

CAMPO MAGNÉTICO

EL ENIGMA DEL MAGNETISMO

Hace varios milenios, los griegos se dieron cuenta de que la magnetita (un mineral de hierro que descubrieron en una región del Asia Menor llamada Magnesia) tenía la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro. Se sabe también que alrededor del año 1000 los chinos habían descubierto que al poner un trozo alargado de magnetita sobre algo que flotase en el agua y se pudiera mover libremente, siempre se alineaba en la misma dirección (Norte-Sur). A este mineral posteriormente se le llamó imán natural.



Estos conocimientos propiciaron la invención de la brújula magnética, cuyo uso para orientarse se extendió a Europa a través de Oriente Medio. Sin embargo, la explicación del magnetismo se mantuvo durante mucho tiempo como un enigma de la naturaleza.

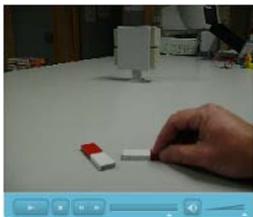
La influencia del medio en estos movimientos es considerable. Las fuerzas de rozamiento entorpecen y modifican sensiblemente el movimiento y a menudo conviene intervenir para minimizar en lo posible estas influencias. Los estudios de aerodinámica, por ejemplo, diseñan perfiles afilados en vehículos, con objeto de facilitar su penetración en el aire. Otras veces, la influencia del medio se puede aprovechar positivamente, logrando algunas aplicaciones notables. Por ejemplo, el empuje puede ser aprovechado para hacer volar globos aerostáticos, la ingeniería aeronáutica aprovecha corrientes de aire generadas por helicópteros y por aviones para mantenerlos en vuelo,...

A finales del siglo XIX encontramos el primer gran estudio sistemático de los fenómenos magnéticos. Lo realizó Gilbert (1544-1603), médico de la reina Isabel I de Inglaterra. En el periodo que va de 1581 al 1600 efectuó numerosos experimentos de electricidad y de magnetismo y recopiló los resultados más importantes de esas experiencias en el libro *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure; Physiologia noua, plurimis & argumentis, & experimentis demonstrata* (Sobre el imán y los cuerpos magnéticos y sobre el gran imán la Tierra), publicado en Londres en 1600.



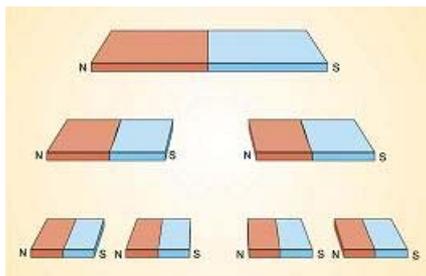
Repasaremos ahora algunos de los aspectos principales de la fenomenología sobre el magnetismo natural:

- 1) Existen algunas sustancias, como la magnetita, que son imanes muy potentes, aunque se encuentran en muy poca cantidad. También es conocido que la Tierra entera actúa como un gran imán y que astros como el Sol ejercen acciones magnéticas muy importantes.
- 2) Los imanes se ejercen entre sí interacciones magnéticas, pero también actúan sobre otros objetos. Concretamente ejercen una fuerte acción atractiva sobre el hierro y el acero y, con menor intensidad sobre otros metales (por ejemplo, el níquel y el cobalto).
- 3) Si cogemos un trozo de magnetita y lo acercamos a limaduras de hierro, vemos que son atraídas hacia dos zonas opuestas del mineral, que se denominan polos magnéticos (polo norte y polo sur). Teniendo esto en cuenta es frecuente recortar los imanes en forma de barras de modo que los polos queden situados en los extremos. También se suelen colorear para señalar los polos norte y sur.



4) Al enfrentarse a dos imanes por polos iguales, se repelen, mientras que si se enfrentan por polos distintos se atraen. En el video adjunto (se puede ver en la versión Web de este tema), filmado por alumnos de Bachillerato en el laboratorio, se observa que como consecuencia de este comportamiento la acción mutua entre dos imanes no es una simple atracción o repulsión, sino que los imanes, al mismo tiempo que se atraen y repelen, se orientan.

5) Si se fragmenta un imán, cada fragmento queda convertido en un nuevo imán, dotado de dos polos. Por mucho que se repita el proceso, todos los pedazos obtenidos actúan como imanes enteros con sus correspondientes polo norte y polo sur. Este hecho, junto con otros, pone en evidencia que el magnetismo no es una manifestación de fuerzas electrostáticas.

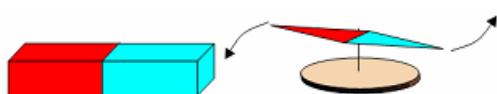


Se podría pensar, por ejemplo, que un imán fuera un dipolo eléctrico, con carga eléctrica positiva acumulada en uno de sus extremos y carga eléctrica negativa acumulada en el otro. Si así fuera, se podrían aislar las zonas donde se concentra la carga de cada signo y esos pedazos obtenidos del imán se comportarían como objetos cargados con su respectiva carga. El hecho de que cualquier pedazo de un imán, por pequeño que sea, es también un imán incrementó durante mucho tiempo el carácter misterioso del magnetismo.

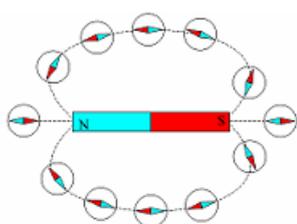
6) Otro fenómeno interesante y específico del magnetismo es lo que les sucede a algunos materiales después de haber sido sometidos a la acción de un imán. Los materiales, como el hierro y el acero, que son atraídos por los imanes, se pueden a su vez imantar (es decir, se convierten en imanes) cuando entran en contacto con el imán o también, por frotamiento, si dicho frotamiento se realiza siempre en el mismo sentido. La imantación desaparece rápidamente en casi todos los casos, pero en otros, como el acero, permanece durante bastante tiempo.

CONCEPTO CUALITATIVO DE CAMPO MAGNÉTICO

Las fuerzas magnéticas, entendidas como fuerzas entre imanes, son un tipo de interacción en la que tiene sentido plantear el concepto de existencia de un campo: el campo magnético.



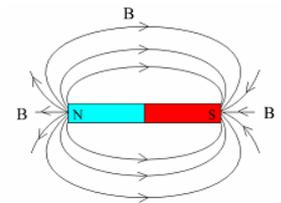
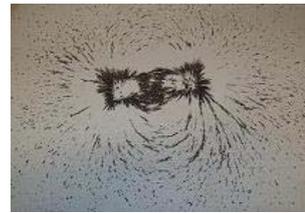
El dibujo adjunto muestra el procedimiento que se ha de seguir para representar el campo magnético creado por un imán. Alrededor de él colocamos en diversas posiciones un pequeño imán testigo (una brújula) de forma que se le permite orientarse pero no desplazarse.



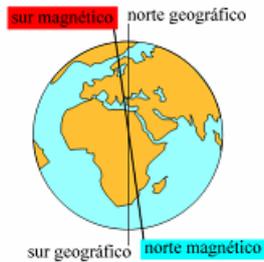
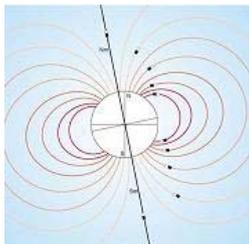
Por definición, la orientación del campo magnético que produce el imán rectangular en cada punto es la orientación sur-norte que adquiere el imán testigo ahí. El vector que representa al campo en cada punto e indica su intensidad, se llama inducción magnética, **B**, y las líneas del campo son tangentes a dicho vector en cada punto. Como se observa en el dibujo adjunto las líneas del campo magnético son cerradas (también atraviesan al imán), emergen hacia el exterior del imán rectangular que produce el campo por su polo norte y vuelven a él por su polo sur.

Se pueden usar pequeñas limaduras de hierro para realizar experimentalmente este proceso. Bajo la influencia del imán, las limaduras se convierten temporalmente en pequeños imanes de prueba, que, una vez orientados, dibujan el trazo de las líneas de fuerza del campo magnético. La imagen más a la izquierda es una fotografía de este experimento tomada en el

laboratorio por alumnos de Bachillerato. Debajo de un tomo de folios o de una cartulina se coloca un imán rectangular y sobre la cartulina se dejan caer las limaduras. La disposición en la que quedan revela la disposición de las líneas del campo magnético que crea el imán en el exterior, representadas en el dibujo de la derecha.



Ya hemos dicho que la Tierra actúa como un imán y que la existencia del magnetismo terrestre se conoce desde la antigüedad. Al colocar una brújula en cualquier lugar sobre el suelo terrestre, se orienta de tal modo que su polo norte



señala aproximadamente al polo norte geográfico (existe una desviación de unos 20°). Esto indica que el polo sur magnético de la Tierra está muy cerca del polo norte geográfico y viceversa. Como se sabe, aprovechando este hecho, las brújulas se han venido utilizando históricamente para orientarse, teniendo un papel muy importante en la navegación, no sólo aérea, sino también, por ejemplo en el desierto.

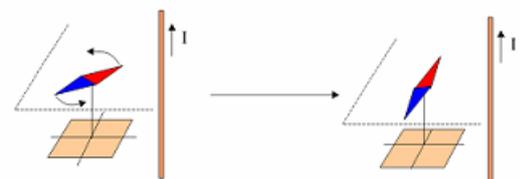
EXPERIENCIA DE OERSTED

La analogía entre el magnetismo y la electricidad promovió la búsqueda de relaciones entre ellos que pudiera explicar sus características comunes. Sin embargo, los primeros intentos para investigar una posible relación entre cargas eléctricas e imanes resultaron infructuosos: Mostraron que al poner objetos cargados en presencia de imanes, la única fuerza que se ejerce entre ellos es una fuerza de atracción global, como la existente entre cualquier objeto cargado y otro neutro (en este caso, el imán). Es decir, un imán y un objeto cargado se atraen, pero no se orientan, lo que indica que no tiene lugar una interacción magnética entre ellos.



Oersted (1777-1851), realizó por primera vez un experimento que mostró la existencia de una relación entre la electricidad y el magnetismo. En 1813 había predicho esa relación, y en 1820, mientras preparaba su clase de física en la Universidad de Copenhague, comprobó que al mover una brújula cerca de un cable que conducía corriente eléctrica, la aguja tendía a orientarse para quedar en una posición perpendicular a la dirección del cable.

La diferencia fundamental de la experiencia de Oersted con intentos anteriores que habían dado resultado negativo es el hecho de que en el experimento de la espira y la corriente **las cargas que interaccionan con el imán están en movimiento**. Teniendo en cuenta este hecho Ampere (1775-1836), poco después de conocer el resultado del experimento de Oersted, planteó formalmente que **toda corriente eléctrica produce un campo magnético**. El propio Ampere utilizó este concepto para anticipar una explicación del magnetismo natural y formalizó estos desarrollos en términos matemáticos.



El hallazgo de que toda corriente eléctrica produce un campo magnético abrió abundantes vías de investigación acerca del magnetismo y su relación con la electricidad. Entre los caminos abiertos que produjeron desarrollos muy fructíferos mencionamos el abordaje de los siguientes problemas:

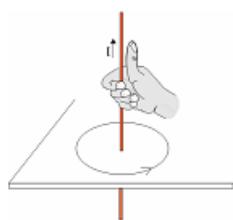
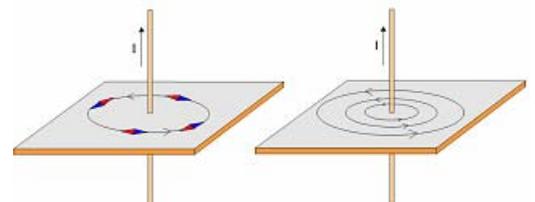
- 1) La determinación cuantitativa del campo magnético producido por diferentes tipos de corrientes eléctricas.** Respondía a la necesidad de producir campos magnéticos de una intensidad y una disposición de sus líneas de fuera controlables, mejorando las prestaciones de los imanes naturales.
- 2) El aprovechamiento de las fuerzas existentes entre corrientes eléctricas e imanes.** Permitió construir motores eléctricos, instrumentos para medir la intensidad de corriente y otras aplicaciones (por ejemplo, la balanza electrónica).
- 3) La explicación del magnetismo natural.** Basada en el conocimiento acumulado de la estructura interna de la materia y en el hecho de que toda corriente genera en sus proximidades un campo magnético.
- 4) El efecto recíproco al mostrado por la experiencia de Oersted, es decir, la obtención de corriente eléctrica a partir de un campo magnético.** Abrió el camino a la obtención industrial de corriente eléctrica y a su aprovechamiento por la mayoría de la población.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR ALGUNOS TIPOS DE CORRIENTES. LEY DE AMPERE

Una vez establecido que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos, interesó establecer expresiones operativas que permitan calcular el campo creado por algunos tipos de corriente. Lógicamente, después de la experiencia de Oersted, el primer caso que se estudió fue la corriente rectilínea.

1. Campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida.

El resultado de la experiencia de Oersted indica que el campo magnético producido por una corriente rectilínea es perpendicular a dicha corriente. Además, el magnetismo natural muestra que las líneas de fuerza son cerradas en todas las experiencias. Por lo tanto, teniendo en cuenta la geometría de la situación, es lógico plantear que las líneas del campo deben ser circunferencias contenidas en planos perpendiculares a la corriente y con el centro en el conductor. La veracidad de esta hipótesis se puede comprobar sencillamente colocando una brújula en diversas posiciones alrededor de la corriente.



Se constata también que el sentido de las líneas del campo magnético verifica respecto del de la corriente la llamada regla de la mano derecha o de cualquier rosca (como la de un tornillo o un sacacorchos), que ilustra el dibujo adjunto. Esta regla tiene en cuenta que, como es lógico, si se invierte el sentido de la corriente eléctrica, también se invierte el sentido de circulación del campo magnético.

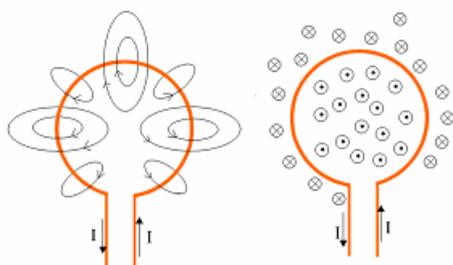
En cuanto al valor de la inducción magnética del campo creado por una corriente rectilínea, viene determinada por:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Esta expresión se conoce como ley de Biot (1774-1882) y Savart (1791-1841). Dice que la inducción magnética es proporcional a la intensidad de corriente, I , que recorre el conductor, e inversamente proporcional a la cantidad $2 \cdot \pi \cdot r$, lo que indica que el campo se va debilitando al alejarnos de dicho conductor como si se repartiera en circunferencias de radio r . La inducción magnética además depende del medio, representado por la constante μ o permeabilidad magnética.

2. Campo magnético creado por una espira

Tiene particular interés establecer la forma de las líneas del campo magnético creado por una espira recorrida por una corriente eléctrica. Para hacerlo, sirven las conclusiones obtenidas acerca del campo magnético creado por un conductor rectilíneo, ya que, aunque la espira tenga forma curvilínea, podemos razonar tomando pequeños trozos del conductor y



asimilándolos a conductores muy pequeños casi rectilíneos. Aplicando este razonamiento se han representado en el dibujo de la izquierda las líneas del campo creado por una espira circular de radio R , mientras que en el dibujo de la derecha se representa dicho campo simbólicamente en el plano de la espira, mediante puntos y aspas. Un punto indica que ahí el campo se dirige hacia nosotros y un aspa indica que ahí el campo lo hace hacia dentro del plano.

Resulta muy instructivo considerar expresamente a la espira como un imán. Así, la cara de la espira que mira hacia nosotros corresponde al polo norte de dicho imán (por ahí emergen, desde la espira, líneas del campo magnético), mientras que la cara opuesta (detrás) corresponde al polo sur del imán (por ahí entran al plano de la espira las líneas del campo magnético).

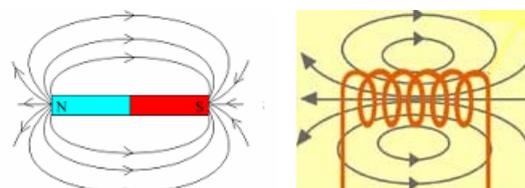
En cuanto al valor de la inducción magnética, es diferente en cada punto que rodea a la espira y en el punto medio de ella se calcula con la expresión:

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot R}$$

3. Campo magnético creado por un solenoide

El estudio de la espira, asimilándola a un imán, sugiere dar un paso más en el diseño del dispositivo de corriente se asemeje a un imán natural de geometría rectangular. Dicho paso consiste en multiplicar el número de espiras arrollando el conductor una y otra vez. El resultado se denomina solenoide o bobina.

Las líneas del campo magnético que produce el solenoide siguen un comportamiento similar a las del campo que produce una sola espira, sólo que ahora no se pueden curvar para salir y volver a entrar en la bobina, hasta que llegamos al extremo del arrollamiento. Tal como enseñan los dibujos adjuntos, la consecuencia de ello es que el

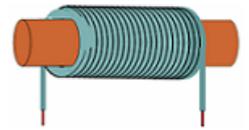


solenoides genera un campo magnético, cuyas líneas en el exterior son muy semejantes a las del imán rectangular.

Por otra parte, en el interior las contribuciones al campo magnético de cada una de las espiras se refuerzan y proporcionan un campo magnético de líneas prácticamente paralelas y equidistantes, por lo tanto uniforme. En puntos suficientemente alejados de los extremos, el valor de la inducción magnética es proporcional a la intensidad de la corriente que circula por las espiras, I , a la permeabilidad magnética del medio, μ , y a la densidad lineal de espiras (es decir, al número de espiras, N , por unidad de longitud, L):

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{L}$$

Como el campo magnético depende del medio, con objeto de aumentar aún más su intensidad se puede incluir en el interior del solenoide un pedazo de hierro dulce. La permeabilidad magnética de este material es muy elevada y así se consigue un imán de inducción controlable (modificando la intensidad de la corriente) e intensa. Se denomina electroimán.



Los ejemplos expuestos, muestran que, con diseños de corrientes eléctricas adecuados, se pueden producir campos magnéticos de geometría e intensidad controlables. En relación con estos conceptos, Ampere (1775-1836) obtuvo en 1826 una relación general entre la intensidad de corriente eléctrica que pasa por un hilo y el campo magnético que produce. Posteriormente la corrigió Maxwell (1831-1879) y la incluyó en un conjunto de cuatro ecuaciones (ecuaciones de Maxwell) que fundamentan la teoría electromagnética clásica. En otro documento, disponible en la Web, se puede consultar la ley de Ampere y su aplicación para deducir las expresiones que calculan el campo magnético de algunos tipos de corriente.

ESTRUCTURA ATÓMICA Y MAGNETISMO

Cuando se descubrió que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos, se abrió el camino a la interpretación del magnetismo natural, puesto que, como es lógico, se pensó que éste también debía estar asociado al desplazamiento de cargas en el interior de los imanes. A partir de esta idea inicial, el modelo explicativo del magnetismo natural ha ido evolucionando conjuntamente con la evolución de las teorías sobre la Estructura interna de la materia.

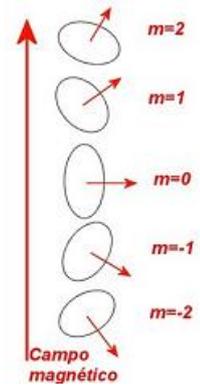
Haremos aquí una interpretación simplificada con referencia al modelo actual mecano-cuántico del átomo. Dicho modelo atribuye a los electrones en el átomo propiedades magnéticas por dos motivos:

- En primer lugar, considera que los electrones en su movimiento dentro del átomo, aunque no se les puede atribuir una órbita definida, equivalen a una corriente eléctrica y, por tanto, producen un campo magnético. En 1896 Zeeman (1865-1943) y Lorentz (1853-1928) pusieron en evidencia este hecho cuando comprobaron que la acción de un campo magnético exterior produce en el átomo un desdoblamiento de las líneas espectrales asociadas a cada tipo de orbital, s , p , d o f (efecto Zeeman).

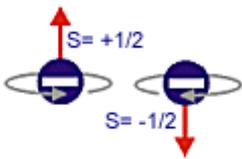
El tercer número cuántico, o número cuántico magnético, m , se introdujo para dar cuenta de este hecho y puede tomar un número impar de valores, correspondientes a las diferentes orientaciones que puede adoptar el campo magnético de cada tipo de orbital cuando se ejerce sobre el átomo un campo magnético externo. La figura adjunta (a la derecha)

recuerda los desdoblamiento del subnivel para $l=2$, u orbital de tipo d . En este caso, m , puede tomar cinco valores, desde $-l$ hasta $+l$ ($-2, -1, 0, 1, 2$), lo que implica que hay que considerar 5 orbitales de tipo, d , y otras tantas orientaciones del pequeño imán a que equivalen.

- Adicionalmente, el modelo cuántico del átomo considera al electrón en sí mismo como un objeto no puntual que produce campo magnético. Cada uno de los dos electrones que pueden conformar un orbital sólo puede tener una entre dos orientaciones magnéticas opuestas. Este efecto es más intenso que el anterior.



Este hecho se puso en evidencia cuando se observó un segundo desdoblamiento de las líneas espectrales que produce un doblete (dos líneas) para cada orbital (efecto Zeeman anómalo). El estudio de estos dobletes indujo en 1925 a Uhlenbeck (1900-1988) y Goudsmit (1902-1978) a introducir el cuarto número cuántico, o espín, s , que puede tomar dos valores ($+1/2$ o $-1/2$).



Así pues, el electrón, en el átomo, se ha de considerar como un pequeñísimo imán. Para dar cuenta de esta cualidad se introdujo la magnitud **momento magnético**, un vector que, en presencia de un campo magnético externo se relaciona con el momento de fuerza tras la reorientación de ambos vectores (el momento magnético del electrón y el campo externo aplicado). Teniendo en cuenta lo expresado unas líneas más arriba, se considera un **momento magnético orbital** y un **momento magnético de espín**.

Poco después de conocerse el efecto magnético del electrón en el átomo, se puso de manifiesto que tenían un momento magnético no nulo otras partículas (por ejemplo el protón) y agrupaciones de ellas (por ejemplo, el núcleo atómico). Finalmente, se dio un paso más, concluyendo que el momento magnético de espín es una propiedad intrínseca o fundamental de las partículas, como lo es la masa o la carga eléctrica.

EXPLICACIÓN DEL MAGNETISMO NATURAL I.

Tipos de sustancias

Partiendo de la relación entre estructura atómica y magnetismo, lo primero que requiere explicación es el motivo de que la mayoría de sustancias no presenten comportamiento magnético, a pesar de que en todas ellas existen innumerables y pequeñísimos imanes. Lógicamente, ello es debido a que los campos magnéticos elementales normalmente se contrarrestan. Podemos verlo al considerar que el campo magnético global de un átomo es igual a la suma vectorial de todos los campos magnéticos que aportan sus componentes individuales, principalmente los electrones. Si el átomo tiene sus orbitales electrónicos completamente llenos el campo magnético de todos los electrones se cancela, porque los valores de espín de cada pareja que forma un orbital son opuestos. El razonamiento es extensible a la mayoría de materiales, aunque tengan una estructura más compleja que una meramente atómica (por ejemplo, sustancias moleculares, macromoléculas, etc.), puesto que los electrones de enlace en estas sustancias también forman orbitales (en este caso, orbitales moleculares).

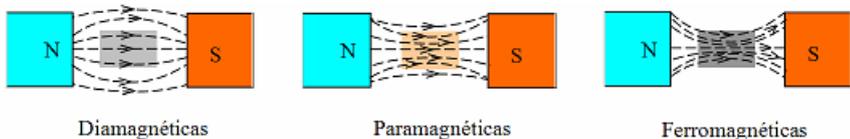
La aplicación en sentido opuesto del razonamiento lleva plantear que en algunas sustancias, los átomos o agrupaciones de ellos más o menos complejas, deben estar orientados de tal forma que los efectos magnéticos individuales se

refuerzan en lugar de anularse. Esta configuración es posible porque los átomos con orbitales electrónicos semi-llenos sí tienen un momento magnético distinto de cero (y cuya intensidad depende del número de electrones desapareados o impares). Por regla general, ello no implica actividad magnética, porque los campos magnéticos de diferentes átomos en la mayoría de los casos se siguen cancelando entre sí. Sin embargo, existen unos pocos materiales (es el caso de la magnetita) que tienen una estructura atómico-molecular especial, en la que los campos magnéticos de nivel atómico se orientan en la misma dirección y, por tanto, se refuerzan. El valor del campo magnético puede así variar sobre unos márgenes muy amplios y para indicar estos órdenes de magnitud se adopta como referencia el valor de la permeabilidad magnética del material, comparada con su valor en el aire o el vacío ($\mu' = \mu_{\text{material}} / \mu_{\text{vacío}}$).

PERMEABILIDAD MAGNÉTICA RELATIVA DE ALGUNAS SUSTANCIAS			
Diamagnéticas ($\mu' < 1$)		Paramagnéticas ($\mu' > 1$)	
Cobre	0'999991	Platino	1'000036
Bismuto	0'999824	Aluminio	1'000023
		Ferromagnéticas ($\mu' \gg 1$)	
		Hierro	300.000
		Níquel	300

De acuerdo con este criterio, las sustancias o los materiales se clasifican en tres grandes grupos, reseñados en la tabla adjunta.

La capacidad que tiene un medio dado, de transmitir la interacción magnética también se puede relacionar con la densidad de líneas del campo magnético que atraviesa dicho medio. Dicha densidad es mayor si la sustancia transmite bien el campo magnético. En este caso, también es mayor el flujo de líneas de dicho campo magnético a través de cualquier superficie perpendicular a dichas líneas. Así, cuando se intercala una sustancia diamagnética (la mayoría) entre los polos de un imán, el campo magnético se debilita (las líneas de fuerza se separan), si se coloca una sustancia paramagnética, se refuerza



ligera (las líneas se juntan) y si se trata de una sustancia ferromagnética, las se refuerza de forma considerable (las líneas se aprietan fuertemente).

En resumen, el magnetismo es una propiedad general de la materia y se manifiesta con mayor o menor intensidad dependiendo de la estructura de cada material. En el contexto de la física clásica decimos que esta estructura puede favorecer que los campos magnéticos elementales generados por las corrientes eléctricas de nivel atómico se refuercen o provocar que se compensen entre ellas. En el marco de la física cuántica actual, es más correcto decir que la estructura puede favorecer que los momentos magnéticos de los componentes individuales se sumen o se contrarresten.

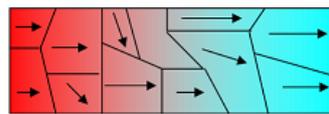
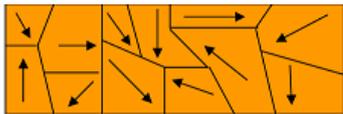
Valores de la inducción magnética	(T)
Sala blindada magnéticamente	10^{-14}
Espacio interestelar	10^{-10}
Campo magnético terrestre	10^{-4}
Imán potente	0.1-0.5
Electroimán industrial	1-2
Imán superconductor	5
Estrella de neutrones	10^8

Como resultado de ello, el valor de la inducción magnética, **B**, puede variar entre márgenes muy amplios, tal como refleja la tabla adjunta.

Imantación

Otro hecho del magnetismo natural pendiente de justificar es el proceso que hace que algunos metales, como el hierro o el cobalto, se conviertan en imanes temporales, cuando interaccionan con un imán natural permanente. Acerca de este hecho, en 1907 Weiss (1865-1940) se dio cuenta de que la estructura interna de estos metales se puede considerar formada por zonas ya imantadas a las que se llamó dominios magnéticos. Posteriormente, se ha comprobado la veracidad de esta hipótesis y que cada dominio magnético lo constituye un grupo considerable de átomos (del orden del trillón), alrededor de los cuales circulan corrientes eléctricas que producen campos magnéticos de la misma orientación.

Tal como indica el dibujo adjunto (a la izquierda), los dominios normalmente están orientados al azar y, por eso, habitualmente el efecto magnético global en un pedazo de hierro o de cobalto es casi nulo. Sin embargo, cuando se les aplica un campo magnético externo, los dominios (en definitiva, pequeños imanes), se orientan en la dirección de ese



campo magnético aplicado. Sus campos magnéticos se refuerzan y producen un campo magnético global que a su vez refuerza a dicho campo externo (figura de la derecha).

Precisamente éste es el efecto que se persigue al construir un electroimán: El campo magnético ejercido por la bobina orienta los dominios del pedazo de hierro insertado dentro de ella. Dicho pedazo de hierro ejerce entonces un campo magnético intenso, que se suma al de la bobina.

Polos magnéticos

Otra cuestión del magnetismo natural que requiere explicación es el hecho de que no se puedan separar los polos de un imán. Una forma de explicarlo se basa en imaginar a cualquier imán natural con una estructura equivalente a la de un conjunto de espiras elementales, todas ellas orientadas igual. Si se considera individualmente cualquiera de estas espiras, una de sus caras actúa como polo norte de ese pequeño imán y la cara opuesta actúa como polo sur. Esas mismas espiras agrupadas forman un único gran imán en el que un extremo actúa como polo norte y el otro como polo sur, como ocurre en un solenoide. Por tanto, si aceptáramos que un imán natural tenga una estructura interna así, al dividirlo en pedazos, cada pedazo mantendrá esa misma estructura, por lo que seguirá siendo un imán.

Con este razonamiento, se descarta la idea de existencia de polos magnéticos aislados. Sin embargo, desde la perspectiva actual aportada por la física cuántica, el asunto es bastante más complejo. En este marco teórico, en lugar de considerar pequeñas corrientes, se han de contabilizar las contribuciones del momento magnético aportado por cada electrón desapareado o, más en general, por cada partícula con un momento magnético no nulo. En principio se podría pensar que esto no modifica la esencia del razonamiento, puesto que toda partícula de momento magnético no nulo es básicamente imán, con sus correspondientes polo norte y polo sur, identificables a partir de la orientación de su momento magnético. Sin embargo, al desarrollarse la física cuántica se vio la conveniencia de considerar la posible existencia de **monopolos magnéticos**, algo que, en este contexto es aceptable desde un punto de vista teórico. Dirac (1902-1984), en 1931 fue el primero que planteó esta hipótesis, cuando propuso que deberían existir partículas con las propiedades de



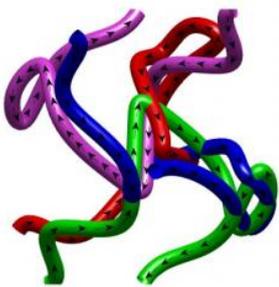
un imán con un solo polo magnético y las describió asociadas a una líneas solenoidales, algo así como bobinas en forma de tubo que llevan el flujo magnético. Estas líneas, llamadas **cuerdas de Dirac** se extenderían hacia el infinito o conectarían con monopolos de carga opuesta. El concepto le resultaba necesario para explicar el hecho de que la carga eléctrica está cuantizada (es múltiplo de una cantidad

elemental) y también para poder escribir las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo de forma completamente simétrica ante un intercambio de las cargas magnéticas y eléctricas.

Los experimentos dedicados a encontrar evidencia experimental de los monopolos magnéticos en la forma como los propuso Dirac dieron durante tiempo resultado negativo. Pero, recientemente, se propuso la búsqueda de tales monopolos magnéticos en una clase de sistemas magnéticos "frustrados" llamados hielos de spin (sus átomos tienen una distribución similar a la que tienen los átomos en el hielo común). Estos monopolos no tendrían existencia fuera del material magnético, sus cargas serían menores que las de Dirac y sus cuerdas asociadas deberían ser observables.

Partiendo de estas premisas, en los años recientes se ha producido una eclosión de trabajos que aseguran que dos grupos de investigación independientes han obtenido resultados alentadores en el intento de confirmar la aparición de estos monopolos magnéticos. Enumeramos de forma escueta y meramente aproximativa algunos aspectos de una parte de estos trabajos:

- La primera condición es utilizar un material adecuado, que se comporte como un "hielo de espín". Se ha utilizado titanato de disprosio ($Dy_2Ti_2O_7$), que se comporta así a temperaturas por debajo de 1K (aproximadamente $-272^\circ C$).



- Usando esta sustancia, se ha aportado evidencia de la existencia de las cuerdas de Dirac de campo magnético y se ha comprobado que los momentos magnéticos del material se organizan de forma que dichas cuerdas forman una especie de espagueti magnético (representado artísticamente en la figura adjunta). Cuando un haz de neutrones atraviesa el material, dichos neutrones sufren distintas deflexiones dependiendo de los campos magnéticos que encuentran en su camino. Observando varios haces apuntados en distintas direcciones se reconstruye la distribución de campo magnético dentro del material.

- El tercer paso, consistió en aplicar un campo magnético externo con la intención de "peinar" dichas cuerdas, es decir, de estirarlas en una dirección. De esta manera se pretende reducir su densidad y promover la disociación de los monopolos que existen en sus puntas.

Conviene ser prudente en la interpretación de estos hallazgos. Los análisis realizados hasta el momento sobre estos trabajos parecen indicar que los "monopolos" detectados en el "hielo de espín" no son estrictamente partículas con un sólo polo magnético, sino variaciones en los patrones de los iones que forman los materiales. Bajo determinadas condiciones algunas regiones de los materiales usados sí se comportarían como monopolos magnéticos, pero todavía no se habría producido la detección directa de un monopolo magnético.

En la Web está disponible un documento que incluye los "abstract" de los artículos mencionados y los vínculos a los mismos.