veces su valor original. c) disminuye un cuarto de su valor original. d) aumenta cuatro veces su valor original.
- La esfera A con una carga neta de $+3.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ se toca a una segunda esfera B, que tiene una carga neta de $-9.0 \times 10^{-3} \text{ C}$. Las dos esferas, que son exactamente del mismo tamaño y composición, están entonces separadas. La carga neta en la esfera A ahora es a) $+3.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ b) $-3.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ c) $-6.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ d) $-9.0 \times 10^{-3} \text{ C}$
- Si la carga en una partícula en un campo eléctrico se reduce a la mitad de su valor original, la fuerza ejercida en la partícula por el campo es a) el doble. b) se divide en dos. c) cuadruplicado. d) sin cambio.
- En la figura de abajo, los puntos A, B y C están a varias distancias de una carga puntual dada.



¿Qué afirmación es la más exacta? La fuerza del campo eléctrico es a) más grande en el punto A. b) más grande en el punto B. c) más grande en el punto C. d) iguales en los tres puntos.

- La fuerza electrostática entre dos cargas puntuales es F . Si la carga de una carga puntual se duplica y el de la otra carga se cuadruplica, ¿en cuál de las siguientes fuerzas se convierte? a) $F/2$ b) $2F$ c) $4F$ d) $8F$

RESPUESTAS

- b).** La diferencia potencial entre dos puntos en un campo eléctrico es el trabajo por unidad de carga requerida para mover una carga entre los dos puntos:

$$\Delta V = W/q = 10.0 \text{ J}/4.00 \text{ C} = 2.50 \text{ V}$$

- d).** Si el único efecto sobre la partícula es un cambio de posición, debe hacerse trabajo negativo; si no, las cargas negativas ganan energía cinética moviéndose con una diferencia potencial positiva.

$$\begin{aligned} W &= \Delta EC + q \Delta V = 0 + (-1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(2.0 \times 10^6 \text{ V}) \\ &= -3.2 \times 10^{-13} \text{ J} \end{aligned}$$

- b).** Los protones están fijos en el núcleo y no se pueden transferir por fricción. Los electrones se pueden transferir por fricción. Por lo tanto, las cargas netas son debidas a la transferencia de electrones entre dos cuerpos. La conservación de la carga significa que si hay una carga positiva neta, un cuerpo debe haber perdido electrones y el otro cuerpo debe haber ganado los electrones.

- a).** La carga elemental $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, así que la carga total de 20 electrones tiene una magnitud de $20(1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 3.2 \times 10^{-18} \text{ C}$.

- c).** Aplique la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$:

$$F = (9.00 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(2.00 \times 10^{-4} \text{ C})(-4.00 \times 10^{-4} \text{ C})/(6.00 \text{ m})^2 = -20.0 \text{ N}$$

así que la magnitud de la fuerza es 20.0 N.

- d).** De la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$ y la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación de los puntos. Disminuir la distancia a la mitad de su valor original significa que la fuerza se cuadruplica.

- b).** Este problema es una aplicación de la ley de la conservación de la carga. La carga neta inicial es $(+3.0 \times 10^{-3} \text{ C}) + (-9.0 \times 10^{-3} \text{ C}) = -6.0 \times 10^{-3} \text{ C}$. La misma carga neta debe existir después del contacto. Los $-6.0 \times 10^{-3} \text{ C}$ se deben distribuir uniformemente entre las dos esferas porque son físicamente idénticas.

8. **b).** La fuerza del campo eléctrico es el cociente de la fuerza ejercida en una unidad de carga en el campo: $E = F/q$. Por lo tanto, F y q son directamente proporcionales y relacionadas linealmente.
9. **c).** De la ley de Coulomb, la fuerza varía inversamente con el cuadrado de la distancia de las cargas. La fuerza del campo eléctrico en un punto es el cociente de esta fuerza entre la carga: $E = k_e q/r^2$. Por lo tanto, E y r^2 son inversamente proporcionales. El valor más pequeño de r , el valor más pequeño de r^2 y el más grande valor de E .
10. **d).** De la ley de Coulomb, $F = k_e(q_A q_B)/r^2$, la fuerza es directamente proporcional al producto de las cargas. Si se duplica q_1 y se cuadruplica q_2 , el producto de las cargas se aumenta por ocho, así que es la fuerza.

Circuitos

EJEMPLO 1

Tres resistencias están conectadas juntas. ¿Cómo deben ser combinadas para reducir al mínimo la resistencia de la combinación? a) Deben ser conectadas en serie. b) Las dos resistencias más grandes se deben poner en paralelo, y la resistencia restante en serie con las dos primeras. c) Las tres resistencias se deben colocar en paralelo.

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

La resistencia es proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de sección transversal de una resistencia. Poner las tres resistencias en paralelo reduce al mínimo con eficacia la resistencia total de las resistencias combinadas y maximiza el área de sección transversal efectiva, así que **c)** es la respuesta correcta.

SOLUCIÓN CUANTITATIVA

Sea R_1 y R_2 , las dos resistencias más grandes. Calcule la resistencia R_S de las tres resistencias en serie:

$$(1) \quad R_S = R_1 + R_2 + R_3$$

Calcule la resistencia $R_{\text{combinada}}$ de un par paralelo en serie con una tercer resistencia:

$$R_{\text{combinada}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3$$

Divida el numerador y el denominador del término de la resistencia en paralelo entre R_1 :

$$(2) \quad R_{\text{combinada}} = \frac{R_2}{1 + \frac{R_2}{R_1}} + R_3$$

Calcule la resistencia R_P de las tres resistencias en paralelo:

$$R_P = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$$

Divida el numerador y el denominador por $R_1 R_2$:

$$(3) \quad R_P = \frac{R_3}{1 + \frac{R_3}{R_1} + \frac{R_3}{R_2}}$$

Note en la ecuación (2) que $R_{\text{combinada}}$ es menor que $R_2 + R_3$ porque el denominador del primer término es mayor que 1, que alternativamente significa que es menor que $R_S = R_1 + R_2 + R_3$. Finalmente, note en la ecuación (3) que R_P , es menor que R_3 , otra vez debido a un denominador más grande que 1, y así R_P es menor que $R_{\text{combinada}}$. La combinación puramente paralela por lo tanto rinde la menor resistencia, y la respuesta es **c)**.

EJEMPLO 2

Dos resistores disiparan tanta energía como sea posible cuando una diferencia de potencial fija se pone a través de ellos. ¿Deben ser instalados en paralelo o en serie?

SOLUCIÓN CONCEPTUAL

la energía disipada por un resistor es proporcional a la diferencia de potencial ajustada e inverso proporcional a la resistencia. La resistencia posible más pequeña por lo tanto dará lugar a la salida de la energía más grande. Por lo tanto, los dos resistores se deben colocar en el paralelo, que da lugar a la resistencia combinada más baja.

■ EJEMPLO 3

Cierta resistencia R tiene resistividad ρ . Suponga que es comercialmente deseable diseñar una nueva resistencia que tenga una tercera parte de la longitud y un cuarto del área de sección transversal de la resistencia existente, pero la misma resistencia total. ¿Cuál debería ser la resistividad ρ_n de la nueva resistencia, en términos de la resistividad ρ del dispositivo original?

SOLUCIÓN

Escriba una expresión para la resistencia R_n de la nueva resistencia en términos de su resistividad, área de sección transversal A , y su longitud L :

$$(1) \quad R_n = \frac{\rho_n L_n}{A_n}$$

Divida la ecuación (1) por la misma expresión para la resistencia original:

$$(2) \quad \frac{R_n}{R} = \frac{\frac{\rho_n L_n}{A_n}}{\frac{\rho L}{A}} = \frac{\rho_n L_n A}{\rho L A_n}$$

Sustituya $A_n = A/4$, $R_n = R$ y $L_n = L/3$ en la ecuación (2):

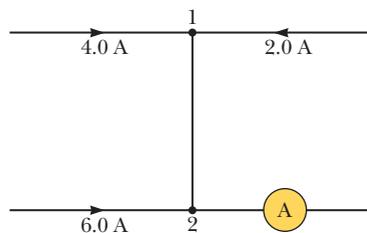
$$(3) \quad 1 = \frac{\rho_n (L/3) A}{\rho L (A/4)} = \frac{4\rho_n}{3\rho}$$

Resuelva la ecuación (3) para la nueva resistividad, ρ_n :

$$\rho_n = \frac{3}{4} \rho$$

Problemas de opción múltiple

- Tres resistencias de 1.0Ω , 2.0Ω y 3.0Ω , respectivamente, están en serie. Si se aplica una diferencia potencial de 12 V a través de la combinación, ¿cuál es la corriente resultante en el circuito? a) 0.50 A b) 2.0 A c) 6.0 A d) 12 A
- Si la longitud de un alambre conductor con resistencia R se duplica, ¿cuál será la resistencia del alambre más largo? a) $R/4$ b) $R/2$ c) $2R$ d) $4R$
- ¿Si una resistencia de 2.0Ω y una resistencia de 6.0Ω están conectadas en paralelo, cuál es su resistencia combinada? a) 1.5Ω b) 4.0Ω c) 8.0Ω d) 12Ω
- Si todos los componentes de un circuito eléctrico están conectados en serie, ¿cuál de las siguientes cantidades físicas debe ser la misma en todos los puntos del circuito? a) el voltaje b) la corriente c) la resistencia d) la potencia
- La corriente en un conductor es de 3.0 A cuando está conectado a través de una batería de 6.0 V . ¿Cuánta potencia se entrega al conductor? a) 0.50 W b) 2.0 W c) 9.0 W d) 18 W
- Una resistencia de 12Ω está conectada a través de una fuente de 6.0 V . ¿Cuánta potencia se entrega a la resistencia en media hora? a) $1.5 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ b) $2.0 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ c) $3.0 \times 10^{-3} \text{ kWh}$ d) $12 \times 10^{-3} \text{ kWh}$
- Una batería con un fem de 6.20 V lleva una corriente de 20.0 A . Si la resistencia interna de la batería es 0.01Ω , ¿cuál es el voltaje terminal? a) 1.24 V b) 6.00 V c) 6.40 V d) 31.0 V
- Los dispositivos A y B están conectados en paralelo con una batería. Si la resistencia R_A del dispositivo A es cuatro veces más grande que el R_B de la resistencia del dispositivo B, ¿cuál es la corriente real de I_A y I_B en los dispositivos A y B? a) $I_A = 2I_B$ b) $I_A = I_B/2$ c) $I_A = 4I_B$ d) $I_A = I_B/4$
- Un alambre tiene resistencia R . ¿Cuál es la resistencia de un alambre de la misma sustancia que tiene la misma longitud pero dos veces el área de sección transversal? a) $2R$ b) $R/2$ c) $4R$ d) $R/4$
- ¿Cuál debe ser la lectura en el amperímetro A para la sección de circuito mostrada?



- a) 0 A b) 6.0 A c) 8.0 A d) 12 A

11. ¿Cuál es la corriente en un alambre si 5.00 C de carga pasa a través del alambre en 0.500 s? a) 1.00 A b) 2.50 A c) 5.00 A d) 10.0 A

RESPUESTAS

1. **b).** Las tres resistencias están conectadas en serie, así que $R_{\text{total}} = \Sigma R = 6.0 \Omega$. De la ley de Ohm, $V_{\text{total}}/R_{\text{total}} = I_{\text{total}} = 12 \text{ V}/6.0 \Omega = 2.0 \text{ A}$.
2. **c).** La resistencia es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al área de sección transversal del conductor. Si el área permanece constante, duplicando la longitud se duplica la resistencia.
3. **a).** Las resistencias están en paralelo:

$$R_{\text{eq}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 12 \Omega^2 / 8.0 \Omega = 1.5 \Omega$$

De hecho, la resistencia equivalente de resistencias en paralelo es siempre menor que la resistencia más pequeña de la combinación, que significa que las respuestas b), c) y d) se habrían podido eliminar inmediatamente.

4. **b).** Un circuito en serie tiene solamente una trayectoria para la corriente, así que debe ser la misma en todos los puntos en el circuito.
5. **d).** $P = I \Delta V = 18 \text{ W}$.
6. **a).** La energía usada por una carga es el producto de la potencia que utiliza por unidad de tiempo y el lapso de tiempo de operación:

$$\begin{aligned} E = W = P \Delta t &= (\Delta V)^2 \Delta t / R = (6.0 \text{ V})^2 (0.50 \text{ h}) / 12 \Omega \\ &= 1.5 \text{ Wh} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kWh} \end{aligned}$$

Observe la conversión de watts-hora a kilowatts-hora.

7. **b).** El producto Ir es la caída de potencial que ocurre dentro de la batería: $Ir = (20.0 \text{ A})(0.01 \Omega) = 0.20 \text{ V}$. Puesto que la batería está produciendo la corriente y no está siendo recargada, el voltaje terminal será menor que la fem por la caída potencial interna, lo que elimina las opciones c) y d) inmediatamente. Así pues, $\Delta V = \mathcal{E} - Ir = 6.20 \text{ V} - 0.20 \text{ V} = 6.00 \text{ V}$.
8. **d).** Se tiene más corriente en el circuito con menor resistencia. Utilice la ley de bucles de Kirchhoff alrededor del bucle que consiste en las dos resistencias paralelas y $R_A = 4R_B$:

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta V_i = 0 &\rightarrow I_A R_A - I_B R_B = 0 \rightarrow \\ \frac{I_A}{I_B} &= \frac{R_B}{R_A} = \frac{R_B}{4R_B} = \frac{1}{4} \end{aligned}$$

por lo tanto, una cuarta parte de la corriente pasa a través del resistor A.

9. **b).** La resistencia es inversamente proporcional al área; duplicar el área reduce la resistencia a la mitad.
10. **d).** La regla de Kirchhoff dice que la corriente que entra en cualquier nodo debe ser igual a la corriente que sale de ese nodo. La corriente que entra en el cruce 1 es 6.0 A, la que subsecuentemente se incorpora al cruce 2, así que la corriente total que entra al cruce 2 es 12 A, y la que sale después del cruce 2 y que entra en el amperímetro es 12 A.
11. **d).** Por definición, la corriente es la cantidad de carga que pasa por un punto en el circuito está dado por: $I = Q/\Delta t = 5.00 \text{ C}/0.500 \text{ s} = 10.0 \text{ A}$.

Átomos

■ EJEMPLO 1

El tritio es un isótopo del hidrógeno con una vida media de $t_{1/2} = 12.33$ años. ¿Cuánto tiempo le llevaría a $1.60 \times 10^2 \text{ g}$ de tritio para decaer a 20.0 g? a) 6.17 años b) 26.7 años c) 37.0 años d) 74.0 años

(continúa)

SOLUCIÓN

Calcule el número n de vidas medias requerido. La ecuación puede resolverse por inspección (puede necesitar logaritmos):

$$\left(\frac{1}{2}\right)^n = \frac{20.0 \text{ g}}{1.60 \times 10^2 \text{ g}} = \frac{1}{8.00} \rightarrow n = 3$$

Multiplique el número de vidas medias por la longitud de vida media para encontrar el intervalo necesario de tiempo en cuestión, verificando que la respuesta es c):

$$\Delta t = nt_{1/2} = 3(12.33 \text{ años}) = 37.0 \text{ años}$$

EJERCICIO 2

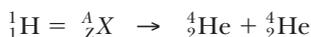
¿Cuál es el número de masa de un átomo de carbón que tiene 6 protones y 8 neutrones? a) 6 b) 8 c) 14

SOLUCIÓN

No confunda el número de masa con el número atómico, Z , que es el número de protones en el núcleo. El número de masa A es el número de nucleones en el núcleo. Para calcular el número de masa, sólo sume el número de protones y de neutrones: $6 + 8 = 14$, que es la respuesta c).

EJEMPLO 3

¿Cuál de las siguientes partículas están dadas por A_ZX en la reacción siguiente? a) ${}^7_3\text{Li}$ b) ${}^7_4\text{Be}$ c) ${}^{14}_7\text{N}$ d) ${}^{10}_6\text{C}$

**SOLUCIÓN**

Igualé la suma del número de masa a ambos lados de la reacción:

$$1 + A = 4 + 4 = 8 \rightarrow A = 7$$

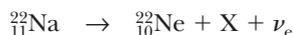
Por conservación de la carga, el número de protones debe, también, ser el mismo para ambos lados:

$$1 + Z = 2 + 2 = 4 \rightarrow Z = 3$$

Basado en estos dos resultados, la respuesta correcta es a), ${}^7_3\text{Li}$.

Problemas de opción múltiple

1. En la reacción nuclear de abajo, ¿qué partícula representa X?



- a) una partícula α b) una partícula β c) un positrón d) un fotón γ
2. ¿Cuál es el número atómico del nucleído hijo en la reacción siguiente?



- a) 14 b) 16 c) 30 d) 31
3. Si ${}^{13}_7\text{N}$ tiene una vida media de cerca de 10.0 minutos, ¿cuánto tiempo tomará para 20 g del isótopo decaer a 2.5 g? a) 5 minutos b) 10 minutos c) 20 minutos d) 30 minutos
4. Cierta radionúclido decae emitiendo una partícula α . ¿Cuál es la diferencia entre los números atómicos del padre y los nucleídos del hijo? a) 1 b) 2 c) 4 d) 6
5. ¿Cuál es la diferencia en número de masa entre el padre y los nucleídos del hijo después de proceso de decaimiento? a) -1 b) 0 c) 1 d) 2
6. Un átomo del nitrógeno tiene 7 protones y 6 neutrones. ¿Cuál es su número de masa? a) 1 b) 6 c) 7 d) 13
7. ¿Cuál del siguiente es un isótopo de ${}^{182}_{63}\text{X}$? a) ${}^{182}_{64}\text{X}$ b) ${}^{182}_{64}\text{X}$ c) ${}^{180}_{63}\text{X}$ d) ${}^{180}_{62}\text{X}$

8. En la siguiente ecuación nuclear, ¿cuál es X?



a) un protón b) un positrón c) partícula β d) una partícula α

9. ¿Cuál es el número de neutrones en ${}^{140}_{54}\text{X}$? a) 54 b) 86 c) 140 d) 194

10. El radon-222 tiene una vida media de cerca de 4 días. Si una muestra de gas ${}^{222}\text{Rn}$ en un envase se duplica inicialmente, la vida media será a) dividida en dos. b) duplicada. c) cuadruplicada. d) sin cambios.

11. Un radionúclido decae totalmente. En el frasco de la reacción, el único gas que se encuentra que es helio, que no estaba presente cuando el frasco fue sellado. El proceso del decaimiento fue probablemente a) un decaimiento β . b) Un decaimiento α . c) un decaimiento γ . d) una emisión de positrón.

12. ¿Cuál es el periodo de un radionúclido si 1/16 de su masa inicial está presente después de 2 h? a) 15 minutos b) 30 minutos c) 45 minutos d) 60 minutos

13. La vida media de ${}^{22}_{11}\text{Na}$ es 2.6 años. Si X gramos de este isótopo de sodio está inicialmente presente, ¿cuánto queda después de 13 años? a) $X/32$ b) $X/13$ c) $X/8$ d) $X/5$

RESPUESTAS

1. c). Note que el número de masa no tiene cambios, mientras que el número atómico ha sido reducido por 1, lo que implica que un protón ha cambiado a un neutrón. La partícula que emite debe tener una carga igual a un protón pero un número de masa atómica cero. El positrón es la única opción que tiene ambos atributos.

2. a). El número atómico es Z. La conservación de la carga significa que $15 = Z + 1$. Allí delante, $Z = 14$.

3. d). Primero, encuentre el número de vidas medias y después multiplique por el valor de la vida media para obtener el tiempo transcurrido:

$$\frac{2.5 \text{ g}}{20 \text{ g}} = \frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \rightarrow n = 3$$

$$\Delta t = nt_{1/2} = 3(10 \text{ min}) = 30 \text{ min}$$

4. b). Una partícula α es un núcleo de helio. En un decaimiento α , dos protones son efectivamente removidos.

5. b). Un decaimiento β emite un electrón de alta energía, ${}^0_{-1}\text{e}$. En el proceso, un neutrón decae en un protón más el electrón emitido y un antineutrino. El número de nucleones permanece sin cambios, con el protón sustituyendo el neutrón en la suma de nucleones.

6. d). El número de masa es la suma de neutrones y de protones: $6 + 7 = 13$ nucleones.

7. c). Los isótopos de un elemento tienen el mismo número atómico pero diferente número de neutrones, así que sus números de masa son diferentes. El número atómico de X es 63.

8. a). Los números de masa deben ser los mismos en ambos lados de la reacción. Si A es el número de masa de X, entonces $14 + 4 = 17 + A$, así que $A = 1$. En cuanto a número atómico, $7 + 2 = 8 + Z$. Por lo tanto, $Z = 1$, que describe un protón, ${}^1_1\text{H}$.

9. b). El número de neutrones es el número de masa menos el número atómico: $A - Z = 140 - 54 = 86$.

10. d). La vida media es una constante que depende de la identidad del nucleído, no en la cantidad presente del nucleído.

11. b). La partícula α es un núcleo del helio. Cada partícula α entonces adquiere dos electrones para formar un átomo neutral de helio.

12. b). En cada vida media, la masa disminuye a la mitad de su valor anterior: $1/16 = 1/2^4$. Le toma cuatro vidas medias para decaer abajo de 1/16 de la masa original. Cada una deben estar en 30 minutos porque el proceso entero toma dos horas.

13. a). En 13 años, habrá 5 vidas medias de 2.6 años cada una ($5 \times 2.6 = 13$). El isótopo disminuye a $1/2^5$ a $1/32$ de su cantidad original.

■ Respuestas a los exámenes rápidos, preguntas de ejemplo, preguntas impares, preguntas de opción múltiple, preguntas conceptuales y problemas

CAPÍTULO 1

Preguntas de ejemplo

1. Falso
2. Verdadero
3. $2.6 \times 10^2 \text{ m}^2$
4. $28.0 \text{ m/s} = \left(28.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{2.24 \text{ mi/h}}{1.00 \text{ m/s}}\right) = 62.7 \text{ mi/h}$

La respuesta es apenas diferente porque los diversos factores de conversión fueron redondeados, conduciendo a diferencias pequeñas, imprevisibles en las respuestas finales.

5. $\left(\frac{60.0 \text{ min}}{1.00 \text{ h}}\right)^2$
6. Una respuesta de 10^{12} células está dentro de un orden de magnitud de la respuesta dada, correspondiendo a opciones apenas diferentes en las estimaciones del volumen. Por lo tanto, 10^{12} células son también una estimación razonable. ¡Una estimación de 10^9 células sería sospechosa porque (trabajando al revés) implicaría que las células podrían ver a simple vista!
7. $\sim 4 \times 10^{11}$
8. $\sim 10^{12}$
9. Trabajando al revés, $r = 4.998$, redondeado a 5.00, mientras que $\theta = 37.03^\circ$, redondeado a 37.0° . Las leves diferencias son causadas por el redondeo.
10. Sí. La función coseno, dividida con la distancia al edificio, da la longitud de la hipotenusa del triángulo.
11. 540 km

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. a)
5. c)
7. a) sí b) no c) sí d) no e) sí
9. d)
11. a)

Preguntas conceptuales

1. a) $\sim 0.1 \text{ m}$ b) $\sim 1 \text{ m}$ c) Entre 10 m y 100 m d) $\sim 10 \text{ m}$ e) $\sim 100 \text{ m}$
3. $\sim 10^9 \text{ s}$
5. a) $\sim 10^6$ pulsaciones b) $\sim 10^9$ pulsaciones
7. La longitud de una mano varía de persona a persona, así que no es un estándar útil de longitud.
9. a) Una ecuación dimensionalmente correcta no es necesariamente verdad. Por ejemplo, en la ecuación 2 perros = 5 perros es dimensionalmente correcta, pero no es verdadera. b) Sin embargo, si una ecuación no es dimensionalmente correcta, no puede estar bien.
11. Una estimación, aunque imprecisa por un orden de magnitud, reduce en gran medida la gama de respuestas plausibles a una pregunta dada. La estimación da la guía en cuanto a qué medidas correctivas pudieran ser factibles. Por ejemplo, si usted estima que 40 000 personas en un país morirán a menos que tengan ayuda alimentaria y si este número es confiable dentro de un orden de magnitud, usted sabe que a lo más 400 000 personas necesitarán provisiones.

A.52

Problemas

3. b) $A_{\text{cilindro}} = \pi R^2$, $A_{\text{placa rectangular}} = \text{longitud} \times \text{ancho}$
5. $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
7. 52 m^2
9. a) tres cifras significativas, b) cuatro cifras significativas, c) tres cifras significativas d) dos cifras significativas
11. a) 35.7 cm^2 b) 99.2 cm^3 c) 17.7 cm^2 , 99.5 cm^3 d) en el proceso de redondeo, se agregan cantidades pequeñas a o se restan de una respuesta para satisfacer las reglas de cifras significativas. Para un redondeo dado, se hacen diversos ajustes pequeños, introduciendo cierta cantidad de aleatoriedad en el dígito significativo de la respuesta final.
13. $5.9 \times 10^3 \text{ cm}^3$
15. $2 \times 10^8 \text{ fatoms}$
17. 0.204 m^3
19. Sí. La velocidad de 38.0 m/s se convierte a 85 mi/h , por lo tanto, el conductor excede el límite de velocidad en 10 mi/h .
21. a) 6.81 cm b) $5.83 \times 10^2 \text{ cm}^2$ c) $1.32 \times 10^3 \text{ cm}^3$
23. $6.71 \times 10^8 \text{ mi/h}$
25. $3.08 \times 10^4 \text{ m}^3$
27. 9.82 cm
29. $\sim 10^8$ suspiros
31. a) $\sim 10^{14}$. Son posibles otras respuestas. Esta respuesta supone una longitud intestinal de cerca de 7 m y del diámetro promedio de cerca de 4 cm. ¡Hay probablemente más bacterias en su tracto intestinal que células en su cuerpo! b) El número grande significa que probablemente no son peligrosos. Las bacterias intestinales ayudan a digerir el alimento y a proporcionar los nutrientes importantes. Los seres humanos y las bacterias gozan de una relación simbiótica mutuamente beneficiosa.
33. $\sim 10^7 \text{ rev}$
35. (2.0 m, 1.4 m)
37. $r = 2.2 \text{ m}$, $\theta = 27^\circ$
39. 5.69 m
41. a) 6.71 m b) 0.894 c) 0.746
43. 3.41 m
45. a) 3.00 b) 3.00 c) 0.800 d) 0.800 e) 1.33
47. 5.00/7.00; el ángulo mismo es 35.5°
49. 70.0 m
51. a) MLT^{-2} b) $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$
53. a) $1.0 \times 10^3 \text{ kg}$ b) $m_{\text{célula}} = 5.2 \times 10^{-16} \text{ kg}$ c) $m_{\text{niñón}} = 0.27 \text{ kg}$ d) $m_{\text{mosca}} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ kg}$
55. El valor de k , una constante sin dimensiones, no se puede encontrar por análisis dimensional.
57. $152 \mu\text{m}$
59. $1 \times 10^{10} \text{ gal/años}$
61. a) $3.16 \times 10^7 \text{ s}$ b) entre 10^{10} y 10^{11} años
63. 1×10^5

CAPÍTULO 2

Exámenes rápidos

1. a) 200 años b) 0 c) 0 d) 8.00 años/s
2. a) Falso b) Verdadero c) Verdadero
3. La gráfica velocidad frente al tiempo a) tiene una pendiente constante, que indica una aceleración constante, la cual es representada con la gráfica de la aceleración contra el tiempo e).

La gráfica b) representa un objeto que aumenta de velocidad, pero como progresa con el tiempo, las rectas dibujadas tangentes a la curva tienen pendientes crecientes. Puesto que la aceleración es la misma en la pendiente de la recta tangente, la aceleración debe aumentar y la gráfica aceleración frente al tiempo que mejor indica conducta es la d).

La gráfica c) representa un objeto que primero tiene una velocidad que aumenta a razón constante, lo que significa que la aceleración del objeto es constante. Después la velocidad deja de cambiar, lo que significa que la aceleración del objeto es cero. Este comportamiento es el mejor representado por la gráfica f).

4. b)
5. a) gráfica azul b) gráfica roja c) gráfica verde
6. e)
7. c)
8. a) y f)

Preguntas de ejemplo

1. No. El objeto puede no viajar en una línea recta. Si las posiciones iniciales y finales están en el mismo lugar, por ejemplo, la dislocación es cero sin importar el total de la distancia viajada durante el tiempo dado.
2. No. Una recta vertical en una gráfica posición frente al tiempo significaría que un objeto había atravesado de alguna manera todos los puntos a lo largo de la trayectoria dada instantáneamente, que es físicamente imposible.
3. No. Una recta tangente vertical correspondería a una aceleración infinita, que es físicamente imposible.
4. 35.0 m/s
5. La solución gráfica es la intersección de una línea recta y de una parábola.
6. El desplazamiento se duplicaría a 143 m, con desplazamiento total de 715 m.
7. La aceleración es cero donde quiera que la tangente a la gráfica velocidad frente al tiempo sea horizontal. Visualmente, eso ocurre de -50 a 0 s y entonces otra vez en aproximadamente 180, 320 y 330 s.
8. El salto ascendente aumentaría levemente la velocidad inicial de la bola, aumentando levemente la altura máxima.
9. 6
10. El motor se debe encender otra vez en 235 m.

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. b)
5. b), c)
7. b)
9. d)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. Sí. Si la velocidad de la partícula es distinta de cero, la partícula está en movimiento. Si la aceleración es cero, la velocidad de la partícula no cambia o es constante.
3. Sí, si esto ocurre, la aceleración del automóvil es opuesta a la dirección del movimiento y el automóvil se desliza hacia abajo.
5. No. El automóvil B puede viajar a una velocidad más baja, pero tener una aceleración mayor en ese instante.
7. a) Sí. b) Sí.
9. a) El automóvil se está moviendo al este y está acelerando.
b) El automóvil se está moviendo al este pero se está deteniendo.
c) El automóvil se está moviendo al este con velocidad constante.
d) El automóvil se está moviendo al oeste pero se está deteniendo.
e) El automóvil se está moviendo al oeste y está acelerando.
f) El automóvil se está moviendo al oeste con velocidad constante.
g) El automóvil parte del reposo y comienza a acelerar hacia el este.
h) El automóvil parte del reposo y comienza a acelerar hacia el oeste.

Problemas

1. ≈ 0.02 s
3. a) 52.9 km/h b) 90.0 km
5. a) El bote A gana por 60 km b) 0
7. a) 180 km b) 63.4 km/h
9. Sí, tomando la velocidad inicial como cero, la velocidad final como 75 m/s y $a = 1.3$ m/s², encontramos que la distancia que viaja el avión antes de detenerse es $x = v_{\text{hacia}}^2/2a = 2.2$ km, la cual es menor que la longitud de la carrera.
11. a) 4.4 m/s² b) 27 m
13. a) 2.80 h b) 218 km
15. 274 km/h
17. a) 5.00 m/s b) -2.50 m/s c) 0 d) 5.00 m/s
19. 0.18 mi al oeste del asta de bandera
21. $|\bar{a}| = 1.34 \times 10^4$ m/s²
23. 3.7 s
25. a) 70.0 mi/h \cdot s = 31.3 m/s² = $3.19g$ b) 321 pies = 97.8 m
27. -16.0 cm/s²
29. a) 6.61 m/s b) -0.448 m/s²
31. a) 2.32 m/s² b) 14.4 s
33. a) 8.14 m/s² b) 1.23 s c) Sí. Para la aceleración uniforme, la velocidad es una función lineal del tiempo.
35. Habrá una colisión solamente si el automóvil y la furgoneta se encuentran en el mismo lugar en algún momento. Escribir las expresiones para la posición frente al tiempo para cada vehículo e igualar las dos ecuaciones cuadráticas en t cuya solución es 11.4 s o 13.6 s. La primera solución, 11.4 s, es el momento de la colisión. La colisión ocurre cuando la furgoneta está a 212 m de la posición original del automóvil de Sue.
37. 200 m
39. a) 1.5 m/s b) 32 m
41. 958 m
43. a) 8.2 s b) 1.3×10^2 m
45. a) 31.9 m b) 2.55 s c) 2.55 s d) -25.0 m/s
47. a) -12.7 m/s b) 38.2 m
49. Piso de madera: $a = 2.0 \times 10^3$ m/s², $\Delta t = 1.4$ ms; piso de alfombra: $a = 3.9 \times 10^2$ m/s², $\Delta t = 7.1$ ms
51. a) Es un objeto que cae libremente, así que su aceleración es -9.80 m/s² (hacia abajo) mientras está en vuelo.
b) 0 c) 9.80 m/s d) 4.90 m
53. a) Continúa hacia arriba, retardándose bajo influencia de la gravedad hasta que alcanza una altura máxima y entonces cae a la Tierra. b) 308 m c) 8.51 s d) 16.4 s
55. 15.0 s
57. a) -3.50×10^5 m/s² b) 2.86×10^{-4} s
59. a) 10.0 m/s hacia arriba b) 4.68 m/s hacia abajo
61. a) 4.0 m/s b) 1.0 ms c) 0.82 m
63. 0.60 s
65. a) 0.231 m b) 0.364 m c) 0.399 m d) 0.175 m
67. a) 1.21 s después de que la primera bola se suelta
b) 7.18 m debajo de la ventana
69. No. En el intervalo es igual al tiempo de reacción de David, el billete de \$1 (un objeto que cae libremente) cae una distancia de $gt^2/2 \approx 20$ cm, que está cerca de dos veces la distancia entre la parte superior del billete y su centro.
71. a) $t_1 = 5.0$ s, $t_2 = 85$ s b) 200 pies/s c) 18500 pies del punto de partida d) 10 s después de comenzar a detenerse (tiempo total del viaje = 100 s)
73. a) 5.5×10^3 pies b) 3.7×10^2 pies/s c) el avión viajaría solamente 0.002 pies en el tiempo que le toma a la luz del perno para alcanzar el ojo.
75. a) 7.82 m b) 0.782 s

CAPÍTULO 3

Exámenes rápidos

1. c)

2. Vector **Componente x** **Componente y**

\vec{A}	-	+
\vec{B}	+	-
$\vec{A} + \vec{B}$	-	-

3. Vector \vec{B}

4. b)
5. a)
6. c)
7. b)

Preguntas de ejemplo

1. Si los vectores apuntan en la misma dirección, la suma de las magnitudes de los dos vectores es igual a la magnitud del vector resultante.
2. Como B_x , B_y y B son todos conocidos, se puede utilizar cualquier función trigonométrica para encontrar el ángulo.
3. Los vectores de desplazamiento de los excursionistas son iguales.
4. Los vectores iniciales y finales de la velocidad son iguales en magnitud porque la componente x no cambia y la componente y cambia solamente por un signo.
5. Para el piloto, el paquete parece caer en línea recta porque las componentes x de la velocidad del avión y del paquete son iguales.
6. Falso
7. 45°
8. Falso
9. Falso
10. Para un observador en la tierra, la bola cae en línea recta.
11. El ángulo disminuye con el aumento de velocidad.
12. El ángulo es diferente porque la velocidad relativa depende de la magnitud y de la dirección de los vectores de la velocidad. En el ejemplo 3.12, el vector de la velocidad del barco forma la hipotenusa de un triángulo rectángulo, mientras que en el ejemplo 3.11, el vector forma un cateto de un triángulo rectángulo.

Preguntas de opción múltiple

1. a)
3. c)
5. b), d)
7. a)
9. b)
11. b)
13. a), d)

Preguntas conceptuales

1. Las magnitudes se suman cuando \vec{A} y \vec{B} están en la misma dirección. El resultado será cero cuando los dos vectores son iguales en magnitud y contrarios en la dirección.
3. a) En tope del vuelo del proyectil, su velocidad es horizontal y su aceleración es hacia abajo. Éste es el único punto en el cual los vectores de la velocidad y de la aceleración son perpendiculares. b) Si el proyectil se lanza directo para arriba o abajo, entonces la velocidad y la aceleración serán paralelas a través del movimiento. Para cualquier otra clase de movimiento del proyectil, la velocidad y los vectores de la aceleración nunca son paralelos.
5. a) La aceleración es cero, puesto que la magnitud y la dirección de la velocidad siguen siendo constantes. b) La partícula tiene una aceleración porque la dirección de \vec{v} cambia.
7. La nave espacial seguirá una trayectoria parabólica equivalente a la de un proyectil lanzado desde un acantilado con una velocidad horizontal. En lo que concierne al proyectil, la gravedad proporciona una aceleración que es siempre perpendicular a la velocidad inicial, dando por resultado una trayectoria parabólica. En lo que concierne a la nave espacial, la velocidad inicial desempeña el papel de la velocidad horizontal del proyectil, y el gas que se escapa desempeña el papel de la gravedad

en el caso del proyectil. Si la orientación de la nave espacial fuera a cambiar en respuesta al escape del gas (que es en gran medida el resultado más probable), entonces la aceleración cambiaría la dirección y el movimiento podría llegar a ser muy complicado.

9. Para los ángulos $\theta < 45^\circ$, el proyectil lanzado a un ángulo θ estará en el aire en un intervalo más corto. Para el ángulo más pequeño, la componente vertical de la velocidad inicial es más pequeña que para el ángulo más grande. Así, el proyectil lanzado al ángulo más pequeño no irá tan alto en el aire y pasará menos tiempo en el vuelo antes de aterrizar.
11. a) Sí, el proyectil está en caída libre. b) La componente vertical de la aceleración es la aceleración descendente de la gravedad. c) La componente horizontal de la aceleración es cero.

Problemas

1. 43 unidades en la dirección negativa de y .
3. a) Aproximadamente 5.0 unidades a -53° b) Aproximadamente 5.0 unidades a $+53^\circ$
5. Aproximadamente 421 pies a 3° bajo la horizontal
7. Aproximadamente 310 km a 57° suroeste
9. Aproximadamente 15 m a 58° sureste
11. 28.7 unidades, -20.1 unidades
13. a) 5.00 cuerdas a 53.1° noreste b) 13.0 cuerdas
15. 47.2 unidades a 122° del eje x positivo
17. 157 km
19. 245 km a 21.4° noroeste
21. 4.64 m a 78.6° noreste
23. a) $(x, y) = (0, 50.0 \text{ m})$ b) $v_{0x} = 18.0 \text{ m/s}$, $v_{0y} = 0$
c) $v_x = 18.0 \text{ m/s}$, $v_y = -(9.80 \text{ m/s}^2)t$
d) $x = (18.0 \text{ m/s})t$, $y = -(4.90 \text{ m/s}^2)t^2 + 50.0 \text{ m}$
e) 3.19 s f) 36.1 m/s, -60.1°
25. 12 m/s
27. a) La bola viaja 0.89 m b) mientras desciende
29. 25 m
31. a) 32.5 m de la base del acantilado b) 1.78 s
33. a) 52.0 m/s horizontalmente b) 212 m
35. a) $(\vec{v}_{JA})_x = 3.00 \times 10^2 \text{ mi/h}$, $(\vec{v}_{JA})_y = 0$,
b) $(\vec{v}_{AE})_x = 86.6 \text{ mi/h}$, $(\vec{v}_{AE})_y = 50.0 \text{ mi/h}$
c) $\vec{v}_{JA} = \vec{v}_{JE} - \vec{v}_{AE}$
d) $\vec{v}_{JE} = 3.90 \times 10^2 \text{ mi/h}$, 7.36° noreste
37. a) 9.80 m/s^2 abajo y 2.50 m/s^2 al sur b) 9.80 m/s^2 abajo
c) Se mueve describiendo una parábola con eje vertical
39. a) 1.26 h b) 1.13 h c) 1.19 h
41. a) $2.02 \times 10^3 \text{ s}$ b) $1.67 \times 10^3 \text{ s}$ c) El tiempo ahorrado por los que van río abajo con la corriente es siempre menor que el tiempo adicional requerido para ir a la misma distancia contra la corriente.
43. a) 6.80 km b) 3.00 km verticalmente sobre el punto del impacto c) 66.2°
45. 18.0 s
47. a) 40.5 m/s b) más que caer como una roca, el esquiador se desliza a través del aire como un pájaro, prolongando el salto.
49. 68.6 km/h
51. a) $1.53 \times 10^3 \text{ m}$ b) 36.2 s c) $4.04 \times 10^3 \text{ m}$
53. a) $R_{Luna} = 18 \text{ m}$ b) $R_{Marte} = 7.9 \text{ m}$
55. a) 42 m/s b) 3.8 s c) $v_x = 34 \text{ m/s}$, $v_y = -13 \text{ m/s}$;
 $v = 37 \text{ m/s}$
57. a) en la dirección en que la bola fue lanzada b) 7.5 m/s
61. $R/2$
63. 7.5 min
65. 10.8 m
67. b) $y = Ax^2$ con $A = \frac{g}{2v_i^2}$ donde v_i es la velocidad inicial
c) 14.5 m/s
69. a) 35.1° o 54.9° b) 42.2 u 85.4 m, respectivamente
71. a) 20.0° por encima de la horizontal b) 3.05 s
73. a) 23 m/s b) 360 m horizontalmente de la base del acantilado.

CAPÍTULO 4

Exámenes rápidos

1. a), c) y d) son verdaderos.
2. b)
3. a) Falso
b) Verdadero
c) Falso
d) Falso
4. c); d)
5. c)
6. c)
7. b)
8. b)
9. b) Ejerciendo un componente ascendente de la fuerza en el trineo, se disminuye la fuerza normal en la tierra y reduciendo así, la fuerza de fricción cinética.

Preguntas de ejemplo

1. Con excepción de las fuerzas mencionadas en el problema, la fuerza de la gravedad tira hacia abajo sobre el barco. Como el barco no se hunde, el agua ejerce una fuerza sobre el barco que debe oponerse a la fuerza de la gravedad. (En el capítulo 9 esta fuerza será identificada como la fuerza de empuje.)
2. Falso. El ángulo en el que se aplican las fuerzas también es importante en la determinación de la dirección del vector de la aceleración.
3. 0.2 N
4. $3g$
5. La fuerza gravitacional de la Tierra actúa sobre el hombre, y una fuerza igual y opuesta a la fuerza gravitacional del hombre actúa sobre la Tierra. La fuerza normal que actúa sobre el hombre y la fuerza de reacción consiste en una presión sobre la superficie.
6. La tensión debería duplicarse
7. La magnitud de la fuerza de tensión sería mayor y la magnitud de la fuerza normal sería menor.
8. Duplicar el peso duplica la masa, que parte en dos la aceleración y el desplazamiento.
9. Una pendiente más suave significa un ángulo más pequeño y por lo tanto una aceleración más pequeña al bajar la pendiente. Por lo tanto, el automóvil tardaría en alcanzar el fondo de la colina.
10. La lectura en la báscula es mayor que el peso del pescado durante la primera fase de la aceleración. Cuando la velocidad llega a ser constante, la lectura en la báscula es igual al peso. Cuando el elevador se retrasa, la lectura en la báscula es menor que el peso.
11. Atar un extremo del cable al objeto que se ha de levantar y el otro extremo a una plataforma. Ponga pesos más ligeros sobre la plataforma hasta que la masa total de los pesos y plataforma exceda la masa del objeto pesado.
12. Un coeficiente de fricción estática más grande aumentaría el ángulo máximo.
13. El coeficiente de fricción cinética sería más grande que en el ejemplo.
14. La aceleración y la tensión aumentan cuando se aumenta m_2 .
15. El bloque en la parte superior deslizaría hacia el extremo trasero del bloque de abajo.

Preguntas de opción múltiple

1. a)
3. b)
5. d)
7. b)
9. a)
11. b)
13. c)
15. b)

Preguntas conceptuales

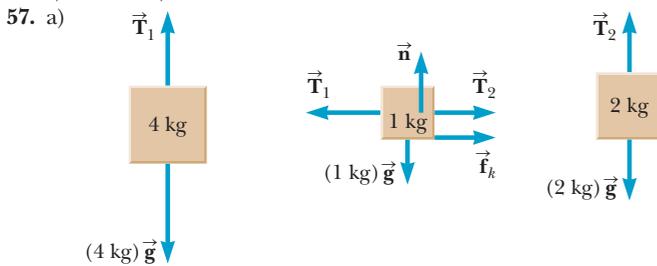
1. La inercia de la maleta mantendría el movimiento adelante como las paradas de autobús. No habría tendencia para que la maleta sea lanzada al revés hacia el pasajero. El caso debe ser marginado.
3. a) $w = mg$ y g disminuyen con la altura. Así, para hacer una buena compra, cómprelo en Denver. b) Si el oro se vendiera por masa, no importaría dónde lo comprara.
5. a) Dos fuerzas externas actúan sobre la bola. i) Una es una fuerza gravitacional hacia abajo ejercida por la Tierra. ii) La segunda fuerza sobre la bola es una, la normal ascendente ejercida por la mano. Las reacciones a estas fuerzas son i) una fuerza gravitacional ascendente ejercida por la bola sobre la Tierra y ii) una fuerza hacia abajo ejercida por la bola en la mano. Después de que la bola salga de la mano, la única fuerza externa que actúa sobre la bola es la fuerza gravitacional ejercida por la Tierra. La reacción es una fuerza gravitacional ascendente ejercida por la bola sobre la Tierra.
7. La fuerza que hace a un automóvil moverse es la fricción entre los neumáticos y el camino pues el automóvil procura empujar el camino al revés. La fuerza que hace que un avión se impulse adelante es la fuerza de la reacción ejercida por el aire en el propulsor, cuando éste gira empuja el aire al revés (la acción). En un bote de remos, el remo empuja el agua al revés con los remos (la acción). El agua empuja adelante en los remos y por lo tanto al barco (la reacción).
9. Cuando el autobús comienza a moverse, la masa de Claudette es acelerada por la fuerza ejercida por la parte posterior del asiento sobre su cuerpo. Clark está de pie, sin embargo, la única fuerza que actúa sobre él es la fricción entre sus zapatos y el piso del autobús. Así, cuando el autobús comienza a moverse, sus pies aceleran hacia adelante, pero el resto de su cuerpo casi no experimenta ninguna fuerza de aceleración (solamente la debida a la aceleración de sus pies). Por consiguiente, su cuerpo tiende a permanecer casi en reposo, según la primera ley del Newton, en relación con la Tierra. Concerniente a Claudette, sin embargo, él se está moviendo hacia ella y cae en su regazo. Ambos actores ganaron premios de la academia.
11. a) Cuando el hombre toma el paso, la acción es la fuerza que su pie ejerce sobre la Tierra; la reacción es la fuerza ejercida por la Tierra sobre su pie. b) Aquí, la acción es la fuerza ejercida por la bola de nieve sobre la espalda de la muchacha; la reacción es la fuerza ejercida por la espalda de la muchacha sobre la bola de nieve. c) Esta acción es la fuerza ejercida por el guante sobre la bola; la reacción es la fuerza ejercida por la bola sobre el guante. d) Esta acción es la fuerza ejercida por las moléculas del aire sobre la ventana; la reacción es la fuerza ejercida por la ventana sobre las moléculas del aire. En cada caso, podríamos intercambiar igualmente los términos "acción" y "reacción."
13. La tensión en la cuerda es la fuerza máxima que ocurre en *ambas* direcciones. En este caso, entonces, puesto que ambas están tirando con una fuerza de magnitud 200 N, la tensión es 200 N. Si la cuerda no se mueve, entonces la fuerza en cada atleta debe ser igual a cero. Por lo tanto, cada atleta ejerce 200 N contra la Tierra.

Problemas

1. 2×10^4 N
3. a) 12 N b) 3.0 m/s^2
5. 3.71 N, 58.7 N, 2.27 kg
7. 1.2 m/s^2 arriba
9. a) 13.5 m/s^2 b) 1.42×10^3 N
11. a) 0.200 m/s^2 b) 10.0 m c) 2.00 m/s
13. 4.85 kN al este
15. 1.1×10^4 N
17. a) 600 N en el cable vertical, 997 N en el cable inclinado, 796 N en el cable horizontal b) Si el punto de acoplamiento fuera

movido más arriba en la pared, el cable izquierdo tendría una componente y que ayudaría a apoyar al gato ladrón, reduciendo así la tensión en el cable a la derecha.

19. 150 N en el cable vertical, 75 N en el cable del lado derecho, 130 N en el lado izquierdo del cable
21. a) $T_1 = 79.8 \text{ N}$, $T_2 = 39.9 \text{ N}$ b) 2.34 m/s^2
23. 613 N
25. 64 N
27. a) $T_1 = 3 mg \sin \theta$ b) $T_2 = 2 mg \sin \theta$
29. a) 7.0 m/s^2 horizontales y a la derecha b) 21 N c) 14 N horizontal y a la derecha
31. a) 78.4 N b) 105 N
33. a) 4.90 kN b) 607 N
35. a) $T > w$ b) $T = w$ c) $T < w$ d) $1.85 \times 10^4 \text{ N}$; sí e) $1.47 \times 10^4 \text{ N}$; sí f) $1.25 \times 10^4 \text{ N}$; sí
37. a) $2.15 \times 10^3 \text{ N}$ hacia adelante b) 645 N hacia adelante c) 645 N hacia atrás d) $1.02 \times 10^4 \text{ N}$ a 74.1° por debajo de la horizontal y hacia atrás
39. $\mu_s = 0.38$, $\mu_k = 0.31$
41. a) 0.256 b) 0.509 m/s^2
43. a) 14.7 m b) ninguna masa es necesaria
45. $\mu_k = 0.287$
47. 32.1 N
49. a) 33 m/s b). No. El objeto subirá a 33 m/s desde cualquier velocidad más baja y retrasará a 33 m/s desde cualquier velocidad más alta.
51. a) 1.78 m/s^2 b) 0.368 c) 9.37 N d) 2.67 m/s
53. a) 1.11 s b) 0.875 s
55. a) 0.404 b) 45.8 lb



b) 2.31 m/s^2 , abajo para el objeto de 4.00 kg, a la izquierda para el objeto de 1.00 kg, encima para del objeto de 2.00 kg

c) 30.0 N en la cuerda izquierda, 24.2 N en la cuerda derecha

d) sin fricción, el bloque de 4 kg cae más libremente, así que la tensión T, en la cuerda unida a ella se reduce. El bloque de 2 kg se acelera hacia arriba a una razón más alta, por lo tanto la fuerza de tensión T_2 que actúa sobre él debe ser mayor.

59. a) 84.9 N hacia arriba b) 84.9 N hacia abajo
61. 50 m
63. a) fricción entre la caja y el camión b) 2.94 m/s^2
65. a) 2.22 m b) 8.74 m/s abajo de la pendiente
67. a) 0.23 m/s^2 b) 9.7 N
69. a) 1.7 m/s^2 , 17 N b) 0.69 m/s^2 , 17 N
71. a) 3.43 kN b) 0.967 m/s horizontalmente hacia delante c) ambos aumentarían
73. a) 30.7° b) 0.843 N
75. $5.5 \times 10^2 \text{ N}$
77. 72.0 N
79. a) $7.1 \times 10^2 \text{ N}$ b) $8.1 \times 10^2 \text{ N}$ c) $7.1 \times 10^2 \text{ N}$ d) $6.5 \times 10^2 \text{ N}$
81. a) 0.408 m/s^2 ascendente b) 83.3 N
83. b) Si θ es mayor que $\tan^{-1}(1/\mu_s)$, el movimiento es imposible.
85. $(M + m_1 + m_2)(m_1 g/m_2)$

2. c)
3. c)

Preguntas de ejemplo

- Como se produce el mismo desplazamiento con la misma fuerza, al duplicar la carga no cambiará la cantidad de trabajo hecha por la fuerza aplicada
- Duplicando el desplazamiento se duplica la cantidad de trabajo hecho en cada caso.
- El camino mojado reduciría el coeficiente de fricción cinética, así que la velocidad final sería mayor.
- c)
- En cada caso la velocidad tendría un componente horizontal adicional, significando que la velocidad total sería mayor.
- Un ángulo más pequeño significa que se requeriría una velocidad inicial más grande para permitir que el saltamontes alcance la altura indicada.
- En presencia de fricción un tobogán con diferente forma daría lugar a diferentes cantidades de energía mecánica perdidas por la fricción, así que la respuesta final dependería de la forma del tobogán.
- En la posición en que se agacha hay menos resistencia del viento. El agacharse también baja el centro de masa del esquiador, haciendo más fácil el balanceo.
- 73.5%
- Si la acróbata dobla las piernas, se agacha inmediatamente después de entrar en contacto con el trampolín y después se impulsa mientras que la plataforma la impulsa, ella puede rebotar a una altura mayor que su altura inicial.
- La vibración continua del resorte significa que una cierta energía no fue transferida al bloque. Consecuentemente, el bloque irá una distancia un poco más pequeña encima de la rampa.
- a)
- El trabajo requerido se cuadruplicaría pero el tiempo se duplicaría, así que toda la energía promedio se duplicaría.
- La potencia instantánea es $9.00 \times 10^4 \text{ W}$, que es dos veces la potencia promedio.
- Falso. La respuesta correcta es un cuarto.
- No. Usar cuadros del mismo tamaño es simplemente una cuestión de conveniencia.

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. d)
5. c)
7. b)
9. b)
11. d)
13. b)

Preguntas conceptuales

- Como no está ocurriendo ningún movimiento, la cuerda no experimenta ningún desplazamiento y no se hace ningún trabajo sobre ella. Por la misma razón, no hay trabajo sobre los tiradores o la tierra. El trabajo se está haciendo solamente dentro de los cuerpos de los tiradores. Para el ejemplo, el corazón de cada tirador está aplicando fuerzas sobre la sangre para moverla a través del cuerpo.
- a) Cuando la rampa es sin fricción, cambiar la longitud o la forma de la rampa no diferenciará la velocidad final del niño, mientras la diferencia en las alturas de los extremos inferiores y superiores de la rampa se mantenga constante. b) Si la fricción debe ser considerada, la longitud de trayectoria a lo largo de la cual la fuerza de fricción hace trabajo negativo será mayor cuando la rampa se hace más larga o se den jorobas. Así, el niño llegará al extremo inferior con menos energía cinética (y por lo tanto menos rapidez).

CAPÍTULO 5

Exámenes rápidos

1. c)
2. d)

5. Si no hacemos caso de cualesquier efecto debido a la fricción del balanceo en los neumáticos del coche, encontramos que se haría la misma cantidad de trabajo en conducir encima del serpenteo y en conducir directo encima de la montaña porque el peso del coche se mueve hacia arriba contra la gravedad para la misma distancia vertical en cada caso. Si incluimos la fricción, hay más trabajo hecho en conducir serpenteando porque el excedente de la distancia que la fuerza de la fricción actúa es mucho más largo. Así que ¿por qué utilizamos serpenteos? La respuesta está en la fuerza requerida, no en el trabajo. La fuerza requerida del motor para seguir una subida suave es mucho más pequeña que la requerida para conducir en una subida recta encima de la colina. Para enfrentar los caminos cuesta arriba, los motores tendrían que ser reajustados para permitirles aplicar fuerzas mucho más grandes. (Es por la misma razón por las que se diseñan rampas para mover objetos pesados en los camiones, en comparación con la elevación vertical de los objetos.)
7. a) La tensión en la cuerda de soporte no hace ningún trabajo, porque el movimiento del péndulo es siempre perpendicular a la cuerda y por lo tanto a la fuerza de tensión. b) La resistencia del aire hace trabajo negativo siempre, porque la resistencia del aire está actuando siempre en una dirección opuesta al movimiento. c) La fuerza de la gravedad actúa siempre hacia abajo; por lo tanto, el trabajo hecho por la gravedad es positivo en la bajada y negativo en la subida.
9. Durante el tiempo que el dedo del pie está en contacto con la bola, el trabajo hecho por éste en la bola está dado por

$$W_{\text{dedo}} = \frac{1}{2}m_{\text{bola}}v^2 - 0 = \frac{1}{2}m_{\text{bola}}v^2$$

donde v es la velocidad de la bola al salir del dedo del pie. Después de que la bola pierde contacto con éste, sólo la fuerza gravitacional y la fuerza de retroceso debido a la resistencia del aire continúan haciendo trabajo sobre la bola a través de su vuelo.

11. a) Sí, la energía mecánica total del sistema se conserva porque las únicas fuerzas que actúan son conservativas: la fuerza de la gravedad y la fuerza del resorte. b) Hay dos formas de energía potencial en este caso: la energía potencial gravitacional y energía potencial elástica almacenada en el resorte.
13. Supongamos que el libro se levanta lentamente. En este caso, hay dos fuerzas en el libro que son casi iguales en magnitud: la fuerza de elevación y la fuerza de la gravedad. Así, el trabajo positivo hecho por usted y el trabajo negativo hecho por la gravedad se cancelan. No hay trabajo neto realizado y ningún cambio neto en la energía cinética, así que el teorema del trabajo-energía se satisface.
15. Como el satélite se mueve en una órbita circular sobre la Tierra, su desplazamiento durante cualquier intervalo pequeño del tiempo es perpendicular a la fuerza gravitacional, que actúa siempre hacia el centro de la Tierra. Por lo tanto, el trabajo realizado por la fuerza gravitacional durante cualquier desplazamiento es cero. (Recuerde que el trabajo realizado por una fuerza está definido por $F\Delta x \cos \theta$, donde θ es el ángulo entre la fuerza y el desplazamiento. En este caso, el ángulo es 90° , así que el trabajo realizado es cero.) Como el teorema del trabajo y la energía dice que el trabajo neto realizado en un objeto durante cualquier desplazamiento es igual al cambio de su energía cinética y el trabajo realizado en este caso es cero, el cambio en la energía cinética del satélite es cero: por lo tanto, su velocidad permanece constante.

Problemas

1. 700 J
 3. 2×10^4 J
 5. a) 61.3 J b) -46.3 J c) 0 d) El trabajo realizado por la gravedad no cambiaría, el trabajo realizado por la fuerza de la fricción disminuiría, y el trabajo realizado por la fuerza normal no cambiaría.
 7. a) 79.4 N b) 1.49 kJ c) -1.49 kJ
 9. a) 2.00 m/s b) 200 N
 11. a) 879 J b) Su energía cinética se incrementa por factor de 4.
 13. a) -5.6×10^2 J b) 1.2 m

15. a) 2.34×10^4 N b) 1.91×10^{-4} s
 17. a) 4.68×10^9 J b) -4.68×10^9 J c) 1.87×10^6 N
 19. a) 2.5 J b) -9.8 J c) -12.3 J
 21. 7.37 N/m
 23. 878 kN hacia arriba
 25. $h = 6.94$ m
 27. $W_{\text{bíceps}} = 120$ J; $W_{\text{barb-arriba}} = 290$ J se deben involucrar músculos adicionales
 29. a) 4.30×10^5 J b) -3.97×10^4 J c) 115 m/s
 31. a) La masa, el resorte y la Tierra (incluyendo la pared) constituyen el sistema. La masa y la Tierra interactúan a través de la fuerza del resorte, de la gravedad, y de la fuerza normal.
 b) el punto de extensión máxima, de $x = 0.060$ m, y del punto del equilibrio, $x = 0$ c) 1.53 J a $x = 6.00$ cm; 0 J en $x = 0$
 d) $\frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2$

$$\rightarrow v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{k}{m}(x_1^2 - x_2^2)}$$

 1.75 m/s e) 1.51 m/s Esta respuesta no es una mitad de la primera respuesta porque la ecuación no es lineal.
 33. 0.459 m
 35. a) 0.350 m b) el resultado serían menor que 0.350 m porque algo de la energía mecánica se pierde como resultado de la fuerza de fricción entre el bloque y la pista.
 37. a) 10.9 m/s b) 11.6 m/s
 39. a) Inicialmente, toda la energía se almacena en el resorte comprimido. Después de que se dispara el arma y sale el proyectil, la energía es transferida a la energía cinética del proyectil, dando por resultado un pequeño aumento en energía potencial gravitacional. Una vez que el proyectil alcance su altura máxima, la energía completa es asociada con su energía potencial gravitacional. b) 544 N/m c) 19.7 m/s
 41. a) Sí. No hay fuerzas no conservativas que actúan sobre el niño, así que se conserva la energía mecánica total. b) No. En la expresión para la conservación de la energía mecánica, la masa del niño se incluye en cada término y por lo tanto se cancela. c) La respuesta es la misma en cada caso. d) La expresión tendría que ser modificada para incluir el trabajo hecho por la fuerza de fricción. e) 15.3 m/s.
 43. a) 372 N b) $T_1 = 372$ N, $T_2 = T_3 = 745$ N c) 1.34 kJ
 45. 3.8 m/s
 47. 289 m
 49. a) 24.5 m/s b) Sí c) 206 m d) Poco posible; la fuerza que se retarda realmente variará con velocidad.
 51. 236 s o 3.93 min
 53. 8.01 W
 55. La potencia del auto deportivo es cuatro veces que la del coche de modelo más viejo.
 57. a) 2.38×10^4 W = 32.0 hp b) 4.77×10^4 W = 63.9 hp
 59. a) 24.0 J b) -3.00 J c) 21.0 J
 61. a) El gráfico es una línea recta que pasa por los puntos (0 m, -16 N), (2 m, 0 N) y (3 m, 8 N). b) -12.0 J
 63. 0.265 m/s
 65. a) $EP_{\text{a}} = 3.94 \times 10^5$ J, $EP_{\text{b}} = 0$, $\Delta EP = -3.94 \times 10^5$ J
 b) $EP_{\text{a}} = 5.63 \times 10^5$ J, $EP_{\text{b}} = 1.69 \times 10^5$ J, $\Delta EP = -3.94 \times 10^5$ J
 67. a) 575 N/m b) 46.0 J
 69. a) 4.4 m/s b) 1.5×10^5 N
 71. a) 3.13 m/s b) 4.43 m/s c) 1.00 m
 73. a) 0.588 J b) 0.588 J c) 2.42 m/s d) $EP_C = 0.392$ J
 e) $EC_C = 0.196$ J
 75. a) 0.020 4 m b) 7.20×10^2 N/m
 77. a) 423 mi/gal b) 776 mi/gal
 79. a) 28.0 m/s b) 30.0 m c) 88.9 m más allá del extremo de la pista
 81. a) 101 J b) 0.412 m c) 2.84 m/s d) -9.80 mm
 e) 2.86 m/s
 83. 914 N/m

85. a) $W_{\text{neto}} = 0$ b) $W_{\text{grav}} = -2.0 \times 10^4 \text{ J}$ c) $W_{\text{normal}} = 0$,
 d) $W_{\text{fricción}} = 2.0 \times 10^4 \text{ J}$
 87. a) 10.2 kW b) 10.6 kW c) $5.82 \times 10^6 \text{ J}$
 89. 4.3 m/s
 91. Entre 25.2 km/h y 27.0 km/h

CAPÍTULO 6

Exámenes rápidos

- b)
- c)
- c)
- a)
- a) Perfectamente inelástico b) Inelástico c) Inelástico
- a)

Problemas de ejemplo

- 44 m/s
- Cuando un automóvil está alcanzando al otro, la velocidad relativa es pequeña, así que en un impacto el cambio en cantidad de movimiento también es pequeño. En una colisión de frente, sin embargo, la velocidad relativa es grande porque los coches están viajando en direcciones opuestas. Consecuentemente, el cambio en la cantidad de movimiento de un pasajero en una colisión de frente es mayor que cuando está golpeado por detrás, lo que implica una fuerza media más grande.
- Suponiendo que las energías cinéticas de las dos flechas son iguales, la flecha más pesada tendría impulso mayor debido a que $p^2 = 2mK$. Esto significa una mayor velocidad de retroceso para el arquero.
- La velocidad final no será afectada, pero se duplicaría el cambio en energía cinética.
- La energía se puede perder debido a la fricción en los mecanismos y la pérdida de energía térmica asociada por la fricción del aire y a través de la emisión de ondas acústicas.
- No. Si ése fuera el caso, la energía no podría ser conservada.
- Ambos bloques no pueden estar en reposo al mismo tiempo porque entonces por ecuación (1) de la cantidad de movimiento no se conservaría.
- 45°
- $m(a + g)$

Preguntas de opción múltiple

- b)
- c)
- c)
- a)
- d)
- a)
- c)

Preguntas conceptuales

- a) No. No puede llevar más energía cinética que la que posee. Eso violaría la ley de la conservación de la energía. b) Sí. Por el rebote del objeto con el que se estrelle, él puede entregar más cantidad de movimiento en una colisión que la que posee en su vuelo.
- Si desaparece toda la energía cinética, tampoco debe haber movimiento de los objetos después de la colisión. Si ni uno ni otro se está moviendo, la cantidad de movimiento final del sistema es cero y la cantidad de movimiento inicial del sistema también debe haber sido cero. Una situación en la cual esto podría ser cierto sería la colisión de frente de dos objetos que tienen cantidades de magnitud iguales pero de dirección opuesta.
- Inicialmente, la arcilla tiene una cantidad de movimiento dirigida hacia la pared. Cuando choca y se pega a la pared, ni la arcilla ni la pared parecen tener cualquier cantidad de movimiento. Así, es tentador (ilícito) concluir que la cantidad de

movimiento no se conserva. Sin embargo, “perder” la cantidad de movimiento es realmente transmitida a la pared y a la Tierra, haciendo que ambos se muevan. Debido a la enorme masa de la Tierra, su velocidad de retroceso es demasiado pequeña para detectarse.

- Mientras que el agua es forzada a salir de los agujeros en el brazo, éste imparte un impulso horizontal al agua. Entonces el agua ejerce un impulso igual y opuesto en el brazo del aerosol, causando que el brazo rote en dirección opuesta al aerosol.
- Será más fácil coger la bola de medicina cuando su velocidad (y la energía cinética) es más baja. La primer opción, lanzar la bola de medicina a igual velocidad será la más difícil, porque la velocidad no se reduce. La segunda opción, lanzar la bola de medicina con la misma cantidad de movimiento, reducirá la velocidad por el cociente de las masas. Como $m_i v_i = m_m v_m$ se sigue que

$$v_m = v_i \left(\frac{m_i}{m_m} \right)$$

La tercera opción, lanzar la bola de medicina con la misma energía cinética, también reducirá la velocidad, pero solamente por la raíz cuadrada del cociente de las masas. Puesto que

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} m_m v_m^2$$

se sigue que

$$v_m = v_i \sqrt{\frac{m_i}{m_m}}$$

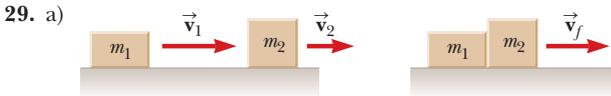
Así que, el lanzamiento se hará lento y fácil cuando la cantidad de movimiento sea constante. Si desea comprobar esta respuesta, intente sustituir valores de $v_i = 1 \text{ m/s}$, $m_i = 1 \text{ kg}$ y $m_m = 100 \text{ kg}$. Entonces la misma cantidad de movimiento caerá en 1 cm/s , mientras que el tiro con la misma energía caerá en 10 cm/s .

- El producto mv es igual para la bala y el arma. La bala tiene una velocidad grande y una masa pequeña, mientras que el arma tiene una velocidad pequeña y una masa grande. Además, la bala lleva mucho más energía cinética que el arma.
- a) Mantener el palo en contacto con la bola tanto como sea posible, maximiza el impulso. Así, la bola acrecenta un cambio en cantidad de movimiento más grande que sin mantener el contacto con una velocidad más alta y viaja más lejos. b) Con un tiro corto al green, el factor primario es de control, no de distancia. Por lo tanto, poco o nada de contacto, permite que el golfista tenga una mejor sensación de qué tan fuerte pegar a la bola.
- No. El impulso $\vec{F}\Delta t$ depende de la fuerza y el intervalo de tiempo durante el que se aplica.

Problemas

- a) $8.35 \times 10^{-21} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) $4.50 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ c) $750 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ d) $1.78 \times 10^{29} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$
- a) 31.0 m/s b) la bala, $3.38 \times 10^3 \text{ J}$ frente a 69.7 J
- a) 0.42 N hacia abajo b) El granizo ejercería una mayor fuerza promedio sobre el techo, ya que éste rebota y el impulso que actúa sobre el granizo sería mayor que el impulso que actúa sobre las gotas de lluvia. La tercera ley de Newton nos dice entonces que el granizo ejerce una mayor fuerza en el techo.
- a) 22.0 m/s b) 1.14 kg
- a) $10.4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ en la dirección de la velocidad final de la bola b) 173 N
- 1.39 N · s hacia arriba
- a) $364 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ adelante a) 438 N adelante
- a) $8.0 \text{ N} \cdot \text{s}$ b) 5.3 m/s c) 3.3 m/s
- a) $12 \text{ N} \cdot \text{s}$ b) $8.0 \text{ N} \cdot \text{s}$ c) 8.0 m/s d) 5.3 m/s
- a) $9.60 \times 10^{-2} \text{ s}$ b) $3.65 \times 10^5 \text{ N}$ c) 26.6g
- 65 m/s

23. a) 1.15 m/s b) 0.346 m/s dirección opuesta al movimiento de la muchacha
 25. a) 154 m b) Por la tercera ley de Newton, cuando el astronauta ejerce una fuerza sobre el tanque, el tanque ejerce una fuerza sobre el astronauta. Esta fuerza de reacción acelera al astronauta hacia la nave espacial.
 27. $v_{\text{lanzador}} = 2.48 \text{ m/s}$; $v_{\text{catcher}} = 2.25 \times 10^{-2} \text{ m/s}$



- b) La colisión se describe lo mejor posible como perfectamente inelástica porque los patinadores permanecen en contacto después de la colisión.
 c) $m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v_f$
 d) $v_f = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2)$ e) 6.33 m/s
 31. 15.6 m/s
 33. a) 1.80 m/s b) $2.16 \times 10^4 \text{ J}$
 35. a) 1
 37. 1.32 m
 39. 57 m
 41. 273 m/s

43. a) El niño se mueve a una velocidad de $\left(\frac{m_g}{m_b}\right)v_g$ hacia el oeste

b) $EC_g = \frac{1}{2} m_g v_g^2$; $EC_b = \left(\frac{m_g}{2m_b}\right)v_g^2$ La proporción $\frac{EC_g}{EC_b} = \frac{m_b}{m_g}$

es mayor que 1 debido a que $m_b > m_g$. Por lo tanto, la niña tiene más energía cinética. c) El trabajo es realizado por el niño y por la niña al separarse y el origen de este trabajo es la energía química de sus cuerpos.

45. 17.1 cm/s (25.0 g objeto), 22.1 cm/s (10.0 g objeto)
 47. a) Sobre un intervalo muy corto de tiempo, las fuerzas externas no tienen ningún tiempo para imprimir un impulso significativo a los jugadores durante la colisión. Los dos jugadores se mueven juntos después de la tacleada, así que la colisión es totalmente inelástica. b) 2.88 m/s a 32.3° c) 785 J. d) La energía cinética perdida se transforma en otras formas de energía como energía térmica y sonido.
 49. 5.59 m/s al norte
 51. a) 2.50 m/s a -60° b) colisión elástica
 53. $1.78 \times 10^3 \text{ N}$ sobre el conductor del camión, $8.89 \times 10^3 \text{ N}$ sobre el conductor del coche
 55. a) 8/3 m/s (partícula incidente), 32/3 m/s (partícula objetivo) b) $-16/3 \text{ m/s}$ (partícula incidente), 8/3 m/s (partícula objetivo) c) $7.1 \times 10^{-2} \text{ J}$ en caso de que a), y $2.8 \times 10^{-3} \text{ J}$ en caso b). La partícula del incidente pierde más energía cinética en caso de que a), en el cual la masa del objetivo es 1.0 g.
 57. $v_1 = -1.7 \text{ m/s}$ (a la izquierda); $v_2 = 1.1 \text{ m/s}$ (a la derecha)
 59. 62 s
 61. a) 3 b) 2
 63. a) -2.33 m/s , 4.67 m/s b) 0.277 m c) 2.98 m d) 1.49 m
 65. a) -0.667 m/s b) 0.952 m
 67. a) 3.54 m/s b) 1.77 m c) $3.54 \times 10^4 \text{ N}$ d), No, la fuerza normal ejercida por el riel contribuye a aumentar la cantidad de movimiento al sistema.
 69. a) 0.28 o 28% b) $1.1 \times 10^{-13} \text{ J}$ para el neutrón, $4.5 \times 10^{-14} \text{ J}$ para el carbono
 71. a) No. Después de chocar, los coches si se mueven como una unidad, viajarían al noreste, así que no podrían dañar las propiedades en la esquina sureste. b) Componente x: 16.3 km por hora, componente y: 9.17 km por hora, ángulo: la velocidad final del coche es 18.7 km por hora a 29.4° al noreste, consistente con el inciso a).
 73. a) 4.85 m/s b) 8.41 m
 75. $v_0 = \left(\frac{M+m}{m}\right)\sqrt{2\mu g d}$
 77. a) 1.1 m/s a 30° debajo del eje x positivo b) 0.32 o 32%

79. a) El impulso del sistema bala-bloque se conserva en la colisión, por lo que puede relacionarse con la velocidad del bloque y la bala inmediatamente después del choque con la velocidad inicial de la bala. A continuación, puede utilizar la conservación de la energía mecánica del sistema bala-bloque-Tierra para relacionar la velocidad después de la colisión a la altura máxima. b) 521 m/s hacia arriba

CAPÍTULO 7

Exámenes rápidos

- c)
- b)
- b)
- b)
- a)
1. e) 2. a) 3. b)
- c)
- b), c)
- e)
- d)

Preguntas de ejemplo

- Sí. El factor de la conversión es $(180^\circ/\pi \text{ rad})$ o $57.3^\circ \text{ s}^{-1}$.
- Todas las cantidades y respuestas están dadas en unidades angulares, así que alterar el radio de la rueda no tiene ningún efecto en las respuestas.
- En este caso, duplicar la aceleración angular duplica el desplazamiento angular. Eso es verdad aquí, porque la velocidad angular inicial es cero.
- La aceleración angular del tocadiscos durante su giro es cero. Un lector de CD's debe tener aceleración diferente a cero porque la velocidad angular debe cambiar.
- b)
- Debería aumentar.
- El ángulo del banco, el coeficiente de fricción y el radio de la circunferencia determinan la máxima y mínima seguras.
- La fuerza normal sigue siendo cero.
- Sí. La fuerza de la gravedad que actúa sobre cada bola de billar sostiene las bolas contra la mesa y las ayuda a crear las fuerzas de fricción que les permite rodar. Sin embargo, la fuerza de gravedad entre las bolas es insignificante.
- Primero, la mayoría de los asteroides son de forma irregular, así que la ecuación (1) no se aplica porque la aceleración puede no ser uniforme. En segundo lugar, el asteroide puede ser tan pequeño que no habrá región significativa o útil donde la aceleración sea uniforme. En ese caso, se requeriría una ley de Newton de la gravitación más general.
- b)
- La energía mecánica se conserva en este sistema. Puesto que la energía potencial en el perigeo es más baja, la energía cinética debe ser más alta.
- 5 días

Preguntas de opción múltiple

- e)
- c)
- c)
- c)
- d)
- b)
- e)

Preguntas conceptuales

- a) La cabeza tenderá a inclinarse hacia el hombro derecho (es decir, hacia el exterior de la curva). b) Cuando no hay correa, la tensión en los músculos del cuello debe producir la aceleración centrípeta. c) Con una correa, la tensión en ésta realiza esta función, permitiendo que los músculos del cuello sigan relajados.

3. El velocímetro será inexacto. El velocímetro mide el número de revoluciones por segundo del neumático, así que sus lecturas serán demasiado bajas.
 5. a) El punto C. La aceleración total aquí es la aceleración centrípeta, hacia arriba. b) El punto A. La velocidad en A es igual a cero cuando la sacudida es en dirección inversa. La aceleración total aquí es la aceleración tangencial, perpendicular a la derecha y hacia abajo de la cuerda. c) El punto B. La aceleración total en este caso es la derecha y apuntando en una dirección en algún lugar entre las direcciones radial y tangencial, en función de sus magnitudes relativas.
 7. Considere una posición individual contra la pared interior del cilindro con la cabeza apuntando en la dirección del eje del cilindro. Mientras que el cilindro rota, la persona tiende a moverse en línea recta tangente a la trayectoria circular seguida por la pared del cilindro. Consecuentemente, la persona presiona contra la pared y la fuerza normal ejercida sobre ella proporciona la fuerza radial requerida para mantenerla moviéndose en una trayectoria circular. Si la velocidad rotatoria se ajusta de manera tal que la fuerza normal sea igual en magnitud a su peso en la Tierra, no podrá distinguir entre la gravedad artificial de la colonia y la gravedad ordinaria.
 9. La tendencia del agua es moverse en una línea recta tangente a la trayectoria circular seguida por el envase. Consecuentemente, en la parte superior de la trayectoria circular, el agua presiona contra el fondo del cubo y la fuerza normal ejercida por el cubo sobre el agua proporciona la fuerza radial requerida para mantener el agua moviéndose en su trayectoria circular.
 11. Cualquier objeto que se mueve de modo tal que cambia la dirección de su velocidad tiene una aceleración. Un coche que se mueve en una trayectoria circular tendrá siempre una aceleración centrípeta.
 13. La velocidad cambia. La componente de la fuerza tangencial a la trayectoria provoca una aceleración tangencial.
31. a) 1.58 m/s^2 b) 455 N ascendente c) 329 N ascendente d) 397 N dirigido al interior y 80.8° sobre horizontal
 33. 321 N hacia la Tierra
 35. $1.1 \times 10^{-10} \text{ N}$ a 72° sobre el eje $+x$
 37. a) $2.50 \times 10^{-5} \text{ N}$ hacia el objeto de 500 kg b) entre los dos objetos y 0.245 m del objeto de 500 kg
 39. a) $r = \frac{9}{8}R_E = 7.18 \times 10^6 \text{ m}$ b) $7.98 \times 10^5 \text{ m}$
 41. a) 2.43 h b) 6.59 km/s c) 4.73 m/s^2 hacia la Tierra
 43. $6.3 \times 10^{23} \text{ kg}$
 45. $\frac{T_B}{T_A} = \sqrt{\frac{27}{8}} = 1.84$
 47. a) $1.90 \times 10^{27} \text{ kg}$ b) $1.89 \times 10^{27} \text{ kg}$ c) Sí
 49. a) 9.40 rev/s b) 44.2 rev/s^2 ; $a_r = 2590 \text{ m/s}^2$; $a_t = 206 \text{ m/s}^2$ c) $F_r = 515 \text{ N}$; $F_t = 40.7 \text{ N}$
 51. a) 2.51 m/s b) 7.90 m/s^2 c) 4.00 m/s
 53. a) $7.76 \times 10^3 \text{ m/s}$ b) 89.3 min
 55. a) $n = m\left(g - \frac{v^2}{r}\right)$ (b) 17.1 m/s
 57. a) $F_{g, \text{verdadera}} = F_{g, \text{aparente}} + mR_E\omega^2$ b) 732 N (ecuador), 735 N (cualquier polo)
 59. 11.8 km/s
 61. 0.835 rev/s
 65. a) 10.6 kN b) 14.1 m/s
 67. a) 0.71 años b) La salida debe ser de modo que la nave espacial llegue al afelio cuando el planeta objetivo esté allí.
 69. a) $t = \frac{2R\omega}{g}$ (b) $\omega = \sqrt{\frac{\pi g}{R}}$
 71. a) 109 N b) 56.4 N
 73. a) 106 N b) 0.396
 75. 0.131

Problemas

1. a) $7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ b) Debido a su rotación alrededor de su eje, la Tierra se abulta en el ecuador.
3. a) $3.2 \times 10^5 \text{ rad}$ b) $5.0 \times 10^7 \text{ rev}$
5. a) 821 rad/s^2 b) $4.21 \times 10^3 \text{ rad}$
7. a) 3.5 rad b) El desplazamiento angular aumenta en un factor de 4 porque la ecuación 7.9 es cuadrática en la velocidad angular.
9. Rotor principal: $179 \text{ m/s} = 0.522v_{\text{sonido}}$
Rotor de la cola $221 \text{ m/s} = 0.644v_{\text{sonido}}$
11. a) 116 rev b) 62.1 rad/s
13. 13.7 rad/s^2
15. a) 6.53 m/s b) 0.285 m/s^2 dirigidos hacia el centro del arco circular
17. a) 0.346 m/s^2 b) 1.04 m/s c) 0.346 m/s^2 d) 0.943 m/s^2 e) 1.00 m/s^2 a 20.1° adelante con respecto a la dirección de \vec{a}_c
19. a) 20.6 N b) 3.35 m/s^2 tangente hacia abajo de la circunferencia; 32.0 m/s^2 radialmente hacia el interior c) 32.2 m/s^2 a 5.98° de la cuerda, apuntando hacia un lugar por debajo del centro de la circunferencia. d) Ningún cambio. e) Si el objeto se está moviendo hacia abajo, está ganando velocidad. Si se está moviendo hacia arriba está perdiendo velocidad, pero su aceleración tiene la misma magnitud y su dirección puede ser descrita en los mismos términos.
21. a) 1.10 kN b) 2.04 veces su peso
23. 22.6 m/s
25. a) 18.0 m/s^2 b) 900 N c) 1.84; este coeficiente tan grande es poco realista y ella no podrá permanecer en el tiovivo.
27. a) 9.8 N b) 9.8 N c) 6.3 m/s
29. a) La fuerza de fricción estática que actúa hacia el centro de la curvatura del camino causa la aceleración centrípeta de la carter. Cuando la fuerza centrípeta necesaria excede el valor máximo de la fuerza estática de fricción, μ , n , la carter comienza a resbalar. b) 0.370

CAPÍTULO 8

Exámenes rápidos

1. d)
2. b)
3. b)
4. a)
5. c)
6. a)

Preguntas de ejemplo

1. La puerta giratoria comienza a moverse en sentido antihorario en vez de a horario.
2. La colocación de la cuña más cerca de la chapa aumenta su efectividad.
3. Si la mujer se inclina al revés, el esfuerzo de torsión que ella ejerce sobre el balancín aumenta y ella comienza a descender.
4. b)
5. El sistema comenzaría a rotar en sentido horario.
6. El ángulo hecho por la fuerza del bíceps, sin embargo, no variaría mucho de 90° pero la longitud del brazo de palanca debería duplicarse, así que la fuerza requerida del bíceps sería reducida por casi la mitad.
7. La tensión en el cable aumentaría.
8. c)
9. Alargar la barra entre las bolas 2 y 4 crearía el cambio más grande en el momento de inercia.
10. El paso hacia adelante transfiere la cantidad de movimiento del cuerpo del lanzador a la bola. Sin la sincronización apropiada, la transferencia no ocurrirá o tendrá menos efecto.
11. La magnitud de la aceleración disminuiría; la tensión aumentaría.
12. Bloque, bola, cilindro
13. La respuesta final no cambiaría.
14. Su velocidad angular sigue siendo la misma.

15. La conservación de energía no se viola. El cambio neto positivo ocurre porque el estudiante está haciendo trabajo sobre el sistema.

Preguntas de opción múltiple

- 1. b)
- 3. a)
- 5. d)
- 7. b), e)
- 9. d)
- 11. d)
- 13. e)

Preguntas conceptuales

1. Para que usted permanezca en equilibrio, su centro de gravedad debe estar siempre sobre su punto de apoyo, los pies. Si sus talones están contra una pared, su centro de gravedad no puede permanecer sobre sus pies cuando usted se inclina hacia adelante, así que perderá su equilibrio.
3. No, sólo si la velocidad angular cambia.
5. La barra tiene un gran momento de inercia alrededor de un eje a lo largo de la cuerda. Un torque desequilibrado entonces sólo produce una pequeña aceleración angular del sistema de artista-barra, ampliando el tiempo disponible para volver a estar en equilibrio. Para mantener el centro de masa por encima de la cuerda, el artista puede mover la barra a la izquierda o derecha, en lugar de tener que doblar su cuerpo alrededor. La barra cae hacia los extremos para bajar el centro de gravedad del sistema, aumentando de la estabilidad relativa del sistema.
7. Cuando la motocicleta se separa de la Tierra, la fricción entre el neumático y la tierra desaparece repentinamente. Si el conductor de la motocicleta mantiene la válvula reguladora abierta mientras que deja la tierra, el neumático posterior aumentará su velocidad angular y, por lo tanto, su cantidad de movimiento angular. La motocicleta aerotransportada es ahora un sistema aislado y su cantidad de movimiento angular debe conservarse. El aumento en la cantidad de movimiento angular de la llanta está dirigido en el sentido de las manecillas del reloj, que debe ser compensado por un aumento en la cantidad de movimiento angular de la motocicleta en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Esta rotación da lugar a que la nariz de la motocicleta se levante y que caiga de cola.
9. La cantidad de movimiento angular de la nube del gas se conserva. Así, el producto $I\omega$ sigue siendo constante. Mientras que la nube se contrae de tamaño, su momento de inercia disminuye, así que su velocidad angular ω debe aumentar.
11. Podemos suponer con bastante exactitud que el motor impulsor funcionará con una velocidad angular constante y a un esfuerzo de torsión constante. Por lo tanto, a) como el radio de la cinta receptora aumenta, la tensión en la cinta disminuirá, de acuerdo con la ecuación

$$T = \tau_{\text{const}} / R_{\text{empiezo}} \tag{1}$$

Como el radio del carrete de la fuente disminuye, dando una disminución de tensión, el esfuerzo de torsión en el carrete de la fuente disminuirá incluso más rápidamente, como lo demuestra la ecuación siguiente:

$$\tau_{\text{fuente}} = TR_{\text{fuente}} = \tau_{\text{cons}} R_{\text{fuente}} / R_{\text{empiezo}} \tag{2}$$

- b) En el caso de un tirón repentino en la cinta, la velocidad angular que cambia del carrete de la fuente llega a ser importante. Si el carrete de la fuente está lleno, entonces el momento de inercia será grande y la tensión en la cinta será grande. Si el carrete de la fuente está casi vacío, entonces la aceleración angular será grande. Así, será más probable que la cinta se rompa cuando el carrete de la fuente está casi lleno. Uno ve el mismo efecto en el caso de las toallas de papel: es más fácil encajar presión a una toalla libre cuando el rodillo es nuevo que cuando está casi vacío.
13. Cuando una escalera se inclina contra una pared, la pared y el piso ejercen fuerzas de fricción sobre la escalera. Si el piso es perfectamente liso, no puede ejercer ninguna fuerza de fricción en la dirección horizontal para contrarrestar la fuerza normal de la pared. Por lo tanto, una escalera en un piso liso no puede estar parada en equilibrio. Sin embargo, una pared lisa puede aún

ejercer una fuerza normal para sostener la escalera en equilibrio contra el movimiento horizontal. El esfuerzo de torsión a la izquierda de esta fuerza previene la rotación sobre el pie de la escalera. Debe elegir, por lo tanto, un piso áspero.

Problemas

1. $168 \text{ N} \cdot \text{m}$
3. a) $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ (sentido contrario a las manecillas del reloj)
b) $36 \text{ N} \cdot \text{m}$ (sentido contrario a las manecillas del reloj)
5. a) $5.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ b) El esfuerzo de torsión aumenta, porque el esfuerzo de torsión es proporcional al momento del brazo, $L \sin \theta$, y este factor aumenta cuando θ aumenta.
7. $F_t = 724 \text{ N}$, $F_s = 716 \text{ N}$
9. 312 N
11. $x_{\text{cg}} = 3.33 \text{ pies}$, $y_{\text{cg}} = 1.67 \text{ pies}$
13. $(-1.5 \text{ m}, -1.5 \text{ m})$
15. 1.01 m en la figura P8.15b; 0.015 m hacia la cabeza en la figura P8.15c.
17. a) $T = 2.71 \text{ kN}$ b) $R_x = 2.65 \text{ kN}$
19. a) 443 N , b) 222 N (a la derecha), 216 N (ascendente)
21. $T_1 = 501 \text{ N}$, $T_2 = 672 \text{ N}$, $T_3 = 384 \text{ N}$
23. a) $d = \frac{mg}{2k \tan \theta}$ b) $R_x = \frac{mg}{2 \tan \theta}$; $R_y = mg$
25. $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{w}{h}\right)$
27. $R = 107 \text{ N}$, $T = 157 \text{ N}$
29. 20 N
31. a) $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ b) $44.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ c) $143 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
33. a) $87.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ b) $1.61 \times 10^3 \text{ kg}$ c) 4.70 rad/s
35. a) 3.92 m/s^2 b) 9.80 rad/s^2 c) Cuando la cuerda sale del cilindro, la masa del cilindro disminuye, disminuyendo también el momento de inercia del cilindro. Al mismo tiempo, la masa de la cuerda que sale del cilindro aumentaría el esfuerzo de torsión ejercido sobre el cilindro. Por lo tanto, la aceleración del sistema aumentaría de magnitud con el tiempo. (El aumento sería leve en este caso, dada la gran masa del cilindro.)
37. a) $24.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ b) 0.0356 rad/s^2 c) 1.07 m/s^2
39. 177 N
41. 0.524
43. 276 J
45. a) 5.47 J b) 5.99 J
47. a) 3.90 m/s b) 15.6 rad/s
49. 149 rad/s
51. a) 500 J b) 250 J c) 750 J
53. a) 5.00 m b) $2.31 \times 10^4 \text{ J}$ c) $1.79 \times 10^4 \text{ J}$ d) 9.27 m/s
55. a) $7.08 \times 10^{33} \text{ J} \cdot \text{s}$ b) $2.66 \times 10^{40} \text{ J} \cdot \text{s}$
57. $17.5 \text{ J} \cdot \text{s}$ en sentido contrario a las manecillas del reloj
59. a) $7 \text{ md}^2/3$ b) mgd en sentido contrario a las manecillas del reloj
c) $3g/7d$ en sentido contrario a las manecillas del reloj
d) $2g/7$ ascendente e) $mgd/7$
g) $m\sqrt{14gd^3/3}$ (h) $\sqrt{2gd/21}$
61. 6.73 rad/s
63. $5.99 \times 10^{-2} \text{ J}$
65. a) $\omega = \left(\frac{I_1}{I_1 + I_2}\right)\omega_0$ b) $\frac{EC_f}{EC_i} = \frac{I_1}{I_1 + I_2} < 1$
67. a) 2.6 rad/s b) $5.1 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ c) $1.7 \times 10^6 \text{ J}$
69. a) Mientras que el niño camina al extremo derecho del barco, el barco se mueve a la izquierda (hacia el embarcadero).
b) El barco se mueve 1.45 m más cercano al embarcadero, así que el niño estará a 5.55 m del embarcadero. c) No. Él acortará al alcanzar la tortuga por 0.45 m .
71. 36.9°
73. a) Mvd b) Mv^2 c) Mvd d) $2v$ e) $4Mv^2$ f) $3Mv^2$
75. a) 6.73 N ascendente b) $x = 0.389 \text{ m}$
77. a) 0 b) 0 ; porque el mono y el plátano se mueven hacia arriba con la misma velocidad, el momento angular del sistema es cero.
c) El mono no alcanza los plátanos hasta que estén atrapados en la polea.

79. 1.09 m

81. a) $T = \frac{Mmg}{M + 4m}$ b) $a_t = \frac{4mg}{M + 4m}$

83. 24.5 m/s

85. 9.3 kN

87. a) 3.12 m/s² b) $T_1 = 26.7 \text{ N}$, $T_2 = 9.36 \text{ N}$

89. a) 0.73 m b) 1.6 m/s

CAPÍTULO 9

Exámenes rápidos

1. c)
2. a)
3. c)
4. b)
5. c)
6. b)
7. a)

Preguntas de ejemplo

1. Debido a que el agua es más densa que el aceite, la presión ejercida por una columna de agua es mayor que la presión ejercida por una columna de aceite.
2. Tungsteno, acero, aluminio, caucho
3. El cráneo y el cuello del instalador de líneas pueden experimentar tensión de compresión
4. Acero, cobre, mercurio, agua
5. A una mayor altitud, la columna del aire sobre un área dada es progresivamente más corta y menos densa, así que el peso de la columna del aire se reduce. La presión es causada por el peso de la columna del aire, así que la presión también se reduce.
6. Mientras que el líquido se vierte hacia afuera con una sola abertura, el aire interior puede expandir el fluido para lograr un volumen más grande, reduciendo la presión debajo de la presión atmosférica. El aire debe entonces incorporar la misma salida en dirección opuesta, dando por resultado la interrupción del flujo. Una abertura separada para la toma de aire mantiene la presión del aire interior puede interrumpir el flujo.
7. Verdadero
8. Falso
9. a)
10. El cubo de aluminio flotaría libremente del fondo.
11. La velocidad de la sangre en la región angostada aumenta.
12. Un factor de 2
13. La velocidad decrece con el tiempo.
14. El límite es $v_1 = \sqrt{2gh}$, y se denomina ley de Torricelli. (Véase el ejemplo 9.13.)
15. La diferencia de la presión a través de las alas depende linealmente de la densidad del aire. A una altitud mayor, disminuye la densidad del aire, así que la fuerza de empuje disminuye también.
16. Falso
17. No. Hay muchas plantas más altas de 0.3 m, así que debe haber alguna explicación adicional.
18. Un factor de 16
19. Falso

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. a)
5. c)
7. d)
9. c)
11. a), c)
13. b)

Preguntas conceptuales

1. Ella ejerce bastante presión sobre el piso para maltratar o picar la cubierta de piso. La gran presión es causada porque su peso

se distribuye sobre un área de sección transversal muy pequeña de sus altos tacones. Si usted es el dueño de la casa, puede ser que desee sugerirle que se quite sus tacones y se ponga unas zapatillas.

3. La densidad del aire es más baja en la ciudad de Denver que está en altitudes más bajas, así que el efecto de la fricción del aire es menor en Denver que lo que estaría en una ciudad tal como Nueva York. La fricción reducida del aire significa que en un buen golpe la bola irá más lejos, beneficiando a los tiradores. Por otra parte, los lanzadores de la bola en curva prefieren lanzar altitudes más bajas donde el aire de más densidad produce mayores fuerzas que desvían a una bola haciéndola girar.
5. Si usted piensa en el grano almacenado en el silo como un líquido, la presión que ejerce el grano sobre las paredes del silo se incrementa con la profundidad, justo como la presión del agua en un lago aumenta con la profundidad. Así, el espaciamiento entre las bandas se hace más pequeño en las porciones más bajas para contrarrestar las fuerzas exteriores más grandes en las paredes en estas regiones.
7. En el océano, los barcos flotan debido a la fuerza de empuje del *agua salada*, que es más densa que el agua dulce. Cuando la nave se lleva a un río, la fuerza de empuje del agua dulce en el río no es suficiente para soportar el peso de la nave y se hunde.
9. A menor altitud la presión del agua es mayor porque aumenta la presión con la profundidad por debajo de la superficie del agua en el depósito (o torre de agua). El *penthouse* no está por debajo de la superficie del agua. La presión es más débil detrás de un grifo cerrado y que el flujo de un grifo abierto. Es probable que el departamento de bomberos tenga un registro de la elevación precisa de cada boca de incendios.
11. Las dos latas desplazan el mismo volumen de agua y por lo tanto actúan sobre ellas fuerzas de empuje de igual magnitud. El peso total de la lata de soda de dieta debe ser menor que esta fuerza de empuje, mientras que el peso total de la lata de soda regular es mayor que la fuerza de empuje. Esto es posible aún cuando los dos envases son idénticos y contienen el mismo volumen de líquido. Debido a la diferencia en las cantidades y las densidades de los dulcificantes usados, el volumen V de la mezcla de dieta tendrá menos masa que un volumen igual de la mezcla regular.
13. Abrir las ventanas da lugar a una diferencia más pequeña de presión entre el exterior y el interior de la casa y, por lo tanto, una menor tendencia a dañar severamente a la estructura debido al efecto de Bernoulli.

Problemas

1. $4.74\rho_0$
3. a) $2\,550 \text{ N}$ b) $3.00 \times 10^4 \text{ Pa}$ c) No, la presión será la misma igual solamente si todos los acróbatas usan zapatos del mismo tamaño.
5. a) $\sim 4 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ b) la densidad de un átomo son cerca de 10^{14} veces mayor que la densidad del hierro y otros sólidos y líquidos comunes, lo que sugiere que un átomo es sobre todo espacio vacío. Los líquidos y los sólidos así como los gases son sobre todo espacio vacío.
7. a) $1.01 \times 10^6 \text{ N}$ b) $3.88 \times 10^5 \text{ N}$ c) $1.11 \times 10^5 \text{ Pa}$
9. 4.90 mm
11. $1.05 \times 10^7 \text{ Pa}$
13. $3.5 \times 10^8 \text{ Pa}$
15. 4.4 mm
17. $8.6 \times 10^{-4} \text{ m}$
19. 1.9 cm
21. a) $3.71 \times 10^5 \text{ Pa}$ b) $3.57 \times 10^4 \text{ N}$
23. 0.133 m
25. $1.05 \times 10^5 \text{ Pa}$
27. 27 N · m
29. 0.258 N hacia abajo
31. 9.41 kN

33. a) 408 kg/m³ b) Si la masa del objeto de acero es sólo un poco más de 0.310 kg, entonces el bloque se sumerge pero el objeto de acero y el bloque no se hunden al fondo, la razón es que el objeto de acero comienza a desplazar el agua y la fuerza de empuje está aumentando. Si el objeto de acero es sólido, desplazará poco más de 0.039 kg de agua cuando está sumergido completamente. El objeto de acero y el bloque se hundirán al fondo cuando la masa del objeto de acero excede de 0.350 kg, para los valores menores que esto, pero mayores que 0.310 kg, el bloque será sumergido por completo y el objeto de acero será sumergido sólo parcialmente.
35. a) 1.43 kN ascendente b) 1.28 kN ascendente c) El globo se expande porque la presión externa declina con el incremento de la altitud.
37. a) 4.0 kN b) 2.2 kN c) La presión de aire a esta alta altitud es mucho más baja que la presión atmosférica en la superficie de la Tierra, así que los globos expandidos eventualmente estallan.
39. a) 7.00 cm b) 2.80 kg
41. a) $1.46 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ b) $2.10 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
43. 17.3 N (escala superior), 31.7 N (escala inferior)
45. a) 80 g/s b) 0.27 mm/s
47. 12.6 m/s
49. a) $9.43 \times 10^3 \text{ Pa}$ b) 255 m/s c) La densidad del aire disminuye con el aumento de altura, dando por resultado una diferencia de presión más pequeña. Más allá de la altitud operacional máxima, la diferencia de presión no puede soportar más el avión.
51. a) 0.553 s b) 14.5 m/s c) 0.145 m/s d) $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ e) $2.06 \times 10^5 \text{ Pa}$; los términos de la gravedad pueden ser despreciados. f) 33.0 N
53. 9.00 cm
55. 1.47 cm
57. a) 28.0 m/s b) 28.0 m/s c) 2.11 MPa
59. $8.3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$
61. $5.6 \times 10^{-2} \text{ N/m}$
63. 8.6 N
65. 2.1 MPa
67. 2.8 μm
69. 0.21 mm
71. $RN = 4.3 \times 10^3$; flujo turbulento
73. $1.8 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$
75. $1.4 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$
77. a) Las fuerzas de empuje son iguales porque los dos bloques desplazan cantidades iguales de agua. b) La escala del resorte lee el valor más grande para el bloque del hierro. c) $B = 2.0 \times 10^3 \text{ N}$ para ambos bloques, $T_{\text{hierro}} = 13 \times 10^3 \text{ N}$, $T_{\text{aluminio}} = 3.3 \times 10^3 \text{ N}$.
79. b) 5.9 km
81. 2.5×10^7 capilares
83. a) 1.57 kPa, 1.55×10^{-2} atmósferas, 11.8 milímetros de mercurio. b) El nivel de fluido debe levantarse con un golpecito. c) Obstrucción del flujo del líquido cerebroespinal
85. 2.25 m sobre el nivel del punto B
87. 0.605 m
89. $F = \pi R^2(P_0 - P)$
91. 17.0 cm sobre el piso

CAPÍTULO 10

Exámenes rápidos

- c)
- b)
- c)
- c)
- A diferencia de hielo terrestre, el hielo que está en el océano ya desplaza el agua, por lo que derretirse el nivel de los océanos no va a cambiar mucho.
- b)

Preguntas de ejemplo

- Grados celsius
- Verdadero

- Cuando la temperatura disminuye, la tensión en el alambre aumenta.
- La magnitud del cambio de temperatura requerido sería más grande porque el coeficiente de expansión lineal del acero es menor que el del cobre.
- Vidrio, aluminio, alcohol etílico, mercurio.
- El globo se expande.
- La presión es ligeramente reducida.
- El volumen del aire disminuye.
- La presión se duplicaría.
- Verdadero.

Preguntas de opción múltiple

- e)
- c)
- d)
- c)
- b)
- b)
- i) b) ii) d)

Preguntas conceptuales

- a) Un plato de cristal ordinario se romperá generalmente debido a las tensiones que se acumulan mientras que el cristal se expande cuando se está calentando. b) El coeficiente de expansión para el vidrio de Pyrex es mucho más bajo que el del vidrio ordinario. Así, el plato de Pyrex se expandirá mucho menos que el plato del vidrio ordinario y no desarrolla normalmente la suficiente tensión para causar fractura.
- El mercurio debe tener el coeficiente de expansión más grande. Mientras que se eleva la temperatura de un termómetro, el mercurio y el vidrio se expanden. Si ambos tuvieran el mismo coeficiente de expansión lineal, el mercurio y la cavidad en el vidrio se expandirán por la misma cantidad, y no habría movimiento evidente del extremo de la columna de mercurio en relación con la escala de calibración sobre el vidrio. ¡Si el cristal se expandiera más que el mercurio, la lectura iría abajo mientras que la temperatura para arriba! Ahora que hemos analizado esto conceptualmente, podemos ver en una tabla y encontrar que el coeficiente para el mercurio es cerca de 20 veces más grande que para el vidrio, así que la expansión de éste puede ser despreciada.
- Podemos pensar en cada bacteria como un pequeño bolso del líquido que contiene burbujas del gas a muy alta presión. La ley de los gases ideales indica que si la bacteria se eleva rápidamente a la superficie, entonces su volumen debe aumentar dramáticamente. De hecho, el aumento en volumen es suficiente para romper la bacteria.
- El agua adicional se evapora en la burbuja, de modo que el número de moles n aumenta.
- Los bolsos de virutas contienen una muestra sellada del aire. Cuando los bolsos se llevan a la montaña, la presión atmosférica externa en ellos se reduce. Consecuentemente, la diferencia entre la presión del aire dentro de los bolsos y de presión reducida exterior es una fuerza neta que empuja el plástico del bolso hacia fuera.
- El coeficiente de expansión para el metal es generalmente mayor que el del vidrio; por lo tanto, la tapa de metal se afloja porque se expande más que el aquél.
- A medida que el agua sube de temperatura, se expande o sufre un aumento de presión o ambos. El exceso de volumen se derrama fuera del sistema de refrigeración, o de lo contrario la presión se elevaría muy alto. La expansión del propio radiador ofrece sólo un poco de alivio, ya que los sólidos en general se expanden mucho menos que los líquidos para un cambio positivo en la temperatura.

Problemas

- a) -460°C b) 37.0°C c) -280°C
- a) -253°C b) -423°F

9. a) 107 °F; b) Sí. La temperatura normal del cuerpo humano es 98.6 °F, así que el paciente tiene una alta fiebre que necesita atención inmediata.
11. 31 cm
13. 55.0 °C
15. a) -179 °C (alcanzable) b) -376 °C (debajo de 0 K, inalcanzables)
17. a) de $11.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ b). No, aunque la densidad del oro sería menor en un día caliente, la masa de la barra sería la misma sin importar su temperatura, y eso es lo que usted está pagando. (Observe que el volumen de la barra aumenta con el incremento de la temperatura, mientras que su densidad disminuye. Su masa, sin embargo, permanece constante.)
19. 1.02×10^3 galones
21. a) 0.10 L b) 2.009 L c) 1.0 cm
23. 2.7×10^2 N
25. 0.548 gal
27. a) aumenta b) 1.603 cm
29. a) 627 °C b) 927 °C
31. a) 2.5×10^{19} moléculas b) 4.1×10^{-21} mol
33. 4.28 atm
35. 7.1 m
37. 16.0 cm³
39. 6.21×10^{-21} J
41. 6.64×10^{-27} kg
43. a) 2.01×10^4 K b) 901 K
45. 16 N
47. 0.663 mm a la derecha a 78° bajo la horizontal
49. 3.55 L
51. 35.016 m
53. 6.57 MPa
55. a) 99.8 mL b) El cambio de volumen del frasco es muy pequeño porque el Pyrex tiene un coeficiente de expansión mucho más pequeño que la acetona. Por lo tanto, el cambio en el volumen del frasco tiene un efecto insignificante en la respuesta.
57. b) La expansión del mercurio es casi 20 veces la del frasco (suponiendo vidrio Pyrex).
59. 2.7 m
61. a) $\theta = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)L_0(\Delta T)}{\Delta r}$
c) La barra doblada en la dirección opuesta.
63. a) Ningún torque actúa sobre el disco por lo que su momento angular es constante. Sí, la velocidad angular aumenta. A medida que el disco se enfría, su radio y por lo tanto, su momento de inercia, disminuyen. La conservación del momento angular, requiere que su velocidad angular aumente.
b) 25.7 rad/s

CAPÍTULO 11

Exámenes rápidos

1. a) Agua, vidrio, hierro. b) Hierro, vidrio, agua.
2. b) Las pendientes son proporcionales al recíproco del calor específico, así que un gran calor específico resulta en una pendiente pequeña, lo que significa que se requiere más energía para alcanzar un cambio dado de temperatura.
3. c)
4. b)
5. a) 4 b) 16 c) 64

Preguntas de ejemplo

1. Desde el punto de vista de la física, repeticiones más rápidas no afectan la respuesta final; sin embargo fisiológicamente, la tasa metabólica del levantador de pesas aumentaría.
2. c)
3. No
4. c)
5. No

6. La masa de hielo derretida se duplicaría.
7. Los asteroides de níquel y hierro tienen una densidad más alta y por lo tanto una mayor masa, lo que significa que pueden entregar más energía en el impacto para una velocidad dada.
8. El metabolismo de un corredor es mucho más alto cuando corre que cuando está en reposo y debido a que los músculos son eficientes sólo un 20%, una gran cantidad de energía térmica se crea al azar a través de un esfuerzo muscular. En consecuencia, el corredor tiene que eliminar mucha más energía térmica cuando corre que en estado de reposo. Una vez que la carrera termina, los esfuerzos musculares cesan y el metabolismo comienza a volver a la normalidad, por lo que el corredor comienza a sentir frío.
9. a)
10. a)

Preguntas de opción múltiple

1. b)
3. d)
5. e)
7. d)
9. c)
11. e)

Preguntas conceptuales

1. Cuando frota la superficie, aumenta la temperatura de la región frotada. Con la superficie del metal, algo de esta energía es transferida lejos del sitio frotado por conducción. Por lo tanto, la temperatura en el área frotada no es tan alta para el metal como lo es para la madera y se siente relativamente más frío que la madera.
3. La fruta pierde energía en el aire por la radiación y la convección de su superficie. Antes de que los cristales de hielo puedan formarse dentro de la fruta para romper membranas celulares, toda el agua líquida en la piel tendrá que congelarse. El retraso puede prevenir daño dentro de la fruta en una noche escarchada. Además, una película superficial de hielo proporciona un cierto aislamiento a la lenta pérdida de energía subsecuente por conducción dentro de la fruta.
5. Una de las maneras que los objetos transfieren energía es por la radiación. La tapa de la caja se orienta hacia el cielo claro. La radiación emitida por la tapa de la caja entra hacia arriba al espacio. Hay poca radiación que viene abajo del espacio a la tapa de la caja. La radiación que sale de los lados de la caja es absorbida por el entorno. Sin embargo, la radiación del ambiente (árbol, casas, coches, etc.), puede incorporarse por los lados de la caja, manteniéndolos más calientes que la tapa. Consecuentemente, la tapa es la porción más fría y se le forma escarcha primero.
7. a) La operación de una bobina de inmersión depende de la convección del agua para mantener una temperatura segura. Mientras que el agua cerca de una bobina se calienta, el agua calentada flota en la parte superior debido al principio de Arquímedes. La temperatura de la bobina no puede ser más alta que la temperatura a la que hierve el agua, 100°C. Si la bobina funciona en aire, se reduce la convección y el límite superior de 100°C es removida. Consecuentemente, la bobina puede llegar a dañarse si se calienta en exceso. b) Si la bobina se utiliza en un intento por calentar un líquido grueso como un guisado, la convección no puede ocurrir lo bastante rápido para llevar energía lejos de la bobina, de modo que pueda llegar a dañarse otra vez si se calienta en exceso.
9. El azulejo es un mejor conductor de la energía que la alfombra, así que el azulejo conduce la energía más lejos de sus pies más rápidamente que el piso alfombrado.
11. La gran cantidad de energía almacenada en el concreto durante el día con la caída de Sol en ella se libera en la noche, dando por resultado una temperatura media total más alta en la ciudad que en el campo. El aire calentado en una ciudad se eleva, pues se ha desplazado por un aire más fresco que se movía adentro desde el campo, así que las brisas de la tarde tienden a soplar del campo a la ciudad.

Problemas

1. 16.9 °C
3. a) 1.67×10^{18} J b) 52.9 años
5. a) 25.8 °C b) No. La energía potencial gravitatoria es proporcional a la masa, al igual que el cambio de temperatura.
7. a) 4.5×10^3 J b) 910 W c) 0.87 Cal/s d) El exceso de energía térmica es transportada por conducción y convección a la superficie de la piel y se dispone a la evaporación del sudor.
9. 176 °C
11. 88 W
13. 4.2×10^6 J
15. 0.845 kg
17. 80 g
19. a) 1.82×10^3 J / kg · °C b) No se puede hacer una identificación definitiva. Podría ser el berilio. c) El material podría ser una aleación desconocida o de un material que no figura en la tabla.
21. 0.26 kg
23. a) 21.3°C b) 178 J/kg · K c) $N_{\text{Sn}} = 2.03 \times 10^{24}$ átomos; $N_{\text{Pb}} = 1.16 \times 10^{24}$ átomos d) $N_{\text{Sn}}/N_{\text{Pb}} = 1.75$; $c_{\text{Sn}}/c_{\text{Pb}} = 1.77$. El calor específico de un elemento es proporcional al número de átomos por unidad de masa de ese elemento.
25. 16 °C
27. 65 °C
29. 2.3 km
31. 16 °C
33. a) $t_{\text{hervir}} = 2.8$ min, b) $t_{\text{evap}} = 18$ min
35. a) todo el hielo se derrite, $T_f = 40^\circ\text{C}$ b) 8.0 derretimientos de g, $T_f = 0^\circ\text{C}$
37. a) La bala pierde toda su energía cinética mientras es detenida por el hielo. También, la energía térmica se debe quitar de la bala para enfriarla de 30.0 a 0 °C. La suma de estas dos energías es igual a la energía que le lleva derretir parte del hielo. La temperatura final de la bala es 0 °C porque no todo el hielo se derrite. b) 0.294 g
39. 3×10^3 W
41. 402 MW
43. 709 s
45. 9.0 cm
47. 2.7×10^7 J
49. 16:1
51. 12 kW
53. 2.3 kg
55. 29 °C
57. 8.00×10^2 J/kg · °C. Este valor difiere del valor tabulado por 11%, así que está dentro del 15%.
59. 66.7 min
61. 51.2 °C
63. a) siete veces b) como el automóvil se detiene, parte de su energía cinética se transforma en energía interna debido a la resistencia del aire. Tan pronto como los frenos están por encima de la temperatura del aire, éstos transfieren energía por calor en el aire. Si llegan a una temperatura alta, transfieren energía muy rápidamente.
65. b) 2.7×10^6 J/kg · °C
67. 12 h
69. 3.85×10^{26} J
71. 1.4 kg
73. a) 75.0°C b) 36 kJ

CAPÍTULO 12

Exámenes rápidos

1. b)
2. A es isovolumétrico, B es adiabático, C es isotérmico, D es isobárico
3. c)
4. b)

5. El número 7 es el resultado más probable. Los números 2 y 12 son los resultados menos probables.

Problemas de ejemplo

1. No
2. No
3. Verdadero
4. Verdadero
5. El cambio en temperatura siempre debe ser negativo porque el sistema trabaja en el entorno a expensas de su energía interna y ninguna energía térmica se puede proveer al sistema para compensar la pérdida.
6. Un gas diatómico hace más trabajo bajo estas suposiciones.
7. Dióxido de carbono gaseoso podría tener una temperatura menor a 380 K.
8. Falso
9. a)
10. No. La eficiencia mejora solamente si el cociente $|Q_c/Q_h|$ llega a ser más pequeño. Además, un aumento demasiado grande en Q_h dañará el motor, así que es un límite aunque Q_c permanezca fijo.
11. Si la trayectoria de B a C fuera una línea recta, se haría más trabajo por ciclo.
12. No. El compresor funciona y calienta la cocina. Con la puerta del refrigerador abierta, el compresor funcionaría continuamente.
13. Falso
14. Plata, plomo, hielo
15. Falso
16. La energía térmica creada por su cuerpo durante el ejercicio sería disipada en el entorno, aumentando la entropía del Universo.
17. Las comidas pasadas por alto pueden bajar el metabolismo básico, reduciendo la tasa en la cual se utiliza la energía. Cuando se hace una comida grande más adelante, el metabolismo más bajo significa que más energía del alimento será almacenada y se ganará peso aunque se haya consumido el mismo número de calorías totales en un día.

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. c)
5. e)
7. b)
9. d)
11. c)
13. b)
15. b)
17. b)

Preguntas conceptuales

1. Primero, la eficiencia del motor del automóvil no puede exceder la eficiencia de Carnot: está limitado por la temperatura del combustible quemado y la temperatura del entorno al que se descargan los gases de combustión. En segundo lugar, el monoblock del motor no se puede permitir exceder cierta temperatura. Tercero, cualquier motor práctico tiene fricción, quema incompleta del combustible y sistema de límites de tiempo para transferir energía por calor.
3. La energía que está dejando al cuerpo por el trabajo y el calor se sustituye por medio de los procesos biológicos que transforman la energía química del alimento que el individuo comió, en energía interna. Así, la temperatura del cuerpo puede ser mantenida.
5. Si no hay cambio en energía interna, entonces, según la primera ley de la termodinámica, el calor es igual al negativo del trabajo realizado sobre el gas (y así igual al trabajo hecho por el gas). Así, $Q = -W = W_{\text{por el gas}}$.

7. Hablando prácticamente, no es posible crear un motor de calor que no cree ninguna contaminación térmica, porque debe haber una fuente de calor caliente (depósito de energía) y un disipador de calor frío (depósito a baja temperatura de energía). El motor de calor calentará el disipador de calor frío y refrescará la fuente de calor. Si cualquiera de esos dos acontecimientos es indeseable, entonces habrá contaminación térmica.

Bajo algunas circunstancias, la contaminación térmica sería insignificante. Por ejemplo, suponga que un satélite en el espacio hace funcionar una bomba de calor entre su lado soleado y su lado oscuro. El satélite interceptaría algo de la energía que recolectó en un lado y "lo agruparía" al lado oscuro. Puesto que ni uno ni otro de esos efectos serían particularmente indeseables, podría decirse que tal bomba de calor no produce ninguna contaminación térmica.

9. Aunque no se transfiere ninguna energía en o del sistema por el calor, el trabajo se hace sobre el sistema como resultado de la agitación. Por lo tanto, la temperatura y la energía interna del café aumentan.

11. La primera ley es una declaración de la conservación de la energía que dice que no podemos idear un proceso cíclico que produzca más energía que la que ponemos en ella. Si el proceso cíclico admite energía por calor y hace trabajo hacia fuera, llamamos al dispositivo un motor de calor. Además de la limitación de la primera ley, la segunda ley dice que, durante la operación de un motor de calor, una cierta energía se debe expulsar al entorno por calor. En consecuencia, es teóricamente imposible construir un motor de calor que funcione con 100% de eficiencia.

13. Si el sistema está aislado, no hay energía que entre o salga del sistema por calor, trabajo u otros procesos de transferencia. Dentro del sistema la energía puede cambiar de una forma a otra, pero ya que la energía se conserva, estas transformaciones no pueden afectar a la cantidad total de energía. La energía total es constante.

Problemas

1. a) -465 J b) El signo negativo para el trabajo realizado sobre el gas indica que la expansión del gas trabaja positivamente en el entorno.
3. a) $-6.1 \times 10^5 \text{ J}$ b) $4.6 \times 10^5 \text{ J}$
5. a) -810 J b) -507 J c) -203 J
7. 96.3 mg
9. a) $1.09 \times 10^3 \text{ K}$ b) -6.81 kJ
13. a) -88.5 J b) 722 J
15. a) 567 J b) 167 J
17. a) -180 J b) $+188 \text{ J}$
19. a) 3.26 kJ b) 0 c) -3.25 kJ d) La energía interna podría incrementarse, resultando en un crecimiento de la temperatura del gas.
21. a) $-4.58 \times 10^4 \text{ J}$ b) $4.58 \times 10^4 \text{ J}$ c) 0
23. a) 40.6 moles b) 506 J/K c) $W = 0$ d) 16.0 kJ e) 31.6 K f) 332 K g) 5.53 atm
25. a) 0.95 J b) $3.2 \times 10^5 \text{ J}$ c) $3.2 \times 10^5 \text{ J}$
27. b) $1.3 \times 10^{56} \text{ K}$
29. 405 kJ
31. 0.540 (o 54.0%)
33. a) 0.25 (o 25%) b) $3/4$
35. a) 0.672 (o 67.2%) b) 58.8 kW
37. a) 0.294 (o 29.4%) b) $5.00 \times 10^2 \text{ J}$ c) 1.67 kW
39. a) $4.50 \times 10^6 \text{ J}$ b) $2.84 \times 10^7 \text{ J}$ c) 68.2 kg
41. $1/3$
43. (a 30.6% b) 985 MW
45. 143 J/K
47. a) -1.2 kJ/K b) 1.2 kJ/K
49. 57.2 J/K
51. 3.27 J/K
53. a)

Resultado final	Posibles lanzamientos	Número total de resultados iguales
Todos H	HHHH	1
1T, 3H	HHHT, HHHT, HTHH, THHH	4
2T, 2H	HHTT, HTHT, THHT, HTTH, THTH, TTHH	6
3T, 1H	TTTH, TTHT, THTT, HTTT	4
Todos T	TTTT	1

b) Todos H o todos T c) 2H y 2T

55. -6.5 MJ
57. 1 300 W
59. 18°C
61. a) 12.2 kJ b) 4.05 kJ c) 8.15 kJ
63. a) 26 J b) $9.0 \times 10^5 \text{ J}$ c) $9.0 \times 10^5 \text{ J}$
65. a) 2.49 kJ b) 1.50 kJ c) -990 J
67. a) $T_{\otimes} = 1.20 \times 10^2 \text{ K}$; $T_{\oplus} = 722 \text{ K}$
b) $1.10 \times 10^5 \text{ J}$ c) $7.50 \times 10^4 \text{ J}$ d) $1.85 \times 10^5 \text{ J}$
69. 0.146 ; 486 kcal
71. a) $2.6 \times 10^3 \text{ tons métricas/día}$ b) $\$7.6 \times 10^6/\text{años}$
c) $4.1 \times 10^4 \text{ kg/s}$

CAPÍTULO 13

Exámenes rápidos

1. d)
2. c)
3. b)
4. a)
5. c)
6. d)
7. c), b)
8. a)
9. b)

Preguntas de ejemplo

1. No. Si un resorte se estira demasiado, no satisface más la ley de Hooke y puede deformarse permanentemente.
2. $k_{\text{eq}} = k_1 + k_2$
3. Falso
4. Verdadero
5. Falso
6. b)
7. Verdadero
8. No
9. a), c)
10. La velocidad se duplica.

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. a)
5. b)
7. a)
9. e)
11. d)
13. c)

Preguntas conceptuales

1. No. Puesto que la energía total es $E = \frac{1}{2}kA^2$, cambiar la masa del objeto, mientras A se mantenga constante, no tiene ningún efecto sobre la energía total. Cuando el objeto está a un desplazamiento x del equilibrio, la energía potencial es $\frac{1}{2}kx^2$, independiente de la masa y la energía cinética es $EC = E - \frac{1}{2}kx^2$, también independiente de la masa.

3. Cuando el resorte con los dos objetos en extremos opuestos se pone en oscilación en el espacio, la bobina en el centro exacto del resorte no se mueve. Así, podemos imaginarnos fijar a la bobina con una abrazadera de centro en el lugar sin afectar el movimiento. Si hacemos esto, tenemos dos sistemas oscilantes separados, uno en cada lado de la abrazadera. El resorte a la mitad en cada lado de la abrazadera tiene dos veces la constante de resorte del resorte completo, como se muestra con el siguiente argumento: la fuerza ejercida por un resorte es proporcional a la separación de las bobinas cuando el resorte está extendido. Imagine que extendemos un resorte una distancia dada y medimos la distancia entre las bobinas. Después cortamos el resorte por la mitad. Si una de las mitades ahora es estirada por la misma distancia, las bobinas estarán dos veces separadas tan lejanas como estaban en el resorte completo. Así, toma dos veces más fuerza estirar la mitad del resorte, con lo que concluimos que la mitad del resorte tiene una constante que es dos veces la del resorte completo. Por lo tanto, nuestro sistema fijo con la abrazadera de objetos en dos mitades de resortes vibrará con una frecuencia que es mayor que f por un factor de la raíz cuadrada de dos.
5. Suponemos que la fuerza de empuje que actúa en la esfera es insignificante con respecto a su peso, aun cuando la esfera esté vacía. También suponemos que la sacudida es pequeña comparada con la longitud del péndulo. Entonces, la frecuencia del péndulo es $f = 1/T = (1/2\pi)\sqrt{g/L}$, que es independiente de la masa. Así, la frecuencia no cambiará cuando el agua escape.
7. a) La pelota que rebota no es un ejemplo de movimiento armónico simple. La pelota no sigue una función sinusoidal para su posición en función de tiempo. b) El movimiento diario de un estudiante tampoco es un movimiento armónico simple, puesto que el estudiante permanece en una localización fija por un largo plazo. Si este movimiento fuera sinusoidal, el estudiante se movería cada vez más lentamente mientras que se acerca al escritorio de ella y tan pronto como ella se sentara en el escritorio, comenzaría a moverse de regreso hacia su hogar otra vez.
9. La velocidad de una onda en una cuerda viene dada por $v = \sqrt{F/\mu}$. Esto nos dice que la velocidad es independiente de la frecuencia de la onda. Por lo tanto, duplicar la frecuencia no afecta la velocidad.
11. La energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad, y la energía potencial es proporcional al cuadrado del desplazamiento. Por lo tanto, ambas deben ser cantidades positivas.

Problemas

1. a) 17 N a la izquierda b) 28 m/s^2 a la izquierda
 3. a) 6.58 N b) 10.1 N
 5. 0.242 kg
 7. a) 0.206 m b) -0.042 l m c) El bloque oscila alrededor de una estrecha posición del resorte con una amplitud de 0.248 m.
 9. a) 60 J b) 49 m/s
 11. $2.94 \times 10^3 \text{ N/m}$
 13. 0.478 m
 15. a) 1 630 N/m b) 47.0 J c) 7.90 kg d) 2.57 m/s e) 26.1 J f) 20.9 J g) -0.201 m
 17. a) 0.28 m/s b) 0.26 m/s c) 0.26 m/s d) 3.5 cm
 19. 39.2 N
 21. a) 1.53 J b) 1.75 m/s c) 1.51 m/s
 23. El desplazamiento horizontal está descrito por $x(t) = A \cos \omega t$, donde A es la distancia del centro de la rueda al botón del manubrio.
 25. 0.63 s
 27. a) 1.0 s b) 0.28 m/s c) 0.25 m/s
 29. a) 5.98 m/s b) 206 N/m c) 0.238 m
 31. a) 11.0 N hacia la izquierda b) 0.881 oscilaciones
 33. $v = \pm \omega A \sin \omega t$, $a = -\omega^2 A \cos \omega t$
 35. a) 1.46 s b) 9.59 m/s²

37. a) lento b) 9:47
 39. a) $L_{\text{Tierra}} = 25 \text{ cm}$ b) $L_{\text{Marte}} = 9.4 \text{ cm}$ c) $m_{\text{Tierra}} = 0.25 \text{ kg}$ c) $m_{\text{Marte}} = 0.25 \text{ kg}$
 41. a) 4.13 cm b) 10.4 cm c) $5.56 \times 10^{-2} \text{ s}$ d) 187 cm/s
 43. a) $5.45 \times 10^{14} \text{ Hz}$ b) $1.83 \times 10^{-15} \text{ s}$
 45. 31.9 cm
 47. 58.8 s
 49. 80.0 N
 51. $5.20 \times 10^2 \text{ m/s}$
 53. a) 30.0 N b) 25.8 m/s
 55. 28.5 m/s
 57. a) 0.051 0 kg/m b) 19.6 m/s
 59. a) 13.4 m/s b) El trabajador podría tirar un objeto como una bola de nieve a un extremo de la línea y dar un tirón para arriba al sistema y generar un pulso; después utilizar un cronómetro para medir el tiempo que le toma al pulso para recorrer la longitud de la línea. Con esta medida, el trabajador tendría una estimación de la velocidad de la onda, que alternativamente se puede utilizar para estimar la tensión.
 61. a) La interferencia constructiva da $A = 0.50 \text{ m}$ b) La interferencia destructiva da $A = 0.10 \text{ m}$
 63. a) 219 N/m b) 6.12 kg
 65. a) 1.68 s b) 16.8 N/m
 67. a) 588 N/m b) 0.700 m/s
 69. 6.62 cm
 71. a) Usando s para el desplazamiento del equilibrio a lo largo del arco, la fuerza de reposo en el globo toma la forma de la ley de Hooke: $F_{\text{tangencial}} = -[(\rho_{\text{aire}} - \rho_{\text{He}})Vg/L]s$ b) $T = 1.40 \text{ s}$
 75. a) 15.8 rad/s b) 5.23 cm

CAPÍTULO 14

Exámenes rápidos

1. c)
 2. c)
 3. b)
 4. b), e)
 5. d)
 6. a)
 7. b)

Problemas de ejemplo

1. El caucho es mucho más fácil de comprimir que el aluminio sólido, por lo tanto el aluminio debe tener un módulo volumétrico mayor y por la ecuación 14.1, una mayor velocidad del sonido.
 2. 3.0 dB
 3. Usted debe aumentar su distancia de la fuente de sonido en un factor de 5.
 4. Sí. Cambia porque la velocidad del sonido cambia con la temperatura. La respuesta b) es la correcta.
 5. No
 6. Verdadero
 7. Verdadero
 8. b)
 9. Verdadero
 10. Verdadero
 11. Las notas son tan diferentes una de otra en una frecuencia que la frecuencia de pulsación es muy alta y no puede ser distinguida.

Preguntas de opción múltiple

1. b)
 3. a)
 5. d)
 7. d)
 9. e)
 11. b)
 13. e)
 15. c)

Preguntas conceptuales

1. a) alto b) bajo
3. Sí. La velocidad del sonido en el aire es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta, \sqrt{T} . La velocidad del sonido es mayor en el aire más caliente, por lo que el pulso de la cámara volverá antes de lo que lo haría en un día frío desde un objeto a la misma distancia. La cámara podría interpretar un objeto como si estuviera más cerca de lo que realmente está en un día caluroso.
5. Los dispositivos electrónicos sofisticados rompen el rango de frecuencia de cerca de 60 a 4 000 hertz usados en las conversaciones telefónicas en varias bandas de frecuencia y después las mezclan en un patrón predeterminado de modo que lleguen a ser ininteligibles. El descodificador, por supuesto, mueve las bandas nuevamente dentro de su orden apropiado.
7. a) El eco es corrimiento Doppler y el corrimiento es como una fuente en movimiento y un observador móvil. El sonido que deja su cuerno en la dirección delantera es corrimiento Doppler a una frecuencia más alta, porque está viniendo de una fuente móvil. Como el sonido se refleja y regresa hacia usted, quien es un observador móvil, así que hay un segundo corrimiento Doppler a una frecuencia incluso más alta. b) Si el sonido que se refleja de la nave espacial viene hacia usted, hay un diferente corrimiento de la fuente en movimiento a una frecuencia incluso más alta. La superficie de reflejo de la nave espacial actúa como fuente móvil.
9. La cuerda del arco se jala lejos del equilibrio y se suelta, de una forma similar a la que se tira y se jala una cuerda de la guitarra cuando se toca. Así, las ondas estacionarias serán excitadas en la cuerda del arco. Si la flecha parte del centro exacto de la cuerda, entonces una serie de armónicos impares será excitada. Los armónicos pares no serán excitados, porque tienen un nodo en el punto donde la cuerda exhibe su máximo desplazamiento.
11. Los dos motores están funcionando a frecuencias levemente diferentes, produciendo así una frecuencia de pulsación entre ellas.

Problemas

1. a) 5.56 km. b) No, la velocidad de la luz es mucho mayor que la velocidad del sonido, así que el intervalo necesario para que la luz lo alcance es despreciable comparado con el intervalo para el sonido.
3. 358 m/s
5. 515 m
7. La longitud de onda disminuye en 2.5 mm
9. a) El pulso que viaja a través del riel b) 23.4 ms
11. 150 dB
13. $3.0 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$
15. a) $1.00 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ b) 105 dB
17. 37 dB
19. a) $1.3 \times 10^2 \text{ W}$ b) 96 dB
23. a) 75 Hz disminuye b) 0.948 m
25. 596 Hz
27. 9.09 m/s
29. 19.7 m
31. a) 56.3 s b) 56.6 km más lejos
33. A distancias de 0.089 m, 0.303 m, 0.518 m, 0.732 m, 0.947 m y 1.16 m de cualquiera de los altavoces
35. 800 m
37. a) 0.240 m b) 0.855 m
39. a) Nodos en 0, 2.67 m, 5.33 m y 8.00 m; antinodos a 1.33 m, 4.00 m y 6.67 m b) 18.6 Hz
41. 378 Hz
43. a) $1.85 \times 10^{-2} \text{ kg/m}$ b) 90.6 m/s c) 152 N d) 2.20 m e) 8.33 m
45. a) 78.9 N b) 211 Hz
47. 19.976 kHz
49. 58 Hz
51. 3.1 kHz
53. a) 0.552 m b) 316 Hz
55. 5.64 pulsos/s

57. 3.85 m/s alejándose de la estación o 3.77 m/s hacia la estación
59. a) 1.99 pulsos/s b) 3.38 m/s
61. 1.76 cm
63. a) 0.642 W b) 0.43%
65. 67.0 dB
67. $r_1 = 3.3 \text{ m}$ y $r_2 = 32.7 \text{ m}$
69. 262 kHz
71. 64 dB
73. a) 439 Hz b) 441 Hz
75. $1.34 \times 10^4 \text{ N}$

CAPÍTULO 15

Preguntas rápidas

1. b)
2. b)
3. c)
4. a)
5. c) y d)
6. a)
7. c)
8. b)
9. d)
10. b) y d)

Preguntas de ejemplo

1. $\frac{1}{4}$
2. a)
3. Cuarto cuadrante
4. La gotita suspendida aceleraría hacia abajo al doble de la aceleración de la gravedad.
5. El ángulo ϕ aumentaría.
6. c)
7. La carga sobre la superficie interior sería negativa.
8. Cero

Preguntas de opción múltiple

1. b)
3. a)
5. b)
7. d)
9. e)
11. e)
13. a)

Preguntas conceptuales

1. Los electrones se removieron del objeto. La carga negativa se ha quitado de la barra inicialmente neutral, lo que resulta en una carga neta positiva en la barra. Los protones no se pueden quitar de la barra; los protones no se mueven porque están dentro de los núcleos de los átomos de la barra.
3. No. La carga sobre la esfera metálica reside sobre su superficie exterior, de modo que la persona puede tocar la superficie sin causar alguna transferencia de carga.
5. No. La vida no sería diferente si los electrones fueran cargados + y los protones cargados -. Las cargas opuestas se atraen todavía y las cargas iguales se repelen. El nombramiento de cargas + y - no es más que una convención.
7. Mueva un objeto A con una carga positiva neta de modo que esté cerca, más no en contacto, de un objeto metálico neutro B que esté aislado del suelo. La presencia de A polarizará a B, lo que hará que un exceso de carga negativa exista en el lado más cercano de A y un exceso de carga positivo de igual magnitud exista en el lado más lejano de A. Mientras A todavía esté cerca de B, toque B con su mano. Entonces electrones adicionales fluirán de tierra, a través de su cuerpo y hacia B. Con A todavía cerca, mas no en contacto con B, quite su mano de B, lo que por lo tanto atrapa los

electrones en exceso en B . Cuando ahora quite A , B quedará con exceso de electrones o una carga negativa neta. Mediante repulsión mutua, esta carga negativa ahora se dispersará de manera uniforme sobre toda la superficie de B .

9. Ella no se conmociona. Ella se convierte en parte de la cúpula del generador Van de Graaff, y las cargas fluyen en su cuerpo. Estas no saltan a su cuerpo a través de una chispa, sin embargo, no se conmociona.
11. El papel seco es inicialmente neutral. El peine atrae el papel porque su campo eléctrico hace que las moléculas del papel se polaricen, el papel como un todo no puede ser polarizado, ya que es un aislante. Cada molécula está polarizada, por lo que su lado sin carga está más cerca del peine cargado que su lado con carga, por lo que la molécula experimenta una fuerza neta atractiva hacia el peine. Una vez que el papel entra en contacto con el peine, como la carga puede ser transferida desde el peine al papel, y si una cantidad suficiente de esta carga se transfiere, el papel cargado es entonces rechazado por el peine.
13. El efecto de blindaje eléctrico de los conductores depende del hecho de que hay dos tipos de carga: positiva y negativa. Como resultado, las cargas se pueden mover dentro del conductor de modo que la combinación de cargas positiva y negativa establece un campo eléctrico que cancela exactamente el campo externo dentro del conductor y cualquier cavidad dentro del conductor. Sin embargo, sólo hay un tipo de carga de gravitación, porque no hay masa negativa. Como resultado, el blindaje gravitacional no es posible. Una habitación no puede blindarse gravitacionalmente porque la masa siempre es positiva o cero, nunca negativa.
15. Sólo puede concluir que la carga neta dentro de la superficie gaussiana es positiva.

Problemas

1. a) 8.7×10^{-8} N b) La fuerza es repulsiva
3. a) 2.36×10^{-5} C b) Las cargas inducen cargas opuestas en las mamparas, pero la carga inducida en la mampara cerca de la bola B es mayor debido a la mayor carga de la bola B . Por lo tanto, el sistema se mueve lentamente hacia la mampara más cercana a la bola B .
5. a) 36.8 N b) 5.54×10^{27} m/s²
7. 49.3 N/m
9. a) 2.2×10^{-5} N (atracción) b) 9.0×10^{-7} N (repulsión)
11. 1.38×10^{-5} N a 77.5° abajo del eje x negativo
13. 0.437 N a -85.3° del eje $+x$.
15. 7.2 nC
17. 2.07×10^3 N/C abajo
19. 3.15 N (hacia el norte)
21. a) $\frac{mg}{|Q|} \sin \theta$ b) 3.19×10^3 N/C abajo de la rampa
23. a) 6.12×10^{10} m/s² b) $19.6 \mu\text{s}$ c) 11.8 m d) 1.20×10^{-15} J
25. $E_x = (1 - \sqrt{2})k_e \frac{Q}{d^2}$, $E_y = \sqrt{2}k_e \frac{Q}{d^2}$
27. 1.8 m a la izquierda de la carga de $-2.5 \mu\text{C}$
29. cero
35. a) 0 b) $5 \mu\text{C}$ adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera c) 0 adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera d) 0 adentro, $-5 \mu\text{C}$ afuera
37. 1.3×10^{-3} C
39. a) 2.54×10^{-15} N b) 1.59×10^4 N/C radialmente hacia afuera
41. a) $858 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$ b) 0 c) $657 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}$
43. $-Q/\epsilon_0$ para S_1 ; 0 para S_2 ; $-2Q/\epsilon_0$ para S_3 ; 0 para S_4
45. a) 0 b) $k_e q/r_2$ hacia afuera
47. a) -7.99 N/C b) 0 c) 1.44 N/C d) 2.00 nC en la superficie interior; 1.00 nC en la superficie exterior
49. 115 N
51. 24 N/C en la dirección x positiva
53. a) $E = 2k_e q b (a^2 + b^2)^{-3/2}$ en la dirección x positiva b) $E = k_e Q b (a^2 + b^2)^{-3/2}$ en la dirección x positiva

$$55. F_x = (0.354)k_e \frac{Q^2}{d^2}; F_y = (1.65)k_e \frac{Q^2}{d^2}$$

57. 4.4×10^5 N/C
59. 1.14×10^{-7} C en una esfera 5.69×10^{-8} C en la otra
61. a) 0 b) 7.99×10^7 N/C (hacia afuera) c) 0 d) 7.34×10^6 N/C (hacia afuera)
63. a) 1.00×10^3 N/C b) 3.37×10^{-8} s c) acelera a 1.76×10^{14} m/s² en la dirección opuesta a la del campo eléctrico

CAPÍTULO 16

Preguntas rápidas

1. b)
2. a)
3. b)
4. d)
5. d)
6. c)
7. a)
8. c)
9. a) C disminuye. b) Q permanece igual. c) E permanece igual. d) ΔV aumenta. e) La energía almacenada aumenta.
10. a) C aumenta. b) Q aumenta. c) E permanece igual. d) ΔV permanece igual. e) La energía almacenada aumenta.
11. a)

Preguntas ejemplo

1. Verdadero
2. Verdadero
3. Falso
4. a)
5. Tres
6. Cada respuesta se reduciría por un factor de un medio.
7. Un cuarto
8. La caída de voltaje es la más pequeña a través del capacitor de $24 \mu\text{F}$ y más grande a través del capacitor de $3.0 \mu\text{F}$.
9. El capacitor de $3.0 \mu\text{F}$
10. c)
11. b)
12. $C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$

Preguntas de opción múltiple

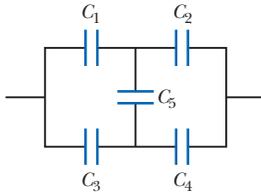
1. b)
3. d)
5. b)
7. a)
9. a)
11. c)

Preguntas conceptuales

1. a) El protón se mueve en una línea recta con aceleración constante en dirección del campo eléctrico. b) Conforme su velocidad aumenta, su energía cinética aumenta y la energía potencial eléctrica asociada con el protón disminuye.
3. El trabajo realizado al separar más las placas del capacitor se transfiere en energía eléctrica adicional almacenada en el capacitor. La carga es constante y la capacitancia disminuye, pero la diferencia de potencial entre las placas aumenta, lo que resulta en un aumento en la energía eléctrica almacenada.
5. Si la línea de transmisión tiene contacto eléctrico con el metal del automóvil, elevará el potencial del automóvil a 20 kV. También elevará el potencial de su cuerpo a 20 kV, porque usted está en contacto con el automóvil. En sí mismo, este no es el problema. Sin embargo, si se baja del automóvil, su cuerpo a 20 kV hará contacto con el suelo, que está a cero volts. Como

resultado, una corriente pasará a través de su cuerpo y probablemente se lesionará. Por ende, es mejor permanecer en el auto hasta que llegue ayuda.

7. Si dos puntos en un objeto conductor estuviesen a diferentes potenciales, entonces las cargas libres en el objeto se moverían y usted no tendría condiciones estáticas, en contradicción con la suposición inicial. (Las cargas positivas libres migrarían de las posiciones de más alto a las posiciones de más bajo potencial. Los electrones libres se moverían rápidamente desde las posiciones de menor a las posiciones de más alto potencial.) Todas las cargas continuarían moviéndose hasta que el potencial se volviera igual en todas partes en el conductor.
9. a) Con frecuencia el capacitor permanece cargado mucho después de que se desconecta la fuente de voltaje. Esta carga residual puede ser letal. b) El capacitor se puede manejar con seguridad después de descargar las placas mediante un cortocircuito del dispositivo con un conductor, como un destornillador con un mango aislante.
11. $D > C > B > A$
13. No todas las conexiones son simples combinaciones de circuitos en serie y paralelo. Como ejemplo de un circuito tan complejo, tenga en cuenta la red de cinco condensadores, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 y C_5 se muestra a continuación



Esta combinación no puede ser reducida a una simple combinación equivalente por las técnicas de capacitores en serie y en paralelo.

Problemas

1. a) $1.92 \times 10^{-18} \text{ J}$ b) $-1.92 \times 10^{-18} \text{ J}$ c) $2.05 \times 10^6 \text{ m}$ en la dirección x negativa
3. $1.4 \times 10^{-20} \text{ J}$
5. $1.7 \times 10^6 \text{ N/C}$
7. a) $1.13 \times 10^5 \text{ N/C}$ b) $1.80 \times 10^{-14} \text{ N}$ c) $4.37 \times 10^{-17} \text{ J}$
9. a) El resorte se estira 4.36 cm.
b) Equilibrio: $x = 2.18 \text{ cm}$; $A = 2.18 \text{ cm}$ c) $\Delta V = -\frac{2kA^2}{Q}$
11. a) $-5.75 \times 10^{-7} \text{ V}$ b) $-1.92 \times 10^{-7} \text{ V}$, $\Delta V = 3.84 \times 10^{-7} \text{ V}$
c) No. A menos que esté fijo en su lugar, el electrón se movería en la dirección opuesta, lo que aumenta su distancia de los puntos A y B y reduce la diferencia de potencial entre ellos.
13. a) $2.67 \times 10^6 \text{ V}$ b) $2.13 \times 10^6 \text{ V}$
15. a) 103 V b) $-3.85 \times 10^{-7} \text{ J}$; se debe realizar trabajo positivo para separar las cargas.
17. -11.0 kV
19. a) $3.84 \times 10^{-14} \text{ J}$ b) $2.55 \times 10^{-13} \text{ J}$ c) $-2.17 \times 10^{-13} \text{ J}$
d) $8.08 \times 10^6 \text{ m/s}$ e) $1.24 \times 10^7 \text{ m/s}$
21. a) 0.294 J b) 271 m/s
23. $2.74 \times 10^{-14} \text{ m}$
25. a) $1.1 \times 10^{-8} \text{ F}$ b) 27 C
27. a) 1.36 pF b) 16.3 pC c) $8.00 \times 10^3 \text{ V/m}$
29. a) 11.1 kV/m hacia la placa negativa b) 3.74 pF
c) 74.8 pC y -74.8 pC
31. a) $5.90 \times 10^{-10} \text{ F}$ b) $3.54 \times 10^{-9} \text{ C}$ c) $2.00 \times 10^3 \text{ N/C}$
d) $1.77 \times 10^{-8} \text{ C/m}^2$ e) Todas las respuestas se reducen.
33. a) $10.7 \mu\text{C}$ en cada capacitor b) $15.0 \mu\text{C}$ sobre el capacitor de $2.50 \mu\text{F}$ y $37.5 \mu\text{C}$ sobre el capacitor de $6.25 \mu\text{F}$
35. a) $2.67 \mu\text{F}$ b) $24.0 \mu\text{C}$ sobre cada capacitor de $8.00 \mu\text{F}$, $18.0 \mu\text{C}$ sobre el capacitor de $6.00 \mu\text{F}$, $6.00 \mu\text{C}$ sobre el capacitor de $2.00 \mu\text{F}$ c) 3.00 V a través de cada capacitor
37. a) $3.33 \mu\text{F}$ b) $180 \mu\text{C}$ sobre los capacitores de $3 \mu\text{F}$ y $6 \mu\text{F}$, $120 \mu\text{C}$ sobre los capacitores de $2.00 \mu\text{F}$ y $4.00 \mu\text{F}$ c) 60.0 V

a través de los capacitores de $3 \mu\text{F}$ y $2 \mu\text{F}$, 30.0 V a través de los capacitores de $6 \mu\text{F}$ y $4 \mu\text{F}$

39. $Q_1 = 16.0 \mu\text{C}$, $Q_5 = 80.0 \mu\text{C}$, $Q_8 = 64.0 \mu\text{C}$, $Q_4 = 32.0 \mu\text{C}$
41. a) $Q_{25} = 1.25 \text{ mC}$, $Q_{40} = 2.00 \text{ mC}$ b) $Q'_{25} = 288 \mu\text{C}$, $Q'_{40} = 462 \mu\text{C}$ c) $\Delta V = 11.5 \text{ V}$
43. $Q'_1 = 3.33 \mu\text{C}$, $Q'_2 = 6.67 \mu\text{C}$
45. $3.24 \times 10^{-4} \text{ J}$
47. a) $54.0 \mu\text{J}$ b) $108 \mu\text{J}$ c) $27.0 \mu\text{J}$
49. a) $\kappa = 3.4$. El material probablemente es nylon (véase la tabla 16.1). b) El voltaje yacería en alguna parte entre 25.0 y 85.0 V .
51. a) 8.1 nF b) 2.4 kV
53. a) volumen $9.09 \times 10^{-16} \text{ m}^3$, área $4.54 \times 10^{-10} \text{ m}^2$
b) $2.01 \times 10^{-13} \text{ F}$ c) $2.01 \times 10^{-14} \text{ C}$, 1.26×10^5 cargas electrónicas
59. 0.188 m^2
61. $6.25 \mu\text{F}$
63. 4.47 kV
65. 0.75 mC en C_1 , 0.25 mC en C_2
67. Esfera A: $0.800 \mu\text{C}$; esfera B: $1.20 \mu\text{C}$

CAPÍTULO 17

Preguntas rápidas

1. d)
2. b)
3. c), d)
4. b)
5. b)
6. b)
7. a)
8. b)
9. a)
10. c)

Preguntas de ejemplo

1. No. Tal corriente corresponde al paso de un electrón cada 2 segundos. Sin embargo, la corriente promedio puede tener cualquier valor.
2. Verdadero
3. Más alto
4. b)
5. a)
6. c)

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. a)
5. d)
7. c)
9. b)
11. c)
13. c)

Preguntas conceptuales

1. En el caso en que las cargas electrostáticas son estacionarias, el campo eléctrico dentro de un conductor debe ser cero. Un campo distinto de cero produce una corriente (mediante la interacción con los electrones libres del conductor), lo que violaría la condición de equilibrio estático. En este capítulo nos ocupamos de los conductores que transportan corriente, una situación no electrostática. La corriente surge a causa de una diferencia de potencial aplicada entre los extremos del conductor, lo que produce un campo eléctrico interno.
3. Debido a que hay tantos electrones en un conductor (aproximadamente 10^{28} electrones/ m^3), la velocidad media de las cargas es muy lenta. Cuando se conecta un cable a una diferencia de potencial, se establece un campo eléctrico en todo

el alambre de manera casi instantánea, para que los electrones comiencen a moverse por todas partes al mismo tiempo.

5. Se concluiría que el conductor es no óhmico.
7. Un voltaje no es algo que “recorra” un circuito completo. Un voltaje es una diferencia de potencial que se aplica a través de un dispositivo o un circuito. Sería más correcto decir “1 ampere de electricidad recorrió el cuerpo de la víctima”. Aunque esta cantidad de corriente tendría resultados desastrosos sobre el cuerpo humano, un valor de 1 (ampere) no suena tan excitante para un artículo periodístico como 10 000 (volts). Otra posibilidad es escribir “10 000 volts de electricidad se aplicaron a través del cuerpo de la víctima”, lo cual todavía no suena muy excitante.
11. Una vez que el interruptor se cierra, el voltaje de línea se aplica a través del foco. Cuando el voltaje se aplica a través del filamento frío cuando se enciende por primera vez, la resistencia del filamento es baja, la corriente es alta y una cantidad de potencia relativamente grande se aplica al foco. Conforme el filamento se calienta, su resistencia se eleva y la corriente disminuye. El gran pico de corriente al comienzo de la operación del foco es la razón por la que éstos con frecuencia fallan justo después de que se encienden.

Problemas

1. a) 3.00×10^{20} electrones b) se mueven en la dirección opuesta a la corriente.
3. 1.05 mA
5. 0.678 mm
7. 27 años
9. a) 55.85×10^{-3} kg/mol b) 1.41×10^5 mol/m³
c) 8.49×10^{28} átomos de hierro/m³ d) 1.70×10^{29} electrones de conducción/m³ e) 2.21×10^{-4} m/s
11. 32 V es 200 veces mayor que 0.16 V
13. a) 13.0 Ω b) 17.0 m
15. a) 30 Ω b) 4.7×10^{-4} Ω · m
17. plata ($\rho = 1.59 \times 10^{-8}$ Ω · m)
19. 256 Ω
23. 2.0 A
25. 2.71 MΩ
27. 26 mA
29. a) 3.0 A b) 2.9 A
31. a) 1.2 Ω b) 8.0×10^{-4} (un aumento de 0.080%)
33. a) 8.33 A b) 14.4 Ω
35. a) 2.1 W b) 3.42 W c) El alambre de aluminio no es tan seguro. Si está rodeado de aislamiento térmico, sería más propicio que un alambre de cobre.
37. 11.2 min
39. a) $R_A = 576$ Ω; $R_B = 144$ Ω b) 4.80 s. c) La carga es la misma. Está en un lugar que es inferior en potencial. d) 0.040 0 s e) la energía entra en el foco por transmisión eléctrica y se escapa por calor y radiación electromagnética. f) \$1.98
41. 1.6 cm
43. 15.0 μW
45. a) 116 V b) 12.8 kW
47. $\frac{d_A}{d_B} = \sqrt{3}$
49. 2.16×10^5 C
51. a) 1.50 Ω b) 6.00 A
53. 1.1 km
55. 1.47×10^{-6} Ω · m; difiere en 2.0% del valor en la tabla 17.1
57. a) \$3.06 b) No. El circuito debe poder manejar al menos 26 A.
59. a) 17.3 A b) 22.4 MJ c) \$0.684
61. 3.77×10^{28} /m³
63. 37 MΩ
65. 0.48 kg/s

CAPÍTULO 18

Preguntas rápidas

1. Verdadero
2. Debido a resistencia interna, la potencia se entrega al material de la batería, lo que eleva su temperatura.
3. b)
4. a)
5. a)
6. b)
7. *Paralelo:* a) no cambia b) no cambia c) aumenta d) disminuye
8. *Serie:* a) disminuye b) disminuye c) disminuye d) aumenta
9. c)

Preguntas de ejemplo

1. Debido a que la resistencia se calienta, su resistencia aumenta, reduce la corriente.
2. b)
3. El resistor de 8.00 Ω
4. Las respuestas serían negativas, pero tendrían la misma magnitud que antes.
5. Sí
6. a)
7. a)

Preguntas de opción múltiple

1. b), c)
3. c)
5. a)
7. e)
9. d)
11. b), e)
13. d)
15. a), d)

Preguntas conceptuales

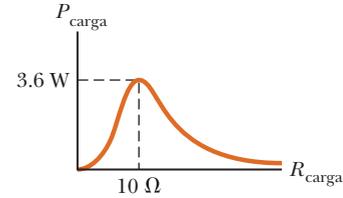
1. No. Cuando una batería funciona como fuente y suministra corriente a un circuito, la corriente convencional fluye a través de la batería desde la terminal negativa hasta la positiva. Sin embargo, cuando una fuente con fem más grande que la batería se usa para cargar la batería, la corriente convencional se fuerza a fluir a través de la batería desde la terminal positiva hasta la negativa.
3. La cantidad total de energía que entrega la batería será menor que W . Recuerde que una batería se puede considerar como una batería ideal sin resistencia, en serie con la resistencia interna. Cuando la batería se carga, la energía que se le entrega incluye la energía necesaria para cargar la batería ideal, más la energía que se usa para elevar la temperatura de la batería debido a calentamiento $I^2 r$ en la resistencia interna. Esta última energía no está disponible durante la descarga de la batería, cuando parte de la energía disponible reducida de nuevo se transforma en energía interna en la resistencia interna, que reduce aún más la energía disponible bajo W .
5. Conectar baterías en paralelo no aumenta la fem. Un dispositivo de alta corriente conectado a dos baterías en paralelo puede extraer corrientes de ambas baterías. Por ende, conectar las baterías en paralelo aumenta la posible salida de corriente y, por lo tanto, la posible salida de potencia.
7. El arranque de un automóvil extrae una corriente relativamente grande de la batería. Esta gran corriente causa una significativa caída de voltaje a través de la resistencia interna de la batería. Como resultado, el voltaje en terminales de la batería se reduce y los faros se apagan en concordancia.

9. El ave descansa sobre un alambre de potencial fijo. Para electrocutarse, se requiere una gran diferencia de potencial entre los pies del ave. La diferencia de potencial entre los pies del ave es muy pequeña para dañarla.
11. No se electrocutará si se sostiene sólo de un alambre de alta tensión, porque no completa un circuito. No hay diferencia de potencial a través de su cuerpo en tanto cuelgue de un solo alambre. Sin embargo, debe soltar el alambre inmediatamente después de que se rompe, porque se convertirá en parte de un circuito cerrado cuando llegue al suelo o entre en contacto con otro objeto.
13. La regla del nodo es un enunciado de la conservación de la carga. Dice que la cantidad de carga que entra a un nodo en algún intervalo debe ser igual a la carga que sale del nodo en dicho intervalo. La regla de la malla es un enunciado de la conservación de la energía. Dice que el aumento y la disminución en potencial alrededor de una malla cerrada en un circuito debe sumar cero.

Problemas

1. 4.92 Ω
3. a) Su diagrama del circuito consistirá de dos resistores de 0.800 Ω en serie con la resistencia de 192 Ω del foco. b) 73.8 W
5. a) 17.1 Ω b) 1.99 A para 4.00 Ω y 9.00 Ω , 1.17 A para 7.00 Ω , 0.820 A para 10.0 Ω
7. 470 Ω y 220 Ω
9. a) 5.68 V b) 0.227 A
11. 55 Ω
13. 0.43 A
15. a) Conecte dos resistores de 50 Ω en paralelo y luego conecte esta combinación en serie con un resistor de 20 Ω . b) Conecte dos resistores de 50 Ω en paralelo, conecte dos resistores de 20 Ω en paralelo y luego conecte estas dos combinaciones en serie una con otra.
17. 0.714 A, 1.29 A, 12.6 V
19. 50.0 mA de a a e
21. a) $I_1 = 1.00$ A hacia arriba en 200 Ω ; $I_4 = 4.00$ A hacia arriba en 70.0 Ω ; $I_2 = 3.00$ A hacia arriba en 80.0 Ω ; $I_3 = 8.00$ A hacia abajo en 20.0 Ω ; b) 200 V
23. a) 0.385 mA, 3.08 mA, 2.69 mA b) 69.2 V, con c en el potencial más alto
25. a) No. La única simplificación es observar que los resistores de 2.0 Ω y 4.0 Ω están en serie y suman una resistencia de 6.0 Ω . Del mismo modo, los resistores de 5.0 Ω y 1.0 Ω están en serie y suman una resistencia de 6.0 Ω . El circuito no se puede simplificar más, debe usar reglas de Kirchhoff para analizar el circuito. b) $I_1 = 3.5$ A, $I_2 = 2.5$ A, $I_3 = 1.0$ A
27. a) No. El circuito multimalla no se puede simplificar más, debe usar reglas de Kirchhoff para analizar el circuito. b) $I_{30} = 0.353$ A se dirige a la derecha, $I_5 = 0.118$ A se dirige hacia la derecha, $I_{20} = 0.471$ A se dirige a la izquierda
29. $\Delta V_2 = 3.05$ V, $\Delta V_3 = 4.57$ V, $\Delta V_4 = 7.38$ V, $\Delta V_5 = 1.62$ V
31. (a) 1.88 s (b) 1.90×10^{-4} C
33. (a) 5.00 s (b) 150 μ C (c) 4.06 μ A
35. (a) 0.432 s (b) 6.00 μ F
37. 48 focos
39. (a) 6.25 A (b) 750 W
41. (a) 1.2×10^{-9} C, 7.3×10^9 iones K^+ . No grande, sólo $1e/(290 \text{ \AA})^2$. (b) 1.7×10^{-9} C, 1.0×10^{10} iones Na^+ (c) 0.83 mA (d) 7.5×10^{-12} J
43. 11 nW
45. a) 4.00 V b) El punto a está en el potencial más alto
47. a) 15 Ω b) $I_1 = 1.0$ A, $I_2 = I_3 = 0.50$ A, $I_4 = 0.30$ A e $I_5 = 0.20$ A c) $(\Delta V)_{ac} = 6.0$ V, $(\Delta V)_{ce} = 1.2$ V, $(\Delta V)_{ed} = (\Delta V)_{fd} = 1.8$ V, $(\Delta V)_{cd} = 3.0$ V, $(\Delta V)_{db} = 6.0$ V d) $P_{ac} = 6.0$ W, $P_{ce} = 0.60$ W, $P_{ed} = 0.54$ W, $P_{fd} = 0.36$ W, $P_{cd} = 1.5$ W, $P_{db} = 6.0$ W
49. 6.00 Ω , 3.00 Ω

51. a) $R_{eq}^{abierto} = 3R$, $R_{eq}^{cerrado} = 2R$ b) $P = \frac{\mathcal{E}^2}{3R}$, $P = \frac{\mathcal{E}^2}{2R}$
- c) Las lámparas A y B aumentan en brillo, la lámpara C se apaga.
53. a) 1.02 A abajo b) 0.364 A abajo c) 1.38 A arriba d) 0 e) 66.0 μ C
55. a) $R_x = R_2 - \frac{1}{4}R_1$ b) $R_x = 2.8 \Omega$ (aterrizaje inadecuado)
59. $P = \frac{(144 \text{ V}^2)R}{(R + 10.0 \Omega)^2}$



61. a) 6.0×10^2 W b) 1.2 J (c) 37 m
63. 0.395 A; 1.50 V
65. a) 2.41×10^{-5} C b) 1.61×10^{-5} C c) 1.61×10^{-2} A

CAPÍTULO 19

Preguntas rápidas

- b)
- c)
- c)
- a)
- a), c)
- b)

Preguntas ejemplo

- La fuerza sobre el electrón es opuesta a la dirección de la fuerza sobre el protón y la aceleración del electrón es mucho más grande que la aceleración sobre el protón debida a la menor masa del electrón.
- Un campo magnético siempre ejerce una fuerza perpendicular a la velocidad de una partícula cargada, de modo que puede cambiar la dirección de la partícula mas no su velocidad.
- Cero
- Conforme el ángulo tiende a 90°, la magnitud de la fuerza aumenta. Después de ir más allá de 90°, disminuye.
- La magnitud de la cantidad de movimiento permanece constante. La dirección de la cantidad de movimiento cambia, a menos que la velocidad de la partícula sea paralela o antiparalela al campo magnético.
- 20 m
- a) a la izquierda b) a la derecha.
- El campo magnético de la Tierra es extremadamente débil, de modo que la corriente que porta el automóvil tendría que ser correspondientemente muy grande. Tal corriente sería impráctica para generarse y, si se generara, calentaría y fundiría los alambres que la portan.
- El protón aceleraría hacia abajo debido a la gravedad mientras avanza en círculos.

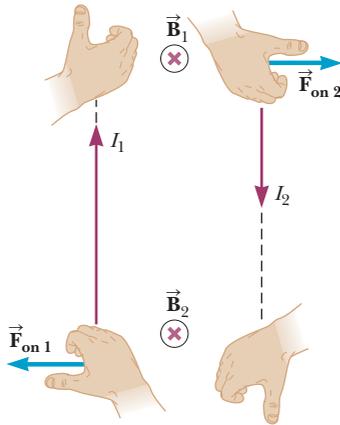
Preguntas de opción múltiple

- a)
- c)
- e)
- e)
- c) y e)
- a)
- b)
- a)
- c)

Preguntas conceptuales

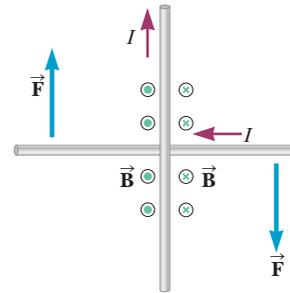
- El conjunto debe orientarse de tal modo que el haz se mueva o hacia el este o hacia el oeste.

3. La fuerza magnética sobre una partícula cargada en movimiento siempre es perpendicular a la dirección de movimiento de la partícula. No hay fuerza magnética sobre la carga cuando se mueve paralela a la dirección del campo magnético. Sin embargo, la fuerza sobre una partícula cargada que se mueve en un campo eléctrico nunca es cero y siempre es paralela a la dirección del campo. Por lo tanto, al proyectar la partícula cargada en diferentes direcciones, es posible determinar la naturaleza del campo.
5. En la figura, el campo magnético creado por el alambre 1 en la posición del alambre 2 está en el papel. Por lo tanto, la fuerza magnética sobre el alambre 2 está en la dirección (corriente abajo) \times (campo en el papel) = (fuerza hacia la derecha), lejos del alambre 1. Ahora el alambre 2 crea un campo magnético en la página en el lugar de alambre de 1, por lo que el alambre 1 siente la fuerza de alambre (corriente arriba) \times (campo en el papel) = (fuerza hacia la izquierda), lejos del alambre 2.



7. Tal levitación no podría ocurrir jamás. En el polo norte, donde el campo magnético de la Tierra se dirige hacia abajo, hacia el equivalente de un polo sur enterrado, un ataúd se repelería si su polo magnético sur se dirigiera hacia arriba. Sin embargo, el equilibrio sólo sería transitorio, pues cualquier ligera perturbación alteraría el equilibrio entre la fuerza magnética y la fuerza gravitacional.
9. Una brújula no detecta corrientes en alambres cercanos a los interruptores eléctricos, por dos razones. La primera es que, puesto que el cable al interruptor contiene dos alambres, uno que porta corriente al interruptor y el otro que la aparta alejándose del mismo, el campo magnético neto sería muy pequeño y caería rápidamente con la distancia creciente. La segunda razón es que la corriente es alterna a 60 Hz. Como resultado, el campo magnético también oscila a 60 Hz. Esta frecuencia sería muy rápida para que la brújula la siguiera, de modo que el efecto sobre la lectura de la brújula promediaría cero.
11. Si usted se moviera junto con los electrones, mediría una corriente cero para los electrones, de modo que no produciría un campo magnético de acuerdo con sus observaciones. Sin embargo, las cargas positivas fijas en el metal ahora se moverían hacia atrás en relación con usted, lo que crearía una corriente equivalente al movimiento hacia adelante de los electrones cuando usted estuviera estacionario. Por ende, mediría el mismo campo magnético como cuando usted está estacionario, pero se debería a las cargas positivas que se presume se mueven desde su punto de vista.
13. Cada espira del Slinky[®] se convertirá en un imán, porque una espira actúa como un circuito de corriente. El sentido de rotación de la corriente es la misma en todas las espiras, de modo que cada bobina se convierte en un imán con la misma orientación de polos. Por ende, todas las espiras se atraen y el Slinky[®] se comprimirá.
15. No hay fuerza neta sobre los alambres, pero sí hay un torque. Para entender esta distinción, imagine un alambre vertical fijo y un alambre horizontal libre (véase la figura siguiente). El alambre vertical porta una corriente hacia arriba y crea un campo

magnético que se mueve en círculos en torno al alambre vertical, él mismo. A la derecha, el campo magnético del alambre vertical apunta hacia la página, mientras que en el lado izquierdo apunta afuera de la página, como se indica. Cada segmento del alambre horizontal (de longitud ℓ) porta corriente que interactúa con el campo magnético de acuerdo con la ecuación $F = B\ell \sin \theta$. Aplique la regla de la mano derecha en el lado derecho: apunte los dedos de su mano derecha en la dirección de la corriente horizontal y enróllelos hacia la página en la dirección del campo magnético. Su pulgar apunta hacia abajo, la dirección de la fuerza sobre el lado derecho del alambre. Repetir el proceso en el lado izquierdo da como resultado una fuerza hacia arriba sobre el lado izquierdo del alambre. Las dos fuerzas son iguales en magnitud y opuestas en dirección, de modo que la fuerza neta es cero, pero crean un torque neto en torno al punto donde los alambres se cruzan.



17. Si están proyectadas en la misma dirección en el mismo campo magnético, las cargas tienen signo opuesto.

Problemas

1. a) oeste b) deflexión cero c) arriba d) abajo
3. a) hacia la página b) hacia la derecha c) hacia la parte inferior de la página
5. a) 1.44×10^{-12} N b) 8.62×10^{14} m/s² c) Sobre el electrón se ejercería una fuerza que tiene la misma magnitud que la fuerza sobre un protón, pero en la dirección opuesta debido a su carga negativa. d) La aceleración del electrón sería mucho mayor que la del protón porque la masa del electrón es mucho menor.
7. 2.83×10^7 m/s oeste
9. 48.9° o 131°
9. $F_g = 8.93 \times 10^{-30}$ N (hacia abajo), $F_e = 1.60 \times 10^{-17}$ N (hacia arriba), $F_m = 4.80 \times 10^{-17}$ N (hacia abajo)
13. 8.0×10^{-3} T en la dirección +z
15. a) hacia la página b) hacia la derecha c) hacia la parte inferior de la página
17. 7.50 N
19. 0.131 T (hacia abajo)
21. a) La fuerza magnética y la fuerza de gravedad actúan ambas sobre el alambre. Cuando la fuerza magnética es hacia arriba equilibra la fuerza descendente de la gravedad, la fuerza neta sobre el alambre es cero y el alambre se puede mover hacia arriba con velocidad constante. b) 0.20 T afuera de la página. c) Si el campo supera 0.20 T, la fuerza magnética ascendente supera la fuerza descendente de la gravedad, de modo que el alambre acelera hacia arriba.
23. ab: 0, bc: 0.040 0 N en la dirección -x, cd: 0.040 0 N en la dirección -z, da: 0.056 6 N paralelo al plano xz. y a 45° en ambas direcciones, +x y +z.
25. $118 \mu\text{N} \cdot \text{m}$
27. 9.05×10^{-4} N · m, que tiende a hacer que el lado izquierdo se mueva hacia usted y el lado derecho se aleje.
29. a) 0.56 A b) 0.064 N · m
31. a) 3.97° b) 3.39×10^{-3} N · m
33. a) 8.51×10^5 m/s b) 2.06×10^{-5} m
37. 1.77 cm
39. $r = 3R/4$
41. a) 2.08×10^{-7} kg/C b) 6.66×10^{-26} kg c) Calcio
43. 20.0 μT

45. 2.0×10^{-10} A
 47. 2.4 mm
 49. $20.0 \mu\text{T}$ hacia la parte inferior de la página
 51. 0.167 mT afuera de la página
 53. a) 4.00 m b) 7.50 nT c) 1.26 m d) cero
 55. a) 3.50×10^{-5} N/m b) repulsiva
 57. 4.5 mm
 59. 31.8 mA
 61. a) 920 vueltas b) 12 cm
 63. a) $2.8 \mu\text{T}$ b) 0.89 mA
 65. a) $5.24 \mu\text{T}$ b) hacia la página c) 7.20 cm
 67. a) $0.500 \mu\text{T}$ afuera de la página b) $3.88 \mu\text{T}$ paralelo al plano xy y a 59.0° en sentido de las manecillas del reloj desde la dirección $+x$
 69. a) 1.33 m/s b) el signo de la fem es independiente de la carga.
 71. $53 \mu\text{T}$ hacia la parte inferior de la página, $20 \mu\text{T}$ hacia el fondo de la página, y 0
 73. a) -8.00×10^{-21} kg · m/s b) 8.90°
 75. 1.41×10^{-6} N

CAPÍTULO 20

Preguntas rápidas

- b, c, a
- c)
- b)
- a)
- b)
- b)

Preguntas de ejemplo

- Falso
- 5.06×10^{-3} V; la corriente estaría en la dirección opuesta.
- a), e)
- Sobre la barra se ejercerá una fuerza magnética dirigida hacia la derecha.
- Duplicar la frecuencia duplica la fem inducida máxima.
- b)
- a)
- 72.6 A
- b)
- Falso

Preguntas de opción múltiple

- c)
- d)
- c)
- b)
- b)
- a)

Preguntas conceptuales

- Conforme la nave espacial se mueve a través del espacio, aparentemente se mueve desde una región de una intensidad de campo magnético a una región con una intensidad diferente de campo magnético. El campo magnético variable a través de la bobina induce una fem y una corriente correspondiente en la bobina.
- De acuerdo con la ley de Faraday, se induce una fem en una espira de alambre si el flujo magnético a través de la espira cambia con el tiempo. En esta situación, se puede inducir una fem o al girar la espira en torno a un eje arbitrario, o al cambiar la forma de la espira.
- Si la barra se mueve hacia la izquierda, la fuerza magnética sobre las cargas negativas en la barra sería hacia arriba, lo que causa una acumulación de carga negativa en la parte superior y cargas positivas en la parte inferior. Por lo tanto, el campo eléctrico en la barra también sería hacia arriba.

- Si, por alguna razón, el campo magnético cambiara rápidamente, en el brazaete se podría inducir una gran fem. Si el brazaete no fuese una banda continua, esta fem generaría arcos de alto voltaje en cualquier brecha de la banda. Si el brazaete fuese una banda continua, la fem inducida produciría una gran corriente inducida y resultaría en calentamiento por resistencia del brazaete.
- Conforme la placa de aluminio se mueve hacia el campo, se inducen corrientes parásitas en el metal al cambiar el campo magnético en la placa. El campo magnético del electroimán interactúa con esta corriente, lo que produce una fuerza retardadora sobre la placa que la frena. En forma similar, conforme la placa deja el campo magnético, se induce una corriente y una vez más hay una fuerza hacia arriba para frenar la placa.
- La corriente de oscilación en el solenoide produce un campo magnético siempre cambiante. El flujo vertical a través del anillo, alternativamente, aumenta y disminuye, produciendo una corriente en él con una dirección que es alternativamente en sentido horario y antihorario. La corriente a través de la resistencia del anillo convierte la energía transmitida eléctricamente en energía interna con la tasa I^2R .

Problemas

- $4.8 \times 10^{-3} \text{T} \cdot \text{m}^2$
- a) 0.177 T b) 0
- a) $\Phi_{B_{\text{neto}}} = 0$ b) 0
- a) $3.1 \times 10^{-3} \text{T} \cdot \text{m}^2$ b) $\Phi_{B_{\text{neto}}} = 0$
- a) cero, ya que el flujo a través del circuito A no cambia b) hacia la izquierda para el circuito B c) hacia la derecha en el circuito C
- 94 mV
- 33 mV
- a) de izquierda a derecha b) de derecha a izquierda
- a) La corriente es cero, debido a que el flujo magnético, producido por la corriente a través del lado derecho del circuito (en la página) es opuesto al flujo a través de la parte izquierda del circuito (de la página), el flujo neto a través del circuito es siempre cero. b) en sentido horario, debido a que el flujo producido por el cable largo a través del circuito de la página y la corriente inducida en el circuito debe ser hacia la derecha para compensar el creciente flujo externo.
- a) $3.77 \times 10^{-3} \text{T}$ b) $9.42 \times 10^{-3} \text{T}$ c) $7.07 \times 10^{-4} \text{m}^2$ d) $3.99 \times 10^{-6} \text{Wb}$ e) $1.77 \times 10^{-5} \text{V}$; la fem inducida promedio es igual a la instantánea en este caso porque la corriente aumenta de manera estable. f) La fem inducida es pequeña, de modo que la corriente en la bobina de 4 espiras y su campo magnético también será pequeña.
- 10.2 μV
- 13.1 mV
- 2.6 mV
- a) hacia el este b) $4.58 \times 10^{-4} \text{V}$
- 2.80 m/s
- a) 81.9 mV b) 105 mA
- $1.9 \times 10^{-11} \text{V}$
- a) 60 V b) 57 V c) 0.13 s
- a) 18.1 μV b) 0
- 4.0 mH
- a) 2.0 mH b) 38 A/s
- a) 5.33 A b) 2.67 s c) 8.00 s
- a) 2.4 V b) 75 mH c) 5.1 A d) $\Delta V_R = -1.5 \text{V}$ e) $\Delta V_L = -0.9 \text{V}$
- 1.92 V
- a) 0.208 mH b) 0.936 mJ
- a) 18 J b) 7.2 J
- sentido antihorario
- a) $F = N^2 B^2 w^2 v / R$ a la izquierda b) 0 c) $F = N^2 B^2 w^2 v / R$ a la izquierda
- a) 20.0 ms b) 37.9 V c) 1.52 mV d) 51.8 mA
- a) 0.500 A b) 2.00 W c) 2.00 W
- 115 kV

63. a) 0.157 mV (el extremo B es positivo) b) 5.89 mV (el extremo A es positivo)
 65. a) 9.00 A b) 10.8 N c) b está al potencial más alto d) No
 67. b) Una resistencia mayor haría la corriente menor, por lo que el circuito debe alcanzar una mayor velocidad antes de que la magnitud de la fuerza magnética sea igual a la fuerza de la gravedad. c) La fuerza magnética es proporcional al producto del campo y la corriente, mientras que la corriente es proporcional al campo. Si B se reduce a la mitad, la velocidad debe ser cuatro veces mayor para compensar y producir una fuerza magnética con una magnitud igual a la de la fuerza gravitatoria.

CAPÍTULO 21

Preguntas rápidas

1. c)
2. b)
3. b)
4. a)
5. a)
6. b)
7. b), c)
8. b), d)

Preguntas de ejemplo

1. Falso
2. Falso
3. Verdadero
4. Verdadero
5. La potencia promedio será cero si el ángulo de fase es 90° o -90° ; esto es, cuando $R = 0$.
6. Falso
7. d)
8. Sí. Cuando el techo es perpendicular a los rayos del Sol la cantidad de energía interceptada por el techo es un máximo. A otros ángulos la cantidad es menor.
9. c)

Preguntas de opción múltiple

1. d)
3. b)
5. a)
7. b)
9. a)
11. e)
13. c)
15. c) y d)

Preguntas conceptuales

1. Diferentes estaciones tienen antenas de transmisión en diferentes lugares. Para una mejor recepción alinee su antena de cono perpendicular a la trayectoria en línea recta desde el televisor a la antena transmisora. Las señales transmitidas son polarizadas. La dirección de polarización de la onda puede cambiar por la reflexión de las superficies, incluyendo la atmósfera, y a través de la rotación de Kerr, un cambio en el eje de polarización cuando pasa a través de una sustancia orgánica. En su casa, el plano de polarización está determinado por su entorno, por lo que las antenas deben ser ajustadas para alinearse con la polarización de la onda.
3. La fuente fundamental de una onda electromagnética es una carga acelerada. Por ejemplo, en una antena transmisora de una estación de radio, las cargas deben moverse arriba y abajo en la frecuencia de la emisora de radio. Estas cargas en movimiento crean campos eléctricos y magnéticos, las ondas electromagnéticas, en el espacio alrededor de la antena.
5. a) El destello de la luz de acuerdo con el código Morse es una drástica modulación de amplitud (AM): la amplitud cambia de un máximo a cero. En este sentido, es similar al código binario encendido-apagado que se usa en las computadoras y discos

- compactos. b) La frecuencia portadora (carrier) es la de la luz, en el orden de 10^{14} Hz. c) La frecuencia de la señal depende de la habilidad del operador, pero está en el orden de un solo hertz, mientras la luz destella y se apaga. d) La antena de transmisión para esta señal modulada es el filamento de la bombilla en la fuente de la señal. e) La antena receptora es el ojo.
7. La vela debe ser tan reflejante como sea posible, de modo que el reflejo de la luz solar transfiera a la vela la máxima cantidad de movimiento.
 9. No. El alambre emitirá ondas electromagnéticas sólo si la corriente varía en el tiempo. La radiación es el resultado de las cargas en aceleración, lo que sólo puede ocurrir cuando la corriente no es constante.
 11. Las fotografías creadas utilizando luz infrarroja hacen más brillantes las zonas cálidas de la cara; las fotografías con luz visible captan la luz del entorno principalmente y no son afectadas por la temperatura. En consecuencia, las áreas brillantes con la luz infrarroja no lo serían necesariamente con la luz visible. Las pupilas, por ejemplo, son muy brillantes con luz infrarroja, pero oscuras con luz visible.
 13. Es mucho más económico transmitir potencia a un alto voltaje que a un bajo voltaje porque la pérdida I^2R en la línea de transmisión es significativamente más baja a alto voltaje. La transmisión de electricidad a alto voltaje permite el uso de transformadores de bajada para poner a disposición del usuario final "bajos" voltajes y altas corrientes.
 15. La frecuencia resonante está determinada por la inductancia y la capacitancia en el circuito. Si tanto L como C se duplican, la frecuencia resonante se reduce por un factor de dos.

Problemas

1. a) 193Ω b) 145Ω
3. 14.6 Hz
5. 6.76 W
7. a) $f > 41.3$ Hz b) $X_C < 87.5 \Omega$
9. 4.0×10^2 Hz
11. 100 mA
13. 3.14 A
15. a) 0.042 4 H b) 942 rad/s
17. $0.450 \text{ T} \cdot \text{m}^2$
19. a) 0.361 A b) 18.1 V c) 23.9 V d) -53.0°
21. a) 1.43 k Ω b) 0.097 9 A c) 51.1° d) el voltaje adelanta a la corriente
23. a) 17.4° b) el voltaje
25. 1.88 V
27. a) 47.1 Ω b) 637 Ω c) 2.40 k Ω d) 2.33 k Ω e) -14.2°
29. a) 103 V b) 150 V c) 127 V d) 23.6 V
31. a) 208 Ω b) 40.0 Ω c) 0.541 H
33. 8.00 W
35. a) $1.8 \times 10^2 \Omega$ b) 0.71 H
37. 1.82 pF
39. $C_{\min} = 4.9$ nF, $C_{\max} = 51$ nF
41. 3.60 kHz
43. 721 V
45. Se pierde 0.18%
47. a) 1.1×10^3 kW b) 3.1×10^2 A c) 8.3×10^3 A
49. 1 000 km; siempre habrá un mejor uso para el dinero de los impuestos.
51. a) 6.30×10^{-6} Pa b) La presión atmosférica es 1.60×10^{10} veces mayor que la presión de la radiación.
53. $f_{\text{red}} = 4.55 \times 10^{14}$ Hz, $f_{\text{IR}} = 3.19 \times 10^{14}$ Hz, $E_{\text{máx},f}/E_{\text{máx},i} = 0.57$
55. $B_{\text{máx}} = 3.39 \times 10^{-6}$ T, $E_{\text{máx}} = 1.02 \times 10^3$ V/m
57. 2.94×10^8 m/s
59. a) 6.00 pm b) 7.50 cm
61. a) 188 m a 556 m b) 2.78 m a 3.4 m
63. 5.2×10^{13} Hz, 5.8 μm
65. 4.299 999 84 $\times 10^{14}$ Hz; la frecuencia disminuye 1.6×10^7 Hz.

67. $5.31 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$
 69. 1.7 centavos
 71. 99.6 mH
 73. a) $6.7 \times 10^{-16} \text{ T}$ b) $5.3 \times 10^{-17} \text{ W/m}^2$ c) $1.7 \times 10^{-14} \text{ W}$
 75. a) 0.536 N b) $8.93 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ c) 33.9 días

CAPÍTULO 22

Preguntas rápidas

- a)
- Los haces 2 y 4 se reflejan; los haces 3 y 5 se refractan.
- b)
- c)

Preguntas de ejemplo

- a)
- b)
- Falso
- c)
- b)
- b)

Preguntas de opción múltiple

- c)
- e)
- b)
- b)
- c)

Preguntas conceptuales

- El espectro de la luz enviada de nuevo hacia usted desde una gota en la parte superior del arco iris llega de tal manera que la luz roja (desviada en un ángulo de 42°) salta a la vista, mientras que la luz violeta (desviada en un ángulo 40°) pasa por encima de su cabeza. Por lo tanto, la parte superior del arco iris se ve rojo. En la parte inferior del arco iris, el violeta llega a su ojo y la luz roja se desvía hacia el suelo. Por lo tanto, la parte inferior del arco iris aparece violeta.
- $n_a > n_c > n_b$
- Por un lado, una bola cubierta con espejos destella al reflejar la luz de su superficie. Por otra parte, un diamante facetado que se ilumina en la parte superior, refleja dicha luz mediante reflexión interna total en la mitad inferior y la saca a través de la parte superior nuevamente. Debido a su alto índice de refracción, el ángulo crítico para el diamante en aire, para reflexión interna total, a saber $\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_{\text{aire}}/n_{\text{diamante}})$, es pequeño. Por ende, los rayos de luz entran a través de un área grande y salen a través de un área muy pequeña con una intensidad mucho mayor. Cuando un diamante se sumerge en disulfuro de carbono, el ángulo crítico aumenta a $\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_{\text{disulfuro de carbono}}/n_{\text{diamante}})$. Como resultado, la luz se emite desde el diamante a través de un área más grande y parece menos intensa.
- No hay dependencia del ángulo de reflexión en la longitud de onda, porque la luz no entra profundamente en el material durante la reflexión: se refleja de la superficie.
- El color que viaja más despacio se dobla más. Por lo tanto, X se desplaza más lentamente en el prisma de vidrio.
- Los rayos de luz procedentes de las partes del lápiz bajo el agua se desvían alejándose de la normal a medida que surgen en el aire por encima. Los rayos penetran en el ojo (o cámara) en ángulo más cercano a la horizontal, por lo que las partes del lápiz bajo el agua aparecen más cerca de la superficie de lo que realmente son, por lo que el lápiz parece doblado.
- La luz viaja a través del vacío con una velocidad de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Por lo tanto, la imagen que usted ve de una estrella o galaxia distante debió generarse hace algún tiempo. Por ejemplo, la estrella Altair está a 16 años luz de distancia; si observa una imagen de Altair en la actualidad, sólo sabe cómo se veía Altair

hace 16 años. Al principio, esto puede no parecer significativo; sin embargo, los astrónomos que observan otras galaxias pueden tener una idea de cómo se veían las galaxias cuando eran mucho más jóvenes. Por lo tanto, no tiene sentido hablar de “mirar hacia atrás en el tiempo”.

Problemas

- $3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
- a) $2.07 \times 10^3 \text{ eV}$ b) 4.14 eV
- a) $2.25 \times 10^8 \text{ m/s}$ b) $1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$ c) $1.24 \times 10^8 \text{ m/s}$
- a) 29.0° b) 25.7° c) 32.0°
- 19.5° sobre la horizontal
- a) 1.52 b) 416 nm c) $4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$ d) $1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$
- 110.6°
- a) $1.56 \times 10^8 \text{ m/s}$ b) 329.1 nm c) $4.74 \times 10^{14} \text{ Hz}$
- cinco veces del espejo derecho y seis veces del espejo izquierdo
- $\theta = 30.4^\circ, \theta' = 22.3^\circ$
- a) 4.84 cm b) 67.5°
- b) 4.73 cm
- $\theta = \text{tan}^{-1}(n_g)$
- 3.39 m
- a) $\theta_{\text{azul}} = 47.79^\circ$ b) $\theta_{\text{rojo}} = 48.22^\circ$
- $\theta_{\text{rojo}} - \theta_{\text{violeta}} = 0.32^\circ$
- a) $\theta_{1i} = 30^\circ, \theta_{1r} = 19^\circ, \theta_{2i} = 41^\circ, \theta_{2r} = 77^\circ$ b) Primera superficie: $\theta_{\text{reflección}} = 30^\circ$; segunda superficie: $\theta_{\text{reflección}} = 41^\circ$
- a) 66.1° b) 63.5° c) 59.7°
- a) 40.8° b) 60.6°
- 1.414
- a) 10.7° b) aire c) El sonido que cae sobre la pared desde la mayoría de las direcciones se refleja 100%.
- 27.5°
- 22.0°
- a) 1.07 m b) 1.65 m
- a) 38.5° b) 1.44
- 24.7°
- 1.93
- a) 1.20 b) 3.39 ns
- a) 53.1° b) $\theta_1 \geq 38.7^\circ$
- 15.9°

CAPÍTULO 23

Preguntas rápidas

- En C
- c)
- a) Falso b) Falso c) Verdadero
- b)
- Una infinidad
- a) Falso b) Verdadero c) Falso

Preguntas de ejemplo

- No
- b)
- Verdadero
- b)
- a)
- c)
- La pantalla debe colocarse a un punto focal de distancia de la lente.
- No. La amplificación más grande debe ser 1, de modo que una lente divergente no sería una buena lupa.
- Vertical
- Sí, es posible que un espejo tenga un objeto virtual. Utilizando el actual sistema de espejos y lentes, coloque el objeto a la derecha de la lente fuera de la distancia focal. La distancia de la imagen se puede hacer tan grande como se desee, moviendo el objeto hacia el punto focal, por lo que en algún momento la imagen de la lente se encuentra a la izquierda del espejo. Esta imagen detrás del espejo forma un objeto virtual para el espejo.

Preguntas de opción múltiple

1. b), c), e)
3. c)
5. d)
7. d), e)
9. c)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. No podrá enfocar sus ojos sobre la fotografía y su imagen al mismo tiempo. Para enfocar sobre la fotografía, debe ajustar sus ojos de modo que un objeto a varios centímetros de distancia (la pintura) esté en foco. Por ende, enfoca sobre la superficie del espejo. Pero su imagen en el espejo está tan lejos detrás del espejo como usted lo está enfrente de él. En consecuencia, debe enfocar sus ojos más allá del espejo, el doble de lejos que la fotografía para llevar la imagen a foco.
3. Un solo espejo plano forma una imagen virtual de un objeto debido a dos factores. Primero, los rayos de luz del objeto necesariamente son divergentes del objeto y segundo, la falta de curvatura del espejo plano no pueden convertir los rayos divergentes en rayos convergentes. Si primero se usa otro elemento óptico para convergir los rayos de luz, entonces el espejo plano se puede colocar en la región donde se presentan los rayos convergentes y cambiará la dirección de los rayos de modo que la imagen real se forme en una ubicación diferente. Por ejemplo, si una imagen real se forma mediante una lente convexa y el espejo plano se coloca entre la lente y la posición de la imagen, la imagen formada por el espejo será real.
5. Se produce un efecto similar a un espejismo, excepto que el "espejismo" se ve flotando en el aire. Luces fantasma en el cielo se han visto en los cuerpos de agua por este efecto.
7. Considere los dos árboles como los dos objetos separados. El árbol lejano es un objeto que está más lejos de la lente que el árbol cercano. En consecuencia, la imagen del árbol lejano estará más cerca de la lente que la imagen del árbol cercano. La pantalla debe moverse más cerca de la lente para poner el árbol lejano en foco.
9. Este es un escenario posible. Cuando la luz cruza una frontera entre aire y hielo, refractará en la misma forma que lo hace cuando cruza una frontera de la misma forma entre aire y vidrio. Por lo tanto, una lente convergente puede hacerse de hielo y de vidrio. Sin embargo, el hielo es un retenedor tan fuerte de la radiación infrarroja que es improbable que pueda comenzar un fuego con una lente de hielo pequeña.
11. Si una lente convergente se coloca en un líquido que tenga un índice de refracción mayor que el del material de la lente, la dirección de refracción en las superficies de la lente estará invertida y la lente divergirá la luz. Un espejo sólo depende de la reflexión, que es independiente del material circundante, de modo que un espejo convergente será convergente en cualquier líquido.
13. La longitud focal de un espejo se determina mediante la ley de reflexión de la superficie del espejo. La ley de reflexión es independiente del material del cual esté hecho el espejo y del medio circundante. Por lo tanto, la longitud focal sólo depende del radio de curvatura y no del material. La longitud focal de una lente depende de los índices de refracción del material de la lente y del medio circundante. En consecuencia, la longitud focal de una lente depende del material de la lente.
15. Porque cuando observa *AIONA.IU8MA* en su espejo retrovisor, la aparente inversión de izquierda a derecha claramente muestra el nombre de la *AMBULANCIA* detrás de usted.

Problemas

1. a) más joven b) en el orden de 10^{-9} s
3. 10.0 pies, 30.0 pies, 40.0 pies
5. a) $p_1 + h$, detrás del espejo inferior b) virtual c) vertical d) 1.00 e) no

7. a) El objeto podría colocarse a 30.0 cm enfrente del espejo b) 0.333
9. a) El objeto está a 10.0 cm delante del espejo b) 2.00
11. 5.00 cm
13. 1.0 m
15. 8.05 cm
17. a) 26.8 cm detrás del espejo b) vertical c) 0.026 8
19. a) cóncavo con longitud focal $f = 0.83$ m b) El objeto debe estar 1.0 m enfrente del espejo.
21. 38.2 cm abajo de la superficie superior del hielo
23. 3.8 mm
25. $n = 2.00$
27. a) La imagen está 0.790 m de la superficie exterior del panel de vidrio, dentro del tanque de agua. b) Con un panel de vidrio de grosor despreciable, la imagen está 0.750 m dentro del tanque. c) Mientras más grueso sea el vidrio, más grande es la distancia entre la imagen final y la superficie exterior del vidrio.
29. 20.0 cm
31. a) 20.0 cm más allá de la lente; real, invertida, $M = -1.00$ b) No se forma imagen. De la lente salen rayos paralelos. c) 10.0 cm enfrente de la lente; virtual, derecha, $M = +2.00$
33. i) a) 13.3 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.333 ii) a) 10.0 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.500 iii) a) 6.67 cm enfrente de la lente, b) virtual, c) vertical, d) +0.667
35. a) 9.63 cm o 3.27 cm b) 2.10 cm
37. a) 39.0 mm b) 39.5 mm
39. 40.0 cm
41. 30.0 cm a la izquierda de la segunda lente, $M = -3.00$
43. 7.47 cm enfrente de la segunda lente; 1.07 cm; virtual, derecha
45. de 0.224 m a 18.2 m
47. imagen real, 5.71 cm enfrente del espejo
49. a) -34.7 cm b) -36.1 cm
51. 160 cm a la izquierda de la lente, invertida, $M = -0.800$
53. $q = 10.7$ cm
55. a) 32.0 cm a la derecha de la segunda superficie b) imagen real
57. a) 20.0 cm a la derecha de la segunda lente; $M = -6.00$ b) invertida c) 6.67 cm a la derecha de la segunda lente; $M = -2.00$; invertida
59. a) 1.99 b) 10.0 cm a la izquierda de la lente c) invertida
61. a) 5.45 m a la izquierda de la lente b) 8.24 m a la izquierda de la lente c) 17.1 m a la izquierda de la lente d) al rodear la lente con un medio que tenga un índice de refracción mayor que el del material de la lente.
63. a) 263 cm b) 79.0 cm
65. 8.57 cm

CAPÍTULO 24

Preguntas rápidas

1. c)
2. c)
3. c)
4. b)
5. b)
6. El disco compacto

Preguntas de ejemplo

1. Falso
2. La película jabonosa es más gruesa en la región que refleja luz roja.
3. El recubrimiento debe ser más delgado.
4. La longitud de onda es menor en agua que en aire, de modo que la distancia entre bandas oscuras también es menor.
5. Falso
6. Puesto que la longitud de onda se vuelve menor en agua, los ángulos a los primeros máximos se vuelven menores, lo que resulta en un máximo central más pequeño.

- La separación entre máximos principales será mayor.
- El polarizador adicional debe formar un ángulo de 90° con respecto al polarizador previo.

Preguntas de opción múltiple

- d)
- b)
- b)
- c)
- e)
- b)

Preguntas conceptuales

- No verá un patrón de interferencia de los faros del automóvil, por dos razones. La primera es que los faros no son fuentes coherentes y por lo tanto son incapaces de producir interferencia sostenida. Además, los faros están muy separados en comparación con las longitudes de onda emitidas que, incluso si se convirtieran en fuentes coherentes, los máximos y mínimos de interferencia estarían muy cercanamente espaciados para ser observables.
- El resultado de la doble rendija es redistribuir la energía que llega a la pantalla. Aunque no hay energía en la posición de una franja oscura, hay cuatro veces tanta energía en la posición de una franja brillante como la hay sólo con una sola rendija estrecha. La cantidad de energía total que llega a la pantalla es el doble de la que llega con una sola rendija, como debe ser de acuerdo con la ley de conservación de la energía.
- Uno de los materiales tiene un mayor índice de refracción que el agua, y el otro tiene un índice más bajo. El material con el índice más alto aparecerá negro conforme se aproxime a grosor cero. Habrá un cambio de fase de 180° para la luz reflejada de la superficie superior, mas no tal cambio de fase para la luz reflejada de la superficie inferior, porque el índice de refracción para el agua en el otro lado es menor que el de la película. Por lo tanto, las dos reflexiones estarán fuera de fase e interferirán de manera destructiva. El material con índice de refracción más bajo que el agua tendrá un cambio de fase para la luz reflejada de las superficies superior e inferior, de modo que la reflexión de la película de grosor cero de nuevo estará en fase y la película parecerá brillante.
- Puesto que la luz que se refleja en la superficie inferior de la película experimenta un cambio de fase de 180° , mientras que la luz reflejada de la superficie superior de la película no experimenta tal cambio, la mancha central (donde la película tiene grosor casi cero) será oscura. Si los anillos observados no son circulares, la superficie curva de la lente no tiene una verdadera forma esférica.
- Para comunicación regional en la superficie de la Tierra, las ondas de radio por lo general se transmiten de corrientes oscilatorias en altas torres verticales. La luz se origina de las vibraciones de los átomos o transiciones electrónicas dentro de los átomos, lo que representa oscilaciones en todas las direcciones posibles. Por ende, la luz por lo general no está polarizada.
- Sí. Para hacer esto, primero mida la reflectividad del radar del metal de su avión. Luego elija un material ligero y duradero que tenga aproximadamente la mitad de la reflectividad de radar del metal en su avión. Mida su índice de refracción y coloque en el metal un recubrimiento igual en grosor a un cuarto de 3 cm , dividido por dicho índice. Venda el avión rápidamente y luego puede vender al supuesto enemigo nuevos radares que operen a 1.5 cm , que el metal recubierto reflejará con extra-alta eficiencia.
- Si quiere realizar un experimento de interferencia, necesita luz coherente monocromática. Para obtenerla, primero debe pasar luz de una fuente ordinaria a través de un prisma o rejilla de difracción para dispersar diferentes colores en diferentes direcciones. Use una sola rendija estrecha, seleccione

un solo color y haga que la luz se difracte para cubrir ambas rendijas para un experimento de Young. El procedimiento es mucho más simple con un láser porque su salida ya es monocromática y coherente.

Problemas

- 632 nm
- a) 2.6 mm b) 2.62 mm
- a) 36.2° b) 5.08 cm c) $5.08 \times 10^{14}\text{ Hz}$
- a) 55.7 m b) 124 m
- 662 nm
- 11.3 m
- 148 m
- 75.0 m
- 85.4 nm
- 511 nm
- 0.500 cm
- a) 238 nm b) λ aumentará c) 328 nm
- $78.4\ \mu\text{m}$
- $4.75\ \mu\text{m}$
- 617 nm, 441 nm, 343 nm
- a) 8.10 mm b) 4.05 mm
- a) 1.1 m b) 1.7 mm
- 462 nm
- 1.20 mm, 1.20 mm
- a) 479 nm, 647 nm, 698 nm b) $20.5^\circ, 28.3^\circ, 30.7^\circ$
- 5.91° en primer orden; 13.2° en segundo orden, y 26.5° en tercer orden
- $1.81\ \mu\text{m}$
- 514 nm
- 9.17 cm
- a) 3.53×10^3 surcos/cm b) 11 máximos
- a) 1.11 b) 42.0°
- a) 56.7° b) 48.8°
- a) 55.6° b) 34.4°
- 6.89 unidades
- a) 413.7 nm, 409.7 nm b) 8.6°
- Una rendija de 0.12 mm de ancho. El máximo central es el doble del ancho de los otros máximos.
- 0.156 mm
- 2.50 mm
- a) 16.6 m b) 8.28 m
- 127 m
- 0.350 mm

CAPÍTULO 25

Preguntas rápidas

- c)
- a)

Preguntas ejemplo

- Verdadero
- Verdadero
- Una longitud focal más pequeña proporciona una mayor amplificación y se debe seleccionar
- Verdadero
- Sí. Aumentar la longitud focal del espejo aumenta la amplificación. Aumentar la longitud focal del ocular disminuye la amplificación.
- Ojos más espaciados aumentan el poder de resolución visual al aumentar efectivamente el tamaño de apertura, D , en la ecuación 25.10. En consecuencia, el ángulo de resolución limitante disminuye, lo que significa poder resolver detalles más finos de objetos distantes.
- La resolución es mejor en el extremo violeta del espectro visible.
- Verdadero

Preguntas de opción múltiple

1. c)
3. c)
5. c)
7. d)
9. b)
11. c)

Preguntas conceptuales

1. El observador *no* usa la lente como un amplificador simple.
Para que una lente se use como amplificador simple, la distancia del objeto debe ser menor que la longitud focal de la lente. Además, un amplificador simple produce una imagen virtual en el punto cercano normal del ojo o a una distancia de imagen de aproximadamente $q = -25$ cm. Con una gran distancia de objeto y una distancia de imagen relativamente corta, la magnitud de la amplificación por la lente sería considerablemente menor que uno. Muy probablemente, la lente en este ejemplo es parte de una combinación de lentes que se utilice como telescopio.
3. La imagen formada en la retina por el cristalino y la córnea ya está invertida.
5. Para que una lente opere como una lupa simple, el objeto debe ser ubicado dentro del punto focal de la lente. Si la potencia de la lente es $+20.0$ dioptrías, su distancia focal es

$$f = (1.00 \text{ m})/P = (1.00 \text{ m})/+20.0 = 0.050 \text{ m} = 5.00 \text{ cm}$$

El objeto se debe colocar un poco menos de 5.00 cm por delante de la lente.

7. Quiere una imagen real formada en el lugar del papel. Para formar una imagen así, la distancia del objeto debe ser mayor que la longitud focal de la lente.
9. Para que alguien vea un objeto a través de un microscopio, la longitud de onda de la luz en el microscopio debe ser menor que el tamaño del objeto. Un átomo es mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz en el espectro visible, de modo que un átomo nunca se puede ver con el uso de luz visible.
11. hipermetrópe; convergente
13. a) El patrón de difracción de un cabello es el mismo que el patrón de difracción producido por una rendija de la misma anchura. b) El máximo central está flanqueado por mínimos. Mida la anchura $2y$ del máximo central entre las cotas mínimas. Debido a que el ángulo es pequeño, puede utilizar

$$\begin{aligned} \sin \theta_{\text{osc.}} &\approx \tan \theta_{\text{osc.}} \\ m\lambda/a &\approx y/L \end{aligned}$$

para encontrar el ancho de uno de los cabellos.

Problemas

1. 7.0
3. 177 m
5. $f/1.4$
7. 8.0
9. a) 42.9 cm b) $+2.33$ dioptrías
11. 23.2 cm
13. a) -2.00 dioptrías b) 17.6 cm
15. $+17.0$ dioptrías
17. -2.50 dioptrías, una lente divergente
19. a) 5.8 cm b) $m = 4.3$
21. a) 4.07 cm b) $m = +7.14$
23. a) $|M| = 1.22$ b) $\theta/\theta_0 = 6.08$
25. 2.1 cm
27. 12.7
29. 3.38 min
31. a) 2.53 cm b) 88.5 cm
33. b) $-fh/p$ c) -1.07 mm
35. a) 1.50 b) 1.9
37. 492 km

39. $0.40 \mu\text{rad}$
41. 5.40 mm
43. 9.8 km
45. No. Se necesita un poder de resolución de 2.0×10^5 , y sólo hay disponibles 1.8×10^5 .
47. 1.31×10^3
49. $50.4 \mu\text{m}$
51. 40
53. a) 8.00×10^2 b) La imagen es invertida.
55. 15.4
57. a) $+2.67$ dioptrías b) 0.16 dioptría muy baja
59. a) $+44.6$ dioptrías b) 3.03 dioptrías
61. a) $m = 4.0$ b) $m = 3.0$

CAPÍTULO 26

Preguntas rápidas

1. Falso: la velocidad de la luz es c para todos los observadores.
2. a)
3. Falso
4. No. Desde su perspectiva usted está en reposo con respecto a la cabina, de modo que se medirá a usted mismo como poseedor de su longitud normal, y requerirá una cabina de tamaño normal.
5. i) a), e); ii) a), e)
6. Falso
7. a) Falso b) Falso c) Verdadero d) Falso

Preguntas de ejemplo

1. 9.61 s
2. c)
3. a)
4. $-0.946c$
5. a)
6. Muy poco de la masa se convierte en otras formas de energía en dichas reacciones, porque el número total de neutrones y protones no cambia. La energía liberada sólo es la energía asociada con sus interacciones.

Preguntas de opción múltiple

1. d), e)
3. b), c)
5. c)
7. e)
9. d)
11. b)

Preguntas conceptuales

1. Un elipsoide. La dimensión en la dirección de movimiento mediría menos que D .
3. No. El principio de relatividad implica que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz en el *vacío*, que es igual a 3.00×10^8 m/s.
5. A medida que el objeto se aproxima a la velocidad de la luz, su energía cinética aumenta sin límite. Se necesitaría una inversión infinita de trabajo para acelerar el objeto a la velocidad de la luz.
7. Para una maravillosa exploración ficticia de esta cuestión, consiga un libro de "Mr. Tompkins" de George Gamow. Todos los efectos relativistas serían obvios en su vida. Ocurrirían la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud. Para llegar rápido a casa, usted pisaría el acelerador no para aumentar tu velocidad, sino para acortar los bloques. Grandes corrimientos Doppler en las frecuencias de las ondas harían que las luces rojas parecieran verdes conforme se aproxime a ellas y harían inútiles las sirenas y los radios. La transportación a alta velocidad sería muy costosa, pues requeriría enormes compras de combustible, así como peligrosas, pues un auto en aceleración podría derribar un edificio. Cuando llegara a casa, hambriento, descubriría que perdió la cena; habría una demora de cinco días en el tránsito cuando observara un

programa de televisión en vivo originado en Australia. Finalmente, no podría ver la Vía Láctea, pues la bola de fuego del Big Bang lo rodearía a la distancia de Rigel o Deneb.

9. Un fotón transporta energía. La equivalencia relativista de masa y energía significa que es suficiente para darle cantidad de movimiento.
11. Supongamos que un tren se está moviendo más allá de usted. Una manera de medir su longitud es la siguiente: marcar las pistas del quita vacas que forman la parte delantera de la máquina en movimiento a las 9:00:00 a.m., mientras que al mismo tiempo, su asistente marca las pistas en la parte posterior del furgón de cola. A continuación, encuentre la distancia entre las marcas en las pistas con una cinta métrica. Usted y su asistente deben hacer las marcas de forma simultánea en el marco de referencia, de lo contrario, el movimiento del tren hará su longitud diferente de la distancia entre las marcas.

Problemas

1. a) 1.38 años b) 1.31 años luz
 3. $0.103c$
 5. a) 1.3×10^{-7} s b) 38 m c) 7.6 m
 7. a) 1.55×10^{-5} s b) 7.09 c) 2.19×10^{-6} s d) 649 m
 e) Desde el punto de vista del tercer observador, el muón viaja más rápido, así que, de acuerdo con el tercer observador, la vida del muón es más larga que la medida por el observador en reposo con respecto a Tierra.
 9. $0.950c$
 11. Sí, con 19 m para dispersar
 13. a) $\frac{2\sqrt{2}}{3}c = 0.943c = 2.83 \times 10^8$ m/s b) el resultado puede ser igual.
 15. $0.285c$
 17. $0.54c$ hacia la derecha
 19. $0.357c$
 21. $0.998c$ hacia la derecha
 23. a) $0.999997c$ b) 3.74×10^5 MeV
 25. $0.786c$
 27. a) 8.65×10^{22} J b) 9.61×10^5 kg
 31. a) 3.91×10^4 b) 7.67 cm
 33. a) $0.979c$ b) $0.0652c$ c) $0.914c$
 35. $0.917c$
 37. a) $v/c = 1 - 1.13 \times 10^{-10}$ b) 5.99×10^{27} J
 c) $\$2.16 \times 10^{20}$
 39. a) $0.800c$ b) 7.50×10^3 s c) 1.44×10^{12} m d) $0.385c$
 41. $0.80c$
 43. a) $v = 0.141c$ b) $v = 0.436c$
 45. a) $7.0 \mu\text{s}$ b) 1.1×10^4 muones
 47. 5.5 años; Valento es más viejo
 49. a) 17.4 m b) 3.30° con respecto a la dirección de movimiento

CAPÍTULO 27

Preguntas rápidas

- Verdadero
- b)
- c)
- Falso
- c)

Preguntas de ejemplo

- Falso
- Falso
- Parte de la energía del fotón se transfiere al electrón.
- Duplicar la velocidad de una partícula duplica su cantidad de movimiento, lo que reduce la longitud de onda de la partícula por un factor de un medio. Esta respuesta ya no es cierta cuando la velocidad duplicada es relativista.
- Verdadero

Preguntas de opción múltiple

- b)
- b)
- a) y c)
- e)
- b)
- a)

Preguntas conceptuales

- La forma de un objeto normalmente se determina al observar la luz que se refleja de su superficie. En un horno, el objeto estará muy caliente y brillará rojo. La radiación emitida es mucho más intensa que la radiación reflejada y la radiación térmica emitida sólo es ligeramente dependiente del material del que está hecho el objeto. A diferencia de la luz reflejada, la luz emitida llega de todas las superficies con igual intensidad, de modo que el contraste se pierde y la forma del objeto es más difícil de distinguir.
- La "negritud" de un cuerpo negro se refiere a su propiedad ideal de absorber toda la radiación que incide sobre él. Si un objeto a temperatura ambiente que usted observa en la vida cotidiana absorbe toda la radiación, lo describe como (visiblemente) negro. Sin embargo, la apariencia negra se debe al hecho de que los ojos son sensibles sólo a luz visible. Si pudiera detectar luz infrarroja con sus ojos, vería el objeto que emite radiación. Si la temperatura del cuerpo negro se eleva, la ley de Wien dice que la radiación emitida se moverá hacia el rango visible del espectro. Por lo tanto, el cuerpo negro podría parecer rojo, blanco o azul, dependiendo de su temperatura.
- Todos los objetos radian energía, pero a temperatura ambiente esta energía principalmente está en la región infrarroja del espectro electromagnético, que los ojos no pueden detectar. (Las serpientes de cuevas tienen órganos sensoriales que *son* sensibles a la radiación infrarroja; por ende, pueden buscar a sus presas de sangre caliente en lo que se consideraría oscuridad absoluta.)
- La luz de mayor frecuencia se puede representar como un torrente de fotones de mayor energía. En una colisión, un fotón puede ceder toda su energía a un solo electrón. La energía cinética de tal electrón se mide mediante el potencial de frenado. El voltaje inverso (voltaje de frenado) requerido para detener la corriente es proporcional a la frecuencia de la luz entrante. La luz más intensa consiste en más fotones que golpean un área unitaria cada segundo, pero los átomos son tan pequeños que un electrón emitido nunca consigue una "patada" de más de un fotón. Aumentar la intensidad de la luz por lo general aumenta el tamaño de la corriente, pero no cambiará la energía de los electrones individuales que expulsa. Por lo tanto, el potencial de frenado permanece constante.
- La teoría ondulatoria predice que el efecto fotoeléctrico debe ocurrir a cualquier frecuencia, siempre que la intensidad de la luz sea suficientemente alta. Sin embargo, como se ve en los experimentos fotoeléctricos, la luz debe tener frecuencia suficientemente alta para que ocurra el efecto.
- a) Los electrones se emiten sólo si la frecuencia del fotón es mayor que la frecuencia de corte.
- No. Suponga que la frecuencia de la luz incidente a la que observa primero el efecto fotoeléctrico está por arriba de la frecuencia de corte del primer metal, pero es menor que la frecuencia de corte del segundo metal. En este caso, el efecto fotoeléctrico no se observaría en absoluto en el segundo metal.
- Un electrón tiene las características clásicas de onda y de partícula. En la difracción de una y de doble rendija y los experimentos de interferencia, los electrones se comportan como ondas clásicas. Un electrón tiene masa y carga. Lleva la energía cinética y el momento en lotes de tamaño definido, como hacen las partículas clásicas. Al mismo tiempo, tiene una longitud de onda y frecuencia. A pesar de que un electrón presenta las características clásicas de onda y partícula, no es una onda,

ni una partícula clásicas. Se acostumbra a llamar una partícula cuántica, pero otro término inventado en 1920, como “wavicle” (una mezcla de *wave*-onda- y *particle*-partícula-) podría servir igual de bien.

Problemas

1. a) $\approx 3\,000\text{ K}$ b) $\approx 20\,000\text{ K}$
3. $9.47\ \mu\text{m}$, el cual está en la región infrarroja del espectro
5. a) $2.49 \times 10^{-5}\text{ eV}$ b) 2.49 eV c) 249 eV
7. a) 2.57 eV b) $1.28 \times 10^{-5}\text{ eV}$ c) $1.91 \times 10^{-7}\text{ eV}$
9. a) 2.24 eV b) 555 nm c) $5.41 \times 10^{14}\text{ Hz}$
11. a) $1.02 \times 10^{-18}\text{ J}$ b) $1.53 \times 10^{15}\text{ Hz}$ c) 196 nm
d) 2.15 eV e) 2.15 V
13. $4.8 \times 10^{14}\text{ Hz}$, 2.0 eV
15. $1.2 \times 10^2\text{ V}$ y $1.2 \times 10^7\text{ V}$, respectivamente
17. 17.8 kV
19. 0.078 nm
21. 0.281 nm
23. 70.0°
25. a) $1.18 \times 10^{-23}\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) 478 eV
27. a) 1.46 km/s b) $7.28 \times 10^{-11}\text{ m}$
29. $3.58 \times 10^{-13}\text{ m}$
31. a) 15 keV b) $1.2 \times 10^2\text{ keV}$
33. $\sim 10^6\text{ m/s}$
35. Dentro de 1.16 mm para el electrón, $5.28 \times 10^{-32}\text{ m}$ para la bala
37. $3 \times 10^{-29}\text{ J}$
39. a) $2.21 \times 10^{-32}\text{ kg} \cdot \text{m/s}$ b) $1.00 \times 10^{10}\text{ Hz}$
c) $4.14 \times 10^{-5}\text{ eV}$
41. 2.5×10^{20} fotones
43. a) $5\,200\text{ K}$ b) claramente, una luciérnaga no está a dicha temperatura, de modo que esta no puede ser radiación de cuerpo negro.
45. 1.36 eV
47. 2.00 eV
49. a) $0.022\text{ }0c$ b) $0.999\text{ }2c$

CAPÍTULO 28

Preguntas rápidas

1. b)
2. a) 5 b) 9 c) 25
3. d)

Preguntas de ejemplo

1. La energía asociada con el número cuántico n aumenta con el número cuántico m creciente y tiende a cero en el límite de n arbitrariamente grande. Por tanto, una transición de un nivel de energía muy alto al estado base resulta en la emisión de fotones que se aproximan a una energía de 13.6 eV , la misma que la energía de ionización.
2. La diferencia de energía en el átomo de helio será cuatro veces la de la misma transición en hidrógeno. Los niveles de energía en los átomos hidrogenoides son proporcionales a Z^2 , donde Z es el número atómico.
3. Los números cuánticos n y ℓ nunca son negativos.
4. No. La capa M está a una mayor energía; por lo tanto, las transiciones de la capa M a la capa K siempre resultarán en más fotones energéticos que cualquier transición de la capa L a la capa K.

Preguntas de opción múltiple

1. b)
3. e)
5. c)
7. c)
9. c)
11. a)
13. c)

Preguntas conceptuales

1. Si la energía del átomo de hidrógeno fuese proporcional a n (o cualquier potencia de n), entonces la energía se volvería infinita conforme n crece al infinito. Pero la energía del átomo es inversamente proporcional a n^2 . Por ende, conforme n crece al infinito, la energía del átomo tiende a un valor que está por arriba del estado base por una cantidad finita, a saber, la energía de ionización 13.6 eV . Conforme el electrón cae de un estado enlazado a otro, su pérdida de energía siempre es menor que la energía de ionización. La energía y la frecuencia de cualquier fotón emitido son finitos.
3. Los rayos X característicos se originan de transiciones dentro de los átomos del blanco, tal que un electrón de la capa L realiza una transición a una vacante en la capa K. La vacante se provoca cuando un electrón acelerado en el tubo de rayos X suministra energía al electrón de la capa K para expulsarlo del átomo. Si la energía de los electrones bombarderos aumentara, el electrón de la capa K se expulsará del átomo con más energía cinética restante. Pero la diferencia de energía entre las capas K y L no cambia, de modo que el rayo X emitido tiene exactamente la misma longitud de onda.
5. Es posible un espectro continuo sin rayos X característicos. A una baja diferencia de potencial aceleradora, posiblemente el electrón no tenga suficiente energía para expulsar un electrón de un átomo blanco. Como resultado, no habrá rayos X característicos. El cambio en rapidez del electrón conforme ingresa al blanco resultará en el espectro continuo.
7. El holograma es un patrón de interferencia entre la luz que se dispersa del objeto y el haz de referencia. Si algo se mueve una distancia comparable a la longitud de onda de la luz (o más), el patrón se deslavará. El efecto es como si se pusieran a vibrar las rendijas en el experimento de Young, lo que haría que las franjas de interferencia vibraran salvajemente, de modo que una fotografía de la pantalla sólo mostraría la intensidad promedio en todas partes.
9. Si el principio de exclusión de Pauli no fuese válido, los elementos y su comportamiento químico serían enormemente diferentes, pues todo electrón terminaría en el nivel de energía más bajo del átomo. En consecuencia, toda la materia sería casi parecida en su química y composición, pues las estructuras de capas de cada elemento serían idénticas. La mayoría de los materiales tendría una densidad mucho mayor y los espectros de los átomos y moléculas serían muy simples, lo que resultaría en la existencia de menos color en el mundo.
11. Los tres elementos tienen configuraciones electrónicas similares, con capas interiores llenas más un solo electrón en un orbital s . Dado que los átomos por lo general interactúan a través de sus capas exteriores no llenas y puesto que las capas exteriores de dichos átomos son similares, las interacciones químicas de los tres átomos serían similares.
13. Cada uno de los ocho electrones debe tener al menos un número cuántico diferente de cada uno de los otros. Pueden diferir (en m_ℓ) por ser espín arriba o espín abajo. Pueden diferir (en ℓ) en cantidad de movimiento angular y en la forma general de la función de onda. Aquellos electrones con $\ell = 1$ pueden diferir (en m_ℓ) en orientación de la cantidad de movimiento angular.
15. La emisión estimulada es la razón por la que la luz láser es coherente y tiende a viajar en un haz paralelo bien definido. Cuando un fotón que pasa por un átomo excitado estimula dicho átomo para emitir un fotón, el fotón emitido está en fase con el fotón original y viaja en la misma dirección. Conforme este proceso se repite muchas veces, se produce un intenso haz paralelo de luz coherente. Sin emisión estimulada, los átomos excitados regresarían al estado base al emitir fotones en momentos aleatorios y en direcciones aleatorias. La luz resultante no tendría las útiles propiedades de la luz láser.

Problemas

1. a) 121.5 nm , 102.5 nm , 97.20 nm b) Ultravioleta lejano
3. a) $2.3 \times 10^{-8}\text{ N}$ b) -14 eV

5. a) 1.6×10^6 m/s b) No. $v/c = 5.3 \times 10^{-3} \ll 1$
 c) 0.45 nm d) Sí. La longitud de onda es aproximadamente del mismo tamaño que el átomo.
 7. a) 0.212 nm b) 9.95×10^{-25} kg · m/s c) 2.11×10^{-34} J · s
 d) 3.40 eV e) -6.80 eV f) -3.40 eV
 11. $E = -1.51$ eV ($n = 3$) a) $E = -3.40$ eV ($n = 2$)
 13. a) 2.86 eV b) 0.472 eV
 15. a) 1.89 eV b) 658 nm c) 3.02 eV d) 412 nm
 e) 366 nm
 17. a) 488 nm b) 0.814 m/s
 19. a) 3 b) 520 km/s
 21. a) 0.476 nm b) 0.997 nm
 23. a) 0.026 5 nm b) 0.017 6 nm c) 0.013 2 nm
 25. a) 1.31 μ m b) 164 nm

27. n	ℓ	m_ℓ	m_s
3	2	2	$\frac{1}{2}$
3	2	2	$-\frac{1}{2}$
3	2	1	$\frac{1}{2}$
3	2	1	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	$\frac{1}{2}$
3	2	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	-1	$\frac{1}{2}$
3	2	-1	$-\frac{1}{2}$
3	2	-2	$\frac{1}{2}$
3	2	-2	$-\frac{1}{2}$

29. Quince posibles estados, como se resume en la tabla siguiente:

n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
ℓ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
m_ℓ	2	2	2	1	1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2
m_s	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0	-1	1	0

31. aluminio

33. a) $n = 4$ y $\ell = 2$ b) $m_\ell = (0, \pm 1, \pm 2)$, $m_s = \pm 1/2$
 c) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^2 5s^2 = [\text{Kr}] 4d^2 5s^2$
 35. a) 14 keV b) 8.9×10^{-11} m
 37. Capa L: 11.7 keV; capa M: 10.0 keV; capa N: 2.30 keV
 39. a) 10.2 eV b) 7.88×10^4 K
 41. a) 5.40 keV b) 3.40 eV c) 5.40 keV
 43. a) 4.24×10^{15} W/m² b) 1.20×10^{-12} J

CAPÍTULO 29

Preguntas rápidas

- Falso
- c)
- c)
- a) y b)
- b)

Preguntas de ejemplo

- El tritio tiene la mayor energía de enlace. A diferencia del tritio, el helio tiene dos protones que ejercen una fuerza electrostática repulsiva mutua. En consecuencia, el núcleo de helio-3 no está tan firmemente enlazado como el núcleo de tritio.
- Duplicar la masa inicial del material radiactivo duplica la actividad inicial. Duplicar la masa no tiene efecto sobre la vida media.
- 7.794×10^{-13} J, 4.60×10^{11} J
- La energía de enlace del carbono-14 debe ser mayor que el nitrógeno-14 porque el nitrógeno tiene más protones en su núcleo. La repulsión mutua de los protones significa que el núcleo de nitrógeno requeriría menos energía para romper que el núcleo de carbono.
- No
- Las reacciones entre helio y berilio se pueden encontrar en el Sol.

Preguntas de opción múltiple

- d)
- e)
- c)
- a)
- c), e)
- b)

Preguntas conceptuales

- Una partícula alfa contiene dos protones y dos neutrones. Puesto que el núcleo de hidrógeno sólo contiene un protón, no puede emitir una partícula alfa.
- Los isótopos de un elemento dado corresponden a núcleos con diferente número de neutrones. Esto resultará en una variedad de diferentes propiedades físicas para los núcleos, incluidos obviamente los de masa. Sin embargo, el comportamiento químico está gobernado por los electrones del elemento. Todos los isótopos de un elemento dado tienen el mismo número de electrones y por lo tanto el mismo comportamiento químico.
- El núcleo Y será más inestable. El núcleo con la mayor energía de unión requiere más energía para ser separado en sus partes constituyentes y tiene menos energía disponible para liberar en un decaimiento.
- En el decaimiento alfa, sólo hay dos partículas finales: la partícula alfa y el núcleo hijo. También existen dos principios de conservación: de energía y de cantidad de movimiento. Como resultado, la partícula alfa debe expulsarse con una energía discreta para satisfacer ambos principios de conservación. Sin embargo, el decaimiento beta es un decaimiento de tres partículas: la partícula beta, el neutrino (o antineutrón) y el núcleo hijo. Como resultado, la energía y la cantidad de movimiento se pueden compartir en varias formas entre las tres partículas mientras satisfagan los dos principios de conservación. Esto permite un rango continuo de energías para la partícula beta.
- La mayor energía en reposo del neutrón significa que un protón libre en el espacio no decaerá espontáneamente en un neutrón y un positrón. No obstante, cuando el protón está en el núcleo, la pregunta importante es la de la energía en reposo total del núcleo. Si es energéticamente favorable que el núcleo tenga un protón menos y un neutrón más, entonces ocurrirá el proceso de decaimiento para lograr esta menor energía.
- La datación con carbono por lo general no se puede usar para estimar la edad de una piedra, porque la piedra no estaba viva para captar carbono del entorno. La datación con carbono sólo se puede usar para estimar la edad de los objetos que alguna vez estuvieron vivos.

Problemas

- a) 1.5 fm b) 4.7 fm c) 7.0 fm d) 7.4 fm
- 1.8×10^2 m
- a) 27.6 N b) 4.16×10^{27} m/s² c) 1.73 MeV
- 1.9×10^7 m/s b) 7.1 MeV
- a) 8.26 MeV/nucleón b) 8.70 MeV/nucleón
- 3.54 MeV
- a) 0.210 MeV/nucleón mayor para ^{23}Na b) atribuible a menos repulsión de protones
- 2.29 g
- a) 6.95×10^5 s b) 9.97×10^{-7} s⁻¹ c) 1.9×10^4 decaimiento /s d) 1.9×10^{10} núcleos e) 5, 0.200 mCi
- 8.06 días
- a) 5.58×10^{-2} h⁻¹, 12.4 h b) 2.39×10^{13} núcleos c) 1.9 mCi
- a) $^{208}_{81}\text{Tl}$ b) $^{95}_{37}\text{Rb}$ c) $^{144}_{60}\text{Nd}$
- decaimiento $e^+ \ ^{56}_{27}\text{Co} \rightarrow \ ^{56}_{26}\text{Fe} + e^+ + \nu$
- a) no puede ocurrir espontáneamente b) puede ocurrir espontáneamente
- 18.6 keV
- 4.22×10^3 años
- a) $^{21}_{10}\text{Ne}$ b) $^{144}_{54}\text{Xe}$ c) $X = e^+$, $X' = \nu$

35. a) $^{13}_6\text{C}$ b) $^{10}_5\text{B}$
 37. a) $^{197}_{79}\text{Au} + n \rightarrow ^{198}_{80}\text{Hg} + e^- + \bar{\nu}$ b) 7.89 MeV
 39. a) El producto del núcleo es $^{10}_5\text{B}$. b) -2.79 MeV
 41. 18.8 J
 43. 24 d
 45. a) 8.97×10^{11} electrones b) 0.100 J c) 100 rad
 47. a) 3.18×10^{-7} mol b) 1.91×10^{17} núcleos
 c) 1.08×10^{14} Bq d) 8.92×10^6 Bq
 49. 46.5 d
 51. a) 4.0×10^9 años b) No podría ser más vieja. c) La roca podría ser más joven si algo de ^{87}Sr estuviera presente inicialmente.
 53. 54 μCi
 55. 5.9 miles de millones de años

CAPÍTULO 30

Preguntas rápidas

- a)
- b)

Preguntas de ejemplo

- 1 mg/años
- 1.77×10^{12} J
- Verdadero
- No. Dicha reacción viola la conservación del número bariónico.

Preguntas de opción múltiple

- d)
- b)
- d)
- b)
- c) y d)
- a), c) y d)

Preguntas conceptuales

- El experimento descrito es una buena analogía del experimento de dispersión de Rutherford. En el experimento de Rutherford, de los átomos se dispersaban partículas alfa y la dispersión era consistente con una pequeña estructura en el átomo que contenía la carga positiva.
- La mayor carga de quark es $2e/3$, de modo que una combinación de sólo dos partículas, un quark y un antiquark que forman un mesón, podría no tener una carga eléctrica de $+2e$. Sólo las partículas que contienen tres quarks, cada una con una carga de $2e/3$, pueden combinarse para producir una carga total de $2e$.
- Hasta aproximadamente 700 000 años después del Big Bang, la temperatura del Universo era lo suficientemente alta como para que cualquier átomo formado se ionizara con radiación ambiente. Una vez que la energía de radiación promedio cayó por debajo de la energía de ionización del hidrógeno, de 13.6 eV, los átomos de hidrógeno se pudieron formar y permanecer como átomos neutros durante un periodo relativamente largo.
- En el modelo de quarks, todos los hadrones están compuestos de unidades más pequeñas llamadas quarks. Los quarks tienen una carga eléctrica fraccional y un número bariónico de $1/3$. Existen seis "sabores" de quarks: arriba (u), abajo (d), extraño (s), encanto (c), cima (t) y fondo (b). Todos los bariones contienen tres quarks y todos los mesones contienen un quark y un antiquark. La sección 30.12 tiene una discusión más detallada del modelo de quarks.
- Bariones y mesones son hadrones, e interactúan principalmente a través de la fuerza fuerte. No son partículas elementales, pues están compuestos de o tres quarks (bariones) o un quark y un antiquark (mesones). Los bariones tienen un número bariónico distinto de cero con espín $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{2}$. Los mesones tienen un número bariónico de cero y un espín 0 o 1.

- Todas las partículas estables distintas de protones y neutrones tienen número bariónico cero. Dado que el número bariónico debe conservarse, y los estados finales del decaimiento de kaón no contienen protones o neutrones, el número bariónico de todos los kaones debe ser *cero*.
- Los reactores de fisión no emiten gases de efecto invernadero como subproductos de la quema de combustibles fósiles, el único medio ambiental necesario de descarga es el calor. Los costos involucrados en la producción de material fisible es comparable con el costo de bombeo, transporte y refinación de combustibles fósiles. El costo por kilovatio hora de energía nuclear es menor que la de carbón, y mucho menos que la de petróleo o de agas, que con el tiempo es mayor que los costos de las centrales nucleares. Además, el combustible nuclear gastado se puede reciclar en reactores, mientras que cuando los combustibles fósiles se agotan, los residuos vierten en la atmósfera. Finalmente, las reservas mundiales de uranio, si se usa en los reactores, tendrán una duración mucho más larga que el suministro mundial de combustibles fósiles.

La desventaja es que algunos de los productos de una reacción de fisión son radiactivos y algunos de ellos tienen vida media larga. Habrá un punto en el que se gasta el combustible suficiente para que las barras de combustible no suministren energía económica y deben ser reemplazados o reciclados. Las barras de combustible siguen siendo radiactivas después de la eliminación. Tanto los residuos y las barras de combustible "gastado" representan serios riesgos de salud y ambientales que pueden durar decenas de miles de años, si no se manejan adecuadamente o son reciclados en los reactores productores. Los riesgos ambientales de los residuos de los reactores nucleares son probablemente mucho menores que los debidos a la quema de combustibles fósiles.

Problemas

- 1.1×10^{16} fisiones
- 126 MeV
- a) 16.2 kg b) 117 g
- a) $3/a$ b) $3.72/a$ c) La relación superficie-volumen es más baja en la esfera, por lo tanto, la esfera tiene la mejor forma para que las fugas sean mínimas.
- 1.01 g
- a) ^4_8Be b) $^{12}_6\text{C}$ c) 7.27 MeV
- 4.03 MeV
- 14.1 MeV
- a) 4.53×10^{23} Hz b) 0.662 fm
- 67.5 MeV, $67.5 \text{ MeV}/c$, 1.63×10^{22} Hz
- a) conservación de número leptónico electrónico y conservación de número leptónico muónico b) conservación de carga c) conservación de número bariónico d) conservación de número bariónico e) conservación de carga
- a) viola la conservación del número bariónico (no permitido). b) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción fuerte. c) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción débil solamente. d) Esta reacción se puede producir por la interacción débil solamente. e) Esta reacción puede ocurrir a través de la interacción electromagnética.
- a) no se conserva b) se conserva c) se conserva d) no conserva e) no se conserva f) no se conserva
- 3.34×10^{26} electrones, 9.36×10^{26} quarks arriba, 8.70×10^{26} quarks abajo
- a) Σ^+ b) π^- c) K^0 d) Ξ^-
- un neutrón, udd
- 18.8 MeV
- a) K^+ b) Ξ^0 c) π^0
- 26
- b) 12 días
- 29.8 MeV
- 3.60×10^{38} protones/s

Nota: Los números de página seguidos de *f* y *t* se refieren a figuras y tablas, respectivamente.

- A**
- A través, de la onda, 457
- Abejas, navegación en, 847
- Aberración cromática, 814, 814*f*, 816
- Aberraciones esféricas, en vidrio y espejos, 794, 794*f*, 814, 814*f*, 816, 870
- Abertura
- circular, resolución de, 872, 872*f*, 878
 - de la cámara, 814, 860, 860*f*
 - una sola rendija, resolución de, 871–872, 871*f*, 872*f*, 878
- Absorción estimulada, 949, 949*f*, 951
- Absorción selectiva, polarización de ondas de luz por parte de, 843–845, 843*f*, 844*f*
- AC. *Véase entradas en* Corriente alterna
- Acción capilar, 311–312, 311*f*, 312*f*
- Aceite de silicón
- constante dieléctrica, 575*t*
 - en capacitores, 574
 - rigidez dieléctrica, 575*t*
- Aceleración (*a*), 33–35, 47–48. *Véase también*
- Aceleración angular, Aceleración centripeta
- constante
- en dos dimensiones, 70–71
 - estrategias para resolver problemas, 38
 - movimiento en una dimensión con, 36–42, 37*f*, 37*t*, 48
- contra velocidad, 35–36, 36*f*
- de caída libre, 43, 48
- a diferentes alturas, 215*t*
- desaceleración frente a la aceleración negativa, 33
- dirección de, 33, 35–36, 36*f*
- en dos dimensiones, 63, 70–71, 75
- en un movimiento armónico simple
- como función de la posición, 438–439, 463
 - en función del tiempo, 449–450, 449*f*, 463
- en una dimensión, 33–35
- gráfica velocidad-tiempo, 34, 34*f*
- instantáneo
- bajo aceleración constante, 37
 - en dos dimensiones, 63, 75
 - en una dimensión, 34–35, 48
 - gráfica de velocidad en función del tiempo, 34, 34*f*, 48
- negativa, 33
- pico, 41–42, 42*f*
- promedio (α_{prom})
- en dos dimensiones, 63, 75
 - en la gráfica de velocidad en función del tiempo, 34, 34*f*
 - en una dimensión, 33–34, 47
- Segunda ley de Newton y, 89–90, 101–105, 112
- tangencial, 204, 224
- total, 208–209
- y peso, 103–104, 103*f*
- Aceleración angular
- aceleración total, 208–209
 - como cantidad vectorial, 209
 - constante movimiento, de rotación en, 202–203, 224
 - dirección de, 209
 - instantánea (α), 201
 - aceleración tangencial y, 204, 224
 - promedio (α_{prom}), 201, 224
 - torque y, 247–249, 261
- Aceleración angular instantánea (α), 201
- aceleración tangencial y, 204, 224
- Aceleración angular media (α_{prom}), 201, 224
- Aceleración centripeta (a_c), 207–214, 207*f*, 224
- definición de, 207
 - estrategias para resolver problemas, 210–211
 - fuerzas que causan, 209–214 y 210*f*
- Aceleración constante
- en dos dimensiones, 70–71
 - estrategias para resolver problemas, 38
 - movimiento en una dimensión con, 36–42, 37*f*, 37*t*, 48
- Aceleración instantánea (*a*)
- bajo aceleración constante, 37
 - en dos dimensiones, 63, 75
 - en una dimensión, 34–35, 48
 - gráfica de velocidad en función del tiempo, 34, 34*f*, 48
- Aceleración negativa, 33
- Aceleración promedio (\bar{v})
- en dos dimensiones, 63, 75
 - en una dimensión, 33–34, 47
 - gráfica de la velocidad en función del tiempo, 34, 34*f*
- Aceleración tangencial, 204, 224
- Aceleración total, 208–209
- Acelerador de partículas atómicas. *Véase* Ciclotrón
- Acelerador lineal. *Véase también* Ciclotrón
- Acero
- módulo elástico, 283*t*
 - resistencia a la rotura, 285*t*
 - velocidad del sonido en, 476*t*
- Acondicionadores de aire, 413–414
- Acondicionamiento aeróbico, 426, 426*t*
- Acrílico, índice de refracción, 771*f*
- Actinio (Ac), series radiactivas, 971, 971*t*
- Actividad. *Véase también* Índice de decaimiento
- Actividad óptica, 847, 847*f*
- Actividad óptica del plástico, 847, 848*f*
- Adenina, 920
- ADN, la estructura de, la determinación, 919–920, 919*f*, 920*f*
- Agencia Europea del Espacio, lugar de lanzamiento, 197
- Agentes activos, 309
- Agentes humectantes, 311, 311*f*
- Agua
- calor específico, 365*t*
 - calor específico molar, 401*t*
 - calor latente de fusión, 369, 370*t*
 - calor latente de vaporización, 369–370, 370*t*
 - cambio de fase en, 370–371, 370*f*, 372
 - como dispositivo de nivelación, 292
 - como molécula polar, 578, 578*f*
 - conductividad térmica, 376*t*
 - constante dieléctrica, 575*t*, 578
 - curva de temperatura *vs.* densidad, 342–343, 343*f*
 - densidad de, 279*t*
 - vs.* temperatura, 342–343, 343*f* - expansión térmica de, 341–343, 343*f*
 - gotas, forma de, 308–309
 - índice de refracción, 767*t*
 - moderación de temperatura por el aire, 365
 - módulo a granel de, 283*t*
 - módulo elástico para, 283*t*
- ondas
- interferencia, reflexión y difracción en, 826, 826*f*, 828, 828*f*
 - olas del mar, 437*f*, 457
- ondas, color de, 764
- ósmosis, 316–317
- punto de congelación, 333, 334, 335, 336*f*
- punto de ebullición, 333, 334, 335, 336*f*
- punto de ebullición, las corrientes de convección en, 380
- punto triple del, 335
- rigidez dieléctrica, 575*t*
- superficie de, 310–311, 310*f*
- tensión superficial, 309*t*
- variación de la presión con la profundidad, 290, 319
- velocidad del sonido en, 476*t*, 478
- viscosidad de, 313*t*
- Agua del océano, velocidad del sonido en, 476*t*, 478
- Aguja, flotante de, 308, 308*f*
- Agujeros negros, 86, 905
- Aire. *Véase también* Atmósfera
- conductividad térmica de, 376*t*
 - constante dieléctrica, 575*t*
 - corrientes de convección en, 380
 - densidad de, 279*t*
 - índice de refracción, 767*t*
 - rigidez dieléctrica, 574, 575*t*
 - velocidad del sonido en, 476–477, 476*t*
- Aislamiento térmico (valor *R*), 378–380, 378*t*
- Aislantes
- carga inducida en, 516, 517*f*
 - definición, 515, 539
- Ajuste del circuito de la radio, 736
- Ajuste, de instrumentos de cuerda, 499–500
- Alcohol etílico
- calor específico, 365*t*
 - calor latente de fusión, 370*t*
 - calor latente de vaporización, 370*t*
 - densidad de, 279*t*
 - índice de refracción, 767*t*
 - tensión superficial, 309*t*
- Alcohol metílico, velocidad del sonido en, 476*t*
- Aleación de acero, 649
- Aleteo vascular, 305–306, 305*f*

- Alfabeto griego, A.19t
- Álgebra, repaso de, A.4–A.12
- Almacenamiento de ácaros (*Lepidoglyphus destructor*), 911f
- Alojamiento, 861, 862–863
- Alpher, Ralph, 999f
- Altura de la imagen, 791, 815. *Véase también* Ampliación, lateral
- Altura del objeto, 791, 815. *Véase también* Ampliación, lateral
- Aluminio (Al)
- calor específico, 365t
 - calor latente de fusión, 370t
 - calor latente de vaporización, 370t
 - coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
 - como conductor, 515
 - como superconductor, 604, 604t
 - como sustancia paramagnética, 674
 - conductividad térmica, 376t
 - configuración de estado base, 946t
 - densidad, 279t
 - función de trabajo, 915t
 - módulo de elasticidad, 283t
 - resistencia a la rotura, 285t
 - resistividad, 598t
 - velocidad del sonido en, 476t
- Amortiguación, 454–455, 455f
- Amortiguador ideal, 382
- Amortiguamiento crítico, 455, 455f
- Ampère (A), 66, 591, 608
- Ampère, André-Marie, 665, 666f
- Amperímetro, 595, 725, 750
- Ampliación máxima angular, 865–866, 877
- Ampliación. *Véase también* Microscopios, telescopios angular
- de la lupa simple, 865–866, 877
 - del microscopio, 867
 - del telescopio, 869, 878
- convención de signos para, 796t
- de microscopio, 867, 868
- del microscopio compuesto, 877
- lateral
- de la lente delgada, 806, 816
 - de la superficie de refracción esférica, 794, 801, 816
 - de microscopio, 867
 - del espejo, 791, 815
- lupas sencillas, 865–866, 865f, 877
- Amplificación angular
- de la lupa simple, 865–866, 877
 - de microscopio, 867
 - del telescopio, 869, 878
- Amplificación lateral
- de espejo, 791, 815
 - de la lente delgada, 806, 816
 - de la superficie de refracción esférica, 794, 801, 816
 - de microscopio, 867
- Amplitud
- de onda, 458–459, 458f, 464
 - del movimiento armónico simple, 438, 439, 450–451
- Análisis dimensional, 5–7, 18
- Analizador, 843f, 844, 844f
- Anderson, Carl, 990
- Aneurisma, 306
- Angstrom (Å), 747
- Ángulo(s)
- de contacto, de la superficie del líquido, 311, 311f
 - crítico, en la reflexión interna total, 777, 777f, 781
 - medida en radianes de, 198–199, 199f
 - la conversión a/desde grados, 199
 - Ángulo crítico, 777, 777f, 781
 - Ángulo de Brewster, 846
 - Ángulo de buzamiento, 650
 - Ángulo de contacto, de una superficie líquida, 311, 311f
 - Ángulo de desviación (δ), 771, 771f
 - Ángulo de incidencia
 - crítico, en la reflexión interna total, 777, 777f, 781
 - en la reflexión, 764, 764f, 780
 - en la refracción, 766, 766f - Ángulo de polarización (θ_p), 845–846, 846f, 850
 - Ángulo de proyección, 64, 64f
 - Ángulo de reflexión, 764, 764f, 780
 - Ángulo de refracción, 765–766, 766f, 768–769, 771, 771f, 780
- Anillo dividido, conmutadores, 661, 661f, 702, 702f
- Anillos de Newton, 831–832 y 831f
- Año luz, 3t
- Antártida, el derretimiento de los glaciares en, 386, 386f
- Antena, la producción de ondas electromagnéticas, 741–742, 741f, 742f, 743f
- Antilogaritmos, A.10–A.11
- Antimateria, 662, 900
- Antineutrinos, 968, 977
- Antinodo, de la onda estacionaria, 489–490, 490f, 495–496, 495f
- Antipartículas, 962, 968, 990, 991t, 1004
- Antiquarks, 996, 996t, 997
- Apertura circular, la resolución de, 872, 872f, 878
- Aproximadamente igual (\approx), A.1, A.19t
- Aptitud física y consumo de oxígeno, 426, 426t
- Arco iris, 761f, 774–775, 774f
- Arcos, 287–288, 287f
- Área
- de formas geométricas comunes, A.12t
 - dimensión de, 5t
 - expansión térmica y, 340–341
- Argón (Ar)
- calor específico molar, 401t
 - como gas noble, 946
 - configuración del estado base, 946t, 947
- Aristarco, 25
- Aristóteles, 25, 43
- Armas
- retroceso en, 174
 - velocidad de bala, la medición de, 178, 178–179
- Armas de riel, 698–699, 698f
- Armas nucleares
- bomba atómica, 921f, 984, 989f
 - bomba de hidrógeno, 987
- Armónica(s)
- en la columna de aire, ondas, 495–498, 495f, 497–498, 504
 - ondas en una cuerda, 490f, 491–494
 - y calidad (timbre) de sonido, 500–501, 501f
- ARN, la estructura de, la determinación, 919
- Arquímedes, 293–294, 294f
- Arquitectura
- arcos, 287–288, 287f
 - modelos de esfuerzo en, 847, 848f
 - movimiento de rotación y, 235
 - resistencia a la rotura de los materiales, 285t, 287–288
- Arrastre, 306, 306f. *Véase también* Resistencia del aire
- Arteriosclerosis, aleteo vascular en, 305–306, 305f
- Asbesto, conductividad térmica, 376t
- Ascensores hidráulicos, 290–292 y 290f
- Asteroides
- en el sistema solar, mapa de, 147f
 - impacto de los, 147
- Astigmatismo, 863
- Astronomía y astrofísica. *Véase también* Luna; Planetas; Sol; telescopios; Universo; *planetas específicos*
- agujero negro, 86, 905
- asteroides
- impacto de los, 147
- cometas, el impacto de, 124f, 373–374
- corrimiento cosmológico al rojo, 750
- curvatura del espacio-tiempo, 904–905
- en el Sistema Solar, mapa de, 147f
- estrellas
- color, 912–913
 - formación de, 219
 - neutrones, 258
 - temperatura de la superficie de las, 912–913
- galaxia(s)
- centro de, 905
 - número aproximado de, 13–14
 - historia de la, 25–26, 214, 221
 - la energía oscura, 279, 1001–1002, 1001f
 - la materia oscura, 278–279, 1000–1001, 1001f
 - leyes de Kepler, 221–224, 225
 - Nebulosa del Cangrejo, 258, 258f, 749, 749f
 - plasmas, 278
 - preguntas cosmológicas sin respuesta, 1000–1003
 - púlsares, 258f
 - radiación de microondas de fondo, 1000, 1000f, 1004
 - refracción atmosférica, 804–805, 804f
- Sistema Solar
- asteroides, mapa de, 147f
 - modelo geocéntrico, 25, 221
 - modelo heliocéntrico, 25–26, 221
 - polvo en, el tamaño de, 744
 - supernovas, 258, 258f
 - teoría del Big Bang, 999–1000, 999f, 1004
 - velocidades de escape, planetario, 220–221, 220t
- Atmósfera (atm), 293
- Atmósfera. *Véase también* Aire
- calor de la radiación de, 382
 - concentraciones de dióxido de carbono en, 385–386, 385f
 - efecto invernadero de, 385
 - gases de efecto invernadero en, 385–386, 385f
 - refracción de la luz, 804–805, 804f
 - velocidad de escape de las moléculas y, 220
- Atomizadores, 305, 305f
- Átomo(s). *Véase también* Núcleo atómico
- absorción estimulada, 949, 949f, 951
 - característica de los rayos X, 947–948, 947f, 951
 - efectos magnéticos producidos por, 673, 673f
 - emisión espontánea, 949, 949f, 951
 - emisión estimulada, 949–950, 950f, 951
 - en estado sólido, 278, 278f
 - espectros de absorción de, 935, 936f
 - espectros de emisión de, 935–937, 936f
 - estructura de, 4, 4f, 514–515
 - capas y subcapas, 942, 942t, 945, 945t, 951
 - modelo de Bohr, 4, 937–941, 937f, 938f, 939f, 951
 - modelo de la mecánica cuántica, 942–948, 951
 - primeros modelos, 934–935 y 935f
 - principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945t, 951
 - y propiedades químicas, 946–947
 - etimología de, 4

- la historia del concepto, 4, 934–935, 935f, 958, 958f
- MCAT guía de estudio para, A.49–A.51
- y la expansión térmica, 337–338
- Átomo(s) de hidrógeno
- del estado fundamental de configuración, 945, 946t
- diagrama de energía de nivel, 939, 939f
- diámetro, 3t, 4
- estado cuántico energías, 938–939, 939f, 951
- masa, 3t
- mecánica cuántica modelo de, 942–945, 951
- modelo de Bohr, 937–941, 937f, 938f, 939f, 951
- niveles de energía, 938–939, 939f
- serie de Balmer, 939–940, 939f
- tamaño, 3t, 4
- Auriculoventricular (AV), 605f, 606
- Aurora austral, 937
- Aurora boreal, 648f, 937
- Autoinducción, 705–707, 705f, 712
- Automóvil(es). *Véase también* Motor de combustión interna
- aceite de motor, la viscosidad de, 313t
- aceleración centrípeta en el, 208–209, 211–213
- amortiguadores, 455, 455f
- ascensores hidráulicos, 290–292 y 290f
- asiento del mecanismo de la cinta, 89, 89f
- carburadores, 305
- colisiones
- análisis de choque, 130–131
- bolsas de aire, y el impacto del accidente, 172
- cantidad de movimiento siguiente, 177–178
- cinturón de seguridad, el efecto sobre el impacto del accidente, 172
- con una berrera de contención, resorte cargado, 442, 442f
- fuerza del, 170–172
- lesión en una, 171–172
- reconstrucción del accidente, 145
- tangenciales, 183–184, 183f
- diferencia de potencial en la batería, 553–554
- distancia de arrastre, 130
- efecto Doppler en las sirenas, 486
- el relámpago, la seguridad de los ocupantes de, 531
- espejos laterales, los 797–798, la 798f
- espejos retrovisores, 792–793 y 792f
- frenos hidráulicos, 291
- fricción y, 111, 111f, 184, 208
- híbrido gas-eléctrico, 661f
- indicadores de carga de la batería, 296, 296f
- limpiaparabrisas e intermitentes, 630
- luces de carretera, 631
- luces, la reflexión de la superficie de la carretera, 764, 764f
- motor(es)
- conversión de armónica en movimiento circular en, 446
- regulación de la temperatura, 380
- sistema de clasificación europea para, 148
- vigilancia radiactiva de los, 975
- oscilación, después de un golpe, 448
- presión de los neumáticos, 350
- pruebas de dispositivos anticongelantes, 295–296, 295f
- reconstrucción de un accidente, 145
- récord de velocidad en tierra, 25f
- Aves, la navegación magnética, 651
- Aviones. *Véase también* Helicópteros
- ala, elevación de, 306–307, 306f
- fem inducida en, 699–700
- ondas de choque de, 487, 487f
- Axon, 636, 636f
- Azufre (S)
- calor latente de fusión, 370t
- calor latente de vaporización, 370t
- configuración del estado base, 946t
- resistividad, 598t
- B**
- Bacterias
- navegación magnética en, 651–652
- tiempo de duplicación, 630
- Balmer, Johann, 936
- Baquelita
- constante dieléctrica, 575t
- rigidez dieléctrica, 575t
- Barco, potencia del motor de, 149
- Barión(es), 991, 991t, 995, 995f, 996, 996t, 997, 997f, 1004
- Barómetros, 292, 292f
- Barras, de los ojos, 861
- Base logaritmo natural, A.10–A.11
- Batería
- en el automóvil, 553–554
- historia de, 590
- potencia entregada a dispositivo, 601–604
- resistencia interna, 617, 617f
- símbolo para circuito, 565, 565f
- voltaje en los terminales, 638
- Becquerel (Bq), 964
- Becquerel, Antoine Henri, 962, 962f
- Bednorz, J. Georg, 604
- Bell, Alexander Graham, 479
- Benceno
- densidad de, 279t
- índice de refracción, 767t
- Berilio (Be)
- calor específico de, 365t
- configuración del estado base, 946t
- Bernoulli, Daniel, 302, 303f
- Bicicletas, sistema de engranaje de, 248–249, 249f
- Biología. *Véase* Medicina y biología
- Bloque de construcción de concreto, la acción capilar y, 312
- Bobina de altavoz, 657, 657f
- Bocinas, en el sistema de sonido, 488, 657, 657f
- Bohr, Niels, 4, 935, 937, 938f
- Bohr modelo de átomo, 4, 937–941, 937f, 938f, 939f, 951
- Bohr principio de correspondencia, 941, 951
- Bolígrafos, la presión en el interior, 293
- Bolsas de aire, y accidente de impacto, 172
- Boltzmann, Ludwig, 422
- Bomba
- de calor, 413–415, 413f, 428
- electromagnética, 657, 657f
- Bomba atómica, 921f, 984, 989f
- Bomba de calor de aguas subterráneas, 414
- Bomba de hidrógeno, 987
- Bombas de calor, 413–415, 413f, 428
- Bombas electromagnéticas, 657, 657f
- Boro (B), configuración del estado base del, 946t
- Bose, Satyendra Nath, 885f
- Bosón de Higgs, 998
- Bosones, 989, 990t, 995, 997–998
- Bosones W, 989, 990t, 997–998
- Bosones Z, 989, 990t, 997–998
- Bradycardia, 607, 608t
- Bragg, W. L., 919
- Brahe, Tycho, 221
- Brazo de palanca, 238, 238f, 261
- Bremsstrahlung, 917
- Brewster, Sir David, 846
- Bromo (Br), configuración del estado base, 946t
- Brújulas, 649–650, 650–651, 652
- Bunsen, Robert, 627f
- Busca travesaños, 576, 576f
- C**
- Caballos de fuerza (hp), 148
- Cable a tierra, en los aparatos de consumo, 634–635, 635f
- Cable coaxial, campo magnético de, 666–667
- Cadmio (Cd), calor específico de, 365t
- Caída libre, 43–47, 48
- aceleración, 43, 48, A.19t
- a distintas alturas, 215t
- definición de, 43
- resistencia al aire, 111–112, 112f, 317–318
- Calcio (Ca)
- como sustancia paramagnética, 674
- configuración del estado base del, 946t
- Calculadoras
- cálculos en radianes, 199
- cifras significativas sobre, 8
- funciones trigonométricas en, 15, 59
- Cálculo, invención de, 86
- Cálculos de orden de magnitud, 12–14, 19
- Calefacción, electricidad, uso de energía por, 603–604
- Calentamiento global
- factores en, 385–386
- pruebas de, 386, 386f
- y la expansión térmica del agua, 341, 342
- y los niveles de los océanos, 362f, 385
- Calidad (timbre) del sonido, 500–501, 501f
- Calor. *Véase también* Calor específico molar
- amortiguadores de ideales, 382
- calor específico (c), 365–366
- de sustancias seleccionadas, 365t
- definición de, 387
- medición de, 367–368, 387
- conducción térmica, 375–376, 375f, 376f, 387
- conductividad de sustancias seleccionadas, 376t
- y aislamiento de casas, 377–380, 378f, 378t
- convección, 380–381, 380f, 387
- de vaporización, 369–370, 370t
- definición de, 332, 354, 363–364, 386
- equivalente mecánico del, 363, 386
- latente (L), 369–370, 387
- de fusión, 369, 370t
- radiación, 381–384, 381f, 382f, 383f, 387
- reflectores ideales, 382
- transferencia de energía a través de, 146
- unidades de, 363–364, 369
- y cambio de fase, 369–374, 387
- Calor de sublimación, 370
- Calor específico (c), 365–366
- de sustancias seleccionadas, 365t
- definición de, 387
- medición de, 367–368, 387
- Calor específico molar
- a presión constante (Cp), 400–401, 401t
- a volumen constante (Cv), 400–401, 401t
- Calor latente (L), 369–370, 387
- de fusión, 369, 370t
- de vaporización, 369–370, 370t
- unidades de, 369
- Calorías (C), 363, 364
- Calorías (cal), 363, 386
- Calorimetría, 367–369, 387
- estrategias para resolver problemas, 371–372
- Calorímetros, 367
- Cama de clavos, 281, 281f

- Cámaras, 859–860, 860*f*, 877
 apertura de, 814, 860, 860*f*
 digital, 859, 860*f*
 flash adjunto, 564
 número *f*, 860, 877
 unidades ultrasónicas que van en, 476
- Cámaras digitales, 859, 860*f*
- Cambio cosmológico al color rojo, 750
- Cambio de fase, 369–374, 370*f*, 387
 en el agua, 370–371, 370*f*, 372
 estrategias para resolver problemas, 371–372
 incompleta, 372–373
 vista molecular de, 371
 y el cambio en la entropía, 419–420
- Cambio de franja, 876–877
- Cambio en el símbolo de (Δ), 26, A.2, A.19*t*
- Caminante, 309–310, 309*f*
- Campo de inflación, 1003
- Campo eléctrico, 522–526, 539
 atmosférico, la medición de, 528, 528*f*
 de Gauss de la superficie (la ley de Gauss), 533, 535–538
 de un conductor aislado, 529, 529*f*
 definición de, 521
 dirección, 522–523, 522*f*, 523*f*, 539
 estrategias para resolver problemas, 524–525
 magnitud de, 522–523, 522*f*, 539
 principio de superposición, 523, 525–526
 superficies equipotenciales, 559–560, 560*f*, 580
 unidades SI de, 522, 553
- Campo eléctrico atmosférico, medición de, 528, 528*f*
- Campo(s) magnético(s) (\vec{B}), 652–655
 de alambre largo y recto, 664–667, 664*f*, 665*f*, 676
 de la Tierra, 650–652, 651*f*, 653, 657–658, 690
 de lazos de corriente, 669–673, 669*f*, 670*f*, 676
 de un solenoide, 670–673, 670*f*, 671*f*, 673*f*, 674, 676
 del inductor, la energía almacenada en, 711–712, 713
 dirección de
 derecho de regla de la mano derecha (#2), 665, 665*f*, 692–695
 determinación, con brújula, 649–650, 650*f*
 notación para, 656
 magnitud de, definición, 652–653
 partícula cargada de movimiento en, 661–664, 662*f*, 675–676
 torque sobre el lazo de corriente en el, 658–661, 659*f*, 675
 unidades SI de, 653, 675, A.21
- Canal del oído, 502, 502*f*
- Cantidad de movimiento lineal (\vec{p}), 167–172, 187
 conservación de, 172–175, 172*f*, 173*f*, 187–188
 definición de sistema en, 173–174
 en las colisiones, 172–173, 172*f*, 173*f*, 175–184, 187–188
 y la propulsión de cohetes, 184–187, 185*f*
 de fotones, 900, 920–921, 923
 de las ondas electromagnéticas, 743–746, 752
 impulso y, 168–169
 relativista
 expresión para, 897, 905
 y energía total, 900–901, 906
 segunda ley de Newton y, 168
 teorema impulso-cantidad de movimiento, 168–169, 187
 y lesiones, 169, 171–172
- Cantidad escalar, 27, 47, 56, 56*f*
 multiplicación/división de un vector, 58
- Cantidad vectorial, 27, 47, 56, 56*f*
- Cantidades angulares
 como vectores, 209
 relación con las cantidades lineales, 202, 202*t*, 203–206, 224, 237
- Cantidades lineales, la relación de las cantidades angulares, 202, 202*t*, 203–206, 224, 237
- Capa
 atómica 942, 942*t*
 nivel de energía de hidrógeno, 938–939, 939*f*
 principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
 delgada, no conductora, 536–537
- Capacitancia (*C*)
 condensador de placas paralelas
 con dieléctrico, 573–574, 574*f*, 576–578, 581
 sin dieléctrico (aire), 564–565
 definición de, 563, 580
 equivalente
 para capacitores en paralelo, 566–567, 580
 para capacitores en serie, 568–569, 580
 estrategias para resolver problemas, 569–570
 unidades SI de, 563, 580, A.21
- Capacitor(es)
 aplicaciones, 564, 564*f*, 572–573, 575, 576, 606–607
 con dieléctricos, 573–579, 574*f*, 575*f*, 581
 de placas paralelas, 538, 538*f*, 563–565, 563*f*, 564*f*, 580
 definición de, 562–563, 562*f*, 580
 electrolítico, 574–575, 575*f*
 en circuitos de *CA*, 727–728, 727*f*, 751
 ángulo de fase, 732*t*
 circuitos *RC*, 732*t*
 circuitos *RLC* en serie, 730–734, 730*f*, 731*f*, 732*t*, 751
 impedancia, 732*t*
 en circuitos de *CC*
 aplicaciones, 630–631
 en paralelo, 565–567, 566*f*, 580
 en serie, 567–569, 568*f*, 580
 estrategias para resolver problemas, 569–570
RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
 energía almacenada en, 571–573, 571*f*, 580–581
 estructura comercial, de, 574–575, 575*f*
 variable, 574, 575, 575*f*, 576*f*
 voltaje máximo de funcionamiento, 572
- Capacitores de placas paralelas, 538, 538*f*, 563–565, 563*f*, 564*f*, 580
- Capacitores electrolíticos, 574–575, 575*f*
- Capas delgadas, no conductoras, 536–537
- Carbón, como combustible, 986
- Carbono (*C*)
 carbono-12, 344
 coeficiente de temperatura de resistividad, 598*t*
 configuración del estado base, 946*t*
 de carbono-14, la desintegración radiactiva de, 969, 970
 isótopos de, 958
 resistividad, 598*t*
- Carburadores, 305
- Carga
 por conducción, 516, 516*f*
 por inducción, 516, 517*f*
- Carga del electrón (*e*), A.20
- Carga eléctrica
 a tierra, definición, 516
 carga por conducción, 516, 516*f*
 carga por inducción, 516, 517*f*
 conservación de, 515, 515*f*, 626, 638
 cuantificación de, 515, 531–532
 de las partículas atómicas, 514–515, 518, 518*t*, 958
 negativa, 514, 514*f*
 polarización de, 516
 positiva, 514, 514*f*
 propiedades de, 514–515, 514*f*, 515*f*, 539
 transferencia de, 514, 516, 530, 530*f*
 unidad fundamental de la (*e*), 515, 531–532, 539
 unidades SI de, 515, 517, 667, A.21
- Carga eléctrica negativa, 514, 514*f*
- Carga eléctrica positiva, 514, 514*f*
- Carga primaria. Véase también Volumen de carga
- Carlson, Chester, 561
- Carnot, Sadi, 416, 416*f*
- Catapulta espacial, 698
- Caucho
 como aislante, 515
 conductividad térmica, 376*t*
 constante dieléctrica, 575*t*
 módulo elástico para, 283*t*
 resistividad, 598*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
 velocidad del sonido en, 476*t*
- Caudal, 300–302
- Cavendish, Henry, 215, 215*t*
- Cavitron aspirador quirúrgico ultrasónico (CUSA), 475
- CC. Véase *entradas en* Corriente continua
- CCD. Véase Dispositivo de carga acoplada
- CD. Véase Discos compactos
- Celdas solares, recubrimientos no reflejantes, 833
- Célula(s)
 área superficial en función del volumen, 316
 ósmosis y, 316–317
- Células musculares, ondas de despolarización en, 605–606, 605*f*
- Centígrados escala. Véase también Escala Celsius
- Centipoise (cp), 313
- Centrales nucleares, 900, 984–986, 985*f*, 1004
- Centrifugación, 319, 319*f*
- Centro de curvatura, de espejo esférica, 793, 793*f*
- Centro de masa (CM), 151
 desplazamiento de, 151
vs. centro de gravedad, 242
- Cepillo (de motor/generador eléctrico), 661, 661*f*, 702, 702*f*
- Cerebro
 el líquido de apoyo, 169, 295
 imágenes de, 990
 lesión de boxeo para, 169
- Cero absoluto, 334, 335, 335*f*
- Chadwick, Robert, 972
- Challenger* investigación, 989*f*
- Charm, conservación de, 1004
- Charmonio, 996
- Cheney, Dick, 607
- Choque, eléctrico, 634
- Ciclo de Carnot, 416, 417*f*, 428
- Ciclo protón-protón, 986–987
- Ciclotrón (acelerador), 671, 998*f*
- Ciencia forense, huellas dactilares, 650
- Cifras significativas, 7–10, 19
- Cinemática, 25. Véase también Movimiento
- Cinturones de seguridad
 efecto de un choque, 172
 mecanismo, 89, 89*f*
- Circón, índice de refracción, 767*t*
- Circuito(s). Véase también Circuitos de corriente alterna (AC); Circuitos eléctricos de corriente directa (DC); Circuitos
- Circuito de corriente eléctrica
 campo magnético de un, 669–673, 669*f*, 670*f*, 676
 en el campo magnético, torque en, 658–661, 659*f*, 675

- Circuito transmisor, 740, 740f
- Circuitos de corriente alterna (AC), 723–737
- capacitores, 727–728, 727f, 732t, 751
 - ángulo de fase, 732t
 - circuitos RC, 732t
 - circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751
 - impedancia, 732t
 - circuitos RC, 732t
 - circuitos RL, 732t
 - circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751–752
 - aplicaciones, 736
 - estrategias para resolver problemas, 733
 - potencia media entregada en, 734–735, 752
 - resonancia en, 735–737, 735f, 752
- inductores en, 728–729, 728f, 729f, 751
- ángulo de fase, 732t
 - circuitos RL, 732t
 - circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 751
 - impedancia, 732t
 - potencia media entregada en, 734–735, 752
 - resistencias en, 723–727, 724f, 725f, 750–751
 - ángulo de fase, 732t
 - circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751
 - impedancia, 732t
 - RC circuitos, 732t
 - RL circuitos, 732t
- Circuitos domésticos, 623, 633–634, 634f
- Circuitos eléctricos. *Véase también* Circuitos de corriente alterna (CA); Circuitos de corriente directa (DC)
- circuitos del hogar, 623, 633–634, 634f
 - definición de, 595
 - flujo de electrones en, 593–595, 593f, 608
 - MCAT guía de estudio para, A.47–A.49
 - símbolos
 - alambres, 565, 565f
 - batería, 565, 565f
 - capacitor, 565
 - foco, 565, 565f
 - fuerza de alimentación CA, 724
 - inductor, 708
 - resistencia, 565, 565f, 597
 - tierra, 601, 601f
 - transferencia de energía en, 601–602
- Circuitos RC
- de corriente alterna
 - ángulo de fase, 732t
 - impedancia, 732t
 - de corriente continua, 629–633, 629f, 638
 - aplicaciones, 630–631
- Circuitos RL
- ángulo de fase, 732t
 - de corriente alterna, 732t
 - de corriente continua, 707–710, 708f, 712–713
- Circuitos RLC en serie, 730–734, 730f, 731f, 732t, 751–752
- aplicaciones, 736
 - estrategias para resolver problemas, 733
 - potencia media entregada en, 734–735, 752
 - resonancia en, 735–737, 735f, 752
- Círculo de referencia, 449, 449f
- Cirugía con láser, 834
- Citosina, 920
- Clausius, Rudolf, 419, 419f
- Cloro (Cl)
- calor específico molar, 401t
 - configuración del estado fundamental, 946t
- Cloruro de sodio (NaCl)
- difracción de rayos X por, 918–919
 - estructura de, 278, 278f, 918, 918f
 - índice de refracción, 767t
- CMOS. *Véase* Semiconductor complementario de óxido metálico
- Cobalto (Co)
- como sustancia ferromagnética, 673, 674
 - configuración del estado base, 946t
- Cobre (Cu)
- calor específico, 365t
 - calor latente de fusión, 370t
 - calor latente de vaporización, 370t
 - coeficiente de temperatura de resistividad, 598t
 - como conductor, 515, 591
 - conductividad térmica, 376t
 - configuración del estado base, 946t
 - densidad, 279t
 - función de trabajo, 915t
 - módulo elástico, 283t
 - resistividad, 598t
 - velocidad del sonido en, 476t
- Cóclea, 502, 502f
- Coeficiente de dilatación lineal (α), 338, 338t, 354
- Coeficiente de expansión de área (γ), 340–341, 354
- Coeficiente de expansión de la superficie (γ), 340–341, 354
- Coeficiente de expansión de volumen (β), 338t, 341, 342, 354
- Coeficiente de expansión lineal (α), 338, 338t, 354
- Coeficiente de fricción cinética (μ_k), 106, 107t, 113
- Coeficiente de fricción estática (μ_s), 106, 107t, 113
- Coeficiente de rendimiento (COP), para la máquina de calor, 414–415, 428
- Coeficiente de temperatura de resistividad (α), 598t, 599–601, 609
- Coeficiente de viscosidad (η), 313
- Coeficientes de difusión, 316, 316t
- Cohetes
- con aceleración en dos dimensiones, 70–71
 - empuje, instantáneo, 186
 - multietapa, 186
 - propulsión, 184–187, 188f
 - velocidades de escape, 185, 186, 307–308
 - vuelo, el análisis de, 46–47
- Colibríes, el color en las plumas, 824f
- Colisión(es), 175–182. *Véase también* Automóvil(es), colisiones
- conservación de la energía cinética en, 179–182
 - conservación del momento lineal en, 172–173, 172f, 173f, 175–184, 187–188
 - elástica
 - en dos dimensiones, 182–183, 188
 - en una dimensión, 176, 179–180, 179f, 188
 - en dos dimensiones, 182–184, 182f
 - elástica, 182–183, 188
 - estrategias de resolución de problemas, 183
 - inelástica, 183–184
 - en una dimensión, 175–182
 - elástica, 176, 179–180, 179f, 188
 - estrategias para resolver problemas, 180
 - inelástica, 176, 188
 - perfectamente inelástica, 176–179, 176f, 188
 - inelástica
 - en dos dimensiones, 183–184
 - en una dimensión, 176, 188
 - perfectamente inelástica, en una dimensión, 176–179, 176f, 188
 - tangencial, 182–184, 182f, 188
- Colisiones elásticas
- en dos dimensiones, 182–183, 188
 - en una dimensión, 176, 179–180, 179f, 188
- Colisiones inelásticas
- en dos dimensiones, 183–184
 - en una dimensión, 176, 188
 - perfectamente inelástica, 176–179, 176f, 188
 - perfectamente inelástica, 176–179, 176f, 188
- Colisiones inelásticas
- en dos dimensiones, 183–184
 - en una dimensión, 176, 188
 - perfectamente inelástica, 176–179, 176f, 188
- Colisiones tangenciales, 182–184, 182f, 188
- Color (carga de color), de los quarks, 997, 997f, 1004
- Columnas de aire, ondas estacionarias en, 495–498, 495f, 504
- Combustibles fósiles, y el efecto invernadero, 385
- Cometas, el impacto en la Tierra, 124f, 373–374
- Comida
- calorías, 363, 364
 - irradiación de, 975
 - y aumento de peso, 364, 425–426
- Comité Internacional de Pesas y Medidas, 335
- Componentes x, de un vector, 58–60, 58f, 59f
- Componentes y, de un vector, 58–60, 58f, 59f
- Componentes, de un vector, 58–62, 58f, 59f
- en la suma de vectores, 60–62, 75
- Compresibilidad, 284
- Compresión, en ondas de sonido, 473, 474f
- Compton cambio, 920–922, 921f, 928–929
- Compton, Arthur H., 920, 921f
- Comunicaciones, fibra óptica en, 779–780, 780f
- Concreto
- conductividad térmica de, 376t
 - resistencia a la rotura de, 285t
- Condensado Bose-Einstein, 885f
- Condición subcrítica, de un reactor nuclear, 985
- Condición supercrítica, de un reactor nuclear, 985
- Conducción. *Véase* Conducción eléctrica; Conducción térmica
- Conducción eléctrica
- carga por, 516, 516f
 - en el sistema nervioso, 635–637, 636f, 637f
 - incremento de la resistencia en, y la temperatura, 601
- Conducción térmica, 375–376, 375f, 376f, 387
- conductividad de las sustancias seleccionadas, 376t
 - y aislamiento doméstico, 377–380, 378f, 378t
- Conductividad térmica (k), 376, 376t, 387
- Conductores. *Véase también* Conductores eléctricos
- Conductores eléctricos
- alambre recto largo
 - campo magnético de, 664–667, 664f, 665f, 676
 - ley circuital de Ampère para, 665–667, 666f, 676
 - de forma irregular, carga acumulada en, 529–530, 530f
 - de transporte de corriente
 - fuerza magnética sobre, 655–658, 656f, 657f, 675
 - potencial eléctrico en, 592
 - definido, 515, 539
 - en equilibrio electrostático (aislados)
 - las propiedades de 529–531, 529f, 530f
 - potencial eléctrico en, 558–559, 559f
 - fuerza paralela, magnético entre, 667–668, 667f, 676
 - resistencia eléctrica. *Véase también* Resistencia
- Conexión a tierra, 634–635, 635f
- Confinamiento electrostático, 564
- Conmutadores, 661, 661f, 702, 702f
- Conocimiento, límites del, 1003
- Conos, de los ojos, 861
- Conservación
- de energía, 146–147, 155
 - en cambio de la energía potencial eléctrica, 549–552

- en los circuitos eléctricos, 626, 638
 - energía potencial elástica y, 440–441
 - pérdida de energía del sistema y, 145–146
 - primera ley de la termodinámica y, 398–401
 - de energía cinética, en las colisiones elásticas, 179–182
 - de energía mecánica
 - en movimiento de rotación, 254–255, 262
 - en resortes, 141–145
 - estrategias de resolución de problemas, 136
 - la gravedad y, 135–138
 - de la carga eléctrica, 515, 515*f*, 626, 638
 - de la fuerza de Coulomb, 549
 - definición de, 135
 - del momento angular, 257–261
 - del momento lineal, 172–175, 172*f*, 173*f*, 187–188
 - definición de sistema en, 173–174
 - en las colisiones, 172–173, 172*f*, 173*f*, 175–184, 187–188
 - y la propulsión de cohetes, 184–187, 185*f*
 - del número bariónico, 992–993, 1004
 - del número de leptones, 993–994
 - Constante cosmológica, en la teoría de la relatividad general, 1001–1002
 - Constante de Boltzmann (k_B), 348, 354, 422, A.20
 - Constante de Coulomb (k_e), 517, 539, A.20
 - Constante de decaimiento (λ), 963–964, 976
 - Constante de Euler (e), 629
 - Constante de gas (R), A.20
 - Constante de la gravitación universal (G), 93, 214, 225, A.20
 - medición de, 215, 215*f*
 - Constante de reproducción (K), 985, 1004
 - Constante de resorte (k), 140, 437–438, 440
 - Constante de Rydberg (R_H), 936, 939, A.20
 - Constante de Stefan-Boltzmann, 382
 - Constante de tiempo (τ)
 - Circuitos RC , 630, 638
 - Circuitos RL , 708–709, 713
 - Constante dieléctrica (κ), 573–574, 575*t*, 581
 - Constante gravitación universal (G), 93, 214, 225, A.20
 - medición de, 215, 215*f*
 - Constante gravitatoria (G), 93, 214, 225, A.20
 - medición de, 215, 215*f*
 - Constante universal de los gases (R), 344, 354
 - Consumo de oxígeno, en el metabolismo humano
 - aptitud física y, 426, 426*t*
 - y la tasa metabólica, 424, 425*t*
 - Contacto térmico, 332, 354
 - Contaminación del aire, la eliminación de la materia particulada, 560–561, 561*f*
 - Contaminación por ruido, 479
 - Convección, 380–381, 380*f*, 387
 - Convección forzada, 380
 - Convección natural, 380
 - Convergente (positiva) lentes delgadas, 805–806 y 805*f*, 807–809, 807*f*, 816*f*
 - conversión de/a de electrón-volts, 901
 - Conversiones
 - de valor R en unidades métricas, 378
 - electrón-voltio a/de joules, 901
 - escala Celsius a/de la escala Fahrenheit, 335–336
 - escala Celsius a/de la escala Kelvin, 334, 335
 - escala Kelvin a/de la escala Fahrenheit, 336
 - Gauss a/de tesla, 652
 - radianes a/de grados, 199
 - SI las unidades de a/de las unidades tradicionales de Estados Unidos, 10
 - Sistema de coordenadas cartesianas a/de coordenadas polares, 15–16
 - unidades de masa atómica a/de energía en reposo, 901
 - Coordenadas polares, 14, 14*f*
 - la conversión a/de coordenadas cartesianas, 15–16
 - Copérnico, Nicolás, 25, 43, 221
 - Corazón
 - actividad eléctrica de, 605–608, 605*f*, 606*f*
 - artificial, 657
 - descargas eléctricas y, 634
 - fibrilación de, 606, 606*f*, 607–608
 - Córnea, 860, 861*f*
 - Coroides, 861*f*
 - Corriente. *Véase también* Corriente eléctrica
 - Corriente alterna (AC) transformadores, 737–739, 737*f*, 752
 - Corriente ascendente, 343
 - Corriente directa (DC), los circuitos, 616–637
 - capacitores
 - en paralelo, 565–567, 566*f*, 580
 - en serie, 567–569, 568*f*, 580
 - estrategias para resolver problemas, 569–570
 - RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
 - aplicaciones, 630–631
 - circuitos RL , 707–710, 708*f*, 712–713
 - estrategias de resolución de problemas
 - capacitores, 569–570
 - reglas de Kirchhoff, 626–627
 - resistencias, 624
 - fuentes de Fem, 616–617, 617*f*, 638
 - RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
 - aplicaciones, 630–631
 - reglas de Kirchhoff, 625–629, 626*f*, 638
 - resistencias en paralelo, 620–625, 621*f*, 638
 - resistencias en serie, 617–620, 618*f*, 638
 - Corriente eléctrica, 590–592, 591*f*
 - definición de, 590
 - dirección de, 591, 608
 - en comparación con el flujo de agua, 596
 - en un circuito RL , 708–710, 708*f*, 713
 - inducida, 691
 - instantánea (I), 591, 608
 - ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
 - medición de, 595–596, 595*f*
 - promedio (I_{prom}), 591, 608
 - regla del nodo, 625–629, 626*f*, 638
 - rms, 724–726, 750–751
 - unidad SI a/de, 667, A.21
 - vista microscópica de, 593–595, 593*f*, 608
 - Corriente eléctrica instantánea (I), 591, 608
 - Corriente eléctrica promedio (I_{prom}), 591, 608
 - Corriente inducida, 691
 - Corriente rms, 724–726, 750–751
 - Corrientes de Foucault, 299, 299*f*
 - Corrimiento hacia el rojo, cosmológico, 750
 - Coseno (\cos), 15, 15*f*
 - Cosmología, preguntas sin respuesta en, 1000–1003
 - Coulomb (C), 515, 517, 667
 - Coulomb, Charles, 517, 518*f*
 - Cresta, de la onda, 457
 - Crick, F. H. C., 920
 - Cristal, expansión térmica de, 338, 338*t*
 - Cristalino, 860, 861, 861*f*
 - Criterio de Lawson, 988, 1004
 - Criterio de Rayleigh, 871–872, 878
 - Cromo (Cr)
 - como trazador radioactivo, 975
 - configuración del estado fundamental, 946*t*
 - Cromodinámica cuántica (QCD), 997, 998, 1004
 - Cuantización
 - de energía. *Véase también* Física cuántica de la carga eléctrica, 515, 531–532
 - de las ondas electromagnéticas, 915
 - Cuanto de flujo magnético (ϕ_0), A.20
 - Cuarzo
 - constante dieléctrica, 575*t*
 - cristales, 278*f*
 - índice de refracción, 767*t*, 771*f*
 - módulo elástico para, 283*t*
 - resistividad, 598*t*
 - rigidez dieléctrica, 575*t*
 - Cubo de hielo experimento (Faraday), 530, 530*f*
 - Cuerda, ondas en, 456, 456*f*, 457*f*, 458, 458*f*, 490*f*
 - ondas estacionarias, 489–494, 489*f*, 490*f*, 504
 - reflexión de, 462, 463*f*
 - resonancia en, 494
 - velocidad de, 459–461, 464
 - Cuerpo humano. *Véase también* Medicina y biología
 - Cuerpo rígido, 199
 - Cuerpos negros, 382, 912
 - Curie (Ci), 964
 - Curie, Marie, 962, 962*f*
 - Curie, Pierre, 962, 962*f*
 - Curvatura del espacio-tiempo, 904–905, CUSA. *Véase* Aspirador quirúrgico ultrasónico Cavitron
- ## D
- DAI. *Véase* Desfibrilador automático implantado
 - Daño genético de la radiación, 974
 - Daño somático por radiación, 974
 - Datación por carbono, 969, 970
 - De Broglie, Louis, 922–923, 923*f*, 929
 - Decaimiento alfa (α), 962–963, 962*f*, 965–967, 976, 977
 - Decaimiento beta (β), 962–963, 962*f*, 967–968, 968*f*, 976, 977
 - Decaimiento exponencial, 963, 963*f*
 - Decibeles, 479–480, 479*t*, 504
 - Declinación magnética, 651
 - Deformación de corte, 284, 284*f*
 - Deformación de volumen, 284, 286–287
 - Degradación de la energía, 423
 - Delta (Δ), 26, A.2, A.19*t*
 - Demócrito, 4
 - Dendritas, 636, 636*f*
 - Densidad (ρ), 279, 319
 - de las sustancias comunes, 279*t*
 - Densidad de ondas, 457, 457*f*
 - Densidad lineal, de la cuerda, 460
 - Deportes
 - acrobacia, 143–144, 257
 - béisbol, 252
 - bolos, 244–245, 244*f*
 - boxeo, 169
 - buceo, 131, 132, 137, 257, 258*f*
 - esquí, 134–135
 - fútbol, 235, 285–286
 - golf, 169–170, 305, 305*f*
 - hockey, 108, 108*f*
 - paracaidismo, 111–112, 112*f*
 - patinaje artístico, 257, 258*f*
 - pool/billar, 180–181, 182, 215–216
 - salto de longitud, 68–69, 68*f*
 - salto en bungee, 447
 - surf, 437*f*
 - tenis, 235, 305
 - tiro con arco, 174–175, 442, 442*f*
 - vela, 307
 - Desaceleración, 33
 - Desconocido, definición, A.4

- Desfibrilador automático implantado (DAI), 607, 607f, 608t
- Desfibriladores
automáticos implantados (DAI), 607, 607f, 608t
externo, 572–573
- Desigualdades, A.1, A.19t
- Desintegración espontánea (transmutación), 966
- Desplazamiento angular ($\Delta\theta$), 199, 199f, 209
- Desplazamiento lineal (Δx). *Véase también* Posición de la partícula bajo aceleración constante, 37, 38t, 65
en dos dimensiones, 62, 62f, 75
en una dimensión, 26–27, 27f, 47
- Despolarización de onda, 605–606, 605f
- Detectores de humo, 969, 969f
- Detectores de metales, 736, 736f
- Detención de potencial, en el efecto fotoeléctrico, 914, 914f
- Detergente
ángulo de contacto γ , 311
como agente tensoactivo, 309, 309t
- Deuterio, 4
como combustible de fusión, 986–987, 1004
como isótopo, 958
energía de enlace, 960–961
- Deuterón de masa (e_m), A.20
- Día solar, 2
- Diagrama de circuito, 595, 595f
- Diagrama de cuerpo libre, 98, 98f
- Diagrama de Feynman, 989, 989f
- Diagramas de fasores, 730–731, 730f, 731f
- Diagramas de movimiento, 35–36, 36f
- Diagramas de nivel de energía, 939, 939f
- Diagramas de rayos
de espejos, 795–798, 797f
para las lentes delgadas, 807–808, 807f, 816f
- Diagramas PV
cálculo de trabajo, 397–398
del proceso isobárico, 397, 397f, 402
en los procesos generales, 408–409, 408f
para la máquina de Carnot, 417f, 428f
para la máquina térmica, 410, 410f
para los procesos adiabáticos, 404, 405–406, 405f
para los procesos isotérmicos, 407, 407f
- Diálisis, 317, 317f
- Diálogo sobre dos sistemas del Nuevo Mundo* (Galileo), 43
- Diamante
destello de, 778
índice de refracción, 767t
- Diapasones, 473–474, 474f, 499–500, 500–501, 500f
- Dieléctrico(s), 573–579, 581
de la capacitancia, 573–574, 574f, 576–578, 581
definición de, 573
descripción atómica de, 578–579, 578f, 579f
- Diferencia de potencial. *Véase también* Potencial eléctrico
- Diferencia de potencial eléctrico. *Véase también* Potencial eléctrico
- Diferencia en, el símbolo (Δ), 26, A.2, A.19t
- Difracción
de las ondas de luz, 836–837, 836f
de una sola ranura de difracción, 837–839, 837f, 838f, 850
difracción de Fraunhofer, 837, 837f
historia de la investigación sobre, 762
rejillas de difracción, 839–842, 839f, 840f, 850, 874–875, 878
y resolución de 871–875, 871f, 872f
de las ondas sonoras, 838
de rayos X de cristales, 917, 917f, 918–920, 918f, 919f, 928
- Difracción de Fraunhofer, 837, 837f
- Difracción una sola rendija, 837–839, 837f, 838f, 850
- Difusión, 315–316, 315f
- Dimensión(es), 5
como cantidades algebraicas, 5
- Dinámica, 25
- Dinámica de fluidos, 299–305, 320
acción capilar, 311–312, 311f, 312f
aplicaciones, 303–308
difusión, 315–316, 315f
- Ecuación de Bernoulli, 302–305, 302f, 303f, 320
aplicaciones, 303–308
estrategias de resolución de problemas, 320
- ecuación de continuidad, 299–302, 300f, 304–305, 320
- fluido ideal, las características de, 299
- flujo turbulento, 299, 299f
alas de aviones y, 306
número de Reynolds, 314–315
- flujo viscoso, 312–314, 313f
- laminar (aerodinámica) de flujo, 299, 299f
- ley de Fick, 316
- ley de Poiseuille, 313–314, 313f
- línea de flujo (laminar), 299, 299f
- medio viscoso, el movimiento a través de, 317–318, 318f
- número de Reynolds, 314–315
- ósmosis, 316–317
- presión. *Véase también* Presión, de líquido
principio de Pascal, 319
sedimentación, 318–319
velocidad de flujo, 300–302
- velocidad del fluido, 303, 303f (*Véase también* Ecuación de Bernoulli; Ecuación de continuidad; Ley de Poiseuille)
viscosidad, 299, 312–313, 313f, 313t
- Dinámica de rotación, aplicaciones, 235
- Dinámica Newtoniana Modificada (MOND), 1001
- Dinamómetro, 424, 424f
- Diodo, un dispositivo no óhmico, 597
- Dioptrías, 863, 877
- Dióxido de azufre (SO₂), calor específico molar de, 401t
- Dióxido de azufre (SO₂), como gas de efecto invernadero, 386
- Dióxido de carbono (CO₂)
calor específico molar, 401t
concentraciones atmosféricas de, 385–386, 385f
hielo seco, 350f
índice de refracción, 767t
rms velocidad de, 352t
- Dipolo eléctrico
líneas del campo eléctrico de, 527, 527f
potencial eléctrico, 555–556, 555f
- Dirac ecuación, 943
- Dirac, Paul A. M., 943, 990, 991f
- Disco óptico, 861f
- Discos compactos (CD)
lectura de, 835–836, 835f
rotación de, 205–206
superficie multicolor de, 841
mecanismo de seguimiento, 841–842, 841f
- Discos fonográficos, rotación de, 205–206
- Dispersión de la luz, 771–775, 771f, 772f, 773f, 774f, 781
- Dispersión, polarización de las ondas de luz por, 846–847, 846f
- Dispositivo de carga acoplada (CCD), 859, 860f
- Distancia (d), 5, 28
- Distancia de la imagen, 790, 791f, 794, 815
- Distancia de objetos, 790, 791f, 794, 815
- Distribución de velocidad de Maxwell, 352, 352t
- Disulfuro de carbono, índice de refracción, 767t
- Divergente (negativa) lentes delgadas, 805–806, 805f, 807–808, 807f, 810–811, 816f
- División
cifras significativas en, 8, 19
de fracciones, A.5
de vector, por escalar, 58
en notación científica, A.4
- Doble hélice del ADN, 920, 920f
- Dominios magnéticos, 673–674, 674f
- Doppler, Christian, 482
- Dosis de radiación absorbida (rad), 974
- DVD (videodiscos digitales), la lectura de, 770, 770f, 835–836, 835f
- ## E
- e (unidad fundamental de carga eléctrica), 515, 531–532, 539
- ECG (electrocardiograma), 605–606, 606f
- Ecuación(es)
análisis dimensional de, 5–7, 18
unidades, cancelación de, 10–11
- Ecuación(es) de estado, 343
para los gases ideales, 345
- Ecuación de Bernoulli, 302–305, 302f, 303f, 320
aplicaciones, 303–308
estrategias de resolución de problemas, 320
- Ecuación de continuidad, 299–302, 300f, 304–305, 320
- Ecuación de onda de Schrödinger, 925–926
- Ecuación de Rydberg, 936
- Ecuación del ciclotrón, 662–664
- Ecuación del espejo, 794–795, 815
- Ecuación para construir lentes, 807
- Ecuaciones cinemáticas
para el movimiento de rotación bajo constante aceleración, 202–203, 202t, 224
para la aceleración constante en dos dimensiones, 65, 76
en una dimensión, 37–38, 38t, 43, 202t
- Ecuaciones cinemáticas de rotación, 202–203, 202t, 224
- Ecuaciones cuadráticas, repaso de, A.7–A.8
- Ecuaciones de oscilador armónico, 438–439
- Ecuaciones lineales
repaso de, A.8–A.9
resolución de ecuaciones simultáneas, A.9–A.10
- Efecto Doppler
ecuación general para, 484
estrategias de resolución de problemas, 484
ondas de sonido, 482–487, 483f, 504
ondas electromagnéticas, 750
- Efecto fotoeléctrico, 762, 913–916, 914f, 915f, 928
- Efecto invernadero, 385
- Efecto piezoeléctrico, 475
- Efecto Zeeman, 942, 942f
- Eficacia biológica relativa (RBE) factor de, 974, 974t
- Eficiencia. *Véase también* Eficiencia térmica
- Eficiencia térmica (e)
de la máquina de Carnot, 416, 417
de la máquina térmica, 410–411, 415, 417–418, 428
del cuerpo humano, 426, 426t
máxima, 417
- Egipto, la antigua
estudio de la astronomía en, 25
- pirámides, la nivelación de las, 292, 292f
- Einstein, Albert, 762, 888, 888f, 899–900, 903–904, 903f, 915, 928, 949, 1001–1002
- Eje de transmisión, de material polarizante, 843
- Eje principal, del espejo esférico, 793, 793f

- Ejercicio
 aptitud física y el consumo de oxígeno, 426, 426*t*
 calorías quemadas en, 151–152, 364, 425
 energía generada en, 152, 152*t*
 fisiología de, 364
 y control de peso, 364, 425–426
- El ángulo de fase (ϕ), 730–733, 730*f*, 732*t*, 752
- El arsénico (As), configuración del estado base, 946*t*
- El centro de gravedad, 241–244, 241*f*, 242*f*
- El hombre invisible, la visión de, 864
- El lado posterior
 de un espejo, definido, 795–796, 796*f*
 de una lente delgada, definida, 807, 807*f*
 de una superficie refractante esférica, definida, 801
- El radón (Rn), 946, 970–971
- El reloj atómico, 2, 2*f*, 905
- Elasticidad, de sólidos, 278
 forma, 283–284, 284*f*, 285–286
 longitud, 282–283, 282*f*, 285
 volumen, 284, 286–287
- Electricidad
 la utilización humana de, 513, 590
 los primeros experimentos con, 513, 590
 seguridad, 634–635, 635*f*
 transmisión a través de largas distancias, 738
 y la función del corazón, 605–608, 605*f*, 606*f*
- Electrocardiogramas, 605
- Electrocardiogramas (ECG), 605–606, 606*f*
- Electroimán. *Véase también* Solenoide
- Electrón(es)
 antipartícula, 962, 968
 como leptones, 991*t*, 992
 como portadores de carga, 591–595, 591*f*, 593*f*, 596–597, 599
 de carga, 514, 515, 518, 518*t*, 532, 958
 en la estructura atómica, 4, 514–515
 en los circuitos eléctricos, la velocidad de la deriva, 593–595, 593*f*, 608
 energía en reposo, 901
 energías, típicas, 559
 masa, 3*t*, 518*t*, 958, 958*t*, A.20
 nubes electrónicas, 944–945, 944*f*, 945*f*
 número de, en un gramo de materia, 514
 spin, 673, 673*f*, 943–944, 943*f*
- Electrón-volts (eV), 560, A.20
 conversión a/de joules, 901
- Electrostática, guía de estudio para el MCAT, A.44–A.47
- Elemento(s)
 espectros de emisión de, 935–937, 936*f*
 estructura atómica y, 4
 propiedades químicas, 946–947
 tabla abreviada de los isótopos, A.14–A.18
 tabla periódica, 344, 946–947, 951
- Elemento de circuito, potencia entregada a, 591–592
- Elevación, ala de aeronave, 306–307, 306*f*
- Emisión espontánea, 949, 949*f*, 951
- Emisión estimulada, 949–950, 950*f*, 951
- Emisividad, 382
- Empuje instantáneo, 186
- En fase, definición, 461, 724
- Energía, 124–154. *Véase también* Energía potencial elástica; Energía potencial gravitatoria; Calor; Energía interna; Energía cinética; Energía mecánica; Energía potencial; Energía cinética de rotación
 conservación de. *Véase también* Conservación cuantización de. *Véase también* Física cuántica de fisión, 983–984
 de fotones, 762, 780, 915, 920–922
 de fusión, 987–988
 de grado superior, que se define, 423
 de los rayos X característicos, 947–948
 de masa equivalente, 900, 902–903, 958
 degradación de, 423
 en el inductor, 711–712, 713
 en el salto vertical, 151–152
 en movimiento de rotación, tipos de, 254, 262
 en un capacitor, 571–573, 571*f*, 580–581
 en un circuito, transferencia de, 601–602
 estado de equilibrio y, 309
 formas de, 124
 interna, 146
 mismo grado, definición, 423
 oscura, 279
 punto cero, 335
 reposo, 899, 906
 conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
 de electrones, 901
 total, 899–900, 901, 906
 y el impulso relativista, 900–901, 906
 transferencia de
 de energía térmica, 375–385
 hacia/desde el sistema, métodos de, 146, 395, 398–399
 transportada por las ondas, 456
 transportada por ondas electromagnéticas, 743–746, 752
- Energía cinética (EC), 129–130, 154. *Véase también* Energía cinética de rotación, trabajo y energía teorema, 129
 conservación, en las colisiones elásticas, 179–182
 de fluido. *Véase* Ecuación de Bernoulli
 en el salto vertical humano, 151–152
 en las colisiones, 175–176, 179
 expresión relativista, 899–900, 906
 impulso y, 168
 transformación en energía interna, 373–374
 y la conservación de la energía mecánica, 135–138
- Energía cinética de rotación (EC_r), 254–256, 254*f*, 262
- Energía cinética de traslación (EC_t), en el movimiento de rotación, 254
- Energía de enlace, 960–962, 961*f*, 976
- Energía de ionización, 939, 946*t*
- Energía de punto cero, 335
- Energía en reposo, 899, 906
 conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
 del electrón, 901
- Energía interna (U)
 cambio en
 en procesos adiabáticos, 404–406
 en procesos genéricos, 408–409
 en procesos isobáricos, 402–404
 en procesos isotérmicos, 407–408
 en procesos isovolumétricos, 406–407
 para gas ideal, 400–401
 primera ley de la termodinámica, 398–401, 427
 conservación de la energía y, 146
 de gas monoatómico, 352, 355
 de gas poliatómico, 363
 definición de, 363–364, 386
 degradación de la energía y, 423
- Energía mecánica (E), 124
 cambio en, como trabajo, 145, 155
 conservación de
 en el movimiento de rotación, 254–255, 262
 en resortes, 141–145
 estrategias de resolución de problemas, 136
 gravedad y, 135–138
- Energía oscura, 279, 1001–1002, 1001*f*
- Energía potencial (EP). *Véase también* Energía potencial elástica; Energía potencial eléctrica; Energía potencial gravitatoria
 como propiedad del sistema, 132
 de fluido. *Véase* Ecuación de Bernoulli
 de resorte, 140–145
 y la conservación de la energía mecánica, 135–138
- Energía potencial elástica (EP_s), 140–145, 140*f*, 155, 441–445, 441*f*, 463
 ecuación para, 441
 trabajo-energía teorema y, 141–143, 155
 y la conservación de la energía mecánica, 140–145
- Energía potencial eléctrica (EP_e), 548–552, 549*f*
 cambio en, en el campo eléctrico constante, 549–552, 579
 debido a cargas puntuales, 555–558, 555*f*, 556*f*, 580
 frente a la energía potencial gravitatoria, 550, 550*f*
 y potencia, 601–602
- Energía potencial gravitatoria (EP_g), 132–140, 154
 definición de, 133
 en movimiento de rotación, 254, 262
 frente a la energía potencial eléctrica, 550, 550*f*
 niveles de referencia para, 134–135
 para objetos altos, 217–219 y 219*f*
 trabajo-energía teorema y, 133–134, 155
 y el trabajo gravitatorio, 133–134, 133*f*, 155, 218–219
 y la conservación de la energía mecánica, 135–138
- Energía solar, 381
- Energía total, 899–900, 901, 906
 y el impulso relativista, 900–901, 906
- Enfoque de Newton, 870
- Enfoque de sistemas, 109–111
- Entropía (S), 418–423, 428
 cambio en, 428
 cálculo de, 419–421
 definición de, 419
 como trastorno mayor, 421–423
 del Universo, 419, 422–423
 vista molecular de, 422–423
- Equilibrio
 condiciones de rotación, para, 240–241
 condiciones de traslación, para, 240
 conductores en
 potencial eléctrico en, 558–559, 559*f*
 propiedades de, 529–531, 529*f*, 530*f*, 539
 definición de, 529
 electrostático
 mecánico
 condiciones para, 240–241, 261
 ejemplos de, 244–247
 estrategia para resolver problemas, 244
 MCAT guía de estudio para, A.29–A.32
 y la segunda ley de Newton, 99–101, 99*f*, 113
 térmica, 332, 332*f*, 354, 368–369
 y el nivel de energía, 309
- Equilibrio de rotación
 aplicaciones, 235
 condiciones para, 240–241
- Equilibrio de traslación, las condiciones para, 240
- Equilibrio electrostático
 conductores en
 potencial eléctrico en, 558–559, 559*f*
 propiedades de, 529–531, 529*f*, 530*f*, 539
 definición de, 529

- Equilibrio mecánico
- Equilibrio térmico, 332, 332f, 354, 368–369
- Equipo(s), de bicicleta, 248–249, 249f
- Equipotencial(es), 559–560, 560f
- Equivalencia (=), A.1–A.2, A.19t
- principio de (en la relatividad general), 904
- Equivalente mecánico del calor, 363, 386
- Equivalente roentgen en el hombre (Rem), 974
- Escala Celsius, 333, 335, 336f, 354
- conversión a/a partir de escala Kelvin, 334, 335
- conversión a/a partir de la escala Fahrenheit, 335–336
- Escala Fahrenheit, 335, 336f, 354
- conversión a/de la escala Celsius, 335–336
- conversión de/a escala Kelvin, 336
- Escandio (Sc), configuración del estado base, 946t
- Esclerótica, 861f
- Esfigmomanómetro, 293, 293f
- Esfuerzo, 282, 319
- Esfuerzo cortante, 283–284, 284f, 285–286
- Esfuerzo de deformación, 283, 285
- Esfuerzo de tensión, 282–283, 285
- cizalla, 283–284, 284f, 285–286
- expansión térmica y, 339
- modelos de, arquitectura, en, 847, 848f
- tracción, 282–283, 285
- volumen (a granel), 284, 286–287
- Espectro
- electromagnético, 746–749, 747f, 753
- efecto Zeeman en el, 942, 942f
- visible, 771, 771f, 772f
- Espectro electromagnético, 746–749, 747f, 753
- efecto Zeeman en el, 942, 942f
- Espectro visible, 771, 771f, 772f
- Espectrómetro de rejilla de difracción, 840, 840f
- Espectrómetros de masas, 663–664
- Espectros de absorción, 936, 936f
- Espectros de emisión, 935–937, 936f
- de hidrógeno, 936, 936f
- de mercurio, 936f
- de neón, 936f
- estructura fina, 943
- Espejismo(s), 804, 804f
- Espejo(s)
- aberraciones en, 814, 814f, 816, 870
- ampliación lateral, 791, 815
- automóviles, espejos laterales, 797–798, 798f
- cóncavo, 793–795, 793f, 794f, 795f, 796, 797f, 798–799
- aplicaciones, 797
- convención de signos para, 795–796, 796f, 796t
- convexo, 795–796, 795f, 796, 797f, 798, 800, 815
- aplicaciones, 797–798, 798f
- diagrama de rayos, 795–798, 797f
- dieléctrico, 834
- ecuación del espejo, 794–795, 815
- esférico (*Véanse también* Espejos cóncavos; Espejos convexos)
- aberración esférica en, 794, 794f, 814, 814f, 816, 870
- definición de, 793
- parabólico, 814, 869
- perfecto, 834
- plano, 790–793, 791f, 815
- reflejo de telescopios, 868–871, 870f
- retrovisores de automóviles, espejos, 792–793, 792f
- Espejo de Lloyd, 829, 829f
- Espejos cóncavos, 793–795, 793f, 794f, 795f, 796, 797f, 798–799
- aplicaciones de, 797
- Espejos convexos y 795–796, 795f, 796, 797f, 798, 800, 815
- aplicaciones de, 797–798, 798f
- Espejos dieléctricos, 834
- Espejos divergentes. *Véase también* Espejos convexos
- Espejos esféricos. *Véase también* Espejos cóncavos; Espejos convexos
- aberración esférica en, 794, 794f, 814, 814f, 816, 870
- definición de, 793
- Espejos parabólicos, 814
- Espejos planos, 790–793, 791f, 815
- Estado base, 939, 939f
- Estado crítico, de un reactor nuclear, 985
- Estado cuántico, 913
- energías de, 938–939, 939f, 951
- Estado metaestable, 949
- Estados de la materia, 277–279, 278f, 319. *Véase también* Gas(es); Líquido(s); Sólido(s)
- Estados excitados, 949, 949f, 951
- Estampido sónico, 487, 487f
- Estaño
- calor específico de, 365t
- como superconductor, 604, 604t
- Esterilización, con radiación, 975
- Estimación, 12–14, 19
- Estrategias para resolver problemas.
- aceleración centrípeta, 210–211
- aceleración, constante, en una dimensión, 38
- análisis dimensional, 5–7, 18
- calorimetría con cambio de fase, 371–372
- campo eléctrico, 524–525
- circuitos de corriente
- capacitores, 569–570
- reglas de Kirchhoff, 626–627
- resistencias, 624
- circuitos *R.L.C.*, 733
- colisiones
- en dos dimensiones, 183
- en una dimensión, 180
- combinaciones de capacitores, 569–570
- conservación de la energía mecánica, 135
- ecuación de Bernoulli, 320
- efecto Doppler, 484
- energía y el movimiento de rotación, 254
- equilibrio, mecánico, 244
- estimación y, 12–14, 19
- estrategia general, 17–18, 17f
- fuerza eléctrica, 524–525
- fuerzas de flotación, 319
- interferencia de película fina, 832
- momento angular, 262
- movimiento de rotación y energía, 254
- movimiento de un proyectil, 66
- potencial eléctrico, 556
- reglas de Kirchhoff, 626–627
- resistencias, 624
- segunda ley de Newton, 99, 112
- velocidad relativa, 72
- Estrellas
- color de, 912–913
- formación de, 219
- neutrones, 258
- temperatura de la superficie de las, 912–913
- Estrellas de neutrones, 258
- Estrellas enanas marrones, 219
- Estríbo (hueso del oído), 502, 502f, 503
- Estructura fina de los espectros de emisión, 943
- Estudios geológicos, los péndulos en, 453, 454
- Éta (η), 991t
- Éter, luminoso, 887–888, 887f, 888f
- Exclusión principio (Pauli), 945–946, 945t, 951
- Expansión. *Véase también* Expansión térmica
- Expansión térmica
- coeficiente de expansión de la superficie (γ), 340–341, 354
- coeficiente de expansión de volumen (β), 338t, 341, 342, 354
- coeficiente de expansión lineal (α), 338, 338t, 354
- de agua, 341–343, 343f
- de líquidos, 338t, 341–343
- de sólidos, 337–341, 337f, 340f, 354
- definición de, 337
- tiras bimetalicas, 339, 340f
- Experimento de Davison-Germer, 923
- Experimento de la doble rendija de Young, 825–829, 826f, 827f, 849
- Experimento de la gota de aceite de Millikan, 531–532, 531f, 532f
- Experimento del cubo de hielo de Faraday, 530, 530f
- Experimento Michelson-Morley, 887–888, 888f, 889
- Explorador Cósmico de Fondo (COBE), 1000, 1000f, 1004
- Exponente(s)
- definición, A.3
- logaritmos y, A.10–A.11
- notación para, 3, 3t
- reglas para, A.6
- Extrañeza(s), la conservación de, 991t, 994, 1004
- ## F
- Factor de potencia, 734–735
- Factorización, repaso de, A.7
- Farad (F), 563, 580
- Faraday, Michael, 87, 522, 526, 530, 688, 689f
- Farnsworth, Philo, 988
- Fasor(es), 730–731, 730f, 731f
- Fem
- de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- fuentes de, 616–617, 617f, 638
- inducida
- aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
- definición de, 688–689, 689f
- dirección de la (ley de Lenz), 692–695, 692f, 694f, 695f, 698
- en los generadores, 701–705
- fem autoinducida, 705–707, 705f, 712
- fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
- fem de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
- ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Fem de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- Fem inducida
- aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
- auto-inducida, 705–707, 705f, 712
- de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
- definición de, 688–689, 689f
- dirección de la (ley de Lenz), 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- en los generadores, 701–705
- fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
- ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
- ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Femtómetro (FM), 959
- Fermi (fm), 959
- Fermi, Enrico, 968, 969f, 984
- Fermiones, 995
- Ferritas, 649

- Ferrocarriles
 acela de tren, 41
 efecto Doppler en el silbato del tren, 485
 fricción y, 184
 locomotora, ruedas de, 446, 447f
 pista, la expansión térmica de, 339, 339f
- Feynman, Richard, 912, 989, 989f
- Fibra OmniGuide, 834
- Fibra óptica, 779–780, 779f, 780f, 781
- Fibrilación auricular, 606, 606f
- Fibrilación ventricular, 606f, 607
- Fibrilación, de corazón, 606, 606f, 607–608
- Física cuántica, 911–927
 concordancia con la física clásica, 940
 corrimiento Compton, 920–922, 921f, 928–929
 Einstein y, 888f
 función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
 historia de, 912
 materia, la naturaleza dual de, 922–925, 928
 modelo del átomo, 942–948, 951
 principio de incertidumbre, 926–928, 926f, 929
 radiación de cuerpo negro y, 911–913, 912f, 928
 rayos X, difracción de cristales de, 917, 917f, 918–920, 918f, 919f, 928
 tubo de rayos X, espectro emitido por, 916–918, 917f, 928
 y el efecto fotoeléctrico, 913–916, 914f, 915f, 928
- Física de partículas, preguntas abiertas en, 1003
- Física térmica, 331–354. *Véase también* Temperatura; Termodinámica
- Física, objetivo de, 1
- Fisión, 900, 902–903, 982–986, 983f, 1004
- Fisión nuclear, 900, 902–903, 982–986, 983f, 1004
 Floraciones de algas, corrientes de convección y, 380–381, 381f
- Fluido(s). *Véase también* Líquido(s)
- Fluido ideal, características de, 299
- Flujo. *Véase también* Flujo eléctrico; Flujo magnético; Dinámica de fluidos
- Flujo eléctrico (Φ), 533–535, 533f
 ley de Gauss, 533, 535–538
 líneas de flujo, el signo de, 534
- Flujo laminar, 299, 299f
- Flujo magnético (Φ), 689–691, 690f, 712
 campo magnético de la Tierra, 690
 fem inducida
 aplicaciones, 695–697, 695f, 696f, 697f, 698–700, 698f
 auto-inducido, 705–707, 705f, 712
 de movimiento, 697–701, 697f, 698f, 712
 definición de, 688–689, 689f
 dirección, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698
 en generadores, 701–705
 fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
 ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
 ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
 unidades SI, 689, A.21
- Flujo turbulento, 299, 299f
 alas de aviones y, 306
 número de Reynolds, 314–315
- Flujo viscoso, 312–314, 313f
- Flúor (F), configuración del estado base, 946t
- Fluorita, índice de refracción, 767t
- Focos
 circuito de símbolo para, 565, 565f
 de tres vías, 623–624, 624f
 defecto de, 602
 intermitente, 631
 luces de Navidad en serie, 618–619
 oscurecimiento de, con la edad, 598
 resistencia en, 599f
- Forma elástica en los sólidos, 283–284, 284f, 285–286
- Forma óctuple, 995, 995f
- Formas geométricas, áreas comunes, y los volúmenes, A.12t
- Fósforo (P), configuración del estado base, 946t
- Fotocélulas, 913–914, 914f, 916
- Fotoconductores, en xerografía, 561–562, 562f
- Fotocopiadoras, 561–562, 562f
- Fotocopiadoras (xerográficas), los 561–562, la 562f
- Fotoelectrones, 913, 914, 928
- Fotografías, los ojos rojos en, 764
- Fotón(es)
 absorción estimulada, 949, 949f, 951
 como cuanto, 915, 928
 como partícula de campo, 989, 990t
 como partícula fundamental, 989
 emisión espontánea, 949, 949f, 951
 emisión estimulada, 949–950, 950f, 951
 emitido por el cambio de órbita del hidrógeno, 939–940, 951
 en la teoría electrodébil, 998, 998f
 energía de, 762, 780, 900, 915, 920–922
 historia del concepto, 762
 impulso de, 900, 920–921, 923
 rayos gamma (γ), 747f, 748–749, 962–963, 962f, 968
 virtual, 989, 989f
- Fotones virtuales, 989, 989f
- Fóvea, 861f
- Fraciones, operaciones matemáticas con, A.5
- Fragmentos de fisión, 982
- Franjas
 brillantes
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
 definición, 825–826, 826f
 oscura
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 de difracción de una sola ranura, 850
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franjas brillantes
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franjas oscuras
 condiciones para, 826–827, 826f, 849
 de difracción de una sola ranura, 850
 en películas delgadas, 830–831, 849–850
 posición de, 828, 849
- Franklin, Benjamin, 514, 514f, 531
- Franklin, Rosalinda, 919, 919f
- Frascos Dewar, 384–385, 384f
- Frecuencia (f). *Véase también* Frecuencia angular
 de corte, en efecto fotoeléctrico, 914
 de la radiación emitida por el cambio de hidrógeno órbita, 937, 939–940, 951
 de ondas, 458, 464
 de ondas de materia, 923, 929
 del movimiento armónico simple, 438, 447–448, 450–451, 463
 del péndulo, 452
 natural, 494
 resonante, 494
- Frecuencia angular (ω)
 en el movimiento armónico simple, 447, 448, 463
 en péndulos, 452
- Frecuencia de corte (f_c), en el efecto fotoeléctrico, 914, 915f
- Frecuencia de pulsación, 499, 504
- Frecuencia de resonancia
 en circuitos LC, 740
 en circuitos RLC en serie, 735–736, 735f, 752
- Frecuencia de resonancia, del oscilador, 494
- Frecuencia fundamental (primer armónico), 490f, 491–494, 495f, 496, 497–498
- Frecuencia natural, 489, 494, 495–496, 495f, 504.
Véase también Armónica(s)
- Frecuencia-tensión proporción de Josephson, A.20
- Frenos hidráulicos, 291
- Frente de onda
 de onda de luz, 763, 763f
 principio de Huygens, 775–777, 775f, 776f, 781
 de onda esférica, 481, 481f
- Fresnel punto brillante, 836f, 837
- Fresnel, Augustín, 837
- Fricción, 105–112, 113. *Véase también* Resistencia del aire
 cinética (\vec{f}_k), 105–106, 106f, 108–109, 113
 coeficiente de fricción cinética (μ_k), 106, 107t, 113
 coeficiente de fricción estática (μ_s), 106, 107t, 113
 definición de, 105
 en el nivel microscópico, 128
 en los fluidos. *Véase* Viscosidad
 enfoque de sistemas para, 109–111
 estática (\vec{f}_s), 105–106, 106f, 107–108, 113
 estrategias de resolución de problemas, 113
 fuerza normal y, 105
 trabajo realizado por, 128–129
- Fricción cinética (\vec{f}_k), 105–106, 106f, 108–109, 113
 coeficiente de (μ_k), 106, 107t
- Fricción estática (\vec{f}_s), 105–106, 106f, 107–108, 113
 coeficiente de (μ_s), 106, 107t, 113
- Fuente de alimentación de corriente alterna (AC)
 corriente eficaz, 724–726, 750–751
 símbolo de circuito, 724
 voltaje rms, 725–726, 750–751
- Fuente de luz coherente, definición de, 825
- Fuente de luz incoherente, definición de, 825
- Fuera de fase, definición, 462, 462f
- Fuerza(s), 87–88, 87f, 112. *Véase también* Resistencia del aire; Fuerzas de flotación; Fuerzas disipativas; Fuerzas eléctricas; Fuerza electromagnética; Fricción; Fuerza gravitacional; Fuerza magnética; Leyes de Newton
 acción, 95–96
 adhesiva, 310f, 311–312, 311f, 312f
 campo, 87, 87f
 centrípeta, 209–210, 210f
 cohesiva, 310–312, 310f, 311f, 312f
 color, 997, 1004
 como fenómenos vinculados, 95
 conservativa, 131–132, 132f, 155
 de contacto, 87, 87f
 de fricción cinética (\vec{f}_k), 105–106, 106f, 107–108
 de fricción estática (\vec{f}_s), 105–106, 106f, 107–108
 de reacción
 tercera ley de Newton y, 95–96, 97
 y la propulsión de cohetes, 184–185
- débil
 Big Bang y, 999, 999f
 características de los, 989, 990f, 992, 994, 1004
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989
 electrodébil y la teoría, 997–998
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 deformación de los objetos por, 88
 electrodébil, 998, 999, 999f, 1004
 electrostática, 517

- fuerte
 Big Bang y, 999, 999f
 características de los, 989, 990t, 991, 994, 1004
 como fuerza de color, 997
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 fuerza centrífuga, tan ficticia, 214
 fuerza de Coulomb, 518 (*Véase también* Ley de Coulomb) conservación de, 549
 fuerza ficticia, centrífuga, 214
 fundamental, 87, 112, 989, 990t, 999, 999f, 1004
 MCAT guía de estudio para, A.26–A.29
 neta, 88
 no conservativa, 131–132, 132f, 155
 el trabajo realizado por, 128–129, 138–140
 movimiento de rotación, con, 254, 255–256, 262
 y la pérdida de energía de los sistemas, 145–146
 normal (\vec{n}), 96–97, 96f
 y fricción, 105
 nuclear, 959, 989, 997
 promedio (\vec{F}_{prom}), 169, 169f
 restauración
 del péndulo, 451–452
 del resorte, 140, 438
 trabajo realizado por fuerza constante
 ángulo para el desplazamiento, 126
 desplazamiento lineal, 125, 125f
 fuerza variable, 152–154, 152t
 fuerzas disipativas, 128–129
 unidades de, 90, 90t, la A.21
 Fuerza centrífuga, como fuerza ficticia, 214
 Fuerza de acción, 95–96
 Fuerza de color, 997, 1004
 Fuerza de Coulomb, 518. *Véase también* Ley de conservación de Coulomb, 549
 Fuerza débil
 Big Bang y, 999, 999f
 características de la, 989, 990t, 992, 994, 1004
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989
 electrodébil y la teoría, 997–998
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 Fuerza eléctrica (F_e)
 como fuerza de campo, 87
 estrategias para resolver problemas, 524–525
 frente a la fuerza gravitacional, 518–519
 ley de Coulomb, 517–522, 518f
 propiedades de, 417, 517
 superposición principio para, 519–522
 Fuerza electrodébil, 998, 999, 999f, 1004
 Fuerza electromagnética
 características de, 994
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989, 990t, 998, 998f, 1004
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 y el Big Bang, 999, 999f
 Fuerza ficticia, la fuerza centrífuga como, 214
 Fuerza fuerte
 Big Bang y, 999, 999f
 características de la, 989, 990t, 991, 994, 1004
 como el color de la fuerza, 997
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989, 990t, 999, 999f
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 Fuerza gravitatoria (F_g), 92–95, 93f. *Véase también* Caída libre
 artificial, 210
 como fuerza de campo, 87
 como fuerza fundamental, 87, 112, 989, 990t, 1004
 como punto de fuerza, 215
 como una fuerza conservativa, 133
 constante de la gravitación universal (G), 93, 214, 225, A.20
 medición de, 215, 215f
 determinación, con péndulo, 453
 en el Modelo Estándar, 998, 998f
 en el movimiento a través de medio viscoso, 318, 318f
 en la relatividad general, 903–905
 en la superficie de la Tierra, el 93
 frente a la fuerza eléctrica, 518–519
 ley de Gauss para, 215
 ley de la gravitación universal (Newton), 86, 92–93, 214–221, 224–225, 1001
 periodo y el péndulo, 452–453, 454
 trabajo realizado por, 133–134, 133f, 155, 218–219
 variación con la altitud, 215t
 y el Big Bang, 999, 999f
 y el tiempo, 904
 y la conservación de la energía mecánica, 135–138
 y la luz, curvatura de, 904–905, 904f
 Fuerza magnética, 87
 aplicaciones, 657, 657f
 conductor de corriente, 655–658, 656f, 657f, 675
 dirección de (regla #1 de la mano derecha), 653–654, 653f, 657, 675
 entre dos conductores paralelos, 667–669, 667f, 676
 sobre una partícula cargada, 652–655, 675
 torque sobre el lazo de corriente, 658–661, 659f, 675
 Fuerza neta, 88
 Fuerza normal (\vec{n}), 96–97, 96f
 y fricción, 105
 Fuerza nuclear, 959, 989, 997
 Fuerza promedio (\vec{F}_{prom}), el teorema de impulso-momento y, 169, 169f
 Fuerzas cohesivas, 310–312, 310f, 311f, 312f
 Fuerzas conservativas, 131–132, 132f, 155
 Fuerzas de adhesión, 310f, 311–312, 311f, 312f
 Fuerzas de campo, 87, 87f, 522. *Véase también* Fuerza eléctrica; Fuerza gravitacional; Fuerza magnética
 Fuerzas de contacto, 87, 87f
 Fuerzas de flotación (B), 293–299, 294f, 295f, 319
 en el movimiento a través de medio viscoso, 318, 318f
 en la sedimentación, 318
 estrategias de resolución de problemas para, 319
 sobre los objetos sumergidos, 294f, 295, 295f, 296–297, 296f
 sobre objetos flotantes, 295–296, 295f, 297–299
 Fuerzas de reacción
 tercera ley de Newton y, 95–96, 97
 y propulsión de cohetes, 184–185
 Fuerzas disipativas. *Véase también* Fricción
 fuerzas no conservativas como, 131
 movimiento de rotación, con, 254, 255–256, 262
 Fuerzas electrostáticas, 517
 Fuerzas fundamentales, 87, 112, 989, 990t, 999, 999f, 1004
 Fuerzas no conservativas, 131–132, 132f, 155
 movimiento de rotación, con, 254, 255–256, 262
 trabajo realizado por, 128–129, 138–140
 y la pérdida de energía de los sistemas, 145–146
 Función de energía potencial, para el trabajo gravitacional, 133
 Función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
 Función de trabajo, 915, 915t, 928
 Función inversa del seno, 15
 Función tangente inversa, 15
 Funciones trigonométricas inversas, 15
 Fusibles, 623
 Fusión de confinamiento electrostático inercial, 988
 Fusión nuclear, 986–988, 1004
 Fusión por confinamiento inercial, 988
 Fusión, calor latente de, 369, 370t
 Fusión, la energía nuclear, 986–988, 1004
- ## G
- Gafas de sol
 Polaroid, 846
 protección UV en, 747f
 Galaxia(s)
 centro de, 905
 número aproximado de, 13–14
 Galilei, Galileo, 26, 43, 43f, 88, 452
 Galio (Ga), configuración del estado base, 946t
 Gamma (γ) desintegración, 962–963, 962f, 968–969, 976, 977
 Gamma (γ) rayos, 747f, 748–749, 962–963, 962f, 968, 977, 987
 Gamow, George, 999f
 Gas(es). *Véase también* Gas ideal
 análisis espectral de, 772, 772f
 características de, 277–278
 conductividad térmica, 376t
 densidad de, 279, 279t
 energía interna de, 352, 355, 363, 400–401
 moléculas, los grados de libertad, 401
 propiedades reales frente a ideales, de, 344
 raíz cuadrada media (RMS) de la velocidad, 352, 352t, 355
 teoría cinética de los, 348–354, 354–355
 trabajo realizado en
 procesos adiabáticos, 404–406, 427
 procesos isobáricos, 395–398, 402–404, 427
 procesos isotérmicos, 407–408, 427
 procesos isovolumétricos, 406–407, 427
 procesos termodinámicos generales, 408–409
 trabajo realizado por, sobre el medio ambiente, 396, 427
 velocidad del sonido en, 476–477, 476t
 Gas ideal
 cambio de energía interna en el, 400–401
 definición de, 344
 propiedades, 343–348
 macroscópicas, 354
 modelos moleculares para, 348–354, 354–355
 vs. gas real, 344
 Gas monoatómico
 calor específico molar, 400–401, 401t
 energía interna, 352, 355
 Gases de efecto invernadero, 385–386, 385f
 Gases diatómicos
 calor específico molar de, 401, 401t
 interior de la energía de, 363
 Gases nobles, 946
 Gato, ojo, resolución de, 873
 Gauss (G), 653, 675
 conversión de/a Tesla, 653
 Gauss (CGS) sistema de unidades, 3
 campo magnético, 653
 de velocidad, 29
 densidad de, 279
 dimensiones en, 5t
 prefijos para, 3–4, 3t
 Gauss, Karl Friedrich, 215, 533
 Gaussiana, superficie, 535–536
 Geiger, Hans, 934–935, 935f
 Gell-Mann, Murray, 995, 995f
 Generación de energía eléctrica, de medición de energía en, 148

- Generador Van de Graaff, 530, 532–533, 532*f*, 548*f*
 Generadores, 701–705
 de corriente alterna (CA), 701–702, 701*f*, 702*f*, 703–704, 712
 de corriente directa (CD), 702–703, 702*f*
 Van de Graaff, 530, 532–533, 532*f*, 548*f*
 Generadores de corriente alterna (AC), 701–702, 701*f*, 702*f*, 703–704, 712
 Generadores de corriente directa (CD), 702–703, 702*f*
 Germanio (Ge)
 calor específico de, 365*t*
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como semiconductor, 515
 configuración del estado base, 946*t*
 resistividad, 598*t*
 GFI. *Véase* Interruptores de falla a tierra
 Glaciares, el derretimiento de, 362*f*, 385–386, 386*f*
 Glaucoma pruebas, 176
 Glicerina, índice de refracción, 767*t*
 Glomérulo, 317, 317*f*
 Glucos, 989, 990*t*, 997, 998, 998*f*
 Goddard, Robert, 185, 307–308
 Goepfert-Mayer, María, 959*f*
 Goudsmit, Samuel, 943
 Gradientes de concentración
 y difusión, 315–316, 315*f*
 y la ósmosis, 316–317
 Grado, de energía, 423
 Grados de libertad, de la molécula de gas, 401
 Grados, conversión a/de radianes, 199
 Gráfica de posición *vs.* tiempo, 29
 velocidad, instantánea, de, 31, 31*f*
 velocidad, promedio, de, 29–30, 30*f*
 Gráfica de velocidad *vs.* tiempo
 aceleración promedio, 34, 34*f*
 bajo la zona, 37
 Gran Colisionador de Hadrones, 998*f*
 Gran teoría unificada (GUT), 999–1000
 Gravedad artificial, 210
 Gravedad específica, 279
 Gravitación universal, ley de Newton de, 86, 92–93, 214–221, 224–225, 1001
 Gravitación, la ley de Newton de, 86, 92–93, 214–221, 224–225, 1001
 Gravitones, 989, 990*t*, la 998*f*
 Grecia, la antigua
 estudio de la astronomía en el, 25
 estudio de la electricidad en, 513
 Grimaldi, Francesco, 762
 Guanina, 920
 Guitarra eléctrica, producción de sonido en, 696, 696*f*
 GUT. *Véase* Gran teoría unificada
 Guth, Alan, 1003
- H**
 Hacer dieta, el metabolismo y, 364, 425–426
 Haces de partículas cargadas, la creación de, 671
 Hadrones, 990–991, 991*t*, 1004
 modelo de quark, 996–997, 996*t*
 Hahn, Otto, 902
 Halógenos, 947
 Haz de partículas de electrones, presión de, 350–351
 Heisenberg, Werner, 925, 926, 926*f*, 941
 Helicópteros
 tercera ley de Newton y, 96
 velocidad del rotor, 200
 Helio (He)
 almacenamiento de líquido, de, 384
 calor específico molar, 401, 401*t*
 calor latente de fusión, 370*t*
 calor latente de vaporización, 370*t*
 como gas noble, 946
 conductividad térmica, 376*t*
 configuración del estado base, 946, 946*t*
 densidad, 279*t*
 láser de helio-neón, 950, 950*f*
 respiración de, y la calidad de voz, 501
 velocidad del sonido en, 476*t*
 velocidad rms de, 352*t*
 Henry (H), 706, 712
 Henry, Joseph, 688, 706*f*
 Heridas, terapia con láser para, 749
 Herman, Robert, 999*f*
 Herschel, William, 747
 Hertz (Hz), 447
 Hertz, Heinrich Rudolf, 740–741, 740*f*, 746–747, 752, 762, 913
 Hidrógeno
 conductividad térmica de, 376*t*
 densidad, 279*t*
 el calor específico molar, 401, 401*t*
 energía de ionización, 939
 espectro de emisión, 936, 936*f*, 937
 fusión de, en el Sol, 986–987
 isótopos, 4, 957, 958
 velocidad del sonido en, 476*t*
 velocidad rms de, 352, 352*t*
 Hielo
 calor específico, 365*t*
 conductividad térmica, 376*t*
 densidad, 279*t*, 343
 índice de refracción, 767*t*
 Hielo (congelación) punto, 333, 334, 335, 336*f*
 Hielo seco, 350*f*
 Hierro (Fe)
 calor específico, 365*t*
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 conductividad térmica, 376*t*
 configuración del estado base, 946*t*
 densidad de, 279*t*
 función de trabajo, 915*t*
 resistencia a la rotura de, 285*t*
 resistividad, 598*t*
 y magnetismo, 648, 649, 650, 673–674
 HIFU. *Véase* Ultrasonido focalizado de alta intensidad
 Hilbert, David, 888*f*
 Hooke, Sir Robert, 140, 438
 Horizonte de eventos, 905
 Hubble, Edwin, 1001
 Huellas dactilares, para quitar el polvo de, 650
 Hueso
 módulo elástico para, 283*t*
 resistencia a la rotura de, 285*t*
 Humectante, de superficie, 311, 311*f*
 Humor acuoso, 860, 861*f*
 Humor vítreo, 861*f*
 Huygens, Christian, 761, 762*f*, 775
- I**
 Imagen
 apenas resuelta, 871–872, 872*f*
 definición de, 790
 real, 790, 793, 801, 815
 recién resuelta, 871, 872*f*, 878
 resuelta, 871–872, 871*f*, 872*f*
 sin resolver, 871–872, 871*f*, 872*f*
 virtual, 790–791, 791*f*, 795, 796, 815
 Imagen apenas resuelta, 871–872, 872*f*
 Imagen resuelta, 871–872, 871*f*, 872*f*
 Imagen virtual, 790–791, 791*f*, 795, 796, 815
 Imágenes por ultrasonido, 473*f*, 474–475
 Imágenes reales, 790, 793, 801, 815
 Imán(es), 648–650, 649*f*
 monopolo, 649, 1002–1003
 permanente, 673–674
 polos de, 648–649
 superconductor, 605, 605*f*, 653
 Imanes monopolo, 649, 1002–1003
 Imanes permanentes, 673–674
 Imanes superconductores, 653
 Impedancia (Z), 731–732, 732*t*, 751
 Impermeabilizante, 312
 Implantes cocleares, 503
 Impresoras láser, 562, 562*f*
 Impulso (\vec{I}), 168–169, 187
 Impulso instantáneo, 186
 Impulso. *Véase también* Momento angular, impulso lineal
 Incertidumbre, en la medición, 7–10, 19
 Indicadores de carga de la batería, 296, 296*f*
 Índice adiabático (γ), 401*t*, 405, 404
 Índice de refracción, 766–767, 767*t*, 769, 771, 771*f*, 780–781
 Indio, como superconductor, 604
 Inducción, 688–689, 689*f*
 aplicaciones, 695–697, 695*f*, 696*f*, 697*f*, 698–700, 698*f*
 carga por, 516, 517*f*
 eliminación de carga de las casas, 530–531
 dirección de la fem inducida, 692–695, 692*f*, 694*f*, 695*f*, 698
 en los generadores, 701–705
 fem autoinducida, 705–707, 705*f*, 712
 fem contraelectromotriz, 704–705, 704*f*
 fem de movimiento, 697–701, 697*f*, 698*f*, 712
 ley de Faraday de, 691–694, 692*f*, 695, 697, 712
 ley de Lenz, 692–695, 692*f*, 694*f*, 695*f*, 698, 712
 Inductancia (L), 706, 713
 del solenoide, 705–707, 713
 Inductor(es)
 definición de, 707
 en circuitos CD RL, 707–710, 708*f*, 712–713
 en circuitos de CA, 728–729, 728*f*, 729*f*, 751
 ángulo de fase, 732*t*
 impedancia, 732*t*
 RL circuitos, 732*t*
 RLC circuitos en serie, 730–734, 730*f*, 731*f*, 751
 energía almacenada en el campo magnético de, 711–712, 713
 símbolo de circuito para, 708
 Inercia, 89, 112
 Ingeniería
 esfuerzo de compresión en el puntal, 366
 juntas de expansión térmica, 337, 338*f*
 oleoductos, y la expansión térmica, 331*f*
 potencia entregada por el motor del elevador, 148–149
 sistema de engranajes de bicicletas, 248–249, 249*f*
 Ingravidez, efectos sobre la salud, 210
 Insectos
 caminando sobre el agua, 309–310, 309*f*
 oídos de, 503
 Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, 2*f*
 Instrumentos de cuerda. *Véanse también* Ondas estacionarias
 producción sonora en, 460, 491–494, 497
 puesta a punto de, 460
 Instrumentos de viento
 afinación de, 499–500
 calidad (timbre) de sonido, 500–501
 producción sonora en, 495–496, 497–498
 Instrumentos musicales. *Véanse también* Ondas estacionarias
 calentamiento de, 497

- calidad (timbre) de sonido, 500–501, 501f
cuerdas
 producción sonora en, 460, 491–494, 497
 puesta a punto de, 460, 499–500
- instrumentos de viento
 calidad (timbre) de sonido, 500–501
 producción sonora en, 495–496, 497–498
 puesta a punto de, 499–500
- Intensidad (*I*)
 de la onda de sonido, 478–479, 481, 504
 variación con la distancia, 481, 482
- de las ondas electromagnéticas, 743–746, 752
- Interferencia
 de ondas de luz, 762 (Véase también Difracción)
 anillos de Newton, 831–832, 831f
 cambio de fase debido a la reflexión, 829–830, 829f
 condiciones para, 824–828, 826f, 830–831, 849
 constructiva
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
 destruktiva
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 de difracción de una sola ranura, 837–838, 838f, 850
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
 en el interferómetro de Michelson, 876–877
 en películas delgadas, 830–834, 830f, 831f, 849–850
 estrategias para resolver problemas, 832
 experimento de la doble rendija de Young, 825–829, 826f, 827f, 849
- de ondas sonoras, 488–489, 488f, 504
 pulsos, 499–500, 499f, 504
- de ondas, en general, 461–462, 461f, 462f, 463f, 464
 constructiva, 461, 461f, 462, 462f, 464, 488, 504
 destruktiva, 461–462, 462f, 463f, 464, 488, 504
 pulsos, 499–500, 499f, 504
- Interferencia constructiva, 461, 461f, 462, 462f, 464, 488, 504
- de ondas de luz
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
- Interferencia destructiva, 461–462, 462f, 463f, 464, 488, 504
- de ondas de luz
 condiciones para, 826–827, 826f, 830–831, 849
 difracción de una sola ranura, 837–838, 838f, 850
 en películas delgadas, 849–850
 posición de, 828, 849
- Interferencia totalmente destructiva, 488
- Interferómetro de Michelson, 876–877, 876f, 887, 888f
- Intermitentes, 631
- Interneuronas, 636, 636f
- Interruptores, 623, 633–634, 634f
- Interruptores de falla a tierra (IF_T), 635, 695–696, 696f
- Inversión de población, 949
- Iones, en la función de las neuronas, los 636–637
- Iridiscencia, 824f
- Iris, 860–861, 861f
- IRM (imágenes por resonancia magnética), 975–976, 976f
- Isótopos, 4, 958, 976
 abreviada de la tabla, A.14t–A.18t
- J**
Jabón, 309. Véase también Detergente
- Jardín de los Dioses, Colorado, 240f
- Jensen, Hans, 959f
- Joule (J), 125–126, 130, 362
- Joule, James P., 362, 363f
- Juntas de dilatación, 337, 338f
- Júpiter
 campo magnético de, 651
 datos planetarios, 223t
 velocidad de escape, 220t
- K**
Kaones (K), 991t, 996t
- Kelvin (K), 335
- Kelvin escala, 36f, 334–335, 335f, 336f, 354
 conversión a/desde escala Celsius, 334, 335
 conversión a/desde la escala Fahrenheit, 336
- Kelvin, Lord, 415f
- Kepler, Johannes, 221
- Kilogramo (kg), 2, 2f, 89, 279
- Kilowatt-hora (kWh), 148, 602–604
- Kirchhoff, Gustav, 627f
- Knievel, Evel, 71
- Kriptón (Kr)
 calor específico molar, 401t
 como gas noble, 947
 configuración del estado base, 946t
- L**
La constante de Planck (*h*), 762, 780, 913, 928, A.20
- La fuerza centrípeta (F_c), 209–210, 210f. Véase también aceleración centrípeta
- La hipermetropía (hipermetropía), 862, 862f, 863–864, 877
- Ladrillo, resistencia a la rotura de, 285t
- Lagos, corrientes de convección en, 380–381, 381f
- Lambda (Λ^0), 991t, 996t
- Lámparas incandescentes, 598, 599f
- Land, E. H., 843
- Láser(es), 949–950, 950f, 951
- Latón, módulo de elasticidad de, 283t
- Lente biconcava, 805f, 806
- Lente biconvexa, 805f
- Lente convexo-cóncava, 805f
- Lente ocular, de un microscopio, 866–867, 867f
- Lente plano-cóncava, 805f
- Lentes delgadas, 805–813, 816
 aberraciones en, 814f, 816
 ampliación angular de, 865–866, 877
 ampliación lateral de, 806, 816
 combinaciones de, 811–812, 812f
 convención de signos, 806–807, 807f, 807t
 convergente (positiva), 805–806, 805f, 807–809, 807f
 diagramas de rayos para, 807–808, 807f, 816f
 divergentes (negativas), 805–806, 805f, 807–808, 807f, 810–811
 ecuación de lente delgada, 806, 808–811, 811–812, 816
 fabricante de lentes de la ecuación, 807
 formas, comunes, 805, 805f
 punto focal, 805, 805f
- Lentes negativas. Véase también Divergentes (negativas) lentes delgadas
- Lentes positivas. Véase también Lentes delgadas convergentes (positivas)
- Leptón(es), 989, 990, 991t, 992, 998, 1003, 1004
- Letteros de neón, 935
- Leucipo, 4
- Ley cero de la termodinámica, 332–333, 332f, 354
- Ley de Boyle, 345
- Ley de Bragg, 919, 928
- Ley de Brewster, 846, 850
- Ley de Charles, 345
- Ley de circuitos de Ampère
 para un alambre, 665–667, 666f, 676
 para un solenoide, 672–673, 673f
- Ley de conservación de la extrañeza, 994
- Ley de conservación de número leptónico, 993–994
- Ley de conservación del número bariónico, 992–993, 1004
- Ley de Coulomb, 517–522, 518f, 539
- Ley de equilibrio. Véase también Ley cero de la termodinámica
- Ley de Faraday de la inducción magnética, 691–694, 692f, 695, 697, 712
- Ley de Fick, 316
- Ley de Gauss
 para el flujo eléctrico, 533, 535–538
 para la fuerza de la gravedad, 215
- Ley de Gay-Lussac, 345
- Ley de Hooke, 140, 437–441, 438f, 463
 péndulos y, 451–452
- Ley de la gravitación universal (Newton), 86, 92–93, 214–221, 224–225, 1001
- Ley de la refracción de Snell, 767–771, 776, 776f, 781
- Ley de Lenz, 692–695, 692f, 694f, 695f, 698, 712
- Ley de Malus, 844–845
- Ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
- Ley de Poiseuille, 313–314, 313f
- Ley de Stefan, 382
- Ley de Stokes, 317–318
- Ley del desplazamiento de Wien, 912–913, 928
- Ley del gas ideal, 345, 348, 354
 aplicaciones, 345–348
 procesos termodinámicos y, 402
- Leyes de inverso del cuadrado, 214
- Leyes de Kepler, 221–224, 225
 primera, 221, 222, 222f, 225
 segunda, 221, 222, 222f, 225
 tercera, 221, 222–223, 225
- Leyes de Newton
 aplicaciones de, 98–105, 113
 ley de la gravitación universal, 86, 92–93, 214–221, 224–225, 1001
 primera ley del movimiento, 86, 88–89, 88f, 89f, 112
 rotación análoga, 237
 segunda ley del movimiento, 86, 89–92, 90f, 112
 aplicaciones de, 98–105, 109–111, 113
 estrategias de resolución de problemas, 99, 112
 fuerzas de fricción y, 107–111
 impulso y, 168
 objetos de equilibrio y, 99–101, 99f, 113
 rotación análoga, 248, 252–253, 257
 y aceleración de objetos, 101–105
 y la fuerza centrípeta, 210, 211–213
 tercera ley de movimiento, 86, 95–98, 96f, 112
- Leyes del movimiento (Newton), 86–105
 aplicaciones de, 98–105, 113
 primera, 86, 88–89, 88f, 89f, 112
 rotación análoga, 237
 segunda, 86, 89–92, 90f, 112
 aceleración de objetos, 101–105
 aplicaciones de, 98–105, 109–111, 113
 estrategias de resolución de problemas, 99, 112
 fuerza centrípeta, 210, 211–213
 fuerzas de fricción y, 107–111
 impulso y, 168

- objetos en equilibrio, 99–101, 113
- rotación análoga, 248, 252–253, 257
- tercera, 86, 95–98, 96f, 112
- Libra (lb), 90
- Límite (lím), 31
- Límite elástico, 283, 283f
- Limpiadores electrostáticos de aire, 561
- Limpiaparabrisas intermitentes, 630
- Línea de corriente de flujo, 299, 299f
- Línea de estabilidad, 960f
- Líneas de campo magnético, 650, 650f
- Líneas eléctricas de campo, 526–528, 527f, 528f, 539
- equipotenciales, 559–560, 560f
- Líneas espectrales, 772
- Linternas, reflectores parabólicos de, 814
- Líquido(s). *Véase también* Dinámica de fluidos
 - características de, 277–278 y 278f
 - densidad de, 279, 279t
 - expansión térmica de, 338t, 341–343
 - punto de congelación de, 333, 334, 335, 336f
 - punto de ebullición de, 333, 334, 335, 336f
 - superficie de, 310–311, 310f
 - tensión superficial (γ), 308–310, 308f, 309t
 - y la acción capilar, 311–312, 311f, 312f
 - velocidad del sonido en, 476–477, 476t
- Litio (Li), configuración del estado base, 946, 946t
- Logaritmo en base común, A.10–A.11
- Logaritmos, repaso de, A.10–A.11
- Longitud (L), 2
 - adecuada, 895, 905
 - contracción de, en la relatividad especial, 895–896, 895f, 905
 - elasticidad de los sólidos, 282–283, 282f, 285
 - unidades de, 2, 3, 18, 959, A.21
 - valores de la muestra, 3, 3t
- Longitud adecuada, 895, 905
- Longitud de onda (λ)
 - Compton, 921
 - de la luz
 - de corte, en efecto fotoeléctrico, 915
 - determinación de rejilla de difracción, 840
 - en el medio, 830, 849
 - espectros de absorción, 936, 936f
 - espectros de emisión, 935–937, 936f
 - medición de, 827–828, 874–875, 876–877
 - y las limitaciones de resolución, 868, 871
 - de la materia (de longitud de onda de De Broglie), 923–924, 929
 - de la onda esférica, 481, 481f
 - de onda lineal, 458–459, 458f, 464
 - de rayos X
 - característica de los rayos X, 947–948, 947f
 - corrimiento Compton, 920–922, 921f, 928–929
 - emitida por el tubo de rayos X, 916–917, 917f, 928
- Longitud de onda Compton ($h/m_e c$), 921, A.20
- Longitud de onda de corte (γ_c), en el efecto fotoeléctrico, 915
- Longitud de onda de De Broglie, 923–924, 929, 937
- Longitud focal (f)
 - de espejo esférico, 795, 800, 815
 - de la lente delgada, 805, 805f, 807, 807t
- Los metales alcalinos, 947
- Luces de carreteras, 631
- Luces de Navidad en serie, 618–619
- Luna
 - datos planetarios, 223t
 - distancia a la Tierra desde, A.19t
 - fuerza gravitacional de, 93
 - masa de, 3t, A.19t
 - velocidad de escape, 220t
- Lupas simples, 865–866, 865f, 877
- Luz linealmente polarizada, 843, 843f. *Véase también* Polarización
- Luz no polarizada, 842–843, 843f
- Luz visible, 747f, 748, 749f
- M**
- Madera, conductividad térmica de, 376t
- Magnesio (Mg), configuración del estado base, 946t
- Magnetismo, 648–674. *Véanse también* entradas de Aplicaciones
 - campo magnético de la Tierra, 650–652, 651f, 653, 657–658, 690
 - imanes, 648–650, 649f
 - monopolo, 649, 1002–1003
 - permanente, 673–674
 - polos de, 648–649
 - superconductor, 605, 605f, 653
 - inducida (magnetización), 649, 673–674
 - magnéticas, 648, 657, 657f
 - materiales magnéticos blandos, 649, 673–674
 - materiales magnéticos duros, 649, 673
 - monopolos magnéticos, 649, 1002–1003
 - tipos de materiales magnéticos, 649, 674
 - vista microscópica de, 673, 673f, 673f, 674f
- Magnetita, 649
- Magnetización, 649, 673–674
- Magnetón de Bohr, A.20
- Magnetón nuclear (μ_n), A.20
- Manganeso (Mn), configuración del estado base, 946t
- Manómetro tubo de tubo abierto, 292, 292f
- Máquina de Atwood, 104–105, 104f
- Máquina de Carnot, 416–418, 417f, 428
- Máquinas de calor, 410–418, 410f, 427–428
 - diagrama para PV , 410, 410f
 - eficiencia de, 415
 - eficiencia térmica de, 410–411, 417–418, 428
 - máquina de Carnot, 416–418, 417f, 428
 - proceso cíclico en el, 410, 411–413
 - refrigeradores y bombas de calor como, 412–415, 414f, 428
 - trabajo realizado por, 410, 428
- Máquinas de diálisis, 657
- Máquinas de movimiento perpetuo, 419
- Marcapasos cardíaco, 606–607
- Marco de referencia estacionario, 72
- Marcos de referencia, 26, 26f. *Véase también* Relatividad
 - absoluta, 887–888
 - estacionaria, 72
 - inercial, 885–886, 886f
 - movimiento en dos dimensiones, 72
 - movimiento, 72
- Marcos de referencia. *Véase también* Marcos de referencia
- Marsden, Ernest, 934–935, 935f
- Marte
 - datos planetarios, 223t
 - velocidad de escape, 220t
- Martillo (hueso del oído), 502, 502f, 503
- Masa (m), 2, 89, 112. *Véase también* Centro de masa
 - de las partículas atómicas, 518t, 958, 958t
 - en la relatividad general, 903–904, 903f, 904f
 - energía equivalente de, 900, 902–903, 958
 - unidad de masa unificada (u), 958
 - unidades de, 2, 2f, 3, 18, 89, 90t, 344, 901, 958, A.20, A.21
 - valores de la muestra de, 3, 3t, A.19t
 - y aceleración (segunda ley de Newton), 89–90, 112
 - y la fuerza de la gravedad, 93–95, 903–904, 903f, 904f
 - y la inercia, 89, 112
- Masa atómica
 - de elementos seleccionados, A.14–A.18
 - el número de Avogadro, y 344
- Masa molar, 344
- Máscaras de buceo
 - con visión de corrección de lente, 808
 - y la visión bajo el agua, 802
- Matemáticas, la revisión de, A.1–A.13
- Materia
 - estados de, 277–279, 278f, 319 (*Véase también* Gas(es); Líquido(s); Sólido(s))
 - MCAT guía de estudio para, A.35–A.37
 - naturaleza dual de la, 922–925, 929
 - niveles de la organización en, 4–5, 4f, 18
 - oscura, 278–279, 1000–1001, 1001f
- Materia oscura, 278–279, 1000–1001, 1001f
- Material diamagnético, 674, 675f
- Materiales magnéticos blandos, 649, 673–674
- Materiales magnéticos duros, 649, 673–674
- Materiales óhmicos, 597, 597f
- Materiales no óhmicos, 597, 597f
- Materiales, resistencia a la rotura de, 285t, 287–288. *Véase también* Sólidos, deformación de
- Maximo, 836
 - de difracción de una sola ranura, 838, 838f
 - para la red de difracción, 839, 839f, 842, 850
- Máximo de orden cero, 827
- Máximo de segundo orden, 840
- Máximos secundarios, 836
- Maxwell, James Clerk, 739–740, 739f, 746–747, 752, 762
- Mayor que ($>$), A.1, A.19t
- MCAT Skill Builder Guía de Estudio, A.22–A.51
- Mecánica
 - clásica, 86, 362
 - newtoniana, 885
 - relativista, 889–896
- Mecánica clásica, 86
- Mecánica estadística y entropía, 422–423, 422t, 423f, 428
- Mecánica newtoniana, 885
- Medicina y biología
 - accidentes automovilísticos, lesiones en, 171–172
 - ADN, la estructura de, determinación, 919–920, 919f, 920f
 - anatomía del oído externo y función, 502–503, 502f, 503f
 - aneurismas, 306
 - antebrazo, fuerzas que actúan sobre, 244–245, 244f
 - arteriosclerosis, aleteo vascular, 305–306, 305f, 306, 306f
 - audición, humana
 - anatomía del oído externo y función, 502–503, 502f, 503f
 - curvas de respuesta de frecuencia, 502, 503f
 - niveles de intensidad producen daños, 479
 - umbral de dolor, 478–479
 - umbral de la audición, 478, 479, 502, 503f
 - bacterias
 - navegación magnética en, 651–652
 - tiempo de duplicación de, 630
 - ballena, energía generada por, 149
 - bioluminiscencia, 146, 146f
 - cavitron aspirador quirúrgico ultrasónico, 475
 - células musculares, ondas de despolarización en, 605–606, 605f
 - cerebro
 - imágenes de, 990
 - lesión de por boxeo, 169
 - líquido de apoyo, 169, 295
 - cirugía con láser, 834

- comida
 aumento de peso, 364, 425–426
 calorías, 363, 364
 irradiación de, 975
- corazón
 actividad eléctrica de, 605–608, 605*f*, 606*f*, 607*f*
 artificial, 657
 descargas eléctricas y, 634
 fibrilación de, 606, 606*f*, 607–608
- daño de la radiación, 973–975, 974*t*
- desfibriladores
 externo, 572–573
 implantados desfibrilador automático (DAI), 607, 607*f*, 608*t*
- diagnóstico por imagen, y exposición a la radiación, 974
- eficiencia térmica del cuerpo humano, 426, 426*t*
- ejercicio
 aptitud física y el consumo de oxígeno, 426, 426*t*
 calorías quemadas en, 151–152, 364, 425
 control de peso, 364, 425–426
 energía generada en, 152, 152*t*
 fisiología de, 364
- fibra óptica, alcance de visión, 779
- glaucoma, prueba de, 176
- heridas, terapia con láser para, 749, 749*f*
- hueso
 módulo elástico para, 283*t*
 resistencia a la rotura de, 285*t*
- imágenes por resonancia magnética (IRM), 975–976, 976*f*
- imágenes por ultrasonido, 473*f*, 474–475
- ingravidéz, efectos sobre la salud de, 210
- iones, en función de las neuronas, 636
- láser en, 950
- máquinas de diálisis renal, 657
- marcapasos cardíaco, 606–607
- membranas celulares, 316–317
- metabolismo, humano, 424–426
 aptitud física y el consumo de oxígeno, 426, 426*t*
 consumo de oxígeno, y la tasa metabólica, 424, 425*t*
 primera ley de la termodinámica y, 424
 tasa metabólica, la medición de, 424, 424*f*
 uso de energía por día, 425–426
 y aumento de peso, 364, 425–426
- movimiento de rotación y, 235
- movimiento flagelar, 146
- neuronas
 conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636*f*, 637*f*
 estructura de, 636, 636*f*
 tipos de, 636
- ojo, 860–865, 861*f*
 alojamiento, 861, 862–863
 anatomía, 860–861, 861*f*
 condiciones de, 861–865, 862*f*, 877
 corrección de la visión, 862–864, 862*f*
 de ojos rojos en las fotografías, 764
 formación de la imagen en, 861
 gafas de sol de protección UV, 747*f*
 longitud de onda de sensibilidad, 749
 máscaras de buceo, 802, 808
 presión del fluido en, 176
 visión bajo el agua, 802
- peces vejiga natatoria, 293
- pérdida de calor corporal, 376–377, 384
- potencia de salida del cuerpo humano, 150–152, 152*t*
- proteínas, estructura, determinación de, 919
- pulmones, tensión superficial del fluido en, 309, 310
- radiactividad, aplicaciones de, 973–976, 976*f*, 990
- rayos X, 475
- regulación del calor corporal, 381
- riñones
 artificial, 317, 317*f*
 diálisis, 317, 317*f*, 657
 funciones de, 317, 317*f*
- ropa de color negro, la absorción de calor por, 381
- salto vertical, la energía y el poder de, 150–152
- sangre
 en la difusión de oxígeno, 316
 limpieza de los riñones, 317, 317*f*
 presión, medición de, 293, 293*f*
 velocidad, la medición de, 475
 viscosidad de, 313*t*, 314
- sedimentación de las moléculas biológicas, 319, 319*f*
- sistema circulatorio
 ley de Poiseuille, 314
 número de Reynolds, 315
- sistema nervioso, conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636*f*, 637*f*
- soluciones intravenosas, y el equilibrio osmótico, 317
- termogramas, 382*f*, 383
- tomografía por emisión de positrones (PET), 990
- tratamiento del cáncer, terapia de campo eléctrico, 726–727
- ultrasonido de alta intensidad en la vida (HIFU), 475–476
- voz, cristales rotos, con, 494
- Medición. *Véase también* Sistema de unidades de Gauss (cgs); SI (Sistema Internacional) de unidades; Unidades; Unidades habituales de Estados Unidos.
- calor específico, 367–368, 387
- corriente eléctrica, 595–596, 595*f*
- incertidumbre en, 7–10, 19
- presión, 292–293, 292*f*
- presión arterial, 293, 293*f*
- temperatura, 332, 333–337, 354, 600
- velocidad de la sangre, 475
- voltaje, 595–596, 595*f*
- Medidor de flujo ultrasónico, 475
- Medio viscoso, movimiento a través de, 317–318, 318*f*
- Meitner, Lise, 902
- Membranas
 celular, 316–317
 selectivamente permeable, 316
- Membranas celulares, difusión a través de, 316–317
- Membranas selectivamente permeables, 316
- Mendeléiev, Dmitry, 946
- Menor que (<), A.1, A.19*t*
- Mercurio (Hg)
 calor específico, 365*t*
 como superconductor, 604, 604*t*
 densidad de, 279*t*
 espectro de emisión, 936*f*
 módulo elástico, 283*t*
 superficie de, 310–311, 310*f*
 tensión superficial, 309*t*
- Mercurio (planeta)
 datos planetarios, 223*t*
 órbita de, 904
 velocidad de escape, 220*t*
- Mercurio del barómetro, 292, 292*f*
- Mesones, 991, 991*t*, 995, 995*f*, 996, 996*t*, 997, 997*f*, 1004
- Metabolismo, humano, 424–426
 consumo de oxígeno
 aptitud física y, 426, 426*t*
 y la tasa metabólica, 424, 425*t*
 primera ley de la termodinámica y, 424
 tasa metabólica, la medición de, 424, 424*f*
 uso de energía por día, 425–426
 y aumento de peso, 364, 425–426
- Metal(es)
 alcalino, 947
 características de los rayos X, 917*f*, 947–948, 947*f*, 951
 conductividad térmica, 375, 376*t*
 efecto fotoeléctrico, 913–916, 914*f*, 915*f*, 928
 funciones de trabajo, 915, 915*t*, 928
 tiras bimetalicas, 339, 340*f*
- Metano (CH₄)
 calor específico molar, 401*t*
 como gas de efecto invernadero, 386
- Método del triángulo, de suma de vectores, 57, 57*f*, 58, 75
- Metro (m), 2
- Michelson, Albert A., 876, 887
- Microonda(s), 747*f*, 748
 polarización de, 844
- Microscopios
 compuesto, 866–868, 867*f*, 877
 electrones, 924–925, 924*f*
 limitaciones ópticas, de, 867–868
 resolución de, 873 (*Véase también* Resolución)
- Microscopios compuestos, 866–868, 867*f*, 877
- Microscopios electrónicos, 671, 924–925, 924*f*
- Millikan, Robert A., 318, 515, 531
- Mínimo, 836
- Miopia, 862, 862*f*, 864, 877
- Miopia (visión corta), 862, 862*f*, 864, 877
- Miopia axial, 862
- Miopia refractiva, 862
- Modelo de Bohr parecido a los átomos hidrógeno, 941–941, 951
- Modelo estándar, 998, 998*f*
- Modelo geocéntrico, 25, 221
- Modelo heliocéntrico, 25–26, 221
- Modelo inflacionario del Universo, 1003
- Moderador, de un reactor nuclear, 985, 985*f*
- Módulo de cizallamiento (S), 283*t*, 284, 319
- Módulo de compresibilidad (B), 283*t*, 284, 319
- Módulo de Young (Y), 283, 283*t*, 319, 476
- Módulo elástico, 282, 319
- Moléculas
 cristalización de, 919
 en la atmósfera, la velocidad de escape, 220
 en un gas, grados de libertad, 401
 polarización de, en dieléctrico, 578, 578*f*
 sedimentación de, 319, 319*f*
- Moles, 344–345, 348, 354
- Molino de campo, 528, 528*f*
- Momento angular (L), 257–261, 262
 conservación de, 257–261
 de ondas electromagnéticas, 743–744, 752
 definición de, 257
 estrategias para resolver problemas, 262
 torque y, 257, 262
- Momento de inercia (I), 247–248, 261
 contra masa, 249–250
 de todo el cuerpo, 248
 definición de, 248, 261
 del objeto compuesto, 249–250, 249*f*
 para objetos largos, 250–254, 250*f*, 251*t*
 unidades de, 248
 y momento angular, 257–261
- Momento magnético ($\vec{\mu}$), 659–660, 675

- MOND (Dinámica Newtoniana Modificada), 1001
- Monitores de apnea, 697, 697f
- Monopolos magnéticos, 649, 1002–1003
- Monóxido de carbono (CO), el calor específico molar, 401t
- Morley, Edward W., 887
- Moseley, Henry G. J., 948
- Motor(es). *Véase también* Motores térmicos
- combustión interna
 - como máquina de calor, 410
 - trabajo realizado por, 404–405
 - de automóvil
 - conversión de armónica para movimiento circular en, 446
 - regulación de la temperatura, 380
 - sistema de clasificación europea para, 148
 - de vapor, 410, 418
 - máquina de Carnot, 416–418, 417f, 428
- Motor de combustión interna
- como máquina de calor, 410
 - trabajo realizado por, 404–405
- Motores de corriente alterna (AC), 661
- Motores de corriente directa (CD), 661, 661f
- Motores de vapor, 410, 418
- Motores eléctricos
- estructura y función, 661, 661f, 704
 - fem contraelectromotriz, 704–705, 704f
- Movimiento. *Véase también* Aceleración; Desplazamiento; Caída libre; Leyes del movimiento; Péndulos; Movimiento de un proyectil; Movimiento de rotación; Movimiento armónico simple; Velocidad; Movimiento circular uniforme; Velocidad
- a través de un medio viscoso, 317–318, 318f
 - en dos dimensiones, 62–71, 63f, 64f, 75–76
 - términos utilizados para describir, 62–63
 - velocidad relativa, 71–75, 72f, 76
 - en la relatividad especial, 898–899, 905
 - en una dimensión, 25–47
 - caída libre, 43–47
 - con aceleración constante, 36–42, 37f, 37t, 48
 - diagramas de movimiento, 35–36, 36f
 - términos utilizados para describir, 26–35
 - inminente 105,
 - MCAT guía de estudio para, A.23–A.26
- Movimiento armónico simple, 463
- aceleración
 - como función de la posición, 438–439, 463
 - como función del tiempo, 449–450, 449f, 463
 - características de, 438–439
 - definición de, 438
 - en comparación con el movimiento circular uniforme, 445–448, 446f, 449, 449f
 - en comparación con el movimiento pendular, 451–452, 453f
 - frecuencia angular en, 447, 448
 - frecuencia de, 447–448
 - periodo de, 446–448
 - posición como función del tiempo, 449–451, 449f, 463
 - sinusoidal de la naturaleza, 449–450, 449f, 450f
 - velocidad
 - como función del tiempo, 449–450, 449f, 463
 - en función de la posición, 443–445, 444f, 463
- Movimiento circular uniforme, en comparación con el movimiento armónico simple, 445–448, 446f, 449, 449f
- Movimiento circular. *Véase también* Movimiento circular uniforme
- Movimiento de proyectil, 63–71, 63f, 64f, 76. *Véase también* Caída libre
- altura máxima, 45–46
 - ángulo de proyección, 64, 64f
 - aumento de potencia, caída libre, 46–47
 - con aceleración en dos dimensiones, 70–71
 - estrategias para resolver problemas, 66
 - hechos importantes, resumen, 65
 - independencia de movimientos horizontal y vertical, 64, 76
 - rango, 69
 - velocidad de la bala, la medición de, 178, 178–179
- Movimiento de rotación, 198–214. *Véase también*
- Aceleración centrípeta, torque
 - con fuerzas no conservativas, 254, 255–256, 262
 - conceptos básicos de, 198–201
 - conservación de la energía mecánica en, 254–255
 - ecuaciones cinemáticas para, 202–203, 202t, 224
 - en virtud de la aceleración angular constante, 202–203, 224
 - tipos de energía en, 254, 262
- Movimiento inminente, 105
- Movimiento sinusoidal
- movimiento armónico simple como, 449–450, 449f, 450f
 - ondas como, 457, 457f
- Müller, K. Alex, 604
- Multímetro digital, 595–596, 595f
- Multiplicación
- cifras significativas en, 8, 19
 - de fracciones, A.5
 - de un vector, por un escalar, 58
 - en notación científica, A.3
- Muón neutrino (ν_μ), 991t
- Muon número leptónico, la conservación de, 993
- Muones (μ), 892–893, 893f, 991, 991t, 992
- Músculo ciliar, 861, 861f, 862
- ## N
- Naves espaciales, las velas solares para, 745–746
- Nebulosa del Cangrejo, 258, 258f, 749, 749f
- Neeman, Yuval, 995
- Neón (Ne)
- calor específico molar, 401t
 - como gas noble, 946
 - configuración del estado base, 946, 946t
 - espectro de emisión, 936f
 - láser de helio-neón, 950, 950f
- Neptunio (Np), serie radiactiva, 971, 971t
- Neptuno
- datos planetarios, 223t
 - velocidad de escape, 220t
- Nervio óptico, 861, 861f
- Neuronas
- conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636f, 637f
 - estructura, 636, 636f
 - tipos de, 636
- Neuronas motoras, 636, 636f
- Neuronas sensoriales, 636, 636f
- Neutrino electrón (ν_e), 991t
- Neutrino tau (ν_τ), 991t
- Neutrinos, 968, 977, 987, 991t, 992, 1001
- Neutrón(es), 4
- carga, 514, 515, 518t, 958
 - como bariones, 991, 991t
 - descubrimiento de, 972
 - en la estructura atómica, 4f, 514, 957–958
 - estructura, 4, 4f
 - masa, 518t, 958, 958t, A.20
 - quark composición, 996t
- Newton (N), 90, 93
- conversión a/de libras, 90
- Newton · metro (N · m), 125, 126, 237, 238
- Newton, Isaac, 86, 87, 90, 90f, 92, 214, 761, 832
- Nicromo, 603
- coeficiente de temperatura de la resistividad, 598t
 - resistividad, 598–599, 598t
- Niobio (Nb), como superconductor, 604t
- Níquel (Ni)
- como sustancia ferromagnética, 649, 673, 674
 - configuración del estado base, 946t
- Nitrógeno (N)
- calor específico molar, 401t
 - calor latente de fusión, 370t
 - calor latente de vaporización, 370t
 - conductividad térmica, 376t
 - configuración del estado base, 946t
 - velocidad rms, 352, 352t
- Nivel de energía, de hidrógeno, 938–939, 939f
- Nivel de intensidad, de la onda de sonido (decibeles), 479–480, 479t, 504
- Nodo AV (atrioventricular), 605f, 606
- Nodo sinoatrial (SA), 605–606, 605f
- Nodo, de la onda estacionaria, 489–490, 490f, 495–496, 495f
- Notación
- cambio (Δ), 26
 - dimensiones, 5–7
 - elementos de circuito. *Véase* Circuitos eléctricos, símbolos
 - muchos dígitos, 2
 - núcleo atómico, 957, 975
 - potencia de diez, 3, 3t
 - símbolos matemáticos, A.1–A.3, A.19t
 - vectores, 27, 56–57
- Notación científica, 8, A.3–A.4
- Notación matemática, repaso de, A.1–A.3, A.19t
- Núcleo atómico
- decaimiento de, 962 (*Véase también* Radiactividad)
 - densidad de, 959, 959f
 - diámetro, 3t
 - energía de enlace, 960–962, 961f, 976
 - estabilidad de, 959–960, 960f
 - estructura, 4, 4f, 514–515
 - hija, núcleo, 965
 - historia del concepto, 935, 958, 958f
 - padre, 965
 - propiedades, 957–959, 976
 - símbolos para, 957, 976
 - tamaño de, 958–959, 976
- Núcleo hijo, 965
- Nucleones, 957, 959f. *Véase también* Neutrón(es); Protón(es)
- Núcleos padres, 965
- Número atómico (Z), 946t, 947–948, 948f, 957–958, 976
- Número bariónico, conservación de, 992–993, 1004
- Número cuántico de spin magnético (m_s), 943–944, 951
- Número cuántico magnético orbital (m_l), 942, 942t, 945, 951
- Número cuántico orbital (l), 942, 942t, 945, 951
- Número cuántico principal (n), 913, 928, 938–939, 939f, 942, 942t, 945, 951
- Número de Avogadro (N_A), 344, 348, 354, A.20
- Número de base, A.10
- Número de leptones, conservación de, 993–994, 1004
- Número de masa (A), 957–958, 976
- Número de neutrones (N), 957–958
- Número de orden, de la franja, 827, 849
- Número de Reynolds (N_R), 314–315
- Número f
- de la cámara, 860, 877
 - rango, del ojo, 861

- Número leptónico electrónico, la conservación de, 993
- Número leptónico tau, la conservación de, 993
- Números cuánticos
 extrañeza (S), 991*t*, 994
 magnético de espín (m_s), 943–944, 951
 orbital (l), 942, 942*t*, 945, 951
 orbitales magnéticos (m_l), 942, 942*t*, 945, 951
 principal (n), 913, 928, 938–939, 939*f*, 942, 942*t*, 945, 951
 y el principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
- Nylon
 constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- O**
- O'Neill, Gerard, 210
- Objetivo(s). *Véase también* Lentes delgadas
 aberraciones en, 814, 814*f*, 816, 869
 amplificación angular de, 865–866, 877
 del ojo, 860, 861, 861*f*
 recubrimientos no reflejantes, 833
- Objetivo de microscopio, 866–867, 867*f*
- Observatorio de Kitt Peak (Arizona), 513*f*
- Observatorio de Yerkes, 870
- Ocular, de un microscopio, 866–867, 867*f*
- Oersted, Hans Christian, 664, 665*f*, 688
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas, 2, 2*f*
- Ohm (Ω), 596, 608
- Ohm, Jorge Simón, 597, 597*f*
- Oído humano
 anatomía del oído externo y su función, 502–503, 502*f*, 503*f*
 curvas de respuesta de frecuencia, 502, 503*f*
 niveles de intensidad que producen daños, 479
 umbral de dolor, 478–479
 umbral de la audición, 478, 479, 502, 503*f*
- Oído, la anatomía y la función, 502–503, 502*f*–503*f*
- Ojo
 gato, la resolución de, 873
 humano, 860–865, 861*f*
 alojamiento, 861, 862–863
 anatomía, 860–861, 861*f*
 condiciones del, 861–865, 862*f*, 877
 corrección de la visión, 862–864, 862*f*
 formación de la imagen en el, 861
 máscaras de buceo, 802, 808
 ojos rojos en las fotografías, 764
 presión del fluido en el, 176
 sensibilidad de longitud de onda, 749
 visión artificial, 616*f*
 visión bajo el agua, 802
 y gafas de sol de protección UV, 747*f*
 pescado, vista desde debajo del agua, 778–779
- Ojos rojos, en fotografías, 764
- Olas del mar, 437*f*, 457
- Omega (Ω), 991*t*, 995, 996*t*, 997
- Onda(s), 455–463. *Véase también* Ondas de luz y la luz; Ondas de sonido; Cuerda; Ondas
 amplitud de, 458–459, 458*f*, 464
 agua
 interferencia, reflexión y difracción en, 826, 826*f*, 828, 828*f*
 ondas del océano, 437*f*, 457
 amortiguada, 454–455, 455*f*
 como movimiento sinusoidal, 457, 457*f*
 cresta de, 457
 definición de, 456
 depresión de, 457
 esféricas, 481–483, 481*f*, 504
 estacionarias
 en columnas de aire, 495–498, 495*f*, 504
 seiches, 486
 sobre cuerdas, 489–494, 489*f*, 490*f*, 504
 frecuencia de, 458, 464
 imágenes gráficas de, 457, 457*f*
 longitud de onda de, 458–459, 458*f*, 464
 MCAT guía de estudio para, A.37–A.40
 ondas de choque, 486–487, 487*f*
 periodo de, 458–459
 planas, 481, 481*f*, 504
 reflejo de, 462–463, 463*f*, 464
 resonancia, 494–495, 494*f*, 495*f*, 498, 504
 tipos de, 456–457, 456*f*, 457*f*
 transversales, 456, 457*f*, 464
 movimiento de los elementos, 474
Véase también Interferencia en, Interferencia
 longitudinal
 características de, 456, 457*f*, 464
 movimiento de los elementos en, 474
 velocidad en una varilla sólida, 476
 velocidad de la onda, 458–459, 459–461, 464
 viajeras, 456–457, 456*f*, 457*f*, 458, 458*f*
 Ondas de choque, los 486–487, 487*f*
- Ondas de luz y la luz
 aproximación de rayos, 763, 763*f*
 de flexión gravitatoria, 904–905, 904*f*
 difracción. *Véase también* Difracción
 dispersión de, 771–775, 771*f*, 772*f*, 773*f*, 774*f*, 781
 en la teoría cuántica, 914–915, 928
 frentes de onda, 763, 763*f*
 principio de Huygens, 775–777, 775*f*, 776*f*, 781
 fuente coherente de, definición, 825
 incoherencia ordinaria, de, 825
 interferencia. *Véase* Interferencia
 longitud de onda. *Véase* Longitud de onda
 MCAT guía de estudio para, A.41–A.44
 naturaleza de, 743, 752, 761–762, 780, 922–923
 polarización. *Véase* Polarización
 primeras investigaciones sobre, 761–762
 principio de Huygens, 775–777, 775*f*, 776*f*, 781
 reflexión de la, 762–763, 763–765, 763*f*, 764*f*, 780
 ángulo de reflexión, 764, 764*f*, 780
 cambio de fase debido a la, 829–830, 829*f*
 en arcoiris, 774–775 y 774*f*
 por polarización, 845–846, 846*f*
 principio de Huygens y, 775–776, 776*f*
 reflexión interna total, 777–780, 777*f*, 778*f*, 781
 refracción de. *Véase* Refracción
- Ondas de materia, 922–925
 función de onda de, 925–926
- Ondas de presión, 457, 457*f*
- Ondas de radio, 3*t*, 747*f*, 748, 749*f*
- Ondas de sonido, 473–503
 audible, 474, 503
 calidad (timbre) de sonido, 500–501, 501*f*
 características de, 474–476, 503
 categorías de, 474
 como onda longitudinal, 456, 457, 473
 difracción de, 838
 efecto Doppler, 482–487, 483*f*, 504
 esférica, 481–483, 481*f*
 infrasónica, 474, 503
 intensidad (I ; vatios por metro), 478–479, 481, 482, 504
 interferencia, 488–489, 488*f*, 504
 ritmos, 499–500, 499*f*, 504
 MCAT guía de estudio para, A.40–A.41
- nivel de intensidad (decibelios), 479–480, 479*t*, 504
- ondas de choque, 486–487, 487*f*
- OSHA regulaciones de ruido, 480
- periodo típico, 3*t*
- producción de, 473–474, 474*f*
- reflexión de, 475
- ritmos, 499–500, 499*f*, 504
- ultrasónica, 474, 503
 aplicaciones de, 474–476
 producción de, 475
- umbral de audición, 478, 479, 502, 503*f*
- umbral del dolor, 478–479, 503*f*
- velocidad de, 476–478, 476*t*, 504
- Ondas electromagnéticas
 cuantificación de, 915 (*Véase también* Física cuántica)
 efecto Doppler en, 750
 espectro de, 746–749, 747*f*, 753
 efecto Zeeman en el, 942, 942*f*
 frecuencia y la longitud de onda, 747
 impulso de, 743–746, 752
 investigación de Hertz en las, 740–741, 740*f*, 741*f*, 752
 predicciones de Maxwell con respecto a, 75*w*, 739–740
 producción por la antena, 741–742, 741*f*, 742*f*, 743*f*
 propiedades de, 742–746, 752–753
 velocidad de, 742, 747
- Ondas esféricas, 481–483, 481*f*, 504
- Ondas estacionarias
 de cuerdas, 489–494, 489*f*, 490*f*, 504
 en las columnas de aire, 495–498, 495*f*, 504
 seiches, 496
- Ondas infrarrojas, 747*f*, 748
 aplicaciones, 383
- Ondas infrasonicas, 474, 503
- Ondas invertidas, 461, 463*f*
- Ondas longitudinales
 características de, 456, 457*f*, 464
 movimiento de los elementos en, 474
 velocidad en una barra sólida, 476
- Ondas mecánicas, transferencia de energía a través de, 146
- Ondas planas
 de sonido, 481, 481*f*
 electromagnéticas, 742
- Ondas sonoras, 474, 503
- Ondas transversales, 456, 457*f*, 464, 742
 movimiento de los elementos en, 474
- Ondas ultrasónicas, 474, 503
 aplicaciones de, 474–476
 producción de, 475
- Ondas viajeras, 456–457, 456*f*, 457*f*, 458, 458*f*
- Onnes, H. Kamerlingh, 604
- Óptica
 de onda, 824 (*Véase también* Difracción, Interferencia; Polarización)
 geométrica, 824
- Óptica de onda, 824. *Véase también* Difracción; Interferencias; Polarización
- Óptica geométrica, 824
- Órbita geoestacionaria, 223–224
- Origen, del sistema de coordenadas, 14
- Oro (Au)
 calor específico, 365*t*
 calor latente de fusión, 370*t*
 calor latente de vaporización, 370*t*
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 conductividad térmica, 376*t*
 densidad, 279*t*
 resistividad, 598*t*

- Oscilación. *Véase también* Péndulos; Movimiento armónico simple; Onda(s)
 amortiguado, 454–455, 455*f*
 ondas estacionarias
 de cuerdas, 489–494, 489*f*, 490*f*, 504
 en columnas de aire, 495–498, 495*f*, 504
- Osmosis, 316–317
- Óxido nitroso, como gas de efecto invernadero, 386
- Oxígeno (O)
 calor específico molar, 401, 401*t*
 calor latente de fusión, 370*t*
 calor latente de vaporización, 370*t*
 conductividad térmica, 376*t*
 configuración del estado base, 946*t*
 densidad de, 279*t*
 difusión a través de las membranas celulares, 316
 velocidad del sonido en, 476*t*
 velocidad rms, 352, 352*t*
- P**
- Palomas, navegación, búsqueda de objetivos en, 847
- Pantallas de cristal líquido (LCD), 847–849, 848*f*
- Pantallas LCD. *Véase también* Pantallas de cristal líquido
- Papel
 constante dieléctrica, 575*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Paradoja de los gemelos, 894–895, 894*f*
- Pararrayos, 530–531
- Parte frontal
 de la lente delgada, 807, 807*f*
 de la superficie de refracción esférica, 801
 del espejo, definición, 795–796, 796*f*
- Partícula(s). *Véase también* Partículas específicas, antipartículas, 962, 968, 990, 991*t*, 1004
 campo, 989, 990*t*
 cargada
 aceleración, la energía radiada por, 741, 742
 almacenamiento de, 662
 fuerza magnética sobre, 652–655, 675
 movimiento en el campo magnético, 661–664, 662*f*, 675–676
 clasificación de, 990–992, 991*t*, 1004
 De Broglie longitud de onda de, 923–924, 929
 forma óctuple, 995, 995*f*
 función de onda (Ψ), 925–926, 929, 945–946
 fundamental, 989
 hadrones, 990–991, 991*t*, 1004
 leptones, 990, 991*t*, 992, 1004
 leyes de conservación, 992–995, 1004
- Partícula masiva de interacción débil (WIMP), 1001
- Partículas alfa (α), 934–935, 935*f*, 958, 958*f*, 962–963, 962*f*, 965–966
- Partículas beta (β), 962–963 y 962*f*
- Partículas de campo, 989, 990*t*
- Partículas extrañas, 994, 994*f*
- Partículas fundamentales, 989
- Pascal (Pa), 283, 284
- Pascal, Blaise, 290
- Patinaje artístico, momento de inercia y, 257, 258*f*
- Patrón de Laue, 918, 918*f*
- Pauli, Wolfgang, 943, 945, 945*f*, 968
- Peces
 profundidad aparente de, 803–804, 803*f*
 vejiga natatoria de los, 293
 vista desde debajo del agua, 778–779, 778*f*
- Películas. *Véase también* Películas delgadas
- Películas delgadas, la interferencia de las ondas de luz en, 830–834, 830*f*, 831*f*, 849–850
 estrategias para resolver problemas, 832
- Pendiente, 29
 de la gráfica posición-tiempo, 29–30, 30*f*, 31, 31*f*, 47
 de la gráfica velocidad-tiempo, 34, 34*f*, 48
- Péndulo balístico, 178, 178–179
- Péndulos
 aplicaciones, 452–453
 físico, 454, 454*f*
 sencillo, 451–454, 452*f*, 453*f*, 464
- Péndulos físicos, 454, 454*f*
- Penzias, Arno A., 1000, 1000*f*
- Pérdida I^2R , 602
- Periodo (T)
 de un movimiento circular, 445
 de una onda, 458–459
 del movimiento armónico simple, 438, 446–448, 450–451, 463
 del péndulo
 físico, 454
 sencillo, 452, 464
 del planeta, 222
- Periscopios submarinos, 778
- Perlmutter, Saúl, 1001
- Permeabilidad de espacio libre (μ_0), 665, 676, A.20
- Permitividad del espacio libre (ϵ_0), 535, 539, 563, A.20
- Peso, 93, 95, 112
 aceleración y, 103–104, 103*f*
 fuerza de la gravedad y, 87, 93
 metabolismo humano, y, 364, 425–426
- Pic(s), 3
- Pinturas, vistas por rayos X, 918
- Piones (π), 989, 991, 991*t*, 996*t*
- Pista
 longitud de, 40–41
 marcas en, 652
- Planck, Max, 912*f*, 913, 928
- Planetas
 datos planetarios, 223*t*
 periodo de, 222
 velocidad de escape, 220–221, 220*t*
- Plano de coordenadas polares (r, θ), 14, 14*f*
 la conversión a/de coordenadas cartesianas, 15–16
- Plano de la luz polarizada, 843, 843*f*. *Véase también* Polarización
- Plano de polarización, 843
- Plantas de energía
 nuclear (reactores de fisión), 900, 984–985, 985*f*, 1004
 reactores de fusión, 987–988, 1004
 reactores reproductores, 986
- Plasma, 277, 278, 987
- Plasma de iones densidad (n), 987–988, 1004
- Plata (Ag)
 calor específico, 365*t*
 calor latente de fusión, 370*t*
 calor latente de vaporización, 370*t*
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como conductor, 515
 conductividad térmica, 376*t*
 densidad de, 279*t*
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
- Platino (Pt)
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como sustancia paramagnética, 674
 densidad de, 279*t*
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
- Playas, flujo de aire cerca de, 365, 365*f*, 380
- Plomería
 rejillas de ventilación, en función de, 307, 307*f*
 trampas de agua, 307, 307*f*
 tuberías congeladas, estallido de, 343
- Plomo (Pb)
 calor específico, 365*t*
 calor latente de fusión, 370*t*
 calor latente de vaporización, 370*t*
 coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 como superconductor, 604, 604*t*
 conductividad térmica, 376*t*
 densidad, 279*t*
 función de trabajo, 915*t*
 resistividad, 598*t*
 velocidad del sonido en, 476*t*
- Plushenko, Evgeni, 258*f*
- Plutón
 datos planetarios, 223*t*
 velocidad de escapar, 220*t*
- Poder de resolución, de una red de difracción, 875, 878
- Poise (unidad), 313
- Poiseuille, J.L., 313
- Polarización
 de carga eléctrica, 516
 de moléculas, en un dieléctrico, 578, 578*f*
 de ondas luminosas, 842–849, 850
 aplicaciones, 847–849, 848*f*
 intensidad del haz polarizado, 844–845, 844*f*, 850
 por absorción selectiva, 843–845, 843*f*, 844*f*
 por dispersión, 846–847, 846*f*
 por reflexión, 845–846, 846*f*
 sustancias ópticamente activas, 847, 848*f*
- Polarización inducida, de moléculas, en dieléctrico, 578, 578*f*
- Polarizador, 843–844, 843*f*, 844*f*
- Polaroid, 843
- Poliestireno
 constante dieléctrica, 575*t*
 índice de refracción, 767*t*
 rigidez dieléctrica, 575*t*
- Polo Norte
 de la Tierra, 650–651, 651*f*
 de un imán, 648–649
- Polo Sur
 de la Tierra, 650–651, 651*f*
 de un imán, 648–649
- Polonio (Po), 962, 962*f*
- Polos, de un imán, 648–649
- Polución
 aire, eliminación de, 560–561, 561*f*
 ruido, 479
- Portadores de carga
 definición de, 592
 vista microscópica de, 593–595, 593*f*, 608
 y resistencia, 596–597
- Posición angular (θ), 199, 199*f*
- Posición. *Véase también* Desplazamiento en movimiento armónico simple, como función del tiempo, 449–451, 449*f*, 463
- Positrón(es) (e^+), 962, 968, 977, 987, 990
- Postes y vigas de construcción, 287, 287*f*
- Potasio (K)
 configuración del estado base, 946*t*
 iones, en función de las neuronas, 636–637
- Potencia (P), 147–152, 155
 de la lente, en dioptrías, 863, 877
 en salto vertical, 151–152
 entregado a la resistencia/dispositivo, 602–604, 609
 entregado al elemento de circuito, 591–592
 fem de salida total de la fuente, 617
 generada por la actividad atlética, 152, 152*t*
 humana de salida, 150–152, 152*t*

- instantánea, 147–148
promedio (\bar{P}), 147
entregada en un circuito *RLC* en serie, 734–735, 752
unidades comerciales de (kilowatt-hora), 148, 602–604
unidades SI de, 147–148, 602, A.21
- Potencia instantánea (P), 147–148
Potencia promedio (\bar{P}), 147
entregada en un circuito *RLC* en serie, 734–735, 752
- Potencial eléctrico (voltaje, V)
aplicaciones, 560–562
debido a las cargas puntuales, 555–558, 555*f*, 556*f*, 580
diferencia en (ΔV)
definición de, 552–553, 579
en el campo eléctrico uniforme, 579
en comparación con el flujo de agua, 596
en conductores cargados, 558–559 y 559*f*
en conductores que transportan corriente, 592
estrategias de resolución de problemas, 556
ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
medición de, 595–596, 595*f*
principio de superposición, 555–558, 555*f*
regla de circuito, 625–629, 626*f*, 638
superficies equipotenciales, 559–560, 560*f*, 580
voltaje rms, 725–726, 750–751
- Potenciales de acción, 635–637, 637*f*
- Potencias de diez
notación para, 3, 3*t*
reglas para, A.6
- Precipitadores electrostáticos, 560–561, 561*f*
- Prefijos, unidades métricas, 3, 3*t*
- Premio Nobel, 318, 532, 604, 902, 915, 920, 921*f*, 923*f*, 926*f*, 935*f*, 945*f*, 958*f*, 959*f*, 962*f*, 969*f*, 989*f*, 991*f*, 995*f*
- Presbicia, 862–863
- Presión (P), 280–281, 280*f*, 319
absoluta, 292
atmosférica, 280, 289
calibre, 292
de fluido
ecuación de Bernoulli, 302–305, 302*f*, 303*f*
aplicaciones, 303–308
ley de Poiseuille, 313–314, 313*f*
principio de Pascal, 290–291, 319
profundidad y, 288, 288*f*, 289*f*, 292, 319
y la fuerza de flotación, 294, 294*f*
de un gas
ley del gas ideal, 345, 348
modelo molecular de, 349–351, 349*f*
medición de, 292–293, 292*f*
medición de la presión arterial, 293, 293*f*
unidades de, 280, A.21
y volumen comprimido, 284
- Presión absoluta, 292
Presión atmosférica, 280, 289, A.19*t*
Presión de radiación, de la luz, 743–744
Presión diastólica, 293
Presión manométrica, 292
Presión sistólica, 293
- Primer armónico (frecuencia fundamental), 490*f*, 491–494, 495*f*, 496, 497–498
Primer armónico (segundo armónico), 490*f*, 491–494, 495*f*, 496, 497–498
- Primer orden máximo, 827, 840
- Primera ley de la termodinámica, 395, 398–401, 399*f*, 427
en los procesos adiabáticos, 404–406, 410*t*
en los procesos generales, 408–409, 410*t*
en los procesos isobáricos, 402–404, 410*t*
en los procesos isotérmicos, 407–408, 410*t*
en los procesos isovolumétricos, 406–407, 410*t*
para máquinas térmicas, 410
y el metabolismo humano, 424
- Primera ley del movimiento (Newton), 86, 88–89, 88*f*, 89*f*, 112
analogía de rotación de, 237
- Principio de Arquímedes, 293–299, 294*f*, 295*f*, 319
- Principio de correspondencia (Bohr), 941, 951
- Principio de equivalencia (en la relatividad general), 904
- Principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
- Principio de Huygens, 775–777, 775*f*, 776*f*, 781
- Principio de incertidumbre, 926–928, 926*f*, 929
- Principio de Pascal, 290–291, 319
- Principio de superposición, 461–462, 461*f*, 462*f*, 463*f*, 464, 489
de fuerza eléctrica, 519–522
para el campo eléctrico, 523, 525–526
para el potencial eléctrico, 555–558, 555*f*
- Prismas, 771–774, 771*f*, 772*f*, 781
espectrómetro de prisma, 772, 772*f*
redirección de la luz con, 778, 778*f*
- Probabilidad, función de onda (Ψ) y, 925–926, 929, 945–946
- Problema de la planitud, 1002, 1003
- Problema del horizonte, 1002, 1003
- Problema del monopolio, 1002–1003
- Proceso irreversible, 415–416
- Proceso reversible, definición, 415–416
- Procesos adiabáticos, 402, 404–406, 410*t*, 427
diagramas *PV*, 404, 405–406, 405*f*
trabajo realizado sobre el gas en, 404–406, 427
- Procesos cíclicos, en máquinas térmicas, 410, 411–413, 427
- Procesos isobáricos, 402–404, 410*t*, 427
definición de, 397
diagrama de *PV*, 397, 397*f*, 402
trabajo realizado por/sobre el gas en, 395–398, 402–404, 427
- Procesos isocóricos. *Véase también* Procesos isovolumétricos
- Procesos isotérmicos, 402, 407–408, 409*f*, 410*t*, 427
diagramas *PV* para, 407, 407*f*
trabajo realizado en la, 407–408, 427
- Procesos isovolumétricos, 402, 406–407, 410*t*, 427
trabajo realizado en la, 406–407, 427
- Procesos termodinámicos generales, 408–409, 410*t*
diagramas *PV*, 408–409, 408*f*
trabajo realizado en, 408–409
- Procesos termodinámicos, 401–410. *Véase también* Procesos adiabáticos; Procesos termodinámicos; procesos isobáricos; Procesos isotérmicos; Procesos isovolumétricos
tipos de, 402, 427
trabajar en, 395–398, 427
- Profundidad de campo, de la cámara, 860
- Proporcionalidad (\propto), A.1, A.19*t*
- Proteínas, la estructura, la determinación de, 919
- Protón(es), 4
como bariones, 991, 991*t*
de carga, 514, 515, 518, 518*t*, 958
diámetro de, 3*t*, 4
en la estructura atómica, 514–515, 957–958
estructura de, 4, 4*f*
masa, 518*t*, 958, 958*t*, A.20
número de, en gramo de materia, 514
quark composición, 996*t*
vida media de, 992, 999
- Ptolomeo, Claudio, 25, 221
- Puente de conexión, 619, 619*f*
- Puente Tacoma Narrows, 494, 495*f*
- Pulmones, tensión superficial de fluidos en, 309
- Púlsares, 258*f*
- Pulso(s), 499–500, 499*f*, 504
- Punto cercano, alojamiento de los ojos, 861
- Punto de congelación, 333, 334, 335, 336*f*
- Punto de ebullición, 333, 334, 335, 336*f*
- Punto de la imagen de espejo esférico, 793–794, 793*f*, 794*f*
- Punto de origen, ondas sonoras de, 481, 481*f*, 482
- Punto de ruptura, 283, 283*f*
- Punto focal (f)
de espejo cóncavo, 795
de la lente delgada, 805–806, 805*f*, 806*f*
- Punto lejano, del alojamiento de los ojos, 861
- Punto mágico, proceso, 296, 296*f*
- Punto triple del agua, 335
- Pupila, 860, 861*f*
- Purkinje, fibras, 605*f*, 606
- ## Q
- Quark bottom (b), 4, 996, 996*t*
- Quark down (d), 4–5, 996, 996*t*
- Quark encantado (c), 4, 996, 996*t*
- Quark extraño (s), 4, 996, 996*t*
- Quark top (t), 4, 996, 996*t*
- Quark up (u), 4–5, 996, 996*t*
- Quarks, 4–5, 4*f*, 515, 989, 990, 991, 995–997, 996*t*, 1003, 1004
- ## R
- Radiación. *Véase también* Radiación electromagnética; Radiactividad; Radiación térmica
- Radiación de cuerpo negro y la teoría cuántica, 911–913, 912*f*, 913*f*, 928
- Radiación de microondas de fondo, 1000, 1000*f*, 1004
- Radiación electromagnética, la transferencia de energía a través de, 146
- Radiación térmica, 381–384, 381*f*, 382*f*, 383*f*, 387 y la teoría cuántica, 910–913, 912*f*, 913*f*, 928
- Radiación ultravioleta (UV), 747*f*, 748
- Radiactividad, 962–971, 976
aplicaciones de, 969–970, 973–976, 976*f*, 990 artificial, 971
constante de desintegración, 963–964, 976
daño de la radiación, 973–975, 974*t*
descubrimiento de, 962, 962*f*
desintegración alfa (α), 962–963, 962*f*, 965–967, 976, 977
desintegración beta (β), 962–963, 962*f*, 967–968, 968*f*, 976, 977
desintegración espontánea (transmutación), 966
desintegración gamma (γ), 962–963, 962*f*, 968–969, 976, 977
límites de exposición, 974–975
natural, 971, 971*f*, 971*t*
natural de fondo, 974
tasa de desintegración (actividad), 963–965, 963*f*, 976
unidades de, 964
vida media ($T_{1/2}$), 963–965, 966, 976 de elementos seleccionados, A.14–A.18
- Radiactividad artificial, 971
- Radiactividad natural, 971, 971*f*, 971*t*
- Radián (rad), 198–199, 199*f*
conversión a/de grados, 199
- Radio
antenas de transmisión, 741
sintonización del circuito de, 736
- Radio (Ra)
descubrimiento de, 962, 962*f*
desintegración radiactiva de, 964–965, 966, 966*f*
serie radiactiva, 971, 971*f*

- Radio de Bohr (a_0), 938, 938*f*, A.20
- Radio de curvatura (R), de espejo esférica, 793, 793*f*
- Radio de Schwarzschild, 905
- Radiotelescopio de Arecibo, 723*f*
- Radiotelescopios, 723*f*, 874
- Raíz cuadrada media (RMS) de velocidad, de los gases, 352, 352*t*, 355
- Raíz cuadrada media (RMS) de voltaje, 725–726, 750–751
- Raíz cuadrada media (RMS) en curso, 724–726, 750–751
- Rankine, escala, 335
- Rapidez de onda (v), 458–459, 476
en la cuerda, 459–461, 464
- Raquetas de nieve, 280, 280*f*
- Rarefacción, en las ondas sonoras, 473–474, 474*f*
- Rayo, 513*f*
automóviles, la seguridad de los ocupantes de, 531
desviación por el campo magnético de la Tierra, 657
trueno producido por, 477
- Rayo(s), de onda esférica, 481, 481*f*
- Rayos X
aplicaciones, 749, 749*f*, 918
característica, 947–948, 947*f*, 951
corrimiento Compton, 920–922, 921*f*, 928–929
daños en el tejido de, 974, 974*t*
descubrimiento de, 916
difracción por los cristales, 917, 917*f*, 918–920, 918*f*, 919*f*, 928
en el espectro electromagnético, 747*f*, 748
espectro emitido por el tubo de rayos X, 916–918, 917*f*, 928
- Rayos X característicos, 917*f*, 947–948, 947*f*, 951
- Reacción en cadena auto-sostenida, 984–985, 985*f*
- Reacción en cadena, energía nuclear, 985, 985*f*
- Reacciones nucleares, 971–973, 977
endotérmica, 973, 977
exotérmica, 972, 977
fisión, 900, 902–903, 982–986, 983*f*, 1004
fusión, 986–988, 1004
umbral de energía, 973, 977
valores Q , 972–973, 977
- Reacciones nucleares endotérmicas, 973, 977
- Reacciones nucleares exotérmicas, 972, 977
- Reacciones termonucleares de fusión, 987
- Reactancia capacitiva (X_C), 727–728, 751
- Reactancia inductiva (X_L), 728–729, 751
- Reactores (de fisión) nuclear, 900, 984–986, 985*f*, 1004
- Reactores de fusión, 987–988, 1004
- Reactores reproductores, 986
- Reconstrucción de accidentes, 145
- Recubrimientos no reflejante, 833
- Redondeo, 8, 10
- Reflectores ideales, 382
- Reflexión
de la luz, 762–763, 763–765, 763*f*, 764*f*, 780
ángulo de reflexión, 764, 764*f*, 780
cambio de fase debido a la, 829–830, 829*f*
de las ondas, 462–463, 463*f*, 464
de las ondas de sonido, 475
en arcoiris, 774–775, 774*f*
por la polarización, 845–846, 846*f*
principio de Huygens y, 775–776, 776*f*
reflexión interna total, 777–780, 777*f*, 778*f*, 781
- Reflexión difusa, 763–764, 763*f*, 764*f*
- Reflexión especular, 763–764, 763*f*, 764*f*
- Reflexión total interna, 777–780, 777*f*, 778*f*, 781
- Refracción de la luz, 762–763, 765–771, 766*f*, 767*f*, 768*f*, 780
ángulo de refracción, 765–766, 766*f*, 780
atmosférica, 804–805, 804*f*
dispersión, 771–775, 771*f*, 772*f*, 773*f*, 774*f*, 781
en lentes delgadas, 805
frecuencia y longitud de onda en, 767–768, 767*f*, 768*f*
imágenes formadas por
convención de signos, 800, 801*t*
superficie esférica, 801–802, 801*f*, 815–816
superficie plana, 801, 801*f*, 803–804, 803*f*
índice de refracción, 766–767, 767*t*, 769, 771, 771*f*, 780–781
ley de Snell, 767–771, 776, 776*f*, 781
principio de Huygens y, 775–776, 776*f*
- Refrigeradores, 412–415, 414*f*, 428
- Regla de la malla, 625–629, 626*f*, 638
- Regla de la mano derecha
para el campo magnético (regla número 2 de la mano derecha), 665, 665*f*, 692–695
para el momento magnético, 659
para el torque, 238–239, 238*f*
para la fuerza magnética (regla número 1 de la mano derecha), 653–654, 653*f*, 657, 675
para la propagación de ondas electromagnéticas, 742
para la velocidad angular, 209, 209*f*
- Regla de los nodos, 625–629, 626*f*, 638
- Reglas de Kirchhoff, 625–629, 626*f*, 638
estrategias para resolver problemas, 626–627
- Regulaciones de ruido de la OSHA, 480
- Rejillas de difracción, 839–842, 839*f*, 840*f*, 850
resolución de, 874–875, 878
- Relación área superficial-volumen, de las células, 316
- Relatividad
especial, 888*f*
contracción de la longitud, 895–896, 895*f*, 905
dilatación del tiempo en el, 890–895, 891*f*, 894*f*, 905
energía cinética, expresión relativista para, 899–900, 901, 906
energía en reposo, 899, 905
conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
de electrones, 901
energía total, 899–900, 901, 906
y el impulso relativista, 900–901, 906
impulso, relativista
expresión para, 897, 905
y la energía total, 900–901, 906
paradoja de los gemelos, 894–895, 894*f*
postulados de la, 888–889, 905
relatividad del tiempo en, 889–890, 890*f*
velocidad relativa en, 898–899, 905
galileana, 885–886, 886*f*
general, 888*f*, 903–905, 903*f*, 904*f*, 1001–1002
- Relatividad especial, 888*f*
contracción de la longitud, 895–896, 895*f*, 905
dilatación del tiempo en el, 890–895, 891*f*, 894*f*, 905
energía cinética, la expresión relativista para, 899–900, 901, 906
energía en reposo, 899, 905
conversión de unidades de masa atómica de/a, 901
de electrones, 901
energía total, 899–900, 901, 906
y el impulso relativista, 900–901, 906
impulso, relativista
expresión para, 897, 905
y la energía total, 900–901, 906
- paradoja de los gemelos, 894–895, 894*f*
postulados de la, 888–889, 905
relatividad del tiempo en, 889–890, 890*f*
relatividad galileana, 885–886, 886*f*
Relatividad general, 888*f*, 903–905, 903*f*, 904*f*, 1001–1002
- Reloj atómico de cesio, 2, 2*f*
- Relojes
atómico, 2, 2*f*, 905
péndulo, 452–453
- Resistencia (R)
carga, 617
definición de, 596–597, 608
equivalente
para resistencias en paralelo, 620–622, 624–625
para resistencias en serie, 617–620, 618*f*, 624–625, 638
estrategias para resolver problemas, 624
ley de Ohm, 597, 608, 726, 751
materiales óhmicos y no óhmicos, 597, 597*f*
propiedades conductoras y, 597–599, 608
superconductores y, 604–605, 604*f*, 604*t*, 605*f*
unidades SI de, 596, 608, A.21
variación de la temperatura, 599–601, 609
vista microscópica de, 596–597
- Resistencia(s), 597*f*
circuito de símbolo para, 565, 565*f*, 597
definición de, 597
en circuitos de CA, 723–727, 724*f*, 725*f*, 750–751
ángulo de fase, 732*t*
impedancia, 732*t*
RC circuitos, 732*t*
RL circuitos, 732*t*
RLC serie de circuitos, 730–734, 730*f*, 731*f*, 732*t*, 751
en circuitos de CD
en paralelo, 620–625, 621*f*, 638
en serie, 617–620, 618*f*, 638
estrategias para resolver problemas, 624
potencia suministrada a, 602–604, 609
RC circuitos, 629–633, 629*f*, 638
RL circuitos, 707–710, 708*f*, 712–713
- Resistencia a la compresión, de materiales seleccionados, 285*t*
- Resistencia a la rotura, 283, 285*t*, 287–288
- Resistencia a la tensión, de materiales seleccionados, 285*t*
- Resistencia del aire
en caída libre, 111–112, 112*f*, 317–318
en las alas de un avión, 306, 306*f*
en un vehículo en movimiento, 111, 111*f*
terminal de velocidad, 112, 318
- Resistividad (ρ), 597–599, 598*t*, 608
- Resistividad eléctrica, 597
- Resolución, 871–875, 878
de abertura de una sola rendija, 871–872, 871*f*, 872*f*, 878
de apertura circular, 872, 872*f*, 878
de rejilla de difracción, 874–875, 878
- Resolución apertura de una rendija, 871–872, 871*f*, 872*f*, 878
- Resonadores, en la radiación de cuerpo negro, 913
- Resonancia, 494–495, 494*f*, 495*f*, 498, 504
en circuitos RLC en serie, 735–737, 735*f*, 752
- Resonancia estructural, 494, 495*f*
- Resonancia magnética nuclear, 975
energía nuclear, 975

- Resorte(s)
energía potencial elástica, 140–145, 140*f*, 155, 441–445, 441*f*, 463
ecuación para, 441
teorema trabajo-energía y, 141–143, 155
y la conservación de la energía mecánica, 140–145
fuerza de recuperación de, 140, 438
ley de Hooke, 140, 437–441, 438*f*, 463
ondas longitudinales en, 456, 457*f*
trabajo realizado por, 141–143
trabajo requerido para estirar, 153–154, 153*f*
- Restauración de la fuerza
de resorte, 140, 438
del péndulo, 451–452
- Retina, 861, 861*f*
- Retroceso, 174
- Retroreflexión, 764
- Riess, Adam, 1001
- Rigidez dieléctrica, 574, 575*t*
- Riñón(es)
artificial, 317, 317*f*
diálisis, 317, 317*f*, 657
funciones de, 317, 317*f*
- Riñones artificiales, 317, 317*f*
- Roentgen (R), 973
- Röntgen, Wilhelm, 916
- Ruptura de la simetría, 998
- Ruptura dieléctrica, 548*f*, 574, 574*f*
- Russell, John Scott, 457
- Rutherford, Ernest, 934–935, 935*f*, 958–959, 958*f*, 969, 971
- S**
- Sangre
en la difusión de oxígeno, 316
limpieza de los riñones, 317, 317*f*
presión, medición de, 293, 293*f*
velocidad, medición de, 475
viscosidad de, 313*t*, 314
- Satélites
aislamiento térmico de, 384–385
altitud, típica, 3*t*
de telecomunicaciones, 223–224
órbita geoestacionaria, 223–224
- Saturno
datos planetarios, 223*t*
velocidad de escape, 220*t*
- Schmidt, Brian, 1001
- Schmitt, Harrison, 93*f*
- Schrödinger, Erwin, 925, 925*f*, 941
- Schwinger, Julián S., 989*f*
- Scott, David, 43
- Sedimentación, 318–319
- Segunda ley de la termodinámica, 395, 415–416, 428
y eficiencia de la máquina de calor, 415
y entropía, 419, 422, 428
- Segunda ley del movimiento (Newton), 86, 89–92, 90*f*, 112
aplicaciones de, 98–105, 109–111, 113
cantidad de movimiento y, 168
estrategias de resolución de problemas, 99, 112
fuerzas de fricción y, 107–111
objetos de aceleración y, 101–105
objetos de equilibrio y, 99–101, 99*f*, 113
rotación análoga, 248, 252–253, 257
y la fuerza centrípeta, 210, 211–213
- Segundo (unidad), 2, 2*f*
- Segundo armónico (primer armónico), 490*f*, 491–494, 495*f*, 496, 497–498
- Segundo armónico (tercer armónico), 490*f*, 491–494, 495*f*, 496, 497–498
- Seguridad eléctrica, 634–635, 635*f*
- Seguridad, electricidad, 634–635, 635*f*
- Seiches, 496
- Selenio (Se)
configuración del estado base, 946*t*
fotoconductividad de, 561, 562*f*
- Semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), 859, 860*f*
- Semiconductores
coeficiente de temperatura de la resistividad, 600
propiedades, 515
- Seno (sen), 15, 15*f*
- Serie armónica, 491
- Serie de Balmer, 936, 936*f*, 939–940, 939*f*, 951
- Serie de Lyman, 936, 939*f*, 951
- Serie de Paschen, 936, 939*f*, 951
- SIDS. Véase Síndrome de muerte súbita del lactante
- Sigma (Σ), 991*t*, 996*t*
- Signo igual (=), A.1, A.19*t*
- Silicio (Si)
calor específico de, 365*t*
coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
como semiconductores, 515
configuración del estado base, 946*t*
resistividad, 598*t*
- Símbolos de los elementos del circuito. Véase también Circuitos eléctricos, símbolos
- Simultaneidad, la relatividad especial y, 889–890, 890*f*
- Síndrome de muerte súbita infantil (SIDS), apnea monitor para, 697, 697*f*
- Singularidades, 905
- Sinusal (SA), nodo, 605–606, 605*f*
- Sistema(s), 132
en la conservación de la cantidad de movimiento lineal, 173–174
energía potencial de, 132
transferencia de energía desde/hasta, 146, 395, 398–399
- sistema cgs (gaussiano). Véase también Sistema de unidades de Gauss (cgs)
- Sistema circulatorio
y el número de Reynolds, 315
y la ley de Poiseuille, 314
- Sistema de coordenadas cartesianas, 14, 14*f*, 19
conversión a/desde las coordenadas polares, 15–16
- Sistema de coordenadas rectangulares. Véase también Sistema cartesiano de coordenadas
- Sistema de sonido, altavoces, 657, 657*f*
- Sistema nervioso, conducción de la señal eléctrica en, 635–637, 636*f*, 637*f*
- Sistema solar. Véase también Planetas, planetas específicos
asteroides, mapa de, 147*f*
modelo geocéntrico, 25, 221
modelo heliocéntrico, 25–26, 221
polvo en, tamaño de, 744
- Sistemas de coordenadas, 14, 14*f*, 19. Véase también Marcos de referencia
selección de
componentes del vector y, 59, 59*f*
en los problemas de la segunda ley de Newton, 98, 98*f*
gravitacionales en los problemas potenciales de energía, 134*f*
- Snell, Willebrord, 768
- Sobreamortiguado, 455, 455*f*
- Soddy, Frederick, 969
- Sodio (Na)
configuración del estado base, 946*t*
función de trabajo, 915*t*
iones, en función de las neuronas, 637
- Sol
atmósfera, identificación de los gases en, 936
como cuerpo negro, 381
datos sobre, 223*t*
distancia a la Tierra desde, A.19*t*
formación del, 219
fuerza de la gravedad del, 93, 94
fusión en, 986–987
masa de, 3*t*, 223, 223*t*, A.19*t*
polarización de la luz a partir de, 846
producción de energía en, 900
radiación electromagnética de, 381
y el ojo humano, la sensibilidad de longitud de onda de, 749
- Solenoides (electromagnético)
aplicaciones de, 671, 671*f*
campo magnético de, 670–673, 670*f*, 671*f*, 673*f*, 674, 676
inductancia de, 705–707, 712
- Sólidos
amorfos, 278, 278*f*
características de, 277–278, 278*f*
cristalinos, 278, 278*f*
difracción de rayos X por, 917, 917*f*, 918–920, 918*f*, 919*f*, 928
deformación de, 282–288, 319
densidad de, 279, 279*t*
elasticidad de
forma, 283–284, 284*f*, 285–286
longitud, 282–283, 282*f*, 285
volumen, 284, 284*f*, 286–287
expansión térmica de, 337–341, 337*f*, 340*f*, 354
velocidad del sonido en, 476–477, 476*t*
- Sólidos amorfos, 278, 278*f*
- Sólidos cristalinos, 278, 278*f*
difracción de rayos X por, 917, 917*f*, 918–920, 918*f*, 919*f*, 928
- Solitones, 457
- Sólo la imagen resuelta, 871, 872*f*, 878
- Soluciones intravenosas, y el equilibrio osmótico, 317
- Spin, del electrón, 673, 673*f*, 943–944, 943*f*
- Stokes, George, 317–318
- Stonehenge, 1*f*
- Subamortiguado, 455, 455*f*
- Subcapas, atómicas, 942, 942*t*
nivel de energía de hidrógeno, 938–939, 939*f*
principio de exclusión de Pauli, 945–946, 945*t*, 951
- Sublimación, 370
- Suma
cifras significativas, 8–9, 19
de fracciones, A.5
de vectores
algebraica, 60–62, 75
geométrica (método del triángulo), 57, 57*f*, 58, 75
- Suma (Σ), A.2, A.19*t*
- Sumeria, la antigua, estudio de la astronomía en, 25
- Superconductores, 604–605, 604*f*, 604*t*, 605*f*
- Superficie cerrada, definición de, 533
- Superficie esférica, las imágenes formadas por refracción en, 801–802, 801*f*, 801*t*, 802–803, 815–816
- Superficie plana, imágenes formadas por la refracción de, 801, 801*f*, 803–804, 803*f*
- Superficie, de líquido, 310–311, 310*f*
- Superficies equipotenciales, 559–560, 560*f*, 580
- Supernovas, 258, 258*f*
- Sustancias ferromagnéticas, 673, 674, 674*f*
- Sustancias paramagnéticas, 674

- Sustracción
cifras significativas en, 8–9, 19
de fracciones, A.5
de vectores, 57, 57f
- T**
- Tabla periódica, 344, 946–947, 951
Tangente (tan), 15, 15f
Taquicardia, 607, 608t
Tasa de decaimiento (actividad, R), 963–965, 963f, 976
Tasa de difusión, 316
Tasa de sedimentación, 319
Tasa metabólica basal, 425
Tau (τ^-), 991t, 992
Teclas de la computadora, condensadores de, 564, 564f
Tecnología de visión nocturna, 383
Teflón
constante dieléctrica, 575t
rigidez dieléctrica, 575t
Telescopio espacial Hubble, 750, 869f, 870–871, 870f
Telescopio Hale, 870f, 874
Telescopios, 868–871, 878
ampliación angular de, 869, 878
de reflexión, 868–871, 870f
de refracción, 868–869, 869f
espacio y polvo, 874
espejos parabólicos en, 814
radio, 874
resolución de, 874 (*Véase también* Resolución)
telescopio espacial Hubble, 750, 869f, 870–871, 870f, 874
telescopio Hale, 870f, 874
telescopios Keck, 870
Telescopios de reflexión, 868–871, 870f
Telescopios de refracción, 868–869, 869f
Telescopios Keck, 859f, 870
Televisión
interferencia, desde aviones que pasan, 828
tubo de imagen, 671, 671f
Temperatura (T). *Véanse también entradas en* Térmica
absoluta, 334–335, 335f
cero absoluto, 334, 335, 335f
de un fluido
y la tensión superficial, 309, 309t
y la viscosidad, 313t
de un gas
en la ley del gas ideal, 345, 348
modelo molecular de, 351–354
definición de, 332–333
ecuaciones para, uso de la escala Kelvin en, 368
equilibrio, cálculo de, 368–369
escala Celsius, 333, 335, 336f, 354
conversión a/de la escala Fahrenheit, 335–336
conversión a/de la escala Kelvin, 334, 335
escala Fahrenheit, 335, 336f, 354
conversión a/de la escala Celsius, 335–336
conversión de/a escala Kelvin, 336
escala Kelvin, 334–335, 335f, 336f, 354
conversión a/de la escala Celsius, 334, 335
conversión a/desde la escala Fahrenheit, 336
escala Rankine, 335
medición de, 332, 333–337, 354, 600
moderación de los cuerpos de agua cercanos, 365
y la velocidad del sonido, 477, 504
y resistencia eléctrica, 599–601, 609
Temperatura absoluta, 334–335, 335f
Temperatura crítica, de superconductor, 604, 604f, 604t
Temperatura de equilibrio, cálculo del, 368–369
Temperatura y presión estándar (STP), 345
Tensión, 282, 319
cizalla, 284, 284f
tracción, 283, 285
volumen, 284, 286–287
Tensión (T), 98, 98f
Tensión superficial (γ), 308–310, 308f, 309t
y la acción capilar, 311–312, 311f, 312f
Teorema de Carnot, 416
Teorema de Pitágoras, 15
Teorema Impulso-momento, 168–169, 187
Teorema Trabajo-energía, 129–130, 154
con el componente de energía potencial gravitacional, 133–134, 155
con la energía potencial gravitacional y componentes elásticos, 141–143, 155
de fuerzas conservadoras y no conservadoras, 132, 138–140, 145, 155
estrategias de resolución de problemas para, 154
para el movimiento rotatorio con no conservativo fuerzas, 254, 255–256, 262
Teoría cinética de los gases, 348–354, 354–355
Teoría de cuerdas, 1003
Teoría de la Quinta esencia, 1003
Teoría del Big Bang, 999–1000, 999f, 1002, 1004
Teoría del campo unificado, 888f. *Véase también* Teoría de la gran unificación
Teoría electrodébil, 997–998
Teoría electromagnética, los conflictos con la relatividad galileana, 886–887
Teoría física, definición de, 1
Terapia de campo eléctrico para el cáncer, 726–727
Tercer armónico (segundo armónico), 490f, 491–494, 495f, 496, 497–498
Tercera ley de la termodinámica, 417, 428
Tercera ley de movimiento (Newton), 86, 95–98, 96f, 112
Térmicas, 365
Termoclinas, 381, 381f
Termodinámica, 362. *Véase también* Calor
ley de cero, 332–333, 332f, 354
primera ley de, 395, 398–401, 399f, 427
en procesos adiabáticos, 404–406, 410t
en procesos generales, 408–409, 410t
en procesos isobáricos, 402–404, 410t
en procesos isotérmicos, 407–408, 410t
en procesos isovolumétricos, 406–407, 410t
para motores térmicos, 410
y el metabolismo humano, 424
segunda ley de, 395, 415–416, 428
y eficiencia de la máquina de calor, 415
y entropía, 419, 422, 428
tercera ley de, 417, 428
Termografía, 383
Termogramas, 382f, 383, 383f
Termómetro de mercurio, 333, 333f
Termómetros, 333–335, 354
de alcohol, 333
de mercurio, 333, 333f
de radiación, 383, 383f
de resistencia, 600
de volumen constante de gas, 334–335, 334f
Termos, 384–385, 384f
Termostatos, tiras bimetalicas en, 339, 340f
Terremoto de Loma Prieta, 494–495
Terremotos, las frecuencias de resonancia y, 494–495
Tesla (T), 653, 675
conversión a/de Gauss, 652
Tesla, Nikola, 732f
Tetracloruro de carbono, índice de refracción, 767t
The New York Times, 185, 307–308
Thomson, Joseph John, 934–935, 935f
Tiempo (t)
adecuado, 892, 905
dimensión de, 5
dirección de la entropía y, 422–423
en la relatividad especial
dilatación de, 890–895, 891f, 894f, 905
relatividad de los intervalos de tiempo, 889–890, 890f
en la relatividad general, 904, 905
la gravedad y, 904, 905
unidades de, 2, 2f, 3, 18, A.21
valores de la muestra de, 3, 3t
Tiempo adecuado, 892, 905
Tiempo de confinamiento de plasma (t), 987–988, 1004
Tierra, eléctrica
definición, 516
símbolo de, 601, 601f
Tierra. *Véase también* Atmósfera
campo magnético de, 650–652, 651f, 653, 657–658, 690
como depósito de electrones, 516
datos planetarios, 223t
distancia a la Luna desde, A.19t
distancia al Sol desde la, A.19t
edad de, 3t
la vida en, y agua, 343
masa de, 3t, A.19t
radio de, 3t, A.19t
velocidad de escape, 220, 220t
Tierras raras, 649
Timbre (calidad) de sonido, 500–501, 500f
Timina, 920
Tímpano (membrana timpánica), 502, 502f
Tímpano (tímpano), 502, 502f
Tiras bimetalicas, 339, 340f
Titanato de estroncio
constante dieléctrica, 575t
rigidez dieléctrica, 575t
Titanio (Ti), configuración del estado fundamental, 946t
Tokamaks, 671, 671f, 988, 988f
Tomografía por emisión de positrones (PET), 990
Tomonaga, Shinichiro, 989f
Tóner, en la xerografía, 562, 562f
Tonómetro, 176
Torio (Th), serie radiactiva, 971, 971t
Torque ($\vec{\tau}$), 236–239, 236f, 238f, 261
a partir de la gravedad, 240–241
condiciones de equilibrio, 240–241, 261
definición
general, 237–238
para las fuerzas perpendiculares, 236
dirección de
positiva y negativa, 236
regla de la mano derecha, 238–239, 238f
eje de rotación, la selección de, 238
en la rotación de objetos, 248–249
lazo de corriente en el campo magnético, 658–661, 659f, 675
punto de aplicación de, 236, 236f
y aceleración angular, 247–249, 261
y momento angular, 257, 262
Torricelli, Evangelista, 292
Trabajo (W), 124–129, 154
cambio de energía mecánica y, 145, 155
definición de, 125
definición intuitiva de, 125

- en la primera ley de la termodinámica, 399–400
- en procesos adiabáticos, 404–406, 427
- en procesos termodinámicos, 395–398, 427
- en un diagrama PV , 397–398
- estrategias de resolución de problemas para, 154
- fuerzas disipativas y, 128–129
- gravitacional, 133–134, 133*f*, 155, 218–219
- MCAT guía de estudio para, A.32–A.35
- mediante la variación de la fuerza, 152–154, 152*t*
- para cargar un capacitor, 571–572, 571*f*
- por el gas, sobre el medio ambiente (W_{amb}), 396, 427
- por fricción, 128–129
- por fuerza constante
- en ángulo para el desplazamiento, 126
 - en el desplazamiento lineal, 125, 125*f*
- por una máquina de calor, 410, 428
- resorte y
- el trabajo realizado por un resorte, 141
 - trabajo necesario para estirar un resorte, 153–154, 153*f*
- sobre un gas
- en procesos adiabáticos, 404–406, 427
 - en procesos de isovolumétricos, 406–407, 427
 - en procesos isobáricos, 395–398, 402–404, 427
 - en procesos isotérmicos, 407–408, 427
 - en procesos termodinámicos generales, 408–409
- transferencia de energía a través de, 146
- unidades de, 125–126, A.21
- y la energía potencial eléctrica, 548–552, 549*f*
- Trabajo gravitatorio (T_G), el potencial gravitatorio energía y, 133–134, 133*f*, 155, 218–219
- Trampa de Penning, 662
- Trampas de agua, en el sistema de plomería, 307, 307*f*
- Transformadores
- CA, 737–739, 737*f*, 752
 - ideal 737
- Transformadores elevadores, 737, 752
- Transformadores ideales, 737
- Transformadores reductores, 737, 752
- Transición microscopio electrónico, 924–925, 924*f*
- Transistor, como dispositivo de no óhmico, 597
- Transmisión eléctrica, la transferencia de energía a través de, 146
- Transmutación (decaimiento espontáneo), 966
- Traslado de los marcos de referencia, 72
- Tratamiento del cáncer, la terapia de campo eléctrico, 726–727
- Trazadores radiactivos, 975
- Tren Acela, 41
- Trigonometría, 15–17, 19, A.13
- Tritio, 4, 958, 1004
- Trueno, causa de, 477, 513*f*
- Tubo de imagen, de la televisión, 671, 671*f*
- Tubos capilares, 311–312 y 311*f* y 312*f*
- Tubos de rayos catódicos, 671*f*
- Tubos de rayos X, espectro emitido por, 916–917, 917*f*, 928
- Tunelización cuántica, 986
- Tungsteno
- coeficiente de temperatura de la resistividad, 598*t*
 - módulo elástico para, 283*t*
 - resistividad, 598*t*
- U**
- Uhlenbeck, George, 943
- Ultrasonidos focalizados de alta intensidad (HIFU), 475–476
- Umbral de audición, 478, 479, 502, 503*f*
- Umbral de energía, de una reacción nuclear, 973, 977
- Umbral de voltaje, emisión de rayos X, 917
- Umbral del dolor, 478–479, 503*f*
- Unidad de frecuencia ultrasónica, en cámaras, 476
- Unidad de masa unificada (u), 958
- Unidad fundamental de carga eléctrica (e), 515, 531–532, 539
- Unidad térmica británica (Btu), 363
- Unidades. *Véase también* Sistema de unidades
- gaussiano (cgs); SI (Sistema Internacional) de unidades de Estados Unidos; Unidades usuales
 - análisis dimensional, 5–7, 18
 - como cantidades algebraicas, 10
 - conversión de, 10–11, 19
 - de exposición a la radiación, 974, 974*t*
 - símbolos para, A.19*t*
- Unidades de masa atómica (u), 344, A.20
- conversión de, a energía en reposo, 901
- Unidades habituales de Estados Unidos, 3, 5*t*
- aceleración, 5*t*, 90*t*
 - aceleración promedio, 33
 - área, 5*t*
 - calor, 363
 - conversión de/a unidades del SI, 10
 - en el sector de la construcción, 377
 - fuerza, 90, 90*t*
 - longitud, 3
 - masa, 3, 90*t*
 - potencia, 148
 - presión, 280
 - tiempo, 3
 - trabajo, 126
 - valor-R, 378
 - velocidad, 5*t*, 29
 - volumen, 5*t*
- Unidades métricas, 3
- Unidades SI (Sistema Internacional), A.21
- aceleración, 5*t*, 90*t*
 - aceleración angular, 201
 - aceleración instantánea, 34
 - aceleración media, 33, 63
 - actividad (tasa de decaimiento), 964
 - área, 5*t*
 - calor, 363
 - calor específico, 365
 - calor latente, 369
 - cambio en la energía potencial eléctrica, 549
 - campo eléctrico, 522, 553
 - campo magnético, 653, 675, A.21
 - cantidad de movimiento, 167
 - capacitancia, 563, 580, A.21
 - carga eléctrica, 515, 517, 667, A.21
 - conversión a/de unidades habituales de Estados Unidos, 10
 - corriente eléctrica, 667, A.21
 - instantánea, 591
 - promedio, 591 - de desplazamiento, 26, 62
 - densidad, 279
 - desplazamiento angular, 199
 - diferencia de potencial eléctrico, 552, 580
 - dimensiones en, 5*t*
 - energía, A.21
 - energía cinética, 130
 - energía potencial gravitatoria, 133, 217
 - entropía, el cambio en, 419
 - esfuerzo, 283
 - fem, 616
 - flujo eléctrico, 533
 - flujo magnético, 689, A.21
- frecuencia, 447
- fuerza, 90, 90*t*, A.21
- impulso, 168
- inductancia, 706, 712, A.21
- intensidad, 478
- intensidad luminosa, A.21
- longitud, 2, 959, A.21
- masa, 2, 2*f*, 3, 18, 89, 90*t*, 344, 901, 958, A.20, A.21
- momento de inercia, 248
- peso, 93
- potencia, 147–148, 602, A.21
- potencial eléctrico, 553, A.21
- prefijos para, 3–4, 3*t*
- presión, 280, A.21
- resistencia, 596, 608, A.21
- resistividad, 598, 608
- temperatura, 335, A.21
- tensión superficial, 308
- tiempo, 2, 2*f*, A.21
- torque, 236, 237
- trabajo, 125–126, A.21
- velocidad, 5*t*, 27
- velocidad angular, 199–200
- velocidad instantánea, 30, 62
- velocidad media, 27, 29, 62
- viscosidad, 313
- volumen, 5*t*
- Universo
- calor de la muerte, 423
 - destino de, 1002, 1002*f*
 - distancias, muestra, 3*t*
 - edad de, 3*t*
 - entropía, 419, 422–423
 - expansión de, 750, 1000, 1001
 - geometría plana de, 1002, 1002*f*
 - masa de, 3*t*
 - modelo inflacionario de, 1003
 - origen de, 999–1000, 999*f*, 1002
 - radiación de microondas de fondo, 1000, 1000*f*, 1004
- Uranio (U)
- como combustible nuclear, 984–985, 985*f*
 - densidad de, 279*t*
 - fisión de, 900, 902–903, 982–984, 983*f*
 - serie radiactiva, 971
- Urano
- datos planetarios, 223*t*
 - velocidad de escape, 220*t*
- UV. *Véase* Ultravioleta (UV)
- V**
- Valor absoluto ($| |$), A.2, A.3, A.19*t*
- Valor R , 378–380, 378*t*
- Valores Q , 972–973, 976
- Vanadio (V), del estado fundamental de configuración, 946*t*
- Vapor (punto de ebullición), 333, 334, 335, 336*f*
- Vapor, calor específico de, 365*t*
- Vaporización, calor latente de, 369–370, 370*t*
- Varillas de control, de un reactor nuclear, 985, 985*f*
- Vector(es), 56–58, 75
- ángulo con el eje x , 59, 75
 - componentes de, 58–62, 58*f*, 59*f*, 75
 - la suma de vectores, 60–62, 75
- definición de, 27, 47
- división por escalar, 58
- igualdad de, 57, 57*f*
- MCAT guía de estudio para, A.22–A.23
- multiplicación por escalar, 58
- negativo de, 57, 76
- normal, 533
- notación para, 27, 56–57

- propiedades de, 56–58
 resta de, 57, 57f
 resultante, 57, 75
 suma de
 algebraica, 60–62, 75
 geométrica (método del triángulo), 57, 57f, 58, 75
- Vector de campo eléctrico (\vec{E}), 526
- Vector de posición, 62
- Vector normal, 533
- Vector resultante, definición, 57, 75
- Veleros, botes de vela en el viento, 307, 307f
- Velocidad, 27–32
 angular ($\vec{\omega}$)
 como cantidad vectorial, 209
 regla de la mano derecha, 209, 209f
 ángulo con el eje x , 65, 76
 como función del desplazamiento, en constante aceleración, 38, 38t
 como función del tiempo
 en el movimiento armónico simple, 449–450, 449f, 463
 en la aceleración constante, 37, 38t
 dimensión de, 5, 5t
 en el movimiento armónico simple
 como función de la posición, 443–445, 444f, 463
 como función del tiempo, 449–450, 449f, 463
 instantánea (\vec{v}), 30
 de una partícula bajo aceleración constante, 37–38, 38t, 65
 en dos dimensiones, 62, 75
 en la gráfica posición-tiempo, 31, 31f, 47
 en una dimensión, 30–32
 promedio (\bar{v})
 en dos dimensiones, 62, 75
 en una dimensión, 29, 47
 de una partícula bajo aceleración constante, 37, 38t
 en la gráfica posición-tiempo, 29–30, 30f, 47
 relativa, 71–75, 72f, 76
 en la relatividad especial, 898–899, 905
 estrategia para resolver problemas, 72
 vs. aceleración, 35–36, 36f
 vs. velocidad, 27, 29
- Velocidad angular
 instantánea (ω), 200, 201, 201f, 202–203
 velocidad tangencial y, 203–204, 224
 promedio (ω_{prom}), 199–200, 224
- Velocidad angular ($\vec{\omega}$)
 como cantidad vectorial, 209
 regla de la mano derecha, 209, 209f
- Velocidad angular instantánea (ω), 200, 201, 201f, 202–203
 velocidad tangencial y, 203–204, 224
- Velocidad angular media (ω_{prom}), 199–200, 224
- Velocidad de deriva, 593–595, 593f, 608
- Velocidad de escape, 220–221, 220t
 moléculas de hidrógeno y, 352
- Velocidad de la luz, de (c), 2, A.20
 como una constante, 888–889, 905
 Experimento Michelson-Morley, 887–888, 888f, 889
 sistemas inerciales de referencia, 886–887, 887f
 teoría del viento de éter, 887–888, 887f, 888f
- Velocidad instantánea (\vec{v}), 30, 31–32, 47
 de una partícula bajo aceleración constante, 37–38, 38t, 65
 en dos dimensiones, 62, 75
 en la gráfica posición-tiempo, 31, 31f, 47
 en una dimensión, 30–32
- Velocidad media, 27–28, 47
- Velocidad promedio (\bar{v})
 en dos dimensiones, 62, 75
 en una dimensión, 29, 47
 de la partícula bajo aceleración constante, 37, 38t
 en la gráfica posición-tiempo, 29–30, 30f, 47
- Velocidad relativa, 71–75, 72f, 76
 en la relatividad especial, 898–899, 905
 estrategias para resolver problemas, 72
- Velocidad rms, de los gases, 352, 352t, 355
- Velocidad tangencial, 203–204
 velocidad angular instantánea y, 224
- Velocidad terminal (v_t), 112, 318
- Velocidad. *Véase también* Velocidad angular
 de la luz, 2, A.20
 como constante, 888–889, 905
 experimento Michelson-Morley, 887–888, 888f, 889
 y la teoría del viento de éter, 887–888, 887f, 888f
 y los sistemas inerciales de referencia, 886–887, 887f
 de escape, 220–221, 220t
 de la onda, 458–459, 459–461, 464, 476
 de las ondas sonoras, 476–478, 476t, 504
 instantánea, 31–32, 47
 movimiento en dos dimensiones, 65, 76
 promedio, 27–28, 47
 récord de velocidad en tierra, 25f
 tangencial, 203–204
 terminal (v_t), 112, 318
 vs. velocidad, 27, 29
- Ventana oval, 502, 502f, 503
- Venturi tubo, 303, 303f
- Venus
 campo magnético de, 651
 datos planetarios, 223t
 efecto invernadero en, 385
 velocidad de escape, 220t
- Viajes espaciales
 Agencia Europea del Espacio, lugar de lanzamiento, 204
 catapulta espacial, 698
 desastre del *Challenger*, 331
 descompresión, los peligros de, 292
 gravedad artificial, 210
 ingravidez, efectos sobre la salud de, 210
 órbita geoestacionaria, 223–224
 reentrada, la resistencia del aire y, 112
 satélites
 aislamiento térmico de, 384–385
 altitud típica, 3t
 órbita geoestacionaria, 223–224
 velas solares, 745–746
 y la mecánica relativista, 892, 894–895, 894f, 899
- Vibraciones forzadas, 494–495, 494f, 495f
- Vida en la Tierra, el agua y la, 343
- Vida media ($T_{1/2}$), 963–965, 966, 976
 de los elementos seleccionados, A.14–A.18
- Videodiscos digitales. *Véase también* DVD
- Vidrio
 ángulo de Brewster para, 846
 calor específico, 365t
 como aislante, 515
 conductividad térmica, 376t
 índice de refracción, 767t, 771f
 módulo elástico para, 283t
 resistividad, 598t
- Vidrio Pyrex
 coeficiente de expansión lineal, 338, 338t
 constante dieléctrica, 575t
 rigidez dieléctrica, 575t
- Viento de éter, 887–888, 887f, 888f
- Viento, cerca de las playas, 365, 365f
- Viscosidad, 299, 312–313, 313f, 313t
 coeficiente de (η), 313
- Visión. *Véase también* Ojos
- Volta, Alessandro, 590
- Voltaje eficaz, 725–726, 750–751
- Voltaje en los bornes de la batería, 638
- Voltaje. *Véase también* Potencial eléctrico
- Voltímetro, 725, 750
- Volts (V), 553, 580, 616
- Volumen (módulo) de tensión, 284, 286–287
- Volumen (V)
 de las formas geométricas comunes, A.12t
 dimensión de, 5t
 elasticidad de sólidos, 284, 284f, 286–287
 expansión térmica y, 338t, 341–342
 ley del gas ideal, 345, 348
- Volumen constante de gas, termómetros, los
 334–335, 334f
- Von Laue, Max, 916
- ## W
- Watson, J.D., 920
- Watt (W), 147–148, 602
- Watt, James, 148
- Wavelets, 775
- Weber (Wb), 689
- Weber por metro cuadrado (Wb/m²), 653, 675
- Wilkins, Maurice, 920
- Wilson, Charles, 921f
- Wilson, Robert W., 1000, 1000f
- WIMP (partícula masiva de interacción débil), 1001
- ## X
- Xenón (Xe), como gas noble, 946
- Xerografía, 561–562, 562f
- Xi (Ξ), 991, 991t, 996t
- ## Y
- Yodo (I), como trazador radiactivo, 975
- Young, Thomas, 762
- Yunque (hueso del oído), 502, 502f, 503
- ## Z
- Zinc (Zn)
 como superconductor, 604, 604t
 configuración del estado base, 946t
 función de trabajo, 915t
- Zona de aceptación, de cable fibra óptica, 780
- Zónulas, 861
- Zwicky, Fritz, 1000

CARTA PEDAGÓGICA DE COLOR

Mecánica y termodinámica

Vectores desplazamiento y de posición	
Desplazamiento y posición de los vectores de componentes	
Vectores velocidad lineal (\vec{v}) y angular ($\vec{\omega}$)	
Vectores componentes de velocidad	
Vectores fuerza (\vec{F})	
Vectores componentes de fuerza	
Vectores aceleración (\vec{a})	
Vectores componentes de aceleración	
Flechas de transferencia de energía	
	
	
Proceso de la flecha	

Vectores cantidad de movimiento lineal (\vec{p}) y angular (\vec{L})	
Momento lineal y angular de vectores de componentes	
Vectores torque ($\vec{\tau}$)	
Vectores componentes torque	
Esquema lineal o direcciones de rotación de movimiento	
Flecha de rotación dimensional	
Ampliación de la flecha	
Resortes	
Poleas	

Electricidad y magnetismo

Campos eléctricos	
Vectores de campo eléctrico	
Vectores de campo eléctrico de componentes	
Campos magnéticos	
Vectores de campo magnético	
Vectores de campo magnético de componentes	
Cargas positivas	
Cargas negativas	
Resistores	
Baterías y otros suministros de potencia CD	
Interruptores	

Capacitores	
Inductores (bobinas)	
Volímetros	
Amperímetros	
Fuentes CA	
Bombillas	
Símbolo de tierra	
Corriente	

Luz y óptica

Rayos de luz	
Rayo de luz focal	
Rayo de luz central	
Lente convergente	
Lente divergente	

Espejo	
Espejo curvo	
Objetos	
Imágenes	

■ FACTORES DE CONVERSIÓN

Longitud

1 m = 39.37 pulg = 3.281 pies
1 pulg = 2.54 cm (exacto)
1 km = 0.621 mi
1 mi = 5 280 pies = 1.609 km
1 año luz (a-l) = 9.461×10^{15} m
1 angstrom (Å) = 10^{-10} m

Masa

1 kg = 10^3 g = 6.85×10^{-2} slug
1 slug = 14.59 kg
1 u = 1.66×10^{-27} kg = 931.5 MeV/c²

Tiempo

1 min = 60 s
1 h = 3 600 s
1 día = 24 h = 1.44×10^3 min = 8.64×10^4 s
1 año = 365.242 días = 3.156×10^7 s

Volumen

1 L = 1 000 cm³ = 0.035 3 pies³
1 pies³ = 2.832×10^{-2} m³
1 gal = 3.786 L = 231 pulg³

Ángulo

180° = π rad
1 rad = 57.30°
1° = 60 min = 1.745×10^{-2} rad

Rapidez

1 km/h = 0.278 m/s = 0.621 mi/h
1 m/s = 2.237 mi/h = 3.281 pies/s
1 mi/h = 1.61 km/h = 0.447 m/s = 1.47 pies/s

Fuerza

1 N = 0.224 8 lb = 10^5 dinas
1 lb = 4.448 N
1 dina = 10^{-5} N = 2.248×10^{-6} lb

Trabajo y energía

1 J = 10^7 erg = 0.738 pies·lb = 0.239 cal
1 cal = 4.186 J
1 pies·lb = 1.356 J
1 Btu = 1.054×10^3 J = 252 cal
1 J = 6.24×10^{18} eV
1 eV = 1.602×10^{-19} J
1 kWh = 3.60×10^6 J

Presión

1 atm = 1.013×10^5 N/m² (o Pa) = 14.70 lb/pulg²
1 Pa = 1 N/m² = 1.45×10^{-4} lb/pulg²
1 lb/pulg² = 6.895×10^3 N/m²

Potencia

1 hp = 550 pies·lb/s = 0.746 kW
1 W = 1 J/s = 0.738 pies·lb/s
1 Btu/h = 0.293 W

■ CONSTANTES FÍSICAS

Cantidad	Símbolo	Valor	Unidad SI
Número de Avogadro	N_A	6.02×10^{23}	partículas/mol
Radio de Bohr	a_0	5.29×10^{-11}	m
Constante de Boltzmann	k_B	1.38×10^{-23}	J/K
Constante de Coulomb, $1/4\pi\epsilon_0$	k_e	8.99×10^9	$\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$
Longitud de onda Compton de electrón	$h/m_e c$	2.43×10^{-12}	m
Masa de electrón	m_e	9.11×10^{-31}	kg
		5.49×10^{-4}	u
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$	
Carga elemental	e	1.60×10^{-19}	C
Constante gravitacional	G	6.67×10^{-11}	$\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
Masa de la Tierra	M_E	5.98×10^{24}	kg
Masa de la Luna	M_M	7.36×10^{22}	kg
Volumen molar de gas ideal a TPE	V	22.4	L/mol
		2.24×10^{-2}	m^3/mol
Masa de neutrón	m_n	$1.674\,93 \times 10^{-27}$	kg
		1.008 665	u
		$939.565 \text{ MeV}/c^2$	
Permeabilidad de espacio libre	μ_0	1.26×10^{-6}	$\text{T} \cdot \text{m}/\text{A}$
		$(4\pi \times 10^{-7} \text{ exacto})$	
Permitividad del espacio libre	ϵ_0	8.85×10^{-12}	$\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$
Constante de Planck	h	6.63×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{s}$
	$\hbar = h/2\pi$	1.05×10^{-34}	$\text{J} \cdot \text{s}$
Masa de protón	m_p	$1.672\,62 \times 10^{-27}$	kg
		1.007 276	u
		$938.272 \text{ MeV}/c^2$	
Radio de la Tierra (en el ecuador)	R_E	6.38×10^6	m
Radio de la Luna	R_M	1.74×10^6	m
Constante de Rydberg	R_H	1.10×10^7	m^{-1}
Rapidez de la luz en el vacío	c	3.00×10^8	m/s
Aceleración estándar de caída libre	g	9.80	m/s^2
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.67×10^{-8}	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$
Constante universal de gas	R	8.31	$\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$

Los valores que se presentan en esta tabla son los que se usan en los cálculos del texto. Por lo general, las constantes físicas se conocen con mucha mejor precisión.

Grupo I		Grupo II		Elementos de transición																		Grupo III	Grupo IV	Grupo V	Grupo VI	Grupo VII	Grupo VIII																																																																												
H 1 1.0079 1s	Li 3 6.941 2s ¹	Be 4 9.0122 2s ²	Na 11 22.990 3s ¹	K 19 39.098 4s ¹	Ca 20 40.078 4s ²	Sc 21 44.956 3d ¹ 4s ²	Ti 22 47.867 3d ² 4s ²	V 23 50.942 3d ³ 4s ²	Cr 24 51.996 3d ⁵ 4s ¹	Mn 25 54.938 3d ⁵ 4s ²	Fe 26 55.845 3d ⁶ 4s ²	Co 27 58.933 3d ⁷ 4s ²	Ni 28 58.693 3d ⁸ 4s ²	Cu 29 63.546 3d ¹⁰ 4s ¹	Zn 30 65.41 3d ¹⁰ 4s ²	Ga 31 69.723 4p ¹	Ge 32 72.64 4p ²	As 33 74.922 4p ³	Se 34 78.96 4p ⁴	Br 35 79.904 4p ⁵	Kr 36 83.80 4p ⁶	Rb 37 85.468 5s ¹	Sr 38 87.62 5s ²	Y 39 88.906 4d ¹ 5s ²	Zr 40 91.224 4d ² 5s ²	Nb 41 92.906 4d ⁴ 5s ¹	Mo 42 95.94 4d ⁵ 5s ¹	Tc 43 98 4d ⁵ 5s ²	Ru 44 101.07 4d ⁷ 5s ¹	Rh 45 102.91 4d ⁸ 5s ¹	Pd 46 106.42 4d ¹⁰	Ag 47 107.87 4d ¹⁰ 5s ¹	Cd 48 112.41 4d ¹⁰ 5s ²	In 49 114.82 5p ¹	Sn 50 118.71 5p ²	Sb 51 121.76 5p ³	Te 52 127.60 5p ⁴	I 53 126.90 5p ⁵	Xe 54 131.29 5p ⁶	Cs 55 132.91 6s ¹	Ba 56 137.33 6s ²	Rf 104 (261) 6d ² 7s ²	Hf 72 178.49 5d ² 6s ²	Ta 73 180.95 5d ³ 6s ²	W 74 183.84 5d ⁴ 6s ²	Re 75 186.21 5d ⁵ 6s ²	Os 76 190.23 5d ⁶ 6s ²	Pt 77 195.08 5d ⁹ 6s ¹	Au 78 196.97 5d ¹⁰ 6s ¹	Hg 80 200.59 5d ¹⁰ 6s ²	Tl 81 204.38 6p ¹	Pb 82 207.2 6p ²	Bi 83 208.98 6p ³	Po 84 (209) 6p ⁴	At 85 (210) 6p ⁵	Rn 86 (222) 6p ⁶	Fr 87 (223) 7s ¹	Ra 88 (226) 7s ²	Rf 104 (261) 6d ² 7s ²	Hf 72 178.49 5d ² 6s ²	Ta 73 180.95 5d ³ 6s ²	W 74 183.84 5d ⁴ 6s ²	Re 75 186.21 5d ⁵ 6s ²	Os 76 190.23 5d ⁶ 6s ²	Pt 77 195.08 5d ⁹ 6s ¹	Au 78 196.97 5d ¹⁰ 6s ¹	Hg 80 200.59 5d ¹⁰ 6s ²	Tl 81 204.38 6p ¹	Pb 82 207.2 6p ²	Bi 83 208.98 6p ³	Po 84 (209) 6p ⁴	At 85 (210) 6p ⁵	Rn 86 (222) 6p ⁶	La 57 138.91 5d ¹ 6s ²	Ce 58 140.12 5d ¹ 4f ¹ 6s ²	Pr 59 140.91 4f ³ 6s ²	Nd 60 144.24 4f ⁴ 6s ²	Pm 61 (145) 4f ⁵ 6s ²	Sm 62 150.36 4f ⁶ 6s ²	Eu 63 151.96 4f ⁷ 6s ²	Gd 64 157.25 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	Tb 65 158.93 4f ⁹ 5d ¹ 6s ²	Dy 66 162.50 4f ¹⁰ 6s ²	Ho 67 164.93 4f ¹¹ 6s ²	Er 68 167.26 4f ¹² 6s ²	Tm 69 168.93 4f ¹³ 6s ²	Yb 70 173.04 4f ¹⁴ 6s ²	Lu 71 174.97 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	Ac 89 (227) 6d ¹ 7s ²	Th 90 232.04 6d ² 7s ²	Pa 91 231.04 5f ² 6d ¹ 7s ²	U 92 238.03 5f ³ 6d ¹ 7s ²	Np 93 (237) 5f ⁴ 6d ¹ 7s ²	Pu 94 (244) 5f ⁶ 6d ⁰ 7s ²	Am 95 (243) 5f ⁷ 7s ²	Cm 96 (247) 5f ⁷ 6d ¹ 7s ²	Bk 97 (247) 5f ⁹ 6d ¹ 7s ²	Cf 98 (251) 5f ¹⁰ 7s ²	Es 99 (252) 5f ¹¹ 7s ²	Fm 100 (257) 5f ¹² 7s ²	Md 101 (258) 5f ¹³ 7s ²	No 102 (259) 5f ¹⁴ 7s ²	Lr 103 (262) 6d ¹ 5f ¹⁴ 7s ²

Símbolo — **Ca** 20 — Número atómico
 Masa atómica[†] — 40.078
 4s² — Configuración electrónica

*Serie de lantánidos

**Serie de actínidos

Nota: Los valores de masa atómica dados se promedian sobre isótopos en los porcentajes en los que existen en la naturaleza.

[†] Para un elemento inestable, entre paréntesis se proporciona el número de masa del isótopo conocido más estable.

^{††} Los elementos 114, 116 y 117 todavía no tienen nombre.

^{†††} Para una descripción de los datos atómicos, visite physics.nist.gov/PhysRefData/elements/per_text.html

Mientras que la física puede parecer difícil, su verdadera calidad es la simplicidad de las teorías físicas fundamentales, las teorías y conceptos que pueden enriquecer la perspectiva del mundo que te rodea. *Fundamentos de Física*, novena edición, ofrece una estrategia clara para la conexión de esas teorías con una constante de resolución de problemas, cuidando reforzar esta metodología a lo largo del texto y la conexión a ejemplos del mundo real.

Características

- Ejemplos resueltos. Para esta novena edición, se han revisado todos los ejemplos prácticos, las mejoras realizadas, y se añadieron o revisaron ejemplos finales, preguntas y ejercicios. Las preguntas por lo general requieren una respuesta conceptual o determinación, pero también incluir los conocimientos que requieren estimaciones de las relaciones entre conceptos. Las respuestas a las preguntas de ejemplo se pueden encontrar en la parte final del libro.
- Estrategias de resolución de problemas. Una estrategia general para resolver problemas a seguir por el estudiante se describe al final del capítulo 1. Esta estrategia ofrece a los estudiantes un proceso estructurado para resolver problemas. En la mayoría de los capítulos hay más estrategias y sugerencias específicas que se incluyen para la solución de los tipos de problemas que aparecen en ambos ejemplos resueltos y en los problemas de final de capítulo. Esta característica ayuda a los estudiantes a identificar los pasos esenciales en la solución de problemas y aumenta sus habilidades para este fin.
- Los últimos hallazgos en la investigación y educación de la Física se han integrado a lo largo del texto, poniendo más énfasis en el pensamiento crítico y conceptual. Los *Exámenes rápidos* dan a los estudiantes oportunidades para probar su comprensión del concepto físico presentado en el texto. Recuadros con *TIPS* o consejos ayudan a los estudiantes a evitar malentendidos comunes. Secciones de *Física aplicada* analizan principios clave sin cálculos de modo que los estudiantes pueden esbozar fácilmente conexiones al mundo real.
- Muchos de los capítulos incluyen secciones y problemas que tienen la intención de exponer al estudiante a las diversas aplicaciones prácticas e interesantes de principios físicos. Temas y problemas relacionados con la conexión de la Física a las ciencias de la vida se identifican con un icono **BIO** para ayudar a motivar a los estudiantes a dominar el contenido.

