

Física

Electricidad y magnetismo

DÉCIMA EDICIÓN

SERWAY | JEWETT

Física

Electricidad y magnetismo

DÉCIMA EDICIÓN

Raymond A. Serway

Emeritus, James Madison University

John W. Jewett, Jr.

Emeritus, California State Polytechnic University, Pomona

Con las contribuciones de Vahé Peroomian, University of Southern California

Traducción

Ana Elizabeth García Hernández

Revisión técnica

Hortencia Caballero López
Universidad Nacional Autónoma de México



Física. Electricidad y magnetismo**Décima edición**

Raymond A. Serway

John W. Jewett, Jr.

Director Higher Education**Latinoamérica:**

Renzo Casapía Valencia

Gerente editorial Latinoamérica:

Jesús Mares Chacón

Editores:

Pablo Miguel Guerrero Rosas

y Karen Estrada Arriaga

Coordinador de manufactura:

Rafael Pérez González

Diseño de portada:

Edgar Maldonado Hernández

Imagen de portada:

©Fotazdymak/Shutterstock.com

Composición tipográfica:

By Color Soluciones Gráficas

© D.R. 2019 por Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., una Compañía de Cengage Learning, Inc. Carretera México-Toluca núm. 5420, oficina 2301. Col. El Yaqui. Del. Cuajimalpa. C.P. 05320. Ciudad de México.

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, almacenada 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:

Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics

Volume 2, Tenth Edition

Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr

© 2019

ISBN: 978-1-337-55358-2

Datos para catalogación bibliográfica:

Serway, Raymond A. y Jewett, John W.

Física. Electricidad y magnetismo,

Décima edición

ISBN: 978-607-526-709-8

Visite nuestro sitio web en:

<http://latinoamerica.cengage.com>

*Dedicamos este libro a nuestras esposas
Elizabeth y Lisa,
y a todos nuestros hijos y nietos,
por su amorosa comprensión cuando
pasamos tiempo escribiendo en lugar de estar con ellos.*

Contenido breve

Electricidad y magnetismo 1

- 1 Campos eléctricos 2
- 2 Distribuciones continuas de carga y Ley de Gauss 29
- 3 Potencial eléctrico 50
- 4 Capacitancia y materiales dieléctricos 77
- 5 Corriente y resistencia 105
- 6 Circuitos de corriente directa 127
- 7 Campos magnéticos 156
- 8 Fuentes del campo magnético 185
- 9 Ley de Faraday 211
- 10 Inductancia 238
- 11 Circuitos de corriente alterna 261
- 12 Ondas electromagnéticas 287

Contenido

Acerca de los autores vii
Prefacio viii
Al estudiante xviii

1 Campos eléctricos 2

- 1.1 Propiedades de las cargas eléctricas 3
- 1.2 Objetos cargados mediante inducción 5
- 1.3 Ley de Coulomb 7
- 1.4 Modelo de análisis: partícula en un campo (eléctrico) 12
- 1.5 Líneas de campo eléctrico 17
- 1.6 Movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico uniforme 19

2 Distribuciones continuas de carga y ley de Gauss 29

- 2.1 Campo eléctrico de una distribución de carga continua 30
- 2.2 Flujo eléctrico 34
- 2.3 Ley de Gauss 37
- 2.4 Aplicación de la ley de Gauss a varias distribuciones de carga 39

3 Potencial eléctrico 50

- 3.1 Potencial eléctrico y diferencia de potencial 51
- 3.2 Diferencias de potencial en un campo eléctrico uniforme 53
- 3.3 Potencial eléctrico y energía potencia debida a cargas puntuales 56
- 3.4 Obtención del valor del campo eléctrico a partir del potencial eléctrico 59
- 3.5 Potencial eléctrico debido a distribuciones continuas de carga 60
- 3.6 Conductores en equilibrio electrostático 65

4 Capacitancia y materiales dieléctricos 77

- 4.1 Definición de capacitancia 78
- 4.2 Cálculo de la capacitancia 79
- 4.3 Combinaciones de capacitores 82
- 4.4 Energía almacenada en un capacitor con carga 86
- 4.5 Capacitores con material dieléctrico 90

- 4.6 Dipolo eléctrico en un campo eléctrico 92
- 4.7 Descripción atómica de los materiales dieléctricos 95

5 Corriente y resistencia 105

- 5.1 Corriente eléctrica 106
- 5.2 Resistencia 108
- 5.3 Modelo de conducción eléctrica 113
- 5.4 Resistencia y temperatura 115
- 5.5 Superconductores 116
- 5.6 Potencia eléctrica 117

6 Circuitos de corriente directa 127

- 6.1 Fuerza electromotriz 128
- 6.2 Resistores en serie y en paralelo 130
- 6.3 Leyes de Kirchhoff 137
- 6.4 Circuitos RC 140
- 6.5 Cableado doméstico y seguridad eléctrica 146

7 Campos magnéticos 156

- 7.1 Modelo de análisis: Partícula en un campo (magnético) 157
- 7.2 Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético uniforme 162
- 7.3 Aplicaciones del movimiento de partículas cargadas en un campo magnético 166
- 7.4 Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente 169
- 7.5 Momento de torsión sobre una espira de corriente en un campo magnético uniforme 171
- 7.6 El efecto Hall 175

8 Fuentes del campo magnético 185

- 8.1 Ley de Biot-Savart 186
- 8.2 Fuerza magnética entre dos conductores paralelos 191
- 8.3 Ley de Ampère 193
- 8.4 Campo magnético de un solenoide 196
- 8.5 Ley de Gauss en el magnetismo 198
- 8.6 Magnetismo en la materia 200

9 Ley de Faraday 211

- 9.1 Ley de Faraday de la inducción 212
- 9.2 Fem de movimiento 215
- 9.3 Ley de Lenz 219
- 9.4 Forma general de la ley de Faraday 222
- 9.5 Generadores y motores 224
- 9.6 Corrientes de eddy 228

10 Inductancia 238

- 10.1 Autoinducción e inductancia 239
- 10.2 Circuitos *RL* 241
- 10.3 Energía en un campo magnético 244
- 10.4 Inductancia mutua 246
- 10.5 Oscilaciones en un circuito *LC* 248
- 10.6 Circuito *RLC* 251

11 Circuitos de corriente alterna 261

- 11.1 Fuentes de CA 262
- 11.2 Resistores en un circuito de CA 262
- 11.3 Inductores en un circuito de CA 265
- 11.4 Capacitores en un circuito de CA 268
- 11.5 Circuito *RLC* en serie 270
- 11.6 Potencia en un circuito de CA 273
- 11.7 Resonancia en un circuito *RLC* en serie 275
- 11.8 El transformador y la transmisión de energía 277

12 Ondas electromagnéticas 287

- 12.1 Corriente de desplazamiento y la forma general de la ley de Ampère 288
- 12.2 Ecuaciones de Maxwell y los descubrimientos de Hertz 290
- 12.3 Ondas electromagnéticas planas 292

- 12.4 Energía transportada por ondas electromagnéticas 296
- 12.5 Cantidad de movimiento y presión de radiación 298
- 12.6 Producción de ondas electromagnéticas por una antena 300
- 12.7 El espectro de las ondas electromagnéticas 301

Apéndices

A Tablas A-1

- A.1 Factores de conversión A-1
- A.2 Símbolos, dimensiones y unidades de cantidades físicas A-2

B Repaso matemático A-4

- B.1 Notación científica A-4
- B.2 Álgebra A-5
- B.3 Geometría A-10
- B.4 Trigonometría A-11
- B.5 Desarrollo de series A-13
- B.6 Cálculo diferencial A-13
- B.7 Cálculo integral A-16
- B.8 Propagación de incertidumbre A-20

C Tabla periódica de los elementos A-22**D Unidades del SI A-24**

- D.1 Unidades del SI A-24
- D.2 Algunas unidades derivadas del SI A-24

Respuestas a exámenes rápidos y problemas con numeración impar A-25**Índice I-1**

Acerca de los autores

Raymond A. Serway recibió su doctorado en el Illinois Institute of Technology y es profesor emérito en la James Madison University. En 2011 fue galardonado con un doctorado honorario por parte de su alma mater, Utica College. En 1990 recibió el Madison Scholar Award en la James Madison University, donde enseñó durante 17 años. El doctor Serway comenzó su carrera docente en la Clarkson University, donde dirigió investigaciones y enseñó de 1967 a 1980. En 1977 recibió el Distinguished Teaching Award en la Clarkson University y el Alumni Achievement Award del Utica College en 1985. Como científico invitado en el IBM Research Laboratory en Zurich, Suiza, trabajó con K. Alex Muller, ganador del premio Nobel 1987. El doctor Serway también fue científico visitante en el Argonne National Laboratory, donde colaboró con su mentor y amigo, Sam Marshall. Además, el doctor Serway es coautor de *College Physics*, novena edición; *Principles of Physics*, quinta edición; *Essentials of College Physics*; *Modern Physics*, tercera edición. También es coautor del libro de bachillerato *Physics*, publicado por Holt, Rinehart y Winston. Además, el doctor Serway ha publicado más de 40 artículos de investigación en el campo de física de materia condensada y ha impartido más de 60 conferencias en reuniones profesionales. El doctor Serway y su esposa, Elizabeth, disfrutan viajar, jugar al golf, pescar, acampar cantar en un coro de iglesia y pasar tiempo de calidad con sus cuatro hijos y diez nietos, y recientemente, otro grandioso nieto.



John W. Jewett, Jr. obtuvo su licenciatura en Física en la Drexel University y su doctorado en la Ohio State University, con especialidad en las propiedades ópticas y magnéticas de la materia condensada. El doctor Jewett comenzó su carrera académica en el Richard Stockton College de Nueva Jersey, donde enseñó de 1974 a 1984. En la actualidad es profesor emérito de física en la California State Polytechnic University, en Pomona. A lo largo de su carrera docente, el doctor Jewett ha sido un activo promotor de la educación en ciencias físicas. Además de recibir cuatro becas National Science Foundation, ayudó a fundar y dirigir el Southern California Area Modern Physics Institute (SCAMPI) y el Science IMPACT (Institute of Modern Pedagogy and Creative Teaching), que trabaja con profesores y escuelas para desarrollar currícula efectiva en ciencia. Los premios del doctor Jewett incluyen el Stockton Merit Award en el Richard Stockton College en 1980, el Outstanding Professor Award en la California State Polytechnic University de 1991-1992 y el Excellence in Undergraduate Physics Teaching Award de la American Association of Physics Teachers (AAPT) en 1998. En 2010, recibió el Alumni Lifetime Achievement Award de la Drexel University en reconocimiento a sus contribuciones en la educación en física. Ha impartido más de 100 conferencias en reuniones profesionales, incluidas conferencias en la AAPT. También ha publicado 25 artículos sobre física de la materia condensada e investigaciones en la enseñanza de la física. Además, es autor de *The World of Physics: Mysteries, Magic and Myth*, el cual proporciona un gran número de conexiones entre la física y las experiencias cotidianas. Aparte de su trabajo en este libro, es coautor de *Principles of Physics*, quinta edición, así como de *Global Issues*, un conjunto de cuatro manuales de ciencia integral para educación secundaria. Al doctor Jewett le gusta tocar piano con su banda de físicos, viajar, la fotografía submarina, las lenguas extranjeras y coleccionar antigüedades que se puedan usar como aparatos de demostración en clases de física. Lo más importante, le gusta pasar el tiempo con su esposa, Lisa, su hijo y nieto.



Prefacio

Al escribir esta décima edición de *Física. Electricidad y magnetismo*, continuamos con nuestros esfuerzos por mejorar la claridad de la presentación e incluir nuevas características pedagógicas que ayudan a apoyar los procesos de aprendizaje y enseñanza. Al retroalimentar las sugerencias de los usuarios de la novena edición, así como de los revisores, hemos refinado el texto para satisfacer mejor las necesidades de los estudiantes y profesores.

Este libro está pensado para un curso introductorio de física para estudiantes que se especializan en ciencia o ingeniería. Todo el contenido del libro podría cubrirse en un curso de tres semestres. Los antecedentes matemáticos ideales de los estudiantes que tomen este curso deben incluir un semestre de cálculo. Si esto no es posible, el estudiante debe inscribirse en un curso simultáneo de introducción al cálculo.

Objetivos

Este libro tiene tres objetivos principales: proporcionar al estudiante una presentación clara y lógica de los conceptos básicos y principios de la física, en especial aquellos relacionados con electricidad y magnetismo, fortalecer la comprensión de los conceptos y principios a través de un amplio rango de interesantes aplicaciones al mundo real y desarrollar habilidades para resolver problemas por medio de un enfoque efectivamente organizado. Para alcanzar estos objetivos hemos enfatizado en argumentos físicos bien organizados y nos hemos concentrado en estrategias para resolver problemas. Al mismo tiempo hemos intentado motivar al estudiante mediante ejemplos prácticos que demuestren el papel de la física en otras disciplinas, incluidas ingeniería, química y medicina.

Cambios en la décima edición

Para la décima edición se realizaron un gran número de cambios y mejoras. Algunas de las nuevas características se basan en nuestras experiencias y en las tendencias actuales en la educación científica. Se incorporaron otros cambios en respuesta a los comentarios y sugerencias ofrecidas por los usuarios de la novena edición y por los revisores del manuscrito. Las características que se presentan a continuación representan los cambios principales de la décima edición.

Nuevos elementos de evaluación

Nuevos problemas ricos en contexto de evaluación. Problemas ricos en el contexto (identificados con un icono de CE) siempre sitúa a “usted” como el individuo en el problema para que tenga una conexión del mundo real en vez de discutir bloques en planos o bolas en cuerdas. Se estructuran como un cuento corto y no siempre se identifica explícitamente la variable que necesita ser evaluada. Los problemas ricos en contexto pueden relacionarse con la semblanza del capítulo, podría incluir escenarios de “testigo experto”, que permiten a los estudiantes ir más allá del manejo matemático mediante el diseño de un argumento basado en resultados matemáticos, o pedir que las decisiones sean hechos en situaciones reales. Un ejemplo de un nuevo problema rico en contexto se presenta en la siguiente página.

Nuevos problemas y actividades de Trabajo colaborativo; Piense, dialogue y comparta. Los problemas y actividades de Trabajo colaborativo son similares a los problemas ricos en contexto, pero tienden a beneficiarse más de las discusiones grupales porque la solución no es tan directa como para un problema de un sólo concepto. Algunos problemas de trabajo colaborativo requieren que el grupo discuta y tome decisiones; otros se hacen más desafiantes por el hecho de que alguna información no está y no se puede conocer. Todos los capítulos del texto tienen al menos un problema o actividad de trabajo colaborativo. A continuación se presentan ejemplos de un problema de “Trabajo colaborativo” y una actividad de “Trabajo colaborativo”.

1. Usted está trabajando haciendo entregas para una tienda de lácteos. En la parte de atrás de su camioneta hay una caja de huevos. En la tienda de lácteos se han agotado las cuerdas elásticas, por lo que la caja no está atada. Se le ha dicho que conduzca con cuidado porque el coeficiente de fricción estática entre el cajón y la cama del camión es 0.600. No está preocupado, porque están viajando por una carretera que parece perfectamente recta. Debido a su confianza y falta de atención, su velocidad ha aumentado arriba de 45.0 mi/h. De repente, ve una curva adelante con un letrero de advertencia que dice, "Peligro: curva no peraltada con radio de curvatura de 35.0 m." Usted está a 15.0 m de donde empieza la curva. ¿Qué puede hacer para salvar los huevos: (i) tomar la curva a 45.0 mi/h, (ii) frenar hasta detenerse antes de entrar en la curva para pensar en esto, o (iii) reducir la velocidad para tomar la curva a una velocidad más lenta? Discuta estas opciones con su grupo y determine si hay un mejor camino a seguir.

20. Hay la caminata 5K que tendrá lugar en su ciudad. Mientras habla con su abuela, que usa una motoneta eléctrica para moverse, ella le dice que le gustaría acompañarle con su motoneta mientras usted camina la distancia de 5.00 km. El manual que venía con su motoneta indica que con batería completamente cargada puede proporcionar 120 Wh de energía antes de que se agote. Para prepararse para la carrera, usted va para una "unidad de prueba": comenzando con una batería completamente cargada, su abuela va a su lado mientras camina 5.00 km en terreno plano. Al final de la caminata, el indicador de uso de la batería muestra que permanece 40.0% de la carga original en la batería. Usted también sabe que el peso combinado de la motoneta y su abuela es de 890 N. Unos días más tarde, lleno de confianza de que la batería tiene suficiente energía, usted y su abuela se dirigen hacia el evento 5K. Usted no sabe, que la ruta 5K no es en terreno plano, sino que es toda cuesta arriba, terminando en un punto más alto que la línea de salida. Un funcionario de la carrera le dice que la cantidad total de desplazamiento vertical en la ruta es de 150 m. ¿Podría acompañarle su abuela en la caminata, o se quedará varado cuando la batería se agote? Suponga que la única diferencia entre su prueba en la unidad y el evento real es el desplazamiento vertical.

3. **ACTIVIDAD** (a) Coloque diez centavos en una regla graduada horizontal, con un centavo a 10 cm, 20 cm, 30 cm, etc., hasta 100 cm. Levante con cuidado la regla, manténgala horizontal, y haga que un miembro del grupo realice una grabación de video del siguiente evento, usando un teléfono inteligente u otro dispositivo. Mientras la grabación de video está en curso, suelte el extremo de 100 cm de la regla mientras que el extremo de 0 cm descansa en el dedo de alguien o en el borde de la mesa. Al pasar las imágenes de video o ver el video en cámara lenta, determine qué centavo primero pierde contacto con la regla mientras cae. (b) Haga una determinación teórica de qué centavos deberían primero perder contacto y compararlo con su resultado experimental.

Cambios de contenido

Reorganización de los capítulos 1 a 3. El movimiento del material de distribución continua de la carga se incorporó en el capítulo 1 (Campos eléctricos) al capítulo 2 (Distribuciones continuas de carga y ley de Gauss) dio como resultado un capítulo que es una introducción más gradual para los estudiantes en el nuevo y desafiante tema de electricidad. El capítulo ahora implica solamente campos eléctricos debido a cargas puntuales y a campos eléctricos uniformes debido a placas paralelas.

El capítulo 2 antes incluía sólo el análisis de campos eléctricos debido a distribuciones continuas de la carga usando la ley de Gauss. La incorporación del material de la distribución continua de carga al capítulo 2 da como resultado un capítulo completo basado en el análisis de campos de distribuciones de carga continua, utilizando dos técnicas: la integración y la ley de Gauss.

El capítulo 2 antes contenía una discusión de las cuatro características de conductores cargados aislados. Tres de estas características fueron comentadas con argumentos de principios básicos, mientras que el estudiante era referido al material necesario del capítulo siguiente (Potencial eléctrico) para una discusión de la cuarta característica. Con el movimiento de esta discusión al capítulo 3 para esta edición, el estudiante ha aprendido todo el material básico necesario antes de la discusión de las características de los conductores cargados aislados, y pueden discutir las cuatro características a partir de principios básicos.

Nueva sección llamada "Imagine" como introducción al texto del capítulo. Cada capítulo se abre con una sección de *Imagine*. Esta característica proporciona una historia continua a través de todo el libro de "usted" como un estudiante de física inquisitivo observando y anali-

zando fenómenos que ve en la vida cotidiana. Esta sección en muchos capítulos implica medidas con un teléfono inteligente, videos de YouTube, o investigaciones en internet.

Nuevas conexiones de apertura de capítulos. El inicio de cada capítulo también se incluye una sección de conexiones que muestra cómo el material del capítulo se conecta con el material previamente estudiado y con el material futuro. La sección de conexiones proporciona un “panorama general” de los conceptos, explica por qué este capítulo se coloca en este lugar en particular en relación con los otros capítulos, y muestra cómo la estructura de la física se basa en material previo.

Características del texto

La mayoría de los profesores creen que el libro de texto seleccionado para un curso debe ser la guía principal del estudiante para entender y aprender el tema. Además, el libro de texto debe ser fácilmente accesible y debe ser estilizado y escrito para facilitar la instrucción y el aprendizaje. Con estos puntos en mente, hemos incluido muchas características pedagógicas, enumeradas a continuación, que están destinadas a mejorar su utilidad tanto para los estudiantes como para los docentes.

Resolución de problemas y comprensión conceptual

Enfoque del modelo de análisis para resolver problemas. Los estudiantes se enfrentan a cientos de problemas durante sus cursos de física. Un número relativamente pequeño de principios fundamentales forman la base de estos problemas. Cuando se enfrenta a un nuevo problema, un físico forma un modelo del problema que se puede resolver de una manera sencilla identificando el principio fundamental que es aplicable en el problema. Por ejemplo, muchos problemas implican la conservación de la energía, la segunda ley de Newton, o las ecuaciones cinemáticas. Debido a que el físico ha estudiado estos principios y sus aplicaciones ampliamente, él o ella puede aplicar este conocimiento como un modelo para resolver un nuevo problema. Aunque sería ideal que los estudiantes siguieran este mismo proceso, la mayoría de los estudiantes tienen dificultades para familiarizarse con toda la paleta de principios fundamentales que están disponibles. Es más fácil que los estudiantes identifiquen una situación en lugar de un principio fundamental.

El *enfoque de modelo de análisis* establece un conjunto estándar de situaciones que aparecen en la mayoría de los problemas de la física. Estas situaciones se basan en una entidad en uno de los cuatro modelos de simplificación: partícula, sistema, objeto rígido y onda. Una vez que se identifica el modelo de simplificación, el estudiante piensa acerca de lo que la entidad está haciendo o cómo interactúa con su entorno. Esto conduce al estudiante a identificar un modelo de análisis específico para el problema. Por ejemplo, si un objeto está cayendo, el objeto se reconoce como una partícula que experimenta una aceleración debida a la gravedad que es constante. El estudiante ha aprendido que el modelo análisis de una partícula bajo aceleración constante describe esta situación. Además, este modelo tiene un pequeño número de ecuaciones asociadas con él para su uso en el inicio de problemas, las ecuaciones cinemáticas. Por tanto, una comprensión de la situación ha llevado a un modelo de análisis, que luego identifica un número muy pequeño de ecuaciones para iniciar el problema, en lugar de las múltiples ecuaciones que los estudiantes ven en el libro. De esta manera, el uso de modelos de análisis lleva al estudiante a identificar el principio fundamental. A medida que el estudiante gane más experiencia, él o ella se recargará menos en el enfoque del modelo de análisis y comenzará a identificar los principios fundamentales directamente.

El enfoque del modelo de análisis para la resolución de problemas proporciona a los estudiantes un proceso estructurado para resolver problemas. En todos los capítulos, la estrategia se emplea explícitamente en todos los ejemplos para que los alumnos aprendan cómo se aplica. Se motiva a los estudiantes a seguir esta estrategia cuando trabaje con problemas de fin de capítulo.

Los **cuadros descriptivos del modelo de análisis** se presentan al final de cualquier sección que introduce un nuevo modelo de análisis. Esta característica recapitula el modelo de análisis introducido en la sección y proporciona ejemplos de los tipos de problemas que un estudiante podría resolver utilizando el modelo de análisis. Estas cajas funcionan como un “repasso” antes de que los estudiantes vean los modelos de análisis en uso en los ejemplos trabajados para una sección dada. El enfoque se refuerza en el resumen de final de capítulo bajo el encabezado de los *Modelos de análisis para la resolución de problemas*.

Tutoriales del modelo de análisis. John Jewett desarrolló 165 tutoriales (que aparecen en los conjuntos de problemas del texto impreso están indicados por un icono **AMT**) que fortalecen las habilidades de resolución de problemas de los estudiantes al guiarlos a través de los pasos en el proceso de resolución de problemas. Los primeros pasos importantes incluyen hacer predicciones y enfocarse en conceptos de física antes de resolver el problema cuantitativamente. Un componente crítico de estos tutoriales es la selección de un modelo de análisis apropiado para describir lo que está sucediendo en el problema. Este paso permite a los estudiantes hacer el importante vínculo entre la situación en el problema y la representación matemática de la situación. Los tutoriales del modelo de análisis incluyen retroalimentación significativa en cada paso para ayudar a los estudiantes a practicar el proceso de resolución de problemas y mejorar sus habilidades. Además, la retroalimentación se refiere a los conceptos erróneos de los estudiantes y les ayuda a detectar otros errores algebraicos y matemáticos. Las soluciones se llevan a cabo simbólicamente cada vez que sea posible, sustituyendo valores numéricos al final. Esta función ayuda a los estudiantes a comprender los efectos de cambiar los valores de cada variable en el problema, evita la sustitución repetitiva innecesaria de los mismos números y elimina los errores de redondeo. Los comentarios al final del tutorial motivan a los estudiantes a comparar la respuesta final con sus predicciones originales.

Ejemplos trabajados. Todos los ejemplos trabajados en el libro se presentan en un formato de dos columnas para reforzar mejor los conceptos físicos. La columna de la izquierda muestra información textual que describe los pasos para resolver el problema. La columna derecha muestra las manipulaciones matemáticas y los resultados al seguir estos pasos. Esta disposición facilita la relación del concepto con su ejecución matemática y ayuda a los alumnos a organizar su trabajo. Los ejemplos siguen de cerca el enfoque del modelo de análisis para la resolución de problemas. Una muestra de un ejemplo trabajado se puede encontrar en la página siguiente.

Los ejemplos consisten en dos tipos. El primer tipo (y más común) de ejemplo presenta un problema y una respuesta numérica. El segundo tipo de ejemplo es de naturaleza conceptual. Para dar cabida a un mayor énfasis en la comprensión de los conceptos físicos, los muchos ejemplos conceptuales están etiquetados como tales y están diseñados para ayudar a los estudiantes a centrarse en la situación física en el problema. Las soluciones de los ejemplos trabajados se presentan simbólicamente en la medida de lo posible, con valores numéricos sustituidos al final. Este enfoque ayudará a los estudiantes a pensar simbólicamente cuando se resuelven problemas en lugar de insertar innecesariamente números en ecuaciones intermedias.

¿Qué pasaría si? Aproximadamente un tercio de los ejemplos trabajados en el libro tienen una característica ¿qué pasaría si? Al final de la solución del ejemplo, ¿qué pasaría si? la pregunta ofrece una variación de la situación planteada en el ejemplo del libro. Esta característica motiva a los estudiantes a pensar en los resultados del ejemplo, y también ayuda a la comprensión conceptual de los principios. **¿Qué pasaría si?** las preguntas también preparan a los estudiantes para encontrar problemas novedosos que se pueden incluir en los exámenes. Los problemas de fin de capítulo seleccionados también incluyen esta característica.

Cuestionarios rápidos. Se les proporcionan a los estudiantes una oportunidad de probar su comprensión de los conceptos físicos presentados a través de cuestionarios rápidos. Las preguntas requieren que los estudiantes tomen decisiones con base en el razonamiento sólido, y se han escrito algunas de preguntas para ayudar a los estudiantes a superar los conceptos erróneos comunes. Los cuestionarios rápidos se han escrito en un formato objetivo, incluyendo opción múltiple, verdadero-falso y clasificación. Las respuestas a todas las preguntas del cuestionario rápido se encuentran al final del libro. Muchos docentes optan por usar estas preguntas en un estilo de enseñanza de “Instrucción peer” o con el uso del sistema de respuesta personal “contador”, pero también se pueden usar en formato de cuestionario estándar. A continuación, se presenta un ejemplo de un cuestionario rápido.

EJERCICIO RÁPIDO 7.5 Un dardo se carga en una pistola de resorte al comprimir a éste por una distancia x . En la segunda carga, al resorte se le comprime una distancia $2x$. ¿Qué tan rápido, comparado con el primero, el segundo dardo abandona la pistola? (a) cuatro veces más, (b) dos veces más, (c) igual, (d) la mitad, (e) la cuarta parte.

Cada solución se ha escrito para seguir de cerca el enfoque de modelo de análisis para reforzar nuevos hábitos para resolver problemas.

Cada paso de la solución se detalla en un formato de dos columnas. La columna izquierda proporciona una explicación para cada paso matemático en la columna derecha, para mejorar el reforzamiento de los conceptos físicos.

Ejemplo 3.2 Un viaje de vacaciones

Un automóvil viaja 20.0 km al norte y luego a 35.0 km en una dirección 60.0° al noroeste, como se muestra en la figura 3.11a. Encuentre la magnitud y dirección del desplazamiento resultante del automóvil.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Los vectores \vec{A} y \vec{B} dibujados en la figura 3.11a ayudan conceptualizar el problema. También se ha dibujado el vector resultante \vec{R} . Esperamos que su magnitud sea de unas pocas decenas de kilómetros. El ángulo β que hace que el vector resultante con el eje y se espera que sea menos de 60°, el ángulo que el vector \vec{B} hace con el eje y.

Categorizar Este ejemplo se puede clasificar como un simple problema de análisis acerca de suma vectorial. El desplazamiento \vec{R} es la resultante cuando se añaden los dos desplazamientos individuales \vec{A} y \vec{B} . Además, se puede clasificar como un problema acerca del análisis de triángulos, así que se acude a la experiencia en geometría y trigonometría.

Analizar En este ejemplo se muestran dos formas para analizar el problema de encontrar la resultante de dos vectores. La primera es resolver el problema mediante la geometría, con el uso de papel graficado y un transportador para medir la magnitud de \vec{R} y su dirección en la figura 3.11a. (De hecho, aun cuando sepa que va a realizar un cálculo, debe bosquejar los vectores para comprobar sus resultados.) Con una regla y transportador ordinarios, típicamente un buen diagrama da respuestas con dos dígitos pero no con una precisión de tres dígitos. ¡Intente usar estas herramientas en \vec{R} en la figura 3.11a y compare con el análisis trigonométrico que se muestra a continuación!

La segunda forma de resolver el problema es analizarlo con álgebra. La magnitud de \vec{R} se obtiene a partir de la ley de cosenos, tal como se aplica al triángulo en la figura 3.11a (véase el apéndice B.4).

Aplique $R^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta$ de la ley de cosenos para encontrar R :

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta}$$

Sustituya valores numéricos y Note que $\theta = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$:

$$R = \sqrt{(20.0 \text{ km})^2 + (35.0 \text{ km})^2 - 2(20.0 \text{ km})(35.0 \text{ km}) \cos 120^\circ} = 48.2 \text{ km}$$

Aplique la ley de senos (apéndice B.4) para encontrar la dirección de \vec{R} medida desde la dirección norte:

$$\frac{\sin \beta}{B} = \frac{\sin \theta}{R}$$

$$\sin \beta = \frac{B}{R} \sin \theta = \frac{35.0 \text{ km}}{48.2 \text{ km}} \sin 120^\circ = 0.629$$

$$\beta = 38.9^\circ$$

El desplazamiento resultante del automóvil es 48.2 km con una dirección de 38.9° al noroeste.

Finalizar ¿El ángulo β , que se calculó, concuerda con una estimación realizada al observar la figura 3.11a o con un ángulo medido del diagrama con el uso del método de la poligonal? ¿Es razonable que la magnitud de \vec{R} sea mayor que la de \vec{A} y \vec{B} ? ¿Las unidades de \vec{R} son correctas?

encuentran abrumador el uso de las leyes de cosenos y senos. Segunda, sólo resulta un triángulo si suma dos vectores. Si suma tres o más vectores, la forma geométrica resultante no es un triángulo. En la sección 3.4 se explora un nuevo método para sumar vectores que abordará estas dos desventajas.

Aunque el método de la poligonal para sumar vectores funciona bien, tiene dos desventajas. Primera, algunas personas

¿QUÉ PASARÍA SI? Suponga que el viaje se realiza considerando los dos vectores en orden inverso: 35.0 km con dirección 60.0° al noroeste primero y después 20.0 km al norte. ¿Cómo cambiarían la magnitud y dirección del vector resultante?

Respuesta No cambiarían. La ley conmutativa para la suma vectorial dice que el orden de los vectores en una suma es irrelevante. Gráficamente, la figura 3.11b muestra que los vectores Añadidos en orden inverso proporcionan el mismo vector resultante.

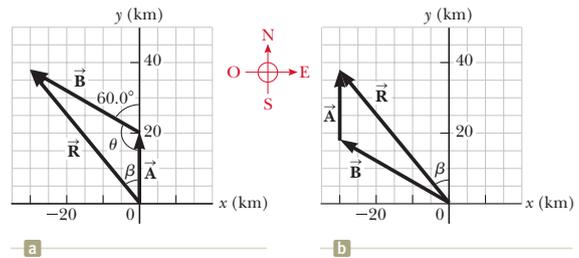


Figura 3.11 (Ejemplo 3.2) (a) Método gráfico para encontrar el vector de desplazamiento resultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$. (b) Sumando los vectores en orden inverso ($\vec{B} + \vec{A}$) da el mismo resultado para \vec{R} .

Las expresiones *¿Qué pasaría si?* se presentan en aproximadamente un tercio de los ejemplos trabajados y ofrecen una variación en la situación de lo que se plantea en el texto del ejemplo. Por ejemplo, esta característica podría explorar los efectos de cambiar las condiciones de la situación, determinar qué sucede cuando una cantidad se lleva a un valor limitador particular, o pregunta si se puede determinar información adicional sobre la situación del problema. Esta característica motiva a los estudiantes a pensar en los resultados del ejemplo y ayuda a la comprensión conceptual de los principios.

Previsiones de riesgos ocultos. Se proporcionan diferentes prevenciones de riesgos (como la que aparece junto a este texto) para ayudar a los estudiantes a evitar errores comunes y desacuerdos. Estas características, que se colocan en los márgenes del texto, abordan los conceptos erróneos comunes de los estudiantes y las situaciones en las que los estudiantes suelen seguir caminos improductivos.

Resúmenes. Cada capítulo contiene un resumen que revisa los conceptos y ecuaciones importantes que se abordan. El resumen se divide en tres secciones: definiciones, conceptos y principios, y modelos de análisis para la resolución de problemas. En cada sección, recuadros tipo ficha de estudio se enfocan en cada definición, concepto, principio o análisis del modelo por separado.

Conjunto de problemas. Para la décima edición, los autores revisaron cada pregunta y problema e incorporaron revisiones diseñadas para mejorar la legibilidad y la asignación.

Problemas. Al final de cada capítulo se incluye un extenso conjunto de problemas. Las respuestas para problemas con números impares en el texto impreso se proporcionan al final del libro.

Los problemas de fin de capítulo están organizados por las secciones de cada capítulo (aproximadamente dos tercios de los problemas están codificados en secciones específicas del capítulo). Dentro de cada sección, los problemas ahora están en la “plataforma” de los estudiantes ordenados en forma ascendente de pensamiento en la presentación de todos los problemas sencillos en la primera sección, seguida por los problemas intermedios. (Los números de problema para problemas sencillos se imprimen en negro; los problemas de nivel intermedio están en azul.) La sección de *Problemas adicionales* contiene problemas que no están codificados en secciones específicas. Al final de cada capítulo está la sección de *Problemas de desafío*, que reúne los problemas más difíciles de un capítulo en un lugar dado. (Los problemas de desafío tienen números de problema marcados en rojo).

Hay varios tipos de problemas que aparecen en este texto:

C/C Los *Problemas cuantitativos/conceptuales* tienen partes que le piden a los estudiantes que piensen cuantitativa y conceptualmente. Un ejemplo de un problema cuantitativo/conceptual se presenta a continuación:

El problema se identifica con un icono **C/C**

Los incisos a)-c) del problema le piden cálculos cuantitativos a.

35. Un resorte horizontal unido a una pared tiene una constante elástica $k = 850 \text{ N/m}$. Un bloque de masa $m = 1.00 \text{ kg}$ se une al resorte y descansa sobre una superficie horizontal sin fricción como en la figura P8.35. (a) El bloque se jala a una posición $x_i = 6.00 \text{ cm}$ desde la posición de equilibrio y se suelta. Encuentre la energía potencial elástica almacenada en el resorte cuando el bloque está 6.00 cm de la posición de equilibrio y cuando el bloque pasa por la posición de equilibrio. (b) Encuentre la rapidez del bloque cuando pasa por el punto de equilibrio. (c) ¿Cuál es la rapidez del bloque cuando está en una posición $x_i/2 = 3.00 \text{ cm}$? (d) ¿Por qué no es la respuesta al inciso (c) la mitad de la respuesta del inciso (b).

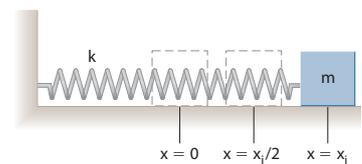


Figura P8.35

La parte d) le pide contestar una pregunta conceptual acerca de la situación.

S Los *problemas simbólicos* le piden a los estudiantes resolver un problema usando solamente la manipulación simbólica. Los revisores de la novena edición (así como la mayoría de los encuestados de una gran muestra) pidieron específicamente un aumento en el número de problemas simbólicos encontrados en el libro porque refleja mejor la forma en que los docentes quieren que sus estudiantes piensen cuando resuelven problemas de física. Un ejemplo de un problema simbólico se presenta a continuación.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 16.2
Dos clases de rapidez/velocidad
 No confunda v , la rapidez de la onda a medida que se propaga a lo largo de la cuerda, con v_y , la velocidad transversal de un punto en la cuerda. La rapidez v es constante para un medio uniforme, mientras que v_y varía en forma senoidal.

El problema se identifica con un icono **S**

No aparece ningún número en el enunciado del problema

36. Un camión se mueve con aceleración constante a en una colina que hace un ángulo ϕ con la horizontal como en la figura P6.36. Una pequeña esfera de masa m está suspendida desde el techo de la camioneta por un cable ligero. Si el péndulo hace un ángulo constante θ con la perpendicular al techo, ¿a qué es igual a ?

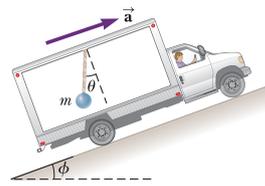


Figura P6.36

La figura muestra sólo cantidades simbólicas

La respuesta al problema es totalmente simbólica

36. $g(\cos \phi \tan \theta - \sin \phi)$

PG Los problemas guiados ayudan a los estudiantes a descomponer los problemas. Un problema de la física generalmente pide una cantidad física en un contexto dado. Sin embargo, con frecuencia, se deben utilizar varios conceptos y se requieren una serie de cálculos para obtener esa respuesta final. Muchos estudiantes no están acostumbrados a este nivel de complejidad y a menudo no saben por dónde empezar. Un problema guiado descompone un problema común en pasos más pequeños, permitiendo a los estudiantes comprender todos los conceptos y estrategias requeridas para llegar a una solución correcta. A diferencia de los problemas comunes de física, la orientación se incorpora a menudo en el enunciado del problema. Los problemas guiados son una reminiscencia de cómo un estudiante podría interactuar con un profesor en una visita a su oficina. Estos problemas (hay uno en cada capítulo del texto) ayudan a entrenar a los estudiantes a descomponer problemas complejos en una serie de problemas más simples, una habilidad esencial para resolver problemas. A continuación, se presenta un ejemplo de un problema guiado:

El problema se identifica con **PG**

24. Una viga uniforme que descansa sobre dos pivotes tiene una longitud $L = 6.00$ m y una masa $M = 90.0$ kg. El pivote bajo el extremo izquierdo ejerce una fuerza normal n_1 sobre la viga, y el segundo pivote ubicado a una distancia $\ell = 4.00$ m del extremo izquierdo ejerce una fuerza normal n_2 . Una mujer de masa $m = 55.0$ kg se para en el extremo izquierdo de la viga y comienza a caminar hacia la derecha, como se indica en la figura P12.24. El objetivo es encontrar la posición de la mujer cuando la viga se empieza a inclinar. (a) ¿Cuál es el análisis de modelo apropiado para la viga antes de que se incline? (b) Dibuje un diagrama de cuerpo libre para la viga, marque las fuerzas gravitacionales y las normales que actúan sobre la viga y coloque a la mujer a una distancia x hacia la derecha del primer pivote, el cual es el origen. (c) ¿Dónde está la mujer cuando la fuerza normal n_1 es máxima? (d) ¿Cuánto vale n_1 cuando la viga está por inclinarse? (e) Utilice la ecuación 12.1 para encontrar el valor de n_2 cuando la viga está a punto de inclinarse. (f) Empleando el resultado del inciso (d) y la ecuación 12.2, con los momentos de torsión calculados en torno al segundo pivote, determine la posición x de la mujer cuando la viga tiende a inclinarse. (g) Verifique la respuesta al inciso (a) mediante el cálculo de momentos de torsión alrededor del primer punto pivote.

Se identifica el objetivo

El análisis comienza al identificar cuál es el modelo de análisis apropiado

Al estudiante se le dan sugerencias de los pasos a seguir para resolver el problema

Se pide el cálculo asociado con el objetivo

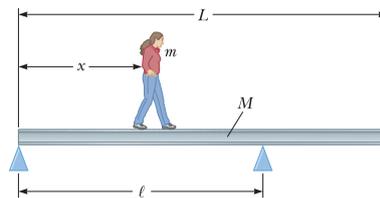


Figura P12.24

Problemas biomédicos. Estos problemas (indicados con un icono **BIO**) resaltan la relevancia de los principios de la física para los estudiantes que toman este curso que se especializan en una de las Ciencias de la vida.

Problemas de imposibilidad. La investigación en física se ha centrado en gran medida en las habilidades de los estudiantes para la resolución de problemas. Aunque la mayoría de los problemas en este libro están estructurados en forma de proporcionar datos y pedir el cálculo de un resultado, dos problemas por cada capítulo, en promedio, se estructuran como problemas de imposibilidad. Comienzan con la frase *¿Por qué es imposible la siguiente situación?* Seguida de la descripción de una situación. El aspecto sorprendente de estos problemas es que no se hace una pregunta a los estudiantes, excepto la que aparece en cursivas al inicio. El estudiante debe determinar las preguntas que se tienen que hacer y qué cálculos se deben realizar. Con base en los resultados de estos cálculos, el estudiante debe determinar por qué la situación descrita no es posible. Esta determinación puede requerir información de la experiencia personal, sentido común, de internet o de investigación impresa, la medición, las habilidades matemáticas, el conocimiento de las normas humanas o el pensamiento científico.

Estos problemas se pueden asignar para desarrollar habilidades de pensamiento crítico en los estudiantes. También son divertidos, tienen el aspecto de “misterios” de la física que hay que resolver por parte de los alumnos de forma individual o en grupos. Un ejemplo de problema de imposibilidad se presenta a continuación:

La frase inicial en cursivas indica un problema de imposibilidad

39. *¿Por qué es imposible la siguiente situación?* Albert Pujols hace un jonrón, de forma que la pelota libra la fila superior de las gradas, 24.0 m de altura, situada a 130 m de la base de home. La bola es golpeada a 41.7 m/s en un ángulo de 35.0° con la horizontal, y la resistencia del aire es despreciable.

Se describe una situación

No se formulan preguntas. El estudiante debe determinar qué necesita para los cálculos y por qué la situación es imposible.

Problemas dobles. Estos problemas son idénticos, uno pidiendo una solución numérica y otro una deducción simbólica. Hay al menos tres pares de estos problemas en la mayoría de los capítulos indicados por un sombreado azul claro, en los conjuntos de problemas de fin de capítulo.

Problemas de repaso. Muchos capítulos incluyen problemas de repaso que requieren que el estudiante combine conceptos cubiertos en el capítulo con los que se explicaron en capítulos anteriores. Estos problemas (indicados como problemas de **repaso**) reflejan la naturaleza cohesiva de los principios en el libro y verifican que la física no es un conjunto de ideas dispersas. Cuando se observan problemas del mundo real como el calentamiento global o las armas nucleares, puede ser necesario invocar ideas físicas de varias partes de un libro como este.

Problemas “Fermi” o que parecen imposibles. En la mayoría de los capítulos se plantea al estudiante uno o más problemas donde debe razonar en términos de orden y magnitud.

Problemas de diseño. Varios capítulos contienen problemas que le solicitan al estudiante determinar parámetros de diseño para un dispositivo práctico, de modo que pueda funcionar como se requiere.

Problemas basados en cálculo. Todos los capítulos contienen al menos un problema que aplica ideas y métodos del cálculo diferencial y un problema que usa cálculo integral.

Ilustraciones. Cada ilustración en la décima edición es de estilo moderno que ayuda a expresar los principios de la física en el trabajo de una manera clara y precisa. Se incluyen *punteros de enfoque* en muchas figuras del texto; estos señalan aspectos importantes de una figura o guían a los estudiantes a través de un proceso ilustrado por la fotografía o las ilustraciones. Este formato ayuda a los estudiantes que están aprendiendo de forma más visual. Un ejemplo de figura con un puntero de enfoque se presenta en la figura siguiente.

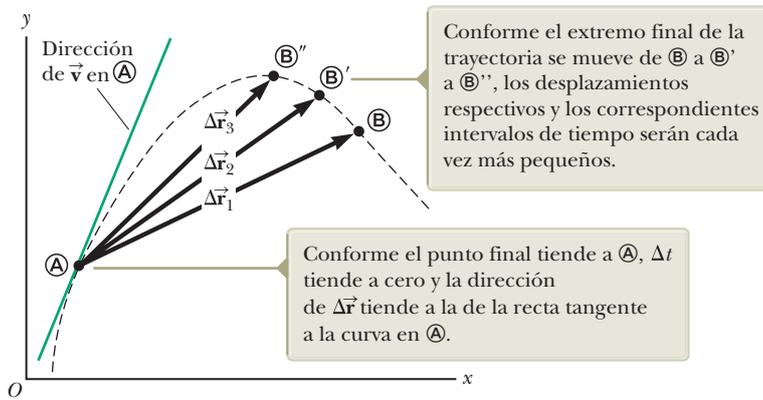


Figura 4.2 A medida que una partícula se mueve entre dos puntos, su velocidad promedio está en la dirección del vector desplazamiento $\Delta\vec{r}$. Por definición, la velocidad instantánea en \textcircled{A} se dirige a lo largo de la recta tangente a la curva en \textcircled{A} .

Apéndice matemático. El apéndice matemático (apéndice B), una valiosa herramienta para los estudiantes se actualizó para mostrar las herramientas matemáticas en un contexto físico. Este recurso es ideal para los estudiantes que necesitan un repaso rápido acerca de temas como álgebra, trigonometría y cálculo.

Características útiles

Estilo. Para facilitar la rápida comprensión, hemos escrito el libro en un estilo claro, lógico y atractivo. Elegimos un estilo de escritura que es un poco informal y relajado, de modo que los estudiantes encontrarán el texto atractivo y agradable para leer. Los nuevos términos se definen cuidadosamente y hemos evitado el uso de vocabulario especial.

Definiciones y ecuaciones importantes. Las definiciones más importantes se ponen en **negritas** o se resaltan con una pantalla de fondo para dar más énfasis y facilitar la revisión.

De igual modo, las ecuaciones importantes se resaltan con una pantalla para facilitar su ubicación.

Notas al margen. Los comentarios y notas que aparecen en el margen con un icono ► se pueden usar para ubicar enunciados, ecuaciones y conceptos importantes en el texto.

Uso pedagógico del color. Los lectores deben consultar la **carta pedagógica de color** (al inicio del libro) para una lista de los símbolos en color que se usan en los diagramas del texto. Este sistema se usa consistentemente en todas las partes del texto.

Nivel matemático. Introducimos el cálculo de manera gradual, teniendo en mente que los estudiantes con frecuencia toman cursos introductorios de cálculo y física simultáneamente. La mayoría de las etapas se muestra cuando se desarrollan ecuaciones básicas y con frecuencia se hace referencia a los apéndices matemáticos cerca del final del texto.

Cifras significativas. Las cifras significativas, tanto en los ejemplos trabajados como en los problemas de fin de capítulo, se manejaron con cuidado. La mayoría de los ejemplos numéricos se trabaja a dos o a tres cifras significativas, dependiendo de la precisión de los datos proporcionados. Los problemas de fin de capítulo por lo regular establecen datos y respuestas a tres dígitos de precisión. En la realización de los cálculos de estimación se suele trabajar con una sola cifra significativa.

Unidades. A lo largo del texto se usa el sistema internacional de unidades (SI).

Apéndices y Notas finales. Casi al final del texto se proporcionan varios apéndices. La mayoría del material de los apéndices representa un repaso de conceptos y técnicas matemáticas aplicadas en el texto, incluidos notación científica, álgebra, geometría, trigonometría, cálculo diferencial y cálculo integral. En todas las partes del texto se hace referencia a estos apéndices. La mayor parte de las secciones de repaso matemático en los apéndices incluyen ejemplos y ejercicios con respuestas. Además de los repasos matemáticos, los apéndices contienen tablas de datos físicos, factores de conversión y las unidades del SI de cantidades físicas, así como una tabla periódica de los elementos. Otra información útil (constantes fundamentales y datos físicos, datos planetarios, una lista de prefijos estándar, símbolos matemáticos, el alfabeto griego y abreviaturas estándar de unidades de medición) aparecen en las páginas finales del libro.

Recursos adicionales

Esta obra cuenta con recursos adicionales. Para mayor información, consulte a su representante local.

Reconocimientos

Esta décima edición de *Física. Electricidad y magnetismo* se preparó con la guía y asistencia de muchos profesores que revisaron selecciones del manuscrito, la revisión previa del texto o ambos. Queremos agradecer a los siguientes académicos y expresar nuestro sincero aprecio por sus sugerencias, críticas y aliento:

John F. DiTusa, *Louisiana State University*; Hani Dulli, *Texas Tech University*; Eric Hudson, *Pennsylvania State University*; David Joffe, *Kennesaw State University*; Yibin Pan, *University of Wisconsin-Madison*; Mark Rzchowski, *University of Wisconsin-Madison*; Joseph Scanio, *University of Cincinnati*; Brian Utter, *Bucknell University*

Durante nuestro trabajo en esta revisión, trabajamos con socios de desarrollo para ayudarnos a determinar el curso de la revisión; Quisiéramos agradecerles:

Tom Barrett, *The Ohio State University*; Ken Bolland, *The Ohio State University*; Colleen Countryman, *North Carolina State University*; Dawn Hollenbeck, *Rochester Institute of Technology*; Kathleen Koenig, *University of Cincinnati*; David Lamp, *Texas Tech University*; Rafael Lopez-Mobilia, *The University of Texas at San Antonio*; Yibin Pan, *University of Wisconsin-Madison*; Chandralekha Singh, *University of Pittsburgh*; Michael Thackston, *Kennesaw State University*; Michael Ziegler, *The Ohio State University*

Antes de nuestro trabajo en esta revisión, realizamos una encuesta de profesores; su retroalimentación y sugerencias ayudaron a dar forma a esta revisión, por lo que quisiéramos agradecer a los participantes de la encuesta:

Steve Alexander, *Southwestern University*; Sanjeev Arora, *Fort Valley State University*; Erik Aver, *Gonzaga University*; David Berube, *Loyola Marymount University*; Muhammad Bhatti, *The University of Texas Rio Grande Valley*; Jeffrey Bierman, *Gonzaga University*; Ken Bolland, *The Ohio State University*; John Bulman, *Loyola Marymount University*; Hani Dulli, *Texas Tech University*; Eric Hudson, *Pennsylvania State University*; Satyanaraya Kachiraju, *The University of Texas Rio Grande Valley*; Brent McDaniel, *Kennesaw State University*; Lisa Paulius, *Western Michigan University*; Linh Pham, *University of San Diego*; Charles Ruggiero, *The Ohio State University at Marion*; Mackay Salley, *Wofford College*; Jeff Sanny, *Loyola Marymount University*; Joseph Scanio, *University of Cincinnati*; Jeffrey Schwartz, *University of California en Los Angeles*; Amit Sharma, *Wright State University*; Mark Spraker, *University of North Georgia*; Anthony Teate, *James Madison University*; Lih-Sin The, *Clemson University*.

Este título fue cuidadosamente revisado por la precisión de Michael faux, Universidad de SUNY en Oneonta. Le agradecemos por sus diligentes esfuerzos bajo la presión del programa.

Belal Abas, Zinoviy Akkerman, Eric Boyd, Hal Falk, Melanie Martin, Steve McCauley, y Glenn Stracher correcciones a problemas tomados de ediciones anteriores.

Agradecimiento especial y reconocimiento al equipo profesional en Cengage en particular, Rebecca Berardy Schwartz, Michael Jacobs, Ed Dodd, Tanya Nigh, Teresa Trego, Lorreen Towle, Tom Ziolkowski, Cate Barr, y Caitlin Ghegan por su buen trabajo durante el desarrollo, producción y promoción de este libro de texto. Reconocemos el servicio de producción calificado y las ilustraciones excelentes proporcionadas por Ed Dionne y el personal de MPS Limited y la dedicada investigación de imágenes y textos de Cheryl Du Bois y Ragu Veeraragavan, respectivamente.

Por último, estamos profundamente en deuda con nuestras esposas, hijos y nietos por su amor, apoyo y sacrificios a largo plazo.

Raymond A. Serway
St. Petersburg, Florida

John W. Jewett, Jr.
Anaheim, California

Al estudiante

Es apropiado ofrecer algunas palabras de consejo que deben ser de beneficio para el estudiante. Antes de hacerlo, suponemos que ha leído el Prefacio, que describe las diferentes características del texto y materiales de apoyo que le ayudarán a lo largo del curso.

Cómo estudiar

Con frecuencia preguntan a los docentes: “¿Cómo debo estudiar física y prepararme para los exámenes?”. No hay una respuesta simple a esta pregunta, pero podemos ofrecer algunas sugerencias de acuerdo con nuestra experiencia en el aprendizaje y enseñanza a través de los años.

Ante todo, mantenga una actitud positiva hacia el tema de estudio, considerando que la física es la más esencial de todas las ciencias naturales. Otros cursos de ciencia que siguen usaran los mismos principios físicos, de modo que es importante que entienda y sea capaz de aplicar los diversos conceptos y teorías explicadas en el libro.

Conceptos y principios

Es esencial que entienda los conceptos y principios básicos antes de intentar resolver los problemas asignados. Esta meta la puede lograr al leer con cuidado el texto antes de asistir a su clase acerca del material cubierto. Cuando lea el texto, debe anotar aquellos puntos que no sean claros. También haga un intento diligente por responder los Exámenes rápidos, conforme los encuentra en su lectura. Hemos trabajado duro para preparar preguntas que le ayuden a juzgar por sí mismo qué tan bien entiende el material. Estudie cuidadosamente las preguntas **¿Qué pasaría si?** que aparecen en muchos de los ejemplos trabajados. Ellas le ayudarán a extender su comprensión más allá del simple acto de llegar a un resultado numérico. Las Previsiones de riesgos ocultos también le ayudarán a alejarse de las malas interpretaciones comunes con respecto a la física. Durante la clase tome notas y pregunte acerca de aquellas ideas que no le sean claras. Considere que pocas personas son capaces de absorber todo el significado del material científico después de sólo una lectura; pueden ser necesarias muchas lecturas del texto y sus notas. Sus clases y trabajo de laboratorio complementan la lectura del libro y deben clarificar algo del material más difícil. Debe minimizar su memorización del material. La memorización exitosa de pasajes del texto, ecuaciones y deducciones no necesariamente indican que comprende el material. Su comprensión del material mejorará mediante la combinación de hábitos eficientes de estudio, discusiones con otros estudiantes y con docentes, y su habilidad para resolver los problemas que se presentan en el libro. Pregunte siempre que crea que es necesario aclarar un concepto.

Agenda de estudio

Es importante que configure una agenda de estudio regular, de preferencia que sea diaria. Asegúrese de leer el programa de estudio del curso y que éste coincida con el calendario establecido por el instructor. Las clases tendrán mucho más sentido si lee el texto correspondiente antes de asistir a ellas. Como regla general, debe dedicar aproximadamente 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 hayan tomado el curso. Puede ser necesario buscar más instrucción de estudiantes experimentados. Con mucha frecuencia, los docentes ofrecen sesiones de repaso, además de los periodos de clase regulares. Evite la práctica de demorar el estudio hasta un día o dos antes de un examen.

Por lo general, este enfoque tiene resultados desastrosos. En lugar de emprender una sesión de estudio de toda la noche antes del examen, repase brevemente los conceptos y ecuaciones básicos, y luego tenga una buena noche de descanso.

Usted puede comprar cualquier producto Cengage Learning en inglés en nuestra tienda online **CengageBrain.com**.

Use las características

Debe usar por completo las diferentes características del texto explicadas en el Prefacio. Por ejemplo, las notas al margen son útiles para localizar y describir ecuaciones y conceptos importantes, y las **negritas** indican enunciados y definiciones importantes. En los apéndices hay muchas tablas útiles, pero la mayoría se incorpora al texto, donde su referencia es útil. El apéndice B es un repaso conveniente de técnicas matemáticas.

Las respuestas a los exámenes rápidos y a los problemas con número impar se proporcionan al final del libro, las respuestas a los exámenes rápidos se ubican al final de cada capítulo. La tabla de contenido proporciona un panorama de todo el texto y el índice le permite ubicar rápidamente material específico. En ocasiones se usan notas a pie de página para complementar el texto o citar otras referencias acerca del tema explicado. Después de leer un capítulo debe ser capaz de definir cualquier cantidad nueva introducida en dicho capítulo y explicar los principios y suposiciones que se usaron para llegar a ciertas relaciones clave. Los resúmenes de capítulo y las secciones de repaso le ayudan a este respecto. En algunos casos puede encontrar necesario remitirse al índice del libro para ubicar ciertos temas. Debe ser capaz de asociar a cada cantidad física el símbolo correcto para representar dicha cantidad y la unidad en que se especifica la cantidad. Además, debe ser capaz de expresar cada ecuación importante en prosa concisa y exacta.

Resolución de problemas

R. P. Feynman, laureado Nobel en física, dijo una vez: “No sabes nada hasta que lo has practicado.” Para estar de acuerdo con este enunciado, le recomendamos encarecidamente que desarrolle las habilidades necesarias para resolver una amplia serie de problemas. Su habilidad para resolver problemas será una de las principales pruebas de su conocimiento en física; por tanto, debe intentar resolver tantos problemas como sea posible. Es esencial que comprenda los conceptos y principios básicos antes de intentar resolver problemas. Es buena práctica intentar encontrar soluciones alternas al mismo problema. Por ejemplo, puede resolver problemas en mecánica usando las leyes de Newton, pero con mucha frecuencia un método alternativo que se apoye en consideraciones sobre la energía es más directo. No debe engañarse y creer que entiende un problema simplemente porque ha visto como se resolvió en clase. Debe ser capaz de resolver el problema y problemas similares por cuenta propia.

El enfoque para resolver problemas se debe planear cuidadosamente. Un plan sistemático es especialmente importante cuando un problema involucra muchos conceptos. Primero, lea el problema muchas veces hasta que esté seguro de que entiende qué se pide. Busque palabras clave que le ayuden a interpretar el problema y tal vez le posibiliten la formulación de ciertas suposiciones. Su habilidad para interpretar adecuadamente una pregunta es una parte integral de la resolución del problema. Segundo, debe adquirir el hábito de escribir la información conocida en un problema y aquellas cantidades que necesite encontrar; por ejemplo, puede construir una tabla que mencione tanto las cantidades conocidas como las cantidades a encontrar. Este procedimiento se usa a veces en los ejemplos trabajados del libro. Por último, después de decidir el método que considere apropiado para un problema determinado, proceda con su solución. La Estrategia General para Resolver Problemas le guiará a través de problemas complejos. Si sigue las etapas de este procedimiento (*Conceptualizar*, *Categorizar*, *Analizar*, *Finalizar*), le será más fácil llegar a una solución y ganará más por sus esfuerzos. Dicha estrategia se usa en todos los ejemplos en los capítulos restantes, de modo que puede aprender cómo aplicarla. En el texto se incluyen estrategias específicas para resolución de problemas para ciertos tipos de situaciones y aparecen con un encabezado especial. Dichas estrategias específicas siguen el esbozo del enfoque del Modelo de análisis para resolver problemas.

Con frecuencia los estudiantes fracasan en el reconocimiento de las limitaciones de ciertas ecuaciones o leyes físicas en una situación particular. Es muy importante que entienda y recuerde las suposiciones que subyacen a una teoría o formalismo particular.

Por ejemplo, ciertas ecuaciones en cinemática sólo se aplican a una partícula en movimiento con aceleración constante. Estas ecuaciones no son válidas para describir el movimiento cuya aceleración no sea constante, como el movimiento de un objeto conectado a un resorte o el movimiento de un objeto a través de un fluido. Estudie cuidadosamente los modelos de análisis para resolver problemas en los resúmenes de capítulo, de modo que sepa cómo se aplica cada modelo a una situación específica. Los modelos de análisis le proporcionan una estructura lógica para resolver problemas y ayudan a desarrollar sus habilidades de pensamiento para ser más como los de un físico. Utilice el enfoque del modelo de análisis para ahorrar horas de búsqueda de la ecuación correcta y para hacer de usted un solucionador de problemas más rápido y eficiente.

Experimentos

La física es una ciencia que se apoya en observaciones experimentales. Por tanto, recomendamos que intente complementar el texto, realizando varios tipos de experimentos “prácticos”, en casa o en el laboratorio. Estos experimentos se pueden usar para poner a prueba ideas y modelos explicados en clase o en el libro. Por ejemplo, el juguete común *Slinky* 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 pendular, diferentes masas unidas al extremo de un resorte o banda de goma vertical se pueden usar para determinar su naturaleza elástica, un viejo par de lentes de sol y algunos lentes de desecho y una lupa son los componentes de diferentes experimentos en óptica, y una medida aproximada de la aceleración en caída libre se puede determinar simplemente al medir con un cronómetro el tiempo que una bola tarda en caer desde una altura conocida. La lista de tales experimentos es interminable. Cuando no estén disponibles los modelos físicos, sea imaginativo e intente desarrollar los suyos por cuenta propia.

El científico no estudia la naturaleza porque sea útil; la estudia porque se deleita en ella y se deleita en ella porque es hermosa. Si la naturaleza no fuera hermosa, no valdría la pena conocerla, y si no valiera la pena conocer la naturaleza, no valdría la pena vivir la vida.

—Henri Poincaré

Física

Electricidad y magnetismo

DÉCIMA EDICIÓN





Electricidad y magnetismo

Ahora estudiará la rama de la física que se ocupa de los fenómenos eléctricos y magnéticos. En esta obra, nos centraremos en el término T_{ET} que representa la transferencia de energía por transmisión eléctrica. En el último capítulo, presentaremos la física detrás del término T_{ER} para la radiación electromagnética. Las leyes de la electricidad y del magnetismo desempeñan un papel muy importante en el funcionamiento de dispositivos como teléfonos inteligentes, televisiones, motores eléctricos, computadoras, aceleradores de alta energía y otros aparatos electrónicos. Incluso, en su forma más básica, las fuerzas interatómicas e intermoleculares responsables de la formación de sólidos y líquidos son, en su origen, eléctricas. A su vez, las fuerzas eléctricas son la base de la ciencia de la química y son responsables del desarrollo de los organismos biológicos. Por tanto, la gravedad juega un papel en la naturaleza al permitir que los planetas existan, ¡pero la vida en ese planeta se debe a la electricidad!

No fue sino hasta principios del siglo XIX que los científicos llegaron a la conclusión de que la electricidad y el magnetismo son fenómenos relacionados. En 1819, Hans Oersted descubrió que la aguja de la brújula se desvía si se coloca cerca de un circuito por el que se conduce una corriente eléctrica. En 1831, Michael Faraday y, en forma simultánea, Joseph Henry, demostraron que cuando se pone en movimiento un alambre cerca de un imán (o, de manera equivalente, cuando un imán se mueve cerca de un alambre), se establece una corriente eléctrica en dicho alambre. En 1873, James Clerk Maxwell aprovechó estas observaciones junto con otros experimentos para sustentar las leyes del electromagnetismo como se conocen hoy día. (*Electromagnetismo* es el nombre que se le da al estudio conjunto de la electricidad y del magnetismo.)

La contribución de Maxwell en el campo del electromagnetismo fue de especial relevancia, porque las leyes que formuló son fundamentales para explicar todas las formas de fenómenos electromagnéticos. Su trabajo tiene tanta importancia como las leyes del movimiento y la teoría de la gravitación universal. ■

Un tren de maglev *Transrapid* se detiene en una estación en Shanghai, China. La palabra *maglev* es una forma abreviada de *levitación magnética*. Este tren no tiene contacto físico con sus rieles, y su peso está totalmente apoyado por las fuerzas electromagnéticas. En este libro, estudiaremos estas fuerzas. (Lee Prince/Shutterstock)

1

Campos eléctricos



Un huevo tiene impresos números sobre él. ¿Cómo imprimirías sobre un huevo? (Starstuff/Shutterstock)

- 1.1 Propiedades de las cargas eléctricas
- 1.2 Objetos cargados mediante inducción
- 1.3 Ley de Coulomb
- 1.4 Análisis del modelo: Partícula en un campo eléctrico
- 1.5 Líneas de campo eléctrico
- 1.6 Movimiento de una partícula cargada en un campo eléctrico uniforme

IMAGINE Aprovechando una visita de fin de semana a la familia, usted ha lavado y secado su ropa y está retirando la ropa de la secadora. Nota que sus calcetines parecen estar pegados a sus camisas. Incluso sacudir la camisa no sacará los calcetines. Cuando quite los calcetines de la camisa, se desprenden con un crujido. Mientras lleva su ropa seca a su habitación, se pregunta por qué ocurrieron esos efectos. Todavía está intrigado mientras se peina en el baño. Abre la llave e involuntariamente sostiene el peine que acaba de usar junto a la corriente de agua. ¡La corriente de agua se dobla hacia un lado, hacia el peine! Mueve el peine a diferentes posiciones y observa que la corriente de agua se desvía hacia el lado en diferentes valores. Su padre deambula mientras hace esto y dice: “Esa es exactamente la técnica que utilizamos en el diseño de nuestras impresoras de fabricación de alta velocidad. Ve a ver las latas de comida en la cocina. ¿Cómo crees que las fechas de vencimiento están impresas en las latas? Aún más fascinante, ¿cómo imprimimos números de código en los huevos?”. Nunca entendió lo que hace su padre para ganarse la vida, pero ahora está bastante intrigado. Sabe que diseña algún tipo de impresora industrial. Le pregunta qué significa el experimento del baño. Él le dice que investigue en línea sobre la impresión continua de inyección de tinta.

CONEXIONES En nuestros capítulos anteriores sobre mecánica, identificamos varios tipos de fuerzas: fuerzas normales perpendiculares a las superficies, fuerzas de fricción paralelas a las superficies, fuerzas de tensión a lo largo de las cuerdas, fuerzas gravitatorias en los planetas, etc. Entre ellas, la fuerza de gravedad, es única, ya que es una fuerza fundamental en la naturaleza. Resulta que las otras fuerzas en esta lista se deben a un segundo tipo de fuerza fundamental, la fuerza electromagnética. En este capítulo, comenzaremos nuestro estudio de una manifestación de esta fuerza, la fuerza eléctrica.

Nuestra comprensión de la fuerza gravitacional desarrollada de acuerdo con una estructura conceptual que construimos: aprendimos que la fuerza existe entre los objetos con masa. Luego desarrollamos una ley matemática, la ley de gravitación universal de Newton, para describir la magnitud de la fuerza. Luego presentamos la noción de un campo gravitacional y estudiamos la energía potencial gravitacional en un sistema de dos o más objetos masivos. Seguiremos un desarrollo conceptual similar en nuestro estudio de la fuerza eléctrica. Aprenderemos que la fuerza existe entre objetos con carga eléctrica. Desarrollaremos una ley matemática, la ley de Coulomb, para describir la magnitud de la fuerza. Introduciremos la noción de un campo eléctrico y discutiremos la energía potencial eléctrica en un sistema de dos o más objetos cargados. A medida que continuemos estudiando la fuerza eléctrica en los próximos capítulos, descubriremos que tenemos mucho más control sobre esta fuerza que sobre la gravedad. Las fuentes de gravedad se restringen a una forma: la forma esférica de los planetas y las estrellas (con la excepción de pequeños asteroides y lunas que pueden desviarse ligeramente de las esferas). Por otro lado, podemos formular diversas formas para situaciones eléctricas: esferas, placas, cables y cosas por el estilo. Los objetos que se mueven en campos gravitacionales son enormes y masivos; no podemos controlar su movimiento. Los objetos que se mueven en campos eléctricos pueden ser tan pequeños como los electrones; ¡podemos cambiar su movimiento fácilmente! No tenemos control sobre la gravedad; siempre está ahí. ¡Pero podemos encender y apagar la electricidad! No podemos ajustar la fuerza del campo gravedad de la Tierra. ¡Pero podemos girar fácilmente un selector para cambiar la fuerza de un campo eléctrico! La gravedad está en todas partes, dentro y fuera de todo. ¡Pero algunos materiales conducen electricidad y otros no! ¡Y podemos crear regiones de espacio libres de campos eléctricos con bastante facilidad! Este tipo de control que tenemos sobre la electricidad lo convierte en la base de nuestra sociedad tecnológica. Los fenómenos asociados con las cargas eléctricas aparecerán repetidamente en la mayoría de los capítulos restantes de este libro.

1.1 Propiedades de las cargas eléctricas

Hay una variedad de experimentos simples para demostrar la existencia de fuerzas eléctricas. Por ejemplo, después de frotar un globo contra el cabello en un día seco, observará que el globo atrae pequeños pedazos de papel. Con frecuencia la fuerza de atracción es lo suficientemente intensa que los pedazos de papel quedan suspendidos. La figura 1.1a muestra otro efecto de la fuerza eléctrica. El cuerpo de la mujer se carga, y, en este caso, hay una fuerza repulsiva entre todos los cabellos de su cabeza. La figura 1.1b muestra otra situación atractiva. Un gato frotó su cuerpo contra los trozos de poliestireno mientras jugaba en una caja de embalaje. Al salir de la caja, los trozos de espuma de poliestireno se pegan a su cuerpo.



JENS SCHLUIJTER/Getty Images

a



Sean McGrath/Flickr

b

Figura 1.1 (a) Esta joven está disfrutando los efectos de cargar eléctricamente su cuerpo. Cada cabello individual en su cabeza se carga y ejerce una fuerza repulsiva sobre los otros cabellos, lo que resulta en el peinado “parado” que se ve aquí. (b) Una fuerza eléctrica atractiva es demostrada por un gato que se metió en una caja de trozos de poliestireno.

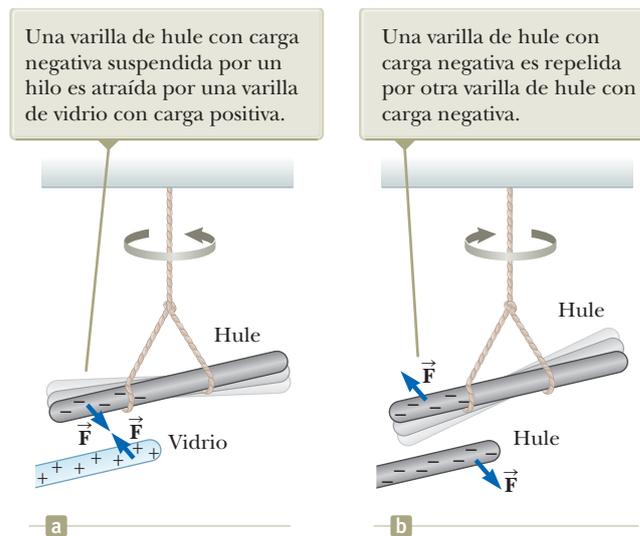


Figura 1.2 Fuerza eléctrica entre (a) objetos con cargas opuestas y (b) objetos con cargas iguales.

Cuando los materiales se comportan de esta manera, se dice que están *electrificados*, o que se han **cargado eléctricamente**. Usted puede electrificar su cuerpo con facilidad si frota con fuerza sus zapatos sobre una alfombra de lana; detectará la carga eléctrica de su cuerpo al tocar ligeramente (y sobresaltar) a un amigo. Bajo condiciones adecuadas, verá una chispa al momento de tocarlo y ambos sentirán una ligera descarga. (Este tipo de experimentos funcionan mejor durante días secos, porque el exceso de humedad en el aire hace que cualquier carga que usted acumule en su cuerpo se “fugue” hacia la tierra.)

A partir de una serie de sencillos experimentos, Benjamín Franklin (1706-1790) descubrió que existen dos tipos de cargas eléctricas, a las que dio el nombre de **positiva** y **negativa**. Los electrones tienen carga negativa y los protones positiva. Para comprobar la existencia de ambos tipos de carga, imagine una varilla rígida de hule o caucho que ha sido frotada contra un trozo de piel y que está suspendida de un hilo, como puede observar en la figura 1.2. Cuando acerca una varilla de vidrio que ha sido frotada con seda a una varilla de hule, ambas se *atraen* (figura 1.2a). Por otra parte, si acerca dos varillas de hule con carga (o dos varillas de vidrio con carga), como se observa en la figura 1.2b, ambas se *repelen*. Esta observación demuestra que el hule y el vidrio tienen dos tipos diferentes de carga. Con base en estas observaciones, se puede concluir que **cargas de un mismo signo se repelen y cargas de signos opuestos se atraen**.

Utilizando la convención sugerida por Franklin, a la carga eléctrica en la varilla de vidrio se le denominó positiva y a la de la varilla de hule, negativa. Por tanto, cualquier objeto cargado que sea atraído por una varilla de hule con carga (o repelido por una varilla de vidrio con carga), deberá tener una carga positiva, y cualquier objeto con carga repelido por una varilla de hule con carga (o atraído por una varilla de vidrio con carga), deberá tener una carga negativa.

Otro aspecto importante de la electricidad que surge de la observación experimental es que en un sistema aislado la **carga eléctrica siempre se conserva**. Es decir, cuando se frota un objeto contra otro, no se crea carga en este proceso. El estado de electrificación se debe a una *transferencia* de carga de uno de los objetos hacia el otro. Uno adquiere parte de la carga negativa en tanto que el otro adquiere la misma cantidad de carga, pero positiva. Por ejemplo, cuando una barra de vidrio es frotada con seda, como se aprecia en la figura 1.3, la seda adquiere una carga negativa igual en magnitud a la carga positiva de la barra de vidrio. Hoy día se sabe, gracias a la comprensión de la estructura del átomo, que en el proceso de frotación se transfieren electrones del vidrio a la seda. De manera similar, cuando el hule es frotado contra la piel, los electrones se transfieren al hule dándole una carga negativa neta y a la piel una carga positiva neta. Este proceso es consistente con el hecho de que la materia, neutra y sin carga, contiene tantas cargas positivas (protones en los núcleos de los átomos) como negativas (electrones). La conservación de la carga eléctrica de un sistema

Para la conservación de la carga, cada electrón añade cargas negativas a la seda, e igual carga positiva se queda en la varilla.

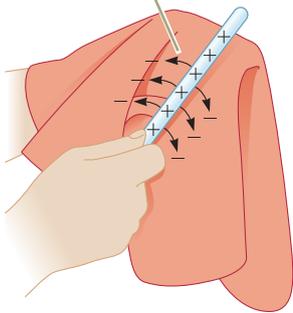


Figura 1.3 Cuando una varilla de vidrio es frotada con seda, se transfieren electrones del vidrio a la seda.

La carga eléctrica se conserva ►

aislado es como la conservación de la energía, del impulso y momento angular, pero no se identifica un modelo de análisis para este principio de conservación, ya que no se utiliza con bastante frecuencia en la solución matemática a los problemas.

En 1909, Robert Millikan (1868-1953), descubrió que las cargas eléctricas siempre se presentan como un entero múltiplo de una cantidad básica de carga e (véase la sección 1.3). En términos actuales se dice que la carga eléctrica q está **cuantizada**, y q es el símbolo de la variable para la carga; en otras palabras, la carga eléctrica existe en forma de “paquetes” discretos y se escribe $q = \pm Ne$, donde N es algún número entero. Otros experimentos en el mismo periodo demostraron que el electrón tiene una carga $-e$ y el protón una carga de igual magnitud, pero de signo contrario, $+e$. Algunas partículas, como el neutrón, no poseen carga.

E XAMEN RÁPIDO 1.1 Se colocan tres objetos, muy cerca uno del otro, dos al mismo tiempo. Cuando se juntan los objetos A y B, se repelen. Cuando se acercan los objetos B y C, también se repelen. De los siguientes enunciados, ¿cuál es el verdadero? **(a)** Los objetos A y C tienen cargas del mismo signo. **(b)** Los objetos A y C poseen cargas de signos opuestos. **(c)** Los tres objetos tienen cargas del mismo signo. **(d)** Uno de los objetos es neutro. **(e)** Es necesario llevar a cabo experimentos adicionales para determinar los signos de las cargas.

1.2 Objetos cargados mediante inducción

Es conveniente clasificar los materiales en función de la capacidad con que los electrones se mueven a través del material:

Los **conductores** eléctricos son aquellos materiales en los cuales algunos de los electrones son libres,¹ no están unidos a átomos y pueden moverse con libertad a través del material. Los **aislantes** eléctricos son aquellos materiales en los cuales todos los electrones están unidos a átomos y no pueden moverse libremente a través del material.

Materiales como el vidrio, hule y madera seca se incluyen en la categoría de aislantes eléctricos. Cuando estos materiales son frotados sólo la zona frotada se carga, y las partículas con carga no pueden moverse hacia otras zonas del material.

En contraste, materiales como el cobre, el aluminio y la plata son buenos conductores eléctricos. Cuando están con carga en alguna pequeña zona, la carga se distribuye de inmediato en toda la superficie del material.

Una tercera clase de materiales son los **semiconductores**, cuyas propiedades eléctricas se ubican entre las correspondientes a los aislantes y a los conductores. El silicio y el germanio son ejemplos muy conocidos de materiales semiconductores de uso común en la fabricación de una gran diversidad de chips electrónicos utilizados en computadoras, teléfonos celulares y estéreos. Las propiedades eléctricas de los semiconductores cambian, en varios órdenes de magnitud, a partir de la adición de cantidades controladas de ciertos átomos.

Para comprender cómo se carga un conductor por un proceso conocido como **inducción**, considere una esfera conductora neutra (sin carga) aislada de la tierra, como se muestra en la figura 1.4a. Los electrones se mueven libremente dentro del conductor. Estos electrones originalmente pertenecían a los átomos metálicos antes de que los átomos se combinaran en una muestra macroscópica. Por tanto, hay una red de átomos bloqueados en su lugar en el conductor, cada uno perdiendo un electrón. Los átomos ahora se llaman iones porque están cargados positivamente, en este caso, debido al electrón faltante. Suponemos que cada átomo libera un electrón, por lo que hay una cantidad igual de iones libres y electrones en la esfera si la carga en ella es exactamente cero. Cuando se le acerca una varilla de hule con

¹Un átomo de metal contiene uno o más electrones externos, que están débilmente unidos al núcleo. Cuando muchos átomos se combinan para formar un metal, los electrones libres son estos electrones externos, que no están unidos a ningún átomo. Estos electrones se mueven sobre el metal de manera similar a las moléculas de gas que se mueven en un contenedor.

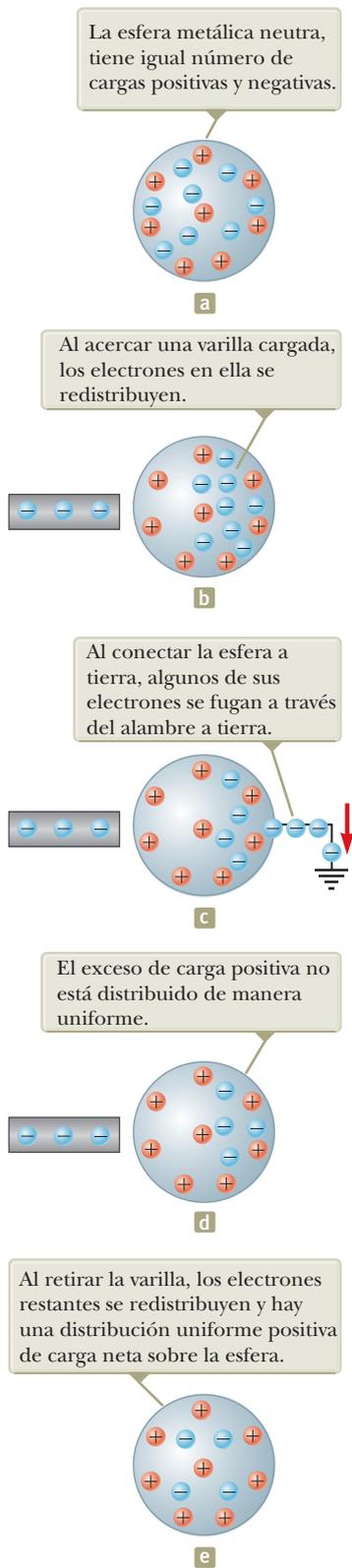


Figura 1.4 Carga de un objeto metálico mediante *inducción* (a) Esfera metálica neutra (b) Una varilla de hule cargada se coloca cerca de la esfera (c) la esfera es conectada a tierra (d) la conexión a tierra es removida (e) la varilla es removida.

carga negativa, los electrones en la región más cercana a la varilla experimentan una fuerza de repulsión y emigran al lado opuesto de la esfera. Esto provoca que la región de la esfera cercana a la varilla se quede con carga positiva a causa del menor número de electrones, como se observa en la figura 1.4b. (El lado izquierdo de la esfera de la figura 1.4b queda con carga positiva, *como si* se hubieran trasladado a dicha región cargas positivas, pero recuerde que sólo los electrones tienen la libertad para moverse.) Esto se presenta aun cuando la varilla no toque la esfera. Si el mismo experimento se realiza con un alambre conductor conectado de la esfera a la tierra (figura 1.4c), algunos de los electrones en el conductor son repelidos con tal fuerza, por la presencia de la carga negativa de la varilla, que salen de la esfera a través del alambre hacia la tierra. El símbolo \equiv al extremo en la figura 1.4c indica que el alambre está conectado a **tierra**, como un depósito, como la Tierra, que puede aceptar o proveer de electrones con libertad sin que se produzca un efecto significativo sobre sus características eléctricas. Si el alambre a tierra se retira (figura 1.4d), la esfera conductora se queda con un exceso de carga positiva *inducida*, ya que tiene menos electrones de los que necesita para cancelar la carga positiva de los protones. Cuando la varilla de hule se aleja de la esfera (figura 1.4e), esta carga positiva inducida se queda en la esfera desconectada de la tierra. Observe que durante este proceso, la varilla de hule no pierde su carga negativa.

Para cargar un objeto por inducción no es necesario que tenga contacto con el objeto que induce la carga, a diferencia de cuando un objeto se carga por frotamiento (por *conducción*), en donde sí se requiere el contacto entre ambos objetos.

Un proceso similar a la inducción en los conductores se presenta en los materiales aislantes. En la mayoría de las moléculas neutras, el centro de la carga positiva coincide con el centro de la carga negativa. Sin embargo, en presencia de un objeto con carga, estos centros en el interior de cada molécula, en un material aislante, se desplazan ligeramente, lo que resulta en que un lado de la molécula tenga una carga más positiva que el otro. Este realineamiento de la carga en el interior de las moléculas produce una capa de carga sobre la superficie del material aislante, como observa en la figura 1.5. La proximidad de las cargas positivas en la superficie del objeto y las cargas negativas en la superficie del aislante resulta en una fuerza de atracción entre el objeto y el aislante. Su conocimiento de inducción en los materiales aislantes, le ayuda a explicar por qué los trozos de poliestireno se pegan al gato en la figura 1.1b.

- E XAMEN RÁPIDO 1.2** Se colocan tres objetos, muy cerca uno del otro, dos al mismo tiempo. Cuando se juntan los objetos A y B, se atraen. Cuando se acercan los objetos B y C, se repelen. ¿Cuál de las siguientes opciones es necesariamente una verdad?: (a) Los objetos A y C tienen cargas del mismo signo. (b) Los objetos A y C tienen cargas de signo opuesto. (c) Los tres objetos tienen cargas del mismo signo. (d) Uno de los objetos es neutro. (e) Es necesario llevar a cabo experimentos adicionales para determinar las cargas de los objetos.

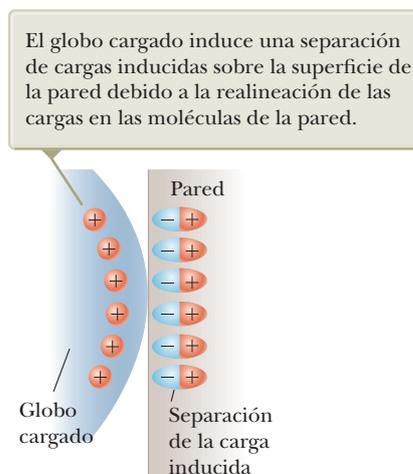


Figura 1.5 Un globo cargado es colocado cerca de una pared aislada.

1.3 Ley de Coulomb

Charles Coulomb midió las magnitudes de las fuerzas eléctricas entre objetos cargados; para hacerlo usó la balanza de torsión, que él inventó (figura 1.6). El principio de operación de la balanza de torsión es el mismo que el del aparato usado por Cavendish para medir la constante de gravitación, con esferas eléctricamente neutras remplazadas por esferas con carga. La fuerza eléctrica entre las esferas A y B de la figura 1.6 causa que se atraigan o se repelan, y el movimiento resultante provoca que la fibra suspendida se tuerza. Gracias a que el momento de torsión de recuperación de la fibra torcida es proporcional al ángulo de rotación de la fibra, una lectura de este ángulo da una medida cuantitativa de la fuerza eléctrica de atracción o de repulsión. Una vez cargadas las esferas por frotación, la fuerza eléctrica entre ambas se vuelve muy grande en comparación con la atracción gravitacional y, por tanto, esta última fuerza se puede ignorar.

A partir de los experimentos de Coulomb, se generalizan las propiedades de la fuerza eléctrica (algunas veces llamada *fuerza electrostática*) entre dos partículas cargadas estacionarias. Para ello se usa el término **carga puntual** que hace referencia a una partícula con carga de prueba. El comportamiento eléctrico de electrones y protones queda muy bien descrito si se representan como cargas puntuales. Debido a observaciones experimentales es posible encontrar que la magnitud de una fuerza eléctrica (a veces llamada *fuerza de Coulomb*) entre dos cargas puntuales está dada por la **ley de Coulomb**:

$$F_e = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (1.1)$$

donde k_e es una constante conocida como **constante de Coulomb**. En sus experimentos, Coulomb demostró que el valor del exponente de r era 2, con una incertidumbre de unos cuantos puntos porcentuales. Experimentos recientes han comprobado que el exponente es 2, con una incertidumbre de unas cuantas partes en 10^{16} . Los experimentos también muestran que la fuerza eléctrica, como la fuerza gravitacional, es conservativa.

El valor de la constante de Coulomb depende de la elección de las unidades. En el SI la unidad de carga es el **coulomb** (C). La constante de Coulomb k_e en unidades del SI tiene el valor

$$k_e = 8.987\,6 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad (1.2)$$

Además esta constante se expresa como

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.3)$$

donde la constante ϵ_0 (griega minúscula épsilon) se conoce como la **permitividad eléctrica del vacío**, cuyo valor es

$$\epsilon_0 = 8.854\,2 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2 \quad (1.4)$$

La unidad de carga más pequeña e conocida en la naturaleza,² es la carga de un electrón ($-e$) o de un protón ($+e$), con una magnitud de

$$e = 1.602\,18 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (1.5)$$

Por tanto, una carga igual a 1 C es aproximadamente igual a la carga de 6.24×10^{18} electrones o protones. Esta cantidad es muy pequeña en comparación con el número de electrones libres presentes en 1 cm^3 de cobre, que es del orden de 10^{23} . Aun así, 1 C es una cantidad de carga sustancial. En los experimentos en que se carga por frotación una varilla de hule o de vidrio, se obtiene una carga neta del orden de 10^{-6} C .

²En una partícula libre no ha sido posible detectar ninguna unidad de carga menor que e ; sin embargo, las teorías actuales proponen la existencia de partículas de nombre *quarks* con cargas iguales a $-e/3$ y $2e/3$. Aunque existen muchas evidencias experimentales de estas partículas en el interior de materia nuclear, jamás se han detectado quarks *libres*. En el capítulo 44 se explican otras propiedades de los quarks.

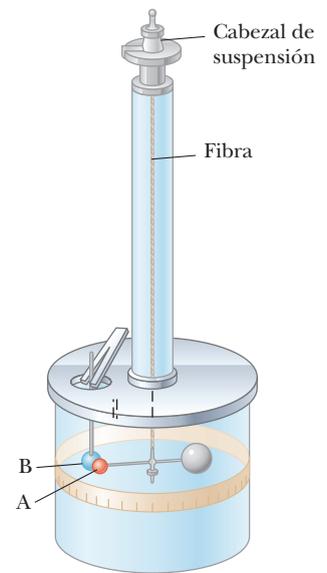


Figura 1.6 Balanza de torsión de Coulomb, utilizada para determinar la ley del cuadrado inverso para una fuerza eléctrica entre dos cargas.

◀ Ley de Coulomb

◀ Constante de Coulomb



Charles Coulomb Físico francés (1736-1806)

Las principales aportaciones a la ciencia de Charles Coulomb fueron en los campos de la electrostática y del magnetismo. En el transcurso de su vida, también investigó la resistencia de los materiales y determinó las fuerzas que afectan a objetos sobre vigas; así contribuyó al campo de la mecánica estructural. En el campo de la ergonomía, sus investigaciones lograron un discernimiento básico sobre las condiciones en que las personas y los animales pueden trabajar mejor.

TABLA 1.1 Carga y masa de electrones, protones y neutrones

Partícula	Carga (C)	Masa (kg)
Electrón (e)	$-1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$9.109\,4 \times 10^{-31}$
Protón (p)	$+1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$1.672\,62 \times 10^{-27}$
Neutrón (n)	0	$1.674\,93 \times 10^{-27}$

En otras palabras, sólo una fracción muy pequeña de la carga total disponible se ha transferido entre la varilla y el material contra el que se frota.

Las cargas y masas del electrón, el protón y el neutrón aparecen en la tabla 1.1. Tenga en cuenta que el electrón y el protón son idénticos en la magnitud de su carga, pero muy diferentes en la masa. Por otra parte, el protón y el neutrón son similares en masa, pero muy diferentes en carga.

Ejemplo 1.1 El átomo de hidrógeno

El electrón y el protón de un átomo de hidrógeno están separados (en promedio) por una distancia de aproximadamente 5.3×10^{-11} m. Encuentre las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional entre las dos partículas.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Considere que las dos partículas están separadas por la muy pequeña distancia dada en el enunciado del problema. Debido a que las partículas tienen tanto carga eléctrica como masa, habrá una fuerza eléctrica y una fuerza gravitacional entre ellas.

Categorizar Las fuerzas eléctrica y gravitacional se evaluarán a partir de leyes de fuerza universales, así que este ejemplo se clasifica como un problema de sustitución.

Use la ley de Coulomb para encontrar la magnitud de la fuerza eléctrica:

$$F_e = k_e \frac{|e||-e|}{r^2} = (8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Use la ley de gravitación universal de Newton y la tabla 1.1 (para las masas de las partículas) para encontrar la magnitud de la fuerza gravitacional:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2}$$

$$= (6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

La razón $F_e/F_g \approx 2 \times 10^{39}$. Por tanto, la fuerza gravitacional entre partículas atómicas con carga es despreciable cuando se compara con la fuerza eléctrica. Observe las similitudes entre la ley de Newton de gravitación universal y la ley de Coulomb de fuerzas eléctricas. Aparte de la magnitud de fuerzas entre partículas elementales, ¿cuál es la diferencia fundamental entre las dos fuerzas?

Cuando se relaciona con la ley de Coulomb, es necesario recordar que la fuerza es una cantidad vectorial que deberá ser tratada como corresponde. La ley de Coulomb, expresada en forma vectorial para una fuerza eléctrica ejercida por una carga q_1 sobre una segunda carga q_2 , rescrita como $\vec{\mathbf{F}}_{12}$, es

Forma vectorial de la ley de Coulomb ►

$$\vec{\mathbf{F}}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12} \quad (1.6)$$

donde $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ es un vector unitario dirigido de q_1 hacia q_2 , como se puede observar en la figura 1.7a. Ya que la fuerza eléctrica obedece a la tercera ley de Newton, la fuerza eléctrica ejercida por q_2 sobre q_1 es igual en magnitud, pero en sentido opuesto a la fuerza ejercida por q_1 sobre q_2 ; es decir, $\vec{\mathbf{F}}_{21} = -\vec{\mathbf{F}}_{12}$. Por último, en la ecuación 1.6, es

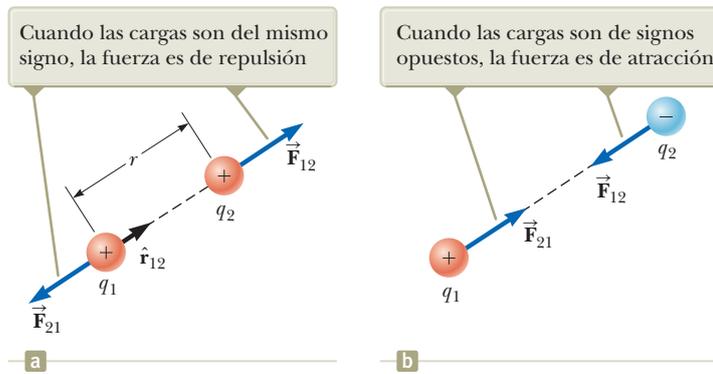


Figura 1.7 Dos cargas puntuales separadas por una distancia r ejercen una fuerza sobre la otra que se da por la ley de Coulomb. La fuerza \vec{F}_{21} ejercida por q_2 sobre q_1 es igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza \vec{F}_{12} ejercida por q_1 sobre q_2 .

claro que si q_1 y q_2 son del mismo signo, como se observa en la figura 1.7a, el producto q_1q_2 es positivo y la fuerza eléctrica sobre una partícula está dirigida lejos de la otra. Si q_1 y q_2 son de signos opuestos, como se muestra en la figura 1.7b, el producto q_1q_2 es negativo y la fuerza eléctrica de una partícula está dirigida hacia la otra. Estos signos indican la dirección *relativa* de la fuerza, pero no la dirección *absoluta*. Un producto negativo indica que se trata de una fuerza de atracción y un producto positivo indica una fuerza de repulsión. La dirección *absoluta* de la fuerza sobre una carga depende de la posición de la otra carga. Por ejemplo, si el eje de las x está a lo largo de las dos cargas en la figura 1.7a, el producto q_1q_2 será positivo, pero \vec{F}_{12} apunta en la dirección positiva de x y \vec{F}_{21} en la dirección negativa de x .

Cuando hay más de dos cargas presentes, la fuerza que se ejerce entre cualquier par de cargas está dada por la ecuación 1.6. Debido a eso, la fuerza resultante de cualquiera de ellas está dada por un principio de superposición y es igual a la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por las otras cargas individuales. Por ejemplo, si están presentes cuatro cargas, la fuerza resultante ejercida por las partículas 2, 3 y 4 sobre la partícula 1 es de

$$\sum \vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

- EJAMEN RÁPIDO 1.3** El objeto A tiene una carga igual a $+2 \mu\text{C}$ y el objeto B una carga de $+16 \mu\text{C}$. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera respecto a las fuerzas eléctricas ejercidas sobre los objetos?
- (a) $\vec{F}_{AB} = -3\vec{F}_{BA}$ (b) $\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ (c) $3\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$ (d) $\vec{F}_{AB} = 3\vec{F}_{BA}$
 - (e) $\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$ (f) $3\vec{F}_{AB} = \vec{F}_{BA}$

Ejemplo 1.2 Encuentre la fuerza resultante

Considere tres cargas puntuales ubicadas en las esquinas de un triángulo rectángulo, como se muestra en la figura 1.8, donde $q_1 = q_3 = 5.0 \mu\text{C}$, $q_2 = -2.0 \mu\text{C}$ y $a = 0.100 \text{ m}$. Encuentre la fuerza resultante que se ejerce sobre q_3 .

SOLUCIÓN

Conceptualizar Piense en la fuerza neta sobre q_3 . Ya que la carga q_3 está cerca de otras dos cargas, experimentará dos fuerzas eléctricas. Estas fuerzas se ejercen en diferentes direcciones como se ve en la figura 1.8. Basado en las fuerzas mostradas en la figura, estime la dirección del vector fuerza neta.

Categorizar Ya que sobre la carga q_3 se ejercen dos fuerzas, este ejemplo se clasifica como un problema de suma vectorial.

Analizar Las direcciones de las fuerzas individuales ejercidas por q_1 y q_2 sobre q_3 se muestran en la figura 1.8. La fuerza \vec{F}_{23} que q_2 ejerce sobre q_3 es de atracción porque q_2 y q_3 tienen signos opuestos. En el sistema coordenado que se muestra en la figura 1.8, la fuerza de atracción \vec{F}_{23} es hacia la izquierda (en la dirección x negativa).

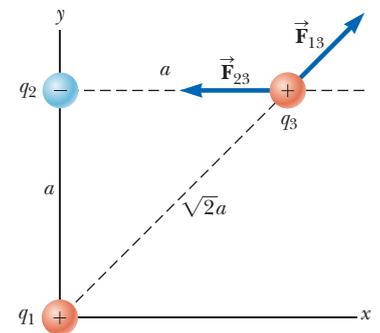


Figura 1.8 (Ejemplo 1.2) La fuerza que ejerce q_1 sobre q_3 es \vec{F}_{13} . La fuerza que ejerce q_2 sobre q_3 es \vec{F}_{23} . La fuerza resultante \vec{F}_3 que se ejerce sobre q_3 es la suma vectorial $\vec{F}_{13} + \vec{F}_{23}$.

1.2 continuación

La fuerza \vec{F}_{13} que q_1 ejerce sobre q_3 es de repulsión porque ambas cargas son positivas. La fuerza de repulsión \vec{F}_{13} forma un ángulo de 45° con el eje x . Las magnitudes de las fuerzas \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} se determinan usando las magnitudes absolutas de las cargas en la ecuación 1.1.

Use la ecuación 1.1 para encontrar la magnitud de \vec{F}_{23} :

$$F_{23} = k_e \frac{|q_2||q_3|}{a^2} = (8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(2.00 \times 10^{-6} \text{ C})(5.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0.100 \text{ m})^2} = 8.99 \text{ N}$$

Encuentre la magnitud de la fuerza \vec{F}_{13} :

$$F_{13} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(\sqrt{2} a)^2} = (8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(5.00 \times 10^{-6} \text{ C})(5.00 \times 10^{-6} \text{ C})}{2(0.100 \text{ m})^2} = 11.2 \text{ N}$$

Encuentre las componentes x y y de la fuerza \vec{F}_{13} .

$$F_{13x} = (11.2 \text{ N}) \cos 45.0^\circ = 7.94 \text{ N}$$

$$F_{13y} = (11.2 \text{ N}) \sin 45.0^\circ = 7.94 \text{ N}$$

Halle las componentes de la fuerza resultante que actúa sobre q_3 :

$$F_{3x} = F_{13x} + F_{23x} = 7.94 \text{ N} + (-8.99 \text{ N}) = -1.04 \text{ N}$$

$$F_{3y} = F_{13y} + F_{23y} = 7.94 \text{ N} + 0 = 7.94 \text{ N}$$

Expresé la fuerza resultante que actúa sobre q_3 en forma de vectores unitarios:

$$\vec{F}_3 = (-1.04\hat{i} + 7.94\hat{j}) \text{ N}$$

Finalizar La fuerza neta sobre q_3 es hacia arriba y a la izquierda en la figura 1.8. Si q_3 se mueve en respuesta a la fuerza neta, cambian las distancias entre q_3 y las otras cargas, de modo que la fuerza neta cambia. En consecuencia, si q_3 se mueve libremente se puede modelar como una partícula bajo una fuerza neta en tanto se reconozca que la fuerza que se ejerce sobre q_3 no es constante. Como un refuerzo a la memoria, si aumentamos los valores numéricos a tres cifras significativas, nos conducirá a operaciones como $7.94 \text{ N} + (-8.99 \text{ N}) = -1.04 \text{ N}$ por arriba. Si usted lleva todos los resultados intermedios a más cifras significativas verá que esta operación es correcta.

¿QUÉ PASARÍA SI? ¿Y si los signos de las tres cargas cambiaran a los signos opuestos? ¿Cómo afectaría al resultado para \vec{F}_3 ?

Respuesta La carga q_3 todavía sería atraída hacia q_2 y repelida de q_1 , con fuerzas de la misma magnitud. En consecuencia, el resultado final para \vec{F}_3 sería el mismo.

Ejemplo 1.3 ¿Dónde es cero la fuerza neta?

Tres cargas puntuales se encuentran a lo largo del eje x , como se muestra en la figura 1.9. La carga positiva $q_1 = 15.0 \mu\text{C}$ está en $x = 2.00 \text{ m}$, la carga positiva $q_2 = 6.00 \mu\text{C}$ está en el origen y la fuerza neta que actúa sobre q_3 es cero. ¿Cuál es la coordenada x de q_3 ?

SOLUCIÓN

Conceptualizar Ya que q_3 está cerca de otras dos cargas, experimenta dos fuerzas eléctricas. Sin embargo, a diferencia del ejemplo anterior, en este problema las fuerzas se encuentran a lo largo de la misma recta, como se indica en la figura 1.9. Como q_3 es negativa, mientras que q_1 y q_2 son positivas, las fuerzas \vec{F}_{13} y \vec{F}_{23} son de atracción. Debido a que q_2 es la carga más pequeña, la posición de q_3 en la que la fuerza es cero debería estar más cerca de q_2 que de q_1 .

Categorizar Ya que la fuerza neta sobre q_3 es cero, la carga puntual se modela como una partícula en equilibrio.

Analizar Escriba una expresión para la fuerza neta sobre la carga q_3 cuando está en equilibrio:

$$\sum \vec{F}_3 = \vec{F}_{23} + \vec{F}_{13} = -k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2} \hat{i} + k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2.00 - x)^2} \hat{i} = 0$$

Mueva el segundo término a la derecha de la ecuación e iguale los coeficientes del vector unitario \hat{i} :

$$k_e \frac{|q_2||q_3|}{x^2} = k_e \frac{|q_1||q_3|}{(2.00 - x)^2}$$

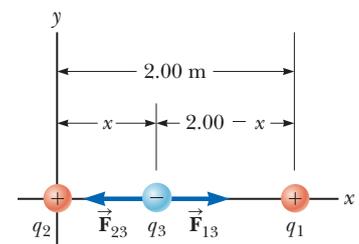


Figura 1.9 (Ejemplo 1.3) Tres cargas puntuales se colocan a lo largo del eje x . Si la fuerza resultante que actúa sobre q_3 es cero, la fuerza \vec{F}_{13} que ejerce q_1 sobre q_3 debe ser igual en magnitud y opuesta en dirección a la fuerza \vec{F}_{23} que q_2 ejerce sobre q_3 .

1.3 continuación

Elimine k_e y $|q_3|$ y reordene la ecuación:

$$(2.00 - x)^2 |q_2| = x^2 |q_1|$$

Tome la raíz cuadrada a ambos lados de la ecuación:

$$(2.00 - x) \sqrt{|q_2|} = \pm x \sqrt{|q_1|}$$

Resuelva la ecuación para x :

$$(1) \quad x = \frac{2.00 \sqrt{|q_2|}}{\sqrt{|q_2|} \pm \sqrt{|q_1|}}$$

Sustituya valores numéricos, eligiendo el signo positivo:

$$x = \frac{2.00 \sqrt{6.00 \times 10^{-6} \text{ C}}}{\sqrt{6.00 \times 10^{-6} \text{ C}} + \sqrt{15.0 \times 10^{-6} \text{ C}}} = 0.775 \text{ m}$$

Finalizar Tenga en cuenta que la carga móvil de hecho está más cerca de q_2 como predijimos en el paso de conceptualizar. Observe que el resultado en la ecuación (1) es independiente tanto de la magnitud como del signo de carga q_3 . Si q_3 aumenta, ambas fuerzas en la figura 1.9 aumentan en magnitud pero aún se cancelan. Si q_3 cambia de signo, ambas fuerzas cambian de dirección, pero aún se cancelan. La segunda raíz de la ecuación es (si elegimos el signo negativo) $x = -3.44 \text{ m}$. Esta es otra posición donde las *magnitudes* de las fuerzas sobre q_3 son iguales, aunque dichas fuerzas están en la misma dirección, por lo que no se anulan.

¿QUÉ PASARÍA SI? Suponga que q_3 se restringe a moverse sólo a lo largo del eje x . Desde su posición inicial en $x = 0.775 \text{ m}$, se jala una pequeña distancia a lo largo del eje x . Cuando se libera, ¿regresa al equilibrio o se jala aún más desde el equilibrio? Es decir, ¿el equilibrio es estable o inestable?

Respuesta Si q_3 se mueve hacia la derecha, \vec{F}_{13} se vuelve mayor y \vec{F}_{23} menor. El resultado es una fuerza neta hacia la derecha, en la misma dirección que el desplazamiento. Por tanto, la carga q_3 continuaría moviéndose hacia la derecha y el equilibrio es *inestable*.

Si q_3 se restringe a permanecer en una coordenada x fija pero se le permite moverse arriba y abajo en la figura 1.9, el equilibrio es estable. En este caso, si la carga se jala hacia arriba (o hacia abajo) y se libera, se mueve de regreso hacia la posición de equilibrio y oscila en torno a este punto. ¿La oscilación es armónica simple?

Ejemplo 1.4 Encuentre la carga sobre las esferas

Dos pequeñas esferas idénticas cargadas, cada una con una masa de $3.0 \times 10^{-2} \text{ kg}$, cuelgan en equilibrio como se muestra en la figura 1.10a. La longitud de cada cuerda es 0.150 m y el ángulo θ es 5.0° . Encuentre la magnitud de la carga sobre cada esfera.

SOLUCIÓN

Conceptualizar La figura 1.10a ayuda a formar ideas de este ejemplo. Las dos esferas ejercen fuerzas de repulsión una sobre la otra. Si se mantienen cerca y se liberan, se mueven hacia afuera desde el centro y se establecen en la configuración de la figura 1.10a después de que las oscilaciones desaparecen debido a la resistencia del aire.

Categorizar La frase clave “en equilibrio” ayuda a modelar cada esfera como una *partícula en equilibrio*. Este ejemplo es similar a los problemas de partícula en equilibrio, con la característica agregada de que una de las fuerzas sobre una esfera es una fuerza eléctrica.

Analizar En la figura 1.10b se muestra el diagrama de cuerpo libre para la esfera de la izquierda. La esfera está en equilibrio bajo la aplicación de las fuerza \vec{T} de la cuerda, la fuerza eléctrica \vec{F}_e de la otra esfera y la fuerza gravitacional $m\vec{g}$.

A partir del modelo de la partícula en equilibrio, iguale a cero la fuerza neta en la esfera de la izquierda para cada componente:

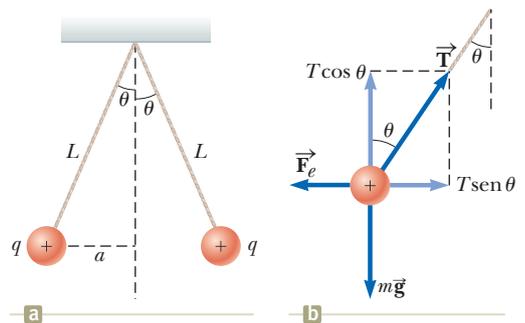


Figura 1.10 (Ejemplo 1.4) a) Dos esferas idénticas, cada una con la misma carga q , suspendidas en equilibrio. b) Diagrama de cuerpo libre para la esfera a la izquierda del inciso a).

$$(1) \quad \sum F_x = T \sin \theta - F_e = 0 \rightarrow T \sin \theta = F_e$$

$$(2) \quad \sum F_y = T \cos \theta - mg = 0 \rightarrow T \cos \theta = mg$$

$$(3) \quad \tan \theta = \frac{F_e}{mg} \rightarrow F_e = mg \tan \theta$$

Divida la ecuación 1) entre la ecuación 2) para encontrar F_e :
Evalúe numéricamente la fuerza eléctrica:

1.4 continuación

Use la geometría del triángulo rectángulo en la figura 1.10a para encontrar la correspondencia entre a , L y θ :

$$(4) \quad \sin \theta = \frac{a}{L} \rightarrow a = L \sin \theta$$

Resuelva la ley de Coulomb (ecuación 1.1) para la carga $|q|$ en cada esfera y sustituya de las ecuaciones 3 y 4:

$$|q| = \sqrt{\frac{F_e r^2}{k_e}} = \sqrt{\frac{F_e (2a)^2}{k_e}} = \sqrt{\frac{mg \tan \theta (2L \sin \theta)^2}{k_e}}$$

Sustituya valores numéricos:

$$|q| = \sqrt{\frac{(3.00 \times 10^{-2} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2) \tan(5.00^\circ) [2(0.150 \text{ m}) \sin(5.00^\circ)]^2}{8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2}}$$

$$= 4.42 \times 10^{-8} \text{ C}$$

Finalizar Si el signo de las cargas no se proporciona en la figura 1.10 no es posible determinarlo. De hecho, el signo de la carga no es importante. La situación es la misma ya sea que ambas esferas tengan carga positiva o carga negativa.

¿QUÉ PASARÍA SI? Suponga que su compañera de cuarto le propone resolver este problema sin la suposición de que las cargas son de igual magnitud. Ella afirma que la simetría del problema se destruye si las cargas no son iguales, de modo que las cuerdas formarían dos ángulos diferentes con la vertical y el problema sería mucho más complicado. ¿Cómo respondería?

Respuesta La simetría no se destruye y los ángulos no son diferentes. La tercera ley de Newton requiere que las magnitudes de las fuerzas eléctricas sobre las dos cargas sean iguales, sin importar la igualdad o desigualdad de las cargas. La solución al ejemplo aún es la misma: el valor de $|q|$ en la solución se sustituye por $\sqrt{|q_1 q_2|}$ en la nueva situación, donde q_1 y q_2 son los valores de las cargas en las dos esferas. La simetría del problema se destruiría si las *masas* de las esferas no fueran iguales. En este caso, las cuerdas formarían diferentes ángulos con la vertical y el problema sería más complicado.

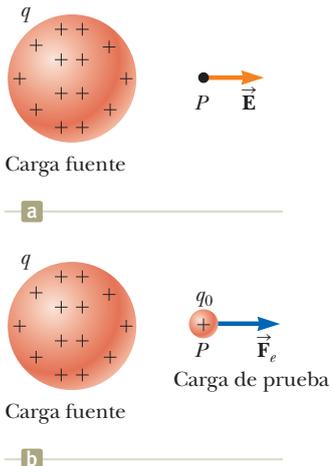


Figura 1.11 Una fuerza eléctrica entre dos partículas es un proceso de dos pasos: (a) Una carga fuente q crea un campo eléctrico en un punto P en el espacio. (b) Cuando se coloca otra carga q_0 en P , se siente el efecto de ese campo eléctrico como una fuerza eléctrica.

1.4 Modelo de análisis: partícula en un campo (eléctrico)

Las fuerzas de campo actúan a través del espacio y producen algún efecto, aun cuando no exista contacto físico entre los objetos que interactúan. Tal interacción puede ser modelada como un proceso de dos pasos: una partícula fuente establece un campo y luego una partícula cargada interactúa con el campo y experimenta una fuerza. El campo gravitacional \vec{g} en un punto en el espacio debido a una fuente particular fue definido, como igual a la fuerza gravitacional \vec{F}_g que actúa sobre una partícula de prueba de masa m dividida entre esa masa: $\vec{g} \equiv \vec{F}_g/m_0$. Entonces, la fuerza ejercida por el campo es $\vec{F} = m\vec{g}$.

El concepto de campo fue desarrollado por Michael Faraday (1791-1867) en el contexto de las fuerzas eléctricas y es de un valor tan práctico que en los siguientes capítulos se le da mucha atención. En este enfoque, se dice que existe un **campo eléctrico** en la región del espacio que rodea al objeto cargado: la **carga fuente**. La figura 1.11a muestra la carga fuente y el campo eléctrico resultante en un punto P en el espacio externo a la carga fuente. La presencia del campo eléctrico se puede detectar colocando una **carga de prueba** en el campo y anotando la fuerza eléctrica sobre ella, como se muestra en la figura 1.11b. Definimos el campo eléctrico debido a la carga fuente en la ubicación de la carga de prueba la fuerza eléctrica sobre la carga de prueba *por unidad de carga*, o, para mayor claridad, **el vector del campo eléctrico** \vec{E} en un punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica \vec{F}_e , que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en ese punto, dividida entre la carga de prueba:³

Definición de campo eléctrico ►

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0} \quad (1.7)$$

³Cuando use la ecuación 1.7, debe suponer que la carga de prueba q_0 es lo suficientemente pequeña como para no perturbar la distribución de cargas responsable por el campo eléctrico. Si la carga de prueba es suficientemente grande, la carga sobre la esfera metálica se redistribuye y el campo eléctrico que establece es diferente del campo que se establece en ausencia de la carga de prueba mucho menor.

El vector \vec{E} está en unidades del SI, newtons por coulomb (N/C). La dirección de \vec{E} como se ve en la figura 1.11a está en la dirección de la fuerza que experimenta una carga positiva de prueba cuando es colocada en el campo como se muestra en la figura 1.11b. Observe que \vec{E} es el campo producido por una carga o distribución de carga separada de la carga de prueba; no es el campo producido por la propia carga de prueba, además observe que la existencia de un campo eléctrico es una propiedad de su fuente; la presencia de una carga de prueba no es necesaria para que el campo exista. La carga de prueba sirve como *detector* del campo eléctrico: existe un campo eléctrico en un punto si una carga de prueba en dicho punto experimenta una fuerza eléctrica.

Ahora, imagine que hemos establecido un campo eléctrico con una carga fuente y han revisado su valor en cada punto del espacio usando la ecuación 1.7.

Si se coloca una carga arbitraria q en un campo eléctrico \vec{E} , éste experimenta una fuerza eléctrica dada por

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (1.8)$$

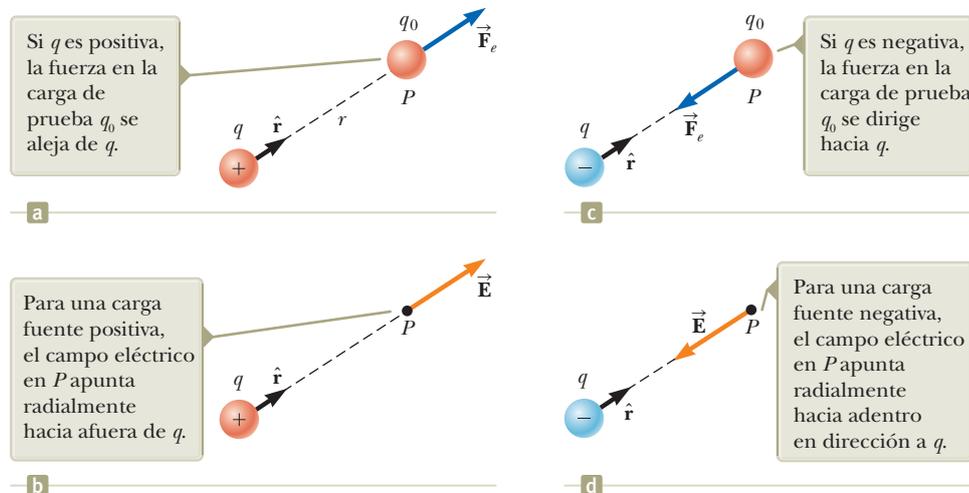
Esta ecuación es la representación matemática de la versión eléctrica del análisis del modelo de **partícula en un campo**. Si q es positiva, la fuerza tiene la misma dirección que el campo. Si q es negativa, la fuerza y el campo tienen direcciones opuestas. Observe la similitud entre la ecuación 1.8 y la ecuación correspondiente a la versión gravitacional de la partícula en un modelo de campo, $\vec{F}_g = m\vec{g}$. Una vez que conoce la magnitud y la dirección del campo eléctrico en un punto determinado, puede calcular la fuerza eléctrica ejercida sobre *cualquier* partícula cargada ubicada en ese punto mediante la ecuación 1.8.

Para determinar la forma del vector de un campo eléctrico, se coloca una carga de prueba q_0 en el punto P , a una distancia r de la carga fuente q , como se observa en la figura 1.12a. Imagine el uso de la carga de prueba para determinar la dirección de la fuerza eléctrica y, por tanto, la dirección del campo eléctrico. De acuerdo con la ley de Coulomb, la fuerza ejercida por q sobre la carga de prueba es

$$\vec{F}_e = k_e \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

donde \hat{r} es un vector unitario con dirección de q hacia q_0 . En la figura 1.12a esta fuerza se aleja de la carga fuente q . Ya que el campo eléctrico en P , que es la posición de la carga de prueba, queda definido por la ecuación 1.7 $\vec{E} = \vec{F}_e/q_0$, el campo eléctrico en P establecido por q es

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (1.9)$$



► Fuerza eléctrica sobre una carga en un campo eléctrico

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 1.1

Sólo partículas La ecuación 1.8 sólo es válida para una *partícula* de carga q , es decir para un objeto de tamaño cero. Para un *objeto cargado* de tamaño finito en un campo eléctrico, el campo puede variar en magnitud y dirección de acuerdo con el tamaño del objeto, por lo que la ecuación de fuerza correspondiente puede ser más complicada.

Figura 1.12 (a), (c) Cuando una carga de prueba q_0 se coloca cerca de una fuente de carga q , la carga de prueba experimenta una fuerza. (b), (d) en un punto P cerca de una fuente de carga q , existe un campo eléctrico.

En esta sección, hemos discutido las similitudes entre el campo eléctrico y el campo gravitacional. Es importante observar una diferencia sutil entre las notaciones usadas para estos dos campos. El campo gravitacional, expresado en términos de una masa fuente, generalmente se configura por un objeto cuya masa es enorme en comparación con la de un objeto colocado en el campo. Por tanto, usamos el símbolo M_E para la fuente, mientras que en otras ecuaciones, usamos un símbolo separado m para la masa del objeto colocado en el campo. Sin embargo, en un campo eléctrico, la carga de la fuente del campo es a menudo similar en magnitud a la carga colocada en el campo. Por tanto, tendemos a usar el mismo símbolo q para ambos. En la figura 1.11 y la ecuación 1.9, q representa la carga fuente que configura el campo eléctrico. Sin embargo, en la ecuación 1.8, q representa la carga colocada en el campo eléctrico. Siempre que haya una posibilidad de confusión, usamos subíndices para diferenciar las cargas, como q_1 y q_2 . Si la carga fuente q es positiva, la figura 1.12b muestra la situación al eliminar la carga de prueba: la carga fuente establece un campo eléctrico en el punto P , alejándose de q . Si q es negativa, como en el caso de la figura 1.12c, la fuerza sobre la carga de prueba está dirigida hacia la carga fuente, por lo que el campo eléctrico en P está dirigido hacia la carga fuente, como en la figura 1.12d.

Para calcular el campo eléctrico en un punto P debido a un pequeño número de cargas puntuales, primero determine los vectores del campo eléctrico en P , uno por uno usando la ecuación 1.9 y en seguida súmelos en forma vectorial. En otras palabras, en cualquier punto P , el campo eléctrico total debido a un grupo de cargas fuente es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos de todas las cargas. Este principio de superposición aplicado a los campos se deduce de la suma vectorial de las fuerzas eléctricas. Por tanto, el campo eléctrico en el punto P debido a un grupo de cargas fuente se expresa como la suma vectorial

Campo eléctrico debido a un número finito de cargas puntuales ►

$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i \quad (1.10)$$

donde r_i es la distancia desde la i -ésima carga fuente q_i hasta el punto P y $\hat{\mathbf{r}}_i$ es un vector unitario dirigido de q_i hacia P .

En el ejemplo 1.6 se explora el campo eléctrico debido a dos cargas a partir del principio de superposición. El inciso (B) del ejemplo se concentra en un **dipolo eléctrico**, que se define como una carga positiva q y una carga negativa $-q$ separadas por una distancia $2a$. El dipolo eléctrico es un buen modelo de muchas moléculas, como el ácido clorhídrico (HCl). Los átomos y moléculas neutros se comportan como dipolos cuando se colocan en un campo eléctrico externo. Además, muchas moléculas, como HCl, son dipolos permanentes. En el capítulo 4 se explica el efecto de tales dipolos sobre el comportamiento de los materiales sujetos a campos eléctricos.

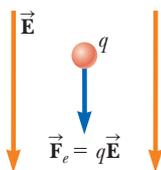
La fuerza eléctrica es la responsable de los tres fenómenos mencionados en la semblanza introductoria. A medida que los elementos de su ropa se frotan en la secadora giratoria, la carga eléctrica se transfiere de un elemento a otro y los elementos se unen cuando los saca de la secadora. Cuando se peina, el roce del peine contra el cabello hace que el peine se cargue. Cuando el peine cargado se coloca cerca de una corriente de agua, hay una fuerza atractiva entre el peine y los iones en el agua. En la impresión de inyección de tinta, ya sea en un centro industrial o en su impresora doméstica, las gotas de tinta reciben una carga y luego se proyectan hacia abajo, hacia la superficie que se va a imprimir. Cuando las gotas de tinta se mueven hacia un sitio que se va a imprimir, pasan libremente a través de una región libre de campos. Cuando las gotas de tinta se mueven hacia un sitio que no se va a imprimir, se enciende un campo eléctrico y la fuerza eléctrica sobre las gotas de tinta las desvía a un canal donde no contribuyen a la imagen impresa.

- E XAMEN RÁPIDO 1.4** Una carga de prueba de valor $+3 \mu\text{C}$ está en un punto P donde un campo eléctrico externo es dirigido hacia la derecha con una magnitud de $4 \times 10^6 \text{ N/C}$. Si la carga de prueba se reemplaza con otra de magnitud $-3 \mu\text{C}$, ¿qué le sucede al campo eléctrico externo en P ? (a) no se ve afectado, (b) invierte su dirección, (c) cambia de un modo que no puede ser determinado.

MODELO DE ANÁLISIS de partícula en un campo (eléctrico)

Imagine un objeto cargado que llamamos *carga fuente*. La fuente de carga establece un **campo eléctrico** \vec{E} a través del espacio. Ahora imaginemos que una partícula con carga q se coloca en ese campo. La partícula interactúa con el campo eléctrico de manera que la partícula experimenta una fuerza eléctrica dada por

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (1.8)$$



Ejemplos:

- un electrón se mueve entre las placas de deflexión de un osciloscopio de rayos catódicos y se desvía de su ruta original
- iones cargados experimentan una fuerza eléctrica desde el campo eléctrico en un selector de velocidad antes de entrar en un espectrómetro de masas (capítulo 7)
- un electrón se mueve alrededor del núcleo en el campo eléctrico establecido por el protón de un átomo de hidrógeno como el modelado por la teoría de Bohr
- un agujero en un material semiconductor se mueve en respuesta al campo eléctrico establecido mediante la aplicación de un voltaje al material

Ejemplo 1.5 Una gota de agua suspendida

Una gota de agua de masa de $3.00 \times 10^{-12} \text{ kg}$ se encuentra en el aire cerca del suelo durante un día de tormenta. Un campo eléctrico atmosférico de magnitud $6.00 \times 10^3 \text{ N/C}$ apunta verticalmente hacia abajo en la proximidad de la gota de agua. La gota permanece suspendida en reposo en el aire. ¿Cuál es la carga eléctrica de la gota?

SOLUCIÓN

Conceptualizar Imagínese la gota de agua flotando en reposo en el aire. Esta situación no es lo que se observa normalmente, así que algo debe mantener a la gota de agua suspendida.

Categorizar La gota puede ser modelada como una partícula y se describe por dos análisis de modelos asociados a los campos: *la partícula en un campo (gravitacional)* y *la partícula en un campo (eléctrico)*. Además, debido a que la gota está sujeta a las fuerzas, pero permanece en reposo, se describe también por el modelo de *partícula en equilibrio*.

Analizar Escriba la segunda ley de Newton de la partícula en el modelo de equilibrio en la dirección vertical:

$$(1) \sum F_y = 0 \rightarrow F_e - F_g = 0$$

Usando las dos partículas en los modelos de campo mencionados en el paso Categorizar, sustituya para las fuerzas en la ecuación (1), reconociendo que la componente vertical del campo eléctrico es negativa:

$$q(-E) - mg = 0$$

Resuelva para la carga de la gota de agua:

$$q = -\frac{mg}{E}$$

Sustituya los valores numéricos:

$$q = -\frac{(3.00 \times 10^{-12} \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)}{6.00 \times 10^3 \text{ N/C}} = -4.90 \times 10^{-15} \text{ C}$$

Finalizar Tomando nota de la unidad más pequeña de la carga libre en la ecuación 1.5, la carga de la gota de agua es un gran número de estas unidades. Observe que la *fuerza* eléctrica es hacia arriba para equilibrar la fuerza gravitacional hacia abajo. El planteamiento del problema afirma que el campo eléctrico es en dirección hacia abajo. Por tanto, la carga que se encuentra por encima es negativa de modo que la fuerza eléctrica es opuesta a la dirección del campo eléctrico.

Ejemplo 1.6 Campo eléctrico debido a dos cargas

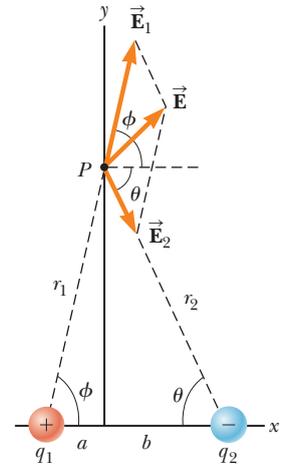
Las cargas q_1 y q_2 se ubican en el eje x , a distancias a y b , respectivamente, del origen, como se muestra en la figura 1.13.

(A) Encuentre las componentes del campo eléctrico neto en el punto P , que está en la posición $(0, y)$.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Compare este ejemplo con el ejemplo 1.2. Ahí, sumó los vectores fuerza para encontrar la fuerza neta sobre una partícula cargada. En este caso, sume los vectores de campo eléctrico para encontrar el campo eléctrico neto en un punto en el espacio. Si una partícula cargada se coloca en P , podría usar la partícula en un modelo de campo para encontrar la fuerza eléctrica sobre la partícula.

Figura 1.13 (Ejemplo 1.6) El campo eléctrico total en P es igual a la suma vectorial \vec{E} , 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 .



Categorizar Tenemos dos cargas fuente y deseamos encontrar el campo eléctrico resultante, de modo que se puede clasificar este ejemplo como uno en el que se puede usar el principio de superposición representado por la ecuación 1.10.

Analizar Encuentre la magnitud del campo eléctrico en P debido a la carga q_1 :

$$E_1 = k_e \frac{|q_1|}{r_1^2} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2}$$

Encuentre la magnitud del campo eléctrico en P debido a la carga q_2 :

$$E_2 = k_e \frac{|q_2|}{r_2^2} = k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2}$$

Escriba los vectores de campo eléctrico para cada carga en forma de vector unitario:

$$\vec{E}_1 = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} \cos \phi \hat{i} + k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} \sin \phi \hat{j}$$

$$\vec{E}_2 = k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} \cos \theta \hat{i} - k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} \sin \theta \hat{j}$$

Escriba las componentes del vector de campo eléctrico neto:

$$(1) \quad E_x = E_{1x} + E_{2x} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} \cos \phi + k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} \cos \theta$$

$$(2) \quad E_y = E_{1y} + E_{2y} = k_e \frac{|q_1|}{a^2 + y^2} \sin \phi - k_e \frac{|q_2|}{b^2 + y^2} \sin \theta$$

(B) Evalúe el campo eléctrico en el punto P en el caso especial de que $|q_1| = |q_2|$ y $a = b$.

SOLUCIÓN

Conceptualizar La figura 1.14 muestra la situación en este caso especial. Observe la simetría en la situación y que la distribución de carga ahora es un dipolo eléctrico.

Categorizar Ya que la figura 1.14 es un caso especial del caso general que se muestra en la figura 1.13, este ejemplo se clasifica como uno en el que se puede tomar el resultado de la parte (A) y sustituir los valores apropiados de las variables.

Analizar En función de la simetría de la figura 1.14, evalúe las ecuaciones (1) y (2) de la parte (A) con $a = b$, $|q_1| = |q_2| = q$, y $\phi = \theta$:

$$(3) \quad E_x = k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \cos \theta + k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \cos \theta = 2k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \cos \theta$$

$$E_y = k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \sin \theta - k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \sin \theta = 0$$

De la geometría en la figura 1.14, evalúe $\cos \theta$:

$$(4) \quad \cos \theta = \frac{a}{r} = \frac{a}{(a^2 + y^2)^{1/2}}$$

Sustituya la ecuación (4) en la ecuación (3):

$$E_x = 2k_e \frac{q}{a^2 + y^2} \left[\frac{a}{(a^2 + y^2)^{1/2}} \right] = k_e \frac{2aq}{(a^2 + y^2)^{3/2}}$$

1.4 continuación

(C) Encuentre el campo eléctrico debido al dipolo eléctrico cuando el punto P está a una distancia $y \gg a$ desde el origen.

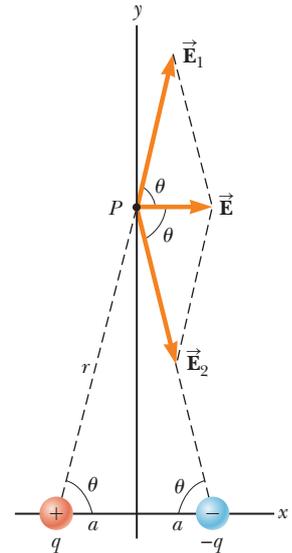
SOLUCIÓN

En la solución a la parte (B), ya que $y \gg a$, ignore a^2 en comparación con y^2 y escriba la expresión para E en este caso:

$$(5) \quad E \approx k_e \frac{2aq}{y^3}$$

Finalizar De la ecuación (5) se ve que, en los puntos alejados de un dipolo, pero a lo largo de la bisectriz perpendicular de la línea que une las dos cargas, la magnitud del campo eléctrico producido por el dipolo varía como $1/r^3$, mientras que el campo que varía más lentamente de una carga puntual lo hace como $1/r^2$ (vea la ecuación 1.9). Esto es porque en puntos distantes los campos de las dos cargas de igual magnitud y signo opuesto casi se cancelan mutuamente. La variación $1/r^3$ en E para el dipolo también se obtiene para un punto distante a lo largo del eje x y para cualquier punto distante en general. En ambas partes (A) y (B), si se coloca una nueva carga q_1 en el punto P , la ecuación 1.8 puede usarse para encontrar la fuerza eléctrica sobre la carga: $\vec{F} = q_1 \vec{E} = q_1 E_x \hat{i} + q_1 E_y \hat{j}$

Figura 1.14 (Ejemplo 1.6) Cuando las cargas en la figura 1.13 son de igual magnitud y equidistantes del origen, la situación se vuelve simétrica, como se muestra en este caso.



1.5 Líneas de campo eléctrico

Con aplicación de la ecuación 1.7 se ha definido matemáticamente el campo eléctrico. Ahora debe explorar un medio para darle una representación gráfica. Una forma conveniente de visualizar los patrones de los campos eléctricos es el trazo de líneas conocidas como **líneas de campo eléctrico**, establecidas por primera vez por Faraday, las cuales relacionan el campo eléctrico con una región del espacio de la manera siguiente:

- El vector \vec{E} del campo eléctrico es tangente a la línea del campo eléctrico en cada punto. La dirección de la línea, indicada por una punta de flecha, es igual al vector del campo eléctrico. La dirección de la línea es la de la fuerza sobre una carga de prueba positiva colocada en el campo de acuerdo a la partícula en un modelo de campo.
- El número de líneas por unidad de área que pasan a través de una superficie perpendicular a dichas líneas es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en dicha región. En consecuencia, las líneas de campo estarán cercanas donde el campo eléctrico sea intenso y separadas donde el campo sea débil.

Estas propiedades se ilustran en la figura 1.15. La densidad de las líneas de campo a través de la superficie A es mayor que la densidad de las líneas a través de la superficie B. Debido a eso, la magnitud del campo eléctrico es más grande en la superficie A que en la superficie B. Además, si las líneas en diferentes ubicaciones apuntan en distintas direcciones el campo no es uniforme.

¿La correspondencia entre la intensidad del campo eléctrico y la densidad de las líneas de campo es consistente con la ecuación 1.9, la expresión que obtuvo para el valor E mediante la ley de Coulomb? Para responder esta pregunta, piense en una superficie esférica imaginaria de radio r concéntrica con una carga puntual. Por simetría, la magnitud del campo eléctrico será la misma en cualquier parte de la superficie de la esfera. El número de líneas N que emergen de la carga es igual al número que penetra en la superficie esférica. Por tanto, el número de líneas por cada unidad de área sobre la esfera es $N/4\pi r^2$ (donde el área de la superficie de la esfera es $4\pi r^2$). Ya que E es proporcional al número de líneas por unidad de área, E varía de la forma $1/r^2$; este resultado es consistente con la ecuación 1.9.

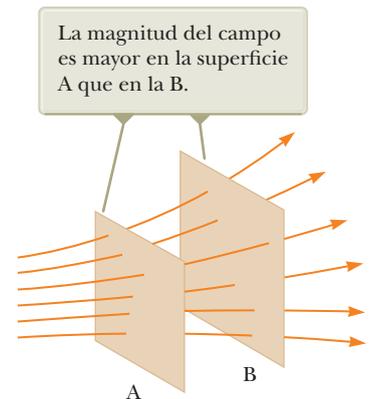


Figura 1.15 Líneas de campo eléctrico que atraviesan dos superficies.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 1.2

¡Las líneas de campo eléctrico no representan las trayectorias de las partículas! Las líneas de campo eléctrico representan el campo en diferentes ubicaciones. Con excepción de casos muy especiales, no representan la trayectoria de una partícula con carga que se mueve en un campo eléctrico.

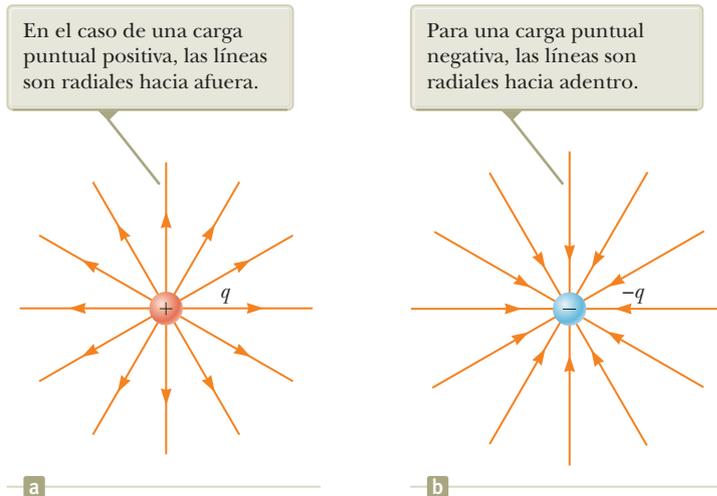


Figura 1.16 Líneas de campo eléctrico para una carga puntual. Observe que las figuras sólo muestran aquellas líneas que están en el plano de la página.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 1.3

Las líneas de campo eléctrico no son reales Las líneas de campo eléctrico no son objetos materiales. Son una representación gráfica para tener una descripción cualitativa del campo eléctrico. Puesto que sólo se puede dibujar un número finito de líneas que parten de cada carga, parecería que el campo fuera cuantizado y que sólo existe en ciertas partes del espacio. De hecho el campo es continuo existiendo en todos los puntos. Debe evitar obtener una impresión equivocada de líneas de campo que parten de un dibujo bidimensional cuya finalidad sólo es describir una situación tridimensional.

En la figura 1.16a se muestran las líneas de campo eléctrico causadas por el campo creado por una sola carga puntual positiva. Este dibujo en dos dimensiones sólo muestra las líneas de campo que están en el plano que contiene a la carga puntual. De hecho, las líneas están dirigidas radialmente alejándose de la carga en todas las direcciones; por tanto, en lugar de una “rueda” plana de líneas, como la que se muestra, es necesario imaginar toda una distribución esférica de líneas. Si se colocara una carga de prueba positiva en este campo sería repelida por la carga fuente positiva, las líneas se alejarían radialmente de la carga fuente. Las líneas de campo eléctrico que representan al campo generado por una sola carga puntual negativa están dirigidas hacia la carga (figura 1.16b). En ambos casos las líneas siguen una dirección radial y se extienden hasta el infinito. Observe que las líneas se acercan entre sí conforme se aproximan a la carga; ello indica que la fuerza del campo se incrementa conforme se acercan hacia la carga fuente.

Las reglas para dibujar las líneas de un campo eléctrico son las siguientes:

- Las líneas deben empezar en una carga positiva y terminar en una carga negativa. En caso de que haya un exceso en cualquier carga, algunas líneas empezarán o terminarán en el infinito.
- El número de líneas dibujadas que salen de una carga positiva o se acercan a una carga negativa será proporcional a la magnitud de dicha carga.
- Dos líneas de campo no se pueden cruzar.

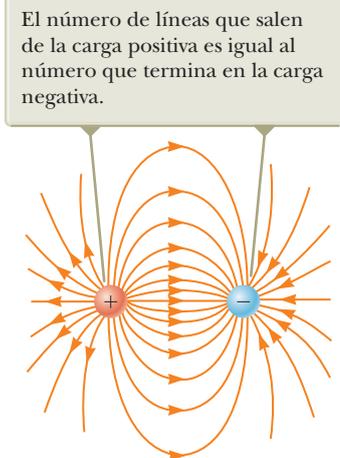


Figura 1.17 a) Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud y de signo opuesto (un dipolo eléctrico)

Elegimos el número de líneas de campo partiendo de cualquier objeto con carga positiva q_+ y $C|q_-|$ el número de líneas de campo que terminan en cualquier objeto con carga negativa q_- , donde C es una constante de proporcionalidad arbitraria. Una vez seleccionada C , queda fijo el número de líneas. Por ejemplo, en un sistema de dos cargas, si el objeto 1 tiene una carga Q_1 y el objeto 2 tiene una carga Q_2 , la razón del número de líneas en contacto con las cargas es $N_2/N_1 = |Q_2/Q_1|$. Las líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales de igual magnitud pero de signos opuestos (un dipolo eléctrico) se muestran en la figura 1.17. Ya que las cargas son de igual magnitud, el número de líneas que empiezan en la carga positiva debe ser igual al número que termina en la carga negativa. En lugares muy cercanos a las cargas, las líneas son prácticamente radiales como en el caso de una carga aislada. La elevada densidad de líneas entre las cargas indica una región con un campo eléctrico intenso.

La figura 1.18 muestra las líneas de campo eléctrico alrededor de dos cargas puntuales positivas iguales. De nuevo, las líneas son prácticamente radiales en puntos cercanos a cada carga, y el mismo número de líneas emerge de cada carga pues son de igual magnitud. Debido a que no hay cargas negativas disponibles, las líneas de campo eléctrico se alejan infinitamente. A una distancia considerable de las cargas, el campo es casi igual al de una sola carga puntual de magnitud $2q$.

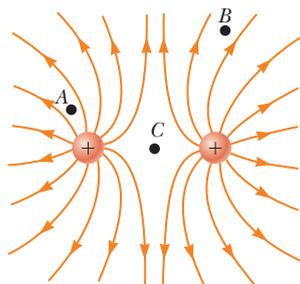


Figura 1.18 Líneas de campo eléctrico para dos cargas puntuales positivas. (Las ubicaciones A, B y C han sido analizadas en el Examen rápido 1.5.)

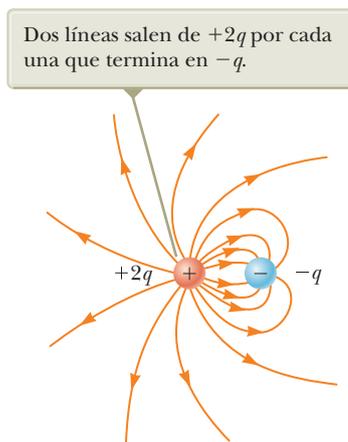


Figura 1.19 Líneas de campo eléctrico para una carga puntual $+2q$ y una segunda carga puntual $-q$.

Por último, en la figura 1.19 aparece el esbozo de las líneas de campo eléctrico asociadas con una carga positiva $+2q$ y una carga negativa $-q$. En este caso, el número de líneas que salen de $+2q$ es el doble de las que terminan en $-q$. En consecuencia, sólo la mitad de las líneas que abandonan la carga positiva llega a la carga negativa. La mitad restante termina en una carga negativa que se supone está en el infinito. Para distancias mucho mayores a la separación entre cargas, las líneas de campo eléctrico son equivalentes a las de una carga $+q$ única.

EXAMEN RÁPIDO 1.5 Clasifique las magnitudes del campo eléctrico en los puntos A, B y C de la figura 1.18 (empiece por la magnitud mayor).

1.6 Movimiento de partículas cargadas en un campo eléctrico uniforme

Cuando una partícula con carga q y masa m se coloca en un campo eléctrico \vec{E} , la fuerza eléctrica ejercida sobre la carga es $q\vec{E}$, de acuerdo con la ecuación 1.8 en la partícula en un modelo de campo. Si esta es la única fuerza ejercida sobre la partícula, es muy posible que se trate de la fuerza neta, la cual provoca que la partícula se acelere de acuerdo con el modelo de partícula bajo una fuerza neta. Por tanto,

$$\sum \vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}$$

y la aceleración de la partícula es,

$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m} \quad (1.11)$$

Si \vec{E} es uniforme (esto es, constante en magnitud y dirección) y la partícula se mueve libremente, la fuerza eléctrica sobre la partícula es constante y se puede aplicar el modelo de partícula bajo aceleración constante. Por tanto, la partícula en esta situación se describe bajo tres análisis de modelos: partícula en un campo, partícula bajo una fuerza neta y las partículas ¡en aceleración constante! Si la partícula tiene carga positiva, su aceleración está en dirección del campo eléctrico. Si la partícula tiene carga negativa, su aceleración será en dirección opuesta al campo eléctrico.

PREVENCIÓN DE RIESGOS OCULTOS 1.4

Sólo se trata de otra fuerza Las fuerzas y los campos eléctricos podrán parecerle conceptos abstractos. Sin embargo, una vez que se evalúa \vec{F}_e , es lo que provoca que una partícula se mueva, de acuerdo con los modelos de fuerzas y movimiento establecido. Teniendo esto presente podrá resolver los problemas de este capítulo.

Ejemplo 1.7 Aceleración de una carga positiva: dos modelos

Un campo eléctrico uniforme \vec{E} se dirige a lo largo del eje x entre placas paralelas de carga separadas una distancia d , como se muestra en la figura 1.20. Una carga puntual positiva q de masa m se libera desde el reposo en un punto \textcircled{A} junto a la placa positiva y acelera a un punto \textcircled{B} junto a la placa negativa.

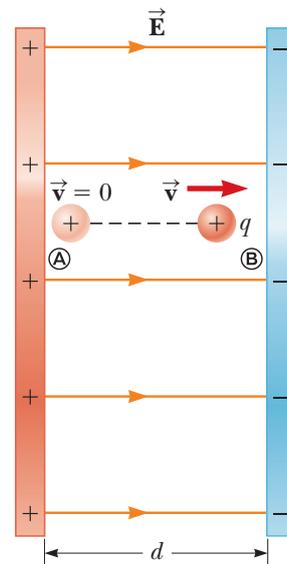
(A) Encuentre la rapidez de la partícula en \textcircled{B} al modelarla como una partícula bajo aceleración constante.

SOLUCIÓN

Conceptualizar Cuando la carga positiva se coloca en \textcircled{A} , experimenta una fuerza eléctrica hacia la derecha en la figura 1.20 debido al campo eléctrico dirigido hacia la derecha. Como resultado, se acelerará a la derecha y llegará a B con alguna rapidez.

Categorizar Ya que el campo eléctrico es uniforme, una fuerza eléctrica constante actúa sobre la carga. Por tanto, como se sugirió en el análisis precedente al ejemplo y al enunciado del problema, la carga puntual puede ser modelada como una *partícula cargada bajo aceleración constante*.

Figura 1.20 (Ejemplo 1.7) Una carga puntual positiva q en un campo eléctrico uniforme \vec{E} experimenta aceleración constante en la dirección del campo.



Analizar Exprese la velocidad de la partícula como función de la posición:

$$v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i) = 0 + 2a(d - 0) = 2ad$$

Resuelva para v_f y sustituya para la magnitud de la aceleración a partir de la ecuación 1.11:

$$v_f = \sqrt{2ad} = \sqrt{2 \left(\frac{qE}{m} \right) d} = \sqrt{\frac{2qEd}{m}}$$

(B) Encuentre la rapidez de la partícula en \textcircled{B} al modelarla como un sistema no aislado en términos de energía.

SOLUCIÓN

Categorizar El enunciado del problema dice que la carga es un *sistema no aislado* para la *energía*. La fuerza eléctrica, como cualquier otra, puede realizar trabajo sobre el sistema. A esta carga se le transfiere energía mediante el trabajo realizado por la fuerza eléctrica que se ejerce sobre la carga. La configuración inicial del sistema es cuando la partícula está en reposo en \textcircled{A} y la configuración final es cuando está moviéndose con alguna rapidez en \textcircled{B} .

Analizar Escriba la reducción adecuada de la ecuación de conservación de energía, para el sistema de la partícula cargada:

$$W = \Delta K$$

Sustituya el trabajo y las energías cinéticas con los valores adecuados para esta situación:

$$F_e \Delta x = K_{\textcircled{B}} - K_{\textcircled{A}} = \frac{1}{2} m v_f^2 - 0 \rightarrow v_f = \sqrt{\frac{2F_e \Delta x}{m}}$$

Sustituya para la magnitud de la fuerza eléctrica F_e del modelo de partícula en un campo y el desplazamiento Δx :

$$v_f = \sqrt{\frac{2(qE)(d)}{m}} = \sqrt{\frac{2qEd}{m}}$$

Finalizar La respuesta a la parte (B) es la misma que la de la parte (A), como se esperaba. Este problema puede ser resuelto con diferentes enfoques. Vimos las mismas posibilidades con problemas mecánicos.

Ejemplo 1.8 Un electrón acelerado

Un electrón entra a la región de un campo eléctrico uniforme, como se muestra en la figura 1.21, con $v_i = 3.00 \times 10^6$ m/s y $E = 200$ N/C. La longitud horizontal de las placas es $\ell = 0.100$ m.

(A) Encuentre la aceleración del electrón mientras está en el campo eléctrico.

1.8 continuación

SOLUCIÓN

Conceptualizar Este ejemplo difiere del precedente porque la velocidad de la partícula cargada es inicialmente perpendicular a las líneas de campo eléctrico. En el ejemplo 1.7, la velocidad de la partícula con carga siempre es paralela a las líneas de campo eléctrico. Como resultado, el electrón en este ejemplo sigue una trayectoria curva, como se muestra en la figura 1.21. El movimiento del electrón es el mismo que la de una partícula masiva proyectada horizontalmente en un campo gravitacional cerca de la superficie de la Tierra.

Categorizar El electrón es una *partícula en un campo (eléctrico)*. Dado que el campo eléctrico es uniforme, se ejerce una fuerza eléctrica constante sobre el electrón. Para encontrar la aceleración del electrón, se le modela como una *partícula bajo una fuerza neta*.

Analizar A partir del modelo de partícula en un campo, sabemos que la dirección de la fuerza eléctrica sobre el electrón es hacia abajo en la figura 1.21, opuesta a la dirección de las líneas de campo eléctrico. Por tanto, del modelo de partícula bajo una fuerza neta, la aceleración del electrón es hacia abajo.

La partícula bajo un modelo de fuerza neta que se utilizó para desarrollar la ecuación 1.11 en el caso en el que la fuerza eléctrica sobre una partícula es la única fuerza. Use esta ecuación para encontrar la componente y de la aceleración del electrón:

$$a_y = -\frac{eE}{m_e}$$

Sustituya valores numéricos:

$$a_y = -\frac{(1.60 \times 10^{-19} \text{ C})(200 \text{ N/C})}{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}} = -3.51 \times 10^{13} \text{ m/s}^2$$

(B) Si supone que el electrón entra al campo en el tiempo $t = 0$, encuentre el tiempo cuando abandona el campo.

SOLUCIÓN

Categorizar Como la fuerza eléctrica sólo actúa en la dirección vertical en la figura 1.21, el movimiento de la partícula en la dirección horizontal se puede analizar si la modela como una *partícula bajo velocidad constante*.

Analizar Resuelva la ecuación para el tiempo en el que el electrón llega a los bordes derechos de las placas:

$$x_f = x_i + v_x t \rightarrow t = \frac{x_f - x_i}{v_x}$$

Sustituya valores numéricos:

$$t = \frac{\ell - 0}{v_x} = \frac{0.100 \text{ m}}{3.00 \times 10^6 \text{ m/s}} = 3.33 \times 10^{-8} \text{ s}$$

(C) Si supone que la posición vertical del electrón cuando entra al campo es $y_i = 0$, ¿cuál es la posición vertical cuando abandona el campo?

SOLUCIÓN

Categorizar Ya que la fuerza eléctrica es constante en la figura 1.21, el movimiento de la partícula en la dirección vertical se analiza al modelarla como una *partícula bajo aceleración constante*.

Analizar Describa la posición de la partícula en cualquier tiempo t :

$$y_f = y_i + v_{yi}t + \frac{1}{2}a_y t^2$$

Sustituya valores numéricos:

$$\begin{aligned} y_f &= 0 + 0 + \frac{1}{2}(-3.51 \times 10^{13} \text{ m/s}^2)(3.33 \times 10^{-8} \text{ s})^2 \\ &= -0.0195 \text{ m} = -1.95 \text{ cm} \end{aligned}$$

Finalizar Si el electrón entra justo abajo de la placa negativa en la figura 1.21, y la separación entre las placas es menor que el valor recién calculado, el electrón golpeará la placa positiva.

Observe que hemos utilizado *cuatro* análisis de modelos para describir al electrón en varias partes de este problema. Hemos ignorado la fuerza gravitacional que actúa sobre el electrón, lo que representa una buena aproximación cuando se trata con partículas atómicas. Para un campo eléctrico de 200 N/C, la razón de la magnitud de la fuerza eléctrica eE a la magnitud de la fuerza gravitacional mg es del orden de 10^{12} para un electrón y del orden de 10^9 para un protón.

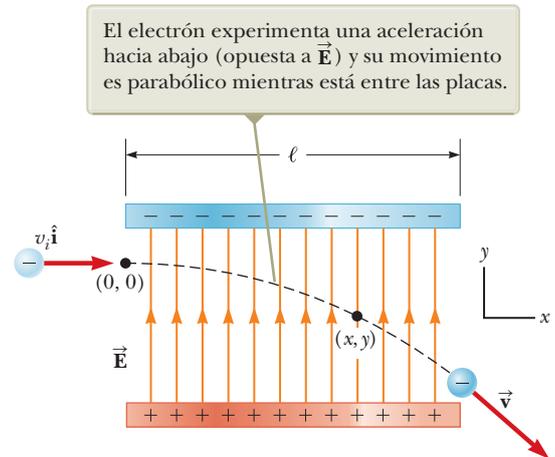


Figura 1.21 (Ejemplo 1.8) Un electrón se proyecta horizontalmente en un campo eléctrico uniforme producido por dos placas cargadas.

Resumen

Definiciones

El **campo eléctrico** \vec{E} en algún punto del espacio se define como la fuerza eléctrica \vec{F}_e que actúa sobre una pequeña carga de prueba positiva colocada en dicho punto, dividida entre la magnitud q_0 de la carga de prueba:

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0} \quad (1.7)$$

Conceptos y principios

Las **cargas eléctricas** tienen las siguientes importantes propiedades:

- Cargas de signos opuestos se atraen, y cargas del mismo signo se repelen.
- La carga total en un sistema aislado se conserva.
- La carga está cuantizada.

Los **conductores** son materiales donde los electrones se mueven libremente.

Los **aisladores** son materiales donde los electrones no se mueven con libertad.

La **ley de Coulomb** establece que la fuerza eléctrica que ejerce una carga puntual q_1 sobre una segunda carga puntual q_2 es

$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12} \quad (1.6)$$

donde r es la distancia entre las dos cargas y \hat{r}_{12} es un vector unitario dirigido de q_1 hacia q_2 . La constante k_e , que se llama **constante de Coulomb**, tiene el valor $k_e = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$.

A una distancia r de una carga puntual q , el campo eléctrico generado por la carga es

$$\vec{E} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (1.9)$$

donde \hat{r} es un vector unitario dirigido desde la carga hacia el punto en cuestión. El campo eléctrico se dirige radialmente hacia afuera desde una carga positiva y radialmente hacia adentro hacia una carga negativa.

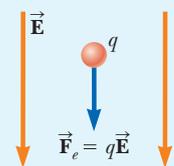
El campo eléctrico generado por un grupo de cargas puntuales se puede calcular usando el principio de superposición. Esto es el campo eléctrico total en algún punto es igual a la suma vectorial de los campos eléctricos de todas las cargas:

$$\vec{E} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \quad (1.10)$$

Análisis de modelos para la resolución de problemas

Partícula en un campo (eléctrico) Una partícula fuente con alguna carga eléctrica establece un campo eléctrico \vec{E} a través del espacio. Cuando se coloca una partícula con carga q en ese campo, experimenta una fuerza eléctrica dada por

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (1.8)$$



Piense, dialogue y comparta

Consulte el Prefacio para obtener una explicación de los iconos utilizados en este conjunto de problemas.

1. Usted y sus compañeros forman un grupo de practicantes en una compañía de nanotecnología. La empresa tiene problemas para fabricar nanopartículas de masa uniforme y se le ha pedido a su grupo que diseñe un sistema que determine la masa de una nanopartícula cargada haciéndola pasar a través de un campo eléctrico uniforme entre placas paralelas de manera idéntica a la del electrón en la figura 1.21. Todo

el sistema está ubicado en una cámara de vidrio vacía, por lo que la resistencia del aire no es un factor. La masa puede ser determinada por la cantidad de desviación de la nanopartícula a medida que atraviesa el campo justo debajo del borde izquierdo de la placa superior con una velocidad inicial en una dirección paralela a las placas. Su grupo trabaja bien juntos y diseña un par de placas paralelas de longitud, $\ell = 1.00 \text{ m}$, con la placa negativa situada a una distancia $d = 8.00 \text{ mm}$ verticalmente por encima de la placa positiva, con un campo eléc-

trico uniforme de magnitud $E = 2.00 \times 10^4 \text{ N/C}$ entre ellos dirigidos perpendicularmente a las placas. Usted dispone que las nanopartículas con una masa $m = 6.50 \times 10^{-13} \text{ g}$, con una carga de $-e$, se proyecten en el campo a una rapidez de $v = 30.0 \text{ m/s}$. Su fecha límite se acerca a medida que termina la construcción del dispositivo y no tiene tiempo para probarlo antes de que lo llamen para mostrar el dispositivo a los líderes del grupo de investigación. Cuando demuestra el dispositivo, ¿por qué su grupo está desconcertado?

2. **ACTIVIDAD** La figura TP1.2 muestra la *serie triboeléctrica*. Se usa con respecto a los experimentos de frotamiento descritos en la sección 1.1. Si un material de la parte superior de la lista se frota contra un material de una parte inferior, cada material se cargará eléctricamente de acuerdo con los signos arriba y abajo de la lista. Mientras más alejados estén dos materiales en la lista, mayor será la cantidad de carga eléctrica cuando se froten entre sí. Como ejemplo, considere la varilla de vidrio frotada con seda en la figura 1.3. Con base en la serie triboeléctrica que se muestra, ¿esperamos que la seda se cargue negativamente y el vidrio se carguen positivamente? Aunque ambos están en el lado positivo de la serie, el vidrio está mucho más arriba, por lo que toma una carga positiva y la seda se carga negativamente.

Para los objetos frotados debajo, identifique el signo de la carga en la varilla, tubería, tenedor o globo después de frotarlo con el otro material:

- Se frota una varilla de vidrio con un paño de lana.
- Se frota una varilla de vidrio con pelo de gato.
- Se frota un tubo de PVC con una toalla de papel.
- Se frota un tenedor de plata con un paño de nailon.
- Se frota una varilla de silicón con un paño de algodón.
- Se frota una varilla de hule o caucho rígido con una toalla de papel.
- Se frota un tubo de cobre con pelo de gato.
- Se frota una varilla de aluminio con una camisa de poliéster.
- Se frota un tubo de plomo con una toalla de papel.

- Se frota un globo de goma en su cabello.
- De las diez opciones (a)–(j), ¿cuál cree que representa la mayor transferencia de carga?

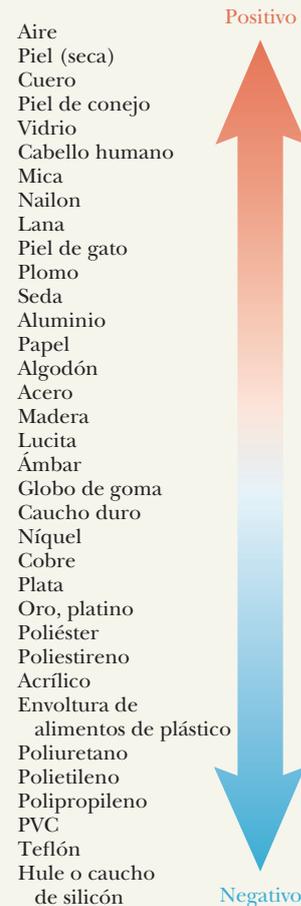


Figura TP1.2

Problemas

Consulte el Prefacio para obtener una explicación de los iconos utilizados en este conjunto de problemas.

SECCIÓN 1.1 Propiedades de las cargas eléctricas

- Determine con una precisión de tres dígitos significativos la carga y la masa de las siguientes partículas. *Sugerencia:* primero busque la masa de un átomo neutro en la tabla periódica de los elementos en el apéndice C. (a) Un átomo de hidrógeno ionizado, representado como H^+ (b) un átomo de sodio ionizado Na^+ (c) un ion de cloro Cl^- (d) un átomo de calcio doblemente ionizado $\text{Ca}^{++} = \text{Ca}^{2+}$ (e) el centro de una molécula de amoníaco modelada como un ion N^{3-} (f) átomos de nitrógeno ionizados al cuádruplo, N^{4+} encontrados en el plasma de una estrella caliente (g) el núcleo del átomo de nitrógeno (h) el ion molecular H_2O^- .

SECCIÓN 1.3 Ley de Coulomb

- (a) Calcule la magnitud de la fuerza eléctrica entre un ion Na^+ y uno de Cl^- separados por 0.50 nm . (b) ¿La respuesta

cambia si el ion de sodio fuera remplazado por Li^+ y el ion cloruro por Br^- ? Explique.

- En una nube de tormenta, puede haber cargas eléctricas de $+40.0 \text{ C}$ cerca de la parte superior y -40.0 C cerca de la parte inferior de la nube. Estas cargas están separadas por 2.00 kilómetros . ¿Cuál es la fuerza eléctrica sobre la carga de la parte superior?
- El premio Nobel, Richard Feynman (1918-1988), dijo en alguna ocasión que si dos personas se colocaban a la distancia de sus brazos una de la otra y cada una de ellas tuviera 1% más electrones que protones, la fuerza de repulsión entre ambos sería suficiente para levantar un “peso” equivalente al de toda la Tierra. Efectúe un cálculo de magnitudes para sustentar esta afirmación.
- Una carga puntual 7.50 nC se encuentra a 1.80 m de una carga puntual de 4.20 nC . (a) Calcule la magnitud de la fuerza eléctrica que una partícula ejerce sobre la otra. (b) ¿La fuerza es atractiva o repulsiva?

Esta décima edición de *Física. Electricidad y magnetismo* conserva los objetivos principales de las ediciones anteriores: presentar de manera clara y lógica los conceptos básicos y principios de electricidad y magnetismo; fortalecer la comprensión de esos temas mediante aplicaciones al mundo real y desarrollar habilidades para la resolución de problemas. Estos objetivos se logran a través de la presentación de ejemplos prácticos que muestran el papel de la física en otras disciplinas como ingenierías, química y medicina.

Algunas características de esta nueva edición son:

- **Nuevos problemas** ricos en contexto de evaluación que relacionan los problemas con el mundo real.
- **Nuevos problemas y actividades de trabajo colaborativo** que promueven la discusión grupal y la toma de decisiones.
- **Reorganización** de capítulos.
- **Nueva sección Imagine** como introducción a cada capítulo en la que se analizan fenómenos de la vida cotidiana.
- **Nuevas conexiones de apertura de capítulos** en las que se conectan los contenidos aprendidos en capítulos anteriores.

Al igual que en ediciones anteriores, esta obra continúa presentando ejemplos que refuerzan los conceptos aprendidos con base en el enfoque del modelo de análisis para la resolución de problemas. Este enfoque establece un conjunto estándar de situaciones que aparecen en la mayoría de los problemas de la física.



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

ISBN-13: 978-607-526-789-0
ISBN-10: 607-526-789-1



9 786075 267890