

22

CAPÍTULO 22

Electrostática

- 22.1 Electricidad
- 22.2 Cargas eléctricas
- 22.3 Conservación de la carga
- 22.4 Ley de Coulomb
- 22.5 Conductores y aislantes
- 22.6 Carga
- 22.7 Polarización de la carga
- 22.8 Campo eléctrico
- 22.9 Potencial eléctrico



- 1** Jim Stith, ex presidente de la American Association of Physics Teachers (Asociación Estadounidense de Profesores de Física), demuestra un generador de Whimshurst que produce relámpagos en miniatura. **2** La naturaleza produce relámpagos más grandes y más fulgurantes. **3** En el Bilkent Erzurum Laboratory School en Turquía, la profesora de física Z. Tugba Kahyaoglu coloca papel de aluminio en lo alto de un generador Van de Graaff. **4** Sus estudiantes se sorprenden cuando trozos del papel vuelan súbitamente debido a la repulsión electrostática.

Es razonable decir que, si Benjamín Franklin no hubiera nacido, la Guerra de Independencia de Estados Unidos habría terminado de un modo diferente. Esto porque Franklin, además de sus aportaciones a la Declaración de Independencia, persuadió a los franceses para que colocaran una flota de navíos cerca de la costa estadounidense e impedir así que los británicos reforzaran al general Cornwallis, a quien George Washington venció en una batalla decisiva de la guerra.



La influencia de Franklin en Europa surgió del gran respeto que ganó como diplomático y científico líder en Estados Unidos. A cualquier lugar que iba en Francia, se aglomeraban multitudes que lo admiraban.

Franklin era un hombre de recursos. Sus logros como impresor, editor, baladista, inventor, filósofo, político, soldado, bombero, embajador, caricaturista y agitador antiesclavista fueron todos parte de su compromiso con el servicio público. Una parte muy importante de su legado tiene que ver con sus logros científicos.

Si bien se le recuerda en general por su invención del pararrayos, también inventó la armónica de vidrio, la estufa Franklin, las gafas bifocales y el catéter urinario flexible. Nunca patentó sus inventos y en su autobiografía afirmó: “...del mismo modo que disfrutamos los grandes beneficios de los inventos de otros, debemos agradecer la oportunidad de servir a los demás con cualquier invento de nuestra creación; y esto debemos hacerlo de un modo libre y generoso”. A él se le recuerda en especial por sus investigaciones de la electricidad.

En una época cuando la electricidad se consideraba como dos tipos de fluido, llamados vítreo y resinoso,

Franklin propuso que la corriente eléctrica era un fluido eléctrico bajo diferentes presiones. Fue el primero en calificar dichas presiones como positiva y negativa, y fue el primero en descubrir el principio de conservación de la carga. La invención del pararrayos de Franklin comenzó con una publicación en 1750. Propuso un experimento para probar que el relámpago era electricidad, para lo cual voló una cometa durante una tormenta, en una etapa antes de que se convirtiera en una tormenta eléctrica. La leyenda dice que con una cometa logró sacar chispas de una nube. Lo que no hizo fue volar su cometa en medio de una tormenta eléctrica, lo que otros por desgracia hicieron y fueron electrocutados. En vez de ello, la acumulación de carga eléctrica en la cuerda de la cometa de Franklin le demostró que los relámpagos eran eléctricos.

Su pararrayos fue resultado de sus experimentos que demostraron que los metales con una punta aguda podían reunir o descargar electricidad silenciosamente, lo que impedía la acumulación de carga en los edificios cuando sobrevolaban nubes cargadas. En el techo de su casa instaló barras de hierro, con puntas agudas, con un alambre que corría de la base de las barras al suelo. Su hipótesis era que las barras extraerían “fuego eléctrico” silenciosamente de las nubes antes de que golpearan como relámpago. Satisfecho de que los relámpagos podían evitarse, Franklin alentó la instalación de pararrayos en la Academy of Philadelphia (más tarde la University of Pennsylvania) y en el Congreso de Pennsylvania (más tarde el Salón de la Independencia) en 1752.

En reconocimiento a sus logros con la electricidad, Franklin recibió la medalla Copley de la *British Royal Society* en 1753, y en 1756 se convirtió en uno de los pocos estadounidenses en ser elegido miembro de la *Royal Society*. Con esta notoriedad estuvo en posición de influir en el resultado de la venidera Guerra de Independencia de Estados Unidos. Benjamín Franklin realmente reconfiguró el mundo.

22.1 Electricidad



Electricidad es el nombre que se da a una amplia diversidad de fenómenos eléctricos que, en una forma u otra, subyacen a casi todo lo que te rodea. Está en los relámpagos del cielo, en la chispa cuando enciendes un fósforo y es lo que mantiene unidos a los átomos para formar moléculas. El control de la electricidad es evidente en dispositivos tecnológicos de muchos tipos, desde las lámparas hasta las computadoras. En este capítulo investigarás la electricidad en reposo, la electricidad estática, o simplemente **electrostática**.

La electrostática involucra cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas, el aura que las rodea y su comportamiento en los materiales. En el Capítulo 23 investigarás el movimiento de las cargas eléctricas o *corrientes eléctricas*. También estudiarás los voltajes que producen las corrientes y cómo pueden controlarse. En el Capítulo 24 estudiarás la relación de las corrientes eléctricas con el magnetismo y, en el Capítulo 25, aprenderás cómo pueden controlarse el magnetismo y la electricidad para operar dispositivos eléctricos, y cómo la electricidad y el magnetismo se relacionan para convertirse en luz.

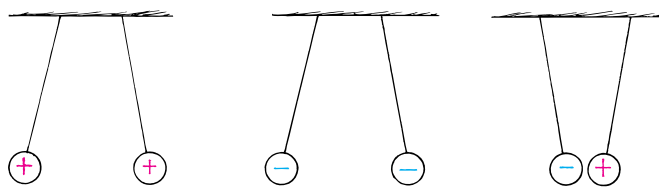
En lugar de leer este capítulo en forma lenta y cuidadosa, intenta leerlo con rapidez, para luego leerlo de nuevo con más cuidado. La física se aprende por repetición, al repasar una y otra vez el mismo material, pues cada vez tendrá más sentido.


SCREENCAST: Electricidad

Para entender la electricidad es indispensable ir paso a paso, porque un concepto es el cimiento sobre el cual se basa el siguiente concepto. Así que, cuando estudies este material, pon atención extra. Puede ser difícil, confuso y frustrante si eres impaciente; pero, con esfuerzo cuidadoso, puede ser comprensible y gratificante. ¡Adelante!

Fuerzas eléctricas

¿Y si hubiera una fuerza universal que, como la gravedad, variara inversamente con el cuadrado de la distancia pero fuera miles de millones de millones de veces más intensa? Si existiera tal fuerza y si fuera una fuerza de atracción como la gravedad, el Universo se juntaría en una bola apretada, con toda la materia tan junta como fuera posible. Pero supón que esta fuerza fuese una fuerza de repulsión y cada pedazo de materia repeliera a todos los demás. ¿Entonces qué? Entonces el Universo explotaría y se separaría en poco tiempo. Sin embargo, supón que el Universo consistiera en dos tipos de partículas: por decir, positivas y negativas. Supón que las positivas repelieran a las positivas pero atrajeran a las negativas y que las negativas repelieran negativas pero atrajeran positivas. En otras palabras, tipos iguales se repelen y tipos diferentes se atraen. Supón que hubiera igual número de cada tipo de partículas, ¿de modo que esta intensa fuerza estuviera perfectamente equilibrada! ¿Cómo sería el Universo? La respuesta es sencilla: sería como éste en el que vives. Porque existen tales partículas y existe tal fuerza. Se le llama *fuerza eléctrica*.


FIGURA 22.1

Cargas iguales se repelen. Cargas distintas se atraen.

En el interior de cada trozo de materia hay átomos. ¿Y qué hay adentro de cada átomo? Las cargas positivas y las negativas se mantienen unidas por la enorme atracción de la fuerza eléctrica. Al formar grupos compactos y mezclados en forma equitativa de positivas y negativas, las enormes fuerzas eléctricas se han equilibrado casi a la perfección. Cuando dos o más átomos se unen para formar una molécula, la molécula también contiene positivas y negativas en equilibrio. Y cuando billones de moléculas se combinan para formar un pedacito de materia, las fuerzas eléctricas se equilibran de nuevo. Entre dos piezas de materia ordinaria difícilmente existe atracción o repulsión eléctrica porque cada pieza contiene igual número de positivas y negativas. Entre la Tierra y la Luna, por ejemplo, no hay fuerza eléctrica. La fuerza gravitacional mucho más débil, que sólo atrae, permanece como la fuerza predominante entre estos cuerpos.

22.2 Cargas eléctricas

Los términos *positivo* y *negativo* se refieren a la *carga* eléctrica, la cantidad fundamental que subyace a todos los fenómenos eléctricos. Las partículas con carga positiva en la materia ordinaria son los protones, y las partículas con carga negativa son los electrones. El protón está incrustado en el núcleo de un átomo y no es móvil como el electrón más pequeño que puede deambular y hacer toda suerte de cosas útiles. Acompañando a los protones en el núcleo hay partículas neutras llamadas neutrones. Cuando dos átomos se acercan, el equilibrio entre las fuerzas de atracción y repulsión no es perfecto, porque los electrones se mueven dentro del volumen de cada átomo. Los átomos, entonces, pueden atraerse entre sí y formar una molécula. De hecho, todas las fuerzas de enlace químico que mantienen unidos a los átomos para formar moléculas son de naturaleza eléctrica. Cualquier persona que piense estudiar química primero debe saber algo de la atracción y la repulsión eléctricas y, antes de estudiar fenómenos eléctricos, debe saber algo de los átomos. Recuerda del Capítulo 11 algunos hechos importantes acerca de los átomos:



Cuáles cargas se llaman positivas y cuáles se llaman negativas es el resultado de una elección hecha por Benjamín Franklin. Pudo haber sido del modo contrario.

1. Todo átomo está compuesto de un *núcleo* con carga positiva rodeado de electrones con carga negativa.
2. Los electrones de todos los átomos son idénticos. Cada uno tiene la misma cantidad de carga negativa y la misma masa.
3. Los protones y los neutrones componen el núcleo. (La forma común del átomo de hidrógeno, que no tiene neutrón, es la única excepción.) Los protones son aproximadamente 1,800 veces más masivos que los electrones, pero portan una cantidad de carga positiva igual a la carga negativa de los electrones. Los neutrones tienen un poco más masa que los protones y no tienen carga neta.
4. Por lo general, los átomos tienen tantos electrones como protones, de modo que el átomo tiene una carga *net*a igual a cero.

¿Por qué los protones no jalan hacia el núcleo a los electrones con carga opuesta? Puedes pensar que los electrones se comportan de la misma forma que los planetas que orbitan al Sol. Pero no es así; esta explicación planetaria no es válida para los electrones. Cuando se descubrió el núcleo en 1911, los científicos sabían que los electrones no podían orbitar plácidamente alrededor del núcleo en la forma que la Tierra orbita al Sol. Sólo en aproximadamente una cien millonésima de segundo, de acuerdo con la física clásica, el electrón caería en espiral hacia el núcleo, y emitiría radiación electromagnética al hacerlo. De modo que se necesitaba una nueva teoría, la teoría llamada mecánica cuántica. Para describir el movimiento de los electrones, todavía se usa la terminología antigua, *órbita* y *orbital*, aunque la palabra preferida es *capa*, que sugiere que los electrones están dispersos sobre una región esférica. En la actualidad, la explicación de la estabilidad del átomo tiene que ver con la naturaleza ondulatoria de los electrones. Un electrón actúa como una onda y necesita cierta cantidad de espacio en relación con su longitud de onda. Cuando se aborde la mecánica cuántica, en el Capítulo 32, verás que el tamaño atómico está determinado por la cantidad mínima de “espacio libre” que necesita un electrón.

¿Por qué los protones en el núcleo no se repelen entre sí y salen disparados? ¿Qué mantiene unido al núcleo? La respuesta es que, además de las fuerzas eléctricas en el núcleo, fuerzas nucleares no eléctricas incluso más intensas mantienen unidos a los protones y superan la repulsión eléctrica. En el Capítulo 33 aprenderás sobre las fuerzas nucleares y cómo los neutrones ponen una distancia necesaria entre los protones.

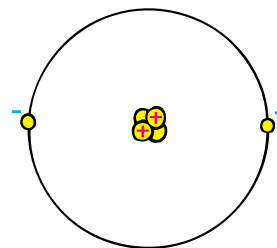


FIGURA 22.2 Modelo de un átomo de helio. El núcleo atómico está compuesto de dos protones y dos neutrones. Los protones con carga positiva atraen a dos electrones negativos.

PUNTO DE CONTROL

1. Bajo las complejidades de los fenómenos eléctricos, se encuentra una regla fundamental de la que surgen casi todos los demás efectos. ¿Cuál es esta regla fundamental?
2. ¿Cómo difiere la carga de un electrón de la carga de un protón?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cargas iguales se repelen; cargas opuestas se atraen.
2. La carga de un electrón es igual en magnitud, pero opuesta en signo, a la carga de un protón.

22.3 Conservación de la carga

Una regla básica de la física es que, siempre que algo está cargado, no se crea ni se destruye ningún electrón. Los electrones simplemente se transfieren de un material a otro. La carga se *conserva*. En todo evento, ya sea a gran escala o al nivel atómico y nuclear, siempre se ha encontrado que aplica el principio de **conservación de la carga**. Jamás se ha encontrado prueba de la creación o destrucción de carga eléctrica neta.



La carga es como una estafeta en una carrera de relevos. Se puede pasar de un objeto a otro pero no se pierde.



FIGURA 22.3

Los electrones se transfieren de la piel a la barra. Entonces la barra se carga negativamente. ¿La piel está cargada? ¿Cuánto, en comparación con la barra? ¿Positiva o negativamente?

pti

■ La electricidad estática es un problema en las bombas de gasolina. Incluso la más pequeña de las chispas puede encender los vapores de gasolina y causar incendios, con frecuencia letales. Una buena regla de seguridad es tocar metal y descargar la carga estática de tu cuerpo antes de servir el combustible. Además, no uses el teléfono celular cuando sirvas combustible.

PUNTO DE CONTROL

Si arrastras electrones hacia tus pies mientras caminas sobre una alfombra, ¿estás cargado negativa o positivamente?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Tienes más electrones después de arrastrar los pies, de modo que estás cargado negativamente (y la alfombra está cargada positivamente).

TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA Y CHISPAS

La carga eléctrica puede ser peligrosa. Hace 200 años había niños pequeños llamados pajes de pólvora que corrían descalzos bajo las cubiertas de los buques de guerra para llevar sacos de pólvora negra a los cañones de la parte superior. Era ley naval que esta tarea se realizara descalzo. ¿Por qué? Porque era importante que no se acumulara carga estática en la pólvora sobre los cuerpos de los niños mientras corrían de un lado a otro. Los pies desnudos se arrastraban sobre las cubiertas mucho menos que los zapatos y garantizaban que la carga no se acumulara y pudiera producir una chispa de ignición y una explosión.

La carga estática es un peligro en muchas industrias en la actualidad, no por las explosiones, sino porque los delicados

circuitos electrónicos pueden destruirse por las cargas estáticas. Algunos componentes de los circuitos son tan sensibles que las chispas de electricidad estática pueden “freírlos”. Los técnicos en electrónica con frecuencia usan ropa de telas especiales con alambres de aterrizaje entre sus mangas y sus calcetines. Algunos usan brazaletes especiales que están conectados a una superficie aterrizada de modo que las cargas estáticas no se acumulen cuando mueven una silla, por ejemplo. Cuanto más pequeño sea el circuito electrónico, más peligrosas serán las chispas que puede producir un cortocircuito en los elementos del circuito.

¹Cada protón tiene una carga $e+$, igual a $+1.6 \times 10^{-19}$ coulomb. Cada electrón tiene una carga $e-$, igual a -1.6×10^{-19} coulomb. Por qué partículas tan diferentes tienen la misma magnitud de carga es una pregunta sin respuesta en la física. La igualdad de las magnitudes se ha analizado con una gran exactitud.

²Sin embargo, dentro del núcleo atómico, partículas elementales llamadas quarks portan cargas de $1/3$ y $2/3$ la magnitud de la carga del electrón. Cada protón y cada neutrón están constituidos de tres quarks. Dado que los quarks siempre existen en tales combinaciones y nunca se han encontrado separados, la regla del múltiplo entero de carga del electrón también se sostiene para los procesos nucleares.

22.4 Ley de Coulomb

La fuerza eléctrica, al igual que la fuerza gravitacional, disminuye inversamente como el cuadrado de la distancia entre los cuerpos cargados. Esta relación, descubierta por Charles Coulomb en el siglo XVIII, se llama **ley de Coulomb**. Afirma que, para dos objetos cargados que son mucho más pequeños que la distancia entre ellos, la fuerza entre los dos objetos varía directamente como el producto de sus cargas e inversamente como el cuadrado de la distancia de separación. (Repasa la ley del inverso al cuadrado en la Figura 9.5.) La fuerza actúa a lo largo de una línea recta de un objeto cargado al otro. La ley de Coulomb puede expresarse como:

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

donde d es la distancia entre las partículas cargadas, q_1 es la cantidad de carga de una partícula, q_2 es la cantidad de carga de la otra partícula y k es la constante de proporcionalidad.

La unidad de carga del SI es el **coulomb**, que se abrevia C. Resulta que 1 C es la unidad de carga asociada con 6.25 trillones de electrones. Esto puede parecer un número enorme de electrones, pero sólo representa la cantidad de carga que fluye en una bombilla común de 100 watts en poco más de un segundo.

La constante de proporcionalidad k en la ley de Coulomb es similar a G en la ley de gravitación de Newton. En lugar de ser un número muy pequeño como G (6.67×10^{-11}), la constante de proporcionalidad eléctrica k es un número muy grande. Es aproximadamente

$$9,000,000,000 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$$

o, en notación científica, $k = 9 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$. La unidad $\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$ no es central para la presente discusión; tan sólo convierte el lado derecho de la ecuación de la ley de Coulomb a la unidad de fuerza, el newton (N). Lo que importa es la gran magnitud de k . Si, por ejemplo, un par de partículas con cargas iguales de 1 C cada una estuvieran separadas 1 m, la fuerza de repulsión entre ellas sería de 9 mil millones de N.³ ¡Esto sería más de 10 veces el peso de un buque de guerra! Obviamente, tales cantidades de carga neta no existen en el entorno cotidiano.

Así que la ley de gravitación de Newton para masas es similar a la ley de Coulomb para cuerpos con carga eléctrica.⁴ La diferencia más importante entre las fuerzas gravitacional y eléctrica es que las fuerzas eléctricas pueden ser o de atracción o de repulsión, en tanto que las fuerzas gravitacionales sólo son de atracción. La ley de Coulomb subyace a las fuerzas de enlace entre las moléculas que son esenciales en el campo de la química.

PUNTO DE CONTROL

1. El protón que está en el núcleo del átomo de hidrógeno atrae al electrón que lo orbita. En relación con esta fuerza, ¿el electrón atrae al protón con menos fuerza, con más fuerza o con la misma cantidad de fuerza?

³Compara esto con la fuerza de atracción gravitacional entre dos masas de 1 kg separadas 1 m: 6.67×10^{-11} N. Ésta es una fuerza extremadamente pequeña. Para que la fuerza sea 1 N, ¡las masas separadas 1 m tendrían que ser casi de 123,000 kg cada una! Las fuerzas gravitacionales entre objetos ordinarios son excesivamente pequeñas, en tanto que las fuerzas eléctricas entre objetos ordinarios pueden ser demasiado enormes. Uno no las percibe porque, en general, positivos y negativos se equilibran. Incluso para objetos muy cargados, la razón de electrones a protones suele ser menor que una parte en un trillón de trillones.

⁴De acuerdo con la teoría cuántica, una fuerza que varía inversamente como el cuadrado de la distancia conlleva el intercambio de partículas sin masa. El intercambio de fotones sin masa es responsable de la fuerza eléctrica, y el intercambio de gravitones sin masa explica la fuerza gravitacional. Algunos científicos buscan una relación incluso más profunda entre la gravedad y la electricidad. Albert Einstein pasó la última parte de su vida buscando con poco éxito una “teoría de campo unificado”. En fecha más reciente, la fuerza eléctrica se ha unificado con una de las dos fuerzas nucleares, la *fuerza débil*, que es importante en el decaimiento radiactivo.



SCREENCAST: Ley de Coulomb



La ley de Coulomb es como la ley de gravitación de Newton. Pero, a diferencia de la gravedad, las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o repulsión.

2. Si un protón a una distancia particular de una partícula cargada se repele con una fuerza dada, ¿en cuánto disminuirá la fuerza cuando el protón esté tres veces más lejos de la partícula? ¿Cuándo esté cinco veces más lejos?
3. ¿Cuál es el signo de la carga de la partícula en este caso?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La misma cantidad de fuerza, de acuerdo con la tercera ley de Newton, ¡mecánica básica! Recuerda que una fuerza es una interacción entre dos cosas; en este caso, entre el protón y el electrón. Ellos se jalan entre sí de la misma forma.
2. Disminuye a $1/9$ de su valor original; a $1/25$ su valor original.
3. Positivo.

22.5 Conductores y aislantes

Es fácil establecer una corriente eléctrica en un metal porque uno o más de los electrones de la capa exterior de sus átomos no están anclados a los núcleos de átomos particulares, sino que tienen libertad de vagar en el material. A tal material se le llama buen **conductor**. Cualquier metal es un buen conductor de corriente eléctrica por la misma razón que es un buen conductor del calor: los electrones en la capa atómica exterior de sus átomos están “suelos”. Los metales costosos como la plata, el oro y el platino están entre los mejores conductores, no se corroen y se utilizan comúnmente en cantidades pequeñas para productos de alto valor. El cobre y el aluminio suelen usarse en los sistemas de cableado eléctrico debido a su buen desempeño y costo más bajo.

Los electrones en otros materiales (caucho y vidrio, por ejemplo) están estrechamente ligados y pertenecen a átomos particulares. No tienen libertad de vagar entre otros átomos del material. En consecuencia, no es fácil hacerlos fluir. Estos materiales son malos conductores de corriente eléctrica por la misma razón por la que generalmente son malos conductores del calor. A dicho material se le llama buen **aislante**. El vidrio es un aislante muy bueno y se utiliza para mantener alejados los alambres eléctricos de las torres metálicas que los transportan. Muchos plásticos también son buenos aislantes, razón por la que el alambrado de tu casa está cubierto con una capa de plástico.

Todas las sustancias pueden clasificarse de acuerdo con su capacidad para conducir carga eléctrica. Los primeros de la lista serían los conductores y los últimos serían los aislantes. Los extremos de la lista están muy separados. La conductividad de un metal, por ejemplo, puede ser más de un trillón de veces mayor que la conductividad de un aislante como el vidrio.

Semiconductores

Algunos materiales, como el germanio (Ge) y el silicio (Si), no son ni buenos conductores ni buenos aislantes. Dichos materiales caen a la mitad del intervalo de resistividad eléctrica, al ser buenos aislantes en su forma cristalina pura y convertirse en excelentes conductores cuando incluso 1 átomo en 10 millones se sustituye con una impureza que agrega o retira un electrón de la estructura cristalina. Un material que se elabora para comportarse a veces como un aislante y a veces como un conductor se llama **semi-conductor**. Son delgadas capas de materiales semiconductores emparedadas juntas las que constituyen a los *transistores*, que se usan para controlar el flujo de electrones en los circuitos, para detectar y amplificar señales de radio y para producir oscilaciones en los transmisores; también actúan como interruptores digitales. Estos pequeños sólidos fueron los primeros componentes eléctricos en los cuales materiales con diferentes características eléctricas no estaban interconectados con alambres sino que se unían



FIGURA 22.4

Es más fácil establecer una corriente eléctrica a través de cientos de kilómetros de alambre metálico que a través de unos pocos centímetros de material aislante.

pti

- El memristor (abreviatura para *resistor de memoria*) utiliza una delgada película de óxido de titanio emparedado entre dos capas de platino. En él caben chips de una forma 100 veces más densa que en los transistores y recuerda la información sin energía eléctrica. ¿Los memristores aparecerán pronto en computadoras y dispositivos inalámbricos?

físicamente en una estructura. Necesitan muy poca potencia y duran en forma indefinida con el uso normal.

Un semiconductor también conducirá cuando sobre él brille una luz del color adecuado. Una placa de selenio puro por lo general es un buen aislante, y cualquier carga eléctrica acumulada sobre su superficie permanecerá durante largos periodos en la oscuridad. Sin embargo, si la placa se expone a la luz, la carga fluye casi de inmediato. Si una placa de selenio cargada se expone a un patrón de luz, como el patrón de luz y oscuridad que constituye esta página, la carga fluirá sólo de las áreas expuestas a la luz. Si un polvo plástico negro se cepillara sobre su superficie, el polvo se pegaría sólo a las áreas cargadas donde la placa no fue expuesta a la luz. Ahora, si una hoja de papel con una carga eléctrica en el reverso se pusiera sobre la placa, el polvo plástico negro se atraería hacia el papel y formaría el mismo patrón que, por decir, el de esta página. Éstos son los principios básicos de las fotocopiadoras.

Superconductores

Un conductor ordinario tiene sólo una resistencia pequeña al flujo de carga eléctrica. Un aislante tiene mucho mayor resistencia (el tema de la resistencia eléctrica se abordará en el Capítulo 23). Es sorprendente que en ciertos materiales a temperaturas suficientemente bajas desaparezca la resistencia eléctrica. Los materiales adquieren resistencia cero (conductividad infinita) al flujo de carga. Tal material se denomina **superconductor**. Una vez que se establece corriente eléctrica en un superconductor, los electrones fluyen de manera indefinida. Sin resistencia eléctrica, la corriente pasa por un superconductor sin perder energía; no ocurren pérdidas por calor cuando fluye carga. La superconductividad de los metales cerca del cero absoluto se descubrió en 1911. En 1987 se descubrió la superconductividad a una temperatura “alta” (arriba de 100 K) en un compuesto no metálico. La superconductividad ha progresado desde entonces, con aplicaciones que incluyen líneas de transmisión eléctrica de baja pérdida y vehículos de levitación magnética de alta rapidez que se espera que sustituyan a los ferrocarriles tradicionales.

22.6 Carga

Para cargar las cosas se transfieren electrones de un lugar a otro. Esto se puede hacer mediante *contacto* físico, como ocurre cuando las sustancias se frotan una con otra o simplemente se tocan. O se puede redistribuir la carga sobre un objeto con sólo poner un objeto cargado cerca de él; a esto se llama *inducción*.

Carga mediante fricción y contacto

Todo mundo está familiarizado con los efectos eléctricos producidos por la fricción. Puedes frotar la piel de un gato y escuchar el crepitar de las chispas que se producen, o peinar tu cabello limpio y seco enfrente de un espejo en una habitación oscura y ver y escuchar las chispas. Puedes arrastrar los zapatos por una alfombra y sentir un hormigueo a medida que las cargas fluyen cuando tocas la perilla de la puerta. Habla con algunos ancianos y te contarán del sorprendente choque que recibían cuando se deslizaban por el recubrimiento plástico del asiento cuando estaban en un automóvil estacionado (Figura 22.6). La carga se transfiere entre las ropas en una secadora. En todos estos casos, los electrones se transfieren por fricción cuando un material frota contra otro.

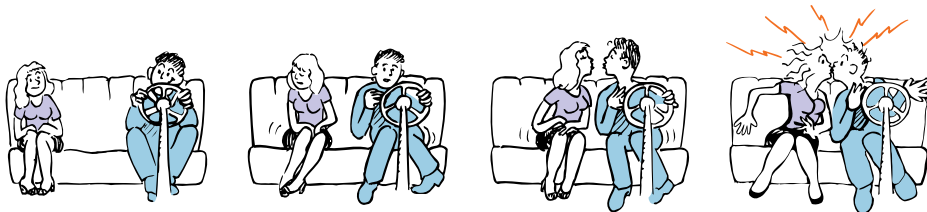


FIGURA 22.6
Carga por fricción y luego por contacto.



(a)



(b)

FIGURA 22.5
(a) Tres transistores. (b) Muchos transistores en un circuito integrado.

Los electrones pueden transferirse de un material a otro por simple contacto. Por ejemplo, cuando una barra con carga negativa se pone en contacto con un objeto neutro, algunos electrones se moverán hacia el objeto neutro. Este método de cargar se llama simplemente **carga por contacto**. Si el objeto es un buen conductor, los electrones se dispersarán hacia todas partes de su superficie porque los electrones transferidos se repelen entre sí. Si es un mal conductor, puede ser necesario tocar la barra en varios lugares sobre el objeto para obtener una distribución de carga más o menos uniforme.

Carga por inducción

Si pones un objeto cargado *cerca* de una superficie conductora, los electrones se mueven en el material de la superficie, incluso sin contacto físico. Considera las dos esferas metálicas aisladas, A y B, de la Figura 22.7. En la parte (a) las esferas se tocan entre sí, de modo que, en efecto, éstas forman un solo conductor descargado. En la parte (b), cuando una barra con carga negativa se acerca a A, los electrones en el metal, al tener libertad para moverse, se repelen lo más lejos posible hasta que su repulsión es tan grande que equilibra la influencia de la barra: la carga se redistribuye. En las partes (c) y (d), si las esferas están separadas mientras la barra todavía está presente, cada una tendrá carga igual y opuesta. Ésta es **carga por inducción**. La barra cargada nunca toca las esferas, y la barra conserva la misma carga que tenía en un inicio.

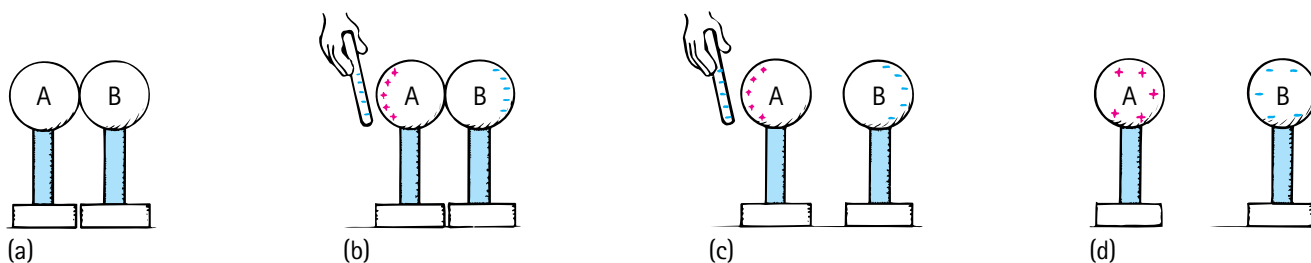


FIGURA 22.7
Carga por inducción.

De igual modo puedes cargar una sola esfera por inducción si la tocas cuando diferentes partes de ella tienen distinta carga. Considera la esfera metálica que cuelga de un hilo no conductor, como se muestra en la Figura 22.8. Cuando tocas la superficie metálica con un dedo, proporcionas una ruta para que la carga fluya hacia o desde un depósito muy grande de carga eléctrica: la tierra. Se dice que *aterrizas* (*pones a tierra*) la esfera, un proceso que puede dejarla con una carga neta. En el Capítulo 23 se regresará a esta idea de la puesta a tierra, cuando estudies las corrientes eléctricas.

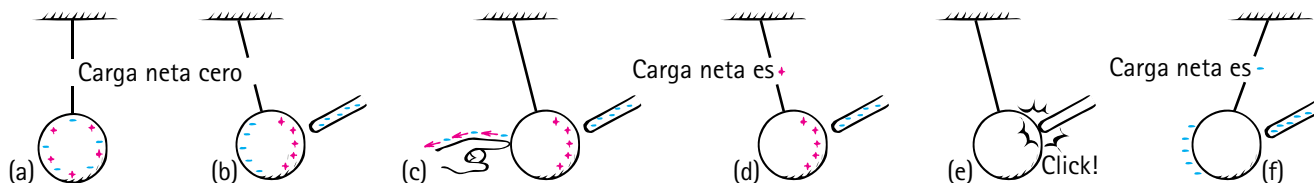


FIGURA 22.8

Etapas de inducción de carga por puesta a tierra. (a) La carga neta sobre la esfera metálica es cero. (b) La redistribución de carga se induce sobre la esfera por la presencia de la barra cargada. La carga neta sobre la esfera todavía es cero. (c) Tocar el lado negativo de la esfera retira electrones por contacto. (d) Esto deja a la esfera con carga positiva. (e) La esfera se atrae con más fuerza hacia la barra negativa y, cuando la toca, ocurre la carga por contacto. (f) La esfera negativa se repele por la barra que todavía tiene algo de carga negativa.

La carga por inducción ocurre durante las tormentas eléctricas. Los fondos de las nubes con carga negativa inducen una carga positiva sobre la superficie del suelo bajo ellas. Como se mencionó al comienzo de este capítulo, Benjamín Franklin fue el primero en demostrar esto cuando su famoso experimento del vuelo de cometa comprobó que los relámpagos eran un fenómeno eléctrico.⁵ El relámpago es una descarga eléctrica entre una nube y el suelo con carga opuesta, o entre regiones de las nubes con cargas opuestas.

Franklin también descubrió que la carga fluye con facilidad hacia o desde puntas metálicas agudas y diseñó el primer pararrayos. El principal propósito del pararrayos es evitar un incendio provocado por un relámpago. Si, por alguna razón, no se drena suficiente carga del aire a la barra y el relámpago golpea de cualquier forma, éste puede atraerse hacia la barra y tomar una ruta directa hacia el suelo, lo que por tanto salva al edificio.



FIGURA 22.10

Los pararrayos se conectan mediante alambres de uso rudo, por lo que pueden conducirse a tierra corrientes muy grandes si pega el relámpago. Con mucha frecuencia, la carga se escapa por la punta afilada de la barra para evitar un relámpago.

PUNTO DE CONTROL

1. ¿Las cargas inducidas en las esferas A y B de la Figura 22.7 tendrían que ser exactamente iguales y opuestas?
2. ¿Por qué la barra negativa de la Figura 22.7 tiene la misma carga antes y después de cargar las esferas, mas no cuando tiene lugar la carga, como en la Figura 22.8?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí, porque cada carga positiva sobre la esfera A resulta de un electrón tomado de A y movido a B. Esto es como retirar ladrillos de la superficie de un camino de ladrillos y colocarlos todos en la acera. El número de ladrillos en la acera coincide exactamente con el número de agujeros en el camino. Del mismo modo, el número de electrones adicionales en B coincidirá de manera exacta con el número de "agujeros" (cargas positivas) que quedan en A. La carga positiva es resultado de un electrón ausente.
2. En el proceso de carga de la Figura 22.7 y alguna de las esferas. Sin embargo, en la Figura 22.8, la barra tocó la esfera con carga positiva. Una transferencia de carga por contacto redujo la carga negativa de la barra.



FIGURA 22.9

La carga negativa en el fondo de la nube induce una carga positiva en la superficie del suelo bajo ella.

pti

- El relámpago ocurre principalmente en climas cálidos. A medida que el vapor de agua caliente se eleva en el aire, éste roza los cristales de hielo en el aire de la parte superior, lo que produce una carga similar a la que ocurre cuando frota los pies sobre una alfombra. Los cristales de hielo obtienen una ligera carga positiva y la corriente ascendente los lleva hacia la parte superior de la nube. De modo que la parte superior de una nube por lo general tiene carga positiva y la parte inferior tiene carga negativa. El relámpago es el rayo que forma un arco entre estas regiones y entre la nube y el suelo bajo ella.

⁵Benjamín Franklin inventó muchas cosas que mejoraron la calidad de vida. ¡Sin duda fue un hombre muy ocupado! Sólo una tarea tan importante como ayudar a formar el sistema de gobierno de Estados Unidos impidió que dedicara todavía más de su tiempo a su actividad favorita: la investigación científica de la naturaleza.



La polarización eléctrica explica lo "pegajoso" de las moléculas de agua. Las cargas opuestas entre las moléculas de agua se atraen, razón por la cual el agua en la atmósfera se condensa a una temperatura mucho más alta que los gases de las moléculas no polarizadas, como el nitrógeno y el dióxido de carbono, aun cuando ambas sean más pesadas y tengan un movimiento más lento que el H_2O .

22.7 Polarización de la carga

La carga por inducción no se restringe a los conductores. Cuando una barra cargada se acerca a un aislante, no hay electrones libres que puedan migrar por el material aislante. En vez de ello, se presenta un reordenamiento de cargas dentro de los átomos y las moléculas (Figura 22.11). Aunque los átomos no se mueven de sus posiciones relativamente fijas, sus "centros de carga" se mueven. Un lado del átomo o de la molécula se induce a volverse más negativo (o positivo) que el lado opuesto. Se dice que el átomo o la molécula están **eléctricamente polarizados**. Si la barra cargada es negativa, por ejemplo, entonces la parte positiva del átomo o la molécula se jala en una dirección hacia la barra, y el lado negativo del átomo o la molécula se empuja en una dirección que se aleja de la barra. Las partes positiva y negativa de los átomos y las moléculas se alinean. Están eléctricamente polarizadas.

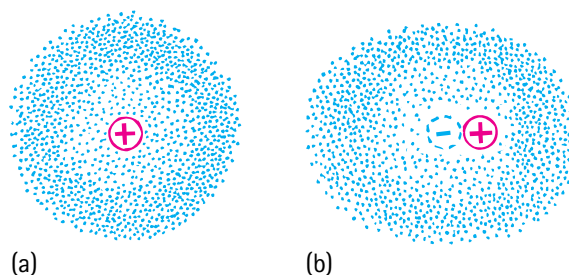


FIGURA 22.11

Un electrón que se mueve en forma frenética alrededor del núcleo atómico produce una nube de electrones. (a) El centro de la nube negativa por lo general coincide con el centro del núcleo positivo en un átomo. (b) Cuando una carga negativa externa se acerca por la derecha, como sobre un globo cargado, la nube de electrones se distorsiona de modo que los centros de carga negativa y positiva ya no coinciden. El átomo ahora está eléctricamente polarizado.

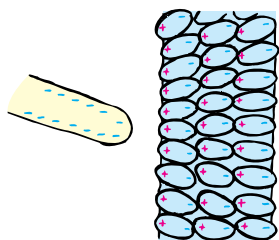


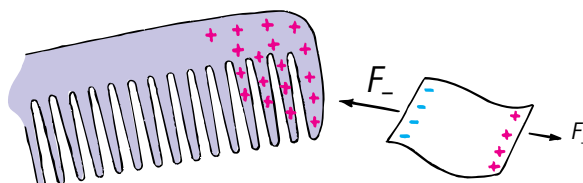
FIGURA 22.12

Todos los átomos o moléculas cerca de la superficie se vuelven eléctricamente polarizados. Cargas superficiales de igual magnitud y signo opuesto se inducen sobre las superficies opuestas del material.

Puedes entender por qué los pedazos de papel eléctricamente neutros se atraen hacia un objeto cargado, por ejemplo, un peine que te pasas por el cabello. Cuando el peine cargado se acerca, las moléculas del papel se polarizan. El signo de la carga más cercana al peine es opuesta a la carga del peine. Las cargas del mismo signo están un poco más distantes. La cercanía gana (ley del inverso al cuadrado) y los pedazos de papel experimentan una atracción neta. En ocasiones se agarrarán del peine y luego saldrán volando en forma súbita. Esta repulsión ocurre porque los pedazos de papel adquieren el mismo signo de carga que el peine cargado cuando entran en contacto. Frota un globo inflado en tu cabello y se cargará. Coloca el globo contra la pared y se pegará. Esto se debe a que la carga sobre el globo induce una carga superficial opuesta sobre la pared. De nuevo, la cercanía gana, porque la carga sobre el globo está un poco más cerca de la carga inducida opuesta que de la carga del mismo signo (Figura 22.14).

FIGURA 22.13

Un peine cargado atrae un pedazo de papel no cargado porque la fuerza de atracción para la carga más cercana es mayor que la fuerza de repulsión para la carga más lejana.



Muchas moléculas — H_2O , por ejemplo— están eléctricamente polarizadas en sus estados normales. La distribución de carga eléctrica no está muy bien equilibrada. Existe un poco más de carga negativa en un lado de la molécula que en el otro (Figura 22.15). Se dice que tales moléculas son *dipolos eléctricos*.

PUNTO DE CONTROL

1. Una barra con carga negativa se acerca a unos pequeños pedazos de papel neutro. Los lados positivos de las moléculas en el papel son atraídos hacia la barra y los lados negativos de las moléculas se repelen. ¿Por qué no se cancelan estas fuerzas de atracción y repulsión?
2. En un sentido humorístico, si frotas un globo en tu cabello y pones la cabeza contra la pared, ¿se pegará a la pared como lo haría el globo?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Los lados positivos tan sólo están más cerca de la barra. Por tanto, experimentan una mayor fuerza eléctrica que los lados negativos más alejados. En consecuencia, se dice que la cercanía gana. ¿Puedes ver que una barra positiva todavía produciría atracción?
2. Lo haría, si tuvieras la cabeza hueca; esto es: si la masa de tu cabeza fuera aproximadamente la del globo, de modo que la fuerza producida sería evidente.

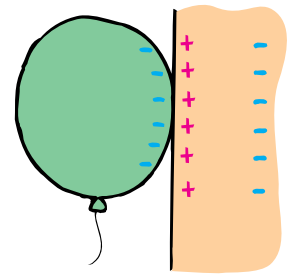


FIGURA 22.14

El globo con carga negativa polariza los átomos de la pared de madera y crea una superficie con carga positiva, de modo que el globo se pega a la pared.

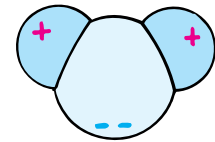


FIGURA 22.15

Una molécula de H_2O es un dipolo eléctrico.

22.8 Campo eléctrico

Las fuerzas eléctricas, al igual que las fuerzas gravitacionales, actúan entre cosas que no están en contacto unas con otras. Tanto para la electricidad como para la gravedad existe un *campo de fuerza* que influye en los cuerpos cargados y masivos, respectivamente. Recuerda, del Capítulo 9, que las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se alteran de tal forma que otro cuerpo masivo introducido a esta región experimentará una fuerza. La fuerza es gravitacional, y el espacio alterado que rodea a un cuerpo masivo es su *campo gravitacional*. Puedes considerar que cualquier otro cuerpo masivo interactúa con el campo y no directamente con el cuerpo masivo que lo produce. Por ejemplo, cuando una manzana cae de un árbol, se dice que interactúa con la Tierra, pero también puedes pensar que la manzana interactúa con el campo gravitacional de la Tierra. El campo desempeña una función de intermediario en la fuerza entre los cuerpos. A menudo se cree que los cohetes distantes y objetos parecidos interactúan con los campos gravitacionales en lugar de con las masas de la Tierra y otros cuerpos responsables de los campos. Así como el espacio alrededor de un planeta (y alrededor de cualquier otro cuerpo masivo) está lleno con un campo gravitacional, el espacio alrededor de todo cuerpo cargado eléctricamente está lleno con un **campo eléctrico**, un aura energética que se extiende por el espacio.



Los tiburones y algunas especies relacionadas de peces están equipados con receptores especializados en sus hocicos que perciben campos eléctricos muy débiles generados por otras criaturas en el agua de mar.

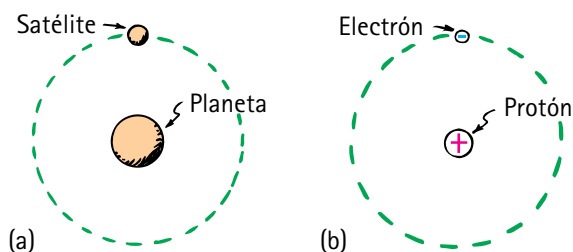


FIGURA 22.16

(a) Una fuerza gravitacional mantiene al satélite en órbita alrededor del planeta y (b) una fuerza eléctrica mantiene al electrón en órbita alrededor del protón. En ambos casos, no hay contacto entre los cuerpos. Se dice que los cuerpos en órbita interactúan con los *campos de fuerza* del planeta y el protón y en todas partes están en contacto con dichos campos. Por ende, la fuerza que un cuerpo con carga eléctrica ejerce sobre otro puede describirse como la interacción entre un cuerpo y el campo establecido por el otro.

Un campo eléctrico tiene tanto magnitud (intensidad) como dirección. La magnitud del campo en cualquier punto es simplemente la fuerza por unidad de carga. Si un cuerpo con carga q experimenta una fuerza F en algún punto del espacio, entonces el campo eléctrico E en dicho punto es:

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

El campo eléctrico se representa con flechas de vectores en la Figura 22.17a. La dirección del campo se muestra mediante los vectores y se define como la dirección en la cual se empujaría a una pequeña carga de prueba positiva en reposo.⁶ La dirección de la fuerza y la del campo en cualquier punto son iguales. Por tanto, en la figura se observa que todos los vectores apuntan hacia el centro de la esfera con carga negativa. Si la esfera tuviera carga positiva, los vectores apuntarían hacia el otro lado de su centro porque se repelería una carga de prueba positiva en la vecindad.



SCREENCAST: Campos eléctricos

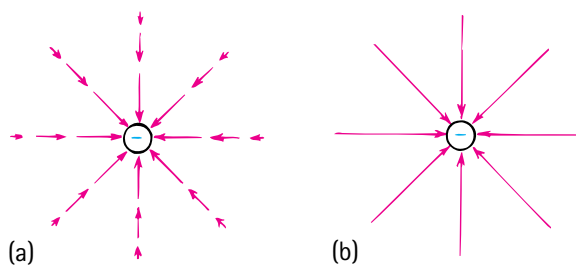


FIGURA 22.17

Representaciones del campo eléctrico en torno a una carga negativa: (a) una representación vectorial y (b) una representación con líneas de fuerza.

HORNO DE MICROONDAS

Imagina un encierro de bolas de *ping-pong* entre algunas raquetas, todas en reposo. Ahora imagina que las raquetas súbitamente comienzan a aletear de ida y vuelta como hélices semigratorias, y que golpean las bolas de *ping-pong* vecinas. Las bolas se energizan y se mueven en todas direcciones. Un horno de microondas funciona de manera similar. Las raquetas son moléculas de agua (u otras moléculas polares) que se ponen a aletear de ida y vuelta al ritmo de las microondas oscilantes en el encierro. Las bolas de *ping-pong* son moléculas no polares que constituyen el volumen del alimento que se va a cocinar.

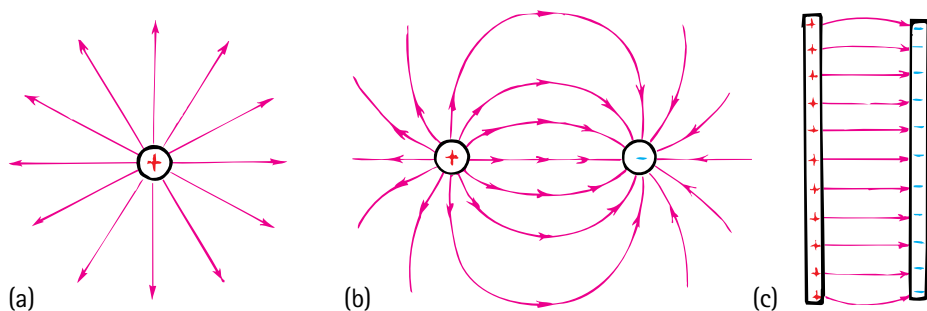
Cada molécula de H_2O es un dipolo eléctrico que se alinea con un campo eléctrico justo como la aguja de una brújula se alinea con un campo magnético. Cuando el campo eléctrico oscila, las moléculas de H_2O también oscilan. Las moléculas de H_2O se mueven de manera muy activa cuando la frecuencia de oscilación coincide con su frecuencia natural: en resonancia. El alimento se cocina por una especie de “fricción cinética” a medida que las moléculas de H_2O oscilantes (u otras moléculas polares) imparten movimiento térmico a las moléculas de su alrededor. El envase

metálico refleja las microondas por todo el horno para una rápida cocción.

El papel seco, los platos de espuma de estireno u otros materiales recomendados para usar en los hornos de microondas no contienen agua ni ninguna otra molécula polar, de modo que las microondas pasan a través de ellos sin ningún efecto. Lo mismo ocurre con el hielo, en el que las moléculas de H_2O están bloqueadas en su posición y no pueden girar. Los materiales metálicos reflejan las microondas, razón por la cual los utensilios metálicos no funcionan bien en un horno de microondas.

Cuando quieras hervir agua en un horno de microondas debes tener cuidado. En ocasiones el agua puede calentarse más rápido de lo que pueden formarse burbujas, y entonces el agua se calienta por encima del punto de ebullición: se supercalienta. Si el agua se sacude o agita lo suficiente como para que se formen burbujas con rapidez, éstas expulsarán violentamente el agua caliente de su contenedor. A más de una persona le ha explotado agua en ebullición en la cara.

⁶La carga de prueba es pequeña, de modo que no influye mucho en las fuentes del campo que se va a medir. Recuerda, de tu estudio del calor, la misma necesidad de un termómetro de masa pequeña cuando mides la temperatura de cuerpos con masas más grandes.

**FIGURA 22.18**

Algunas configuraciones del campo eléctrico. (a) Líneas de fuerza que emanan de una sola partícula con carga positiva. (b) Líneas de fuerza para un par de partículas con igual carga pero opuesta. Observa que las líneas emanan de la partícula positiva y terminan en la partícula negativa. (c) Líneas de fuerza uniformes entre dos placas paralelas con carga opuesta.

Una manera más clara de describir un campo eléctrico es con líneas de fuerza (líneas de campo), como se muestra en la Figura 22.17b. Las líneas de fuerza que se muestran en la figura representan un pequeño número de la cantidad infinitamente grande de posibles líneas que indican la dirección del campo. La figura es una representación bidimensional de tres dimensiones. Donde las líneas están más alejadas, el campo es más débil. Para una carga aislada, las líneas se extienden hasta el infinito; para dos o más cargas opuestas, las líneas se representan como emanaciones que salen de una carga positiva y terminan en la carga negativa. En la Figura 22.18 se muestran algunas configuraciones de campo eléctrico.

El concepto de campo eléctrico ayuda a comprender no sólo las fuerzas entre cuerpos cargados aislados y estacionarios, sino también lo que ocurre cuando se mueven las cargas. Cuando las cargas se mueven, su movimiento se comunica a los cuerpos cargados vecinos en forma de una perturbación del campo. Tal perturbación emana a la velocidad de la luz de un cuerpo cargado y acelerado. Aprenderás que el campo eléctrico es un almacén de energía y que la energía puede transportarse grandes distancias en un campo eléctrico. La energía que viaja en un campo eléctrico puede dirigirse y guiarse mediante alambres metálicos, o puede unirse a un campo magnético para moverse por el espacio vacío. Regresarás a esta idea en el Capítulo 23 y más adelante, cuando aprendas acerca de la radiación electromagnética.

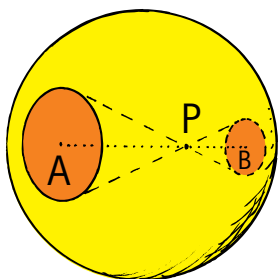


Una barra de dulce en el bolsillo de Percy Spencer se fundió misteriosamente mientras experimentaba con oscilaciones eléctricas en un nuevo tubo de vacío en 1946. Intrigado, colocó algunos granos de maíz cerca del tubo y los vio reventar. El nacimiento del horno de microondas siguió poco después.

Blindaje eléctrico

Una diferencia importante entre los campos eléctricos y los gravitacionales es que los campos eléctricos pueden blindarse mediante varios materiales, en tanto que los campos gravitacionales no pueden blindarse. La cantidad de blindaje depende del material usado para blindar. Por ejemplo, el aire hace que el campo eléctrico entre dos objetos cargados sea un poco más débil de lo que sería en el vacío, mientras que el aceite colocado entre los objetos puede disminuir el campo hasta casi una centésima parte de su intensidad original. El metal puede blindar por completo un campo eléctrico. Es muy interesante que, cuando no fluye corriente, el campo eléctrico dentro de un metal es cero, sin importar la intensidad del campo exterior.

Considera, por ejemplo, los electrones sobre una bola metálica esférica. Debido a la repulsión mutua, los electrones se dispersarán de manera uniforme sobre la superficie exterior de la bola. No es difícil ver que la fuerza eléctrica ejercida sobre una carga de prueba colocada exactamente en el centro de la bola es cero, porque las fuerzas

**FIGURA 22.19**

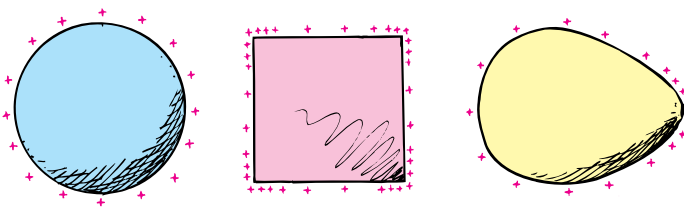
La carga de prueba en P es atraída con la misma intensidad hacia la mayor cantidad de carga en la región más alejada A que hacia la menor cantidad de carga en la región más cercana B. La fuerza neta sobre la carga de prueba es cero, ahí y en cualquier otra parte en el interior del conductor. El campo eléctrico en todo el interior también es cero.

opuestas se equilibran en todas direcciones. Es muy interesante que la cancelación completa ocurra *en cualquier parte* dentro de una esfera conductora. Para entender por qué esto es así se necesita pensar más y tiene que ver con la ley del inverso al cuadrado y un poco de geometría. Considera la carga de prueba en el punto P de la Figura 22.19. La carga de prueba está al doble de distancia del lado izquierdo de la esfera cargada de lo que está del lado derecho. Si la fuerza eléctrica entre la carga de prueba y las cargas dependiera sólo de la distancia, entonces la carga de prueba sería atraída sólo $1/4$ parte hacia la izquierda de lo que es atraída hacia la derecha. (Recuerda la ley del inverso al cuadrado: doble de distancia significa sólo $1/4$ parte del efecto, tres veces la distancia significa sólo $1/9$ parte del efecto, y así sucesivamente.) Pero la fuerza también depende de la cantidad de carga. En la figura, los conos que se extienden del punto P a las áreas A y B tienen el mismo ángulo en el ápice, pero uno tiene el doble de altitud que el otro. Esto significa que el área A en la base del cono más largo es 4 veces el área B en la base del cono más corto, lo que es cierto para cualquier ángulo en el ápice. Dado que $1/4$ parte de 4 es igual a 1, una carga de prueba en P es atraída igualmente hacia cada lado. Ocurre una cancelación. Un argumento similar se aplica si los conos que emanan del punto P están orientados en cualquier dirección. La cancelación completa ocurre en todos los puntos dentro de la esfera. (Recuerda este argumento del Capítulo 9, Figura 9.25, para la cancelación de la gravedad dentro de un planeta hueco. La bola metálica se comporta de la misma forma, sea hueca o no, porque toda su carga se reúne sobre su superficie exterior.)

Si el conductor no es esférico, entonces la distribución de carga no será uniforme. En la Figura 22.20 se muestra la distribución de carga sobre conductores con formas diversas. La mayor parte de la carga sobre un cubo conductor, por ejemplo, se repele mutuamente hacia las esquinas. Lo extraordinario aquí es esto: la distribución de carga exacta sobre la superficie de un conductor es tal que el campo eléctrico en todo el interior del conductor es cero. Míralo de esta forma: si hubiera un campo eléctrico dentro de un conductor, entonces los electrones libres en el interior del conductor se pondrían en movimiento. ¿Qué tan lejos se moverían? Hasta que se establezca el equilibrio, que es, por decir, cuando las posiciones de todos los electrones producen un campo cero dentro del conductor.

**FIGURA 22.21**

Los electrones provenientes del relámpago se repelen entre sí hacia la superficie metálica exterior. Aunque el campo eléctrico que establecen los electrones puede ser muy grande *afuera* del automóvil, el campo eléctrico neto *adentro* del automóvil es cero.

**FIGURA 22.20**

La carga eléctrica se distribuye sobre la superficie de todos los conductores de tal forma que el campo eléctrico en el interior de los conductores es cero.

No es posible blindarse uno mismo de la gravedad, porque la gravedad sólo atrae. No hay partes repelentes de gravedad para compensar las partes de atracción. Sin embargo, el blindaje de los campos eléctricos es muy simple. Rodéate a ti, o a cualquier cosa que quieras blindar, con una superficie conductora. Pon esta superficie en un campo eléctrico de cualquier intensidad de campo. Las cargas libres en la superficie conductora se ordenarán solas sobre la superficie del conductor de tal forma que todas las aportaciones interiores del campo se cancelarán entre sí. Es por eso que ciertos componentes electrónicos están encerrados en cajas metálicas y determinados cables tienen una cubierta metálica: para blindarlos de la actividad eléctrica exterior.

22.9 Potencial eléctrico

Cuando estudiaste la energía en el Capítulo 7, aprendiste que un objeto tiene energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. De igual modo, un objeto cargado tiene energía potencial (EP) en virtud de su ubicación en un campo eléctrico. Tal como se necesita trabajo para levantar un objeto masivo contra el campo gravitacional de la Tierra, se necesita trabajo para empujar una partícula cargada contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Este trabajo cambia la energía potencial eléctrica de la partícula cargada.⁷ Considera la partícula con la pequeña carga positiva ubicada a cierta distancia de una esfera con carga positiva de la Figura 22.22b. Si acercas la partícula a la esfera, gastarás energía para superar la repulsión eléctrica; esto es: harás trabajo al empujar la partícula cargada contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo realizado al mover la partícula a su nueva ubicación aumenta su energía. A la energía que la partícula posee en virtud de su ubicación se le llama **energía potencial eléctrica**. Si la partícula se libera, acelera en una dirección que se aleja de la esfera y su energía potencial eléctrica cambia a energía cinética.

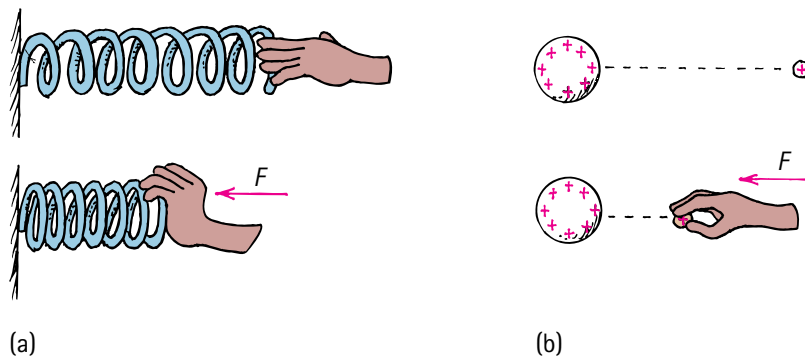


FIGURA 22.22

(a) El resorte tiene más EP mecánica cuando se comprime. (b) La partícula cargada igualmente tiene más EP eléctrica cuando se acerca a la esfera cargada. En ambos casos, el aumento de EP es resultado de la entrada de trabajo.

Si en vez de ello empujas una partícula con el doble de carga, haces el doble de trabajo al empujarla, de modo que la partícula con doble carga en la misma ubicación tiene el doble de energía potencial eléctrica que antes. Una partícula con tres veces la carga tiene tres veces más energía potencial, y así sucesivamente. En lugar de lidiar con la energía potencial de una partícula cargada, es conveniente, cuando se trabaja con partículas cargadas en un campo eléctrico, considerar la energía potencial eléctrica *por unidad de carga*. La unidad de carga eléctrica es el coulomb, de modo que la energía potencial eléctrica se considera *por cada coulomb* de carga. Entonces, en cualquier ubicación, la energía potencial eléctrica por coulomb será la misma, sin importar cuánta carga haya. Por ejemplo, un objeto con 10 coulombs de carga en una ubicación específica tiene 10 veces tanta energía potencial eléctrica como un objeto con 1 coulomb de carga.



VIDEO: Potencial eléctrico

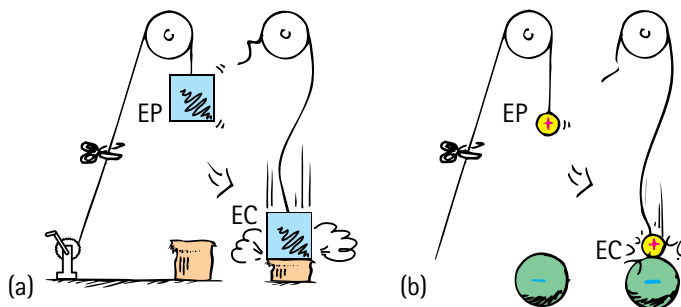
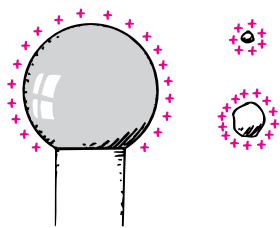


FIGURA 22.23

(a) La EP (energía potencial gravitacional) de una masa sostenida en un campo gravitacional, cuando se libera, se transforma en EC (energía cinética). (b) La EP de una partícula cargada sostenida en un campo eléctrico, cuando se libera, se convierte en EC. ¿Puedes ver que la EC adquirida por cada una es igual a la disminución en EP?

⁷Este trabajo es positivo si aumenta la energía potencial eléctrica de la partícula cargada, y negativo si la reduce.

**FIGURA 22.24**

De los dos cuerpos cargados cerca del domo cargado, el que tiene mayor carga posee la mayor EP eléctrica en el campo del domo. Pero el *potencial eléctrico* de cada uno es igual; lo mismo ocurre para cualquier cantidad de carga en la misma ubicación. ¿Puedes ver por qué?



SCREENCAST: Potencial eléctrico



De modo que *potencial eléctrico* y *voltaje* significan la misma cosa (energía potencial eléctrica por unidad de carga) en unidades de volts.

Pero 10 veces la energía potencial eléctrica para 10 veces la carga produce el mismo valor de energía potencial eléctrica por 1 coulomb de carga. La energía potencial eléctrica por unidad de carga tiene un nombre especial, **potencial eléctrico**:

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

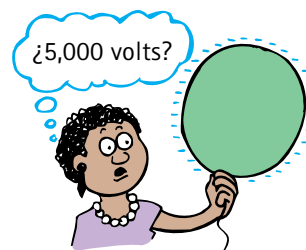
La unidad de medición para el potencial eléctrico es el volt, de modo que el potencial eléctrico con frecuencia se llama *voltaje*. Un potencial de 1 volt (V) es igual a 1 joule (J) de energía por 1 coulomb (C) de carga:

$$1 \text{ volt} = 1 \frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$$

Por tanto, una batería de 1.5 volts produce 1.5 joules de energía por cada coulomb de carga que pasa por la batería. Ambos nombres, *potencial eléctrico* y *voltaje*, son comunes, de modo que puedes usar cualquiera. En este libro los nombres se usarán de manera indistinta.

El potencial eléctrico (voltaje) tiene la misma función para la carga que la presión tiene para los fluidos. Cuando existe una diferencia de presión entre dos extremos de una tubería llena con fluido, el fluido fluye del extremo de presión alta al extremo de presión más baja. En el Capítulo 23 verás que las cargas responden a las diferencias de potencial en forma similar.

Si frota un globo en tu cabello, el globo se carga negativamente, ¡quizás varios miles de volts! Eso sería varios miles de joules de energía, si la carga fuera de 1 coulomb. Sin embargo, 1 coulomb es una cantidad de carga muy grande. La carga en un globo frotado en cabello suele ser mucho menor que un millonésimo de coulomb. Por tanto, la cantidad de energía asociada al globo cargado es muy, muy pequeña. Un voltaje alto significa mucha energía sólo si hay mucha carga de por medio. Hay una diferencia importante entre energía potencial eléctrica y potencial eléctrico.

**FIGURA 22.25**

Aunque el potencial eléctrico (voltaje) del globo cargado es alto, la energía potencial eléctrica es baja debido a la pequeña cantidad de carga. Por tanto, cuando el globo se descarga, se transfiere muy poca energía.



Un alto voltaje a baja energía es similar a las inofensivas chispas de alta temperatura de una bengala de fuegos artificiales. Recuerda que la temperatura es la energía cinética promedio por molécula, lo cual significa que la energía total es grande sólo para un número grande de moléculas. De igual modo, alto voltaje significa una gran cantidad de energía sólo para una gran cantidad de carga.

PUNTO DE CONTROL

Si en la carga de prueba cerca de la esfera cargada de la Figura 22.22b hubiera el doble de coulombs, ¿cómo se afectaría la energía potencial eléctrica de la carga de prueba en relación con la esfera? ¿Cómo se afectaría su potencial eléctrico?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El doble de coulombs significa que la carga de prueba tiene el doble de energía potencial eléctrica (porque el doble de trabajo puso a la carga en dicha ubicación). Pero el potencial eléctrico no se modificaría. El potencial eléctrico (medido en volts) es diferente de la energía potencial eléctrica (medida en joules). Asegúrate de comprender esto antes de estudiar más.

Almacenamiento de energía eléctrica

La energía eléctrica puede almacenarse en un dispositivo común denominado **capacitor**. El capacitor más simple es un par de placas conductoras separadas por una pequeña distancia, pero que no se tocan. Cuando las placas se conectan a un dispositivo de carga, como la batería que se muestra en la Figura 22.26, los electrones se transfieren de una placa a la otra. Esto ocurre a medida que la terminal positiva de la batería jala electrones de la placa conectada a ella. Dichos electrones, en efecto, son bombeados a través de la batería y por medio de la terminal negativa hacia la placa opuesta. Las placas del capacitor tienen entonces cargas iguales y opuestas: la placa positiva conectada a la terminal positiva de la batería y la placa negativa conectada a la terminal negativa. El proceso de carga se completa cuando la diferencia de potencial entre las placas es igual a la diferencia de potencial entre las terminales de la batería: el voltaje de la batería. Cuanto mayor sea el voltaje de la batería, y más grandes y juntas las placas, mayor será la carga que pueda almacenarse. En la práctica, las placas pueden ser delgadas hojas metálicas separadas por una delgada hoja de papel. Este “emparedado de papel” se enrolla entonces para ahorrar espacio y se inserta en un cilindro. Tal capacitor práctico, junto con otros, se muestra en la Figura 22.28.

Los capacitores se encuentran en casi todos los circuitos electrónicos. Un capacitor almacena energía en unidades de flash fotográfico comunes. La rápida liberación de esta energía es evidente en la corta duración del destello. Lo mismo ocurre con un desfibrilador, donde cortas explosiones de energía se aplican a una víctima de ataque cardíaco. De igual modo, pero a una escala más grande, enormes cantidades de energía se almacenan en bancos de capacitores que impulsan láseres gigantes en los laboratorios nacionales.

La energía almacenada en un capacitor proviene del trabajo necesario para cargarlo. Descargar un capacitor cargado puede ser una experiencia peligrosa si sucede que tú eres la ruta conductora. La transferencia de energía que ocurre puede ser mortal donde hay presentes altos voltajes, como en la fuente de poder de un televisor, incluso después de que el aparato se apague. Ésta es la principal razón de las señales de advertencia en tales dispositivos. La energía se almacena en el campo eléctrico entre sus placas. Entre las placas paralelas, el campo eléctrico es uniforme, como se indica en la Figura 22.18c. De modo que la energía almacenada en un capacitor es la energía de su campo eléctrico. En el Capítulo 23 se hablará de la importancia de los capacitores en los circuitos eléctricos. Luego, en los Capítulos 25 y 26, verás cómo la energía proveniente del Sol se radia en forma de campos eléctricos y magnéticos. El hecho de que la energía esté contenida en los campos eléctricos es verdaderamente trascendental.

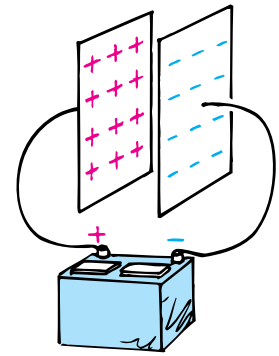


FIGURA 22.26

Un capacitor que consiste en dos placas metálicas paralelas con espacios muy estrechos entre sí. Cuando se conectan a una batería, las placas adquieren cargas iguales y opuestas. Entonces el voltaje entre las placas coincide con la diferencia de potencial eléctrico entre las terminales de la batería.



FIGURA 22.27

Mona El Tawil-Nassar ajusta las placas de un capacitor didáctico.



FIGURA 22.28

Capacitores prácticos.

PUNTO DE CONTROL

¿Cuál es la carga neta de un capacitor cargado?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cero, porque las cargas en sus dos placas son iguales en número y opuestas en signo. Incluso cuando el capacitor se descarga (por decir, al proporcionar una ruta para que la carga fluya entre las placas con carga opuesta) la carga neta del capacitor sigue siendo cero, porque entonces cada placa tiene carga cero.

**FIGURA 22.29**

Lillian, con la mano sobre un generador Van de Graaff cargado, está cargada a un voltaje alto, como lo demuestra la repulsión electrostática de su cabello.



VIDEO: El generador Van de Graaff



La mayor amenaza para la civilización es el exceso de certeza.

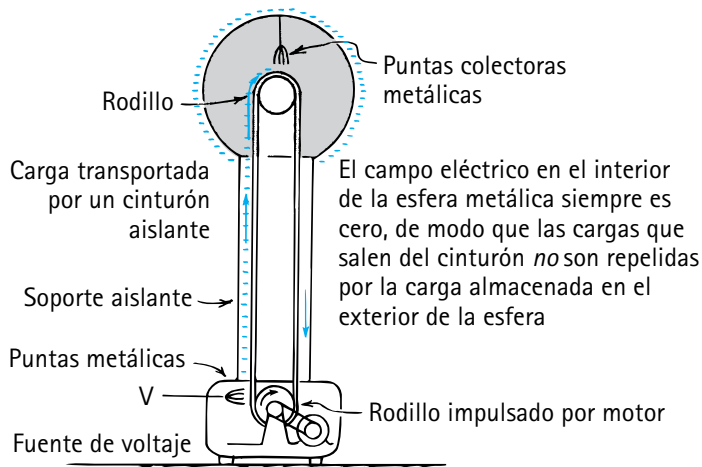
Generador Van de Graaff

Un dispositivo de laboratorio común para producir altos voltajes y crear electricidad estática es el *generador Van de Graaff*, inventado por el físico estadounidense Robert J. van de Graaff en 1931 para suministrar el alto voltaje necesario para los primeros aceleradores de partículas. Estos aceleradores eran conocidos como aplastadores de átomos, porque aceleraban partículas subatómicas a velocidades muy altas y luego las “aplastaban” contra los átomos blanco. Las colisiones resultantes podían desprender protones y neutrones de los núcleos atómicos y crear radiación de alta energía como los rayos X y los rayos gamma. La capacidad para crear estas colisiones de alta energía es esencial para la física de partículas y nuclear.

Los generadores Van de Graaff también son las máquinas de relámpagos que los científicos locos usaban en las antiguas películas de ciencia ficción. Un modelo pedagógico de un generador Van de Graaff suministra la carga estática para hacer que el cabello de Lillian se erice en la Figura 22.29.

La Figura 22.30 muestra el interior de un modelo simple del generador. Una esfera metálica hueca está sostenida por un pedestal aislante cilíndrico. Un cinturón de caucho impulsado por un motor dentro del pedestal de soporte pasa por un conjunto de puntas metálicas con forma de peine que se mantienen a un gran potencial negativo en relación con la tierra. La descarga en las puntas deposita un suministro continuo de electrones en el cinturón, que después se llevan hacia la esfera conductora hueca. Dado que el campo eléctrico dentro de la esfera es cero, la carga no tiene impedimento para escapar hacia las puntas metálicas (pequeños pararrayos) dentro de la esfera. Los electrones se repelen entre sí hacia la superficie exterior de la esfera, tal como la carga estática siempre se encuentra en la superficie exterior de cualquier conductor. Esto deja el interior descargado y en condiciones de recibir más electrones conforme éstos se transportan en el cinturón. El proceso es continuo y la carga se acumula hasta que el potencial negativo sobre la esfera es mucho mayor que en la fuente de voltaje en el fondo, del orden de millones de volts.

Una esfera con un radio de 1 m puede elevarse a un potencial de 3 millones V antes de que ocurra una descarga eléctrica a través del aire. El voltaje puede aumentarse aún más si se aumenta el radio de la esfera o si se coloca todo el sistema en un contenedor lleno con gas a alta presión. Los generadores Van de Graaff pueden producir voltajes de hasta 20 millones de V. Tocar uno puede ser una experiencia que ponga los pelos de punta.

**FIGURA 22.30**

Un modelo simple de un generador Van de Graaff.