Electromagnetismo I

S12 - Magnetismo

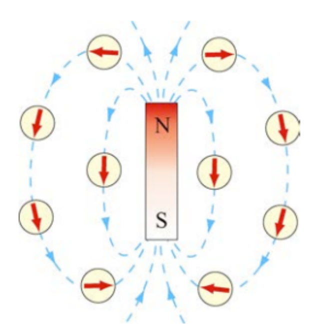
Josue Meneses Díaz

Universidad de Santiago de Chile

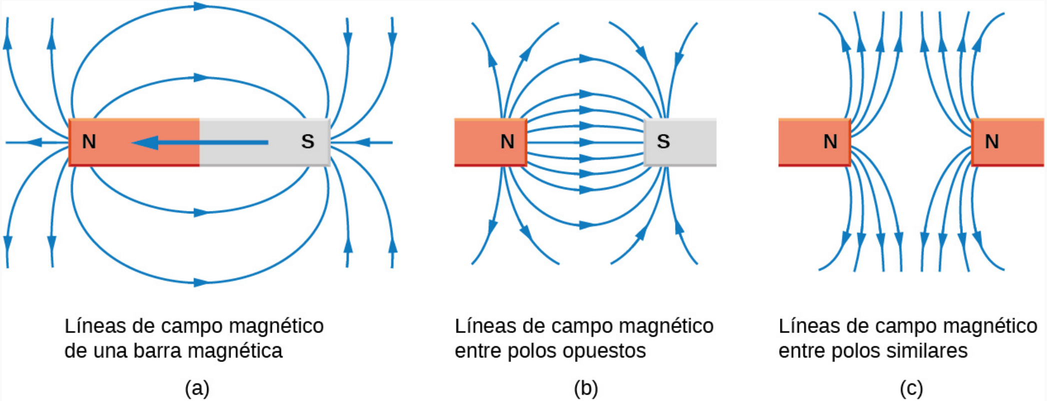
Magnetismo

En este capítulo, definiremos lo que entendemos por campo magnético y discutimos el efecto que el campo magnético tiene sobre las cargas eléctricas en movimiento. Posteriormente, consideramos la forma en que se producen los campos magnéticos.

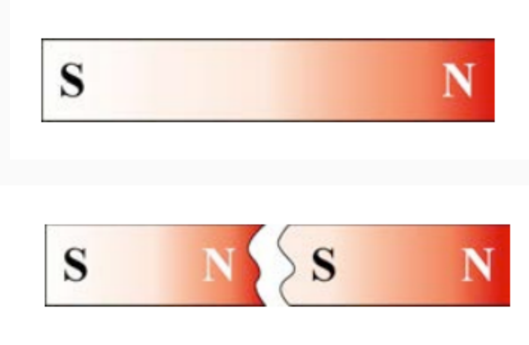
Hemos visto que un objeto cargado produce un campo eléctrico $\vec{E}$ en todos los puntos del espacio. De manera similar, una barra magnética es una fuente de un campo magnético $\vec{B}$. Esto se puede demostrar fácilmente moviendo una brújula cerca del imán. La aguja de la brújula se alineará a lo largo de la dirección del campo magnético producido por el imán.



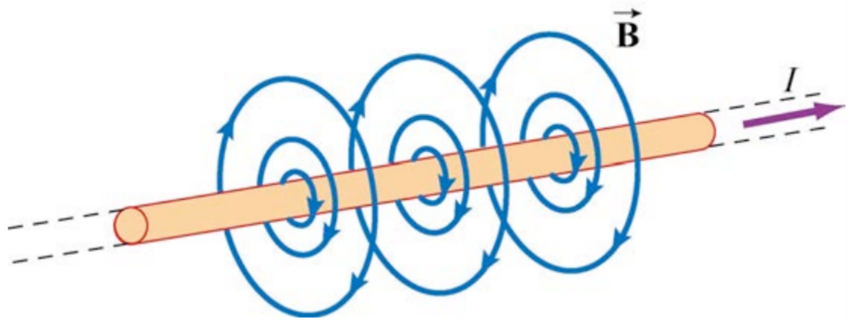
Una barra magnética consta de dos polos, que se designan como el norte (N) y el sur (S). Los campos magnéticos son más fuertes en los polos. Las líneas del campo magnético salen del polo norte y entran en el polo sur. Al sostener dos barras magnéticas cerca una de la otra, los polos similares se repelerán entre sí mientras que los polos opuestos se atraen



A diferencia de las cargas eléctricas, que se pueden aislar, los dos polos magnéticos siempre vienen en par. Cuando se rompe la barra magnética, se obtienen dos nuevos imanes de barra, cada uno con un polo norte y un polo sur. En otras palabras, los “monopolos” magnéticos no existen de forma aislada, aunque son de interés teórico.



Otra fuente familiar de campos magnéticos es el cable portador de corriente. En la figura se muestrael campo magnético asociado con un cable portador de corriente infinitamente largo. El campo magnético se envuelve en círculos alrededor del cable, con la dirección de rotación de los círculos determinada por la regla de la mano derecha (si el pulgar de su mano derecha está en la dirección de la corriente, sus dedos se curvarán en la dirección del campo magnético).



Las cargas eléctricas en movimiento generan **campos magnéticos**, con una configuración similar a la que se muestra en la Figura: círculos centrados en un eje definido por la **velocidad vectorial de la carga**. En el caso de un campo eléctrico $\vec{E}$, ya hemos visto que el campo se define como la fuerza por unidad de carga:

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

¿Cómo definimos el campo magnético $\vec{B}$?. Debido a la ausencia de monopolos magnéticos, $\vec{B}$ debe definirse de otra manera.

Definición de Campo magnético $\vec{B}$

Para definir el campo magnético en un punto P, consideremos una partícula con carga q, ubicada en el punto P, con velocidad $\vec{v}$. Mediante experimentos se ha determinado que:

1. La fuerza $\vec{F}_B$ en P sobre la partícula en P es perpendicular a la dirección de $\vec{v}$ en P.
2. Cuando variamos la dirección de la velocidad de la partícula, observamos que, para una dirección particular de $\vec{v}$, la fuerza $\vec{F}_B$ en P es cero.
3. Si variamos la dirección de $\vec{v}$ en P, de modo que se mueva perpendicularmente a $\vec{B}$, hasta que la magnitud de la fuerza $\vec{F}_B$ sea máxima, $F_{B,\text{max}}$. Definimos la magnitud del campo magnético en P, B, por

$$B = \frac{F_{B,\text{max}}}{|q||\vec{v}|}$$

Las observaciones anteriores se pueden resumir en la siguiente definición para el campo magnético en cualquier punto P . El campo causa una fuerza sobre una carga eléctrica en movimiento dada por

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

La unidad SI del campo magnético es el tesla (T),

$$1 \text{ Tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \text{m/s}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

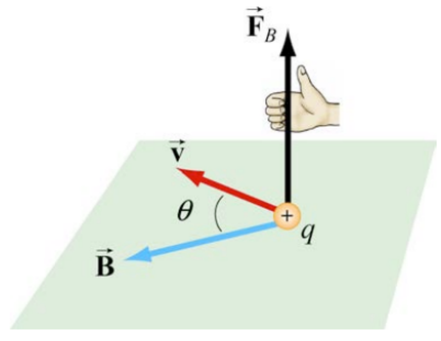
Otra unidad no SI comúnmente utilizada para $\vec{B}$ es el gauss (G), donde $1T = 10^4$ G .

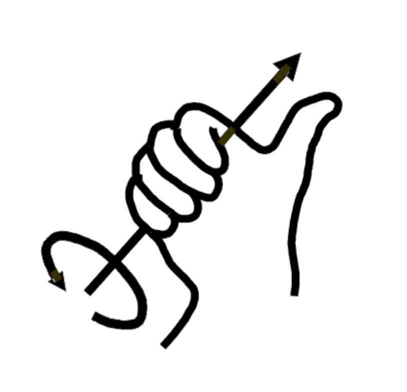
En la presencia de ambos campos $\vec{B}$ y $\vec{E}$, la fuerza total que actúa sobre una partícula en movimiento con carga q es

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_B = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}),$$

donde $\vec{v}$ es la velocidad de la partícula. La dirección de $\vec{F}_B$ involucra el producto cruzado de $\vec{v}$ y $\vec{B}$, basado en la regla de la mano derecha.

Regla de la mano derecha





Diferencia entre fuerza eléctrica y magnética

- La fuerza eléctrica actúa **a lo largo de la dirección del campo eléctrico**, mientras que la fuerza magnética **actúa perpendicularmente a éste**.
- La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula cargada sin importar si ésta se encuentra en movimiento, mientras que la fuerza magnética actúa sólo cuando la partícula está en movimiento.
- La fuerza eléctrica realiza trabajo al desplazar una partícula cargada, en tanto que la fuerza magnética no efectúa trabajo cuando se desplaza una partícula, debido a que la fuerza es perpendicular al desplazamiento.

Sin embargo, la dirección de $\vec{v}$ puede ser alterada por la fuerza magnética, como veremos a continuación.

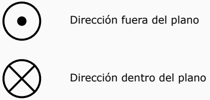
Consejos para la resolución de problemas

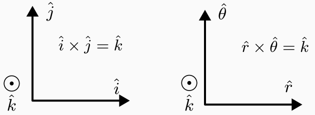
En coordenadas cartesianas, el producto vectorial (cruz) asociado con el cáculo $\vec{v} \times \vec{B}$ de la fuerza de Lorentz y los vectores unitarios $\widehat{i}$, $\widehat{j}$ y $\widehat{k}$ satisfacen las siguientes propiedades:

$$\widehat{i} \times \widehat{j} = \widehat{k}, \quad \widehat{j} \times \widehat{k} = \widehat{i}, \quad \widehat{k} \times \widehat{i} = \widehat{j}$$

$$\widehat{j} \times \widehat{i} = -\widehat{k}, \quad \widehat{k} \times \widehat{j} = -\widehat{i}, \quad \widehat{i} \times \widehat{k} = -\widehat{j}$$

$$\widehat{i} \times \widehat{i} = \widehat{j} \times \widehat{j} = \widehat{k} \times \widehat{k} = \vec{0}.$$





Para $\vec{v} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} + v_z\hat{k}$ y $\vec{B} = B_x\hat{i} + B_y\hat{j} + B_z\hat{k}$, el producto cruzado se puede obtener como

$$\vec{v} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \left(v_y B_z - v_z B_y\right)\hat{i} + \left(v_z B_x - v_x B_z\right)\hat{j} + \left(v_x B_y - v_y B_x\right)\hat{k}.$$

Si solo está presente el campo magnético y $\vec{v}$ es perpendicular a $\vec{B}$, entonces la trayectoria es un círculo con un radio $r = \frac{mv}{|q|B}$, y una velocidad angular $\omega = \frac{|q|B}{m}$.

Al tratar con un caso más complicado, es útil trabajar con los componentes individuales de la fuerza. Por ejemplo,

$$F_x = ma_x = qE_x + q(v_y B_z - v_z B_y).$$

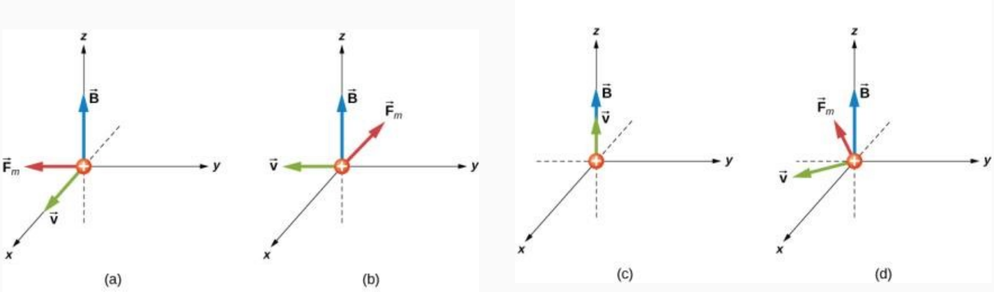
Trabajo realizado por $\vec{B}$

Observa que $\vec{F}_B$ siempre es perpendicular a $\vec{v}$ y $\vec{B}$, y no puede cambiar la velocidad v de la partícula (y por lo tanto, su energía cinética). En otras palabras, la fuerza magnética no puede acelerar ni desacelerar una partícula cargada. Consecuentemente, $\vec{F}_B$ no puede realizar trabajo sobre la partícula,

$$dW = \vec{F}_B \cdot d\vec{s} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v}\, dt = q(\vec{v} \times \vec{v}) \cdot \vec{B}\, dt = 0.$$

Ejemplo

Encontrar la fuerza en cada uno de los casos mostrados en la figura



Ejemplo

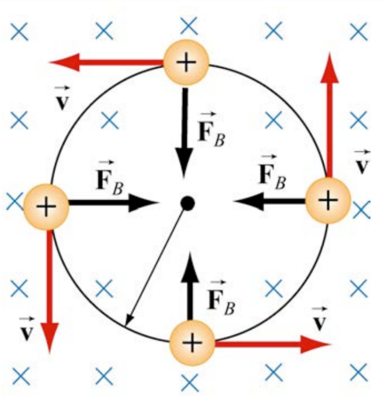
Una partícula alfa tiene una velocidad de $\vec{\nu} = (3\hat{i} + 5\hat{j} - 9\hat{k})$ [m/s] dentro de un campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = (3\hat{i} - 20\hat{j} + 5\hat{k})$ [μ T]. ¿Cuál es la fuerza que siente la partícula alfa?.

Movimiento de una partícula cargada en un campo magnético uniforme

Consideremos el caso especial de una partícula con carga positiva que se mueve en un campo magnético uniforme, estando el vector de velocidad inicial de la partícula perpendicular al campo magnetico $\vec{B}$.

Si una partícula de masa m es colocada en se mueve en un círculo de radio (r) a una velocidad constante (v), debe haber una fuerza radial actuando sobre la partícula que siempre apunta hacia el centro y es perpendicular a la velocidad de la partícula.

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} = qvB(-\hat{i})$$



Dado que $\vec{F}_B$ no puede realizar trabajo, solo puede cambiar la dirección de $\vec{v}$ pero no su magnitud. Si la fuerza es siempre perpendicular a la velocidad, la trayectoria de la partícula es un círculo

$$\sum F = ma$$

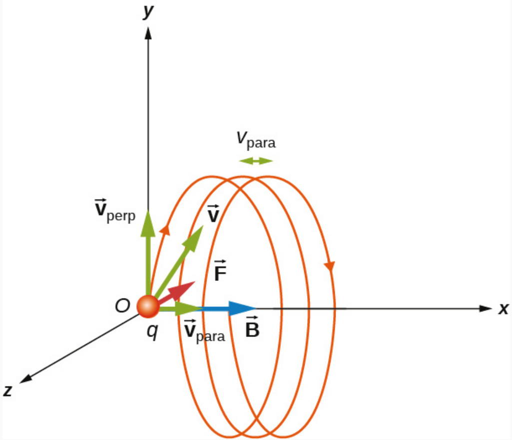
$$qvB = m\frac{v^2}{r}$$

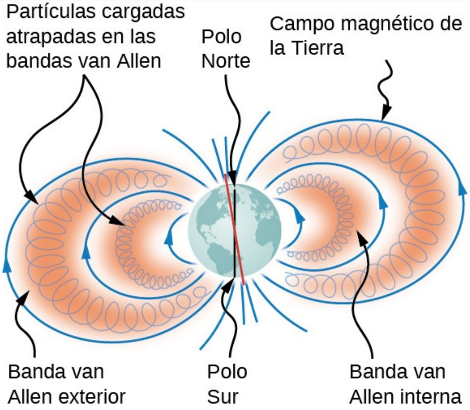
$$r = \frac{mv}{qB}$$

con r es el radio de giro. El periodo y la velocidad angular de la partícula son

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{qB}{m}$$




Partículas cargadas
atrapadas en las
bandas van Allen
Polo
Norte
Campo magnético de
la Tierra
Banda van
Allen exterior
Polo
Sur
Banda van
Allen interna

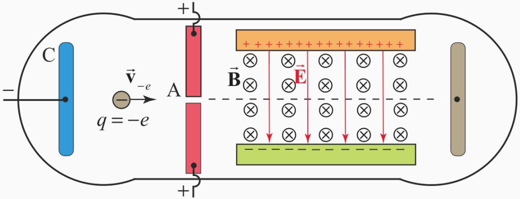
(a)

(b)

Ejercicios

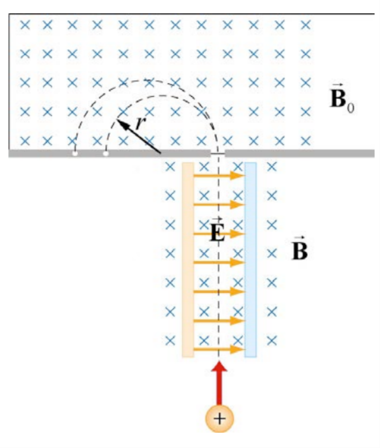
Ejemplo (Selector de velocidad)

Los electrones con carga $-e$ y masa m son emitidos desde el cátodo C y acelerados hacia la rendija A con diferentes velocidades en la dirección mostrada. Los electrones ingresan a una región con un campo eléctrico apuntando hacia abajo (de magnitud E) y un campo magnético (de magnitud B) que apunta hacia el plano de la figura. En este caso, podemos ignorar la gravedad. Los electrones que viajan en una trayectoria recta a través de la brecha entre las placas tienen una velocidad.



Ejemplo (Espectrometro de masa)

Se pueden utilizar varios métodos para medir la masa de un átomo. Una posibilidad es mediante el uso de un espectrómetro de masas. La característica básica de un espectrómetro de masas Bainbridge se ilustra en la Figura. Encontrar la expresión para encontrar la masa de la partícula que entra en el espectrómetro de masas.



Resumen

- La fuerza magnética que actúa sobre una carga q que viaja a una velocidad $\vec{v}$ en un campo magnético $\vec{B}$ se encuentra dada por:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- La fuerza sobre una partícula cargada q que viaja a una velocidad $\vec{v}$ ejercida por el campo eléctrico $\vec{E}$ y el campo magnético $\vec{B}$ es llamada fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Si una partícula con carga q y masa m entra en un campo magnético de magnitud B con una velocidad $\vec{v}$ perpendicular a las líneas del campo magnético, el radio de la trayectoria circular que sigue la partícula se da por:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \qquad \omega = \frac{|q|B}{m}$$

Referencia

Referencia

Freedman, Young, y S. Zemansky. 2009. «27 CAMPO MAGNÉTICO Y FUERZAS MAGNÉTICAS. 27.1 Magnetismo. 27.2 Campo Magnético. 27.4 Movimiento de Partículas Cargadas En Un Campo Magnético. 27.5 Aplicaciones Del Movimiento de Partículas Cargadas». En *Física Universitaria*.

Ling, Samuel J., y William Moebs. 2021. «CAPÍTULO 11 Fuerzas y Campos Magnéticos». En *Física Universitaria Volumen 2*. Vol. 2. OpenStax.

Serway, Raymond A., y John W. Jewett. 2005. «29 Campos Magnéticos. 29.1 Campos y Fuerzas Magnéticas. 29.2 Movimiento de Una Partícula Con Carga En Un Campo Magnético Uniforme. 29.3 Aplicaciones Del Movimiento de Partículas Con Carga En Un Campo Magnético.» En *Física Para Ciencias e Ingeniería Con Física Moderna*, 7ma ed. Vol. 2. CENGAGE learning.