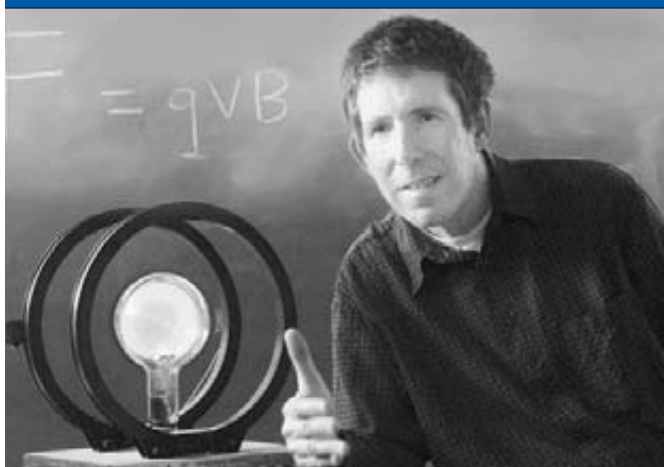


Magnetismo



Ken Ganezer muestra la incandescencia de electrones que giran en torno a las líneas de un campo magnético, dentro de un tubo de Thompson.



Magnetismo



El descubrimiento de Oersted

A los jóvenes les fascinan los imanes, principalmente porque éstos actúan a distancia. Uno puede mover un clavo acercándole un imán, aunque haya un trozo de madera entre ellos. Asimismo, un neurocirujano puede guiar una pastilla a través del tejido cerebral para llegar a tumores inoperables, poner en posición un catéter o implantar electrodos con poco daño al tejido cerebral. El uso de los imanes aumenta día con día.

El término *magnetismo* proviene de Magnesia, una provincia costera de Thessaly en la Grecia antigua, donde se encontraron ciertas piedras hace más de 2000 años. Esas piedras se llamaron *piedras imán*, y tenían la extraña propiedad de atraer piezas de hierro. Los chinos usaron los imanes en sus brújulas en el siglo XII, para guiarse en la navegación.

En el siglo XVI, el médico de la reina Isabel, William Gilbert, fabricó imanes artificiales frotando trozos de hierro y de magnetita (piedra imán). También sugirió que la brújula siempre apunta hacia el norte y el sur, porque la Tierra tiene propiedades magnéticas. Después, en 1750, el astrónomo y físico inglés John Michell determinó que los polos magnéticos obedecen la ley del inverso del cuadrado, y Charles Coulomb confirmó sus resultados. Los temas del magnetismo y la electricidad se desarrollaron en forma casi independiente, hasta 1820, cuando el profesor danés Hans Christian Oersted descubrió, en una demostración en su clase, que la corriente eléctrica afecta a una brújula.¹ Observó otras evidencias que confirmaban que el magnetismo estaba relacionado con la electricidad. Poco después, el físico francés André-Marie Ampère propuso que la fuente de todos los fenómenos magnéticos son las corrientes eléctricas.



Tiempo atrás, las historietas de Dick Tracy, además de predecir el advenimiento de los teléfonos celulares, destacaron este titular: “Quien controle el magnetismo, controlará el Universo.”

¡EUREKA!

Fuerzas magnéticas

En el capítulo 22 describimos las fuerzas que ejercen entre sí las partículas con carga eléctrica. La fuerza entre dos partículas cargadas cualesquiera, depende de la magnitud de su carga y de la distancia que las separa, como indica la ley de Coulomb. Sin embargo, la ley de Coulomb no es todo cuando las partículas con carga se mueven entre sí. En este caso, la fuerza entre las partículas cargadas depende también de su movimiento, en una forma complicada. Se ve que, además de la

¹ Al decir que la carga fluye, se quiere indicar que las *partículas* con carga fluyen. La carga es una propiedad de determinadas partículas, siendo las más importantes los electrones, los protones y los iones. Cuando el flujo es de carga negativa, está formado por electrones o por iones negativos. Cuando el flujo es de carga positiva, lo que fluye son protones o iones positivos.

fuerza que llamamos *eléctrica*, hay una fuerza debida al movimiento de las partículas cargadas que llamaremos **fuerza magnética**. La fuente de la fuerza magnética es el movimiento de partículas con carga, por lo general electrones. Las fuerzas tanto eléctrica como magnética son en realidad distintos aspectos del mismo fenómeno de electromagnetismo.

Polos magnéticos

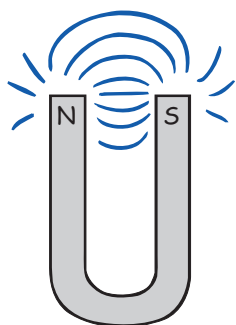


FIGURA 24.1
Un imán tipo herradura.



La banda magnética en una tarjeta de crédito contiene millones de diminutos dominios magnéticos, que se mantienen unidos gracias a una cubierta de resina. Los datos están codificados en un sistema binario, con ceros y unos, que se distinguen mediante la frecuencia de los dominios de inversión. Es sorprendente lo rápido que aparece tu nombre cuando un empleado de una aerolínea desliza tu tarjeta para hacer una reservación.

¡EUREKA!

Las fuerzas que ejercen los imanes entre sí se parecen a las fuerzas eléctricas, porque ambas atraen y repelen sin tocar, dependiendo de qué extremos de los imanes están cerca uno de otro. También como las fuerzas eléctricas, la intensidad de su interacción depende de la distancia a la que están los dos imanes. Mientras que la carga eléctrica es lo más importante en las fuerzas eléctricas, las regiones llamadas *polos magnéticos* originan fuerzas magnéticas.

Si con un cordón cuelgas por su centro un imán recto, tendrás una brújula. Un extremo, llamado *polo que busca al norte* apunta hacia el norte; y el extremo opuesto se llama *polo que busca al sur*, y apunta hacia el sur. En forma más sencilla, se llaman respectivamente *polo norte* y *polo sur*. Todos los imanes tienen un polo norte y un polo sur (algunos tienen más de uno de cada uno). Las figuras con imanes para la puerta de los refrigeradores, que se hicieron muy comunes en años recientes, tienen bandas delgadas de polos norte y sur alternados. Esos imanes son lo bastante fuertes como para sujetar hojas de papel contra la puerta del refrigerador, pero tienen muy corto alcance, porque sus polos norte y sur se anulan. En un imán recto sencillo, los polos norte y sur están en los dos extremos. Un imán ordinario en forma de herradura no es más que un imán recto que se dobla en forma de U. Los polos también están en sus dos extremos (figura 24.1).

Cuando el polo norte de un imán se acerca al polo norte de otro, se repelen entre sí.² Sucede lo mismo con un polo sur cerca de un polo sur. Sin embargo, si se acercan polos opuestos, hay atracción y se llega a lo siguiente:

Los polos iguales se repelen, y los polos opuestos se atraen.

Esta regla se parece a la de las fuerzas entre cargas eléctricas, donde las cargas iguales se repelen entre sí, y las cargas desiguales se atraen. No obstante hay una diferencia muy importante entre los polos magnéticos y las cargas eléctricas. Mientras que las cargas eléctricas se pueden aislar, los polos magnéticos no. Los electrones con carga negativa y los protones con carga positiva son entidades en sí mismos. Un grupo de electrones no necesita estar acompañado de un grupo de protones, y a la inversa. Pero nunca existe un polo norte magnético sin la presencia de un polo sur, y viceversa.

Si partes a la mitad un imán recto, cada mitad se seguirá comportando como si fuera un imán completo. Si parte las mitades de nuevo a la mitad, obtendrás cuatro imanes completos. Puedes seguir partiendo las piezas a la mitad y nunca aislarás a un solo polo.³ Aun cuando la pieza tenga un átomo de grosor, tendrá dos polos. Eso parece indicar que los átomos mismos son imanes.

² La fuerza de interacción entre los polos magnéticos es $F \sim \frac{p_1 p_2}{d^2}$, donde p_1 y p_2 representan las intensidades de los polos magnéticos, y d representa la distancia entre los polos. Observa el parecido de esta ecuación con la ley de Coulomb.

³ Durante más de 70 años los físicos teóricos han especulado acerca de la existencia de “cargas” magnéticas discretas, llamadas *monopolos magnéticos*. Esas partículas diminutas portarían un solo polo magnético norte o sur, y serían contrapartes de las cargas positiva y negativa en electricidad. Se han hecho varios intentos para encontrar monopolos; pero ninguno ha tenido éxito. Todos los imanes que se conocen tienen, cuando menos, un polo norte y un polo sur.

EXAMÍNAME

¿Cualquier imán tiene necesariamente un polo norte y un polo sur?

Campos magnéticos

Esparce cierta cantidad de limaduras de hierro sobre una hoja de papel colocado sobre un imán, y verás que las limaduras trazan un patrón de líneas ordenadas que rodean al imán. El espacio que rodea al imán contiene un **campo magnético**. Las limaduras revelan la forma del campo, al alinearse con las líneas magnéticas que salen de un polo, se esparcen y regresan al otro. Es interesante comparar las formas del campo en las figuras 24.2 y 24.4, con las de los campos eléctricos de la figura 22.19 del capítulo 22.

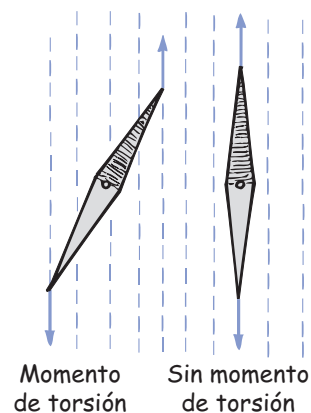


FIGURA 24.3

Cuando la aguja de la brújula no está alineada con el campo magnético (izquierda), las fuerzas sobre su aguja, en dirección opuesta, producen un momento de torsión que hace girar la aguja hasta que queda alineada (derecha).

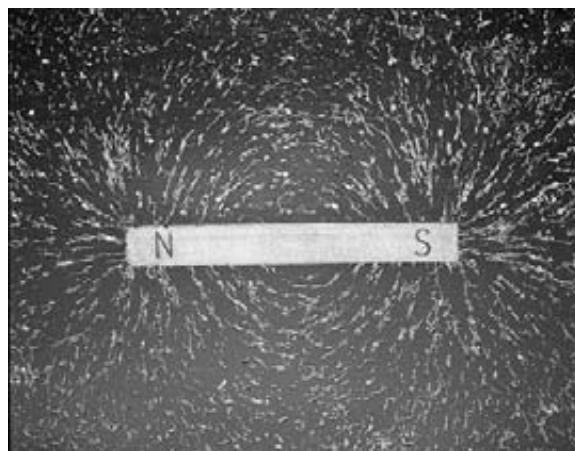


FIGURA 24.2

[Figura interactiva](#)

Vista superior de limaduras de hierro dispersas en torno a un imán. Las limaduras trazan un patrón de *líneas de campo magnético* en el espacio que rodea al imán. Resulta interesante que tales líneas continúen dentro del imán (no las revelan las limaduras), y formen trayectorias cerradas.

La dirección del campo fuera de un imán es del polo norte hacia el polo sur. Cuando las líneas están más cercanas, el campo es más intenso. La concentración de las limaduras de hierro en los polos del imán, que se observa en la figura 24.2, indica que la fuerza del campo magnético es mayor en ellos. Si se coloca otro imán, o una brújula pequeña en cualquier lugar del campo, los polos quedarán alineados con el campo magnético.

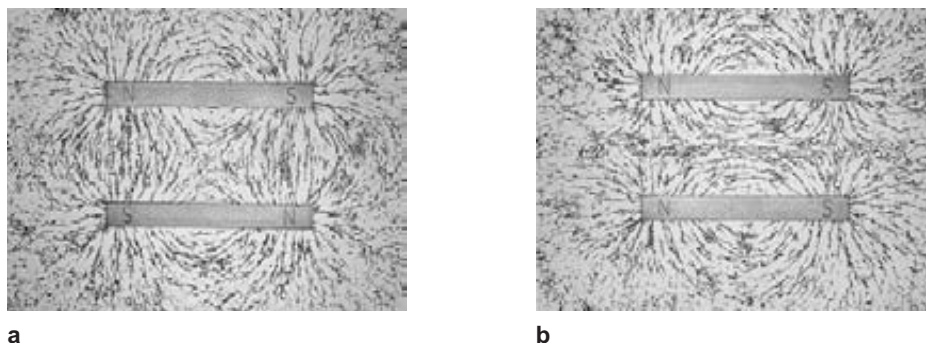
El magnetismo se relaciona estrechamente con la electricidad. Así como una carga eléctrica está rodeada por un campo eléctrico, si se mueve se rodeará también de un campo magnético. Este campo magnético se debe a las “distorsiones” del campo eléctrico causadas por el movimiento y fueron explicadas por Albert Einstein en 1905, en su teoría especial de la relatividad. No detallaremos los resultados, sino tan sólo veremos que un campo magnético es un subproducto relativista del campo eléctrico. Las partículas cargadas en movimiento tienen aso-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sí, al igual que toda moneda tiene dos lados, una “cara” y una “cruz”. Algunos imanes “con truco” tienen más de dos polos, sin embargo, los polos siempre vienen en pares.

FIGURA 24.4

Patrones del campo magnético para un par de imanes. *a)* Los polos opuestos están más cerca entre sí; y *b)* los polos iguales están más cerca entre sí.

**FIGURA 24.5**

Wai Tsan muestra los clavos de acero que se vuelven imanes inducidos.

ciados un campo eléctrico y un campo magnético. El movimiento de la carga eléctrica produce un campo magnético.⁴

Si el movimiento de la carga eléctrica produce el magnetismo, ¿dónde estará ese movimiento en un imán de barra común? La respuesta es *en los electrones de los átomos que forman el imán*. Esos electrones están en constante movimiento. Hay dos clases de movimiento de electrones que contribuyen al magnetismo: el espín y el orbital del electrón. Los electrones giran en torno a sus propios ejes, como perinolas, y giran también en torno al núcleo del átomo. En los imanes más comunes lo que más produce el magnetismo es el espín de los electrones.

Cualquier electrón que gire es un imán diminuto. Un par de electrones que giran en la misma dirección forman un imán más fuerte. Sin embargo, si giran en direcciones opuestas son antagonistas, porque sus campos magnéticos se anulan. Es la causa de que la mayoría de las sustancias no sean magnéticas. En la mayor parte de los átomos, los diversos campos se anulan entre sí, porque los electrones giran en direcciones opuestas. Sin embargo, en materiales como el hierro, níquel y cobalto, los campos no se anulan entre sí por completo. Cada átomo de hierro tiene cuatro electrones, cuyo magnetismo debido al espín no se anula. Entonces, cada átomo de hierro es un imán diminuto. Lo mismo sucede, en menor grado, con los átomos de níquel y cobalto. Los imanes más comunes se fabrican con aleaciones que contienen hierro, níquel y cobalto en diversas proporciones.⁵

Dominios magnéticos

El campo magnético de un átomo individual de hierro es tan intenso que las interacciones entre átomos adyacentes hacen que grandes grupos de ellos se alineen entre sí. A esos grupos de átomos alineados se les llama **dominios magnéticos**. Cada dominio está formado por miles de millones de átomos alineados. Los dominios son microscópicos (figura 24.6), y en un cristal de hierro hay muchos. Como el alineamiento de los átomos de hierro dentro de los dominios, los dominios mismos se pueden alinear entre sí.

⁴ Es interesante que, como el movimiento es relativo, también el campo magnético es relativo. Por ejemplo, cuando se mueve una carga y pasa por delante de ti, hay un campo magnético definido asociado con la carga en movimiento. Pero si te mueves junto con la carga y no hay movimiento respecto a ti, no encontrarás que haya un campo magnético asociado con la carga. El magnetismo es relativista. De hecho, Albert Einstein fue el primero en explicarlo al publicar su primer artículo sobre la relatividad especial, "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento". (Encontrarás más sobre relatividad en los capítulos 35 y 36.)

⁵ El espín de los electrones origina casi todas las propiedades magnéticas de los imanes comunes fabricados con aleaciones de hierro, níquel, cobalto y aluminio. En los metales de las tierras raras, como el gadolinio, el movimiento en órbita es más importante.

PRÁCTICA DE FÍSICA

La mayoría de los objetos de acero que te rodean están magnetizados hasta cierto punto. Un archivero, un refrigerador y hasta las latas de alimentos de tu alacena tienen polos norte y sur inducidos por el campo magnético de la Tierra. Acerca una brújula a las partes superiores de objetos de hierro o de acero en tu casa y verás que el polo norte de la brújula apunta hacia ellas, y que el polo sur apunta a las partes inferiores de esos objetos. Eso demuestra que los objetos están magnetizados o imanados,

y que tienen un polo sur arriba y un polo norte abajo. Verás que hasta las latas de alimento que han estado verticales en la alacena están magnetizadas. ¡Voltéalas y ve cuántos días se tardan en invertirse los polos!

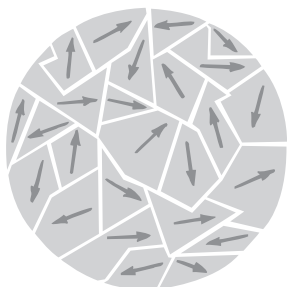
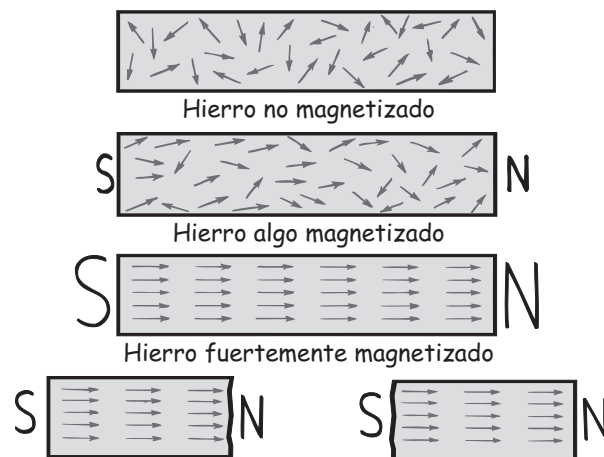


FIGURA 24.6

Vista microscópica de los dominios magnéticos en un cristal de hierro. Cada dominio consiste en miles de millones de átomos de hierro alineados. Las flechas apuntan en direcciones distintas, lo cual indica que esos dominios no están alineados entre sí.

Sin embargo, no cualquier trozo de hierro es un imán. Eso se debe a que en el hierro ordinario los dominios no están alineados. Imagina un clavo de hierro: los dominios en él están orientados al azar. Sin embargo, muchos de ellos se inducen a alinearse cuando se acerca un imán. (Es interesante escuchar, con un estetoscopio amplificado, el cliqueo de los dominios que se están alineando en un trozo de hierro, cuando se le acerca un imán fuerte.) Los dominios se alinean casi como las cargas eléctricas en un trozo de papel en presencia de una varilla cargada. Cuando retiras el clavo del imán, el movimiento térmico ordinario hace que la mayor parte o todos los dominios del clavo regresen a un ordenamiento aleatorio. Sin embargo, si el campo del imán permanente es muy intenso, el clavo puede conservar algo de magnetismo permanente propio, después de separarlo del imán.

Los imanes permanentes se fabrican simplemente colocando piezas de hierro o de ciertas aleaciones de hierro en campos magnéticos intensos. Las aleaciones del hierro se comportan en formas distintas: el hierro suave es más fácil de magnetizar que el acero, lo cual ayuda a que en el hierro común todos los dominios entren en alineamiento. Otra forma de fabricar un imán permanente consiste en frotar un trozo de hierro con un imán. El frotamiento alinea los dominios en el hierro. Si se deja caer un imán permanente, o si se calienta, algunos de los dominios se impulsan hacia afuera del alineamiento y se debilita el imán.



Cuando se parte un imán en dos partes, cada una se convierte en un imán con la misma intensidad

FIGURA 24.7

[Figura interactiva](#)

Trozos de hierro en etapas de magnetización sucesivas. Las flechas representan los 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 una pieza de hierro.

TERAPIA MAGNÉTICA

En el siglo XVIII un “magnetizador” célebre de Viena, Franz Mesmer, llevó los imanes a París y se estableció como curandero en la sociedad parisina. Curaba a los pacientes haciendo oscilar bandas magnéticas sobre la cabeza.

Benjamín Franklin, la mayor autoridad mundial en electricidad, estaba de visita en París, como representante de Estados Unidos, y comenzó a sospechar de que los pacientes de Mesmer realmente mejoraran con este ritual, porque se apartaban de las prácticas de entonces, que consistían en sacar sangre por medio de ventosas. Ante las insistencias de la comunidad médica, el rey Luis XVI contrató a una comisión real que investigara las afirmaciones de Mesmer. En la comisión estuvieron Franklin y Antoine Lavoisier, el fundador de la química moderna. Los comisionados diseñaron una serie de pruebas, en las que algunas personas pensaban que estaban recibiendo el tratamiento de Mesmer, sin recibirlo; mientras que otros recibieron el tratamiento, pero se les hizo creer que no lo recibían. Los resultados de tales experimentos ciegos demostraron, sin lugar a dudas, que el éxito de Mesmer sólo se debía al poder de la sugestión. En la actualidad se considera que este informe es un modelo de claridad y raciocinio. La reputación de Mesmer se esfumó y se retiró a Austria.

Ahora, 200 años después, con todo lo aprendido sobre magnetismo y fisiología, los mercachifles del magnetismo aún atraen a muchos más seguidores. Pero no hay comisiones gubernamentales de Franklins y Lavoisiers que desafíen sus afirmaciones. Por el contrario, la terapia magnética es otra de las “terapias alternativas” sin pruebas y sin reglamentos, a las que incluso el Congreso de Estados Unidos le dio reconocimiento oficial en 1992.

Aunque hay muchos testimonios acerca de los beneficios de los imanes, no hay prueba científica de que éstos refuerzan la energía del organismo o de que combatan el dolor. Ninguna. Sin embargo, en las tiendas y en los catálogos se venden millones de imanes terapéuticos. Los clientes compran pulseras, plantillas, bandas para la muñeca y la rodilla, soportes para la espalda y cuello, cojines, colchones, lápiz labial y hasta agua. Los vendedores dicen que sus imanes tienen poderosos efectos sobre el cuerpo, principalmente porque aumentan el flujo sanguíneo a las áreas lesionadas. La idea de que la sangre es atraída por un imán es pura palabrería, porque el hierro de las moléculas de hemoglobina no es ferromagnético y no es atraído por un imán. Además, la mayoría de los imanes que se venden con fines terapéuticos son del tipo de figuras para los refrigeradores, con alcance

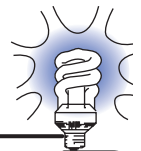
muy limitado. Para tener una idea de lo rápido que se desvanece el campo de esos imanes, fíjate cuántas hojas de papel sujetan uno de esos imanes sobre un refrigerador o sobre cualquier superficie de hierro. El imán se caerá cuando lo separen del refrigerador unas cuantas hojas de papel. El campo no pasa mucho más de un milímetro, y no penetra en la piel, y mucho menos en los músculos. Y aun cuando lo hiciera, no hay pruebas científicas de que el magnetismo tenga algunos efectos benéficos sobre el organismo. Pero de nueva cuenta, los testimonios son otra historia.

Algunas veces una afirmación estrafalaria tiene algo de verdad. Por ejemplo, en los siglos anteriores la práctica de la sangría por medio de ventosas era, de hecho, benéfica para un pequeño porcentaje de hombres, quienes padecían de una rara enfermedad genética, la *hemocromatosis*, es decir, el exceso de hierro en la sangre; las mujeres no la padecían tanto debido a la menstruación. Aunque la cantidad de hombres que aprovecharon las sangrías fue pequeña, los testimonios de éxito alentaron la difusión de dicha práctica, la cual mató a muchos.

Ninguna afirmación es tan estrafalaria que no se puedan encontrar testimonios que la respalden. Las afirmaciones como las de una Tierra plana y de platillos voladores en su mayoría son inocuas, y nos pueden divertir. La terapia magnética también puede ser inocua en muchos padecimientos; pero no cuando se usa para el tratamiento de una afección grave, en vez de la medicina moderna. Se puede promulgar que la seudociencia es para engañar en forma intencional, o que es un producto de razonamiento incorrecto y con determinado fin. En cualquier caso, la seudociencia es un gran negocio. El mercado de imanes terapéuticos y otros frutos parecidos de la sinrazón es enorme.

Los científicos deben mantener abierta la mente; deben estar preparados para aceptar las pruebas recientes. Pero también tienen la responsabilidad de expresarse cuando los seudocientíficos engañan, y de hecho roban, al público, cuando las afirmaciones de aquéllos no tienen fundamento.

* Adaptada de *Voodoo Science: The Foolishness to Fraud*, por Robert L. P. University Press, 2000.



Todos necesitamos un filtro de conocimiento para distinguir entre lo que es verdad y lo que parece ser verdad. El mejor filtro de conocimiento que se ha inventado es la ciencia.

¡EUREKA!

EXAMÍNATE

¿Cómo puede un imán atraer una pieza de hierro que no esté magnetizada?

Corrientes eléctricas y campos magnéticos

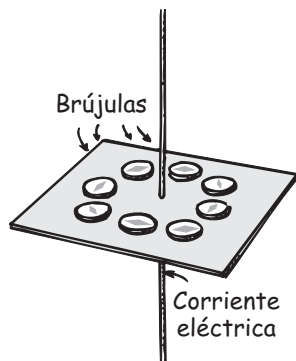
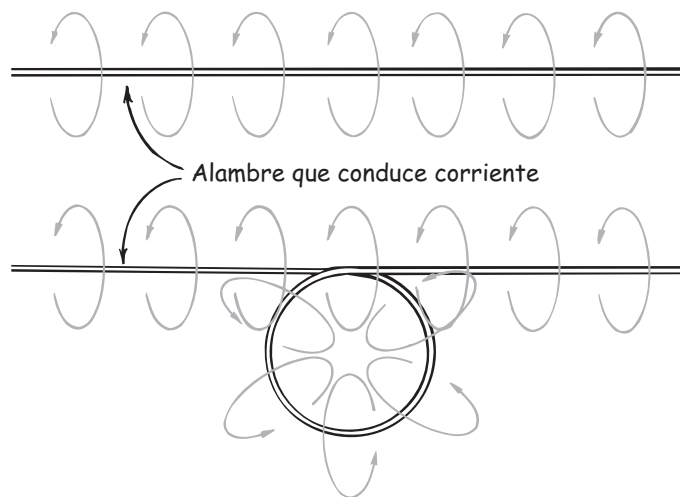


FIGURA 24.8

Las brújulas indican la forma circular del campo magnético que rodea un alambre que conduce corriente eléctrica.

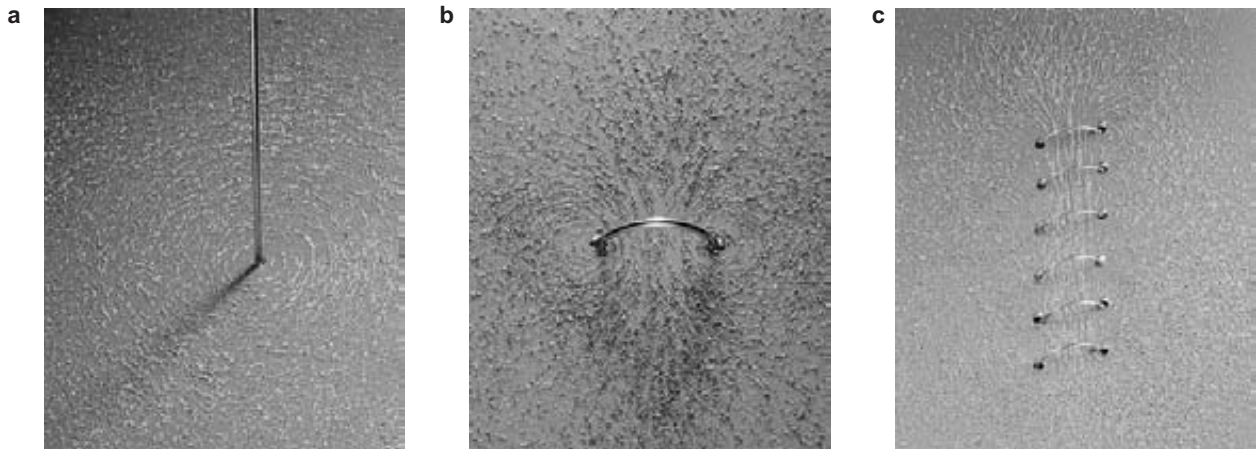
FIGURA 24.9

Líneas de campo magnético en torno a un alambre que conduce corriente; se juntan cuando el alambre se dobla formando un círculo.



COMPRUEBA TU RESPUESTA

Los dominios en la pieza no imantada de hierro se inducen a alinearse con el campo magnético del imán cercano. Ve cómo se parece esto a la figura 22.12. Como los trozos de papel que saltan hacia el peine, los trozos de hierro serán atraídos por un imán poderoso al acercarlo. Pero a diferencia del papel, después ya no se repelen. ¿Puedes imaginarte por qué?

**FIGURA 24.10**

Las limaduras de hierro esparcidas sobre el papel indican las configuraciones del campo magnético en torno *a)* a un conductor con corriente, *b)* a una espira con corriente y *c)* a una bobina de espiras con corriente.

Electroimanes

Una bobina de alambre que conduce corriente es un **electroimán**. La intensidad de un electroimán aumenta tan sólo con aumentar la corriente que pasa por la bobina. Los electroimanes industriales adquieren mayor intensidad cuando en el interior de la bobina hay una pieza de hierro. Los dominios magnéticos en el hierro son inducidos a alinearse y aumentan el campo. Para los electroimanes extremadamente poderosos, como los que se usan para controlar haces de partículas cargadas en los aceleradores de altas energías no se usa el hierro, porque a partir de cierto momento, todos sus dominios quedan alineados y ya no aumenta la intensidad.

Los electroimanes con la potencia suficiente para levantar automóviles se ven con frecuencia en los depósitos de chatarra. La intensidad de esos electroimanes se limita por el calentamiento de las bobinas conductoras de corriente (por su resistencia eléctrica) y por la saturación del alineamiento de los dominios en el núcleo. Los imanes más poderosos, sin núcleo de hierro, usan bobinas superconductoras a través de las cuales fluye con facilidad una corriente eléctrica muy grande.

Electroimanes superconductores (opcional)

**FIGURA 24.11**

Un imán permanente levita sobre un superconductor porque su campo magnético no puede penetrar el material superconductor.

Recuerda que, en el capítulo 22, se vio que en un superconductor no hay resistencia eléctrica que limite el flujo de cargas eléctricas y, en consecuencia, no hay calentamiento aunque pasen corrientes enormes. Los electroimanes que usan bobinas superconductoras producen campos magnéticos extremadamente intensos, y lo hacen en forma muy económica porque no hay pérdidas de calor (aunque se usa energía para mantenerlos fríos). En el Fermilab, cerca de Chicago, los electroimanes superconductores guían a partículas de gran energía en torno a un acelerador de 4 millas de circunferencia. En los hospitales también se pueden encontrar imanes superconductores en los aparatos de imágenes por resonancia magnética (MRI, *magnetic resonance imaging*).

Otra aplicación que hay que vigilar es el transporte con levitación magnética o “maglev”. La figura 24.12 muestra el modelo a escala de un sistema maglev desarrollado en Estados Unidos. El vehículo, llamado magplano, tiene bobinas super-

**FIGURA 24.12**

Vehículo que levita magnéticamente: un *magplano*. Mientras que los trenes convencionales vibran al rodar por las vías con gran rapidez, los magplanos pueden avanzar sin vibración, a mayor rapidez, porque no tienen contacto físico con la guía sobre la cual flotan.

conductoras en la base. Al moverse por alguna varilla de aluminio, tales bobinas generan corrientes en el aluminio, las cuales actúan como imanes de espejo y repelen el magplano. Éste flota unos cuantos centímetros encima de la vía, y su rapidez está limitada tan sólo por la fricción del aire y la comodidad de los pasajeros.

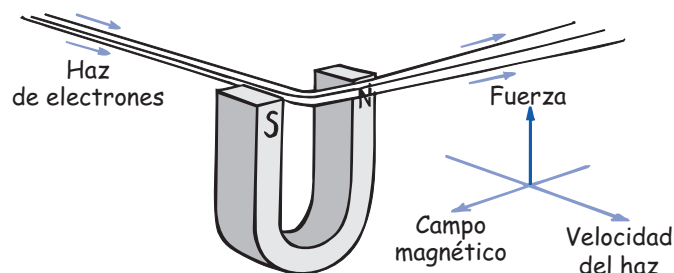
Un tren maglev construido por ingenieros alemanes actualmente da servicio a rapideces de hasta 460 km/h, entre el centro de Shanghai y su aeropuerto, y cubre unos 30 kilómetros en menos de ocho minutos. Se tiene planeado construir una vía de alta rapidez que conectará Shanghai con Beijing, que está a 1,380 km de distancia, reduciendo a la mitad las acostumbradas 14 horas de viaje. Debes estar al tanto de la proliferación de esta tecnología relativamente nueva.

Fuerza magnética sobre partículas con carga en movimiento

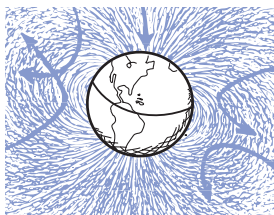
Una partícula cargada en reposo no interacciona con un campo magnético estático. Pero si la partícula cargada se mueve en un campo magnético, se hace evidente el carácter magnético de una carga en movimiento. Sufrir una fuerza desviadora.⁶ La fuerza es máxima cuando la partícula se mueve en dirección perpendicular a la de las líneas del campo magnético. Con otros ángulos, la fuerza disminuye y se vuelve cero cuando las partículas se mueven paralelas a las líneas de 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). Así, una carga en movimiento se desvía cuando cruza un campo magnético, pero no se desvía cuando viaja en dirección paralela al campo.

FIGURA 24.13

Un haz de electrones es desviado por un campo magnético.



⁶ Cuando las partículas de carga eléctrica q y velocidad v se mueven dentro de un campo magnético de intensidad B , en dirección perpendicular a la del campo, la fuerza F sobre cada partícula no es más que el producto de las tres variables: $F = qvB$. Cuando la dirección no es perpendicular, en esa ecuación v debe ser el componente de la velocidad perpendicular a B .

**FIGURA 24.14**

El campo magnético de la Tierra desvía muchas de las partículas con carga eléctrica que forman la radiación cósmica.

La fuerza que causa la desviación es muy distinta de las fuerzas que se producen 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 la interacción, sino en dirección perpendicular tanto a la del campo magnético como a la trayectoria del haz de electrones.

Somos afortunados de que los campos magnéticos desvíen las partículas cargadas. Esto se emplea para guiar a los electrones hacia la superficie interna de los cinescopios de TV y formen una imagen. Es también muy interesante que las partículas cargadas procedentes del espacio exterior son desviadas por el campo magnético de la Tierra. Si no fuera así, sería mayor la intensidad de los nocivos rayos cósmicos que llegan a la superficie terrestre.

Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica

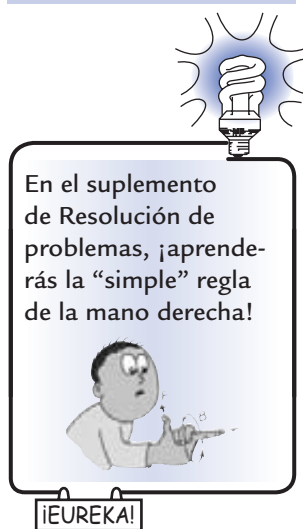
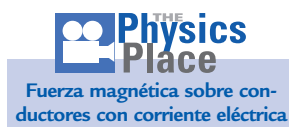
**FIGURA 24.15**

Figura interactiva

Un alambre que conduce corriente está sometido a una fuerza cuando está dentro de un campo magnético. (¿Puedes ver que es una continuación de lo que sucede en la figura 24.13?)

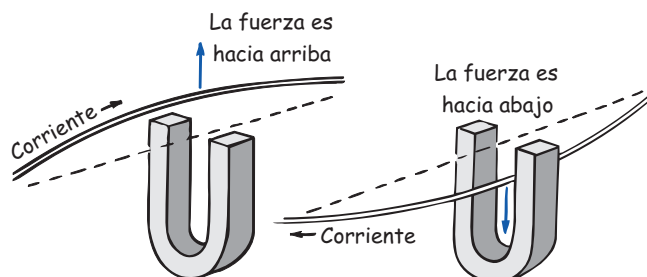
La simple lógica indica que si una partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético está sometida a una fuerza desviadora, entonces una corriente de partículas cargadas que se mueve a través de un campo magnético también siente una fuerza desviadora. Si las partículas están en un conductor, cuando responden a la fuerza desviadora, el alambre también será empujado (figura 24.15).

Si se invierte la dirección de la corriente, la fuerza desviadora actúa en dirección contraria. La fuerza es máxima 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, ni a lo largo de la dirección de la corriente. La fuerza es perpendicular tanto a las líneas de campo como a la corriente. Es una fuerza lateral.

Vemos que así como un conductor con corriente desvía una brújula (que fue lo que descubrió Oersted en su aula en 1820), un imán desviará a un conductor con corriente eléctrica. El descubrimiento de tales relaciones complementarias entre la electricidad y el magnetismo causó gran excitación, porque casi de inmediato las personas comenzaron a dominar la fuerza electromagnética para fines útiles, con grandes sensibilidades en los medidores eléctricos y con grandes fuerzas en los motores eléctricos.

EXAMÍNATE

¿Qué ley de la física establece que si un conductor con corriente produce una fuerza sobre un imán, éste debe producir una fuerza sobre un alambre que conduce corriente?



COMPRUEBA TU RESPUESTA

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

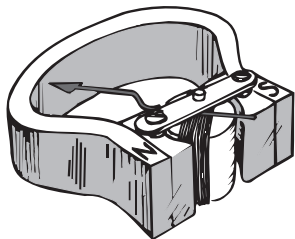


FIGURA 24.17
Diseño común de galvanómetro.



El galvanómetro recibió ese nombre en honor de Luigi Galvani (1737-1798), quien, mientras hacía la disección de la pierna de una rana, descubrió que metales diferentes que tocaban la extremidad provocaban que ésta se encogiera. Este descubrimiento fortuito condujo a la invención de las pilas y las baterías químicas. La próxima vez que tomes una cubeta galvanizada, piensa en Luigi Galvani y su laboratorio de anatomía.

¡EUREKA!

FIGURA 24.18

Tanto el amperímetro como el voltímetro son básicamente galvanómetros. (En el amperímetro, la resistencia eléctrica del instrumento es muy baja, y en el voltímetro es muy alta.)

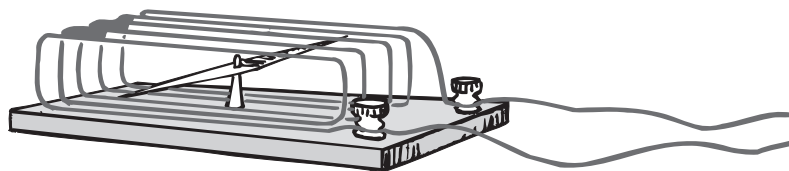


FIGURA 24.16
Un galvanómetro muy sencillo.

Medidores eléctricos (opcional)

El medidor más sencillo para detectar la corriente eléctrica no es más que un imán que gira libremente, es decir, una brújula. El siguiente en sensibilidad es 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 manera que puede detectar una corriente muy pequeña. El instrumento sensible que indica paso de corriente se llama *galvanómetro*.

Un diseño más común es el que muestra la figura 24.17, el cual usa más vueltas de alambre y en consecuencia es más sensible. La bobina se monta de forma que pueda moverse, y el imán se mantiene estacionario. La bobina gira en contra de un resorte, por lo que cuanto mayor corriente haya en sus espiras, mayor será su desviación. Un galvanómetro puede calibrarse para medir corriente (ampere), en cuyo caso se llama *amperímetro*. O bien, se puede calibrar para indicar el potencial eléctrico (volts) y en este caso se llama *voltímetro*.

Motores eléctricos

Si se modifica un poco el diseño del galvanómetro, para que la desviación sea de una rotación completa y no parcial, se obtiene un *motor eléctrico*. La diferencia principal es que en un motor se hace que la corriente cambie de dirección cada vez que la bobina hace media rotación. Después de forzarla a hacer media rotación, continúa su movimiento justo a tiempo cuando la corriente se invierte y, entonces, en vez de que la bobina invierta su dirección de giro, es forzada a continuar otra media vuelta en la misma dirección. Eso sucede en forma cíclica, y se produce la rotación, la cual se aprovecha para hacer funcionar relojes, aparatos diversos y para levantar cargas pesadas.

En la figura 24.19 vemos el principio del motor eléctrico. Un imán permanente produce un campo magnético en una región donde está una espira rectangular de alambre, que se monta para que gire respecto al eje de la línea punteada.



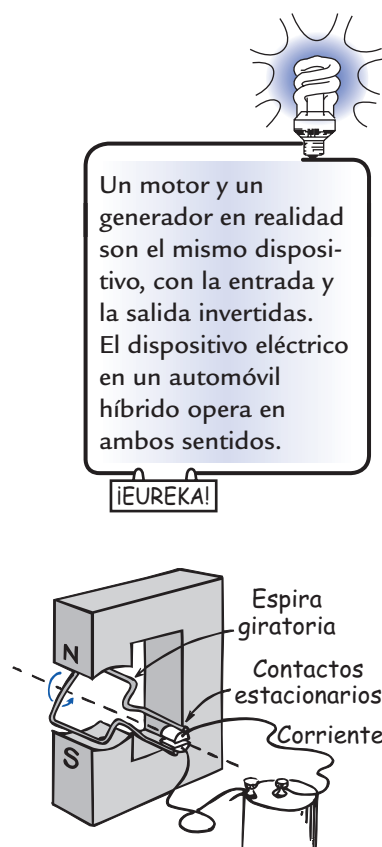


FIGURA 24.19

Figura interactiva

Un motor eléctrico simplificado.

Cualquier corriente en la espira tiene una dirección en el lado superior de ésta, y la dirección contraria en el lado inferior (porque si las cargas entran por un extremo de la espira, deben salir por el otro extremo). Si el lado superior de la espira es impulsado hacia la izquierda por el campo magnético, el lado inferior es forzado hacia la derecha, como si fuera un galvanómetro. Pero, a diferencia del caso de un galvanómetro, en un motor la corriente se invierte en cada media revolución, mediante contactos estacionarios sobre el eje. Las partes del alambre que giran y rozan con esos contactos se llaman *escobillas*. De esta forma, la corriente en la espira alterna de dirección, y las fuerzas sobre las partes superior e inferior no cambian de dirección cuando gira la espira. La rotación es continua mientras se suministre corriente eléctrica.

Aquí sólo describimos un motor sencillo de cd. Los motores mayores, de cd o de ca, se suelen fabricar reemplazando el imán permanente por un electroimán que la fuente de electricidad energiza. Naturalmente que se usa más que una sola espira. Se *devanan* muchas vueltas de alambre sobre un cilindro de hierro, y el conjunto se llama *armadura* que gira cuando el alambre conduce corriente.

La aparición de los motores eléctricos puso fin a muchas de las fatigas humanas y de los animales en todas partes del mundo. Han cambiado la forma de vivir de las personas.

EXAMÍNATE

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

El campo magnético de la Tierra (opcional)

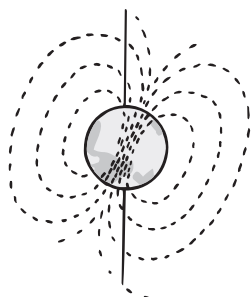


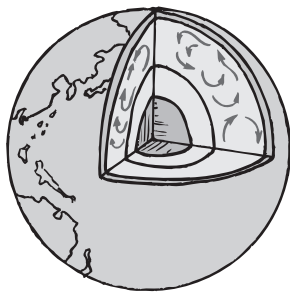
FIGURA 24.20

La Tierra es un imán.

Un imán colgado o una brújula apuntan al norte porque la Tierra misma es un gigantesco imán. La brújula se alinea con el campo magnético de la Tierra. Sin embargo, los polos magnéticos terrestres no coinciden con los polos geográficos; de hecho, están a gran distancia entre sí. Por ejemplo, en el hemisferio norte, el polo magnético está a unos 1,800 kilómetros del polo geográfico, en algún lugar de la Bahía de Hudson en el norte de Canadá. El otro polo está al sur de Australia (figura 24.20). Esto quiere decir que las brújulas no apuntan, generalmente, hacia el norte verdadero. La discrepancia entre la orientación de una brújula y el norte verdadero se llama *declinación magnética*.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Un galvanómetro y un motor se parecen en que ambos emplean bobinas dentro de un campo magnético. Cuando pasa una corriente por las bobinas, las fuerzas sobre los alambres las hacen girar. La principal diferencia es que la rotación máxima de la bobina de un galvanómetro es media vuelta; mientras que en un motor, la bobina (que está enrollada sobre una armadura) gira una cantidad ilimitada de vueltas. Eso se logra alternando la corriente en cada media vuelta de la armadura.

**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 terrestre.



Al igual que la cinta en una grabadora, la historia del fondo del océano está preservada en un registro magnético.

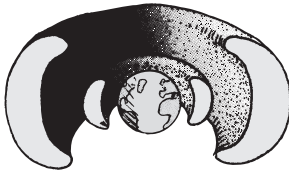
¡EUREKA!

No se sabe a ciencia cierta por qué la Tierra es un imán. La configuración del campo magnético terrestre es como la de un poderoso imán de barra colocado cerca del centro de la Tierra. Pero la Tierra no es un trozo magnetizado de hierro, como lo es un imán recto. Simplemente está demasiado caliente como para que los átomos individuales mantengan determinada orientación. Entonces la explicación debe buscarse en las corrientes eléctricas en las profundidades de la Tierra. A unos 2,000 kilómetros bajo el manto rocoso externo (que tiene casi 3,000 kilómetros de espesor), está la parte fundida que rodea al centro sólido. La mayoría de los geofísicos creen que hay cargas en movimiento, girando dentro de la parte fundida de la Tierra, que originan el campo magnético. Otros geofísicos especulan que las corrientes eléctricas se deben a corrientes de convección, debido al calor que sube desde el núcleo central (figura 24.21), y que esas corrientes de convección, combinadas con los efectos rotacionales de la Tierra producen el campo magnético terrestre. Debido al gran tamaño de la Tierra, la rapidez de las cargas en movimiento sólo necesita ser un milímetro por segundo, aproximadamente, para explicar el campo. Es necesario esperar que se realicen más estudios para llegar a una explicación más convincente.

Sea cual fuere la causa, el campo magnético terrestre no es estable; ha variado durante el tiempo geológico. La prueba de ello se encuentra en los análisis de las propiedades magnéticas de los estratos rocosos. Los átomos de hierro fundidos están desorientados debido al movimiento térmico; pero un poco de predominio de ellos se alinea con el campo magnético terrestre. Al enfriarse y solidificarse, este ligero predominio indica la dirección del campo magnético terrestre en la roca ígnea que se forma. Esto es parecido a las rocas sedimentarias, donde los dominios magnéticos de los granos de hierro que contienen los sedimentos tienden a alinearse con el campo magnético terrestre, y quedan asegurados en la roca que se forma. El ligero magnetismo que se produce se puede medir con instrumentos sensibles. A medida que se analizan muestras de roca de diferentes estratos formados a través del tiempo geológico, el campo magnético terrestre se puede cartografiar en distintas épocas. Esta evidencia indica que hubo épocas en que el campo magnético terrestre se redujo a cero, seguido por la inversión de los polos. En los últimos 5 millones de años se han presentado más de 20 inversiones. La más reciente fue hace 700,000 años. Las inversiones anteriores eran de cada 870,000 a 950,000 años. Con estudios de sedimentos profundos se ve que el campo ha desaparecido de 10,000 o 20,000 años, hasta un poco más de 1 millón de años. No podemos predecir cuándo será la siguiente inversión, porque la secuencia no es regular. Pero hay una pista en las mediciones recientes, que indican una disminución de más del 5% de la intensidad del campo magnético terrestre en los últimos 100 años. Si se mantiene ese cambio, podríamos tener 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 con regularidad, cada 22 años. Este ciclo magnético de 22 años se ha relacionado, a través de la evidencia en tres franjas terrestres, con periodos de sequía en la Tierra. Es interesante que el ciclo de 11 años de las manchas solares, conocido desde hace mucho, sea exactamente la mitad del tiempo en el que el Sol invierte su polaridad magnética.

Los vientos iónicos variables en la atmósfera terrestre causan fluctuaciones más rápidas, pero mucho más pequeñas, del campo magnético terrestre. Los iones en esas regiones se deben a las interacciones energéticas de los rayos ultravioleta y los rayos X solares, con los átomos en la atmósfera. El movimiento de esos iones produce una parte pequeña, pero importante, del campo magnético terrestre. Al igual que las capas inferiores de aire, la ionosfera es agitada por los vientos. Las variaciones en esos vientos son la causa de casi todas las fluctuaciones rápidas del campo magnético terrestre.

**FIGURA 24.22**

Cinturones de radiación de Van Allen, cuyos cortes transversales se ven aquí, sin distorsión por el viento solar.

**FIGURA 24.23**

La luz de la aurora boreal en el cielo se debe a partículas cargadas, en los cinturones de Van Allen, que chocan contra las moléculas atmosféricas.

Rayos cósmicos (opcional)

El Universo es un campo de tiro de partículas cargadas, las cuales se llaman **rayos cósmicos** y consisten en protones, partículas alfa y otros núcleos atómicos, así como electrones de alta energía. Los protones podrían ser restos del Big Bang. Es probable que los núcleos más pesados salieran de las estrellas en explosión. En cualquier caso, viajan por el espacio con rapidez fantásticas, y forman la radiación cósmica, tan peligrosa para los astronautas. Dicha radiación se intensifica cuando el Sol está activo y aporta sus propias partículas cargadas. Los rayos cósmicos también son un peligro para la instrumentación electrónica en el espacio: los impactos de núcleos de rayos cósmicos muy ionizantes pueden causar “inversiones” en los bits de la memoria de las computadoras, o la falla de pequeños microcircuitos. Por fortuna, para nosotros en la superficie terrestre, la mayoría de esas partículas cargadas se desvían y alejan gracias al campo magnético de nuestro planeta. Algunas de ellas quedan atrapadas en los confines externos del campo magnético y forman los cinturones de radiación de Van Allen (figura 24.22).

Los cinturones de radiación de Van Allen son dos anillos, en forma de rosquilla, que rodean la Tierra. Tienen el nombre de James A. Van Allen, quien sugirió su existencia a partir de datos reunidos por el satélite estadounidense *Explorer I* en 1958. El anillo interior está centrado en la Tierra, y a unos 3,200 kilómetros sobre la superficie; el anillo externo, mayor y más ancho, también está centrado y a unos 16,000 kilómetros sobre nosotros. Los astronautas describen órbitas a distancias seguras, muy por debajo de esos cinturones de radiación. La mayoría de las partículas cargadas, protones y electrones, atrapados en el cinturón externo, probablemente vienen del Sol. Las tormentas solares lanzan partículas cargadas hacia afuera, como surtidores gigantes, y muchas de ellas pasan cerca de la Tierra y quedan atrapadas por el campo magnético. Las partículas cargadas describen trayectorias en forma de espiral, en torno a las líneas del campo magnético terrestre, y regresan o rebotan, entre los polos magnéticos terrestre, a mucha altura sobre la atmósfera. Las perturbaciones del campo terrestre permiten, con frecuencia, que los iones se sumerjan en la atmósfera y hagan que brille como una lámpara fluorescente. Son las bellas *aurora boreal* en el hemisferio norte, y *aurora austral* en el hemisferio sur.

Es probable que las partículas atrapadas en el cinturón interno se hayan originado en la atmósfera terrestre. Las explosiones de bombas de hidrógeno a gran altitud, en 1962, aportaron electrones frescos a este cinturón.

A pesar del campo magnético terrestre protector, muchos rayos cósmicos “secundarios” llegan a la superficie terrestre.⁷ Son partículas formadas cuando los rayos cósmicos “primarios”, los que provienen del espacio exterior, chocan contra núcleos atómicos en la alta atmósfera. El bombardeo de los rayos cósmicos es má-

⁷ Algunos biólogos creen que los cambios magnéticos en la Tierra desempeñaron un papel importante en la evolución de las formas de vida. Una hipótesis es que en las primeras fases de la vida primitiva, el campo geomagnético era lo suficientemente intenso para proteger las delicadas formas de vida contra las partículas cargadas de alta energía. Pero durante los periodos de intensidad cero, la radiación cósmica y la dispersión de los cinturones de Van Allen aumentaron la tasa de mutaciones hacia formas más robustas de vida, en igual forma que las mutaciones que producen los rayos X en los famosos estudios de herencia en moscas de frutas. Las coincidencias entre las fechas de mayor frecuencia de cambios y las fechas de las inversiones de los polos magnéticos en los últimos millones de años parecen respaldar esta hipótesis.

**FIGURA 24.24**

En septiembre de 1997 un magnetómetro en la nave espacial Surveyor detectó un débil campo magnético en torno a Marte, 800 veces menor que el campo magnético de la superficie terrestre. Si el campo era más intenso en el pasado, cabe imaginar si desempeñó algún papel relevante para proteger al material viviente en ese planeta, contra el viento solar y los rayos cósmicos.

ximo en los polos magnéticos, porque las partículas cargadas que chocan contra la Tierra en esos lugares no viajan *a través* de las líneas del campo magnético, sino *a lo largo* de las líneas y no se desvían. El bombardeo disminuye al alejarse de los polos y es mínimo en las regiones ecuatoriales. En las latitudes intermedias llegan unas cinco partículas por centímetro cuadrado y por minuto en el nivel del mar. Esta frecuencia aumenta muy rápido con la altitud. ¡Los rayos cósmicos penetran a tu organismo mientras estás leyendo esto! ¡Y también cuando no lo lees!

Biomagnetismo

**FIGURA 24.25**

Puede ser que las palomas sientan bien la dirección porque tengan incorporada una “brújula” en el cráneo.

Algunas bacterias producen biológicamente granos de magnetita (un óxido de hierro) con un solo dominio, que se alinean y forman brújulas internas. Pueden usar sus brújulas para detectar la inclinación del campo magnético terrestre. Como tienen un sentido de dirección, son capaces de localizar fuentes de alimento. Es notable que esas bacterias, al sur del ecuador, forman los mismos imanes de un dominio, ¡pero alineadas en direcciones opuestas respecto a las que forman sus contrapartes en el hemisferio norte! Las bacterias no son los únicos organismos vivos que tienen brújulas incorporadas. En fecha reciente se determinó que las palomas tienen imanes de magnetita de múltiples dominios, dentro del cráneo, conectados con una gran cantidad de nervios que penetran en el cerebro. Las palomas tienen un sentido magnético, y pueden discernir no sólo las direcciones longitudinales al campo magnético terrestre, sino también la latitud, por la inclinación de ese campo. También se ha encontrado material magnético en el abdomen de las abejas, cuyo comportamiento se ve afectado por pequeños campos magnéticos. Algunas avispas, las mariposas monarca, las tortugas marinas y los peces son criaturas con sentido magnético. Se han descubierto diminutos cristales de magnetita en los cerebros humanos, parecidos a los cristales de las bacterias magnéticas. Nadie sabe si están relacionados con nuestros sentidos. Al igual que las criaturas mencionadas arriba, puede ser que tengamos un sentido magnético.

IRM: IMAGEN DE RESONANCIA MAGNÉTICA

El escáner de imagen de resonancia magnética produce fotografías de alta resolución de los tejidos en el interior del organismo. Unas bobinas superconductoras producen un campo magnético intenso, hasta 60,000 veces más fuerte que el campo magnético terrestre; ese campo se usa para alinear los protones de los átomos de hidrógeno en el organismo del paciente.

Al igual que los electrones, los protones tienen la propiedad del “espín”, y se alinean con un campo magnético. A diferencia de una brújula que se alinea con el campo magnético terrestre, el eje de un protón oscila en torno del campo magnético aplicado. A los protones que oscilan se les golpea con un impulso de ondas de radio, sintonizadas de tal modo que empujen al eje de giro (al eje del espín) del protón hacia un lado, perpendicular al campo magnético aplicado. Cuando las ondas de radio pasan y los protones regresan con rapidez a su comportamiento de oscilación, emiten señales electromagnéticas débiles, cuyas frecuencias dependen un poco del ambiente químico donde se encuentre el protón. Las señales son captadas por sensores, y analizadas por una

computadora revelan densidades variables de átomos de hidrógeno en el organismo, y sus interacciones con los tejidos vecinos. En las imágenes se distinguen con claridad el fluido y el hueso, por ejemplo.

Es interesante que la IRM antes se llamaba RMN (resonancia magnética nuclear) porque los núcleos de hidrógeno resuenan con los campos aplicados. A causa de la fobia del público hacia todo lo “nuclear”, se cambió el nombre a IRM a todos esos dispositivos. ¡Avisa a tu amigo que padezca esa fobia, que todos los átomos de su organismo tienen un núcleo!



Resumen de términos

Campo magnético Región de influencia magnética en torno a un polo magnético o a una partícula con carga eléctrica en movimiento.

Dominios magnéticos Regiones agrupadas de átomos magnéticos alineados. Cuando esas regiones se alinean entre sí, la sustancia que las contiene es un imán.

Electroimán Imán cuyo campo lo produce una corriente eléctrica. Suele tener la forma de una bobina de alambre con una pieza de hierro en su interior.

Fuerza magnética 1. Entre imanes, es la atracción mutua de polos magnéticos distintos, y la repulsión mutua de polos magnéticos iguales. 2. Entre un campo magnético y una partícula con carga eléctrica en movimiento, es una fuerza desviadora debida al movimiento de la partícula. Esa fuerza desviadora es perpendicular a la velocidad de la partícula y es perpendicular a las líneas de campo magnético. Es máxima cuando la partícula cargada se mueve en dirección perpendicular a la de las líneas de campo, y es mínima (cero) cuando se mueve en dirección paralela a ellas.

Rayos cósmicos Diversas partículas de alta velocidad que viajan a través del Universo y originadas en sucesos violentos en las estrellas.

Preguntas de repaso

1. ¿Quién descubrió, y en qué condiciones lo hizo, la relación entre la electricidad y el magnetismo?

Fuerzas magnéticas

2. La fuerza entre partículas con carga eléctrica depende de la magnitud de la carga, de la distancia entre ellas y, ¿de qué más?
3. ¿Cuál es la fuente de la fuerza magnética?

Polos magnéticos

4. ¿La regla de la interacción entre polos magnéticos se parece a la regla de la interacción entre partículas con carga eléctrica?
5. ¿En qué sentido los *polos magnéticos* son muy diferentes de las *cargas eléctricas*?

Campos magnéticos

6. ¿Cómo se relaciona la intensidad del campo magnético con la cercanía de sus líneas del campo magnético en un imán recto?
7. ¿Qué produce un campo magnético?
8. ¿Cuáles son las dos clases de movimiento giratorio que tienen los electrones en un átomo?

Dominios magnéticos

9. ¿Qué es un dominio magnético?
10. A nivel micro, ¿cuál es la diferencia entre un clavo de acero no magnetizado y uno magnetizado?
11. ¿Por qué al dejar caer un imán de hierro sobre un piso duro se debilita su magnetización?

Corrientes eléctricas y campos magnéticos

12. En el capítulo 22 aprendimos que el campo eléctrico se dirige radialmente en torno a una carga puntual. ¿Cuál es la dirección del campo magnético que rodea a un alambre que conduce corriente?
13. ¿Qué le sucede a la dirección del campo magnético en torno a una corriente eléctrica cuando se invierte la dirección de la corriente?
14. ¿Por qué la intensidad del campo magnético es mayor dentro de una espira de un alambre que conduce corriente, que en torno a un tramo recto del mismo alambre?

Electroimanes

15. ¿Por qué un trozo de hierro dentro de una espira que conduce corriente aumenta la intensidad del campo magnético?

Electroimanes superconductores

16. ¿Por qué los campos magnéticos de imanes superconductores son más intensos que los de imanes convencionales?

Fuerza magnética sobre partículas con carga en movimiento

17. ¿En qué dirección, en relación con la de un campo magnético, se mueve una partícula cargada para estar sujeta a una fuerza desviadora máxima? ¿Y a una fuerza desviadora mínima?
18. ¿Qué efecto tiene el campo magnético terrestre sobre la intensidad de los rayos cósmicos que llegan a la superficie de nuestro planeta?

Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica

19. Como una fuerza magnética actúa sobre una partícula cargada en movimiento, ¿tiene sentido que una fuerza magnética actúe también sobre un alambre que conduce corriente? Defiende tu respuesta.
20. ¿Qué dirección relativa entre un campo magnético y un alambre que conduce corriente eléctrica produce la fuerza máxima?

Medidores eléctricos

21. ¿Cómo detecta un galvanómetro la corriente eléctrica?
22. ¿Cómo se llama un galvanómetro cuando se calibra para indicar corriente? ¿Y para indicar voltaje?

Motores eléctricos

23. ¿Qué tan a menudo se invierte la corriente en las espiras de un motor eléctrico?

Campo magnético terrestre

24. ¿Qué quiere decir declinación magnética?
25. ¿Por qué es probable que no haya dominios magnéticos de alineación permanente en el núcleo terrestre?
26. ¿Qué son las *inversiones de los polos magnéticos*? ¿Suceden en el Sol, además de en la Tierra?

Rayos cósmicos

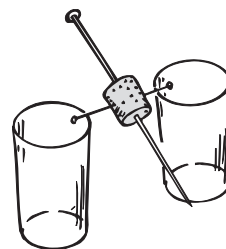
27. ¿Cuál es la causa de la aurora boreal?

Biomagnetismo

28. Menciona al menos seis seres vivos de los que se sepa que albergan imanes diminutos en sus organismos.

Proyectos

1. Determina la dirección y la inclinación de las líneas del campo magnético terrestre en donde te encuentras. Imana una aguja grande de acero, o una pieza recta de alambre de acero, frotándola dos docenas de veces con un imán fuerte. Atraviesa con la aguja un tapón de corcho, de tal modo que cuando flote el corcho la aguja quede horizontal (paralela a la superficie del agua). Haz flotar el corcho en un recipiente de plástico o de madera. La aguja apuntará hacia el polo magnético. A continuación clava un par de alfileres no imanados en los costados del corcho. Apoya los alfileres en las orillas de un par de vasos de vidrio, para que la aguja o el alambre apunte hacia el polo magnético. Debe inclinarse, alineado con el campo magnético terrestre.
2. Se puede magnetizar o imanar con facilidad una varilla de hierro, alineándola con las líneas del campo magnético terrestre, y golpeándola suavemente algunas veces con un martillo. Funciona mejor si la varilla se inclina hacia abajo, para coincidir con la inclinación del campo terrestre. Al martillar, los dominios se agitan y pueden llegar a una mejor alineación con el campo terrestre. La varilla se puede desmagnetizar golpeándola cuando se encuentre en dirección este-oeste.

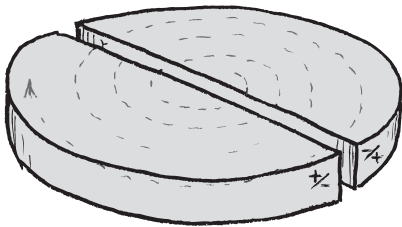
**Ejercicios**

1. Muchos cereales secos se fortifican con hierro, el cual se agrega al cereal en forma de pequeñas partículas de hierro. ¿Cómo se podrían separar del cereal tales partículas?
2. ¿En qué sentido todos los imanes son electroimanes?
3. Como todos los átomos tienen cargas eléctricas en movimiento, ¿por qué entonces no todos los materiales son magnéticos?

4. ¿Para elaborar una brújula, apunta un clavo de hierro común en la dirección del campo magnético terrestre (el cual, en el hemisferio norte, está inclinado hacia abajo, es decir, hacia el polo norte) y de forma repetida golpéalo durante unos segundos con un martillo o con una piedra. Luego cuélgalo de un cordel por su centro de gravedad. ¿Por qué al golpearlo se magnetizó el clavo?
5. Si colocas un trozo de hierro cerca del polo norte de un imán, lo atraerá. ¿Por qué también lo atraerá si colocas el hierro cerca del polo sur del imán?
6. ¿Se atraen entre sí los polos de un imán tipo de herradura? Si doblas el imán para que los polos queden más cerca, ¿qué le sucede a la fuerza entre los polos?
7. ¿Por qué no se aconseja fabricar un imán tipo de herradura con un material flexible?
8. ¿Qué clase de campo de fuerza rodea a una carga eléctrica estacionaria? ¿Y qué campo adicional la rodea cuando está en movimiento?
9. Tu amigo te dice que un electrón siempre experimenta una fuerza en un campo eléctrico, pero no siempre en un campo magnético. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué?
10. ¿Cuál es la diferencia entre los polos magnéticos de los imanes para refrigerador comunes y los de imanes de barra comunes?
11. Un amigo te dice que la puerta de un refrigerador, abajo de la capa de plástico pintado de blanco, es de aluminio. ¿Cómo podrías saber si ello es verdad (sin dañar la pintura)?
12. ¿Por qué un imán atrae un clavo o un broche para papel (*clip*) comunes, pero no un lápiz de madera?
13. ¿Los dos polos de un imán atraen un broche para papel? Explica lo que le sucede al broche cuando es atraído. (*Sugerencia:* revisa la figura 24.12.)
14. ¿Por qué los imanes permanentes no son en realidad permanentes?
15. Una forma de hacer una brújula es atravesar un tapón de corcho con una aguja magnetizada, y ponerlos a flotar en agua en un recipiente de vidrio. La aguja se alinea con la componente horizontal del campo magnético terrestre. Como el polo norte de esta brújula es atraído hacia el norte, ¿la aguja se moverá hacia la orilla norte del recipiente? Defiende tu respuesta.
16. Una “brújula de inclinación” es un imán pequeño montado en un eje horizontal, de modo que gire hacia arriba o hacia abajo (como una brújula puesta de lado). ¿En qué lugar de la Tierra esa brújula apuntará en dirección más vertical? ¿En qué lugar apuntará en dirección más horizontal?
17. ¿En qué dirección apuntaría la aguja de una brújula, si estuviera libre para apuntar en todas direcciones, cuando se localizara en el polo norte de la Tierra en Canadá?
18. ¿Cuál es la fuerza magnética neta en la aguja de una brújula? ¿Con qué mecanismo la aguja de la brújula se alinea con el campo magnético?
19. Como las limaduras de hierro que se alinean con el campo magnético del imán recto de la figura 24.2 no son en sí mismas imanes pequeños, ¿cuál será el mecanismo que las hace alinearse con el campo del imán?
20. El polo norte de una brújula es atraído hacia el polo norte de la Tierra; sin embargo, los polos iguales se repelen. ¿Puedes resolver este aparente dilema?
21. Sabemos que una brújula apunta hacia el norte, porque la Tierra es un imán gigantesco. ¿Esa aguja que apunta hacia el norte seguirá apuntando al norte cuando la brújula se lleve al hemisferio sur?
22. Un amigo dice que cuando una brújula atraviesa el ecuador, gira y apunta en dirección contraria. Otro amigo dice que eso no es cierto, que las personas en el hemisferio sur usan el polo sur de la brújula, que apunta hacia el polo más cercano. Luego te toca a ti. ¿Qué dices?
23. ¿En qué posición una espira de alambre que conduce corriente se localiza en un campo magnético, de manera que no tienda a girar?
24. El imán A tiene un campo magnético con intensidad doble que el imán B (a una distancia igual), y a cierta distancia atrae al imán B con una fuerza de 50 N. Entonces, ¿con cuánta fuerza el imán B tira del imán A?
25. En la figura 24.15 se ve un imán que ejerce una fuerza sobre un alambre que conduce corriente. ¿Ese alambre ejerce una fuerza sobre el imán? ¿Por qué?
26. Un imán poderoso atrae un broche para papel con cierta fuerza. ¿El broche atrae al imán poderoso? En caso negativo, ¿por qué no? En caso afirmativo, ¿ejerce tanta fuerza sobre el imán como la que el imán ejerce sobre él? Defiende tus respuestas.
27. Un alambre que conduce corriente está en una orientación norte-sur. Cuando la aguja de la brújula se coloca por abajo o por encima de él, en qué dirección apunta la aguja de la brújula?
28. Un altavoz consiste en un cono unido a una bobina que conduce corriente, ubicada en un campo magnético. ¿Cuál será la relación entre las vibraciones de la corriente y las vibraciones del cono?
29. ¿Un imán superconductor usará menos energía eléctrica que un electroimán tradicional de alambre de cobre o usará la misma cantidad de energía? Sustenta tu respuesta.
30. Cuando se construyen barcos de planchas de acero, se escribe en una placa de latón fija al barco la ubicación del astillero y la orientación que tenía el barco al ser construido. ¿Por qué?
31. ¿Un electrón en reposo dentro de un campo magnético puede ponerse en movimiento usando el campo magnético? ¿Qué sucedería si estuviera en reposo en un campo eléctrico?



32. Un haz de electrones pasa a través de un campo magnético sin ser desviado. ¿Qué puedes concluir acerca de la orientación del haz en relación con el campo magnético? (Ignora cualesquiera otros campos.)
33. Un ciclotrón es un dispositivo para acelerar partículas cargadas a grandes rapidezces, mientras describen una trayectoria espiral hacia afuera. Las partículas cargadas están sometidas tanto a un campo eléctrico como a un campo magnético. Uno de esos campos aumenta la rapidez de las partículas cargadas, y el otro las hace que describan una trayectoria curva. ¿Qué campo efectúa cuál función?



34. Un protón se mueve en una trayectoria circular perpendicular a un campo magnético constante. Si se incrementa la intensidad del campo del imán, ¿el diámetro de la trayectoria circular se incrementará, disminuirá o permanecerá igual?
35. Un haz de protones de alta energía sale de un ciclotrón. ¿Supones que hay un campo magnético asociado con esas partículas? ¿Por qué?
36. Un imán puede ejercer una fuerza sobre una partícula cargada en movimiento, pero no puede cambiar la energía cinética de la partícula. ¿Por qué?
37. Un campo magnético puede desviar un haz de electrones, pero no puede efectuar trabajo sobre ellos para cambiar sus rapidezces. ¿Por qué?
38. Dos partículas cargadas son lanzadas a un campo magnético que es perpendicular a sus velocidades. Si las partículas se desvían en direcciones opuestas, ¿qué indica eso?
39. Se dice que dentro de cierto laboratorio hay un campo eléctrico o un campo magnético, pero no ambos. ¿Qué experimentos se podrían realizar para determinar qué clase de campo hay en ese recinto?
40. ¿Por qué los astronautas se mantienen a menores altitudes que las de los cinturones de Van Allen cuando hacen caminatas espaciales?

41. Los residentes del norte de Canadá están bombardeados por radiación cósmica más intensa que los residentes de México. ¿Por qué?
42. ¿Qué cambios de intensidad esperas de los rayos cósmicos en la superficie terrestre, que haya durante periodos en los cuales el campo magnético terrestre pase por una fase cero al invertir sus polos?
43. En un espectrómetro de masas (figura 34.14), los iones entran a un campo magnético, donde su trayectoria se curva, y llegan a un detector. Si diversos átomos simplemente ionizados viajan a la misma rapidez por el campo magnético, ¿esperas que todos sean desviados la misma cantidad? O bien, ¿los iones distintos se desvían en diferentes cantidades? Sustenta tu respuesta.
44. Una forma de blindar un hábitat contra la radiación cósmica, al estar en el espacio anterior, sería con una colchoneta absorbente que funcionara como la atmósfera que protege a la Tierra. Imagina otra forma de blindaje que también se parezca al blindaje natural de la Tierra.
45. Si tuvieras dos barras de hierro, una imantada y la otra no, y no tuvieras a la mano más materiales, ¿cómo podrías decir cuál de ellas es el imán?
46. Históricamente, cuando se cambió la terracería por pavimento se redujo la fricción en los vehículos. Cuando se cambió el pavimento por rieles de acero se redujo aun más la fricción. ¿Cuál será el siguiente paso para reducir la fricción en los vehículos con la superficie? ¿Qué fricción quedará cuando se elimine la fricción con la superficie?
47. ¿Un par de conductores paralelos que conducen corriente ejercen fuerzas entre sí?
48. ¿Cuál será el efecto magnético de juntar dos alambres con corrientes iguales pero en dirección opuesta? ¿Y de entrelazar uno sobre el otro?
49. ¿Cuándo una corriente pasa por un resorte embobinado helicoidalmente, el resorte se contrae como si se comprimiera. ¿Cuál es tu explicación de esto?
50. Cuando se les prepara para someterse al escáner de imagen de resonancia magnética, ¿Por qué a los pacientes se les pide quitarse anteojos, relojes, joyería y otros objetos metálicos?

