

LO QUE APRENDEREMOS

- La electricidad y el magnetismo juntos constituyen el electromagnetismo, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.
- Hay dos tipos de carga eléctrica: positiva y negativa. Cargas iguales se repelen y cargas diferentes se atraen.
- La carga eléctrica está cuantizada, lo cual significa que esto ocurre sólo en múltiplos enteros de una cantidad elemental más pequeña. La carga eléctrica también se conserva.
- La mayor parte de los materiales a nuestro alrededor son eléctricamente neutros.
- El electrón es una partícula elemental y su carga es la cantidad más pequeña observable de carga eléctrica.
- Los aislantes conducen electricidad de manera deficiente o no la conducen. Los conductores conducen bien electricidad, pero no perfectamente: se pierde algo de energía.
- Los semiconductores son capaces de cambiar de un estado de conducción a uno de no conducción.
- Los superconductores conducen electricidad perfectamente.
- Los objetos pueden cargarse directamente por contacto o indirectamente por inducción.
- La fuerza que dos cargas eléctricas estacionarias ejercen entre sí es proporcional al producto de las cargas y varía como el inverso del cuadrado de la distancia entre las dos cargas.

Muchas personas piensan en la electricidad estática como la molesta chispa que ocurre cuando, en un día seco después de haber caminado sobre una alfombra, tocan un objeto metálico, como la perilla de una puerta (figura 21.1). De hecho, muchos fabricantes de aparatos electrónicos colocan pequeñas placas metálicas en el equipo, de modo que los usuarios puedan descargar cualquier chispa sobre la placa, sin dañar las partes más sensibles del equipo. No obstante, la electricidad estática es más que una molestia ocasional; es el punto de partida para cualquier estudio de la electricidad y el magnetismo, fuerzas que han cambiado a la sociedad humana de manera tan radical como no se veía desde el descubrimiento del fuego o la rueda.

En este capítulo analizamos las propiedades de la carga eléctrica. Una carga eléctrica en movimiento origina un fenómeno por separado, denominado *magnetismo*, que se abordará en capítulos posteriores. Aquí estudiamos objetos cargados que no se mueven; de ahí el término *electroestática*. Todos los objetos tienen carga, puesto que las partículas cargadas pueden constituir átomos y moléculas. A menudo no observamos los efectos de la carga eléctrica porque la mayor parte de los objetos son eléctricamente neutros. Las fuerzas que mantienen juntos a los átomos y separados a los objetos, incluso cuando están en contacto, son de naturaleza eléctrica.

21.1 Electromagnetismo



FIGURA 21.2 Relámpagos sobre la ciudad de Seattle.

Quizá ningún misterio fue tan extraño para las civilizaciones antiguas como la electricidad, fundamentalmente en forma de relámpagos (figura 21.2). La fuerza destructiva inherente a los rayos, capaz de incendiar objetos y matar a personas y animales, parecía divina. Los antiguos griegos, por ejemplo, creían que Zeus, padre de los dioses, tenía la habilidad de lanzar rayos. Las tribus germánicas atribuían este poder al dios Thor, y los romanos al dios Júpiter. Es decir, la capacidad para producir rayos pertenecía al dios más importante de la jerarquía divina (o a uno cercano a ésta).

Los antiguos griegos sabían que si frotaban un trozo de ámbar con uno de tela podían atraer objetos pequeños y ligeros. Ahora sabemos que al frotar ámbar con tela se transfieren partículas cargadas negativamente denominadas *electrones*. (Las palabras *electrón* y *electricidad* se derivan de la palabra griega para ámbar.) Los rayos también constan de un flujo de electrones. Los primeros griegos y otros pueblos también conocían objetos magnéticos que existen en la naturaleza denominados *pedra imán*, que se encontraban en depósitos de magnetita, un mineral que consiste de óxido de hierro. Estos materiales también se usaban para elaborar brújulas ya desde 300 a.C.

La relación entre la electricidad y el magnetismo no se comprendió sino hasta mediados del siglo XIX. Los siguientes capítulos revelarán cómo la electricidad y el magnetismo pueden unificarse en un marco de referencia común denominado *electromagnetismo*. No obstante, la unificación de fuerzas no termina ahí. Durante la primera parte del siglo XX se descubrieron dos fuerzas fundamentales más: la interacción débil, que opera en el decaimiento beta (en el que un electrón y un neutrino se emiten espontáneamente desde ciertos tipos de núcleos) y la interacción fuerte, que actúa dentro del núcleo atómico. Estudiaremos estas fuerzas con mayor detalle en el capítulo 39, sobre física de

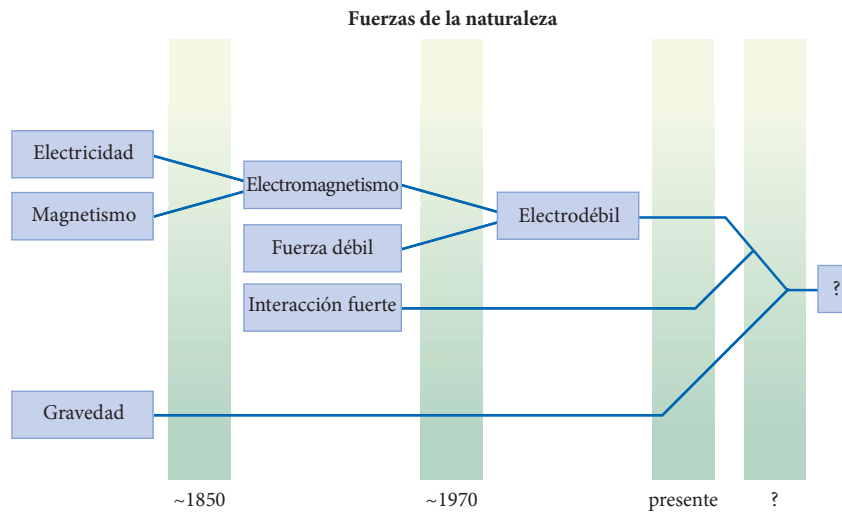


FIGURA 21.3 Historia de la unificación de las fuerzas fundamentales.

partículas. Normalmente, las interacciones electromagnéticas débil y fuerte se consideran como dos aspectos de la fuerza electro débil (figura 21.3). Para los fenómenos que se analizan en los siguientes capítulos, esta unificación electro débil no tiene ninguna influencia; se vuelve importante en las colisiones de partículas de más alta energía. Debido a que la escala para la unificación electro débil es tan alta, la mayor parte de los libros de texto continúan hablando de cuatro fuerzas fundamentales: gravitacional, electromagnética, y las interacciones débil y fuerte.

Hoy, un gran número de físicos cree que la fuerza electro débil y la interacción fuerte también pueden unificarse; es decir, describirse en un marco de referencia común. Varias teorías proponen diversas formas para lograrlo, pero aún falta evidencia experimental. Es interesante saber que la fuerza que se ha conocido durante más tiempo que cualquier otra de las fuerzas fundamentales, la gravedad, parece ser la más difícil de introducir en un marco de referencia común con las otras fuerzas fundamentales. La gravedad cuántica, la supersimetría y la teoría de cuerdas constituyen focos actuales de la investigación física de vanguardia en la que los teóricos están intentando construir esta gran unificación y descubrir la (desmedidamente llamada) teoría del todo. Ellos se guían fundamentalmente por principios de simetría y la convicción de que la naturaleza debe ser elegante y simple.

Volveremos a estas consideraciones en los capítulos 39 y 40. En este capítulo abordamos la carga eléctrica, cómo los materiales reaccionan a ésta, la electricidad estática y las fuerzas resultantes de las cargas eléctricas. La **electrostática** abarca situaciones en las que las cargas permanecen en su sitio y no se mueven.

21.2 Carga eléctrica

Investiguemos más a fondo sobre la causa de las chispas eléctricas que usted recibe ocasionalmente un día seco de invierno, al caminar sobre una alfombra y tocar la perilla de una puerta. (Las chispas electrostáticas han incluso encendido los vapores de gas cuando alguien llena el tanque de su automóvil en una estación de servicio. Ésta no es una leyenda urbana: las cámaras de vigilancia de las estaciones de servicio han registrado algunos de estos casos.) Los procesos que originan este chispazo se denominan **carga**, que consiste en la transferencia de partículas con carga negativa, denominadas **electrones**, desde los átomos y las moléculas del material de la alfombra a la suela de sus zapatos. Esta carga puede moverse con relativa facilidad a través de su cuerpo, incluyendo las manos. La carga eléctrica acumulada se descarga en la perilla metálica de la puerta, creando una chispa.

Los dos tipos de carga eléctrica que hay en la naturaleza son la **carga positiva** y la **carga negativa**. Normalmente, parece que los objetos a nuestro alrededor no están cargados; pero esto no es exacto: son eléctricamente neutros. Los objetos neutros contienen el mismo número de carga positiva y de carga negativa que se cancelan entre sí. El efecto de la carga eléctrica sólo se observa cuando las cargas positiva y negativa no están en equilibrio.

Si usted frota una barra de vidrio con un trozo de tela, la barra se carga y la tela adquiere una carga de signo opuesto. Si frota una barra de plástico con piel, la barra y la piel también se cargan opuestamente. Si acerca entre sí dos barras de vidrio cargadas, se repelen mutuamente. En forma semejante, si aproxima entre sí dos barras de plástico, también se repelen mutuamente. No obstante, una barra de vidrio cargada y una barra de plástico cargada se atraen mutuamente. Esta diferencia surge porque la barra de vidrio y la de plástico tienen cargas opuestas. Esta observación lleva a la

ley de las cargas eléctricas

Cargas semejantes se repelen y cargas opuestas se atraen.

La unidad de la carga eléctrica es el **coulomb** (C), llamada así en honor del físico francés Charles-Augustine de Coulomb (1736-1806). El coulomb se define en términos de la unidad SI para la corriente, el amperio (A), nombrado así en honor de otro físico francés, André-Marie Ampère (1775-1836). Ni el coulomb ni el amperio pueden deducirse en términos de otras unidades SI: metro, kilogramo y segundo. En lugar de eso, el amperio es otra unidad fundamental SI. Es por esto que el sistema internacional de unidades algunas veces se denomina *sistema MKSA* (*metro-kilogramo-segundo-amperio*). La unidad de carga se define como

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A s.} \tag{21.1}$$

La definición del amperio debe esperar hasta que analicemos la corriente en capítulos posteriores. No obstante, es posible definir la magnitud del coulomb al especificar simplemente la carga de un solo electrón:

$$q_e = -e \tag{21.2}$$

donde q_e es la carga y e tiene el valor (actualmente el más aceptado y determinado experimentalmente)

$$e = 1.602176487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C.} \tag{21.3}$$

(Por lo general esto basta sólo llevar de dos a cuatro cifras significativas de esta mantisa. En este capítulo usaremos un valor útil de 1.602, pero debe tomar en cuenta que la ecuación 21.3 proporciona toda la precisión hasta la que se ha medido esta carga.)

La carga del electrón es una de sus propiedades intrínsecas, así como su masa. La carga del **protón**, otra partícula básica de los átomos, es exactamente de la misma magnitud que la del electrón, sólo que su carga es positiva:

$$q_p = +e. \tag{21.4}$$

La decisión de cuál carga es positiva y cuál es negativa es arbitraria. La elección de costumbre de $q_e < 0$ y $q_p > 0$ se debe al estadista, científico e inventor estadounidense Benjamin Franklin (1706-1790), quien fue pionero de los estudios sobre electricidad.

Un coulomb es una unidad de carga extremadamente grande. Más tarde veremos, en este mismo capítulo, cuán grande es, cuando investiguemos la magnitud de las fuerzas de cargas entre sí. Suelen usarse unidades de μC (microcoulombs, 10^{-6} C), nC (nanocoulombs, 10^{-9} C) y pC (pico-coulombs, 10^{-12} C).

Asimismo, Benjamin Franklin propuso que la carga también se conserva. Por ejemplo, cuando usted frota una barra de plástico con piel, a la barra se transfieren electrones, dejando una carga neta positiva en la piel. (Los protones no se transfieren porque suelen estar incrustados dentro de los núcleos atómicos.) La carga no se crea ni se destruye; simplemente se mueve de un objeto a otro.

Ley de conservación de la carga

La carga eléctrica total de un sistema aislado se conserva.

Esta ley es la cuarta ley de conservación encontrada hasta la fecha; las tres primeras son las leyes de conservación de la energía total, cantidad de movimiento lineal y cantidad de movimiento angular. Las leyes de conservación constituyen un hilo conductor que atraviesa toda la física y, por lo mismo, atraviesa todo este libro.

$$q = \pm n e$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

21.1 Ejercicio en clase

¿Cuántos electrones se requieren para obtener 1.00 C de carga?

- a) $1.60 \cdot 10^{19}$ d) $6.24 \cdot 10^{18}$
- b) $6.60 \cdot 10^{19}$ e) $6.66 \cdot 10^{17}$
- c) $3.20 \cdot 10^{16}$

Resulta importante observar que hay una ley de conservación para la carga, pero *no* para la masa. Más tarde veremos en este libro que la masa y la energía no son independientes entre sí. Lo que algunas veces se describe en química elemental como conservación de la masa no es una ley de conservación exacta, sino sólo una aproximación usada para seguir el rastro del número de átomos en una reacción química. (Se trata de una buena aproximación hasta un gran número de cifras significativas, pero no es una ley exacta, como la conservación de la carga.) La conservación de la carga es válida para todos los sistemas, desde el sistema macroscópico de la barra de plástico y piel hasta sistemas de partículas subatómicas.

Carga elemental

La carga eléctrica sólo ocurre en múltiplos enteros de un tamaño mínimo. Esto se expresa al afirmar que la carga está **cuantizada**. La unidad más pequeña observable de carga eléctrica es la carga del electrón, que es $-1.602 \cdot 10^{-19}$ C (como se define en la ecuación 21.3).

El hecho de que la carga eléctrica está cuantizada fue comprobado en un experimento ingenioso llevado a cabo en 1910 por el físico estadounidense Robert A. Millikan (1868-1953) y se conoce como *experimento de Millikan de la gota de aceite* (figura 21.4). En este experimento se rociaron gotas de aceite en una especie de cámara, donde algunos de sus electrones fueron extraídos al ser impactados por alguna forma de radiación, como los rayos X. A las gotas resultantes, cargadas positivamente, se les dejó caer entre dos placas cargadas eléctricamente. Para que las gotas dejaran de moverse en caída libre, se ajustó la carga de las placas, lo cual permitió medir su carga. Lo que Millikan observó fue que la carga estaba cuantizada, en lugar de ser continua. (En el capítulo 23 se presentará un análisis cuantitativo de este experimento sobre potencial eléctrico.) Es decir, este experimento y sus refinamientos posteriores establecieron que la carga sólo se presenta en múltiplos enteros de la carga de un electrón. En experiencias cotidianas con electricidad no se observa que la carga está cuantizada porque la mayor parte de los fenómenos eléctricos implican una gran cantidad de electrones.

En el capítulo 13 se analizó el hecho de que la materia está compuesta por átomos y que un átomo consta de un núcleo que contiene protones cargados y neutrones neutros. La figura 21.5 muestra un esquema de un átomo de carbono. Un átomo de carbono tiene seis protones y (normalmente) seis neutrones en su núcleo. Este núcleo está rodeado por seis electrones. Observe que este dibujo no está a escala. En la forma verdadera, la distancia de los electrones al núcleo es mucho más grande (por un factor del orden de 10 000) que el tamaño del núcleo. Además, los electrones se muestran en órbitas circulares, lo cual tampoco es del todo correcto. En el capítulo 38 veremos que las ubicaciones de los electrones en el átomo pueden caracterizarse sólo por distribuciones de probabilidad.

Como ya se mencionó, un protón tiene carga positiva con una magnitud que es *exactamente* igual a la magnitud de la carga negativa de un electrón. En un átomo neutro, el número de electrones cargados negativamente es igual al número de protones cargados positivamente. La masa del electrón es mucho más pequeña que la masa del protón o del neutrón. En consecuencia, la mayor parte de la masa del átomo reside en el núcleo. Los electrones pueden removerse de los átomos con relativa facilidad. Es por esto que los electrones suelen ser los portadores típicos de carga eléctrica, en lugar de los protones o los núcleos atómicos.

El electrón es una partícula fundamental y carece de subestructura; se trata de una partícula puntual con radio cero (por lo menos, según lo último que se conoce). No así en el protón, en él se han usado sondas de alta energía para observar el interior del protón. Un protón está compuesto por partículas cargadas denominadas *quarks*, que se mantienen unidas por partículas no cargadas denominadas *gluones*. Los quarks tienen una carga de $\pm \frac{1}{3}$ o $\pm \frac{2}{3}$ veces la carga del electrón. Estas partículas con carga fraccionaria no pueden existir de manera independiente y nunca se han observado directamente, a pesar de numerosas y profundas investigaciones. Justo como la carga de un electrón, las cargas de los quarks son propiedades intrínsecas de estas partículas elementales.

Un protón consta de dos *quarks arriba* (cada uno con carga $+\frac{2}{3}e$) y un *quark abajo* (con carga $-\frac{1}{3}e$), lo cual otorga al protón una carga de $q_p = (2)(+\frac{2}{3}e) + (1)(-\frac{1}{3}e) = +e$ como se ilustra en la



FIGURA 21.4 Esquema del experimento de Millikan de la gota de aceite.

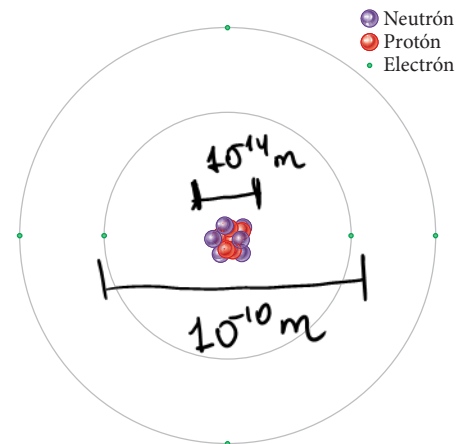


FIGURA 21.5 En un átomo de carbono, el núcleo contiene seis neutrones y seis protones. El núcleo está rodeado por seis electrones. Observe que este dibujo es esquemático y no está a escala.

$$\begin{aligned} \text{quarks} &\rightarrow +\frac{1}{3}e \\ &\rightarrow +\frac{2}{3}e \end{aligned}$$

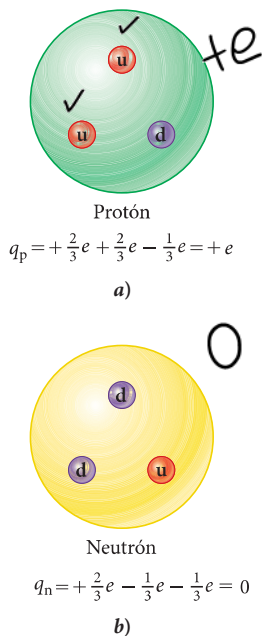


FIGURA 21.6 a) Un protón contiene dos quarks arriba (u) y un quark abajo (d). b) Un neutrón contiene un quark arriba (u) y dos quarks abajo (d).

21.1 Oportunidad de autoevaluación

Proporcione la carga de las siguientes partículas elementales o átomos en términos de la carga elemental $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

- a) protón
- b) neutrón
- c) átomo de helio (dos protones, dos neutrones y dos electrones)
- d) átomo de hidrógeno (un protón y un electrón)
- e) quark arriba
- f) quark abajo
- g) electrón
- h) partícula alfa (dos protones y dos neutrones)

figura 21.6a). El neutrón eléctricamente neutro (¡de ahí su nombre!) consta de un quark arriba y dos quarks abajo, como se muestra en la figura 21.6b), de modo que su carga es $q_n = (1)(+\frac{2}{3}e) + (2)(-\frac{1}{3}e) = 0$. En el capítulo 39 veremos que hay otros quarks mucho más masivos, denominados *extraño*, *encanto*, *cima* y *fondo* que tienen la misma carga que los quarks *arriba* y *abajo*. También hay partículas mucho más masivas semejantes al electrón denominadas *muon* y *tau*. Pero prevalece la cuestión básica de que toda la materia en la vida diaria está compuesta por electrones (con carga eléctrica $-e$), quarks arriba y abajo (con cargas eléctricas $+\frac{2}{3}e$ y $-\frac{1}{3}e$, respectivamente) y gluones (carga cero).

Es extraordinario que la suma de la carga de los quarks dentro de un protón sea *exactamente* de la misma magnitud que la carga del electrón. Este hecho sigue siendo un enigma, que indica algún tipo de simetría en la naturaleza que aún no se comprende cabalmente.

Debido a que todos los objetos macroscópicos están compuestos por átomos, que a su vez están compuestos por electrones y núcleos atómicos integrados por neutrones y protones, la carga, q , de cualquier objeto puede expresarse en términos de la suma del número de protones, N_p , menos la suma del número de electrones, N_e , que componen el objeto:

$$q = e \cdot (N_p - N_e) \tag{21.5}$$

EJEMPLO 21.1 Carga neta

PROBLEMA

Si quisiéramos que un bloque de hierro de 3.25 kg de masa adquiriera una carga positiva de 0.100 C, ¿qué fracción de los electrones es necesario remover?

SOLUCIÓN

El hierro tiene un peso atómico de 56. En consecuencia, el número de átomos de hierro en el bloque de 3.25 kg es

$$N_{\text{átomo}} = \frac{(3.25 \text{ kg})(6.022 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol})}{0.0560 \text{ kg/mol}} = 3.495 \cdot 10^{25} = 3.50 \cdot 10^{25} \text{ átomos.}$$

Observe que hemos usado el número de Avogadro, $6.022 \cdot 10^{23}$, y la definición de mol, que especifica que la masa de 1 mol de una sustancia en gramos es justo el número de masa de la sustancia; en este caso, 56.

Debido a que el número atómico del hierro es 26, que es igual al número de protones o electrones en un átomo de hierro, el número total de electrones en el bloque de 3.25 kg es:

$$N_e = 26N_{\text{átomo}} = (26)(3.495 \cdot 10^{25}) = 9.09 \cdot 10^{26} \text{ electrones.}$$

Para encontrar el número de electrones, $N_{\Delta e}$, que es necesario remover, se usa la ecuación 21.5. Debido a que el número de electrones es igual al número de protones en el objeto original sin carga, la diferencia en el número de protones y electrones es el número de electrones removidos, $N_{\Delta e}$:

$$q = e \cdot N_{\Delta e} \Rightarrow N_{\Delta e} = \frac{q}{e} = \frac{0.100 \text{ C}}{1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 6.24 \cdot 10^{17}.$$

Por último, se obtiene la fracción de electrones que deben removerse:

$$\frac{N_{\Delta e}}{N_e} = \frac{6.24 \cdot 10^{17}}{9.09 \cdot 10^{26}} = 6.87 \cdot 10^{-10}.$$

Es necesario remover menos de mil millones de electrones de un bloque de hierro a fin de colocar en él una carga positiva mensurable de 0.100 C.

21.3 Aislantes, conductores, semiconductores y superconductores

Los materiales que conducen electricidad se denominan **conductores**. Los materiales que no conducen electricidad se denominan **aislantes**. (Por supuesto, hay buenos y malos conductores y buenos y malos aislantes.)

La estructura electrónica de un material se refiere a la forma en la que los electrones están ligados al núcleo, como se analizará en capítulos posteriores. Por ahora estamos interesados en la propensión relativa de los átomos de un material a donar o adquirir electrones. Para los aislantes, no ocurre ningún movimiento libre de los electrones porque el material no tiene electrones ligados débilmente que puedan escapar de sus átomos y entonces moverse con libertad por todo el material. Incluso cuando una carga externa se coloca sobre un aislante, no puede moverse de manera apreciable. Algunos aislantes típicos son el vidrio, el plástico y la tela.

Por otra parte, los materiales conductores poseen una estructura electrónica que permite el movimiento libre de algunos electrones. Las cargas positivas de los átomos de un material conductor no se mueven, puesto que residen en los núcleos pesados. Algunos conductores sólidos típicos son los metales. El cobre, por ejemplo, es un muy buen conductor usado en cables eléctricos.

Los fluidos y el tejido orgánico también sirven como conductores. El agua pura destilada no es un muy buen conductor. Sin embargo, cuando se disuelve sal común (NaCl) en agua, la conductividad mejora en forma extraordinaria, ya que los iones de sodio con carga positiva (Na^+) y los iones de cloro con carga negativa (Cl^-) pueden moverse dentro del agua para conducir electricidad. En los líquidos, a diferencia de los sólidos, los portadores de carga positiva, así como negativa, son móviles. El tejido orgánico no es muy buen conductor, pero conduce electricidad lo suficientemente bien como para hacer que grandes corrientes sean peligrosas para los seres humanos. (En el capítulo 26 aprenderemos más sobre la corriente eléctrica, donde estos términos, que son de uso cotidiano, se definirán con precisión.)

Semiconductores

Una clase de materiales denominados **semiconductores** puede cambiar de aislante a conductor y de vuelta a aislante. Los semiconductores fueron descubiertos apenas hace poco más de 50 años, aunque constituyen la columna vertebral de todas las industrias de computadoras y aparatos electrónicos. El primer uso amplio de los semiconductores fue en los transistores (figura 21.7a); los chips de computadoras modernas (figura 21.7b) realizan las funciones de millones de transistores. Las computadoras y prácticamente todos los productos y dispositivos electrónicos (televisiones, cámaras, videojuegos, teléfonos celulares, etc.) no existirían sin semiconductores. Gordon Moore, cofundador de Intel, hizo la famosa declaración de que, debido a los avances tecnológicos, el poder de la CPU (unidad central de procesamiento) promedio de las computadoras se duplica cada 18 meses, lo cual es una media empírica durante las cinco últimas décadas. Este fenómeno de duplicado se denomina *ley de Moore*. Los físicos han sido, y sin duda seguirán siendo, el motor detrás de este proceso de descubrimiento, invención y mejoramiento científicos.

Hay dos tipos de semiconductores: intrínsecos y extrínsecos. Ejemplos de *semiconductores intrínsecos* son los cristales químicamente puros del arseniuro de galio, germanio o, en especial, silicio. Los ingenieros producen *semiconductores extrínsecos* por *dopaje*, que es la adición de cantidades minúsculas (por lo general, 1 parte en 10^6) de otros materiales que pueden actuar como donantes o receptores de electrones. Los semiconductores dopados con donantes de electrones se denominan *tipo n* (la *n* significa “carga negativa”). Si la sustancia dopante actúa como un receptor de electrones, el hueco que deja un electrón que se fija a un receptor también puede desplazarse a través del semiconductor y actuar como un portador eficaz de carga positiva. En consecuencia, estos semiconductores se denominan *tipo p* (la *p* significa “carga positiva”). Así, a diferencia de los conductores sólidos normales en los que sólo se mueve la carga negativa, los semiconductores tienen movimiento de cargas negativas o positivas (que realmente son huecos de electrones; es decir, electrones faltantes).

Superconductores

Los **superconductores** son materiales que tienen resistencia cero a la conducción de electricidad, a diferencia de los conductores normales, que conducen electricidad bien, pero con algunas pérdidas. Un superconductor típico es una aleación de niobio-titanio que debe mantenerse casi a la temperatura del helio líquido (4.2 K) para retener sus propiedades de superconducción. Durante los últimos 20 años se han desarrollado nuevos materiales denominados *superconductores de alta T_c* (la T_c significa “temperatura crítica”, que es la temperatura máxima que permite la superconductividad). Estos materiales son superconductores a temperatura del nitrógeno líquido (77.3 K). Todavía no se han encontrado materiales que sean superconductores a temperatura ambiente (300 K), aunque serían extremadamente útiles. Actualmente se realiza investigación dirigida al desarrollo de tales materiales y a la explicación teórica de los fenómenos físicos que originan la superconducción de alta T_c .



a)



b)

FIGURA 21.7 a) Réplica del primer transistor, inventado en 1947 por John Bardeen, Walter H. Brattain y William B. Shockley. b) Los chips de una computadora moderna hechos a partir de laminillas de silicio contienen muchas decenas de millones de transistores.

► FIGURA 15.2 La ley de carga-fuerza o ley de cargas *a)* Cargas iguales se repelen, *b)* Cargas desiguales se atraen.

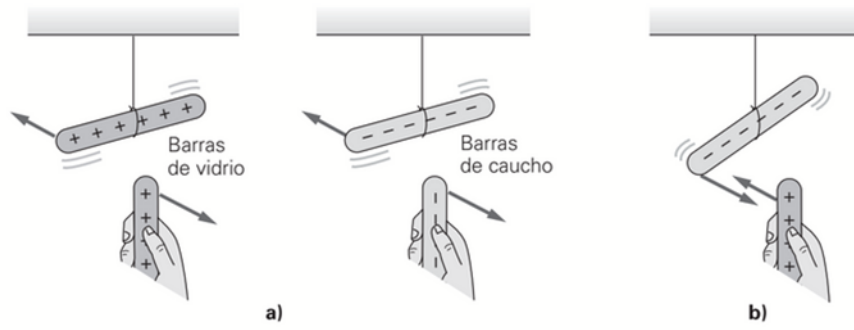
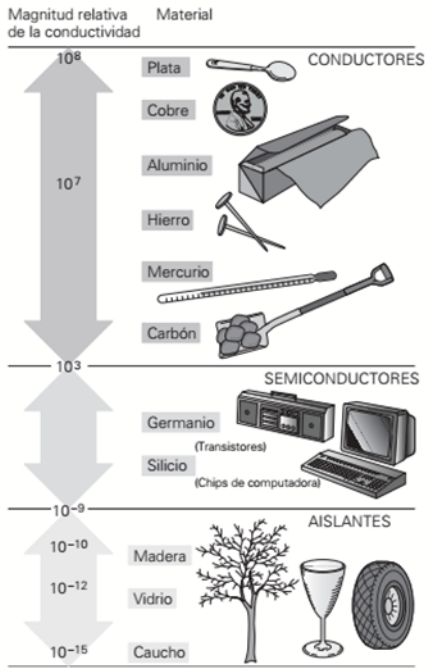


TABLA 15.1 Partículas subatómicas y sus cargas eléctricas

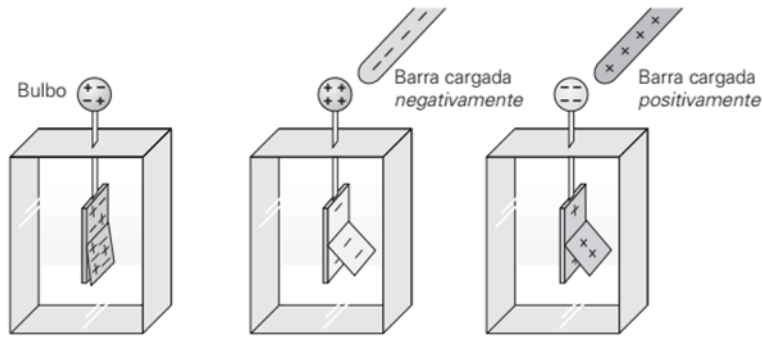
Partícula	Carga eléctrica*	Masa*
Electrón	$-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Protón	$+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Neutrón	0 ✓	$m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$

* Aunque los valores están dados con cuatro cifras significativas, usaremos sólo dos o tres cifras en nuestros cálculos.

$\times 10^4$
 $\times 10^4$



◀ **FIGURA 15.3** Conductores, semiconductores y aislantes Una comparación de las magnitudes relativas de las conductividades eléctricas de varios materiales (el dibujo no está a escala).



◀ **FIGURA 15.4** El electroscoipo Este dispositivo sirve para determinar si un objeto está cargado eléctricamente. Cuando un objeto cargado se acerca al bulbo, la hoja se aleja de la pieza metálica.

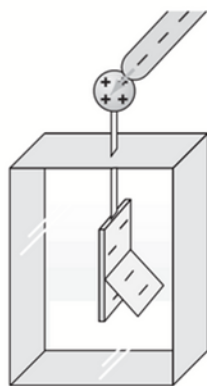
Carga por fricción

En el proceso de carga por fricción, al frotar ciertos materiales aislantes con tela o piel, resultan cargados eléctricamente mediante una transferencia de carga. Por ejemplo, si una barra de caucho duro se frota con piel, adquirirá una carga neta negativa; al frotar una barra de vidrio con seda, la barra adquirirá una carga neta positiva. Este proceso se llama **carga por fricción**. La transferencia de carga se debe al contacto entre los materiales, y la cantidad de carga transferida depende, como podría esperarse, de la naturaleza de los materiales implicados.

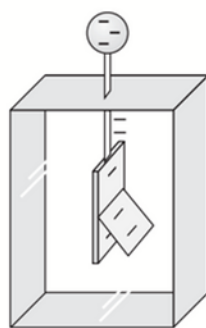
El ejemplo 15.1 fue realmente un ejemplo de carga por fricción, en el que usted recogió una carga neta de la alfombra. Si toca un objeto metálico, como la perilla de una puerta, es probable que sienta una chispa. Conforme su mano se aproxima, la perilla se carga positivamente y, por lo tanto, atrae los electrones de su mano. Conforme se desplazan, chocan con los átomos del aire y los excitan, emitiendo luz conforme pierden excitación (es decir, energía). Esta luz se ve como la chispa de un “mini relámpago” entre su mano y la perilla.

Carga por conducción (o contacto)

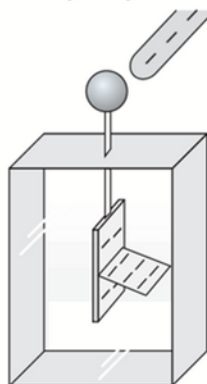
Al acercar una varilla cargada a un electroscopio, éste revelará que la varilla está cargada, pero no le indicará qué tipo de carga tiene esta última (positiva o negativa). Sin embargo, es posible determinar el signo de la carga si al electroscopio se le da primero un tipo conocido de carga (neta). Por ejemplo, los electrones pueden transferirse al electroscopio desde un objeto negativamente cargado, como se ilustra en la figura 15.



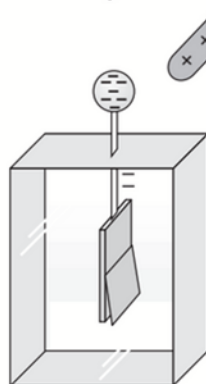
a) El electroscopio neutral se toca con una varilla con carga negativa.



b) Las cargas se transfieren al bulbo; el electroscopio tiene carga neta negativa.



c) La varilla cargada negativamente repele a los electrones; la hoja se separa más aún.

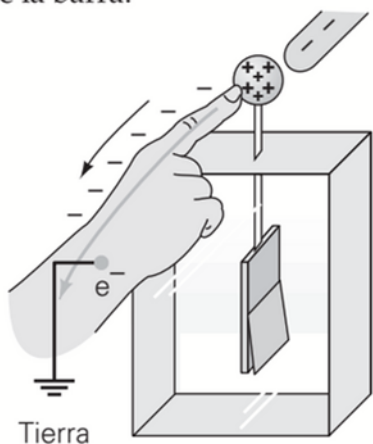


d) La varilla cargada positivamente atrae a los electrones; la hoja se colapsa.

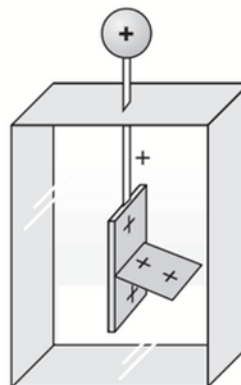
Carga por inducción

Usando una barra de caucho con carga negativa (cargada por fricción), cabe preguntar si es posible crear un electroscopio que esté positivamente cargado. La respuesta es sí, y hacerlo implica un proceso llamado **carga por inducción**. Comenzando con un electroscopio descargado, usted toca el bulbo con un dedo, lo que pone a tierra el electroscopio, esto es, ofrece una trayectoria por la cual los electrones pueden escapar del bulbo (▼ figura 15.6). Entonces, cuando una barra cargada negativamente se acerca al bulbo (pero sin tocarlo), la barra repele electrones del bulbo al dedo y hacia abajo a tierra (de ahí el término *tierra*). Retirar su dedo *mientras la barra cargada se mantiene cerca*, deja el electroscopio con una carga neta positiva. Esto se debe a que cuando se retira la barra, los electrones que viajan a la Tierra (es decir, al suelo) no tienen manera de regresar porque ha desaparecido el camino para ello.

▼ **FIGURA 15.6** Carga por inducción *a)* Al tocar el bulbo con un dedo se forma una trayectoria hacia la tierra para la transferencia de carga. El símbolo e^- significa "electrón". *b)* Cuando se retira el dedo, el electroscopio tiene una carga positiva neta, contraria a la de la barra.



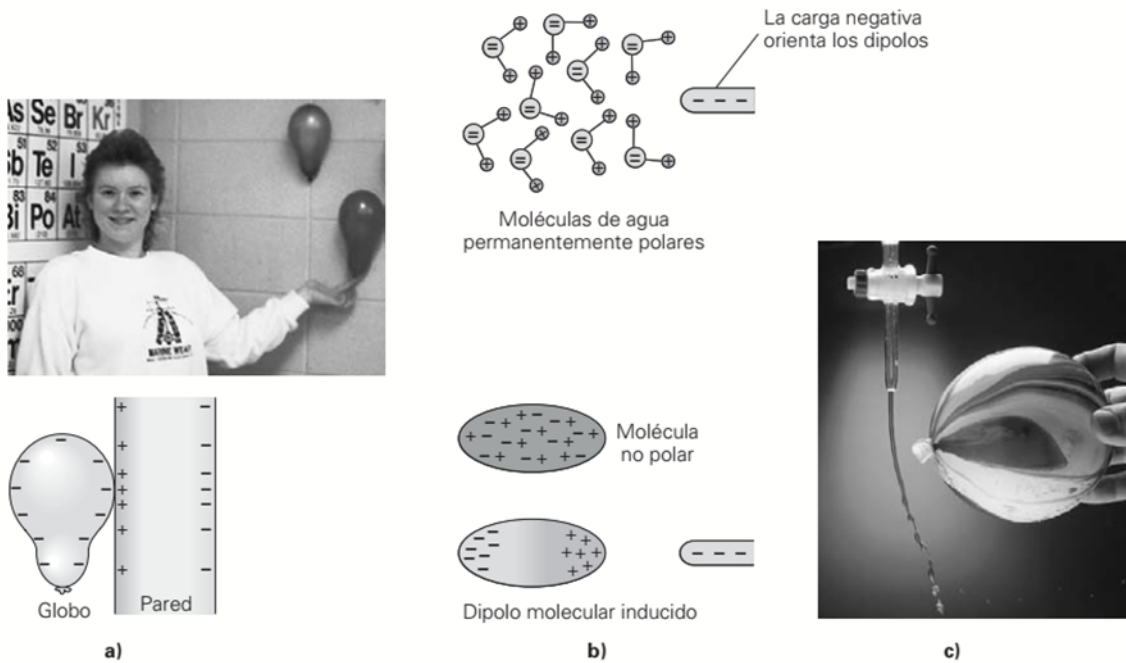
a) Repelidos por la barra negativamente cargada, los electrones son transferidos a tierra a través de la mano.



b) Al retirar primero el dedo y luego la barra, el electroscopio queda positivamente cargado.

Separación de carga por polarización

La carga por contacto y por inducción crean una carga neta mediante la remoción de carga de un objeto. Sin embargo, es posible que la carga se mueva *dentro del objeto* mientras la carga neta se mantiene en cero. En este caso, la inducción genera una polarización, o separación de la carga positiva y negativa. Si el objeto no es puesto a tierra, se volverá eléctricamente neutro, pero tendrá cantidades de carga en ambos extremos iguales pero de signo contrario. En esta situación, decimos que el objeto actúa como un *dipolo eléctrico* (véase la sección 15.4). En el nivel molecular, los dipolos eléctricos pueden ser permanentes; es decir, no necesitan tener cerca un objeto cargado para retener su separación de carga. Un buen ejemplo de esto es la molécula de agua. Ejemplos tanto de dipolos permanentes como de no permanentes, así como de las fuerzas que actúan sobre



▲ **FIGURA 15.7 Polarización** a) Cuando los globos se cargan por fricción y se ponen en contacto con la pared, ésta se polariza. Esto es, se induce una carga de signo contrario sobre la superficie de la pared, a la que los globos se adhieren por la fuerza de la atracción electrostática. Los electrones en el globo no lo abandonan porque su material (el caucho) es un conductor deficiente. b) Algunas moléculas, como las del agua, son de naturaleza polar; esto es, tienen regiones separadas de carga positiva y negativa. Pero incluso algunas moléculas que no son normalmente de naturaleza dipolar pueden polarizarse temporalmente por la presencia de un objeto cargado cercano. La fuerza eléctrica induce una separación de carga y, en consecuencia, la aparición de dipolos moleculares temporales. c) Una corriente de agua se dobla hacia un globo cargado. El globo cargado simplemente atrae los extremos de las moléculas de agua, haciendo que la corriente se doble.

a la bola del electroscopio pero no la toca, se retira la conexión en la figura 21.11d). Así, una vez que la paleta se aleja del electroscopio en la figura 21.11e), el electroscopio sigue estando cargado positivamente (pero con una desviación menor que en la figura 21.11b). El mismo proceso también funciona con una paleta con carga positiva. Este proceso se denomina **carga por inducción** y genera una carga en el electroscopio con signo opuesto a la carga en la paleta.

21.5 Fuerza electrostática: ley de Coulomb

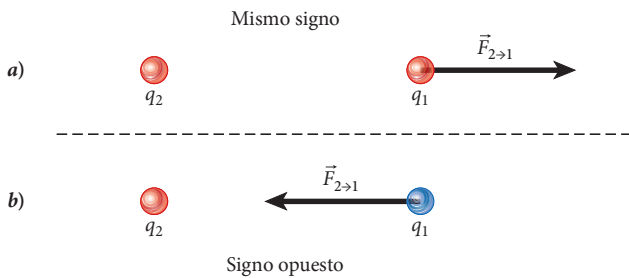


FIGURA 21.12 La fuerza ejercida por la carga 2 sobre la carga 1: a) dos cargas con el mismo signo; b) dos cargas con signos opuestos.

La ley de la carga eléctrica es evidencia de una fuerza entre dos cargas cualesquiera en reposo. Experimentos han demostrado que para la fuerza electrostática ejercida por una carga q_2 sobre una carga q_1 $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$, la fuerza sobre q_1 apunta hacia q_2 si las cargas tienen signos opuestos y se aleja de q_2 si las cargas tienen signos iguales (figura 21.12). Esta fuerza sobre una carga debida a otra carga siempre está sobre una recta entre las dos cargas. La **ley de Coulomb** proporciona la magnitud de esta fuerza como

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \tag{21.6}$$

donde q_1 y q_2 son cargas eléctricas, $r = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ es la distancia entre éstas y

$$k = 8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} \tag{21.7}$$

es la **constante de Coulomb**. Puede ver que un coulomb es una carga *muy* grande. Si dos cargas de 1 C estuviesen separadas por una distancia de 1 m, la magnitud de la fuerza que ejercerían una sobre la otra sería de 8.99 miles de millones de newtons. Por comparación, ¡esta fuerza es igual al peso de 450 transbordadores espaciales completamente cargados!

La relación entre la constante de Coulomb y otra constante, ϵ_0 , denominada **permitividad eléctrica del espacio libre**, es

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \tag{21.8}$$

En consecuencia, el valor de ϵ_0 es

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}. \tag{21.9}$$

Entonces, una forma alternativa para escribir la ecuación 21.6 es

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}. \tag{21.10}$$

Como verá en los siguientes capítulos, algunas ecuaciones en electrostática son más convenientes de escribir con k , mientras otras se escriben más fácilmente en términos de $1/(4\pi\epsilon_0)$.

Observe que las cargas en las ecuaciones 21.6 y 21.10 pueden ser positivas o negativas, de modo que el producto de las cargas también puede ser positivo o negativo. Puesto que cargas opuestas se atraen y cargas iguales se repelen, un valor negativo del producto $q_1 q_2$ significa atracción, y uno positivo, repulsión.

Por último, la ley de Coulomb para la fuerza debida a la carga 2 sobre la carga 1 puede escribirse en forma vectorial como:

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 1} = -k \frac{q_1 q_2}{r^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{21}. \tag{21.11}$$

En esta ecuación, \hat{r}_{21} es un vector unitario que apunta de q_1 a q_2 (vea la figura 21.13). El signo negativo indica que la fuerza apunta en sentido contrario al vector \hat{r}_{21} . En ese caso, $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ se aleja de la carga 2, como muestra la figura 21.13a). Por otra parte, si una de las cargas es positiva y la otra es negativa, entonces $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ apunta hacia la carga 2, como indica la figura 21.13b).

21.3 Ejercicio en clase

Coloque dos cargas separadas entre sí por una distancia r . Luego, cada carga se duplica y la distancia entre las cargas también se duplica. ¿Cómo cambia la fuerza entre las dos cargas?

- a) La nueva fuerza es el doble de grande.
- b) La nueva fuerza es la mitad de grande.
- c) La nueva fuerza es cuatro veces más grande.
- d) La nueva fuerza es cuatro veces más pequeña.
- e) La nueva fuerza es la misma.

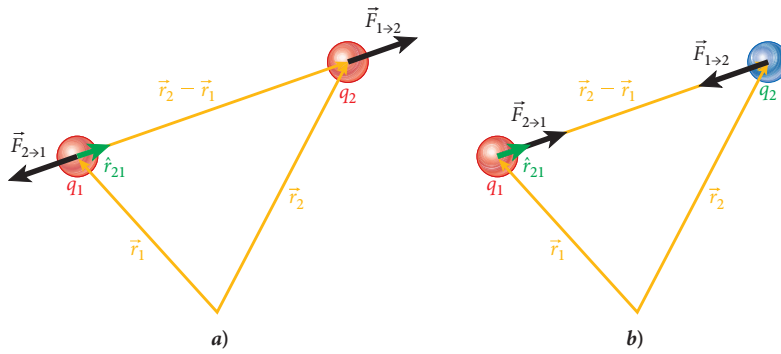


FIGURA 21.13 Vectores de fuerza electrostática entre dos cargas que interactúan entre sí: a) dos cargas con el mismo signo; b) dos cargas con signos opuestos.

Si la carga 2 ejerce la fuerza $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ sobre la carga 1, entonces la fuerza $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$ que la carga 1 ejerce sobre la carga 2 se obtiene simplemente a partir de la tercera ley de Newton (vea el capítulo 4): $\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$.

Principio de superposición

Hasta ahora en este capítulo se han tratado dos cargas. Ahora se considerarán tres cargas puntuales, q_1 , q_2 y q_3 , en las posiciones x_1 , x_2 y x_3 , respectivamente, que se muestran en la figura 21.14. La fuerza ejercida por la carga 1 sobre la carga 3, $\vec{F}_{1 \rightarrow 3}$, está dada por

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 3} = -\frac{kq_1q_3}{(x_3 - x_1)^2} \hat{x}.$$

La fuerza ejercida por la carga 2 sobre la carga 3 es

$$\vec{F}_{2 \rightarrow 3} = -\frac{kq_2q_3}{(x_3 - x_2)^2} \hat{x}.$$

La fuerza que la carga 1 ejerce sobre la carga 3 no se ve afectada por la presencia de la carga 2. La fuerza que la carga 2 ejerce sobre la carga 3 no se ve afectada por la presencia de la carga 1. Además, las fuerzas ejercidas por la carga 1 y la carga 2 sobre la carga 3 se suman vectorialmente para producir una fuerza neta sobre la carga 3.

$$\vec{F}_{\text{neta} \rightarrow 3} = \vec{F}_{1 \rightarrow 3} + \vec{F}_{2 \rightarrow 3}.$$

Esta superposición de fuerzas es completamente análoga a la descrita en el capítulo 4 para fuerzas como gravedad y fricción.

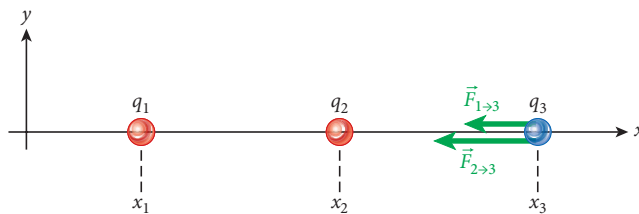


FIGURA 21.14 Fuerzas ejercidas sobre la carga 3 por la carga 1 y la carga 2.

21.4 Ejercicio en clase

¿Qué indican las fuerzas que actúan sobre la carga q_3 en la figura 21.14 sobre los signos de las tres cargas?

- a) Las tres cargas deben ser positivas.
- b) Las tres cargas deben ser negativas.
- c) La carga q_3 debe ser cero.
- d) Las cargas q_1 y q_2 deben tener signos opuestos.
- e) Las cargas q_1 y q_2 deben tener el mismo signo, y q_3 debe tener signo opuesto.

21.5 Ejercicio en clase

Suponga que las longitudes de los vectores en la figura 21.14 son proporcionales a las magnitudes de las fuerzas que representan. ¿Qué indican sobre las magnitudes de las cargas q_1 y q_2 ? (Sugerencia: La distancia entre x_1 y x_2 es la misma que la distancia entre x_2 y x_3 .)

- a) $|q_1| < |q_2|$
- b) $|q_1| = |q_2|$
- c) $|q_1| > |q_2|$
- d) No es posible determinar la respuesta a partir de la información proporcionada en la figura.

EJEMPLO 21.2 Fuerza electrostática dentro del átomo

PROBLEMA 1

¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática que los dos protones dentro del núcleo de un átomo de helio ejercen entre sí?

SOLUCIÓN 1

Los dos protones y los dos neutrones en el núcleo del átomo de helio se mantienen juntos debido a la interacción fuerte; la fuerza electrostática separa los protones. La carga de cada protón

(continúa)

(continuación)

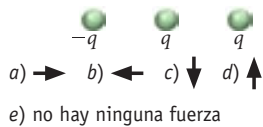
es $q_p = +e$. La distancia aproximada entre los dos protones es $r = 2 \cdot 10^{-15}$ m. Al usar la Ley de Coulomb es posible encontrar la fuerza:

$$F = k \frac{|q_p q_p|}{r^2} = \left(8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(+1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(+1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(2 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 58 \text{ N}.$$

En consecuencia, los dos protones en el núcleo de un átomo de helio están siendo separados por una fuerza de 58 N (aproximadamente el peso de un perro pequeño). Al considerar el tamaño del núcleo, esta fuerza es extraordinariamente grande. ¿Por qué no explotan los núcleos atómicos? La respuesta es que incluso una fuerza más grande, la idóneamente denominada interacción fuerte, los mantiene juntos.

21.6 Ejercicio en clase

Tres cargas están dispuestas sobre una recta como muestra la figura. ¿Cuál es la dirección de la fuerza electrostática sobre la carga de *en medio*?



PROBLEMA 2

¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática entre un núcleo de oro y un electrón del átomo de oro en una órbita de radio $4.88 \cdot 10^{-12}$ m?

SOLUCIÓN 2

El electrón con carga negativa y el átomo de oro con carga positiva se atraen entre sí con una fuerza cuya magnitud es

$$F = k \frac{|q_e q_N|}{r^2},$$

donde la carga del electrón es $q_e = -e$ y la carga del átomo de oro es $q_N = +79e$. Entonces, la fuerza entre el electrón y el núcleo es

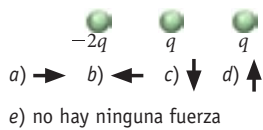
$$F = k \frac{|q_e q_N|}{r^2} = \left(8.99 \cdot 10^9 \frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2} \right) \frac{(1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(79)(1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(4.88 \cdot 10^{-12} \text{ m})^2} = 7.63 \cdot 10^{-4} \text{ N}.$$

Por lo tanto, la magnitud de la fuerza electrostática ejercida sobre un electrón en un átomo de oro por el núcleo es alrededor de 100 000 veces menor que entre los protones dentro de un núcleo.

Nota: El núcleo de oro tiene una masa que es aproximadamente 400 000 veces la del electrón. Pero la fuerza que el núcleo de oro ejerce sobre el electrón tiene exactamente la misma magnitud que la fuerza que el electrón ejerce sobre el núcleo de oro. Quizás usted afirme que esto resulta evidente a partir de la tercera ley de Newton (vea el capítulo 4), lo cual es cierto. Sin embargo, merece la pena recalcar que esta ley fundamental también se cumple para fuerzas electrostáticas.

21.7 Ejercicio en clase

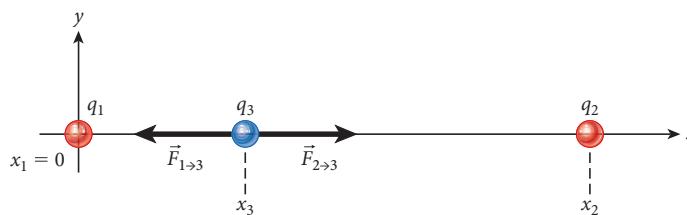
Tres cargas están dispuestas sobre una recta como muestra la figura. ¿Cuál es la dirección de la fuerza electrostática sobre la carga de la *derecha*? (Observe que la carga izquierda es el doble de lo que era en el ejercicio en clase 21.6.)



EJEMPLO 21.3

Posición de equilibrio

FIGURA 21.15 Colocación de tres partículas cargadas para el ejemplo 21.3. La tercera partícula se muestra con carga negativa.



PROBLEMA

Dos partículas cargadas están colocadas como se muestra en la figura 21.15; $q_1 = 0.15 \mu\text{C}$ está ubicada en el origen y $q_2 = 0.35 \mu\text{C}$ está sobre el eje x positivo en $x_2 = 0.40$ m. ¿Dónde debe colocarse una tercera partícula cargada, q_3 , para que sea un punto de equilibrio (donde la suma de las fuerzas es cero)?

SOLUCIÓN

Primero se determinará dónde no poner la tercera carga. Si ésta se coloca en cualquier parte fuera del eje x , siempre habrá una componente de la fuerza apuntando hacia o alejándose del eje x .

Por lo tanto, es posible encontrar un punto de equilibrio (un punto en el que la suma de fuerzas es cero) sólo *sobre* el eje x . El eje x puede dividirse en tres segmentos: $x \leq x_1 = 0$, $x_1 < x < x_2$ y $x_2 \leq x$. Para $x \leq x_1 = 0$, los vectores de fuerza provenientes tanto de q_1 como de q_2 que actúan sobre q_3 apuntan en la dirección positiva si la carga es negativa y en la dirección negativa si la carga es positiva. Debido a que se está buscando una ubicación en la que las dos fuerzas se cancelen, es posible excluir el segmento $x \leq x_1 = 0$. Con un razonamiento semejante se excluye $x \geq x_2$.

En el segmento restante del eje x , $x_1 < x < x_2$, las fuerzas tanto de q_1 y q_2 sobre q_3 apuntan en direcciones opuestas. Buscamos la ubicación x_3 donde las magnitudes absolutas de ambas fuerzas sean iguales y entonces la suma de éstas sea cero. La igualdad de las dos fuerzas la expresamos como

$$|\vec{F}_{1 \rightarrow 3}| = |\vec{F}_{2 \rightarrow 3}|,$$

que es posible volver a escribir como

$$k \frac{|q_1 q_3|}{(x_3 - x_1)^2} = k \frac{|q_2 q_3|}{(x_2 - x_3)^2}.$$

Ahora podemos ver que la magnitud y el signo de la tercera carga no importan porque esta carga se cancela, así como la constante k , con lo cual se obtiene

$$\frac{q_1}{(x_3 - x_1)^2} = \frac{q_2}{(x_2 - x_3)^2}$$

o bien,

$$q_1(x_2 - x_3)^2 = q_2(x_3 - x_1)^2. \quad (i)$$

Al tomar la raíz cuadrada de ambos miembros y despejar x_3 se encuentra

$$\sqrt{q_1}(x_2 - x_3) = \sqrt{q_2}(x_3 - x_1),$$

o bien,

$$x_3 = \frac{\sqrt{q_1}x_2 + \sqrt{q_2}x_1}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}.$$

Podemos tomar la raíz cuadrada de ambos miembros de la ecuación (i) porque $x_1 < x_3 < x_2$, y así se asegura que ambas raíces, $x_2 - x_3$ y $x_3 - x_1$, son positivas.

Al insertar los números dados en el planteamiento del problema se obtiene

$$x_3 = \frac{\sqrt{q_1}x_2 + \sqrt{q_2}x_1}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}} = \frac{\sqrt{0.15 \mu\text{C}}(0.4 \text{ m})}{\sqrt{0.15 \mu\text{C}} + \sqrt{0.35 \mu\text{C}}} = 0.16 \text{ m}.$$

Este resultado tiene sentido porque esperamos que el punto de equilibrio esté más cerca de la carga más pequeña.

PROBLEMA RESUELTO 21.1

Esferas cargadas

PROBLEMA

Dos esferas con carga idéntica cuelgan del techo suspendidas por cuerdas aislantes de la misma longitud, $\ell = 1.50 \text{ m}$ (figura 21.16). A cada esfera se le proporciona una carga $q = 25.0 \mu\text{C}$. Luego las dos esferas cuelgan en reposo, y cada cuerda forma un ángulo de 25.0° con respecto a la vertical (figura 21.16a). ¿Cuál es la masa de cada esfera?

SOLUCIÓN

PIENSE

Sobre cada esfera cargada actúan tres fuerzas: la fuerza de gravedad, la fuerza electrostática de repulsión y la tensión en la cuerda de la cual está suspendida. Al usar la primera condición de equilibrio estático del capítulo 11,

(continúa)

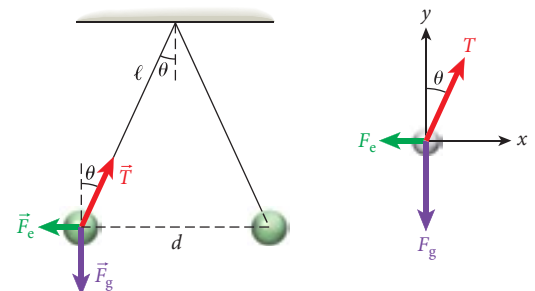


FIGURA 21.16 a) Dos esferas cargadas suspendidas del techo en su posición de equilibrio. b) Diagrama de cuerpo libre para la esfera cargada de la izquierda.

(continuación)

sabemos que la suma de todas las fuerzas sobre cada esfera debe ser cero. Es posible resolver las componentes de las tres fuerzas e igualarlas a cero, permitiendo despejar la masa de las esferas cargadas.

ESBOCE

En la figura 21.16*b*) se muestra un diagrama de cuerpo libre de la esfera izquierda.

INVESTIGUE

La condición de equilibrio estático establece que la suma de las componentes x de las tres fuerzas que actúan sobre una esfera debe ser igual a cero y que la suma de las componentes y de estas fuerzas debe ser igual a cero. La suma de las componentes x de las fuerzas es

$$T \sen \theta - F_e = 0, \quad (i)$$

donde T es la magnitud de la tensión en la cuerda, θ es el ángulo de la cuerda con respecto a la vertical y F_e es la magnitud de la fuerza electrostática. La suma de las componentes y de las fuerzas es

$$T \cos \theta - F_g = 0. \quad (ii)$$

La fuerza de gravedad, F_g , es justo el peso de la esfera cargada:

$$F_g = mg, \quad (iii)$$

donde m es la masa de la esfera cargada. La fuerza electrostática que las dos esferas ejercen entre sí está dada por

$$F_e = k \frac{q^2}{d^2}, \quad (iv)$$

donde d es la distancia entre las dos esferas. Es posible expresar la distancia entre las esferas en términos de la longitud de la cuerda, ℓ , al observar la figura 21.16*a*). Vemos que

$$\sen \theta = \frac{d/2}{\ell}.$$

Entonces, podemos expresar la fuerza electrostática en términos del ángulo con respecto a la vertical, θ , y la longitud de la cuerda, ℓ :

$$F_e = k \frac{q^2}{(2\ell \sen \theta)^2} = k \frac{q^2}{4\ell^2 \sen^2 \theta}. \quad (v)$$

SIMPLIFIQUE

Dividimos la ecuación (i) entre la ecuación (ii):

$$\frac{T \sen \theta}{T \cos \theta} = \frac{F_e}{F_g},$$

eliminando la tensión de la cuerda (desconocida) y obteniendo

$$\tan \theta = \frac{F_e}{F_g}.$$

Al sustituir en las ecuaciones (iii) y (v) la fuerza de gravedad y la fuerza electrostática, obtenemos

$$\tan \theta = \frac{k \frac{q^2}{4\ell^2 \sen^2 \theta}}{mg} = \frac{kq^2}{4mg\ell^2 \sen^2 \theta}.$$

Al despejar la masa de la esfera, llegamos a

$$m = \frac{kq^2}{4g\ell^2 \sen^2 \theta \tan \theta}.$$

CALCULE

Al insertar los valores numéricos, obtenemos

$$m = \frac{(8.99 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(25.0 \mu\text{C})^2}{4(9.81 \text{ m/s}^2)(1.50 \text{ m})^2(\sin^2 25.0^\circ)(\tan 25.0^\circ)} = 0.764116 \text{ kg.}$$

REDONDEE

Mostramos nuestro resultado con tres cifras:

$$m = 0.764 \text{ kg.}$$

VUELVA A REVISAR

Para corroborar, hacemos las aproximaciones de ángulo pequeño donde $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$ y $\cos \theta \approx 1$. Así, la tensión en la cuerda tiende a mg y podemos expresar las componentes x de las fuerzas como

$$T \sin \theta \approx mg\theta = F_e = k \frac{q^2}{d^2} \approx k \frac{q^2}{(2\ell\theta)^2}.$$

Al despejar la masa de la bola cargada, obtenemos

$$m = \frac{kq^2}{4g\ell^2\theta^3} = \frac{(8.99 \cdot 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2)(25.0 \mu\text{C})^2}{4(9.81 \text{ m/s}^2)(1.50 \text{ m})^2(0.436 \text{ rad})^3} = 0.768 \text{ kg,}$$

que está cerca de nuestra respuesta.

Precipitador electrostático

Una aplicación de la carga electrostática y de las fuerzas electrostáticas se encuentra en la limpieza de emisiones de plantas que queman carbón. Un dispositivo denominado **precipitador electrostático** (PES) se usa para remover cenizas y otras partículas que resultan de quemar carbón para generar electricidad. Su operación se ilustra en la figura 21.17.

El PES consta de cables y placas, donde los cables mantienen un alto voltaje negativo con respecto a una serie de placas que se mantienen a voltaje positivo. (Aquí el término *voltaje* se usa coloquialmente; en el capítulo 23 este concepto se define en términos de diferencia de potencial eléctrico.) En la figura 21.17, los gases de escape del proceso de quema de carbón entran al PES por la izquierda. Las partículas que pasan cerca de los cables adquieren una carga negativa. Luego, estas partículas son atraídas hacia una de las placas positivas y ahí se adhieren. El gas continúa su curso a través del PES, dejando atrás la ceniza y otras partículas. Luego, el material acumulado se sacude de las placas hacia un cesto que está abajo. Este desecho puede usarse para muchas cosas, incluida la elaboración de materiales para construcción o fertilizantes. La figura 21.18 muestra un ejemplo de planta que quema carbón que cuenta con un PES.

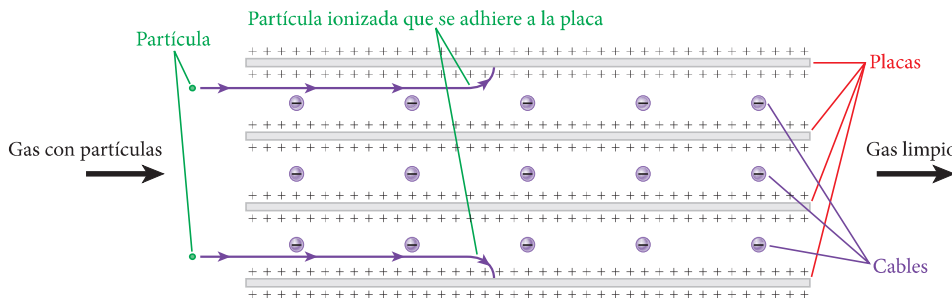
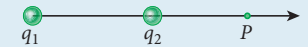


FIGURA 21.17 Operación de un precipitador electrostático utilizado para limpiar los gases emitidos por una planta que quema carbón. La vista es desde la parte superior del dispositivo.

21.2 Oportunidad de autoevaluación

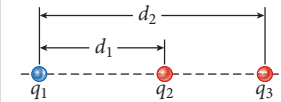
Una carga puntual positiva $+q$ se coloca en el punto P , a la derecha de dos cargas q_1 y q_2 , como se muestra en la figura. Se establece que la fuerza electrostática neta sobre la carga positiva $+q$ es cero. Califique cada una de las siguientes declaraciones como falsa o verdadera.



- a) La carga q_2 debe tener signo opuesto a q_1 y su magnitud debe ser menor.
- b) La magnitud de la carga q_1 debe ser menor que la magnitud de la carga q_2 .
- c) Las cargas q_1 y q_2 deben tener el mismo signo.
- d) Si q_1 es negativa, entonces q_2 debe ser positiva.
- e) Una de las dos, q_1 o q_2 , debe ser positiva.

21.8 Ejercicio en clase

Considere tres cargas colocadas a lo largo del eje x , como muestra la figura.



Los valores de las cargas son $q_1 = -8.10 \mu\text{C}$, $q_2 = 2.16 \mu\text{C}$ y $q_3 = 2.16 \text{ pC}$. La distancia entre q_1 y q_2 es $d_1 = 1.71 \text{ m}$. La distancia entre q_1 y q_3 es $d_2 = 2.62 \text{ m}$. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza electrostática total ejercida sobre q_3 por q_1 y q_2 ?

- a) $2.77 \cdot 10^{-8} \text{ N}$
- b) $7.92 \cdot 10^{-6} \text{ N}$
- c) $1.44 \cdot 10^{-5} \text{ N}$
- d) $2.22 \cdot 10^{-4} \text{ N}$
- e) $6.71 \cdot 10^{-2} \text{ N}$



FIGURA 21.18 Planta que quema carbón en la Universidad Estatal de Michigan e incorpora un precipitador electrostático para eliminar partículas de sus emisiones.