

# 10 Electricidad



© Pakowacz/Shutterstock

*Una tormenta de rayos produce voltajes muy altos, y crea corrientes eléctricas muy grandes y peligrosas.*

Vemos los efectos de la electricidad cuando sacamos chispas. En los días muy secos, podemos sentir un choque cuando tocamos un pomo de puerta metálico después de caminar sobre una alfombra. Si miramos con atención, vemos saltar una chispa entre nuestra mano y el pomo. Aunque pueden sorprendernos, las chispas no nos dañan. Por otra parte, la naturaleza produce chispas muy prolongadas y peligrosas durante las tormentas eléctricas. ¿Qué determina la magnitud de las chispas?

---

(Consulte la respuesta a esta pregunta en la página 195.)

---

Los griegos antiguos sabían que el ámbar, la savia fosilizada de un árbol que en la actualidad se usa en joyería, tenía la interesante capacidad de atraer pedazos de fibra y cabello después que se frotaba con una piel. Éste era un modo de reconocer un objeto que estaba electrificado. En la terminología moderna, decimos que el objeto está **cargado**. Esto no explica lo que es una **carga**, pero es un modo útil de denominar esta condición.

En 1600, el científico inglés William Gilbert publicó una obra pionera, *De Magnete*, en la cual señalaba que este efecto eléctrico no era una propiedad aislada del ámbar, sino una propiedad mucho más general de la materia. Los materiales como las gemas, el vidrio y el lacre también pueden cargarse. Frotar entre sí dos objetos hechos de diferentes materiales era el modo más común de cargar un objeto. De hecho, se cargan ambos objetos.

Después de Gilbert, muchos experimentadores se dedicaron a investigar la electricidad. Sin embargo, la pregunta de lo que sucede cuando un objeto gana o pierde esta propiedad eléctrica sigue sin respuesta. Una respuesta moderna incluiría palabras como *electrón* o *protón*. Pero debemos tener cuidado para no simplemente reemplazar con palabras o frases nuevas las antiguas. Para responder esta pregunta por completo y, por lo tanto, ampliar nuestra visión del mundo, necesitamos examinar con atención nuestro mundo eléctrico.

## Propiedades eléctricas

En un esfuerzo por explicar la electricidad, Gilbert propuso la existencia de un fluido eléctrico en ciertos tipos de objetos. Sugirió que frotar un objeto retiraba una parte de este fluido y lo dejaba en la región que rodeaba al objeto. La corriente provocada por el fluido al regresar al objeto atraía trozos de fibra hacia el objeto. Aunque muchos otros fenómenos eléctricos no podían explicarse con esta idea, fue el primer intento para modelar los procesos invisibles fundamentales que provocaban los efectos eléctricos.

Durante más de un siglo se avanzó muy poco. En la década de 1730 se demostró que la carga de un objeto se transfería a un objeto distante si se conectaba con cables metálicos, pero no con hilos de seda. Los materiales capaces de transferir una carga se llaman **conductores**; los que no la transfieren se denominan no conductores, o **aislantes**. Se descubrió que los metales, el cuerpo humano, la humedad, y algunas otras sustancias eran conductores.

El descubrimiento de que la humedad es un conductor explica por qué los efectos eléctricos varían de un día a otro. Es normal que experimente choques más intensos en el invierno, cuando la humedad natural es baja. En los días más húmedos, la humedad en el aire que rodea su cuerpo disipa rápido cualquier carga que adquiere al arrastrar sus pies.

Los camiones con combustible se conectan a tierra para eliminar la carga acumulada por el combustible cuando fluye por las mangueras.



Muchos objetos cargados deben colgarse de aislantes como hilos de seda o bases de plástico, o pierden rápidamente sus cargas en la tierra. De hecho, hablamos de **aterrizar** un objeto para asegurar que no está cargado. Otros objetos mantienen sus cargas sin estar aislados. Cuando cargamos una barra de plástico al frotarla con una tela, la carga permanece en la barra incluso si la asimos. Pero nuestros cuerpos son conductores. ¿Por qué la carga no fluye hacia tierra a través de nuestros cuerpos? Permanece en la barra porque ésta es un aislante, y la carga generada en un extremo permanece ahí. La carga puede eliminarse al pasar a nuestras manos por el extremo cargado. Cuando tocamos las regiones cargadas, las cargas fluyen a través de nuestros cuerpos hacia tierra.

Una barra metálica no puede cargarse al sostenerla en nuestras manos y frotarla contra una tela, porque el metal conduce la carga hacia nuestras manos. Una barra metálica se carga si se monta en una base aislante o si la sostenemos con un guante aislante; es decir, la barra debe aislarse de su entorno.

Incluso el flujo de un líquido por una tubería basta para cargar el líquido. Los camiones con combustible tienden a acumular una carga cuando despachan el combustible. Si esta carga se vuelve bastante grande, pueden ocurrir chispas y provocar un incendio o una explosión. Para evitar este peligro, se conecta un cable conductor del camión al suelo para permitir que la carga fluya hacia la tierra.

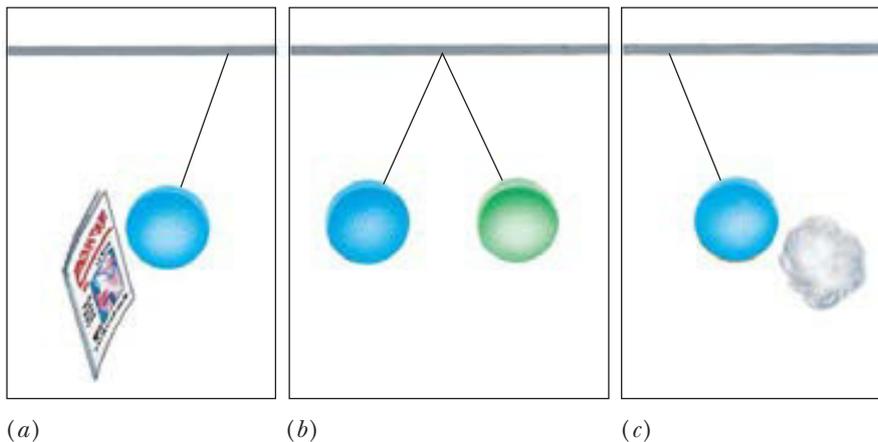
FÍSICA | **HÁGALO USTED MISMO**

Observe las chispas cuando efectúa una de estas acciones en una habitación a oscuras: (1) Separe algunas prendas recién sacadas de una secadora. (2) Jale rápido un poco de cinta transparente de su rollo. (3) Peine su cabello y acerque el peine a un objeto metálico.

**Dos tipos de cargas**

También desde principios de la década de 1730 se mencionó que los objetos cargados se repelían entre sí. Se creía que la electricidad, igual que la gravedad, sólo atraía. Ahora esto puede parecer extraño, porque los aspectos de atracción y repulsión de la electricidad son fáciles de demostrar. Si peina su cabello, el peine se carga y sirve para atraer pedazos de papel pequeños. Después de entrar en contacto con el peine, éste repele algunos de estos pedazos.

Este fenómeno se puede investigar con más atención mediante globos y pedazos de lana. Si frotamos un globo con un pedazo de lana, el globo se carga; atrae pedazos de papel pequeños y se pega en las paredes o el techo. Si colgamos este globo de un hilo y le acercamos objetos no cargados, los objetos atraen el globo (figura 10-1[a]). Todo parece un efecto atrayente.



**Figura 10-1** (a) Los objetos no cargados atraen un globo cargado. (b) Un globo con una carga idéntica repele un globo cargado. (c) La lana utilizada para cargarlo, atrae un globo cargado.

Si carga otro globo de la misma manera, comprueba el efecto nuevo: los dos globos se repelen entre sí (figura 10-1[b]). Debido a que creemos que dos objetos cualesquiera preparados del mismo modo se cargan de la misma manera, llegamos a la idea de que los objetos con una carga igual se repelen entre sí.

Cuando cargamos un objeto al frotarlo con otro, ambos objetos se cargan. Si examinamos los pedazos de lana, encontramos que también están cargados: atraen pedazos de papel.

**Pregunta** ¿Dos pedazos de lana se atraerán o repelerán entre sí?

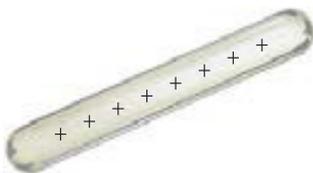
**Respuesta** Debido a que se han cargado de la misma manera, se repelerán entre sí.

Sin embargo, el pedazo de lana y el globo se atraen entre sí después de frotarse juntos (figura 10-1[c]). Si tienen el mismo tipo de carga, deben repelerse. Por lo tanto, llegamos a la idea de que deben existir dos tipos diferentes de carga y que los dos tipos se atraen. Estos experimentos se resumen así

Cargas iguales se repelen; cargas diferentes se atraen.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Realice los experimentos con la lana y los globos descritos en el texto.



**Figura 10-2** La carga en la barra de vidrio se llama positiva. Esto se indica mediante algunos signos de más.

## Conservación de la carga

Igual que Gilbert, Benjamin Franklin creía que la electricidad era un fluido único y que un exceso de este fluido provocaba un tipo de estado cargado, mientras que una deficiencia generaba el otro. Debido a que no podía saber cuál era cuál, nombró arbitrariamente un tipo de carga positiva y el otro tipo, negativa. Por convención, la carga de una barra de vidrio frotada con una película de seda o de plástico es positiva (figura 10-2); mientras que la de un ámbar o una barra de hule frotada con lana o piel, es negativa.

A primera vista, estos nombres parecen no tener una ventaja sobre otras opciones posibles, como blanco y negro, o yin y yang. Sin embargo, fueron más significativos. El uso de Franklin del modelo del fluido lo llevó a predecir que la carga debía conservarse. La cantidad de fluido eléctrico debe permanecer igual; sólo se transfiere de un objeto a otro. Si usted comienza con dos objetos no cargados y los frota entre sí, la cantidad de fluido en exceso en uno es igual a la deficiencia en el otro. En otras palabras, las cargas positivas y negativas son iguales. Con su sistema de números positivos y negativos, podemos sumarlos y ver que la carga total sigue siendo cero.

Ya no confiamos en el modelo de fluidos de Franklin; el modelo de fluidos se abandonó porque no pudo explicar observaciones experimentales posteriores. Sin embargo, la idea de Franklin acerca de la conservación de la carga se ha verificado con una muy alta precisión. Es una de las leyes fundamentales de la física. Esa forma generalizada, se expresa así

conservación de la carga ►

En un sistema aislado, se conserva la carga total.

En nuestra visión moderna del mundo de la física, todos los objetos están formados por electrones con carga negativa, protones con carga positiva y neutrones no cargados. La carga de un electrón y la carga de un protón tienen la misma magnitud. Un objeto no está cargado (o es neutro) porque tiene cantidades iguales

## FRANKLIN | El Newton estadounidense

Cuando Benjamin Franklin (1706-1790) llegó a París como embajador del Estados Unidos revolucionario, fue conocido entre los amables franceses como un famoso científico que “robó el centro al tirano y el rayo a los dioses”. Precisamente porque era el “Newton estadounidense”, fue el representante más eficaz que la joven nación en ciernes pudo enviar.

Nacido en Boston, Franklin obtuvo fortuna y reputación en Filadelfia; en esa época, la ciudad de habla inglesa más grande fuera de Londres. Fue una Cámara de Comercio de un solo hombre que aceptó a los recién llegados, incorporó jóvenes prometedores en su círculo de amigos, y ayudó a organizar todo, desde la primera sociedad filosófica en el país, hasta un distrito con calles iluminadas, un departamento de bomberos, y un hospital mental. Sus publicaciones sobre la electricidad lo hicieron miembro de la Royal Philosophical Society of London. (Newton había sido presidente de ella apenas 50 años antes.) Inventó el pararrayos y lo utilizó en su propia casa con gran efecto.

Franklin creía que la electricidad era un fluido que invadía todos los cuerpos en cantidades variables. Parecía que un cuerpo



Benjamin Franklin

© Georgios Kollidas/Dreamstime

buscaba conservar un equilibrio eléctrico. Si existía un déficit, el cuerpo estaba en un estado negativo, y la electricidad fluía dentro de él. Si había un excedente, la electricidad se escapaba. También creía que, a diferencia de la gravitación, que sólo es atrayente, la materia electrificada podía repeler o atraer otra materia electrificada. También podía atraer materia no electrificada.

Como otros en su época, también se interesó en el calor, la iluminación, el clima, y otros aspectos de la ciencia. Igual que Michael Faraday un poco después, Franklin no era un matemático, de modo que no podía dar forma definitiva a sus argumentos. Aún así, este reconocido patriota fue el más conocido de los primeros científicos estadounidenses y un ser humano fascinante.

—Pierce C. Mullen, *historiador y autor*

Fuentes: Carl Van Doren, *Benjamin Franklin* (Nueva York: Viking Press, 1938) y *The Autobiography of Benjamin Franklin* (Nueva York: Dover Publishing, Thrift Editions, 1966).

de cargas positivas y negativas, no porque no contenga cargas. Por ejemplo, los átomos son eléctricamente neutros porque tienen la misma cantidad de electrones y protones.

Los objetos cargados positivamente pueden tener un exceso de cargas positivas o una deficiencia de cargas negativas; es decir, un exceso de protones o una deficiencia de electrones. Los llamamos simplemente cargados positivamente porque los efectos eléctricos son iguales en ambas situaciones.

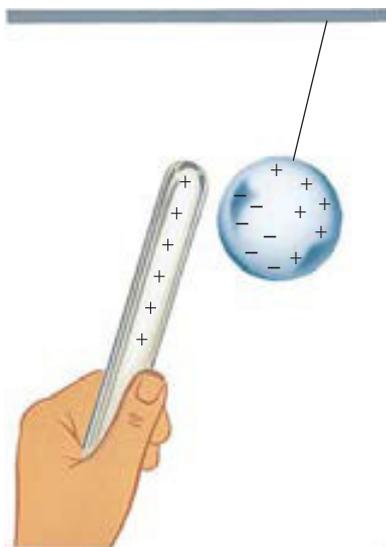
La visión moderna explica fácilmente la conservación de una carga al cargar objetos. La frotación simplemente provoca la transferencia de electrones de un objeto al otro; lo que un objeto pierde, el otro lo gana.

**Pregunta** Si quita un electrón de una moneda neutra y un electrón de un automóvil neutro, ¿cuál (de ser así) tiene la carga neta más grande?

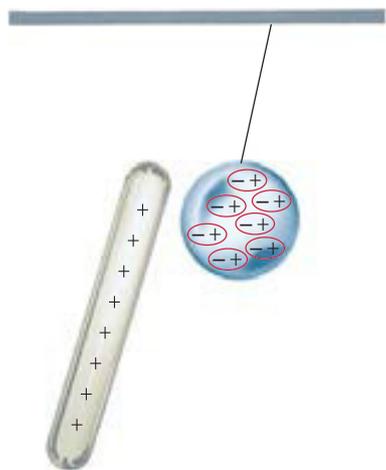
**Respuesta** En cualquier caso, cada protón se aparea con un electrón, excepto para uno. La carga neta en cualquier objeto sería la carga de un solo protón.

## Atracciones inducidas

La atracción es más común que la repulsión, porque los objetos cargados pueden atraer objetos *no cargados*. ¿Cómo explicamos la observación de que los objetos cargados atraen los objetos no cargados? Considere una barra cargada positivamente y una bola metálica no cargada. Cuando la barra se acerca a la bola, las cargas positivas de la barra atraen las cargas negativas y repelen las cargas positivas de la bola. Debido a que las cargas en la bola pueden moverse, esto produce un exceso de cargas negativas en el extremo cercano y un exceso de cargas positivas en el extremo lejano de la bola (figura 10-3). Como se conserva la carga, el exceso de carga negativa en un lado es igual al exceso de carga positiva en el otro. Los experimentos con globos muestran que la fuerza eléctrica varía con la distancia; la fuerza se debilita cuando los globos se alejan. Por lo tanto, la barra atrae la carga negativa de la bola más de lo que repele su carga positiva. Estas cargas inducidas producen una atracción neta de la bola no cargada hacia la barra.



**Figura 10-3** Una barra cargada atrae una bola metálica neutra debido a la separación inducida de las cargas.



**Figura 10-4** Un objeto aislante es atraído debido a la separación de las cargas dentro de las moléculas.

Los experimentos muestran que si la bola está hecha de un material aislante, todavía ocurre una atracción. En los aislantes, la carga no está en libertad de moverse a través del objeto, pero puede haber un movimiento a nivel molecular. Aunque las moléculas no estén cargadas, la presencia de la barra cargada puede inducir una separación de la carga dentro de la molécula. Otras moléculas son naturalmente más positivas en un extremo y más negativas en el otro. La barra positiva gira estas moléculas polares, de modo que sus extremos negativos se acerquen a la barra, como se aprecia en la figura 10-4. Una vez más, esto produce una fuerza atrayente neta.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

Pase un peine por su cabello y luego póngalo en un delgado chorro de agua de un grifo. ¿Cómo se explica lo que sucede?

Un ejemplo particularmente gráfico de la atracción de un aislante no cargado se presenta en la figura 10-5. Una tabla larga de dos por cuatro se equilibra sobre el vidrio de un reloj para que la tabla esté en libertad de girar. Cuando se acerca una barra cargada a un extremo, la fuerza atrayente resultante produce una torsión que hace girar la tabla.

**Pregunta** Suponiendo que la tabla de dos por cuatro fue atraída por una barra cargada positivamente en el ejemplo anterior, ¿en cuál dirección giraría si se usara una barra cargada negativamente?

**Respuesta** Giraría en la misma dirección. La interacción entre cualquier objeto cargado y uno no cargado siempre es atrayente.

Ahora podemos regresar al peine cargado que atrajo y luego repelió pedazos de papel. Al principio, los pedazos de papel no están cargados. El peine los atrae por medio de una carga inducida. Cuando los pedazos de papel tocan el peine, adquieren parte de la carga del peine y son repelidos, porque el peine y el papel tienen cargas con el mismo signo y las cargas iguales se repelen entre sí.

### Razonamiento defectuoso



Su maestra demuestra que una barra de vidrio cargada atrae el polo sur de un imán en barra. Después pide al grupo que prediga lo que ocurrirá cuando la barra de vidrio cargada se acerca al polo norte del imán. El mejor estudiante del grupo contesta, "La barra de vidrio está cargada positivamente, de modo que el polo sur del imán debe estar cargado negativamente. Sé que un polo norte atraerá un polo sur, de modo que los polos nortes de los imanes deben estar positivamente cargados. Predigo que la barra de vidrio repelerá el polo norte del imán".

Entonces su maestra efectúa el experimento y demuestra que la barra de vidrio atrae el polo norte. Después presenta que una barra de hule negativamente cargada también atrae ambos polos del imán, lo que demuestra que el imán debe ser eléctricamente neutro. Es evidente que el mejor estudiante de la clase cometió un error en su razonamiento. **¿Cuál es?**

**Respuesta** Una atracción eléctrica entre dos objetos sólo indica que cuando menos uno de ellos está cargado. El grupo ya sabía que la barra de vidrio estaba cargada, de modo que la primera demostración no indica nada acerca de la carga (en caso de tenerla) del imán. Si la barra cargada hubiera repelido uno de los polos del imán, hubiera indicado que el imán estaba cargado. Sin embargo, los imanes de barra normalmente no están cargados y sólo los atrae una barra cargada.



**Figura 10-5** La fuerza atrayente de una barra cargada hace girar una tabla normal de dos por cuatro equilibrada sobre un plato curvo.

## El electroscopio

En casi todos los experimentos, transferimos muy pocas cargas, de modo que la atracción o repulsión total es pequeña, comparada con la atracción de la gravedad. Detectar que un objeto está cargado se vuelve difícil a menos que sea muy ligero; como los pedazos de papel o un globo. Resolvemos esta dificultad con un dispositivo llamado *electroscopio*, el cual nos ofrece un resultado que se observa con facilidad cuando está cargado. Al acercar el objeto en cuestión al electroscopio, podemos deducir si está cargado o no, por el efecto que tiene sobre el electroscopio.

Las características esenciales de un electroscopio son una barra metálica con una bola metálica en la parte superior y dos hojas metálicas muy delgadas sujetas en la parte inferior. La figura 10-6 presenta un electroscopio casero construido con



**Figura 10-6** Un electroscopio hecho con un matraz, una barra metálica y dos pedazos de hoja metálica delgadas.

**Figura 10-7** Cuando un electroscopio se carga mediante un contacto directo, tiene la misma carga que la barra.



un matraz de química. El envase de vidrio protege las hojas muy delgadas de las corrientes de aire y aísla eléctricamente las hojas y la barra del entorno.

Si el electroscopio no está cargado, las hojas cuelgan hacia abajo bajo la influencia de la gravedad. Cuando tocamos la bola del electroscopio con una barra cargada, la barra comparte una parte de su exceso de carga con el electroscopio. Las cargas fluyen de la barra al electroscopio porque las cargas en la barra se repelen entre sí y, por lo tanto, se distribuyen sobre la región más larga posible, la cual incluye la bola, la barra metálica y las hojas. Debido a que las hojas tienen el mismo tipo de carga, se repelen entre sí y se separan (figura 10-7). La separación de las hojas indica que el electroscopio está cargado; la magnitud de la separación es un indicio aproximado de la magnitud del exceso de carga. Esto ocurre cuando el electroscopio hace contacto con una barra positiva, al igual que con una negativa.

Cuando un objeto cargado toca un electroscopio, éste adopta el mismo tipo de carga que el objeto. Sin embargo, el electroscopio sólo muestra la presencia de una carga; no indica el signo. Podemos determinar el signo al acercar lentamente una barra con una carga positiva o negativa conocida hacia la bola del electroscopio cargado y al observar el movimiento de las hojas.

Por ejemplo, cuando una barra positiva se acerca al electroscopio, induce una redistribución de la carga en el electroscopio. Repele la carga positiva y atrae la negativa, provocando un aumento de la carga positiva (o una disminución en la carga negativa) de las hojas. Si las hojas al principio eran positivas, la carga positiva adicional haría que se alejaran más. Si las hojas al principio eran negativas, la carga positiva adicional cancelaría una parte de la carga negativa y las hojas se acercarían.

---

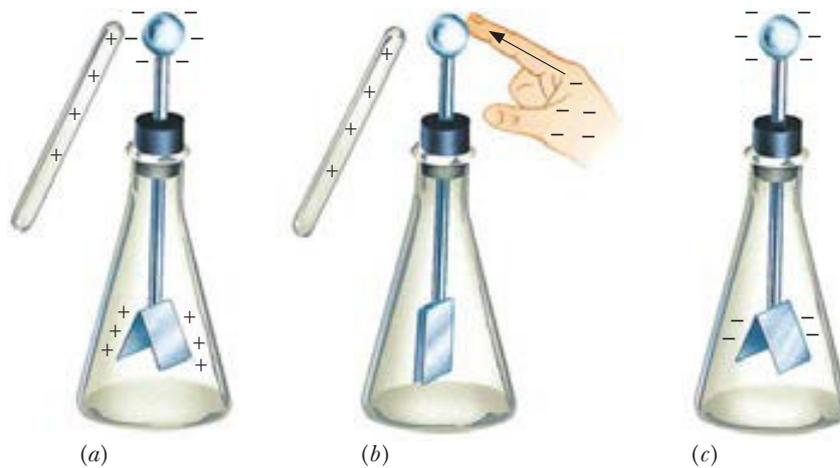
**Pregunta** Cuando una barra negativa se acerca lentamente a un electroscopio que al principio estaba cargado, las hojas se acercan. ¿Cuál es la carga en el electroscopio?

---

**Respuesta** La barra negativa repele las cargas negativas en la bola del electroscopio, lo que aumenta su concentración en las hojas. Debido a que esta carga negativa reduce la carga en las hojas, al principio deben haber sido positivas.

---

Una barra cargada también separará las hojas en un electroscopio no cargado. Cuando una barra positiva se acerca a un electroscopio no cargado, la bola de la parte superior atrae una parte de las cargas negativas del electroscopio; la bola tiene una carga negativa neta, y las hojas tienen una carga positiva neta, como se aprecia en la figura 10-8 (a). Observe que la carga neta en el electroscopio todavía es cero,



**Figura 10-8** (a) La barra cargada positivamente acercada al electroscopio atrae las cargas negativas a la bola, y deja las hojas con un exceso de carga positiva. (b) Al tocar la pelota con un dedo permite que las cargas negativas fluyan hacia el electroscopio, (c) y lo dejan con una carga negativa neta.

porque no lo tocamos con la barra. Sólo movimos las cargas en el electroscopio al acercar la barra cargada a la bola. Cuando se retira la barra cargada, las cargas se redistribuyen y las hojas caen. Ocurre un fenómeno similar con una barra negativa.

Imagine que mientras sostiene la barra positiva cerca del electroscopio, toca la bola con su dedo, igual que en la figura 10-8 (b). Una carga positiva grande en la barra atrae las cargas negativas, las cuales viajan desde el suelo por su cuerpo hasta el electroscopio. Si primero quita su dedo y después la barra, ahora el electroscopio está cargado y las hojas se repelen entre sí. Esto se conoce como cargar el electroscopio por inducción. El electroscopio adquiere una carga *opuesta* a la de la barra.

## La fuerza eléctrica

### ✓ MATEMÁTICAS

Las observaciones simples de la atracción o la repulsión de dos objetos cargados indican que la magnitud de la fuerza eléctrica depende de la distancia. Por ejemplo, un objeto cargado tiene más efectos sobre un electroscopio cuando se acerca. Pero necesitamos ser más precisos. ¿Cómo varía esta fuerza cuando cambia la separación entre dos objetos cargados? ¿Y cómo varía cuando se modifica la magnitud de la carga en los objetos?

En 1785, el físico francés Charles Coulomb midió los cambios en la fuerza eléctrica cuando variaba la distancia entre dos objetos y las cargas en ellos. Verificó que si se duplicaba la distancia entre dos objetos cargados (sin modificar las cargas), la fuerza eléctrica sobre cada objeto se reducía a una cuarta parte del valor inicial. Si se triplicaba la distancia, la fuerza se reducía a una novena parte, y así sucesivamente. Este tipo de comportamiento se conoce como una **relación cuadrada inversa**; *inversa* porque la fuerza se hace más pequeña cuando aumenta la distancia, *cuadrada* porque la fuerza cambia por el cuadrado del factor que se modifica la distancia.

Coulomb también demostró que reducir a la mitad la carga en uno de los objetos reducía la carga eléctrica a la mitad de su valor original. La reducción a la mitad de la carga en cada uno disminuyó la fuerza a una cuarta parte del valor original. Esto significa que la fuerza es proporcional al producto de las dos cargas.

**Pregunta** Coulomb no pudo medir una carga directamente. ¿Cuál técnica pudo haber usado para reducir la carga a la mitad de su valor original?

**Respuesta** Pudo haber empleado esferas conductoras idénticas y poner una esfera cargada en contacto con una neutra. Por simetría, cada esfera hubiera tenido la mitad de la carga original.

✓ El suplemento *Problem Solving* (Solución de problemas) ofrece una presentación extendida.

Estos dos efectos se combinaron en una sola relación conocida como la ley de Coulomb:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

En esta ecuación,  $q_1$  y  $q_2$  representan la magnitud de la carga en los objetos 1 y 2,  $r$  es la distancia entre sus centros, y  $k$  es una constante (conocida como la constante de Coulomb) cuyo valor depende de las unidades elegidas para la fuerza, la carga y la distancia.

Cada objeto siente la fuerza producida por el otro. Las fuerzas son vectores y actúan sobre la línea entre los centros de los dos objetos. La fuerza en cada objeto se dirige hacia el otro si las cargas tienen signos opuestos, y se alejan entre sí si las cargas tienen el mismo signo (figura 10-9). Debido a que las dos fuerzas se deben a la interacción entre los dos objetos, las fuerzas son un par acción-atracción. De acuerdo con la tercera ley de Newton, las fuerzas son iguales en magnitud, apuntan en direcciones opuestas, y actúan sobre objetos diferentes.

Debido a que, hasta el siglo XX, se desconocía la existencia de una carga fundamental elemental, por conveniencia se eligió la unidad de la carga eléctrica, el coulomb (C), para los circuitos eléctricos. (Más adelante definiremos formalmente el coulomb.) Al emplear el coulomb como la unidad de la carga, mediante un experimento se determina que el valor de la constante de Coulomb es

$$k = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

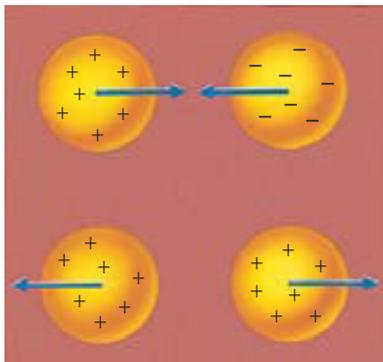
El coulomb es una unidad muy grande para las situaciones que hemos analizado. Por ejemplo, la fuerza entre dos esferas, en donde cada una tiene 1 coulomb de carga y están separadas por 1 metro, es

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left( 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1 \text{ C})(1 \text{ C})}{(1 \text{ m})^2} = 9 \times 10^9 \text{ N}$$

Ésta es una fuerza de 1 millón de toneladas.

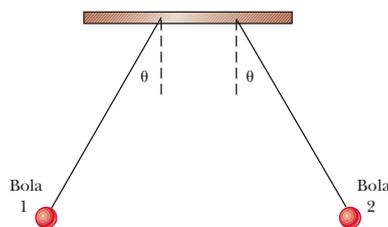
Las cargas que hemos analizado son mucho menores. Cuando arrastra sus zapatos sobre una alfombra, las cargas transferidas son alrededor de una millonésima de un coulomb. Pero incluso esta carga es muy grande comparada con la de un solo electrón o un protón. Ahora se sabe que el tamaño de la carga en un electrón o un protón es  $1.6 \times 10^{-19}$  coulombs. A la inversa, se requeriría una carga en  $6.24 \times 10^{18}$  protones (o electrones) para igualar una carga de 1 coulomb.

ley de Coulomb ►



**Figura 10-9** Las fuerzas sobre dos objetos cargados tienen la misma magnitud y direcciones opuestas, de acuerdo con la tercera ley de Newton.

constante de Coulomb ►



**Figura 10-10**

## Razonamiento defectuoso



La pregunta siguiente aparece en el examen final: “Dos bolas metálicas pequeñas idénticas cuelgan una junto a la otra desde hilos de seda. Ambas bolas recibieron la misma carga neta, de modo que se repelen entre sí, como en la figura 10-10. Si la carga neta en la bola 2 se reduce a la mitad, ¿el ángulo que hace la bola 1 con la vertical será más pequeño, igual, o más grande que el ángulo que hace la bola 2 con la vertical?”

Peter ofrece la respuesta siguiente: “La bola 2 todavía colgará en el mismo ángulo que antes. La carga en la bola 1 no ha cambiado, de modo que ejerce la misma fuerza sobre la bola 2. La bola 2 tiene la mitad de la carga, de modo que ejerce la mitad de la fuerza sobre la bola 1. Por lo tanto, la bola 1 colgará en un ángulo más pequeño que la bola 2.” **¿Debe Peter recibir un reconocimiento por este problema?**

**Respuesta** La ley de Coulomb satisface automáticamente la tercera ley de Newton. La fuerza que ejerce la bola 2 sobre la bola 1 debe tener la misma magnitud (y la dirección opuesta) a la fuerza que ejerce la bola 1 sobre la bola 2. La reducción a la mitad de la carga en la bola 2 disminuirá a la mitad la fuerza percibida por *cada* bola. Ambas bolas cuelgan en el mismo ángulo más pequeño.

## Electricidad y gravedad

### ✓ MATEMÁTICAS

La forma matemática de la ley de Coulomb es igual que la ley de la gravitación universal analizada en el capítulo 4. Por lo tanto, el dibujo de la figura 4-2, que ejemplifica que depende de la ley del cuadrado inverso sobre la distancia, también vale para la electricidad si se reemplaza la Tierra con un objeto cargado. Sin embargo, hay varias diferencias importantes entre la gravedad y electricidad que controlan las reglas de estas dos fuerzas en el universo.

Existen dos tipos de carga eléctrica; positiva y negativa. Las cargas opuestas se atraen y las diferentes se repelen. Sin embargo, sólo hay un tipo de masa. No existe la masa negativa, y la fuerza gravitacional nunca es repulsiva. Debido a la distribución posible de una carga inducida con dos tipos de carga, los materiales conductores pueden blindar una región de todas las fuerzas eléctricas externas. Suponga que construimos una habitación metálica grande. Si esta habitación se colocara cerca de una carga eléctrica grande, las cargas en las paredes metálicas se redistribuirían de tal modo que cancelarían el efecto de la carga externa para todos los lugares en la habitación. La cancelación sólo funciona porque hay dos tipos de carga eléctrica. Este resultado no es posible para las fuerzas gravitacionales; no puede crearse una cámara libre de gravitación, porque no existe una masa negativa. Las naves espaciales antigraavedad, aunque son un buen material para los escritores de ciencia ficción, no son posibles.

Otra diferencia entre la electricidad y la gravedad estriba en el comportamiento de los objetos en los campos respectivos. La fuerza gravitacional es proporcional a la masa de un objeto y, por lo tanto, los objetos de todos tamaños y composiciones tienen la misma aceleración en un campo gravitacional. Por ejemplo, todos los objetos tienen la misma aceleración en caída libre cerca de la superficie de la Tierra. En contraste, la fuerza eléctrica es proporcional a la carga en un objeto y *no* a la masa del objeto. Por lo tanto, los objetos cargados tienen aceleraciones distintas en un campo eléctrico. Por ejemplo, si liberáramos un protón y un electrón cerca de un objeto cargado, el electrón tendría una aceleración mucho más grande. Las fuerzas en el electrón y el protón tienen el mismo tamaño, pero la masa del electrón es mucho más pequeña, lo cual produce una aceleración mucho más grande. En este caso, la aceleración sería en dirección opuesta, porque las cargas tienen signos opuestos.

Por último, todas las cargas ocurren como múltiplos enteros de un tamaño fijo. Los experimentos han demostrado que las cargas en los electrones y los protones tienen el mismo tamaño. Las cargas en las partículas subatómicas comunes son de



La jaula metálica protege al profesor Sprott de la descarga de alto voltaje.



© Royalty-Free/Corbis

La fuerza eléctrica domina en la escala atómica, como en este cristal grande.



© NASA

La fuerza gravitacional domina en el Sistema Solar y más allá, como en esta galaxia.

este mismo tamaño o múltiplos enteros de este tamaño; las cargas pueden ser 2 o 3 veces la carga en el protón, pero nunca 1.5 veces esta carga. La masa también ocurre en grandes cantidades, pero hay muchos tamaños diferentes; por ejemplo, las masas del electrón, el protón y el neutrón. Éstas se pueden combinar en muchas maneras distintas y las masas totales no son múltiplos de una unidad de masa única.

Una consecuencia de estas diferencias son las distintas funciones que estas dos fuerzas desempeñan en nuestras vidas. La fuerza eléctrica es la fuerza dominante en el mundo atómico; determina las propiedades de los átomos y las moléculas. Por otra parte, la fuerza gravitacional domina en la escala macroscópica de las personas, los planetas y las galaxias. La razón de que la electricidad y la gravedad también funcionen en estos dos dominios es que los objetos macroscópicos esencialmente no están cargados; es decir, existen aproximadamente cantidades iguales de cargas positivas y negativas en casi todos los objetos grandes. Aunque es tremenda la fuerza atrayente total entre todas las cargas positivas en la Tierra y todas las cargas negativas en la Luna, es igual y opuesta a la fuerza repulsiva entre las cargas negativas en la Tierra y las cargas negativas en la Luna. La fuerza eléctrica neta es esencialmente cero debido a esta cancelación. Sin embargo, como sólo hay un tipo de masa, no hay nada para cancelar la mucho más débil fuerza gravitacional entre los átomos en la Tierra y los átomos en la Luna. De modo que cuando pasamos de las personas a los planetas y llegamos a las galaxias, la fuerza gravitacional se vuelve la fuerza dominante.

✓ **MATEMÁTICAS**

### SOLUCIÓN | Fuerzas gravitacional y eléctrica

Como ejemplo numérico, calculemos los tamaños de las fuerzas eléctrica y gravitacional entre un electrón y un protón en un átomo de hidrógeno. Suponemos primero que el electrón y el protón están separados por una distancia de  $5.29 \times 10^{-11}$  m y empleamos las masas y las cargas conocidas del electrón y el protón. (Véase la tabla de datos físicos al final del libro.)

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = \left( 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \right) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})(1.673 \times 10^{-27} \text{ kg})}{(5.29 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= 3.63 \times 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \left( 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5.29 \times 10^{-11} \text{ m})^2} 8.23 \times 10^{-8} \text{ N}$$

Por lo tanto, la fuerza eléctrica es más de  $10^{39}$  veces la intensidad de la fuerza gravitacional. (Eso es ¡mil sextillones de veces más grande!) Debido a que las dos fuerzas cambian de la misma manera cuando se modifica la separación del electrón y el protón, la separación no importa y la fuerza eléctrica siempre es así de más intensa.

### El campo eléctrico

✓ **MATEMÁTICAS**

De manera implícita, hemos supuesto que la fuerza entre dos cargas es el resultado de algún tipo de interacción directa: una especie de interacción a distancia. Este tipo de interacción es un poco inquietante porque no hay un mecanismo directo de impulso o atracción en el espacio interpuesto. Los efectos eléctricos son evidentes incluso en situaciones en las cuales existe un vacío entre las cargas.

En muchos casos, se comprueba que, en lo conceptual y computacional, es más sencillo separar en dos pasos distintos la interacción eléctrica que un objeto siente como resultado de otro. En primer lugar, uno de los objetos genera, en virtud de su carga, un **campo eléctrico** en cada punto en el espacio. En segundo lugar, otro objeto interactúa, en virtud de su carga, con el campo eléctrico para experimentar la fuerza. Las cargas eléctricas crean el campo eléctrico y ejercen fuerzas

sobre otras cargas eléctricas. Este método es similar al que aplicamos con la fuerza gravitacional casi al final del capítulo 4.

Si éste fuera el único propósito de la idea del campo, desempeñaría una función menor en nuestra visión del mundo de la física. De hecho, es probable que parezca que cambiamos una idea inquietante por otra. Sin embargo, cuando continuemos nuestros estudios, encontraremos que el campo eléctrico adopta una identidad propia. Como veremos en el capítulo 12, los campos eléctrico y magnético viajan por el espacio como ondas.

Definimos el campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , en cada punto en el espacio, como la fuerza ejercida sobre una carga positiva unitaria colocada en ese punto. Esto equivale al modo en que se definió el campo gravitacional, con la unidad de masa reemplazada por una carga positiva unitaria.

Debido a que la fuerza es una cantidad vectorial, el campo eléctrico es un campo de vector; tiene una magnitud y una dirección en cada punto en el espacio. Puede imaginar el espacio que rodea una carga positiva como un puerco espín de pequeñas flechas que apuntan hacia fuera, como en la figura 10-11. Las flechas más alejadas de la carga son más cortas para indicar que la fuerza es más débil ahí.

---

**Pregunta** ¿A qué se asemeja el campo eléctrico que rodea una carga negativa?

---

**Respuesta** Un campo eléctrico que rodea una carga negativa se ve igual que un campo eléctrico que rodea una carga positiva, excepto que todas las flechas están invertidas.

---

Los valores para un campo eléctrico real se miden con una carga de prueba. La unidad de carga que se ha utilizado es 1 coulomb. Ésta es una cantidad de carga muy grande, y si en realidad utilizáramos 1 coulomb como la carga de prueba, lo más probable es que moviera las cargas que generaron el campo, con lo cual perturbaría el campo. Por lo tanto, empleamos una carga mucho más pequeña, como 1 microcoulomb, y obtenemos el tamaño del campo al dividir la fuerza medida  $\mathbf{F}$  entre el tamaño  $q$  de la carga de prueba:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$$

Observe que las unidades de un campo eléctrico son newtons por coulomb (N/C).

Si conocemos los tamaños y las ubicaciones de las cargas que crean el campo eléctrico, también podemos calcular el valor del campo en cualquier punto de interés, al suponer que colocamos una carga de 1 coulomb en el lugar, y calculamos la fuerza de esta carga mediante la ley de Coulomb. Al hacer esto, podemos aprovechar el hecho de que cada carga actúa de modo independiente; los efectos simplemente se suman. Esto significa que hemos calculado la contribución de cada carga del campo y después sumamos estas contribuciones de manera vectorial.

Una vez que conocemos el valor del campo eléctrico en cualquier punto, podemos calcular la fuerza que experimentaríamos cualquier carga  $q$  si se colocara en ese punto:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}$$

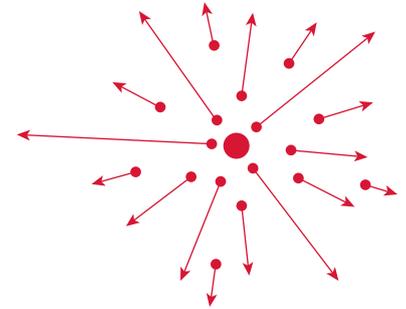
Esto se lee: "La fuerza de un objeto es igual a la carga neta  $q$  sobre el objeto por el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en el lugar del objeto."

Como ejemplo, supongamos que hemos generado un campo eléctrico uniforme que apunta hacia abajo y tiene una magnitud de 1000 newtons por coulomb. Si colocamos un objeto en este campo que tenga una carga positiva de 1 microcoulomb, el objeto experimentará una fuerza hacia debajo de

$$F = qE = (10^{-6} \text{ C}) \left( 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}} \right) = 10^{-3} \text{ N}$$

Si cambiamos la carga sobre el objeto, es muy fácil calcular la fuerza nueva; no tenemos que abordar las cargas que produjeron el campo eléctrico.

◀ campo eléctrico = fuerza sobre una carga positiva unitaria

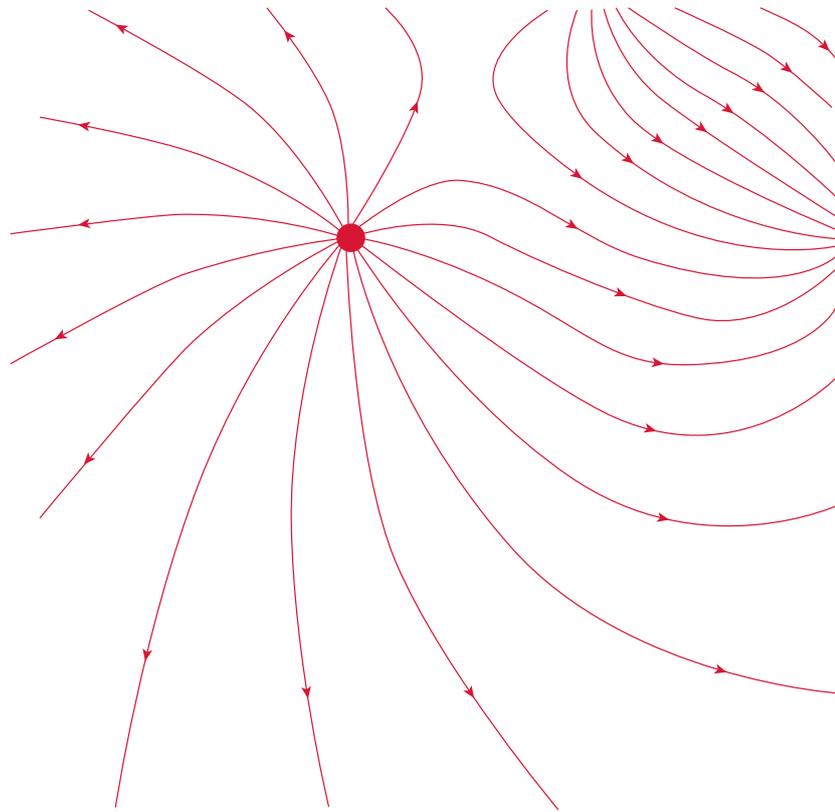


**Figura 10-11** Vectores de ejemplo de un campo eléctrico alrededor de una carga fuente positiva.

◀ campo eléctrico =  $\frac{\text{fuerza}}{\text{carga}}$

◀ fuerza eléctrica = carga  $\times$  campo eléctrico

**Figura 10-12** Las líneas del campo eléctrico representa el campo eléctrico total en una región del espacio.

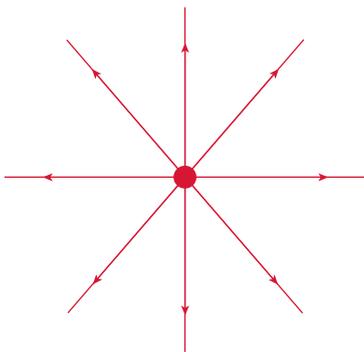


### Líneas del campo eléctrico

Si sólo nos interesa lo que ocurre en un punto único, es muy útil la representación del campo eléctrico. Sin embargo, se vuelve complicada si nos interesa una región del espacio, porque cada punto en el espacio puede tener un vector de campo eléctrico diferente asociado con él. Para dibujar esto, necesitaríamos dibujar un vector distinto (posiblemente diferente en magnitud y en dirección) en cada punto y éstos tenderían a superponerse. Para manejar esto, presentamos una representación alterna que emplea las **líneas del campo eléctrico**.

Imagine una región que contiene partículas cargadas fijas en un lugar y que crean un campo eléctrico en cada punto de la región. Ahora dibujamos una línea del campo eléctrico. Encuentre la dirección del campo eléctrico en un punto inicial y avance un pequeño paso en la dirección de este vector. En el punto nuevo, encuentre de nuevo la dirección del campo eléctrico y avance un paso pequeño en esta dirección. La continuación de este proceso crea una serie de puntos que conectamos con una línea uniforme. Ésta es una línea del campo eléctrico. El paso final es poner una pequeña flecha en la línea para indicar la dirección del viaje. El comienzo en un punto nuevo en esta región conduce a una nueva línea del campo eléctrico. Si hacemos esto desde suficientes puntos iniciales diferentes, obtenemos un ejemplo de las líneas por toda la región, como se aprecia en la figura 10-12.

Esto suena como un proceso largo y complicado; y lo es. Las buenas noticias es que a menudo aprendemos mucho mediante los diagramas cualitativos de las líneas de un campo eléctrico, lo cual es mucho más fácil que hacer los cálculos detallados. Podemos emplear nuestra intuición para dibujar las líneas de un campo eléctrico que rodean una carga aislada de una fuente positiva. Una carga de prueba positiva se repelería directamente de la carga fuente positiva, de modo que las líneas del campo eléctrico deben comenzar en la carga fuente y continuar de manera radial hacia fuera hasta el infinito, igual que la figura 10-13. En tal caso, el vector del campo eléctrico en cualquier punto en el espacio es tangente a la línea del campo eléctrico que atravesaría ese punto. Esto coincide con el dibujo de la figura 10-11 de los vectores del campo eléctrico para una carga fuente positiva. (Si



**Figura 10-13** Las líneas del campo eléctrico producidas por una carga aislada de una fuente positiva.

nos interesa un punto que no está sobre una de las líneas del campo eléctrico que hemos dibujado, podemos determinar la dirección aproximada de una línea que atraviesa ese punto al analizar las líneas circundantes.)

Observe que las líneas del campo eléctrico de la figura 10-13 comienzan en lugares equidistantes alrededor de la carga fuente. Cuando se dibujan de esta manera las líneas del campo eléctrico, nos ofrecen información visual acerca de la magnitud del vector del campo eléctrico en cualquier punto. Observe que las líneas del campo eléctrico están cercanas entre sí cerca de la carga fuente, en donde el campo eléctrico es intenso, y las líneas del campo están alejadas entre sí en los lugares alejados de la carga fuente, en donde el campo eléctrico es débil. En realidad, cualquier punto en el espacio que está a 3 centímetros de la carga fuente debe tener el mismo campo eléctrico. La simetría esférica de nuestras líneas del campo asegura que el espaciamiento entre las líneas del campo adyacentes sea igual para todos estos puntos. En general, la intensidad del campo eléctrico (es decir, la longitud del vector) es mayor en las regiones donde las líneas del campo eléctrico están más cercanas. Otro modo de decir esto es que el campo eléctrico es proporcional a la densidad de las líneas del campo eléctrico.

---

**Pregunta** ¿Cómo cambiaría el diagrama de la figura 10-13 si la carga fuente positiva se reemplazara con una carga fuente negativa?

---

**Respuesta** Las flechas en el diagrama apuntarían en direcciones opuestas.

---

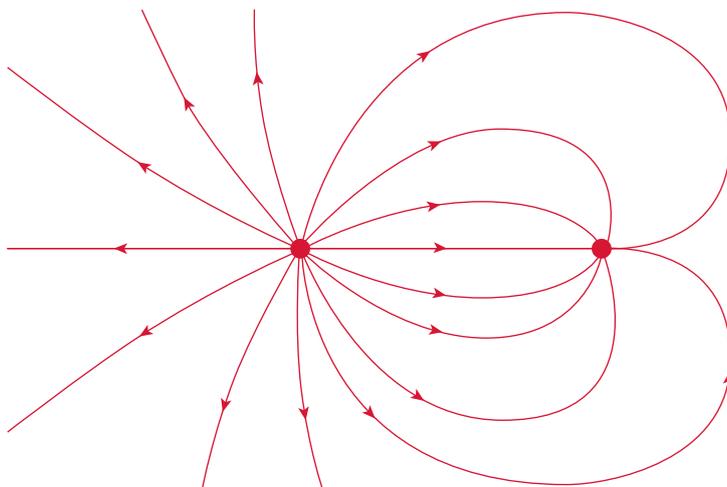
Cuando está presente más de una carga fuente en una región, las líneas del campo representan el campo eléctrico total en la región producido por todas las cargas fuente. En los lugares muy cercanos a una de las cargas fuente, las líneas del campo eléctrico todavía deben ser radialmente simétricas respecto a la carga fuente (porque su contribución dominará). El número de líneas del campo que se originan en una carga fuente positiva o terminan en una carga fuente negativa debe ser proporcional a la magnitud de la carga. En otras palabras, la intensidad del campo eléctrico en un lugar a 1 centímetro de una carga fuente de +2 coulombs debe ser el doble de grande que la intensidad de un campo eléctrico a 1 centímetro de una carga fuente de +1 coulomb. La figura 10-14 presenta las líneas del campo eléctrico alrededor de dos cargas fuente, una positiva y una negativa.

---

**Pregunta** Si la carga fuente positiva de la figura 10-14 tiene una carga de +6 microcoulombs, ¿cuál es la magnitud de la carga en la carga fuente negativa?

---

**Respuesta** El número de líneas del campo eléctrico que se originan en una carga positiva o terminan en una carga negativa es proporcional al tamaño de la carga eléctrica.



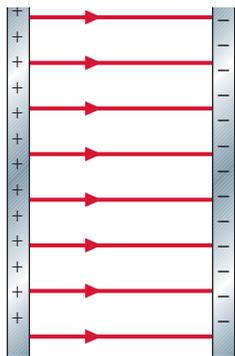
**Figura 10-14** Las líneas del campo eléctrico indican que la magnitud de la carga positiva es el doble de la de la carga negativa.

Dieciséis líneas del campo salen de la carga fuente positiva, pero sólo ocho de esas líneas del campo terminan en la carga fuente negativa. El tamaño de la carga negativa debe ser la mitad del tamaño de la carga positiva. Debe tener una carga de  $-3$  microcoulombs.

Observe que las líneas del campo eléctrico siempre inician en cargas positivas y terminan en cargas negativas. Si la región que considera contiene más cargas positivas que negativas, algunas líneas saldrán de la región. Si la región contiene más cargas negativas, algunas líneas entrarán del exterior de la región.

**Pregunta** ¿Por qué las líneas del campo eléctrico nunca se cruzan?

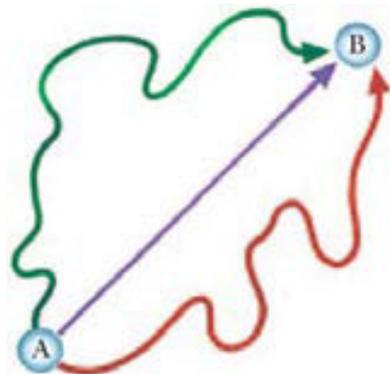
**Respuesta** Las líneas del campo eléctrico representan el campo eléctrico total en una región producido por todas las cargas fuente. El vector del campo eléctrico en cualquier punto en el espacio es tangente a la línea del campo eléctrico que atraviesa ese punto. Si dos líneas del campo eléctrico se cruzaran en algún punto, el campo eléctrico en ese punto tendría que ser tangente a ambas líneas del campo eléctrico. Tendría que apuntar en dos direcciones en un solo lugar. Esto no es posible.



**Figura 10-15** Las líneas del campo eléctrico entre placas de metal cargadas indican que el campo eléctrico es uniforme entre las placas.

Una situación muy común en donde las líneas del campo eléctrico aportan una percepción física es el caso de las placas de metal paralelas cargadas. Si se toman electrones de una placa metálica y se colocan en la otra, ambas placas terminan con la misma cantidad de exceso de carga eléctrica (positiva en una placa y negativa en la otra). La carga se dispersará en las superficies enfrentadas de las placas, hasta que la densidad de la carga sea uniforme. Las líneas del campo eléctrico se originan en la carga positiva y terminan en la carga negativa, de modo que la distribución uniforme de la carga en las placas dicta que las líneas del campo eléctrico entre las placas sean paralelas entre sí, perpendiculares a las placas, y uniformemente espaciadas, como en la figura 10-15.

Estas líneas del campo eléctrico son muy sencillas, y representan un campo eléctrico cuya intensidad es uniforme en cualquier lugar entre las dos placas. La sencillez de las líneas del campo eléctrico predice un resultado que es contrario al sentido común: si pone una carga de prueba positiva pequeña en un lugar a la mitad entre las placas, experimenta el mismo campo eléctrico (y, por lo tanto, la misma fuerza eléctrica) de lo que percibiría si estuviera muy cercana a la placa positiva (o, de hecho, en cualquier otro lugar entre las placas). Es posible demostrar matemáticamente que, en realidad, esto es lo que sucede, pero es mucho más fácil usar el concepto de las líneas del campo eléctrico.



**Figura 10-16** El trabajo efectuado al llevar una carga de A a B no depende de la trayectoria.

energía eléctrica potencial = trabajo ➤  
desde un punto de referencia

## Potencial eléctrico

✓ **MATEMÁTICAS**

Debemos efectuar un trabajo para elevar un bloque de 1 kilogramo en el campo gravitacional de la Tierra, y este trabajo aumenta la energía gravitacional potencial del bloque. Cuando se suelta el bloque, cae y la energía gravitacional potencial cambia a energía cinética. Elevar la misma distancia un bloque de 5 kilogramos requiere cinco veces ese trabajo y el bloque gana cinco veces la energía gravitacional potencial. En otras palabras, conocer la energía que adquiere un bloque de 1 kilogramo nos permite calcular la energía que adquiriría cualquier otra masa que se moviera entre los dos puntos.

De la misma manera, se requiere un trabajo para mover una partícula cargada en un campo eléctrico, y este trabajo cambia la **energía eléctrica potencial** de la partícula. Cuando soltamos la partícula, esta energía eléctrica potencial se convierte a energía cinética. Por lo tanto, definimos la energía eléctrica potencial del mismo modo que lo hicimos para la gravedad. La energía eléctrica potencial de un objeto cargado es igual al trabajo realizado al llevar el objeto de un punto de referencia cero al lugar del objeto. Igual que con la energía gravitacional potencial, el valor de la energía eléctrica potencial no depende de la trayectoria, sino

## Relámpago

Todos han visto un relámpago (figura A) y es probable que en algún momento hayan sentido temor por este espectacular despliegue de energía. Un relámpago es impredecible y parece ocurrir de manera aleatoria e instantánea. Todo, excepto el trueno, suele transcurrir en menos de medio segundo. No obstante, los efectos son importantes: cada año los relámpagos provocan 80 millones de dólares en daños en Estados Unidos. En promedio, los relámpagos matan 85 personas al año y lesionan a otras 250 sólo en Estados Unidos.

Todavía tenemos mucho que aprender de los relámpagos. Por ejemplo, no sabemos qué provoca la acumulación inicial de una carga, qué determina las trayectorias que siguen los relámpagos, o qué los activa.

Sabemos que, durante una tormenta, las nubes generan una separación de la carga eléctrica, en donde la parte superior de las nubes se carga positivamente y la parte inferior se carga negativamente, como se indica en la figura B. La producción de un relámpago comienza cuando la carga negativa en la parte inferior de la nube se hace lo bastante grande para superar la resistencia del aire al flujo de electricidad (figura C) y los electrones comienzan a fluir hacia la Tierra sobre una trayectoria bifurcada en zigzag a unas 60 millas por segundo. Cuando los electrones fluyen hacia abajo, chocan con las moléculas del aire y las ionizan, produciendo más electrones libres. Aunque la corriente puede tener una magnitud de 1000 amperes, éste no es el relámpago que vemos.

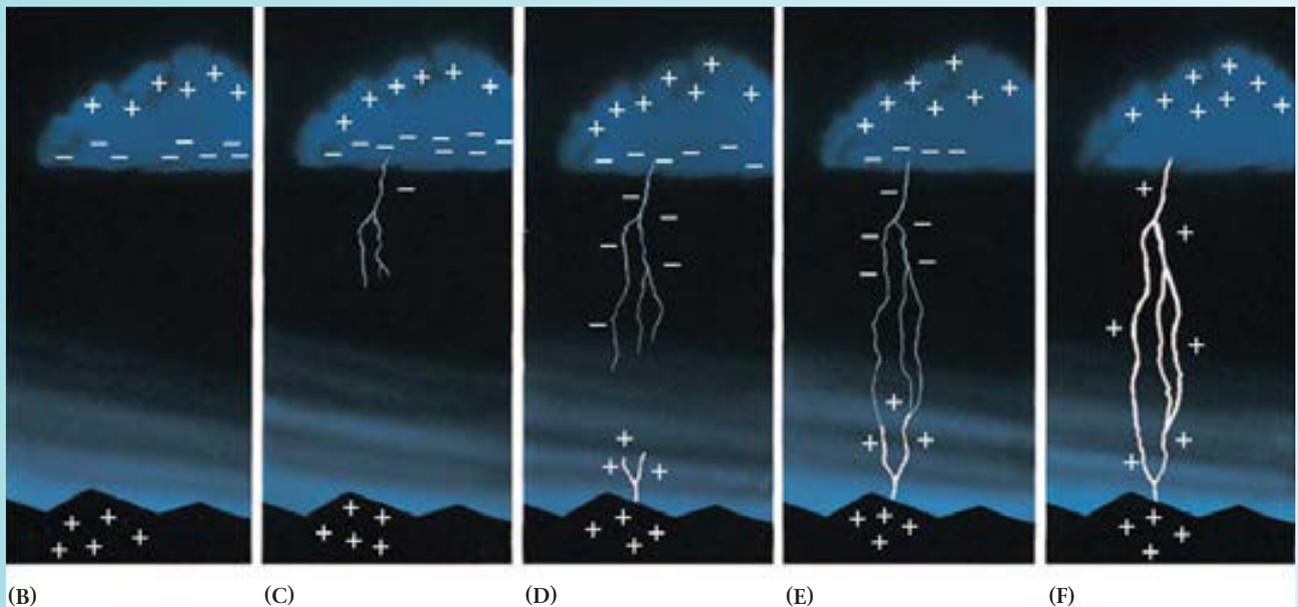
Mientras tanto, cuando los electrones se acercan a la tierra, ésta se carga positivamente cada vez más, debido a la repulsión de los electrones en la tierra. Esta región cargada positivamente asciende a través de los objetos conductores en la tierra —casas, árboles y personas— hacia el aire (figura D). Cuando los electrones que se mueven hacia abajo alcanzan las regiones positivas que fluyen hacia arriba a una altitud aproximada de 100 metros, forman un circuito com-



© James Horn/Dreamstime

**Figura A** Los relámpagos generan corrientes hasta de 200 000 amperes.

pleto (figura E), y comienza el relámpago. En menos de 1 milisegundo, hasta 1000 billones de electrones pueden llegar a tierra; la corriente puede tener una magnitud de 200 000 amperes. Aunque el flujo de la carga es hacia abajo, el punto de contacto entre la carga de la nube y la carga de la tierra fluye hacia arriba a aproximadamente 50 000 millas por segundo. (Los observadores informan que el relámpago se mueve hacia abajo porque la trayectoria que está iluminada es la ruta bifurcada inicial que viene de la nube.) La onda irruptiva hacia arriba calienta el aire a 50 000°F. Un metro de la trayectoria del relámpago puede destellar con un brillo de 1 millón de bombillos de 100 watts (figura F). Este rápido calentamiento del aire sobre la trayectoria del relámpago también produce una onda de impacto que escuchamos como el trueno. Lo que vemos como un solo relámpago suelen ser varios relámpagos en rápida sucesión sobre la misma trayectoria.



**Figura B** El desarrollo de un relámpago.

de la ubicación de la referencia, la ubicación del objeto, y la carga sobre el objeto (figura 10-16).

Como con la energía gravitacional potencial, el valor real de la energía eléctrica potencial no es importante en los problemas físicos; lo que importa es sólo la diferencia en la energía entre los puntos. Si se requieren 10 joules de trabajo para mover un objeto cargado del punto A al punto B, la energía eléctrica potencial del objeto en el punto B es 10 joules más alta que en el punto A. Si el punto A es el punto de referencia cero, la energía eléctrica potencial del objeto en el punto B es 10 joules.

Debido a que los objetos con cargas diferentes tienen energías eléctricas potenciales distintas en un punto específico, suele ser más conveniente hablar de la energía disponible producida por un campo eléctrico, sin referencia a un objeto cargado específico. El **potencial eléctrico**  $V$  en cada punto de un campo eléctrico se define como la energía eléctrica potencial  $EPE$  dividida entre la carga  $q$  del objeto:

$$\text{potencial eléctrico} = \frac{\text{energía eléctrica potencial}}{\text{carga}} \rightarrow$$

$$V = \frac{EPE}{q}$$

Observe que no importa cuál objeto cargado utilizamos para definir el potencial eléctrico. Esta cantidad es numéricamente igual al trabajo requerido para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde el punto de referencia cero al punto especificado. Las unidades para el potencial eléctrico son joules por coulomb (J/C), una combinación conocida como **volt** (V). Por esta razón, solemos referirnos al potencial eléctrico como un *voltaje*.

La definición del potencial eléctrico nos permite obtener la energía eléctrica potencial para cualquier objeto cargado al multiplicar el potencial por la carga. Una vez más, lo único que importa es la *diferencia de potencial*. Por ejemplo, una batería de 12 volts tiene una diferencia eléctrica potencial de 12 volts entre sus dos terminales. Esto significa que 1 coulomb que se mueve de una terminal a la otra ganaría o perdería  $(1 \text{ coulomb})(12 \text{ volts}) = 12 \text{ joules}$  de energía.

---

**Pregunta** ¿Cuánto trabajo se requiere para mover 3 coulombs de carga positiva desde la terminal negativa de una batería de 12 volts a la terminal positiva?

---

**Respuesta** Cada coulomb exige 12 joules de trabajo, de modo que 3 coulombs requieren 36 joules:  $W = qV = (3 \text{ coulombs})(12 \text{ volts}) = 36 \text{ joules}$ .

---

Si es alta la diferencia de potencial, o el voltaje, entre dos puntos, y los puntos están cercanos, el campo eléctrico puede ser lo bastante intenso para arrancar los electrones de las moléculas en el aire. Los electrones son atraídos en una dirección, y los iones positivos restantes son atraídos en la otra. Debido a que los electrones tienen mucha menos masa que los iones, pronto aceleran a altas velocidades. Cuando aceleran, chocan con otras moléculas, con lo cual arrancan electrones adicionales. Esto forma una cascada de electrones que denominamos una *chispa*. El aire seco se descompone de esta manera cuando el campo eléctrico alcanza unos 30 000 volts por centímetro.

### FÍSICA | HÁGALO USTED MISMO

La siguiente ocasión que el clima esté seco y usted produzca chispas al tocar los pomos de las puertas, sostenga una llave en su mano cuando toque objetos metálicos. ¿Por qué le duele menos? Calcule su potencial eléctrico al estimar la extensión de las chispas.

## Resumen

Los objetos se cargan o descargan eléctricamente mediante la transferencia de cargas. Un objeto cargado tiene cantidades iguales de cargas positivas y negativas. Los objetos cargados positivamente tienen un exceso de cargas positivas o una

deficiencia de cargas negativas. En un sistema aislado, se conserva la carga total. Las cargas pueden fluir por los conductores, como alambres metálicos, pero no a través de los aislantes, como los hilos de seda.

En la electricidad, a diferencia de la gravedad, hay dos tipos diferentes de cargas, y la dirección de la fuerza depende de los tipos relativos de las cargas. Cargas iguales se repelen; cargas distintas se atraen. Un objeto cargado puede atraer un objeto no cargado debido a una separación de cargas inducida.

La fuerza eléctrica tiene la misma forma matemática que la fuerza gravitacional. Sin embargo, la fuerza eléctrica puede ser repulsiva, al igual que atrayente. La carga eléctrica viene en múltiplos enteros de un tamaño fijo. Las cargas eléctricas en los electrones y los protones tienen la misma magnitud, pero signos opuestos.

Las cargas eléctricas están rodeadas por un campo eléctrico que es igual a la fuerza experimentada por una carga positiva unitaria. Este campo eléctrico es un vector con una magnitud y una dirección en cada punto en el espacio. Las unidades para el campo eléctrico son newtons por coulomb. Las líneas del campo eléctrico representan el campo eléctrico en una región del espacio. El campo eléctrico en cualquier ubicación apunta en una dirección tangente a la línea del campo en esa ubicación, y la intensidad del campo eléctrico es proporcional a la densidad local de las líneas del campo eléctrico.

La energía eléctrica potencial de un objeto cargado en un campo eléctrico es igual al trabajo realizado para llevar el objeto desde cierta ubicación de referencia cero. En las situaciones físicas, sólo importan las diferencias en la energía eléctrica potencial. El potencial eléctrico es igual a la energía eléctrica potencial dividida entre la carga del objeto. Esta cantidad es numéricamente igual al trabajo requerido para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde el punto de referencia cero. Las unidades para el potencial eléctrico son joules por coulomb, o volts.

## Capítulo 10



## Revisión

Ocurren chispas cuando el campo eléctrico se hace lo bastante fuerte para atraer los electrones de los átomos. El campo eléctrico acelera estos electrones y obtiene suficiente energía cinética para arrancar los electrones de otros átomos. Esta avalancha de electrones produce las chispas que observamos. Los campos eléctricos de 30 000 volts por centímetro son lo bastante fuertes para arrancar los átomos en el aire seco. Debido a que el campo eléctrico es proporcional a la diferencia del potencial eléctrico e inversamente proporcional a la distancia, se requieren voltajes grandes para producir chispas extensas.

## TÉRMINOS IMPORTANTES

**aislante:** Un material que no permite el paso de una carga eléctrica. Los materiales cerámicos son buenos aislantes.

**aterizar:** El establecimiento de una conexión eléctrica hacia la tierra para neutralizar un objeto.

**campo eléctrico:** El espacio que rodea a un objeto cargado, en donde se asigna a cada ubicación un valor igual a la fuerza experimentada por una unidad de carga positiva colocada en esa ubicación; se mide en newtons por coulomb.

**carga:** Una propiedad de las partículas elementales que determina la intensidad de su fuerza eléctrica con otras partículas que poseen una carga. Se mide en coulombs, o en múltiplos enteros de la carga en el protón.

**cargado:** Que posee una carga neta negativa o positiva.

**conductor:** Un material que permite el paso de una carga eléctrica. Los metales son buenos conductores.

**conservación de la carga:** En un sistema aislado, la carga total se conserva.

**coulomb:** La unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional; la carga de  $6.24 \times 10^{18}$  protones.

**energía eléctrica potencial:** El trabajo realizado para llevar un objeto cargado desde una ubicación de referencia cero a un punto específico en el espacio; se mide en joules.

**líneas del campo eléctrico:** Una representación del campo eléctrico en una región del espacio. El campo eléctrico es tangente a la línea del campo en cualquier punto y su magnitud es proporcional a la densidad local de las líneas del campo.

**potencial eléctrico:** La energía eléctrica potencial dividida entre la carga de un objeto; el trabajo realizado para llevar una carga de prueba positiva de 1 coulomb desde una ubicación de referencia

cero a un punto específico en el espacio; se mide en joules por coulomb, o volts.

**relación cuadrada inversa:** Una relación en la cual una cantidad se relaciona con el recíproco del cuadrado de una segunda cantidad;

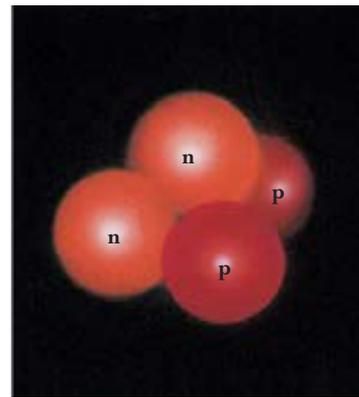
la fuerza eléctrica es proporcional al cuadrado inverso de la distancia desde la carga.

**volt:** La unidad del potencial eléctrico en el Sistema Internacional, 1 joules por coulomb.

## PREGUNTAS CONCEPTUALES

- Una barra de vidrio portátil se carga al frotarla con una bolsa de seda o de plástico mientras la sostiene en sus manos. A partir de esto, ¿concluiría que el vidrio es un conductor o un aislante? ¿Por qué?
- Los maestros de física inexpertos a menudo demuestran el uso del electroscopio al tocarlo con una barra de vidrio cargada en un solo punto. Los maestros más experimentados suelen arrastrar toda la barra sobre la parte superior del electroscopio para aumentar el efecto deseado. ¿Por qué es útil esto?
- ¿Por qué no es posible cargar sólo un extremo de una varilla metálica?
- ¿Puede utilizar piel para cargar una varilla metálica que sostiene en su mano desnuda? Explique.
- ¿Por qué es más fácil cargar un globo en un día seco que en un día húmedo?
- ¿Por qué es más fácil demostrar los fenómenos electrostáticos en Fairbanks, Alaska, que en Honolulu, Hawaii?
- Antes que un avión se abastezca de combustible desde un camión, se conecta un cable desde el camión al avión. ¿Por qué?
- ¿Por qué a veces las prendas se pegan entre sí cuando se sacan de una secadora?
- Si una barra de hule se carga con piel y otra con plástico, se atraen entre sí. ¿Cómo explica esto?
- Emplea un pedazo de seda para cargar una barra de vidrio. ¿Esto deja la seda con una carga positiva o negativa? Explique.
- Cuando frota globos con lana y los pone cerca de pedazos de papel, encuentra tres categorías de comportamiento. Los globos atraen la lana y los pedazos de papel, pero repelen otros globos. Los pedazos de lana atraen los globos y los pedazos de papel, pero repelen otros pedazos de lana. Los globos y los pedazos de lana atraen los pedazos de papel, pero éstos no reaccionan con otros pedazos de papel. Cuando tenemos tres comportamientos distintos, ¿por qué sólo necesitamos dos tipos de carga en nuestro modelo?
- ¿Cómo sabría si descubrió un tercer tipo de carga? ¿Cuáles otros objetos esperaría que atrajera y repeliera el tercer tipo de carga?
- Su compañero afirma que los imanes en realidad sólo son barras cargadas con cargas opuestas en los dos extremos. ¿Cuál experimento efectuaría para convencer a su compañero de lo contrario?
- Encuentra que una barra de vidrio cargada atrae el polo norte de un imán en barra. Después descubre que la misma barra también atrae el polo sur del imán. Si le acerca una barra de hule cargada, ¿el polo norte será atraído, repelido, o no experimentará ninguna fuerza? Explique.
- Usted tiene tres bolas pequeñas, y cada una cuelga de un hilo aislante. Encuentra que las bolas 1 y 2 se repelen entre sí, y que las bolas 2 y 3 se repelen entre sí. ¿Las bolas 1 y 3 se atraerán o se repelerán entre sí? Explique.

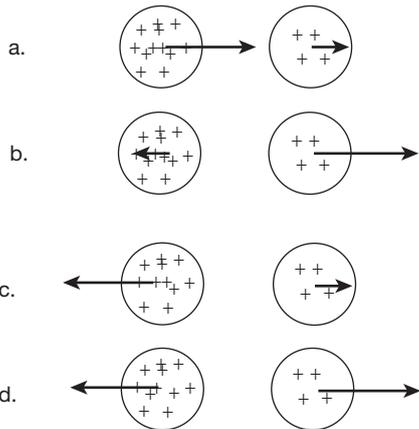
- Usted tiene tres bolas pequeñas, y cada una cuelga de un hilo aislante. Encuentra que las bolas 1 y 2 se atraen entre sí, y que las bolas 1 y 3 se atraen entre sí. Si acerca las bolas 2 y 3, ¿cuáles son los resultados posibles?
- El núcleo de un átomo de helio contiene dos protones y dos neutrones no cargados. Si dos electrones rodean el núcleo, ¿cuál es la carga total del átomo?



- En la visión moderna de la electricidad, ¿un objeto con una carga negativa tiene un exceso de carga positiva, un exceso de carga negativa, una deficiencia de carga negativa, o una deficiencia de carga positiva? Explique.
- Describa cómo un globo cargado se pega a una pared.
- Cuando se acerca un peine cargado a pedazos de papel, el peine primero atrae los pedazos, y los repele después que entran en contacto con él. Describa cómo se modifican las cargas en el peine y en los pedazos de papel durante este proceso.
- ¿Por qué los objetos cargados negativa y positivamente atraen los objetos neutros?
- Describa cómo una barra cargada negativamente atrae: (a) un objeto conductor no cargado, y (b) un objeto aislante no cargado.
- ¿Cómo puede utilizar un electroscopio con una carga positiva conocida para determinar el signo de una barra cargada?
- ¿Cómo puede emplear una barra cargada negativamente para determinar si un electroscopio cargado tiene una carga negativa o una positiva, sin modificar la carga en el electroscopio?
- Describa cómo puede emplear una barra cargada negativamente para poner una carga negativa en un electroscopio.
- Describa cómo utilizaría una barra cargada negativamente para dar a un electroscopio una carga positiva.
- Al principio un electroscopio tiene una carga negativa neta. ¿Por qué las hojas se juntan y permanecen juntas cuando la mano de una persona toca el electroscopio?
- Al principio un electroscopio recibe una carga positiva neta. Usted encuentra que, cuando acerca su mano a la

parte superior del electroscopio, sin tocarlo, las hojas se acercan ligeramente. Cuando retira su mano, se separan. ¿Cómo explica esto?

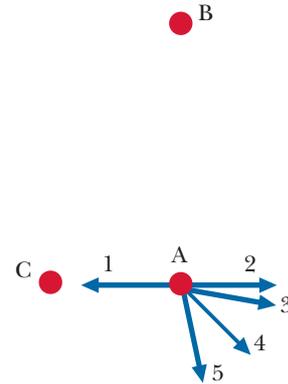
- ▲ 29. Tiene dos esferas metálicas sobre bases aislantes. Acerca cada una a la bola de un electroscopio cargado negativamente y encuentra que la esfera A hace que aumente la desviación, mientras que la esfera B hace que disminuya. ¿Qué puede decir acerca de la carga neta en cada esfera metálica?
- ▲ 30. Sostiene una barra de hule cargada cerca de la bola de un electroscopio y luego toca brevemente la bola con su dedo. Después de quitar la barra de hule, acerca una barra de vidrio cargada a la bola. ¿La desviación de las hojas aumenta, disminuye o se mantiene igual? ¿Por qué?
- ▲ 31. Cuando Coulomb desarrollaba su ley, no tenía un instrumento para medir una carga. No obstante, fue capaz de obtener esferas con  $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$  de cierta carga original. ¿Cómo pudo haber utilizado un conjunto de esferas idénticas para hacer esto?
- ▲ 32. Tiene tres esferas metálicas idénticas sobre bases aislantes. Las esferas contienen cargas  $Q_A = -2q$ ,  $Q_B = -q$  y  $Q_C = 4q$ . Primero, la esfera A se pone en contacto con la esfera C y se separan. Después, la esfera C se pone en contacto con la esfera B y se separan. ¿Cuál es la carga resultante en la esfera B?
- 33. Dos esferas aislantes cargadas de manera uniforme se sostienen sobre postes fijos. La carga en una de las esferas es tres veces la carga en la otra. ¿Cuál diagrama representa de manera correcta la magnitud y la dirección de las fuerzas eléctricas en las dos esferas? Explique su respuesta.



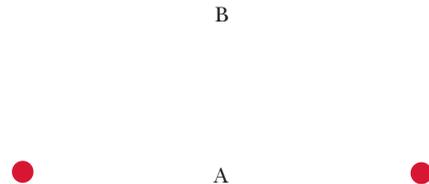
- 34. Tiene objetos cargados positivamente. El objeto B tiene el doble de la carga del objeto A. Cuando se acercan, el objeto A experimenta una fuerza eléctrica de 10 newtons. ¿La fuerza eléctrica que experimenta el objeto B es mayor, igual, o menor que 10 newtons? Explique.
- 35. Suponga que tiene dos objetos cargados de manera idéntica, separados por cierta distancia. ¿Cómo cambiaría la fuerza si los objetos estuvieran separados por el triple de la distancia?
- 36. Dos objetos cargados están muy lejos de cualquier otra carga. Si la distancia entre ellos se reduce a la mitad de su valor original, ¿qué le ocurre a la fuerza eléctrica entre las cargas?
- 37. Suponga que tiene dos objetos cargados de manera idéntica, separados por cierta distancia. ¿Cómo cambiaría la

fuerza si un objeto tuviera el triple de la carga y el otro mantuviera la misma carga?

- 38. Dos objetos cargados están muy lejos de cualquier otra carga. Si se duplica la carga en cada objeto, ¿qué le ocurre a la fuerza eléctrica entre los objetos?
- 39. Tres cargas idénticas están organizadas igual que en la figura. La distancia de A a B es el doble de la distancia de A a C. ¿Cuáles vectores representan mejor la fuerza en la carga A debida a B y C? Justifique su respuesta.



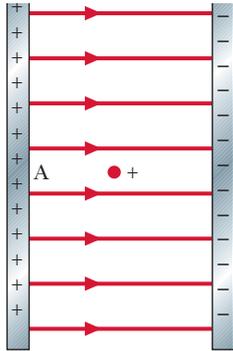
- 40. Dos cargas idénticas están fijas en los lugares indicados en la figura. Una tercera carga, idéntica a las otras dos, se pone primero en la posición A y después en la posición B. Para cada caso, determine la dirección de la fuerza eléctrica neta sobre la tercera carga. Si la fuerza es cero, declare eso explícitamente.



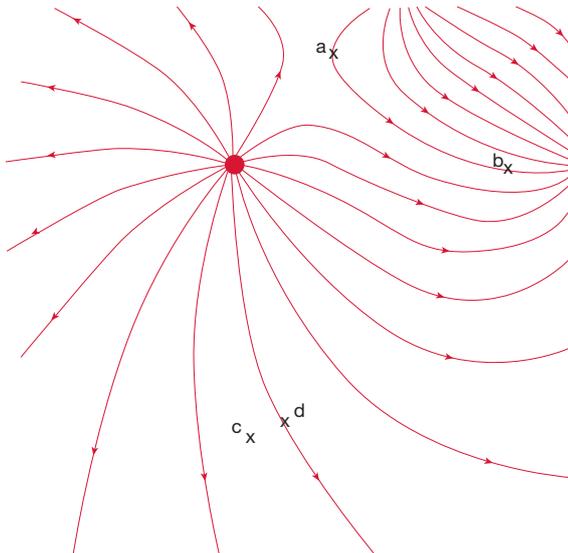
- 41. Aunque las fórmulas para las fuerzas eléctrica y gravitacional adoptan la misma forma, existen diferencias en las dos. ¿Cuáles son algunas de estas diferencias?
- 42. ¿Cuáles son las semejanzas entre las fuerzas eléctrica y gravitacional?
- 43. Cuando nos acercamos a otra persona, no estamos conscientes de las fuerzas gravitacional y eléctrica entre nosotros. En cada caso, ¿cuáles son las razones?
- 44. Aunque las fuerzas eléctricas entre los electrones y los protones son mucho más fuertes que las fuerzas gravitacionales, éstas determinan los movimientos en el Sistema Solar. ¿Por qué?
- 45. ¿Por qué las aceleraciones de todos los objetos cargados cerca de una esfera cargada no son iguales?
- ▲ 46. En el capítulo, comparamos las fuerzas eléctrica y gravitacional entre un electrón y un protón. ¿Por qué es válido el resultado para todas las separaciones?
- 47. Una esfera metálica con una carga de +3 coulombs experimenta una fuerza eléctrica de 15 newtons dirigida hacia la izquierda. Si la carga en la esfera aumenta a 6 coulombs, ¿cuál fuerza experimentará?
- 48. Una esfera metálica con una carga de +2 coulombs experimenta una fuerza eléctrica de 25 newtons dirigida hacia

la izquierda. Si la carga en la esfera cambia a  $-8$  coulombs, ¿cuál fuerza experimentará la esfera?

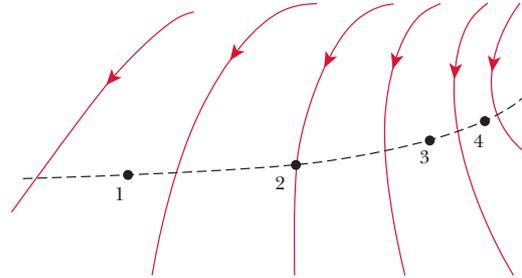
49. Las líneas del campo eléctrico entre dos placas cargadas paralelas en todas partes son perpendiculares a las placas y paralelas entre sí, como se observa en la figura. Una partícula pequeña cargada positivamente colocada a la mitad entre las placas experimenta una fuerza eléctrica de una magnitud  $F$ . Si la partícula cargada se colocara en la ubicación A, cerca de la placa positiva, ¿la fuerza en la partícula sería mayor, igual, o menor que  $F$ ? Utilice el concepto de las líneas del campo para justificar su respuesta.



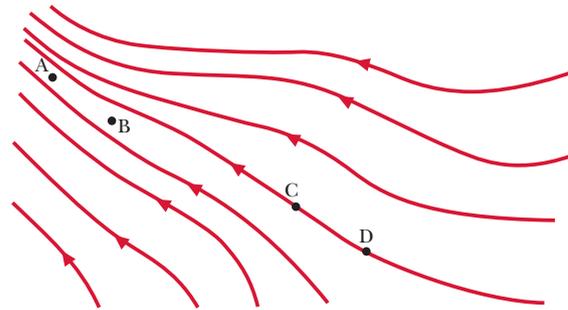
50. Para la situación descrita en la pregunta 49, la partícula cargada se suelta de las demás en el punto medio y choca contra la placa negativa a una velocidad  $v$ . Si en lugar de eso la partícula se hubiera soltado en reposo en el punto A, ¿hubiera chocado contra la placa a una velocidad mayor, igual, o menor que  $v$ ? Explique su razonamiento.
51. Un electrón y un protón se sueltan en una región del espacio en donde el campo eléctrico está verticalmente hacia arriba. ¿Cómo se comparan las fuerzas eléctricas en el electrón y el protón?
52. ¿Cómo se comparan las aceleraciones del protón y el electrón de la pregunta 51?
53. A continuación se presenta una parte de un campo eléctrico. Con una  $x$ , se marcaron dentro del campo cuatro ubicaciones denominadas a, b, c y d. Dibuje los vectores que representan la fuerza en una carga de prueba positiva cuando se coloca en cada una de estas ubicaciones. Explique su razonamiento.



54. Las líneas del campo (líneas continuas) presentadas a continuación representan el campo eléctrico en cierta región del espacio. Se suelta una partícula cargada con una velocidad inicial y sigue la trayectoria de los puntos 1 al 4 representada por la línea de guiones. Dibuje vectores para representar la fuerza sobre la partícula cargada en cada ubicación. ¿Cuál es el signo de la partícula cargada? Explique cómo puede saberlo.



55. La figura presenta las líneas del campo eléctrico en una región vacía del espacio. ¿El campo eléctrico en la región entre A y B es mayor, igual, o menor que el campo eléctrico en la región entre C y D? Explique.



56. En la figura descrita en la pregunta 55, los puntos A y B y los puntos C y D están separados por distancias iguales. ¿La diferencia de potencial entre A y B es mayor, igual, o menor que la diferencia de potencial entre C y D? Explique.
- ▲ 57. Se observa que un protón se mueve a una velocidad  $v_0$  en el punto A en el espacio donde el potencial eléctrico son 750 volts. Se mueve al punto B en donde el potencial eléctrico son 550 volts. ¿Su velocidad en el punto B es mayor, igual, o menor que  $v_0$ ? Explique.
- ▲ 58. Se observa que un electrón se mueve a una velocidad  $v_0$  en el punto A en el espacio donde el potencial eléctrico son 750 volts. Se mueve al punto B en donde el potencial eléctrico son 550 volts. ¿Su velocidad en el punto B es mayor, igual, o menor que  $v_0$ ? Explique.
59. ¿Cómo se define el valor del potencial eléctrico en cada punto en el espacio definido?
60. ¿Cuál es la definición del valor de la energía eléctrica potencial de un objeto cargado en cada punto en el espacio?
- ▲ 61. Se suelta un protón de los demás en un campo eléctrico uniforme. ¿La energía eléctrica potencial del protón aumenta o disminuye? Explique.
- ▲ 62. Se suelta un electrón de los demás en un campo eléctrico uniforme. ¿La energía eléctrica potencial del electrón aumenta o disminuye? ¿El electrón se mueve hacia una ubicación con un potencial eléctrico más alto o más bajo? Explique.

## EJERCICIOS

- Un ion de sodio contiene 11 protones, 12 neutrones y 10 electrones. ¿Cuál es la carga neta del ion?
- ¿Cuál es la carga neta de un ion de yodo que contiene 53 protones, 74 neutrones y 54 electrones?
- El núcleo de cierto tipo de átomo de plutonio contiene 94 protones y 150 electrones. ¿Cuál es la carga total del núcleo?
- ¿Cuántos electrones se requieren para tener una carga total de  $-1$  coulomb?
- ¿Cuál es la fuerza de atracción eléctrica entre cargas de  $+3$  C y  $-6$  C separadas por una distancia de  $2$  m?
- ¿Cuál distancia deben estar separadas dos cargas de  $+4$  C para que la fuerza repulsiva entre ellas sea  $3.6 \times 10^{10}$  N?
- El núcleo del litio contiene tres protones y tres neutrones. Cuando se eliminan dos electrones del átomo de litio neutro, el electrón restante tiene una distancia promedio desde el núcleo de  $0.018$  nm. ¿Cuál es la fuerza entre el electrón y el núcleo en esta separación?
- En un sólido iónico, como la sal de mesa común (NaCl), se transfiere un electrón de un átomo a otro. Si una distancia de  $0.1$  nm separa los átomos, ¿cuán intensa es la fuerza eléctrica entre ellas?
- ¿Cuánto más intensa es la fuerza eléctrica entre 2 protones que la fuerza gravitacional entre ellos?
- Calcule la razón de la fuerza eléctrica entre la fuerza gravitacional entre 2 protones.
- Una carga de  $5$  mC experimenta una fuerza de  $4$  N dirigida hacia el norte. ¿Cuál es el campo eléctrico (magnitud y dirección) en el lugar de la carga? Encuentre la fuerza sobre una carga de  $-20$  mC que reemplaza la carga de  $5$  mC.
- Una carga de  $-20$  mC experimenta una fuerza de  $25$  N dirigida hacia el oeste. ¿Cuál es el campo eléctrico (magnitud y dirección) en el lugar de la carga? Si esta carga se elimina y no se reemplaza, ¿cuál es el campo eléctrico en este lugar?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $4$  cm desde  $2$  mC de una carga negativa?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $2$  m desde  $4$  C de una carga positiva?

- ¿Cuál es el campo eléctrico a una distancia de  $0.2$  nm desde un núcleo de carbono que contiene seis protones y seis neutrones?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a  $5.3 \times 10^{-11}$  m desde un protón?
- ¿Cuál es el campo eléctrico a la mitad entre cargas de  $2$  C y  $5$  C separadas  $2$  m?



- ¿Cuál es el campo eléctrico a la mitad entre un electrón y un protón separados  $0.2$  nm?
- ▲ ¿Cuál es la fuerza sobre un protón ubicado en un campo eléctrico de  $5000$  N/C? ¿Cuál es la aceleración del protón?
- ▲ ¿Cómo cambiarían los valores obtenidos en el ejercicio 19 si se sustituyera el protón con un electrón?
- Se sabe que la energía eléctrica potencial de un objeto en el punto A es  $40$  J. Si se suelta en reposo en A, adquiere  $50$  J de energía cinética cuando se mueve al punto B. ¿Cuál es su energía potencial en B?
- Si el objeto del ejercicio 21 tuviera una carga de  $+2$  C, ¿cuál sería la diferencia de potencial entre los puntos A y B?
- ¿Cuánto trabajo efectúa una batería de  $12$  V al impulsar  $2$  mC de carga a través de un circuito que contiene un bombillo?
- Los puntos A y B tienen un potencial eléctrico de  $+9$  V. ¿Cuánto trabajo se requiere para llevar  $3$  mC de carga de A a B?
- ¿Cuál era su potencial eléctrico respecto a un tubo metálico si una chispa saltó  $1.3$  cm ( $0.5$  pulgadas) por el aire seco desde su dedo hasta el tubo?
- ¿Qué tan lejos puede saltar una chispa en el aire seco si la diferencia del potencial eléctrico es  $6 \times 10^5$  V? (Por esta razón las fuentes de alto voltaje se rodean con un vacío o un fluido aislante.)