

CAMPO MAGNÉTICO

Los puntos donde la fuerza de atracción de un imán es más intensa son sus extremos, que se denominan polos norte y sur. Un campo magnético muy familiar es el que afecta todo nuestro planeta y es generado indirectamente por la rotación de la Tierra alrededor de su eje. Los polos geográficos de la Tierra reciben el nombre opuesto al del polo magnético que se encuentra en su vecindad.

El polo norte geográfico se encuentra cercano al polo sur magnético, y recíprocamente. En el interior de la Tierra existe una región que contiene enormes cantidades de hierro y níquel a altas temperaturas y en estado líquido. La circulación de cargas en este material debido a la rotación de la Tierra genera por inducción magnética el campo magnético terrestre. Las brújulas, instrumentos que se emplean para orientación en el espacio sobre la superficie terrestre, tienen una aguja magnetizada que tiende a estar permanentemente alineada con la dirección norte-sur de los polos magnéticos terrestres.

La fuerza que mantiene a la aguja de la brújula alineada es más intensa cerca de los polos que en el ecuador, ya que el campo magnético más intenso se encuentra sobre los polos magnéticos. Existen únicamente dos tipos de polos magnéticos que, como se dijo, reciben los nombres de norte y sur, respectivamente. Los polos magnéticos del mismo tipo se repelen, en tanto que los polos de distinto tipo se atraen entre sí, un comportamiento análogo al de la carga eléctrica.

Campo Eléctrico

Una carga percibe los efectos de otras cargas sobre ella. Una de las posibles maneras de interpretar la fuerza eléctrica es considerar que cada carga produce a su alrededor un campo eléctrico. El campo eléctrico es análogo al campo gravitatorio. Considerando la gravedad en términos de campos, podemos decir que el campo gravitatorio de la Tierra se extiende hasta el infinito, y por lo tanto, todo el Universo detecta su presencia en mayor o menor grado. Somos atraídos hacia el centro de la Tierra porque estamos bajo la acción de su campo gravitatorio. Del mismo modo, una carga eléctrica pasa información a todo el Universo sobre su presencia a través de su campo eléctrico, que se extiende en todas direcciones hasta el infinito.

El campo gravitatorio de la Tierra se denomina $\mathbf{g}$, y su valor está dado por $\mathbf{g} = \mathbf{F}/m$. Notar que este no es el valor de la aceleración de la gravedad en la superficie de la Tierra, sino la fuerza por unidad de masa en cualquier punto de Universo. Tanto el campo eléctrico como el gravitatorio son magnitudes vectoriales, cuya dirección es la misma que la de la fuerza de interacción en el punto donde se desea calcular el campo.

El campo eléctrico está dado por $\mathbf{E} = \mathbf{F}/q$, y tiene unidades de fuerza por unidad de carga. Antes de la relatividad y las ecuaciones de Maxwell, se asumía que la interacción entre dos cargas era instantánea, pero hoy en día se sabe que toda información o influencia se propaga como máximo a la velocidad de la luz. Por lo tanto, aceptamos que el campo es la entidad que transmite la información sobre la presencia de la carga, a la velocidad de la luz. Esto indica que el campo tiene una existencia real, y no es sólo una manera cómoda de realizar los cálculos.

Cuando se dice que una carga eléctrica crea un campo eléctrico a su alrededor, no debemos pensar que un campo se puede encender y apagar. De hecho, campo y carga existen al mismo tiempo, y no se puede separar uno de otro. A partir de la ley de Coulomb, se puede obtener el módulo del campo de una carga puntual: $E = K q/r^2$. Las unidades de campo en el

SI (Sistema Internacional) son el N/C (newton sobre Coulomb), y el V/m (volt por metro). La conservación de la carga asegura que la carga no puede ser creada ni destruida, por lo que lo mismo se puede decir del campo eléctrico. Para calcular el campo eléctrico en un punto dado debido a la acción de varias cargas, se aplica el

principio de superposición, calculando el campo debido a cada una de las cargas por separado, y luego sumando los campos separados.

Por ejemplo, tenemos cuatro cargas dispuestas en los extremos de un cuadrado de lado igual a 1m, cada una con una carga de 1 Coulomb, y queremos calcular el valor del campo eléctrico en el centro de cuadrado. Se ve que la distancia de cada carga al centro del cuadrado es $(1/\sqrt{2})$ m. Por lo tanto, el valor del campo de cada carga en el centro será de

$(K/2)N/C$, y el campo total sobre el centro será de $2K N/C = 1,8 \times 10^{10} N/C$. Una forma de visualizar el campo eléctrico es usar líneas de fuerza. Las líneas de fuerza parten de una carga puntual, apuntando hacia la carga si esta tiene signo negativo, y viceversa. Para calcular el campo magnético en un punto en términos de líneas de fuerza, obtenemos su dirección como la tangente a la línea que pasa por el punto, con el campo apuntando en dirección de la línea; su módulo estará dado por la cantidad de líneas por unidad de área en la vecindad del punto.

En el caso de una carga puntual aislada, vemos que las líneas de fuerza se alejan radialmente del centro de cargas. La intensidad del campo disminuirá con el cuadrado de la distancia, puesto que un área rectangular dada, en la dirección de cada uno de sus lados, corta la mitad de líneas de fuerza si se aleja el doble. Por lo tanto, el área cuadrada arbitraria cortará un número de líneas cuatro veces menor.

Campo Magnético Terrestre

Alguna vez, todos hemos tenido la oportunidad de observar una brújula y advertir que la aguja en su interior siempre tiende a apuntar en una dirección determinada. Esta aguja está magnetizada, lo que indica que existe un campo magnético asociado a la Tierra. La observación de la aguja de una brújula manteniendo siempre la misma dirección por acción de una fuerza desconocida para él causó tal impresión en Einstein cuando este tenía apenas tres años de edad, que probablemente este evento fue el mayor responsable de su dedicación al estudio de los fenómenos físicos. Fue William Gilbert quién alrededor del año 1600, alentado por la Reina Elizabeth I de Inglaterra, de quién era médico personal, escribió el libro *De Magnete*, que trataba sobre los fenómenos magnéticos conocidos hasta entonces.

Fue en este libro que William Gilbert expuso su teoría de que la Tierra era un gigantesco imán, con el polo norte magnético próximo al polo sur geográfico y el polo sur magnético próximo al polo norte geográfico. Puede imaginarse que la Tierra contiene un gran imán permanente en su interior, o, según las investigaciones modernas, una gigantesca espira circular recorrida por una corriente muy grande a muchos kilómetros de profundidad en su interior, con el plano de esta espira desplazado unos $11,5^\circ$ en relación al plano del Ecuador. Las investigaciones geológicas recientes afirman que parte de la región central de la Tierra esta constituida por metales fundidos, principalmente hierro y níquel, y las corrientes eléctricas existentes dentro de esta región líquida serían las responsables de la existencia del campo magnético terrestre. No todos los cuerpos presentan la misma situación en lo que al campo magnético propio se refiere. La Luna posee un núcleo sólido y no posee campo magnético, en tanto que varios planetas del sistema solar, así como el Sol, presentan campo magnético propio.

Inclusive nuestra galaxia posee un campo magnético que, a pesar de ser pequeño en intensidad, resulta importante por el enorme volumen sobre el cual actúa. Uno de los objetivos científicos más importantes al enviar sondas espaciales interplanetarias de investigación y exploración, es el estudio de los campos magnéticos en el espacio y sobre las planetas y el Sol. El momento dipolar magnético terrestre es de $8,06 \times 10^{21}$ tesla .cm³.

Hace siglos que se estudia las variaciones del módulo, dirección y sentido del campo magnético terrestre en distintas regiones geográficas, dada su gran utilidad como guía de la navegación y exploración, tanto en el pasado como hoy en día. Para hacer mediciones del campo magnético terrestre, se utilizan los magnetómetros,

dispositivos que permiten medir campos magnéticos con gran precisión, aunque hasta una simple brújula permite obtener información sobre su dirección sobre el plano horizontal. En los últimos años se ha desarrollado el SQUID (dispositivo de interferencia cuántica superconductor), que se ha convertido en el más sensible detector de campos magnéticos en existencia. El campo magnético en la superficie terrestre varía tanto con la posición como en el tiempo. Por ejemplo, entre los años de 1580 y 1820 hubo una variación de 35° en la dirección del norte magnético. Las variaciones en el campo magnético de la Tierra también pueden ser causadas por variaciones de corrientes en la ionosfera o tempestades magnéticas causadas por la radiación solar, ya que una pequeña parte del campo magnético terrestre es producido por la ionosfera.

También se estudian los campos magnéticos existentes en el fondo de los océanos y principalmente en la Cordillera del Medio del Atlántico, una cordillera submarina en la que el magma del interior de la Tierra alcanza la superficie del fondo oceánico, depositándose a ambos lados de la cordillera. Este magma se solidifica al entrar en contacto con el agua y preserva dentro de sí un registro del campo magnético terrestre en diferentes épocas de su historia, al congelar la orientación de los dominios magnéticos al momento de su solidificación, por lo que aquellos retendrán una orientación preferencial en la dirección del campo magnético presente en ese momento.

Estudios de este tipo permitieron a los físicos descubrir que la polaridad del campo magnético de la Tierra se invierte aproximadamente cada millón de años. El campo magnético de la Tierra a gran distancia de su superficie sufre grandes distorsiones debidas principalmente a la existencia del viento solar, constituido por un plasma de electrones y núcleos atómicos de hidrógeno y helio expelidos por el Sol.

Ley de Ampère

Desde la antigüedad el Hombre ha conocido fuentes de campo magnético tales como los imanes naturales, que eran piedras de magnetita. Recién en el siglo pasado se iniciaron las investigaciones que llevaron a comprender el origen de los campos magnéticos. En 1820, Hans Christian Oersted descubrió accidentalmente que una corriente eléctrica circulando por un cable desviaba la aguja de una brújula. Apenas un mes después de esta observación, Jean Baptiste Biot y Félix Savart anunciaron sus resultados sobre mediciones de la fuerza que actúa sobre un polo magnético colocado en las proximidades de un cable recorrido por una corriente. André Marie Ampère mostró entonces que los elementos de corriente sufren una fuerza cuando están en presencia de un campo magnético exterior y que dos cables cerrados (llamados espiras) atravesados por corrientes ejercen fuerzas entre sí. Las observaciones llevaron a Ampère a concluir que las líneas de campo magnético eran siempre cerradas y rodeaban al cable.

En particular, mostró experimentalmente que las líneas de campo alrededor de un cable rectilíneo extenso son círculos centrados en el cable. Logró entonces formular su ley, que es relativamente simple y puede ser aplicada a cualquier trayectoria cerrada que rodea una corriente. La ley de Ampère tiene la siguiente expresión: donde I es la corriente y μ_0 una constante llamada permeabilidad del vacío. Este resultado, que es particularmente útil cuando tratamos con sistemas con gran simetría, es muy diferente del que se obtiene para la integral de línea de un campo eléctrico estático a lo largo de un camino cerrado, que siempre es cero. Vamos a calcular el campo magnético generado en el espacio por un cable rectilíneo infinito recorrido por una corriente I .

La ley de Ampère dice que la integral de línea del campo magnético sobre un camino cerrado que rodea el cable es proporcional a la corriente. Para el caso de un cable infinito, el camino más adecuado para elegir, por su simetría, es una circunferencia. Por la simetría de la situación, es obvio que el campo $\mathbf{B}$ es el mismo en cualquier punto de la circunferencia, para un radio fijo R . Aplicando la observación experimental de que las líneas de campo alrededor de un cable rectilíneo extenso son círculos centrados en el cable, y escogiendo $d\mathbf{z}$ con el mismo sentido que $\mathbf{B}$, la integral de línea sobre la circunferencia C resulta entonces $\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{z} = B \cdot 2\pi R$, donde R el radio de la circunferencia y varía de acuerdo con la posición en el espacio en la se desea calcular el campo magnético. Aplicando la ley de Ampère, resulta $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$

, con la dirección del campo como se indicó anteriormente en cada punto de la circunferencia C de radio R.

Vemos que se puede obtener el valor del campo magnético generado por un cable rectilíneo infinito con muy pocos cálculos usando la ley de Ampère. Si comparamos los cálculos necesarios para obtener el campo en la misma situación usando la ley de Biot–Savart y la de Ampère, se ve que Ampère consiguió transformar la primera a una forma mucho más simple y efectiva para aplicar a situaciones de alto grado de simetría. Años después de la formulación de la ley de Ampère, James Clerk Maxwell, expresando dicha ley en forma diferencial, observó que, en el caso en que las corrientes no fueran constantes, debía agregarse a la ley un término adicional. Este término es la llamada corriente de desplazamiento, y con su agregado, la ley de Ampère se transforma en la ley de Ampère– Maxwell, que es una de las cuatro ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo.

FUERZA

en física, cualquier acción o influencia que modifica el estado de reposo o de movimiento de un objeto. La fuerza es un vector, lo que significa que tiene módulo, dirección y sentido. Cuando sobre un objeto actúan varias fuerzas, éstas se suman vectorialmente para dar lugar a una fuerza total o resultante. Esta fuerza total que actúa sobre un objeto, la masa del objeto y su aceleración están relacionadas entre sí a través de la segunda ley de Newton, llamada así en honor al físico y matemático del siglo XVII Isaac Newton. Esta ley afirma que la aceleración que experimenta un objeto multiplicada por su masa es igual a la fuerza total que actúa sobre el objeto. Por tanto, si una fuerza igual actúa sobre dos objetos de diferente masa, el objeto con mayor masa resultará menos acelerado. Véase Mecánica.

Un objeto experimenta una fuerza cuando otro objeto lo empuja o tira de él. Por ejemplo, al empujar un triciclo parado se aplica una fuerza que hace que éste se acelere. Un objeto también puede experimentar una fuerza debido a la influencia de un campo de fuerzas. Por ejemplo, si se deja caer una pelota, ésta adquiere una aceleración hacia abajo debido a la existencia del campo gravitatorio terrestre; las cargas eléctricas se atraen o se repelen debido a la presencia de un campo eléctrico.

Generalmente, sobre un objeto actúan varias fuerzas a la vez. Si la suma de las mismas da lugar a una fuerza total nula, el objeto no se acelerará: seguirá parado o detenido o continuará moviéndose con velocidad constante. Por ejemplo, si una persona lo empuja con una fuerza de magnitud igual a la fuerza de rozamiento que se opone al movimiento del triciclo, las fuerzas se compensarán, produciendo una fuerza total nula.

Eso hace que se mueva con velocidad constante. Si la persona deja de empujar, la única fuerza que actúa sobre el triciclo es la fuerza de rozamiento. Como la fuerza total ya no es nula, el triciclo experimenta una aceleración, y su velocidad disminuye hasta hacerse cero. (Una aceleración negativa como ésta, en la que se reduce la velocidad, se conoce como deceleración).

En el Sistema Internacional de unidades, la fuerza se mide en newtons: 1 newton (N) es la fuerza que proporciona a un objeto de 1 kg de masa una aceleración de 1 m/s².

Las fuerzas que actúan entre las moléculas y los átomos también se conocen como interacciones. Véase Partículas elementales.