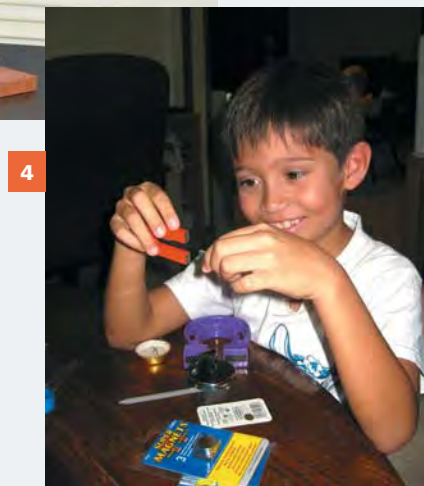
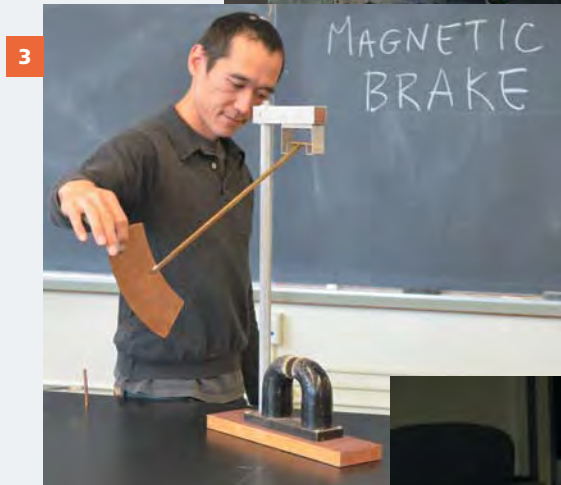
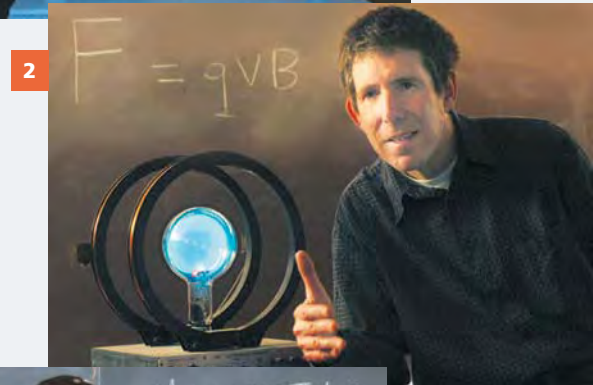
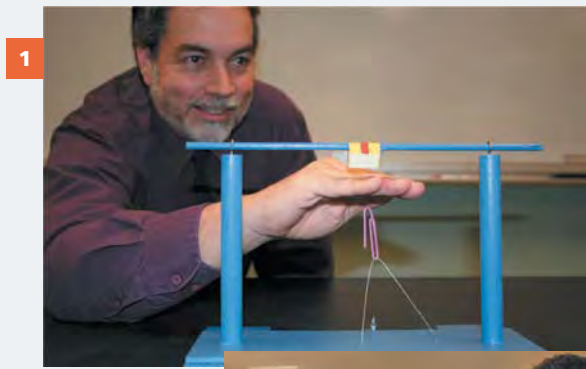


# 24

CAPÍTULO 24

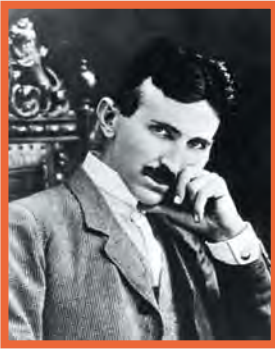
## Magnetismo

- 24.1 Magnetismo
- 24.2 Polos magnéticos
- 24.3 Campos magnéticos
- 24.4 Dominios magnéticos
- 24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos
- 24.6 Electroimanes
- 24.7 Fuerzas magnéticas
- 24.8 El campo magnético de la Tierra
- 24.9 Biomagnetismo



- 1** Fred Myers muestra que el campo magnético de un imán cerámico penetra su cuerpo y el recubrimiento plástico de un clip. **2** Ken Ganezer muestra el brillo azul-verdoso de los electrones que dan vueltas en las líneas de campo magnético en el interior de un tubo Thomson. **3** Cuando Fred Cauthen suelta la hoja de cobre, ¿por qué se detiene cuando comienza a balancearse entre los polos magnéticos? **4** William Davis, como la mayoría de los niños, está fascinado con los imanes.

En la época en la que el aceite de ballenas se utilizaba para encender lámparas y la iluminación eléctrica hacía su debut, una pregunta apremiante era cuál forma de energía alimentaría la iluminación eléctrica. La persona que respondió mejor dicha pregunta fue Nikola



la Tesla, un serbio que emigró a Estados Unidos procedente del imperio austriaco en 1884.

Tesla, ingeniero eléctrico, fue un inventor prolífico y un genio que hablaba siete idiomas. Cuando llegó a Estados Unidos no tenía más que una carta de recomendación de su empleador, dirigida a Thomas Edison. La carta era breve:

“Conozco dos grandes hombres, uno es usted y el otro es este joven”. Edison contrató a Tesla para que trabajara en su empresa Edison Machine Works. Tesla pronto se dedicó a resolver los problemas más difíciles de la compañía. Trabajó día y noche en el rediseño de los ineficaces motores y generadores de Edison pensando en la espléndida bonificación que le habían prometido si lograba buenos resultados. Cuando la bonificación no se materializó, Tesla renunció.

Entonces estuvo cavando zanjas durante poco tiempo, irónicamente, para la compañía de Edison.

La principal disputa entre Tesla y Edison fue acerca de si la potencia eléctrica debía transportarse mediante corriente directa o corriente alterna. Edison defendía la corriente directa, que no se transportaba bien a través de largas distancias. La corriente alterna de Tesla sí lo hacía. Edison se puso furioso con Tesla y emprendió una enérgica campaña en contra de la corriente alterna de Tesla. Los dos siguieron siendo acérrimos adversarios a lo largo de sus vidas. Pero Tesla prevaleció y formó su propia compañía, que condujo a muchas patentes que ayudaron a dotar de electricidad a ciudades e industrias modernas. Tesla fue homenajeado en reiteradas ocasiones y se le alabó como el santo patrono de la electricidad moderna.

En 1888 Tesla formó equipo con George Westinghouse, y juntos aprovecharon la energía de las Cataratas del Niágara para alumbrar la ciudad cercana de Buffalo. Para enviar la electricidad a través de distancias más grandes, Westinghouse perfeccionó un dispositivo llamado transformador (consulta el Capítulo 25). La potencia de las Cataratas del Niágara pronto llegó a la ciudad de Nueva York y más lejos. Los esfuerzos de Tesla y Westinghouse en verdad iluminaron el mundo.

## 24.1 Magnetismo

A los niños les fascinan los imanes, principalmente porque actúan a distancia. Incluso cuando tu mano se interpone entre ellos, actúan a distancia como lo muestra Fred Myers en la primera de las fotografías con las que inicia el capítulo. Del mismo modo, un neurocirujano puede guiar un perdigón por el tejido cerebral hasta tumores inoperables, colocar un catéter en su posición o implantar electrodos sin causar casi ningún daño al tejido cerebral. El uso de los imanes crece día con día.

El término *magnetismo* proviene del nombre Magnesia, un distrito costero de la antigua Tesalia, en Grecia, donde los griegos encontraron piedras extrañas hace más de 2,000 años. Estas piedras, llamadas *magnetitas*, tienen la asombrosa propiedad de atraer pedazos de hierro. Con los imanes se fabricaron primero brújulas, que los chinos utilizaban para navegar en el siglo XII.

En el siglo XVI, William Gilbert, médico de la reina Isabel, fabricó imanes artificiales al frotar pedazos de hierro contra magnetitas, y sugirió que una brújula siempre apuntaba al norte y al sur porque la Tierra tenía propiedades magnéticas. Después, en 1750, John Michell, físico y astrónomo inglés, descubrió que las fuerzas magnéticas disminuían con la distancia respecto de la fuente magnética, y sus resultados fueron confirmados por Charles Coulomb. Los temas de magnetismo y electricidad se desarrollaron casi independientemente uno del otro hasta 1820, cuando un físico danés llamado Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración en su salón de clase, que una corriente eléctrica afecta una brújula magnética.<sup>1</sup> También observó evidencia confirmadora de que el magnetismo se relacionaba con la electricidad. Poco tiempo después, el físico francés Andre Marie Ampere propuso que las corrientes eléctricas eran la fuente de todos los fenómenos magnéticos.



VIDEO: El descubrimiento de Oersted



Se dicen muchas mentiras sobre el magnetismo, de ahí la necesidad de un *filtro de conocimiento* que indique la diferencia entre lo que es cierto y lo que no lo es. El mejor filtro de conocimiento jamás inventado es la ciencia.

<sup>1</sup>Uno sólo puede especular sobre la frecuencia con que tales relaciones se vuelven evidentes cuando “se supone que no deben ocurrir” y se descartan como “algo anda mal con el aparato”. Sin embargo, Oersted tuvo la intuición —característica de un buen científico— para ver que la naturaleza revelaba otro de sus secretos.

En el Capítulo 22 se estudiaron las fuerzas que las partículas con carga eléctrica ejercen unas sobre otras: la fuerza entre cualesquiera dos partículas cargadas depende de la magnitud de la carga sobre cada una y de su distancia de separación, como lo especifica la ley de Coulomb. Pero la ley de Coulomb no es suficiente cuando las partículas cargadas se mueven unas con respecto a otras. La fuerza entre las partículas con carga eléctrica también depende, en una forma complicada, de su movimiento. Se descubre que, además de la *fuerza eléctrica*, hay una fuerza debida al movimiento de las partículas cargadas que se llama **fuerza magnética**. La fuente de la fuerza magnética es el movimiento de las partículas cargadas, generalmente electrones. Las fuerzas eléctrica y magnética en realidad son diferentes aspectos del mismo fenómeno de electromagnetismo.

### PUNTO DE CONTROL

¿Las fuerzas eléctricas y las fuerzas magnéticas dependen del movimiento?

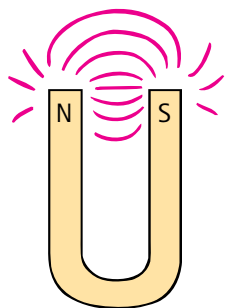
### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sólo la fuerza magnética necesita movimiento. Sigue leyendo.

## 24.2 Polos magnéticos

Las fuerzas que ejercen los imanes unos sobre otros son similares a las fuerzas eléctricas, porque ambas pueden atraer y repeler sin tocar, dependiendo de qué extremos de los imanes se mantengan juntos. También, al igual que las fuerzas eléctricas, la intensidad de su interacción depende de la distancia de separación entre los dos imanes. Mientras que la carga eléctrica es responsable de las fuerzas eléctricas, las regiones llamadas *polos magnéticos* originan las fuerzas magnéticas.

Si suspendes un imán de barra en su centro con un pedazo de cuerda, tendrás una brújula. Un extremo, llamado *polo que busca el norte*, apunta al norte, y el extremo opuesto, llamado *polo que busca el sur*, apunta al sur. Dicho de un modo más sencillo, se les llama *polos norte* y *sur*. Todos los imanes tienen tanto polo norte como polo sur (algunos tienen más de uno de ellos). Los imanes del refrigerador, populares en años recientes, tienen tiras delgadas de polos norte y sur alternados. Estos imanes son tan potentes que sostienen hojas de papel contra la puerta del refrigerador, pero tienen un alcance muy corto porque los polos norte y sur están juntos y se cancelan a distancias cortas. En un imán de barra simple, un solo polo norte y un solo polo sur se ubican en extremos opuestos. Un imán de herradura común es tan sólo un imán de barra que se dobló en forma de U. Sus polos también están en sus dos extremos (Figura 24.1).



**FIGURA 24.1**  
Un imán de herradura.

Cuando el polo norte de un imán se acerca al polo norte de otro imán, éstos se repelen.<sup>2</sup> Lo mismo sucede con un polo sur que se acerca a otro polo sur. Sin embargo, si polos opuestos se acercan, se atraen. Se descubre que:

### Polos iguales se repelen; polos opuestos se atraen.

Esta regla es similar a la regla para las fuerzas entre cargas eléctricas, donde cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen. Pero hay una diferencia muy importante entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas. Mientras que las cargas eléctricas pueden aislarse, los polos magnéticos no pueden aislarse. Los electrones con carga negativa y los protones con carga positiva son entidades por sí mismas. Un grupo de electrones no necesita acompañarse de un grupo de protones, ni viceversa. Pero un polo magnético norte nunca existe sin la presencia de un polo sur, y viceversa.

<sup>2</sup>La fuerza de la interacción entre los polos está dada por  $F \sim \frac{p_1 p_2}{d^2}$ , donde  $p_1$  y  $p_2$  representan las intensidades de los polos magnéticos y  $d$  representa la distancia de separación entre los polos. Observa la semejanza de esta relación con la ley de Coulomb.



Si los imanes no se pegan a la puerta de acero inoxidable de tu refrigerador, seguramente la puerta es una mezcla de acero y níquel. Pero los imanes se pegarán al acero inoxidable cuando esté hecho con cromo en lugar de níquel.

Si rompes un imán de barra a la mitad, cada mitad todavía actúa como un imán completo. Rompe los trozos de nuevo a la mitad y tendrás cuatro imanes completos. Puedes seguir rompiendo los trozos a la mitad y nunca aislarás un solo polo.<sup>3</sup> Aun cuando el pedazo sea del grosor de un átomo, habrá dos polos, lo cual sugiere que los átomos en sí mismos son imanes.

### PUNTO DE CONTROL

¿Todo imán necesariamente tiene un polo norte y uno sur?

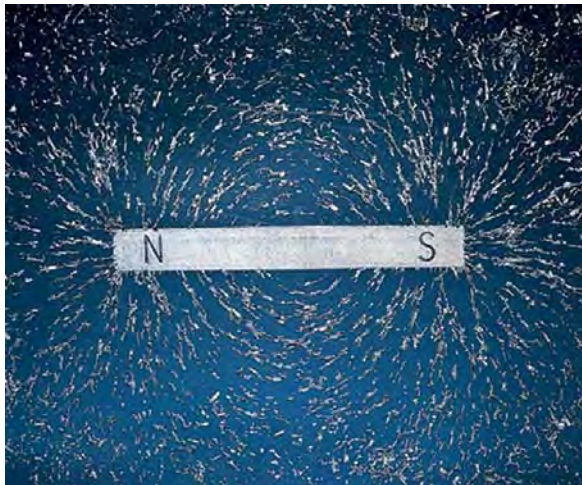
### COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sí, así como toda moneda tiene dos lados, una “cara” y una “cruz”. Algunos imanes “de truco” tienen más de un par de polos, pero, no obstante, los polos siempre ocurren en pares.

## 24.3 Campos magnéticos

Si esparces algunas limaduras de hierro sobre una hoja de papel colocada encima de un imán, verás que las limaduras trazan un patrón ordenado de líneas en torno al imán. El espacio alrededor del imán contiene un **campo magnético**. La forma del campo lo revelan las limaduras, que se alinean con las líneas del campo magnético que se extiende desde un polo y regresa al otro.

La dirección del campo afuera de un imán es del polo norte al polo sur. Donde las líneas están más juntas, el campo es más intenso. Las concentraciones de limaduras de hierro en los polos del imán de la Figura 24.2 muestran que la intensidad del campo magnético es mayor ahí. Si colocas otro imán o una pequeña brújula en cualquier parte del campo, sus polos se alinearán con el campo magnético.



**FIGURA 24.2**

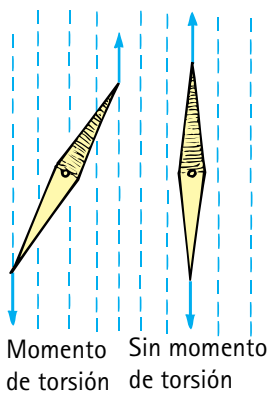
Vista superior de limaduras de hierro esparcidas alrededor de un imán que trazan un patrón de líneas de campo magnético. Es interesante que las líneas del campo magnético continúen en el interior del imán (no reveladas por las limaduras) y formen bucles cerrados.

El magnetismo está muy relacionado con la electricidad. Tal como una carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, la misma carga también está rodeada por un campo magnético si ésta se encuentra en movimiento. Este campo magnético se debe a las “distorsiones” del campo eléctrico causadas por el movimiento y esto lo explicó Albert Einstein en 1905 en su teoría de la relatividad especial. En este texto no

<sup>3</sup>Los físicos teóricos han especulado durante más de 75 años sobre la posible existencia de “cargas” magnéticas discretas, denominadas monopolos magnéticos. Estas pequeñas partículas portarían un solo polo magnético norte o un solo polo magnético sur, y serían las contrapartes de las cargas positiva y negativa en electricidad. Se han hecho varios intentos por encontrar los monopolos, pero ninguno ha resultado exitoso. Todo mundo sabe que los imanes siempre tienen al menos un polo norte y un polo sur.



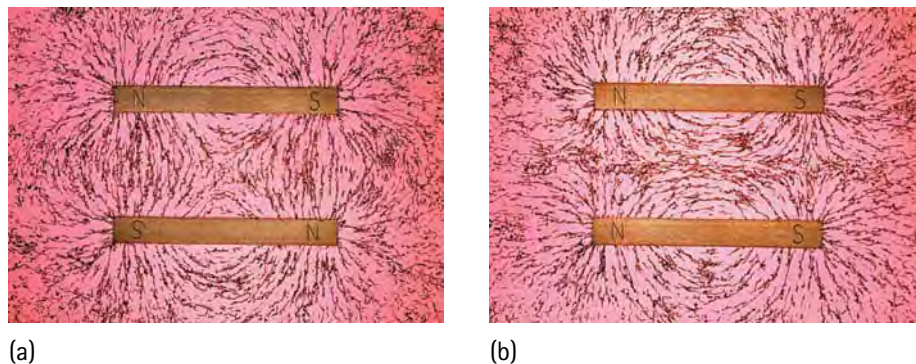
SCREENCAST: Magnetismo

**FIGURA 24.3**

Cuando la aguja de la brújula no está alineada con el campo magnético (izquierda), las fuerzas sobre la aguja que se dirigen en sentido opuesto producen un par de momentos de torsión (llamados *torcas* o *pares*) que giran la aguja hasta alinearla (derecha).

**FIGURA 24.4**

Patrones de campo magnético de un par de imanes. (a) Los polos opuestos están más cerca entre ellos, y (b) los polos iguales están más cerca entre ellos.

**FIGURA 24.5**

Vista microscópica de los dominios magnéticos en un cristal de hierro. Las flechas azules que apuntan en diferentes direcciones indican que dichos dominios no están alineados.

se entrará en detalles, excepto para reconocer que un campo magnético es un subproducto relativista del campo eléctrico. Las partículas cargadas en movimiento tienen asociadas con ellas tanto un campo eléctrico como un campo magnético. Un campo magnético se produce por el movimiento de una carga eléctrica.<sup>4</sup>

Si el movimiento de las cargas eléctricas produce magnetismo, ¿dónde está este movimiento en un imán de barra común? La respuesta es: en los electrones de los átomos que constituyen el imán. Estos electrones están en movimiento constante. Dos tipos de movimiento electrónico contribuyen al magnetismo: la revolución del electrón y el espín del electrón. Los electrones se comportan como si giraran en torno al núcleo atómico y también alrededor de su propio eje como trompos. En casi todos los imanes comunes, el espín del electrón es el que más contribuye al magnetismo.

Todo electrón que gira es un pequeño imán. Un par de electrones que giran en la misma dirección constituyen un imán más fuerte. Sin embargo, un par de electrones que giran en direcciones contrarias trabajan uno contra el otro. Los campos magnéticos se cancelan. Es por esto que casi ninguna sustancia es imán. En la mayoría de los átomos, los diversos campos se cancelan entre sí porque los electrones giran en direcciones opuestas. Pero en materiales como el hierro, el níquel y el cobalto, los campos no se cancelan entre sí por completo. Por ende, cada átomo de hierro es un pequeño imán. Lo mismo sucede, aunque en menor medida, con los átomos de níquel y cobalto. La mayoría de los imanes comunes están hechos de aleaciones que contienen hierro, níquel y cobalto en varias proporciones.<sup>5</sup>

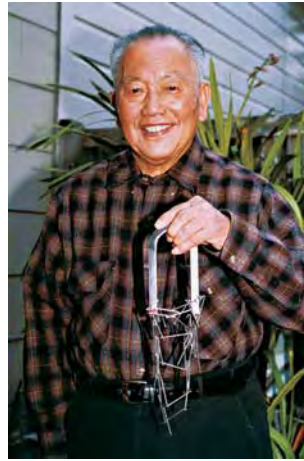
## 24.4 Dominios magnéticos

El campo magnético de un átomo de hierro es tan intenso que las interacciones entre átomos adyacentes hacen que grandes grupos de ellos se alineen entre sí. Estos grupos de átomos alineados se llaman **dominios magnéticos**. Cada dominio está constituido por miles de millones de átomos alineados. Los dominios son microscópicos (Figura 24.5) y existen muchos de ellos en un cristal de hierro. De forma parecida a la alineación de átomos de hierro dentro de los dominios, los dominios también pueden alinearse entre sí.

<sup>4</sup>Es interesante que, dado que el movimiento es relativo, el campo magnético es relativo. Por ejemplo, cuando una carga se mueve hacia ti, existe un campo magnético asociado con la carga en movimiento. Pero si te mueves junto con la carga, de modo que no haya movimiento en relación a ti, descubrirás que no hay campo magnético asociado a la carga. El magnetismo es relativista. De hecho, Albert Einstein fue el primero en explicar esto cuando publicó su primer ensayo sobre la relatividad especial, "On the Electrodynamics of Moving Bodies" (Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento). (En los Capítulos 35 y 36 encontrarás más acerca de la relatividad.)

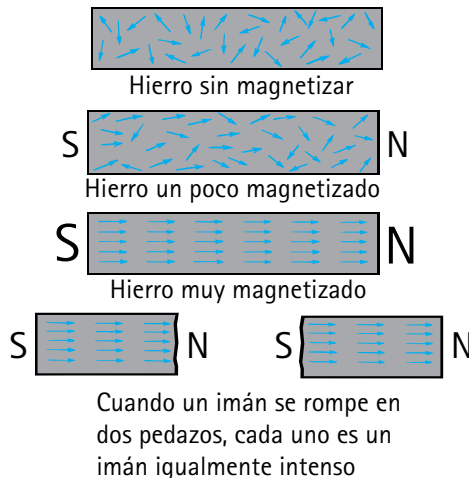

<sup>5</sup>El espín del electrón contribuye virtualmente a todas las propiedades magnéticas de los imanes hechos con aleaciones que contienen hierro, níquel, cobalto y aluminio. En los metales raros como el gadolinio, el movimiento orbital es más significativo.

Sin embargo, no todo pedazo de hierro es un imán. Esto es así porque los dominios en el hierro ordinario no están alineados. Piensa en un clavo de hierro común: los dominios en el clavo están orientados al azar. No obstante, muchos de ellos se inducen a alinearse cuando se acerca un imán. (Es interesante escuchar con un estetoscopio amplificador el traqueteo de los dominios que experimentan alineación en un pedazo de hierro cuando se aproxima un imán intenso.) Los dominios se alinean en forma muy parecida a como las cargas eléctricas en una hoja de papel se alinean en presencia de una barra con carga eléctrica. Cuando alejas el clavo del imán, el movimiento térmico ordinario hace que la mayoría o todos los dominios en el clavo regresen a su ordenamiento aleatorio. Sin embargo, si el campo del imán permanente es muy intenso, el clavo puede conservar cierto magnetismo permanente propio después de que los dos se hayan separado.



**FIGURA 24.6** Wai Tsan Lee muestra clavos de hierro que se convierten en imanes inducidos.

Para fabricar imanes permanentes, sólo se colocan pedazos de hierro o ciertas aleaciones de hierro en campos magnéticos intensos. Las aleaciones de hierro difieren; el hierro blanco es más fácil de imantar que el acero. Es de utilidad golpear el hierro para sacudir cualquier dominio terco y que se alinee. Otra forma de hacer un imán permanente es golpear un trozo de hierro con un imán. El movimiento de golpeteo alinea los dominios en el hierro. Si un imán permanente se deja caer o se calienta, parte de los dominios salen de alineación y el imán se vuelve más débil.

Con frecuencia, las vacas tragan objetos metálicos que pueden perforarles el estómago. Es por ello que los ganaderos alimentan a las vacas con *imanes vacunos* (largos y estrechos imanes de alnico), que atraen las piezas metálicas y reducen la posibilidad de perforación estomacal.

**FIGURA 24.7** Pedazos de hierro en etapas sucesivas de magnetización. Las flechas representan dominios; la punta es un polo norte y la cola es un polo sur. Los polos de los dominios vecinos neutralizan sus efectos entre sí, excepto en los dos extremos de un pedazo de hierro.

**PUNTO DE CONTROL**

¿Cómo es que un imán puede atraer un pedazo de hierro que no está magnetizado?

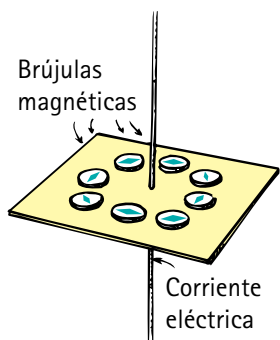
**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

Los dominios en el pedazo no magnetizado de hierro se inducen a la alineación mediante el campo magnético del imán cercano. Observa la semejanza de esto con la Figura 22.13 del Capítulo 22. Al igual que los pedazos de papel que saltan hacia el peine, los pedazos de hierro saltarán hacia un imán intenso cuando se acerquen a él. Pero, a diferencia de los pedazos de papel, después no se repelen. ¿Puedes pensar en una razón por la que sucede esto?



- La banda magnética de una tarjeta de crédito contiene millones de pequeños dominios magnéticos que se mantienen juntos mediante un adhesivo de resina. Los datos se codifican en código binario, donde los ceros y unos se distinguen por la frecuencia de inversiones de dominio. Es bastante sorprendente cuán rápido brinda tu nombre cuando un empleado barre tu tarjeta.

## 24.5 Corrientes eléctricas y campos magnéticos



**FIGURA 24.8**

Las brújulas muestran la forma circular del campo magnético que rodea al alambre portador de corriente.

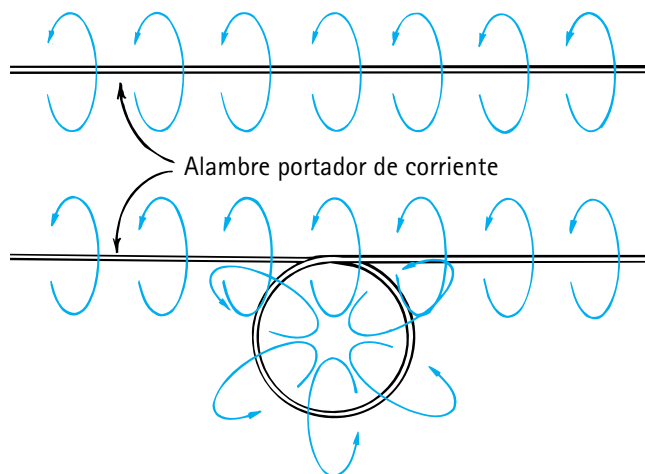
Dado que una carga en movimiento produce un campo magnético, se deduce que una corriente de cargas también produce un campo magnético. Puedes mostrar el campo magnético que rodea un conductor portador de corriente si colocas una distribución de brújulas alrededor de un alambre (Figura 24.8) y haces pasar una corriente por él. Las agujas de las brújulas se alinearán con el campo magnético producido por la corriente y mostrarán el campo como un patrón de círculos concéntricos alrededor del alambre. Cuando la corriente invierte su dirección, las agujas de las brújulas dan la vuelta, lo que demuestra que también cambia la dirección del campo magnético. Éste es el efecto que Oersted demostró por primera vez en su salón de clase.

Si el alambre se dobla en una espira, las líneas del campo magnético se amontonan dentro de la espira (Figura 24.9). Si el alambre se dobla en otra espira, que coincida con la primera, la concentración de las líneas de campo magnético dentro de las espiras se duplica. Se deduce que la intensidad del campo magnético en esta región aumenta con el número de espiras. La intensidad del campo magnético es considerable para una bobina portadora de corriente con muchas espiras.

La Figura 24.10c muestra la concentración de la intensidad del campo magnético para múltiples espiras portadoras de corriente. Estas espiras constituyen una bobina, que se conoce como solenoide. El campo total dentro del solenoide es igual a la suma de los campos debidos a cada espira de corriente.

**FIGURA 24.9**

Las líneas de campo magnético en torno a un alambre portador de corriente se amontonan cuando el alambre se dobla en una espira.



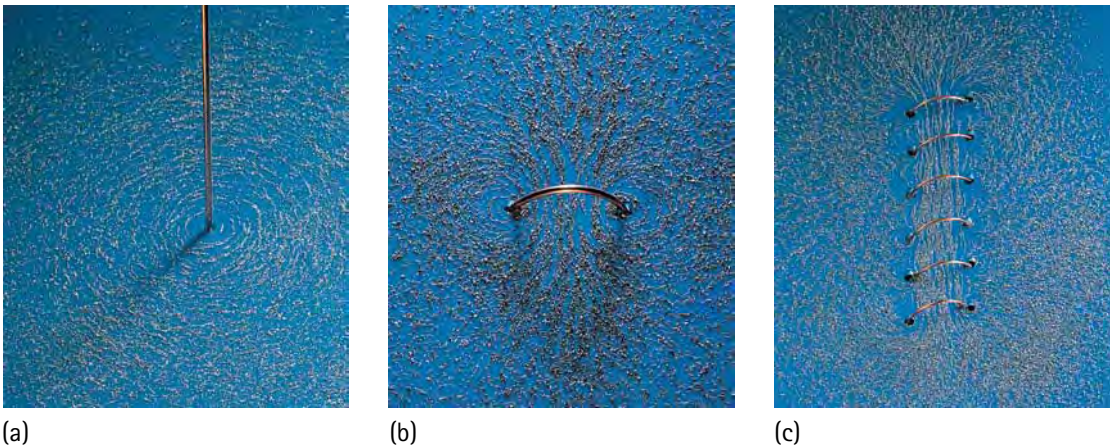
### PRACTICANDO LA FÍSICA

Casi todos los objetos de hierro que te rodean están magnetizados en cierta medida. Un archivero, un refrigerador e incluso las latas de alimentos de tu alacena tienen polos norte y sur inducidos por el campo magnético de la Tierra. Si acercas una brújula magnética a los objetos de hierro o acero de tu casa, descubrirás que el polo norte de la aguja de la brújula apunta hacia la parte superior de dichos objetos, y que el polo sur de la aguja de la brújula apunta a su parte inferior. Esto demuestra que los objetos son imanes, que tienen un polo sur en la parte superior y un polo norte en la parte inferior. ¡Voltea de cabeza las latas de alimento que estaban en una posición horizontal y observa cuántos días transcurren para que los polos se inviertan!



## 24.6 Electroimanes

Una bobina de alambre portadora de corriente es un **electroimán**. La intensidad de un electroimán aumenta con sólo incrementar la corriente que pasa por la bobina y el número de vueltas en la bobina. Los imanes industriales adquieren más intensidad cuando tienen dentro de la bobina un pedazo de hierro. Es común observar en los desguaces electroimanes tan poderosos que levantan automóviles. Los dominios magnéticos en los núcleos de hierro se inducen a alinearse, y se agregan al campo. En el caso de los electroimanes extremadamente potentes, como los utilizados para controlar haces de partículas cargadas en los aceleradores de alta energía, no se usa hierro porque, después de cierto punto, todos sus dominios se alinean. Se dice que el imán está saturado, y aumentar la corriente eléctrica que fluye alrededor del núcleo ya no afecta más la magnetización del núcleo y ya no se agrega al campo.



**FIGURA 24.10**

Limaduras de hierro esparcidas sobre papel revelan las configuraciones del campo magnético en torno a (a) un alambre portador de corriente, (b) una espira portadora de corriente y (c) una bobina de espiras portadora de corriente.

Los electroimanes no necesitan tener núcleos de hierro. Los electroimanes sin núcleo de hierro se utilizan en la transportación mediante levitación magnética, o “maglev” por *magnetic levitated*. La Figura 24.11 muestra un tren maglev, que no tiene motor diesel ni otro convencional. Los trenes maglev ya están en operación en China y Japón, y varios diseños todavía están en proceso de creación. En un diseño que ya es de uso comercial, la levitación se logra con bobinas magnéticas que corren a lo largo de la vía, llamada pista de guiado. Las bobinas repelen grandes imanes en la parte inferior del tren. Una vez que el tren levita algunos centímetros, se suministra energía a las bobinas dentro de las paredes de la pista de guiado, lo que impulsa al tren. Para lograr esto, se alterna continuamente la corriente eléctrica que alimenta a las bobinas, las que continuamente alternan su polaridad magnética. De esta forma, un campo magnético jala el vehículo hacia adelante, mientras que un campo magnético más atrás lo empuja hacia adelante. Los empujones y jalones alternados producen un empuje hacia adelante. Dado que los trenes maglev flotan sobre un colchón de aire, la fricción que acompaña a los trenes convencionales se elimina. Las rapidezces maglev, de aproximadamente la mitad de la rapidez de los aviones comerciales, sólo está limitada por la fricción del aire y la comodidad de los pasajeros. Espera la expansión de esta tecnología en crecimiento.



**FIGURA 24.11**

Un vehículo de levitación magnética: un *magplane*. Mientras que los trenes convencionales vibran cuando viajan sobre las vías a rapidezces altas, los magplanes pueden viajar sin vibración a rapidezces altas porque levitan sobre la pista de guiado.

### Electroimanes superconductores

Los electroimanes más poderosos sin núcleos de hierro utilizan bobinas superconductoras a través de las cuales fluyen con facilidad grandes corrientes eléctricas. Recuerda del Capítulo 22 que en un superconductor no hay resistencia eléctrica que limite el flujo de carga eléctrica y, por tanto, no hay calentamiento, aun cuando la corriente es enorme. Los electroimanes que utilizan bobinas superconductoras producen campos





**FIGURA 24.12**  
Un imán permanente levita sobre un superconductor porque su campo magnético no puede penetrar al material superconductor.

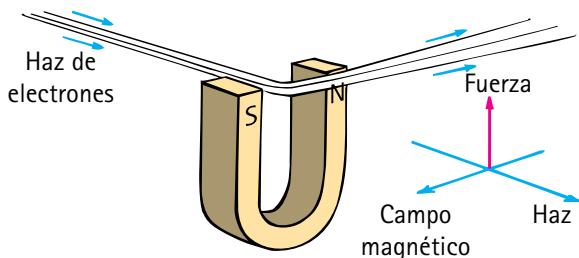
magnéticos muy poderosos, y lo hacen de un modo muy económico, porque no hay pérdidas por calor (aunque se usa energía para mantener fríos los superconductores). En el Gran Colisionador de Hadrones de Ginebra, Suiza, imanes superconductores guían partículas de alta energía alrededor de un acelerador con más de 27.3 kilómetros (17 millas) de circunferencia. En los hospitales se usan imanes superconductores en los dispositivos para obtener imágenes por resonancia magnética (IRM).

Sean superconductores o no lo sean, los electroimanes son parte de la vida cotidiana. Se encuentran en los sistemas de sonido, en los motores eléctricos, en los automóviles e incluso en los sistemas de reciclado y reducción de basura para retirar fragmentos metálicos. ¡Vivan los electroimanes!

## 24.7 Fuerzas magnéticas

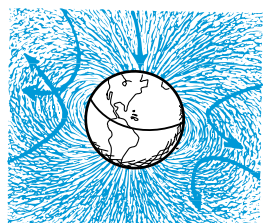
### Sobre las partículas cargadas en movimiento

Una partícula cargada en reposo no interactuará con un campo magnético estático. Pero si se mueve en un campo magnético la partícula cargada, el carácter magnético de una carga en movimiento se vuelve evidente. Experimenta una fuerza de deflexión.<sup>6</sup> La fuerza es más grande cuando la partícula se mueve en una dirección perpendicular a las líneas del campo magnético. En otros ángulos, la fuerza es menor y se vuelve cero cuando las partículas se mueven paralelas a las líneas del campo. En cualquier caso, la dirección de la fuerza siempre es perpendicular a las líneas del campo magnético y a la velocidad de la partícula cargada (Figura 24.13). De modo que una partícula cargada en movimiento se desvía cuando cruza un campo magnético, pero cuando viaja paralela al campo, no ocurre desviación.



**FIGURA 24.13**  
Un haz de electrones se desvía mediante un campo magnético.

Esta fuerza de deflexión es muy diferente de las fuerzas que ocurren en otras interacciones, como las fuerzas gravitacionales entre masas, las fuerzas eléctricas entre cargas y las fuerzas magnéticas entre polos magnéticos. La fuerza que actúa sobre una partícula cargada en movimiento no actúa a lo largo de la línea que une las fuentes de interacción sino, en vez de ello, actúa perpendicularmente tanto al campo magnético como al haz de electrones.

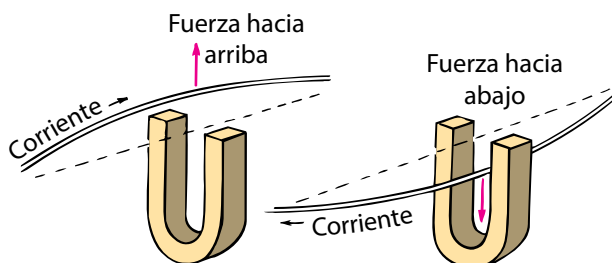


**FIGURA 24.14**  
El campo magnético de la Tierra desvía muchas partículas cargadas que constituyen la radiación cósmica.

La humanidad es afortunada de que las partículas cargadas se desvíen mediante campos magnéticos. Las partículas cargadas en los rayos cósmicos se desvían gracias al campo magnético de la Tierra. Aunque la atmósfera de la Tierra absorbe la mayor parte de ellas, la intensidad de los rayos cósmicos en la superficie de la Tierra sería mucho mayor sin el campo magnético protector de la Tierra.

### Sobre los alambres portadores de corriente

La simple lógica indica que, si una partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético experimenta una fuerza de deflexión, entonces una corriente de partículas cargadas que se mueven a través de un campo magnético también experimenta una fuerza de deflexión. Si las partículas están atrapadas dentro de un alambre cuando responden a la fuerza de deflexión, el alambre también será empujado (Figura 24.15).



**FIGURA 24.15**  
Un alambre portador de corriente experimenta una fuerza en un campo magnético. (¿Puedes ver que esto es continuación de lo que ocurre en la Figura 24.13?)

<sup>6</sup>Cuando partículas con carga eléctrica  $q$  y velocidad  $v$  se mueven perpendicularmente a través de un campo magnético con intensidad  $B$ , la fuerza  $F$  sobre cada partícula es tan sólo el producto de tres variables:  $F = qvB$ . Para ángulos no perpendiculares,  $v$  en esta relación debe ser el componente de velocidad perpendicular a  $B$ .

Si se invierte la dirección de la corriente, la fuerza de deflexión actúa en la dirección contraria. La fuerza es más intensa cuando la corriente es perpendicular a las líneas de campo magnético. La dirección de la fuerza no es a lo largo de las líneas de campo magnético o a lo largo de la dirección de la corriente. La fuerza es perpendicular tanto a las líneas del campo como a la corriente. Es una fuerza lateral.

Se observa que, así como un alambre portador de corriente desviaría un imán tal como la aguja de una brújula (de nuevo, como lo descubrió Oersted), entonces, un imán desviaría un alambre portador de corriente. El descubrimiento de estos vínculos complementarios entre electricidad y magnetismo creó mucho entusiasmo, y las personas comenzaron a aprovechar casi de inmediato la fuerza electromagnética para propósitos útiles —con gran sensibilidad en los medidores eléctricos y con gran fuerza en los motores eléctricos—.

**PUNTO DE CONTROL**

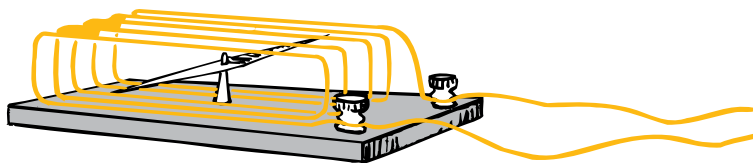
¿Qué ley de la física te indica que, si un alambre portador de corriente produce una fuerza sobre un imán, entonces un imán debe producir una fuerza sobre un alambre portador de corriente?

**COMPRUEBA TU RESPUESTA**

La tercera ley de Newton, que se aplica a *todas* las fuerzas de la naturaleza.

**Medidores eléctricos**

El medidor más simple para detectar corriente eléctrica es un imán que puede girar con libertad: una brújula. El siguiente medidor más simple es una brújula en una bobina de alambres (Figura 24.16). Cuando una corriente eléctrica pasa por la bobina, cada espira produce su propio efecto sobre la aguja, de modo que puede detectarse una corriente muy pequeña. Un instrumento sensible que indica la corriente se llama *galvanómetro*, llamado así en honor a Luigi Galvani, quien, en el siglo XVIII, descubrió que distintos metales provocaban el retorcimiento de la pata de una rana que estaba disecando.



En la Figura 24.17 se muestra el diseño de un galvanómetro común. Éste emplea muchas espiras de alambre y, por tanto, es muy sensible. La bobina está montada y dispuesta para moverse, y el imán se mantiene estacionario. La bobina gira contra un resorte, de modo que cuanto más grande sea la corriente en sus devanados, mayor será su deflexión. Un galvanómetro puede calibrarse para medir corriente (amperes), en cuyo caso se llama *amperímetro*. O puede calibrarse para medir potencial eléctrico (volts), en cuyo caso se llama *voltímetro*.

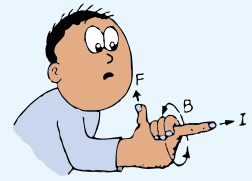


**FIGURA 24.18**

Tanto el amperímetro como el voltímetro son básicamente galvanómetros. (La resistencia eléctrica del instrumento se hace muy baja para el amperímetro y muy alta para el voltímetro.)



En el complemento de Resolución de problemas, ¡aprenderás la regla “simple” de la mano derecha!



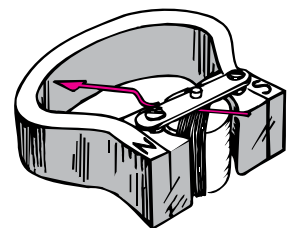
**VIDEO: Fuerzas magnéticas sobre alambres portadores de corriente**



El azaroso descubrimiento de Galvani de la rana que se retorció lo condujo a inventar la celda química y la batería. La próxima vez que levantes un cubo galvanizado, piensa en Luigi Galvani en su laboratorio de anatomía.

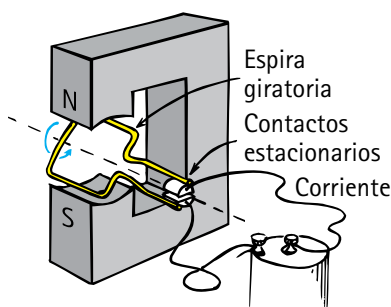
**FIGURA 24.16**

Un galvanómetro muy simple.



**FIGURA 24.17**

Diseño de un galvanómetro común.



**FIGURA 24.19**  
Un motor eléctrico simplificado.



Un motor y un generador en realidad son el mismo dispositivo, con la entrada y la salida invertidos. El dispositivo eléctrico en un automóvil híbrido es una combinación motor/generador.

## Motores eléctricos

Si el diseño del galvanómetro se modifica un poco, de modo que la deflexión realice una rotación completa en lugar de una parcial, se tiene un *motor eléctrico*. La principal diferencia es que, en un motor, la corriente se hace cambiar de dirección cada vez que la bobina realiza media rotación. Después de forzarse a girar media rotación, la bobina continúa en movimiento justo a tiempo para que la corriente se invierta, con lo cual, en lugar de que la bobina invierta su dirección, es forzada a continuar otra media rotación en la misma dirección. Esto ocurre de forma cíclica para producir una rotación continua, la cual se ha aprovechado para hacer funcionar relojes y dispositivos electrónicos, así como para levantar cargas pesadas.

En la Figura 24.19 puedes ver el principio del motor eléctrico en un dibujo sencillo. Un imán permanente produce un campo magnético en una región en la que una espira rectangular de alambre está montada para girar en torno al eje punteado que se muestra. La corriente en la espira cambia de dirección con cada media vuelta y ocasiona una rotación continua.

Cualquier corriente en la espira se mueve en una dirección en el lado superior de la espira y en la dirección opuesta en el lado inferior (puesto que las cargas que fluyen hacia un extremo de la espira deben fluir hacia fuera del otro extremo). Si el lado superior de la espira se fuerza hacia la izquierda por el campo magnético, el lado inferior se fuerza hacia la derecha, como si fuese un galvanómetro. Pero, a diferencia de lo que sucede con un galvanómetro, la corriente en un motor se invierte durante cada media revolución mediante contactos estacionarios en el eje. Las partes del alambre que giran y cepillan contra dichos contactos se llaman *escobillas*. De esta forma, la corriente en la espira alterna de modo que las fuerzas sobre las regiones superior e inferior no cambian de dirección mientras la espira gira. La rotación es continua en tanto se suministre corriente.

Aquí sólo se describe un motor CD muy simple. Para fabricar motores más grandes, con CD o CA, por lo general se sustituye el imán permanente con un electroimán que es energizado mediante la fuente de poder. Desde luego, se utiliza más de una sola espira. Muchas espiras de alambre se devanan en torno a un cilindro de hierro, llamado *armadura*, que entonces gira cuando el alambre porta corriente.

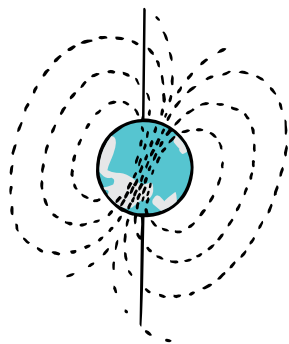
La llegada de los motores eléctricos puso fin a muchos trabajos pesados realizados por seres humanos y animales en muchas partes del mundo. Los motores eléctricos han cambiado enormemente la vida de las personas.

### PUNTO DE CONTROL

¿Cuál es la principal semejanza entre un galvanómetro y un motor eléctrico simple? ¿Cuál es la principal diferencia?

### COMPRUEBA TU RESPUESTAS

En ambos, las bobinas se colocan en un campo magnético. Una fuerza produce rotación cuando pasa corriente por las bobinas. La principal diferencia es que la máxima rotación de la bobina en un galvanómetro es una media vuelta, en tanto que, en un motor, la bobina (enrollada sobre una armadura) gira muchas vueltas completas, lo que se logra al alternar la corriente con cada media vuelta de la armadura.



**FIGURA 24.20**  
La Tierra es un imán.

## 24.8 El campo magnético de la Tierra

Un imán suspendido o brújula apunta hacia el norte porque la Tierra misma es un imán enorme. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, los polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los polos geográficos; de hecho, los polos magnético y geográfico están muy separados (Figura 24.20). El polo magnético en el hemisferio norte, por ejemplo, ahora se ubica a casi 1,800 kilómetros del polo geográfico, en alguna parte de la región de la bahía de Hudson del norte de Canadá. El

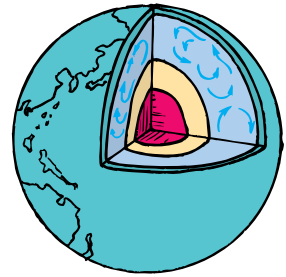
otro polo se ubica al sur de Australia. Esto significa que las brújulas por lo general no apuntan hacia el norte verdadero. La discrepancia entre la orientación de una brújula y el norte verdadero se conoce como *declinación magnética*.

No se sabe con exactitud por qué la Tierra es un imán. La configuración del campo magnético de la Tierra es como el de un intenso imán de barra colocado cerca del centro de la Tierra. Pero la Tierra no es un pedazo magnetizado de hierro, como un imán de barra. Simplemente está demasiado caliente para que cada átomo se mantenga en la orientación apropiada. De modo que es probable que la explicación tenga que ver con corrientes eléctricas en lo profundo de su interior. Unos 2,000 kilómetros por debajo del manto rocoso exterior de la Tierra (que tiene un grosor de casi 3,000 kilómetros) yace la parte fundida que rodea el centro sólido. La mayoría de los científicos que estudian la Tierra consideran que hay cargas en movimiento que dan vueltas dentro de la parte fundida de la Tierra y crean el campo magnético. Algunos científicos especulan que las corrientes eléctricas son resultado de corrientes de convección (calor que sube desde el núcleo central; Figura 24.21) y que tales corrientes de convección, combinadas con los efectos rotacionales de la Tierra, producen el campo magnético de la Tierra. Debido al gran tamaño de la Tierra, la rapidez de las cargas en movimiento sólo necesita aproximadamente un milímetro por segundo para provocar el campo. Hay que estudiar más para encontrar una explicación más firme.

Cualquiera que sea la causa, el campo magnético de la Tierra no es estable; ha variado con el transcurso del tiempo geológico. La evidencia de esto proviene del análisis de las propiedades magnéticas de los estratos rocosos. Los átomos de hierro en un estado fundido están desorientados debido al movimiento térmico, pero una predominancia leve de los átomos de hierro se alinea con el campo magnético de la Tierra. Cuando ocurren enfriamiento y solidificación, esta predominancia registra la dirección del campo magnético de la Tierra en las rocas ígneas resultantes. El proceso es similar con las rocas sedimentarias, donde los dominios magnéticos en granos de hierro que se asientan en los sedimentos tienden a alinearse con el campo magnético de la Tierra y a quedar grabados en la roca que forman. El leve magnetismo que resulta puede medirse con instrumentos sensibles. A medida que se hacen pruebas con las muestras de roca de diferentes estratos formados a lo largo del tiempo geológico, se pueden realizar gráficas del campo magnético de la Tierra para diferentes periodos. Estos datos muestran que ha habido épocas en las que el campo magnético de la Tierra ha disminuido hasta cero, seguido por una inversión de los polos. En los pasados 5 millones de años han ocurrido más de 20 inversiones. La más reciente ocurrió hace 700,000 años. Hubo inversiones previas hace 870,000 y 950,000 años. Estudios de los sedimentos de las profundidades marinas indican que el campo virtualmente desapareció durante 10,000 a 20,000 años hace más de 1 millón de años. No es posible predecir cuándo ocurrirá la siguiente inversión porque la secuencia de inversión no es regular. Pero existe una pista en las mediciones recientes que muestran una reducción de más del 5% de la intensidad del campo magnético de la Tierra en los últimos 100 años. Si este cambio se mantiene, podría tenerse otra inversión dentro de 2,000 años.

La inversión de los polos magnéticos no es exclusiva de la Tierra. El campo magnético del Sol se invierte en forma regular, con un periodo de 22 años. Este ciclo magnético de 22 años se ha vinculado, por evidencias en los anillos de los árboles, con los periodos de sequía de la Tierra. Es muy interesante que el muy conocido ciclo de 11 años de las manchas solares esté a la mitad del tiempo durante el cual el Sol gradualmente invierte su polaridad magnética.

Los vientos iónicos variables en la atmósfera terrestre provocan fluctuaciones más rápidas, pero mucho más pequeñas, en el campo magnético de la Tierra. Los iones en esta región se producen por las interacciones energéticas de los rayos ultravioleta y los rayos X solares con los átomos atmosféricos. El movimiento de estos iones produce una pequeña pero importante parte del campo magnético de la Tierra. Al igual que las capas inferiores de aire, la ionosfera es agitada por vientos. Las variaciones de estos vientos ocasionan casi todas las fluctuaciones rápidas del campo magnético de la Tierra. Es interesante que los vientos solares que llegan a la Tierra choquen con el campo magnético de la Tierra en lugar de chocar con la atmósfera.

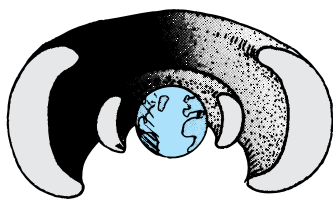


**FIGURA 24.21**

Las corrientes de convección en las partes fundidas del interior de la Tierra pueden impulsar corrientes eléctricas que produzcan el campo magnético de la Tierra.



Al igual que la cinta de un magnetófono, la historia del fondo marino se conserva en un registro magnético.

**FIGURA 24.22**

Sección transversal de los cinturones de radiación Van Allen, que aquí se muestran sin la distorsión producida por el viento solar.

**FIGURA 24.23**

Las auroras boreales en el cielo son causadas por partículas cargadas en los cinturones de Van Allen que golpean moléculas atmosféricas.



En ciencia no cabe la certidumbre. Los científicos entienden que todo conocimiento es provisional y está sujeto a revisión. ¿Cuántos de los crímenes y crueldades en la historia han sido perpetrados por personas que tenían la certeza de saber la verdad?

## Rayos cósmicos

El Universo es una galería de tiro de partículas cargadas. Se llaman **rayos cósmicos** y consisten en protones, partículas alfa y otros núcleos atómicos desprendidos de electrones, así como de electrones de alta energía. Los protones pueden ser restos del Big Bang; los núcleos más pesados probablemente se evaporaron de estrellas que explotaron. En cualquier caso, viajan a través del espacio con rapidez fantásticas y constituyen la radiación cósmica que es peligrosa para los astronautas. Esta radiación se intensifica cuando el Sol está activo y aporta partículas energéticas adicionales. Los rayos cósmicos también son peligrosos para la instrumentación electrónica en el espacio; impactos de núcleos de rayos cósmicos pueden hacer que bits de memoria de cómputo se “inviertan” o que fallen pequeños microcircuitos. Por fortuna para quienes están sobre la superficie de la Tierra, la mayor parte de estas partículas cargadas no llegan a la superficie debido al grosor de la atmósfera. Los rayos cósmicos también son desviados por el campo magnético de la Tierra. Algunos de ellos quedan atrapados en los confines externos del campo magnético de la Tierra y constituyen los cinturones de radiación Van Allen (Figura 24.22).

Los cinturones de radiación Van Allen consisten en dos anillos con forma de dona que rodean la Tierra, llamados así en honor de James A. Belts, quien sugirió su existencia por datos recopilados por el satélite estadounidense *Explorer I* en 1958.<sup>7</sup> El anillo interior se centra aproximadamente a 3,200 kilómetros sobre la superficie terrestre, y el anillo exterior, que es una dona más grande y más ancha, se centra aproximadamente a 16,000 kilómetros sobre la superficie. Los astronautas orbitan a distancias seguras muy por abajo de estos cinturones de radiación. Es probable que la mayor parte de las partículas cargadas (protones y electrones) atrapadas en el cinturón exterior provengan del Sol. Las tormentas en el Sol arrojan partículas cargadas en grandes fuentes, muchas de las cuales pasan cerca de la Tierra y quedan atrapadas por su campo magnético. Las partículas atrapadas siguen rutas en espiral alrededor de las líneas de campo magnético de la Tierra y rebotan entre los polos magnéticos de la Tierra muy por arriba de la atmósfera. Las perturbaciones en el campo de la Tierra con frecuencia permiten que los iones caigan hacia la atmósfera, lo que produce que brillen como una lámpara fluorescente. Esta es la hermosa *aurora boreal* (o luces del norte); en el hemisferio sur, es la *aurora austral*.

Es probable que las partículas atrapadas en el cinturón interior se hayan originado en la atmósfera de la Tierra. Este cinturón ganó electrones adicionales libres con las explosiones de la bomba de hidrógeno a gran altitud en 1962.

A pesar del campo magnético protector de la Tierra, muchos rayos cósmicos “secundarios” llegan a la superficie de la Tierra.<sup>8</sup> Estas son partículas creadas cuando los rayos cósmicos “primarios” —los provenientes del espacio exterior— golpean núcleos atómicos en lo alto de la atmósfera. El bombardeo de rayos cósmicos es mayor en los polos magnéticos porque las partículas cargadas que golpean la Tierra no viajan *a través* de las líneas de campo magnético sino, más bien, *a lo largo* de las líneas de campo y no se desvían. El bombardeo de rayos cósmicos disminuye lejos de los polos y es más pequeño en las regiones ecuatoriales. A latitudes medias, alrededor de cinco partículas golpean cada centímetro cuadrado a cada minuto a nivel del mar; este número aumenta rápidamente con la altitud. De modo que hay rayos cósmicos que penetran tu cuerpo mientras lees esto, ¡y aun cuando no lees esto!

<sup>7</sup>En realidad, humor aparte, el nombre es James A. Van Allen (con su autorización).

<sup>8</sup>Algunos científicos biológicos especulan que los cambios magnéticos de la Tierra tuvieron una función muy importante en la evolución de las formas de vida. Una hipótesis es que, durante las primeras fases de la vida primitiva, el campo magnético de la Tierra era tan intenso que protegía las delicadas formas de vida contra las partículas cargadas con alta energía. Pero, durante periodos de intensidad cero, la radiación cósmica y el desbordamiento de los cinturones Van Allen aumentaron la tasa de mutación de las formas de vida más resistentes, nada diferente de las mutaciones producidas por los rayos X en los famosos estudios de herencia de las moscas de la fruta. Las coincidencias entre las fechas en que aumentaron los cambios de vida y las fechas de las inversiones de los polos magnéticos en los últimos millones de años brindan sustento a esta hipótesis.

## 24.9 Biomagnetismo

Ciertas bacterias producen biológicamente granos de magnetita (un compuesto equivalente a las vetas de hierro) de un solo dominio que juntan para formar brújulas internas. Luego utilizan estas brújulas para detectar las inclinaciones del campo magnético de la Tierra. Dotados con un sentido de dirección, los microorganismos son capaces de ubicar suministros de alimentos. Es sorprendente que estas bacterias que viven al sur del ecuador construyan los mismos imanes de un solo dominio que sus contrapartes que viven al norte del ecuador, ¡pero los alinean en la dirección contraria para que coincidan con el campo magnético en dirección opuesta en el hemisferio sur!

Las bacterias no son los únicos organismos vivos con brújulas magnéticas internas. Las palomas tienen imanes de magnetita con dominios múltiples dentro de sus cráneos, que están conectados mediante un gran número de nervios al cerebro de la paloma. Las palomas tienen un sentido magnético: no sólo pueden discernir direcciones longitudinales a lo largo del campo magnético de la Tierra, sino que también pueden detectar la latitud mediante las inclinaciones del campo de la Tierra. El material magnético también se encuentra en los abdómenes de las abejas, en cuyo comportamiento influyen pequeños campos magnéticos. Algunas avispas, mariposas monarca, tortugas marinas y peces se unen a las clasificaciones de criaturas que tienen un sentido magnético. Cristales de magnetita que recuerdan a los cristales observados en las bacterias magnéticas también se han encontrado en los cerebros humanos. Nadie sabe si guardan relación con las sensaciones humanas. Al igual que las criaturas mencionadas antes, es posible que los seres humanos compartan un sentido magnético común.



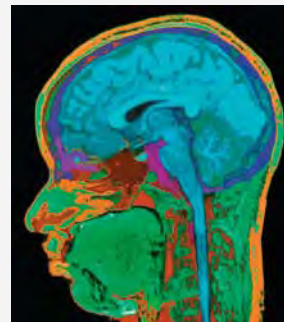
**FIGURA 24.24**

Estas bacterias acuáticas flotantes no pueden percibir arriba y abajo mediante la gravedad. En vez de ello, se orientan con el campo magnético de la Tierra gracias a sus “brújulas” internas.

## IRM: IMÁGENES POR RESONANCIA MAGNÉTICA

Las imágenes por resonancia magnética (IRM) constituyen una forma no invasiva de producir imágenes de alta resolución de los tejidos dentro del cuerpo. Bobinas superconductoras producen un intenso campo magnético hasta 60,000 veces más intenso que el campo magnético de la Tierra, que se utiliza para alinear los protones de los átomos de hidrógeno en el cuerpo del paciente.

Al igual que los electrones, los protones tienen una propiedad de “espín”, de modo que se alinearán con un campo magnético. A diferencia de la aguja de una brújula que se alinea con el campo magnético de la Tierra, el eje del protón bambolea en torno al campo magnético aplicado. Los protones bamboleantes son golpeados por una ráfaga de ondas de radio ajustadas para empujar el eje de giro de los protones en sentido lateral, de forma que quede perpendicular al campo magnético aplicado. Cuando las ondas de radio pasan y los protones regresan con rapidez a su patrón de bamboleo, emiten débiles señales electromagnéticas cuyas frecuencias dependen un poco del entorno químico en el



cual residen los protones. Las señales, que se detectan con sensores, se analizan con una computadora para revelar las densidades variables de los átomos de hidrógeno en el cuerpo y sus interacciones con el tejido circundante. Las imágenes distinguen con claridad entre líquido y hueso.

Es interesante observar que las IRM antes se llamaban IRMN (imágenes por resonancia magnética nuclear) porque los núcleos de hidrógeno resuenan con los campos aplicados. Sin embargo, debido a la fobia de la gente por cualquier cosa “nuclear”, los aparatos ahora se llaman escáneres IRM. ¡Dile a tus amigos fóbicos que todos los átomos de su cuerpo contienen un núcleo!