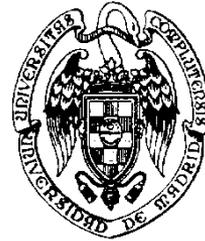


Prof. Maurizio Mattesini



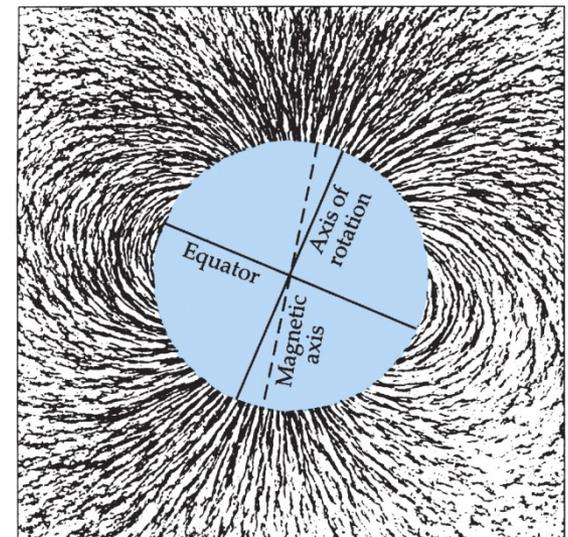
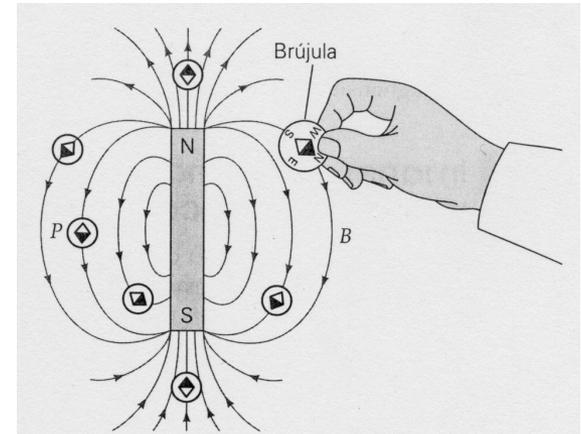
ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Capítulo 26

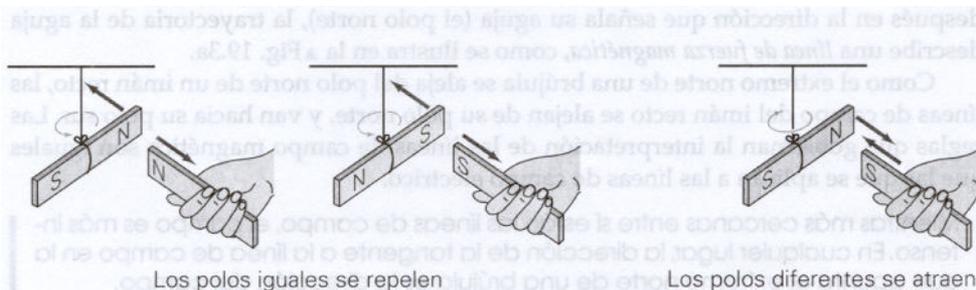
El campo magnético

Cronología del magnetismo

- Hace más de 2000 años que **los griegos** sabían que un cierto mineral (llamado ahora *magnetita*) tenía la propiedad de atraer piezas de hierro.
- En 1269, **Pierre Maricourt** descubrió que si una aguja se deja en distintas posiciones sobre un imán esférico, se orienta a lo largo de líneas que pasan por puntos situados en extremos opuestos de la esfera, llamados **polos del imán**.
- Posteriormente, muchos experimentadores observaron que todos los imanes, cualquiera sea su forma, poseen dos polos, llamados **polo norte** y **polo sur**. También se observó que los **polos iguales se repelen** entre sí y los **polos distintos se atraen** mutuamente.
- En 1660, **William Gilbert** descubrió que la **Tierra es un imán natural** con polos magnéticos próximos a los polos geográficos norte y sur. Como el polo norte de la aguja de una brújula apunta al polo sur de un imán, **lo que llamamos polo norte de la Tierra es realmente un polo sur magnético**.
- Aunque las **cargas eléctricas** y los **polos magnéticos** son semejantes en muchos aspectos, hay una diferencia muy importante: **los polos magnéticos siempre se presentan por pareja**. Hasta ahora no existe una evidencia concluyente sobre la existencia de un polo magnético aislado. Si se rompe un imán por la mitad, aparecen dos imanes cada uno con un polo norte y un polo sur.



Las líneas de campo salen del polo magnético norte, que está próximo al polo sur geográfico y entran en el polo magnético sur, que está próximo al polo norte geográfico.



Magnetita (Fe_3O_4)



La **magnetita** es un [mineral](#) de [hierro](#) constituido por [óxido](#) ferroso-diférrico (Fe_3O_4) que debe su nombre de la ciudad griega Magnesia. Su fuerte magnetismo a un fenómeno de **ferrimagnetismo**: los momentos magnéticos de los distintos cationes de hierro del sistema se encuentran fuertemente acoplados, por interacciones antiferromagnéticas, pero de forma que en cada [celda unidad](#) resulta un momento magnético no compensado. La suma de estos momentos magnéticos no compensados, fuertemente acoplados entre sí, es la responsable de que la magnetita sea un [imán](#).

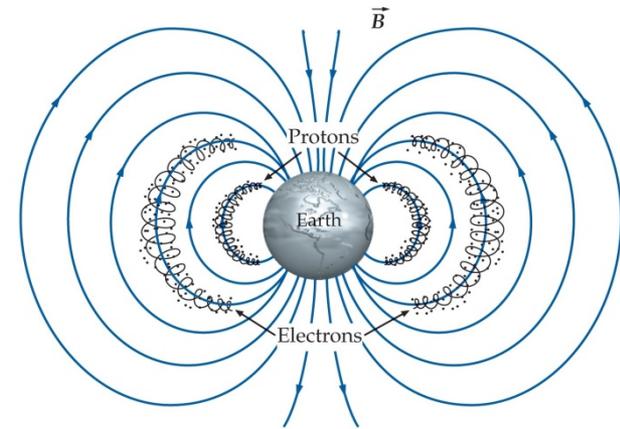
Auroras polares

Aurora australis (southern lights)- September 11, 2005



La **Aurora boreal o austral** surge cuando partículas cargadas (**flujo de plasma**) procedentes de las reacciones de fusión nuclear, que tiene lugar en el Sol (**viento solar**), son atrapadas por el campo magnético terrestre y empujadas hacia los **polos magnéticos**. La penetración en el atmósfera excita las partículas cargadas dando lugar a fenómenos de luminiscencias (**fluorescencia**) llamados **Auroras polares**.

Cinturones de Van Allen



26-1

Fuerza ejercida por un campo
magnético

Fuerza magnética (fuerza de Lorentz)

¿De dónde viene la fuerza magnética? Durante siglos, se atribuyeron las fuerzas de atracción de los imanes a fenómenos **sobrenaturales**.

Hoy, el magnetismo se asocia con la electricidad. Ambas cosas son en realidad distintos aspectos de una sola fuerza: **la fuerza electro-magnética**.

Aunque la **electricidad** y el **magnetismo** son manifestaciones de la misma fuerza fundamental, es instructivo considerarlas primero en forma individual, para después unir las en **electro-magnetismo**.

Cuando una carga q se mueve con velocidad \mathbf{v} en un campo magnético \mathbf{B} , la fuerza magnética \mathbf{F} que actúa sobre la carga es

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = qvB \sin\theta$$

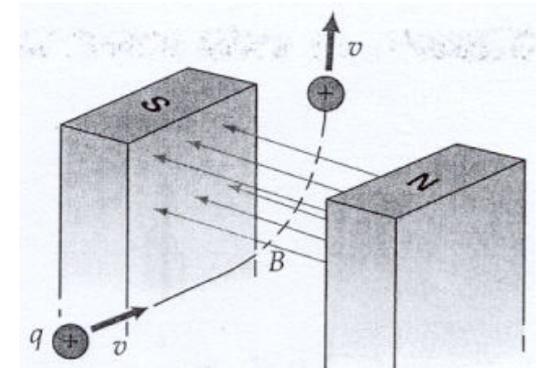
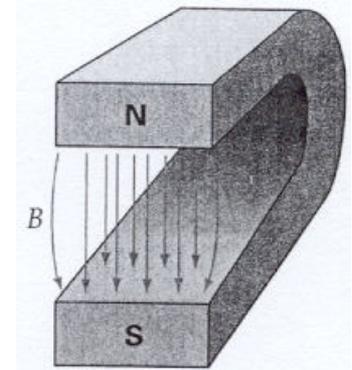
FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UNA CARGA MÓVIL

La fuerza magnética es cero cuando \mathbf{v} y \mathbf{B} son paralelos ($\theta=0^\circ$ o 180°). La fuerza alcanza su valor máximo cuando esos dos vectores son perpendiculares ($\theta=90^\circ$). Como \mathbf{F} es perpendicular a ambos, \mathbf{v} y \mathbf{B} , resulta ser perpendicular al plano definido por estos dos vectores. La dirección de $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ viene dada por **la regla de la mano derecha**.

La **unidad SI** del campo magnético B es el **tesla** (T), definido como *una carga de 1 C que se mueve con una velocidad de 1 m/s perpendicular a un campo magnético de 1 T, experimenta una fuerza de 1 N:*

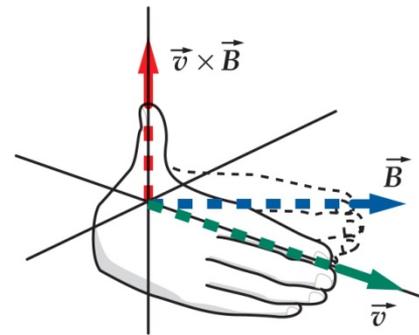
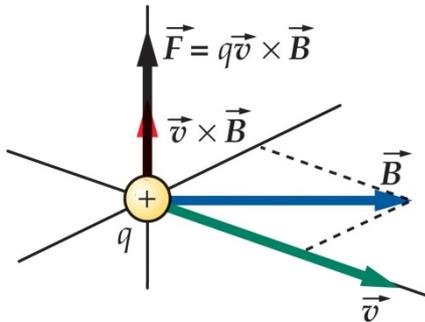
$$1T = 1 \frac{N}{Cm/s} = 1 N/A \cdot m$$

Una unidad usada corrientemente, deducida del sistema **cgs**, es el **gauss** (G), que está relacionada con el tesla por **$1G=10^{-4} T$** .



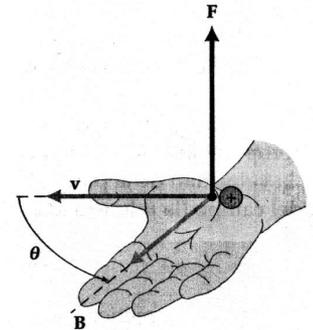
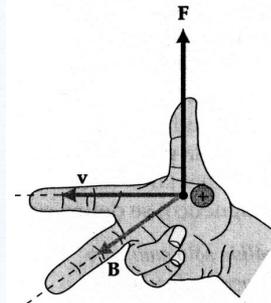
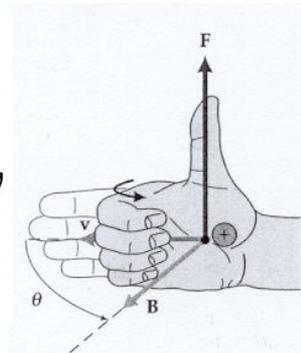
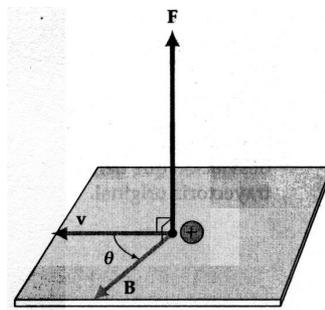
*Al entrar al campo, la partícula es **desviada** y adopta una trayectoria curva, que sería un arco circular si el campo fuera perfectamente uniforme.*

Regla de la mano derecha

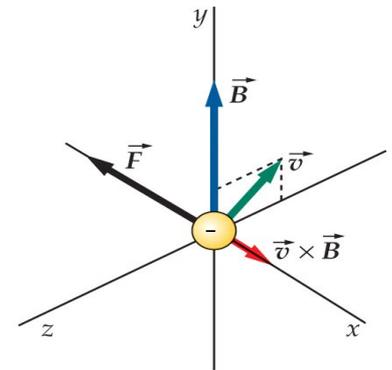
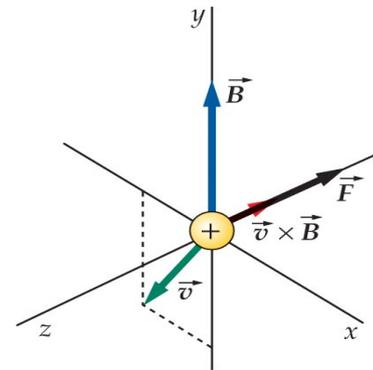
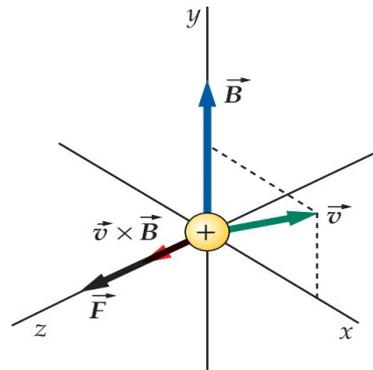


La *dirección* de la fuerza magnética sobre cualquier partícula cargada en movimiento se determina con la **regla de la mano derecha**:

Cuando los dedos de la mano derecha se apuntan en la dirección de la velocidad \mathbf{v} de una partícula cargada q , y se flexionan después (en el ángulo menor) hacia el vector \mathbf{B} , el pulgar extendido apunta en la dirección de la fuerza \mathbf{F} .



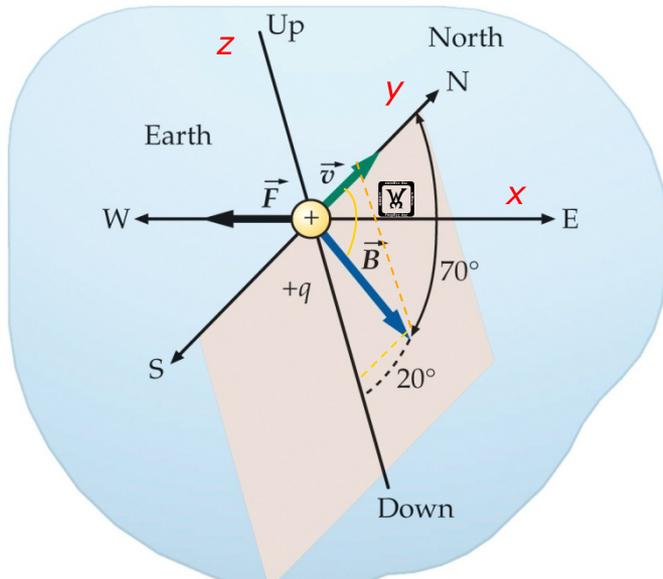
Si q es **positiva**, la \mathbf{F} tiene el mismo sentido que $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$. Independientemente de la regla empleada, siempre se debe recordar que **se invierte la dirección cuando la carga es negativa**.



Fuerza sobre un protón que se dirige hacia el norte

EJEMPLO 26.1

El campo magnético en un punto de la superficie de la Tierra tiene un valor de 0.6 G y está dirigido hacia abajo, en el hemisferio norte, formando un ángulo de 70° aproximadamente con la horizontal, como indica la figura[†]. Un protón ($q=+e$) se mueve horizontalmente en dirección norte con velocidad $v=10^7$ m/s. Calcular la fuerza magnética que actúa sobre el protón (a) utilizando $F=qvB \sin\theta$ y (b) expresando v y B en función de los vectores unitarios i, j, k y calculando $F=qv \times B$.



Planteamiento del problema: sea x e y las direcciones este y norte, respectivamente, y sea z la dirección hacia arriba. El vector velocidad está en la dirección y . Con la **regla de la mano derecha** podemos ver que la dirección de F es hacia el oeste (W).

(a) Calcular $F = qvB \sin\theta$ siendo $\theta = 70^\circ$

$$\begin{aligned} F &= qvB \sin 70^\circ \\ &= (1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(10^7 \text{ m/s})(0.6 \times 10^{-4} \text{ T})(0.94) \\ &= \boxed{9.02 \times 10^{-17} \text{ N}} \end{aligned}$$

[†]El módulo, dirección y sentido del campo magnético terrestre (c.m.t) varía de lugar a otro. Los datos que aquí se dan corresponden aproximadamente a la parte central de los Estados Unidos.

(b) 1. La fuerza magnética es el producto vectorial de $q\mathbf{v}$ por \mathbf{B} :

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

2. Expresar \mathbf{v} y \mathbf{B} en función de sus componentes:

$$\mathbf{v} = v_y \mathbf{j}$$

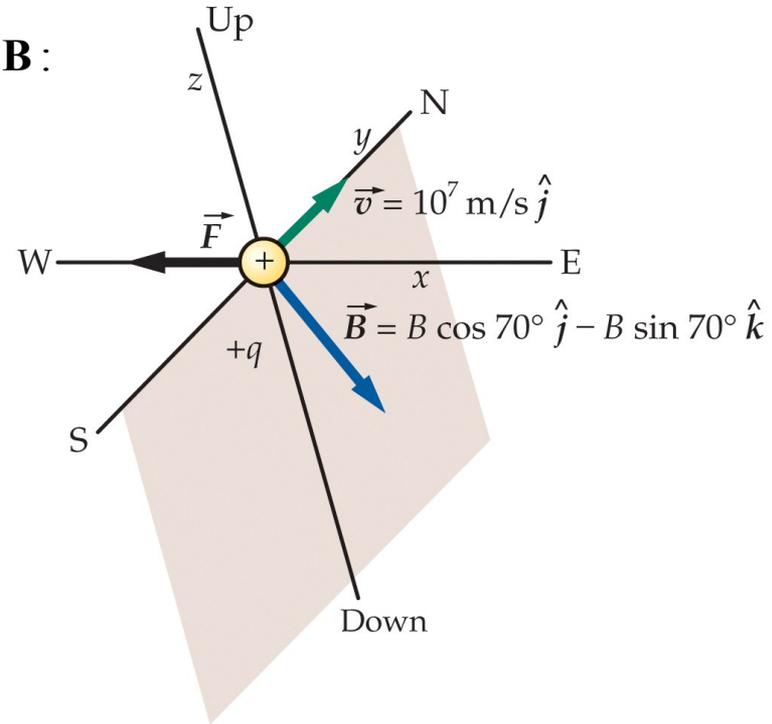
$$\mathbf{B} = B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}$$

3. Escribir $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ en función de estas componentes:

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = q(v_y \mathbf{j}) \times (B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k}) \\ &= qv_y B_y (\mathbf{j} \times \mathbf{j}) + qv_y B_z (\mathbf{j} \times \mathbf{k}) \\ &= 0 + qv_y B_z \mathbf{i}\end{aligned}$$

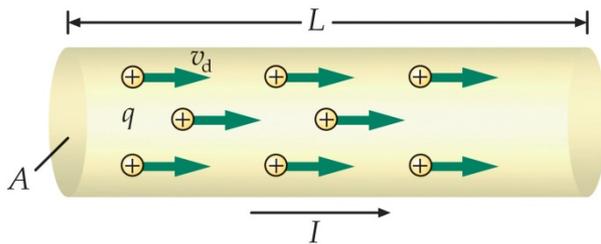
4. Hallar el valor de \mathbf{F} :

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= qv(-B \operatorname{sen} \theta) \mathbf{i} \\ &= -(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(10^7 \text{ m/s})(0.6 \times 10^{-4} \text{ T}) \operatorname{sen} 70^\circ \mathbf{i} \\ &= \boxed{-9.02 \times 10^{-17} \text{ N } \mathbf{i}}\end{aligned}$$



Observación: La dirección de \mathbf{i} es hacia el este, de modo que la fuerza está dirigida hacia el oeste como calculado en el apartado (a).

Fuerza magnética sobre un cable



Cuando por un cable situado en el interior de c.m. circula una corriente, existe una fuerza que se ejerce sobre el conductor que es la suma de las fuerzas magnéticas sobre las partículas cargadas cuyo movimiento produce la corriente.

La fuerza sobre cada carga es $q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$

El número de cargas en el interior del segmento es $n \cdot AL$, donde n es la carga por unidad de volumen y AL el volumen. Así pues la **fuerza total** sobre el segmento de cable es

$$\mathbf{F} = (q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B})nAL$$

Considerando que la corriente que circula por el hilo es

$$I = nqv_d A$$

Así pues, la fuerza puede escribirse en la forma

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

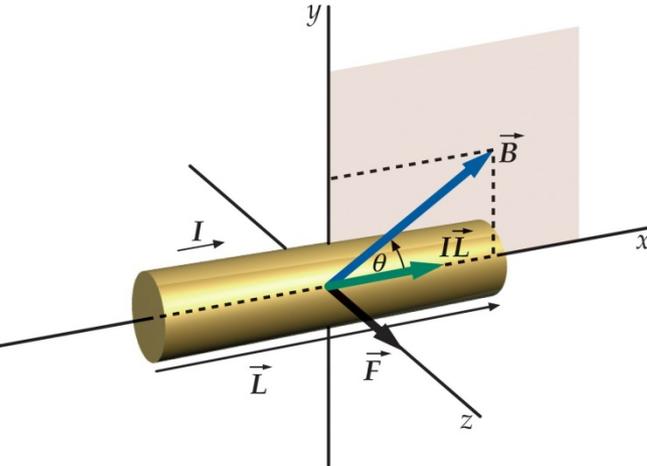
FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN SEGMENTO DE ALAMBRE PORTADOR DE CORRIENTE

en donde \mathbf{L} es un vector cuyo módulo es la longitud del hilo y cuya dirección es paralela a la corriente, en el mismo sentido. Se generaliza fácilmente la formula en el caso de un **conductor de forma arbitraria** en el interior de un campo magnético cualquiera:

$$d\mathbf{F} = Idl \times \mathbf{B}$$

FUERZA MAGNÉTICA SOBRE UN ELEMENTO DE CORRIENTE

En este caso, se halla la fuerza total integrando respecto a todos los elementos de corriente.

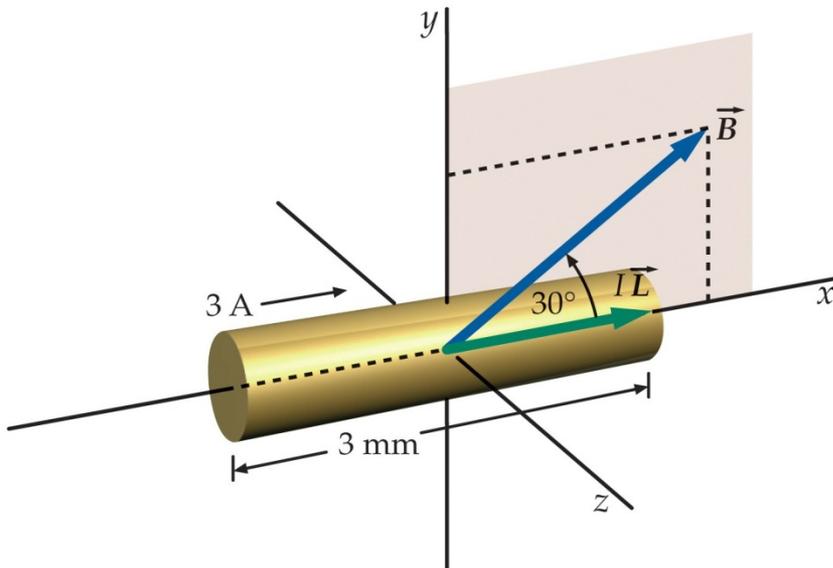


La corriente lleva la dirección x , y el campo magnético está en el plano xy y forma un ángulo θ con el eje x positivo. La fuerza \mathbf{F} está dirigida en el sentido positivo de z , perpendicular a ambos, \mathbf{B} y \mathbf{L} . Su módulo es $ILB \sin \theta$.

Fuerza sobre un cable recto

EJEMPLO 26.2

Un segmento de cable de 3 mm de longitud transporta una corriente de 3 A en la dirección +x. Se encuentra en el interior de un campo magnético de módulo 0.02 T cuya dirección es paralela al plano xy, formando un ángulo de 30° con el eje +x. ¿Cuál es la fuerza magnética ejercida sobre el segmento de cable?



Planteamiento del problema: La fuerza magnética se encuentra en la dirección de $\mathbf{L} \times \mathbf{B}$ que como vemos en la figura está en la dirección z.

La fuerza magnética viene dada por la ecuación

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{L} = L\mathbf{i} \\ \mathbf{B} = B_x\mathbf{i} + B_y\mathbf{j} \end{array} \right.$$

$$\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B} = IL\mathbf{i} \times (B_x\mathbf{i} + B_y\mathbf{j})$$

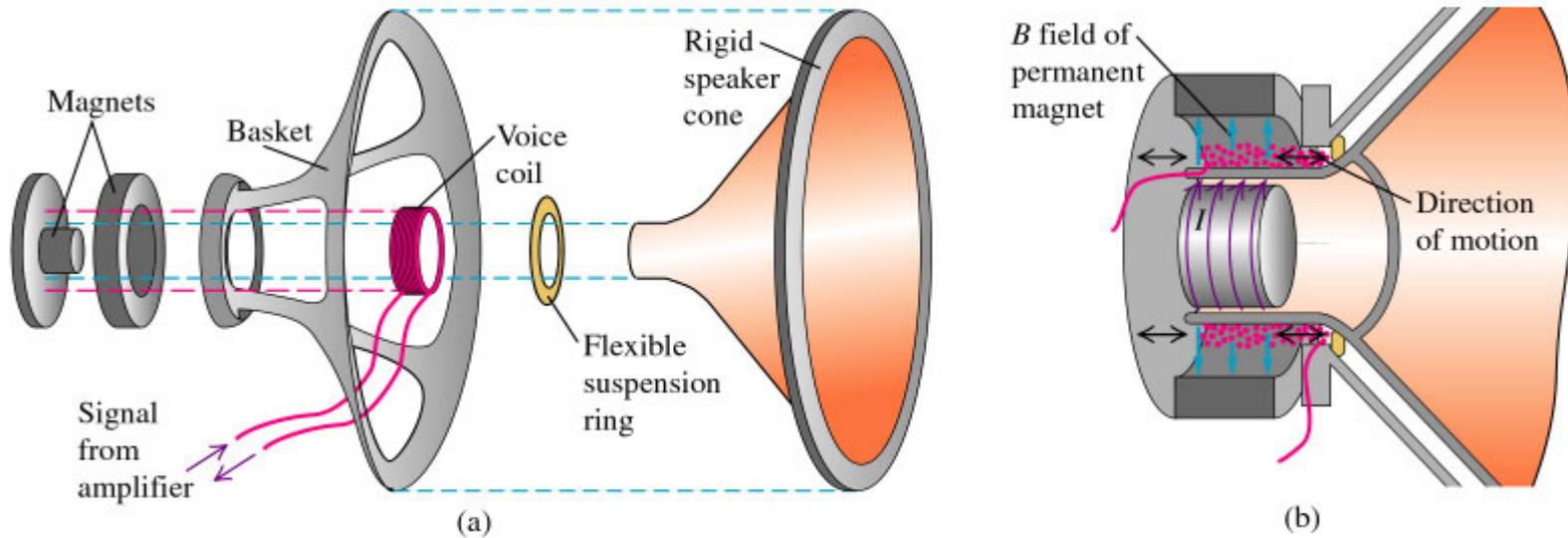
$$\mathbf{F} = ILB_x(\mathbf{i} \times \mathbf{i}) + ILB_y(\mathbf{i} \times \mathbf{j}) = 0 + ILB_y\mathbf{k}$$

$$\mathbf{F} = ILB \sin 30^\circ \mathbf{k} = (3.0 A)(0.003 m)(0.02 T)(\sin 30^\circ) \mathbf{k}$$

$$= 9 \times 10^{-5} N \mathbf{k}$$

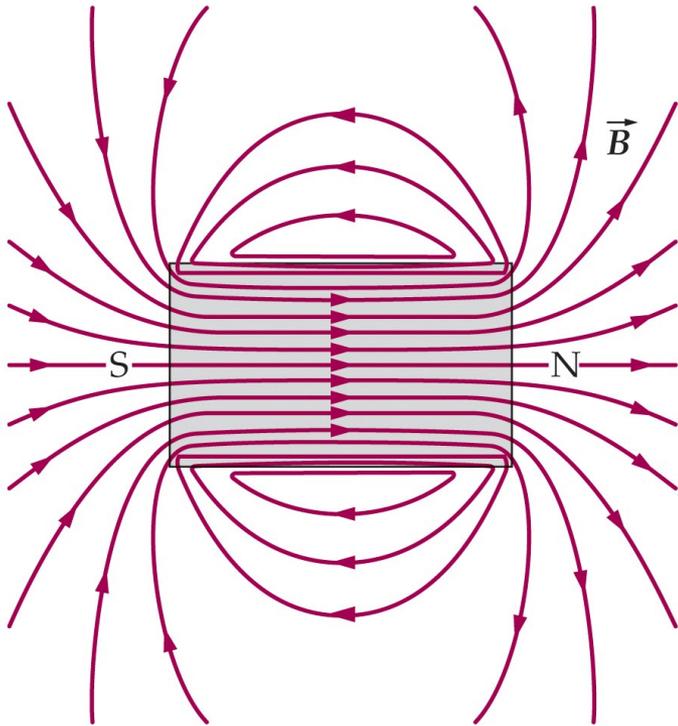
El altavoz

Una aplicación común de las fuerzas magnéticas sobre conductor de corriente la tenemos en los altavoces. (a) Componentes de un altavoz. (b) El imán permanente crea un campo magnético que ejerce fuerzas sobre la corriente de la bobina móvil; para una corriente I en la dirección que se muestra, la fuerza es hacia la derecha. Si la corriente eléctrica en la bobina oscila, el cono unido a ella también oscila con la misma frecuencia.



El campo magnético creado por el imán permanente ejerce una fuerza sobre la bobina móvil de voz proporcional a la corriente en la bobina; la dirección de la fuerza es a la izquierda o a la derecha, dependiendo de la dirección de la corriente. La señal que proviene del amplificador ocasiona que la dirección y la magnitud de la corriente oscilen. La bobina y el cono del altavoz al cual está conectada responden oscilando con una amplitud proporcional a la de la corriente en la bobina. Al girar el mando del volumen en el amplificador, aumenta la amplitud de la corriente y, en consecuencia, también la amplitud de la oscilación del cono y de la onda sonora producida por el cono en movimiento.

Líneas de campo magnético



La figura muestra las líneas de \mathbf{B} tanto fuera como dentro de una barra imantada. Las líneas emergen del polo norte y entran en el polo sur (por convención), pero carecen de principio y de fin. **Forman circuitos cerrados.**

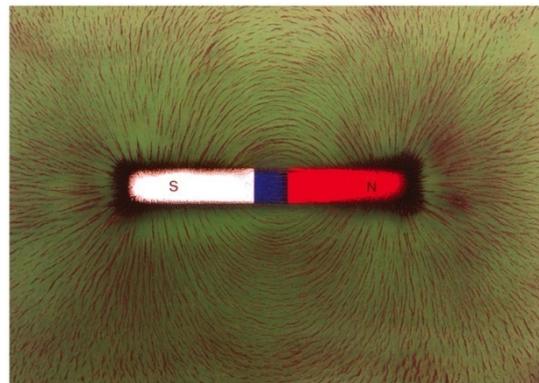
Del mismo modo que \mathbf{E} puede representarse mediante líneas de campo eléctrico, también \mathbf{B} puede ser representado mediante **líneas de campo magnético**.

En ambos casos, la dirección y el sentido del campo vienen dados por la dirección y el sentido de las líneas de campo y el módulo por su intensidad.

Existen, sin embargo, **dos importantes diferencias** entre las líneas de \mathbf{E} y las de \mathbf{B} :

(a) Las líneas de \mathbf{E} poseen la dirección de la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga positiva, mientras que **las líneas de \mathbf{B} son perpendiculares a la fuerza magnética** sobre una carga móvil.

(b) Las líneas de \mathbf{E} comienzan en las cargas positivas y terminan en las negativas. **Las líneas de \mathbf{B} son cerradas.**



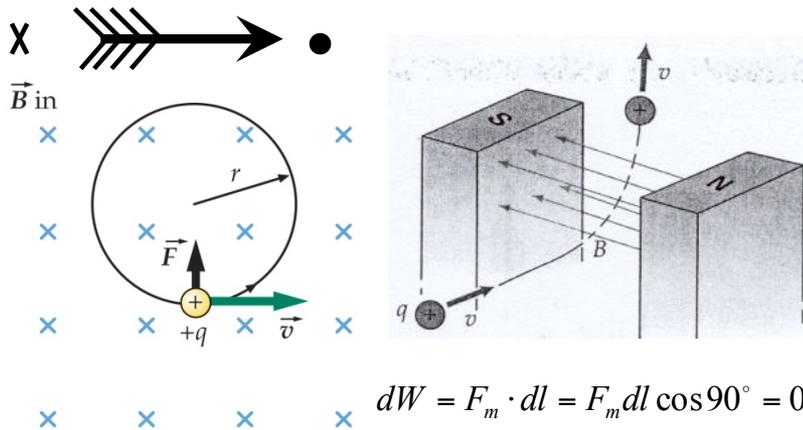
Líneas de campo magnético exterior a una barra imantada, visualizadas por limaduras de hierro.

26-2

Movimiento de una carga puntual en un campo magnético

Movimiento circular

La **fuerza magnética** que actúa sobre una partícula cargada que se mueve a través de un campo magnético es **siempre \perp a la velocidad de la partícula**. Por lo tanto, **la fuerza magnética modifica la dirección de la velocidad pero no su módulo**. Los campos magnéticos no realizan trabajo sobre las partículas y no modifican su energía cinética.



$$dW = F_m \cdot dl = F_m dl \cos 90^\circ = 0$$

En el caso especial que **\mathbf{v} sea \perp a \mathbf{B}** , la partícula se mueve describiendo una órbita circular. La fuerza magnética proporciona una **fuerza centrípeta** necesaria para que la partícula adquiera la aceleración v^2/r del movimiento circular.

Obsérvese que T y f dependen de la relación carga/masa (q/m), pero son independientes del radio r y de la velocidad v . Dos importantes aplicaciones del movimiento circular de las partículas cargadas en un campo magnético uniforme son el **espectrómetro de masa** y el **ciclotrón**.

Utilizando la segunda ley de Newton podemos relacionar el radio r de la circunferencia con el campo \mathbf{B} y la velocidad \mathbf{v} de la partícula. El módulo de la fuerza magnética es qvB , ya que \mathbf{v} e \mathbf{B} son \perp :

$$F = ma$$

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

El radio de curvatura es \propto al momento lineal e $1/\propto$ a la carga de la partícula.

El **periodo del movimiento circular**, llamado **periodo de ciclotrón**, es el tiempo que la partícula tarda en dar una vuelta completa alrededor del círculo:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(mv/qB)}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

PERIODO DE CICLOTRÓN

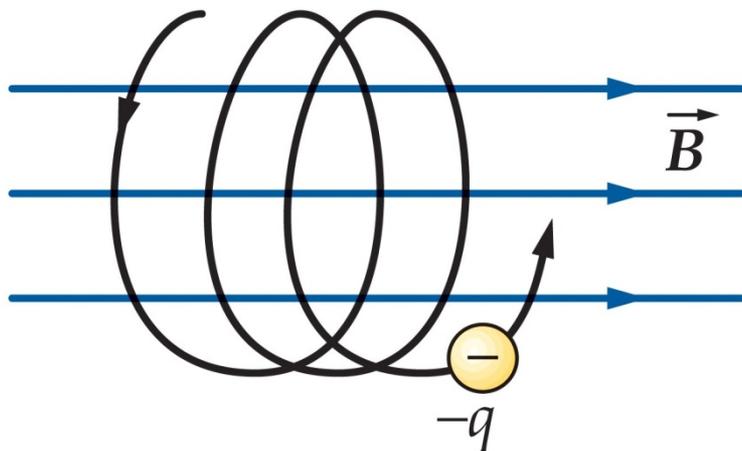
La frecuencia del movimiento circular, llamada **frecuencia de ciclotrón**, es el valor recíproco del periodo:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}, \text{ de modo que } \omega = 2\pi f = \frac{q}{m} B$$

FRECUENCIA DE CICLOTRÓN

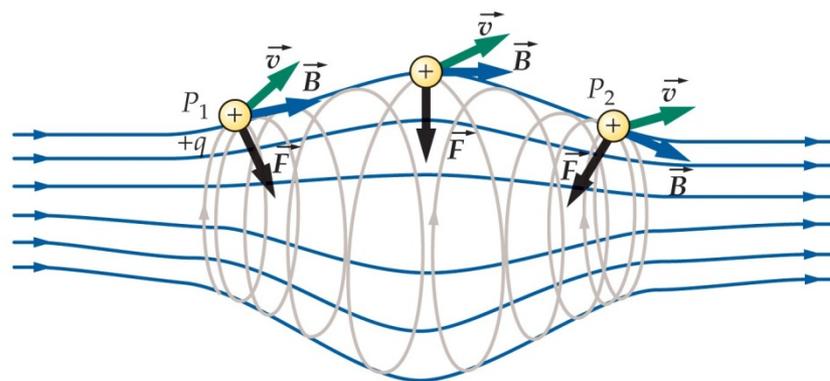
Trayectoria helicoidal y botella magnética

La **trayectoria helicoidal** se obtiene cuando una partícula entra en una región del espacio donde existe un **campo B uniforme**, con una velocidad que no es \perp a **B**.



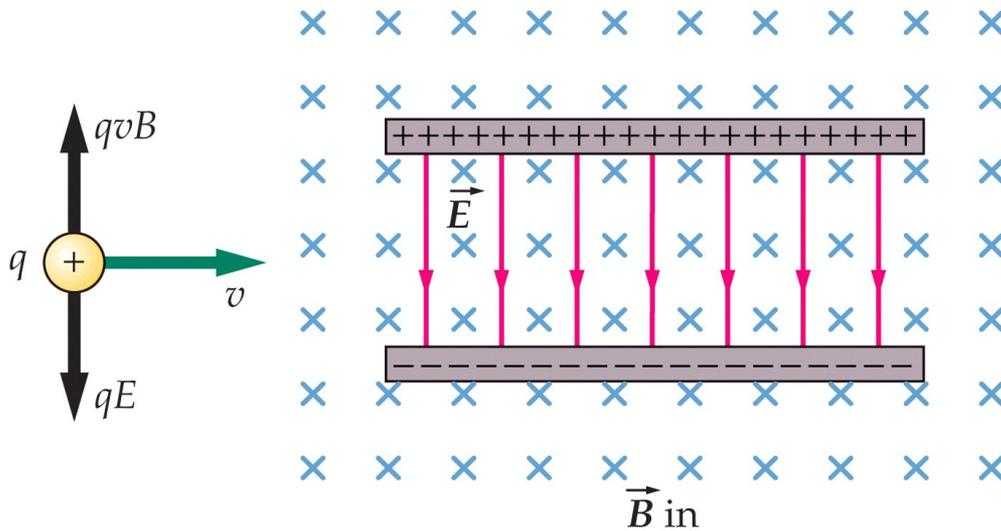
Cuando una partícula cargada posee una componente de velocidad paralelo a un campo magnético y otro perpendicular al mismo, la trayectoria de la partícula es una **hélice**.

La **botella magnética** se obtiene cuando una partícula cargada entra en un **campo B no uniforme**, muy intenso en ambos extremos y débil en el centro. La partícula queda atrapada y se mueve en espiral atrás y adelante alrededor a las líneas de campo.



Estas configuraciones de campos magnéticos se utilizan para confinar haces densos de partículas cargadas (*plasma*) en las investigaciones sobre fusión nuclear.

Selector de velocidades



La fuerza magnética ($F_{\text{mag.}}$) que actúa sobre una partícula cargada que se mueve en el interior de un campo \mathbf{B} uniforme puede equilibrarse por una fuerza electrostática ($F_{\text{ele.}}$) si se eligen adecuadamente los valores, dirección, y sentido de los campos magnético y eléctrico.

Puesto que la $F_{\text{ele.}}$ tiene la dirección y el sentido de \mathbf{E} y la $F_{\text{mag.}}$ es \perp al campo \mathbf{B} , los campos eléctrico y magnético deben ser perpendiculares entre sí para que se contrarresten estas fuerzas. Una región de estas características se dice que tiene los **campos cruzados**.

Consideramos una partícula $+q$ entrando en este espacio desde la izquierda. La fuerza neta sobre la partícula es:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Si q es positiva, la $F_{\text{ele.}}$ de módulo qE está dirigida hacia abajo y la fuerza magnética de módulo qvB está dirigida hacia arriba. Si la carga es negativa, estarán invertidas ambas fuerzas. **Las dos fuerzas se equilibrarán si $qE=qvB$** , o sea,

$$v = \frac{E}{B}$$

Para determinados valores de \mathbf{E} y \mathbf{B} , las fuerzas se equilibrarán solo para partículas cuya velocidad sea dada por $v=E/B$. Cualquier partícula con esta velocidad, atravesará el espacio sin desviarse. **Una partícula con velocidad mayor se desviará en el sentido de la fuerza magnética** y otra de velocidad menor se desviará en el sentido de la fuerza eléctrica. Un dispositivo de campos de esta forma se denomina **selector de velocidades**. Sólo pasarán y serán seleccionadas aquellas partículas cuya velocidad venga dada por $v=E/B$.

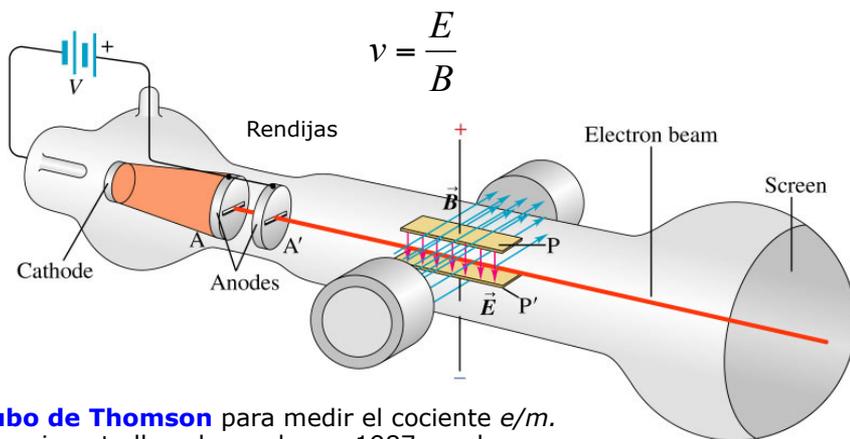
Experimento de Thomson

Los electrones provenientes del **cátodo caliente** son acelerados y concentrados en forma de haz por una diferencia de potencial V entre los dos ánodos A y A' .

La energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ es igual a la pérdida de energía potencial eV , donde e es la magnitud de la carga del electrón:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV, \quad \text{o} \quad v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Los electrones pasan entre las placas P y P' y chocan contra la pantalla en el extremo del tubo, que está recubierto con un material fluorescente que brilla en el punto de impacto. Los electrones pasan directamente cuando se satisface la relación:



Tubo de Thomson para medir el cociente e/m . Experimento llevado a cabo en 1987 en el laboratorio Cavendish en Cambridge, Inglaterra.

Combinando esto con la relación de la velocidad, obtenemos:

$$\frac{E}{B} = \sqrt{\frac{2eV}{m}}, \quad \text{así que} \quad \frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB^2}$$

Todas las cantidades del lado derecho pueden medirse, de modo que se puede determinar el cociente e/m de la carga y la masa.

El aspecto más significativo de las mediciones de e/m de **J.J Thomson** (1856-1940) fue que encontró **un solo valor** para esta cantidad. No depende del material del cátodo ni del gas residual en el tubo ni de otra cosa del experimento. Esta independencia mostró que las partículas del haz, que ahora llamamos **electrones**, son un constituyente común de toda la materia. Por tanto, a Thomson se le acredita el descubrimiento de la primera partícula subatómica, el electrón. El valor más preciso de e/m que se había podido obtener cuando se publicó este texto es:

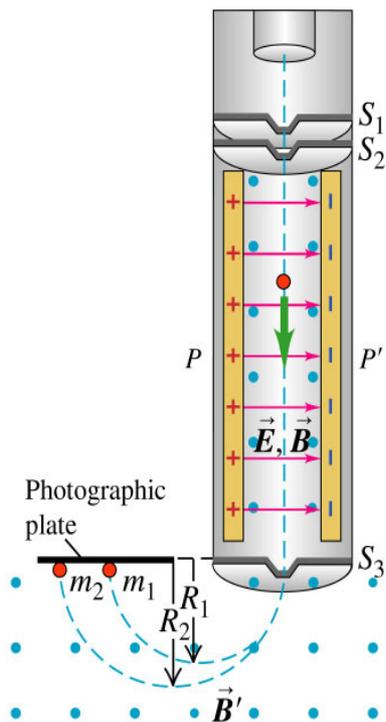
$$\frac{e}{m} = 1.75881962(53) \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

Quince años después de los experimentos de Thomson, el físico estadounidense **Robert Millikan** logró medir con precisión la carga del electrón. Este valor, junto con el valor e/m , nos permite determinar la *masa* del electrón. El valor más preciso de que se dispone hasta la fecha es:

$$m = 9.1093897(54) \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Espectrómetro de masas

Se pueden utilizar técnicas parecidas a la que usó Thomson en su experimento de e/m para medir **masas de iones** (masa atómicas y moleculares). En 1919, **Francis Aston** (1877-1945), alumno de Thomson, construyó el primero instrumento conocido como **espectrómetro de masas**.



El **espectrómetro de masas de Bainbridge** usa un selector de velocidad para producir partículas con velocidad uniforme v . En la región del campo magnético B , las partículas con masa más grande recorren trayectorias con radio R mayor.

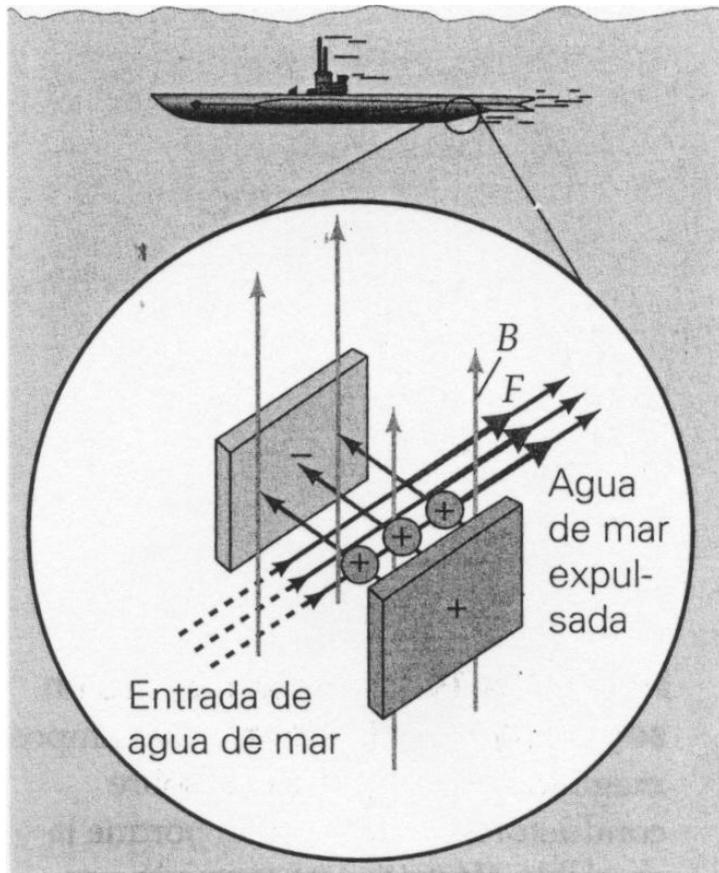
Los iones positivos provenientes de una fuente pasan por las ranuras S_1 y S_2 y forman un haz estrecho, y luego pasan por un selector de velocidad con campos \vec{E} y \vec{B} cruzados para bloquear el paso de todos los electrones, excepto aquellos cuya velocidad v sea igual a E/B . Por último, los iones pasan a una región donde hay un campo magnético $\vec{B}' \perp$ al plano de la figura, donde se desplazan en un arco circular de radio R determinado por:

$$R = \frac{mv}{qB'}$$

Los **iones con masa diferente** chocan contra la placa fotográfica en puntos diferentes, y se pueden medir los valores de R .

Uno de los resultados de este trabajo fue el descubrimiento de que **al neón posee dos especies de átomos**, con **masas atómicas de 20 y 22 g/mol**. Ahora conocemos a estas especies como **isótopos** del elemento. En experimentos posteriores se mostró que muchos elementos tienen varios isótopos, que son **átomos con comportamiento químico idéntico pero de masas diferentes**, debido a que poseen un **número diferente de neutrones** en sus núcleos.

Propulsión silenciosa: magnetohidrodinámica



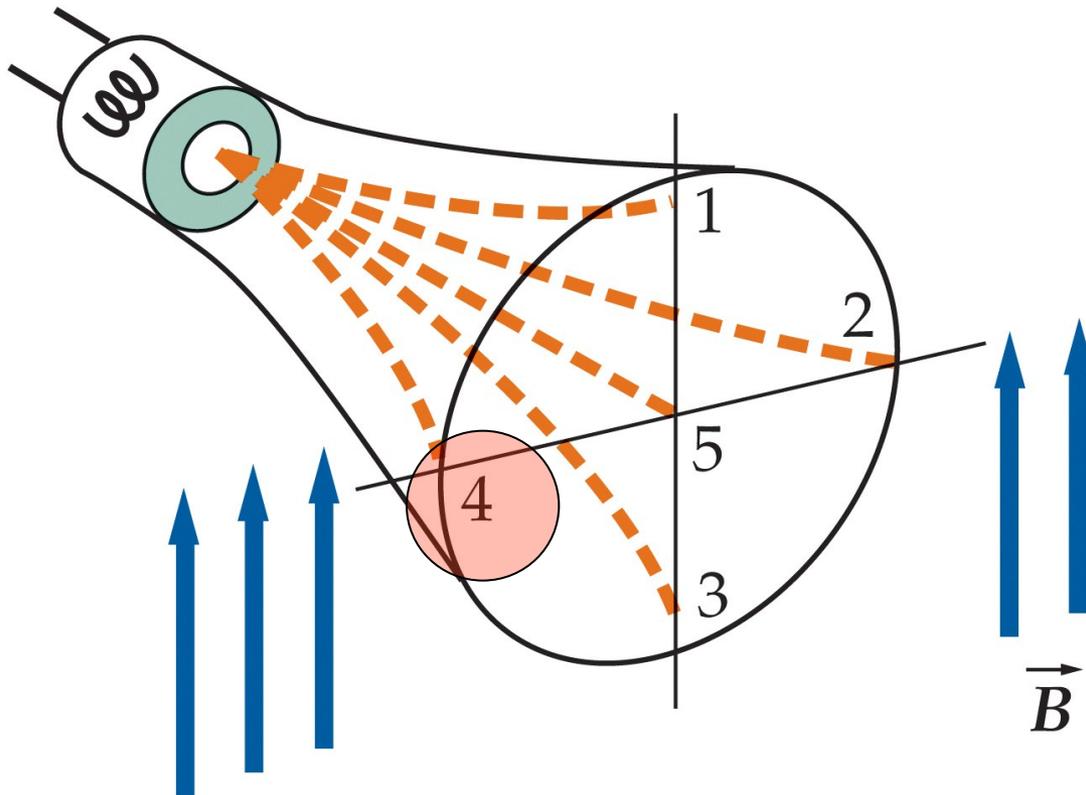
En la **propulsión magnetohidrodinámica**, se hace pasar una corriente eléctrica por agua de mar, con alto voltaje. Un campo magnético ejerce una fuerza sobre ella, empujando al agua hacia fuera de la parte trasera del **submarino**. La fuerza de reacción empuja al barco en la dirección contraria.

Recuérdese que el agua de mar es buena conductora, porque tiene una concentración alta de iones, como sodio (**Na⁺**) y cloro (**Cl⁻**).

Para evitar la detección, la función de "**funcionamiento silencioso**" tiene especial importancia en el diseño de los submarinos modernos.

PROBLEMA 1

Cuando un tubo de rayos catódicos se sitúa horizontalmente en un campo magnético dirigido verticalmente hacia arriba, los electrones emitidos desde el cátodo siguen una de las líneas discontinuas de la figura hasta incidir en la pantalla del tubo. La trayectoria correcta es (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5.

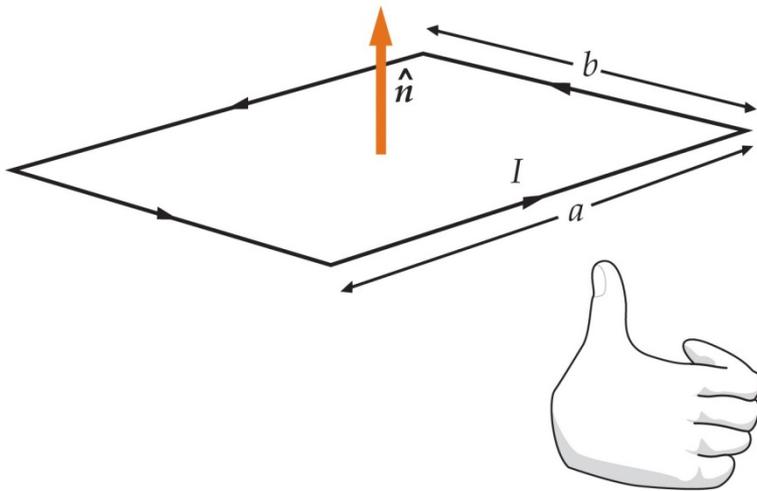


26-3

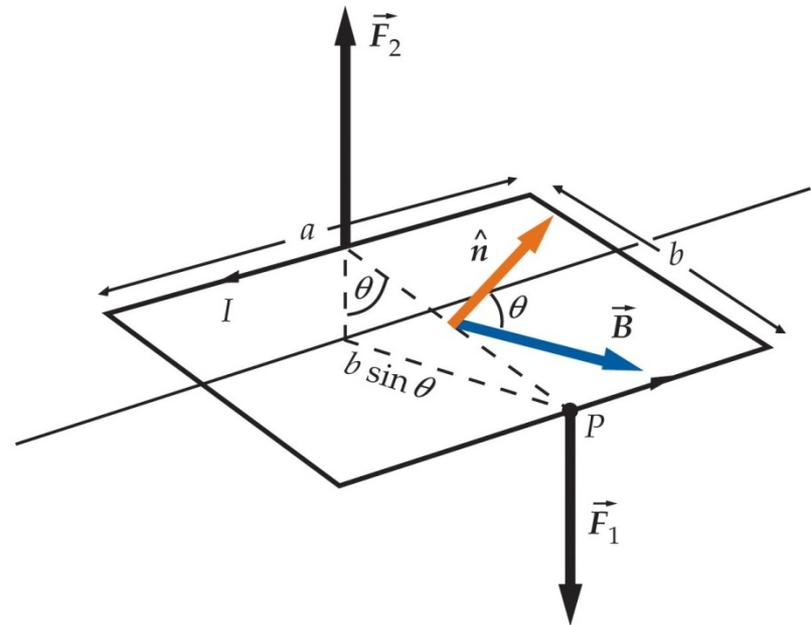
Momentos de fuerzas sobre
espiras de corriente e imanes

Espiras de corriente

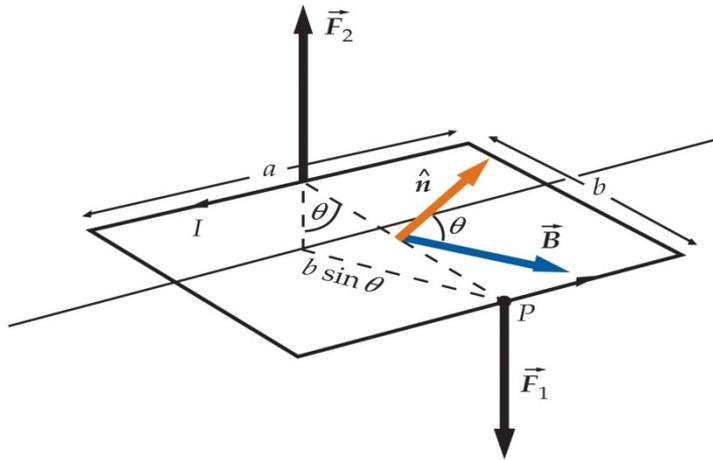
Una espira portadora de corriente no experimenta ninguna fuerza neta cuando se encuentra en un campo magnético uniforme, pero **sobre ella se ejerce un par que tiende a girarla.**



La orientación de una espira de corriente viene descrita por el vector unitario \mathbf{n} . La regla de la mano derecha nos sirve para determinar el sentido de \mathbf{n} .



La figura muestra la fuerza ejercida por un campo \mathbf{B} uniforme sobre una espira rectangular cuyo vector unitario \mathbf{n} forma un ángulo θ con el campo magnético. La fuerza neta sobre la espira es cero.



Las fuerzas F_1 y F_2 tienen módulo $F_1 = F_2 = IaB$ y forman **un par de fuerzas**, de modo que el momento es el mismo respecto a cualquier punto. La magnitud del momento en el punto P de la figura es

$$\tau = F_2 b \sin\theta = IaBb \sin\theta = IAB \sin\theta$$

en donde $A = ab$ es el área de la espira. Si esta posee N vueltas, el momento tiene el módulo

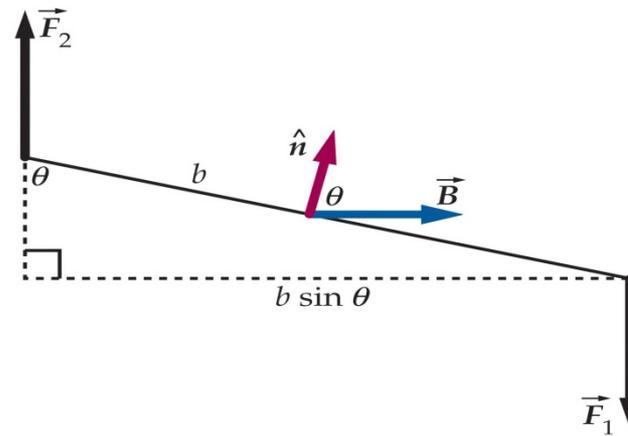
$$\tau = NIAB \sin\theta$$

Este momento tiende a girar la espira de modo que \mathbf{n} tenga la misma dirección que \mathbf{B} , es decir, de modo que su plano sea \perp a \mathbf{B} .

El momento puede escribirse convenientemente en función del **momento dipolar magnético** μ de la espira de corriente, definido por

$$\mu = NIA \hat{\mathbf{n}}$$

MOMENTO DIPOLAR MAGNÉTICO DE UNA ESPIRA DE CORRIENTE

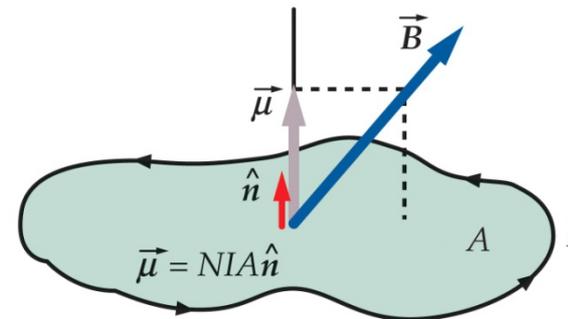


La **unidad del SI** del momento es el *amperio-metro*² ($A \cdot m^2$). En función del momento dipolar magnético, el momento de torsión sobre la espira de corriente viene dado por

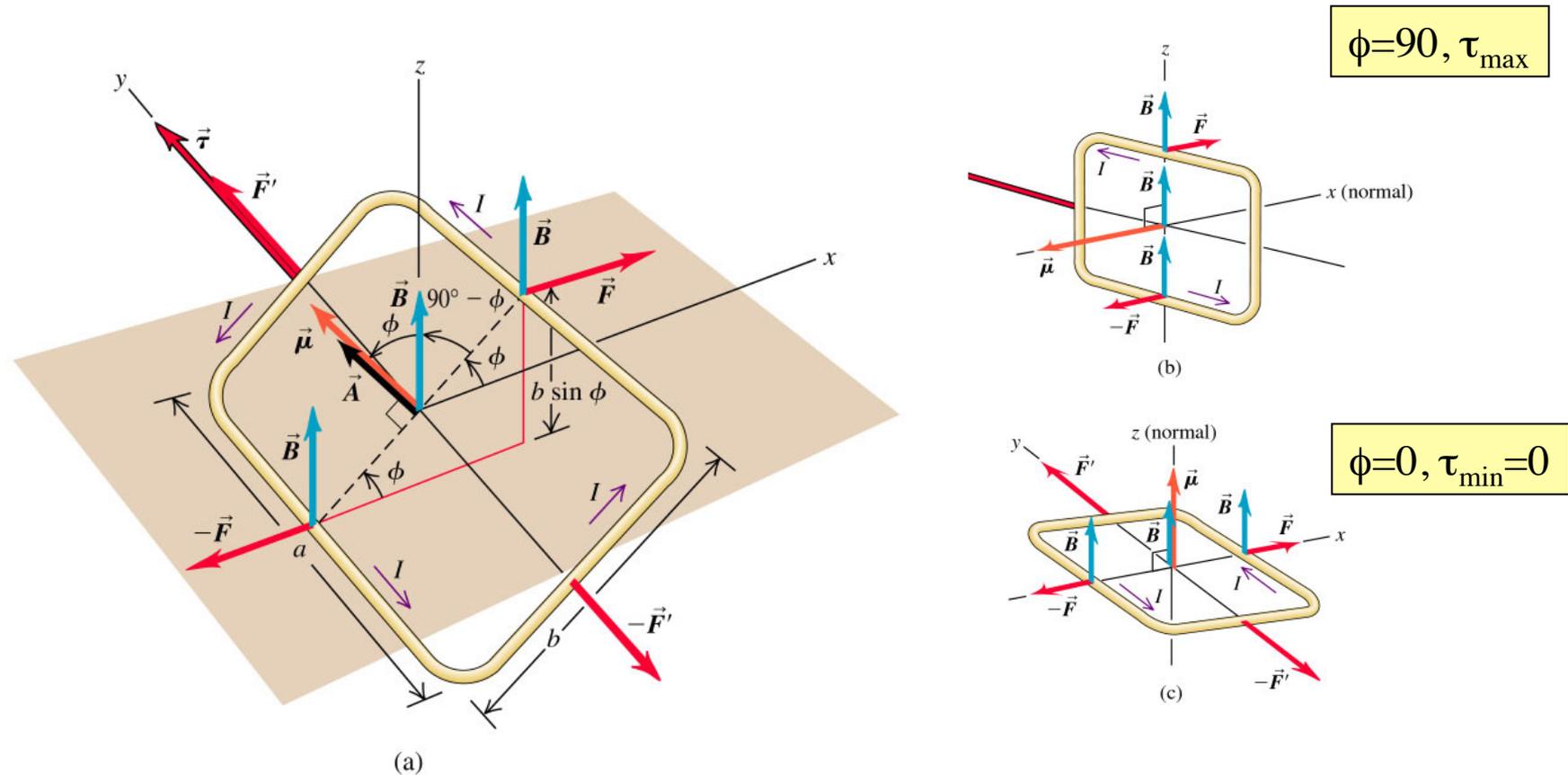
$$\tau = \mu \times \mathbf{B}$$

MOMENTO SOBRE UNA ESPIRA DE CORRIENTE

Esta ecuación, deducida por una espira rectangular, es válida en general para una espira plana de cualquier forma.



Momento de torsión sobre una espira de corriente



(a) Fuerzas sobre los lados de una espira de corriente en un campo magnético. La fuerza resultante es cero; el momento de torsión neto tiene magnitud $\tau=IAB \text{ sen}\phi$. (b) El momento de torsión es máximo cuando la normal a la espira es \perp a \mathbf{B} . (c) Cuando la normal a la espira es paralela a \mathbf{B} , el momento de torsión es cero (equilibrio estable). Si la normal es antiparalela a \mathbf{B} , el momento de torsión también es cero, pero el equilibrio es inestable ($\phi=180$ y $\tau=0$).

Energía potencial de un dipolo magnético en un campo magnético

Cuando un momento actúa sobre un objeto y éste gira un determinado ángulo, se realiza trabajo. Cuando un dipolo gira un ángulo $d\theta$ el trabajo realizado es

$$dW = -\tau d\theta = -\mu B \operatorname{sen} \theta d\theta$$

El signo $-$ aparece porque el momento tiende a disminuir θ . Haciendo este trabajo igual a la disminución de energía potencial, tenemos

$$dU = -dW = +\mu B \operatorname{sen} \theta d\theta$$

Integrando, resulta

$$U = -\mu B \cos \theta + U_0$$

Si elegimos la **energía potencial** de modo que sea cero cuando $\theta=90^\circ$, resulta $U_0=0$ y la energía potencial del dipolo es

$$U = -\mu B \cos \theta = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

ENERGÍA POTENCIAL DE UN DIPOLO MAGNÉTICO

Esta ecuación expresa la energía potencial de un dipolo magnético que forma un ángulo θ con un campo magnético.

El motor de corriente continua

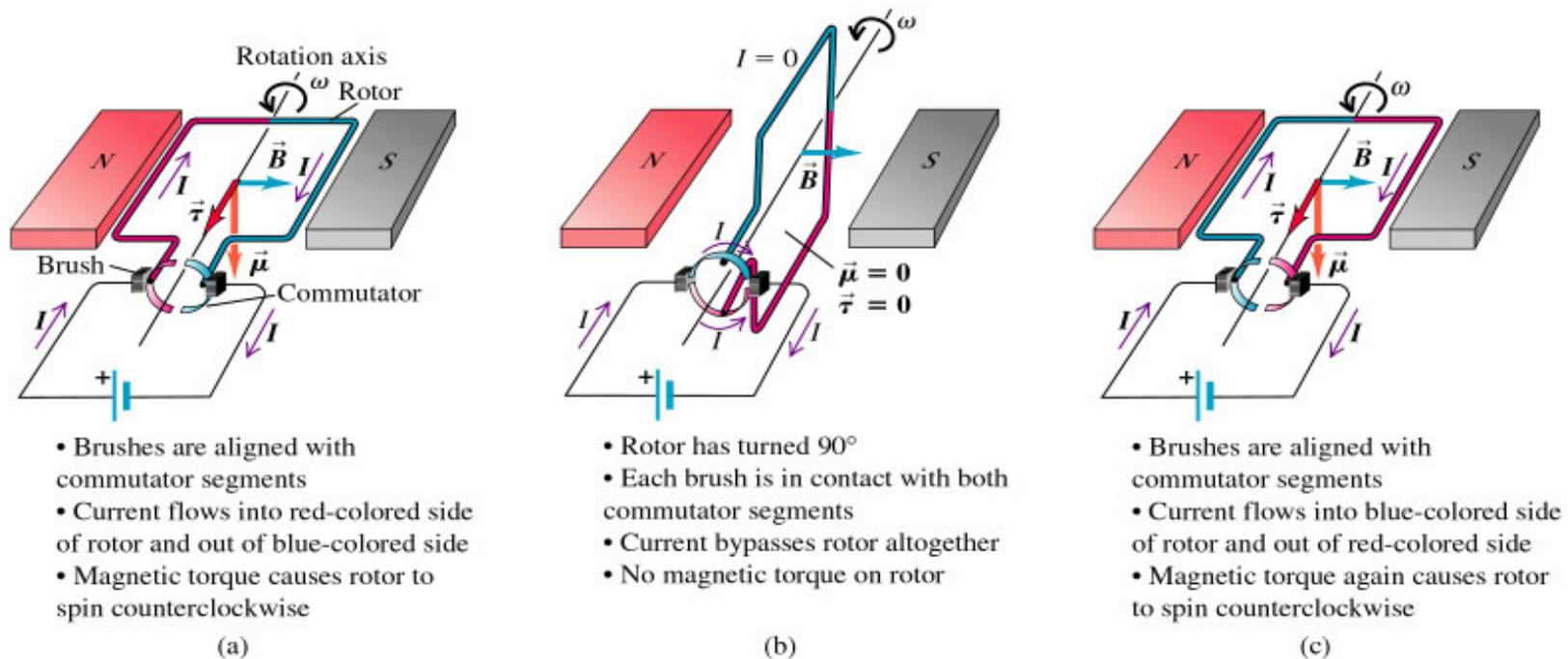
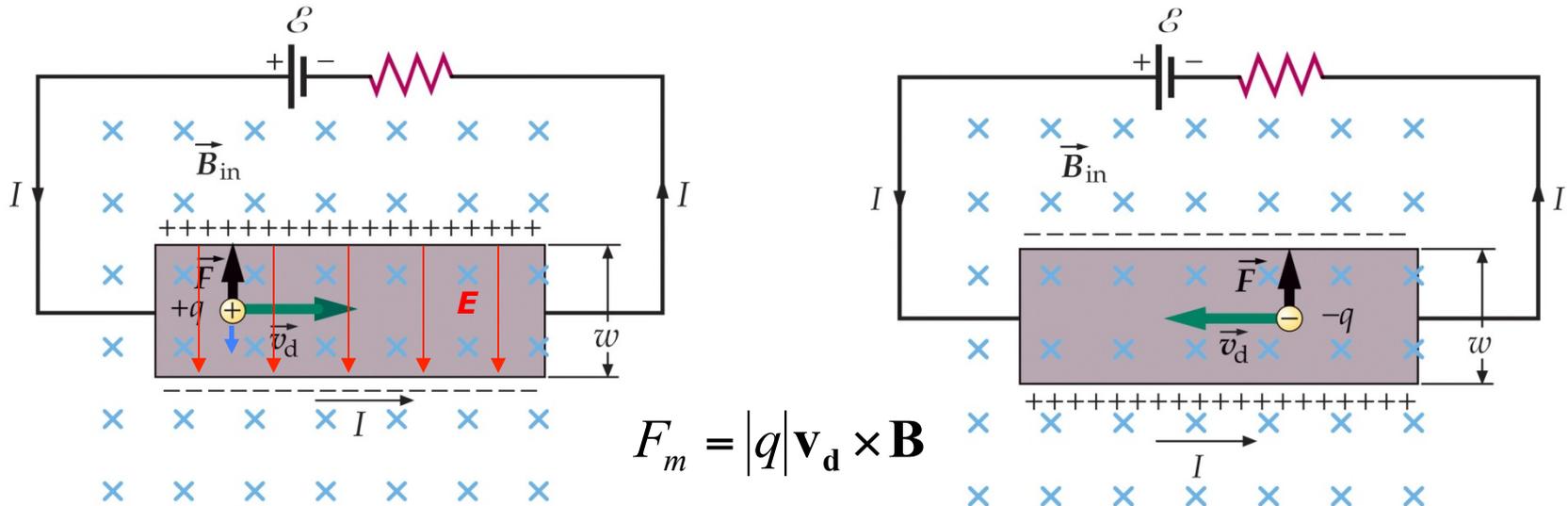


Diagrama esquemático de **un motor cc sencillo**. El rotor es una espira de alambre que puede girar libremente alrededor de un eje; los extremos del rotor están unidos a dos conductores curvos que forman el conmutador, cuyos segmentos están aislados entre sí. (a) Las escobillas están alineadas con los segmentos del conmutador y la corriente fluye en un lado del rotor y sale por el otro extremo. El momento de torsión magnético ocasiona que el rotor gire en sentido antihorario. (b) El rotor ha girado de 90° . Cada cepillo está en contacto con ambos segmentos del conmutador, de modo que la corriente ya no pasa por el rotor. (c) A medida que gira el rotor más allá de la posición mostrada en (b), la corriente fluye de nuevo de los segmentos del conmutador al rotor, pero ahora la corriente fluye por el sentido contrario. El momento de torsión magnético actúa en la misma dirección que en (a). **Gracias al conmutador, la corriente se invierte de 180° , de modo que el momento de torsión apunta siempre en la dirección tal que el rotor gira en el sentido antihorario.** Para obtener una rotación continua, se invierte la corriente cada medio giro, para que se inviertan las fuerzas productoras del par.

Efecto Hall

Cuando las cargas se mueven en un campo magnético experimentan una fuerza perpendicular a su movimiento. Debido a esto se produce una separación de carga en el alambre denominada **efecto Hall**. **Este fenómeno nos permite determinar el signo de la carga en un portador** y el número de portadores n por unidad de volumen del conductor. La figura muestra dos **cintas conductoras** cada una de las cuales transporta una corriente I hacia la derecha. Las cintas se encuentran en un campo magnético dirigido perpendicularmente hacia la dentro del papel.



Supongamos que la corriente está formada por **partículas positivamente cargadas** que se mueven hacia la derecha: La fuerza magnética es $\mathbf{F}_m = q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ y está dirigida hacia arriba. Las partículas positivas, por lo tanto, se mueven hacia la parte superior de la cinta, dejando el fondo de la misma con un exceso de carga negativa. Esta separación de carga produce un campo electrostático en la cinta que se opone a la fuerza magnética que actúa sobre los portadores de carga. Cuando la fuerza electrostática ($\mathbf{F}_e = q\mathbf{E}$) y magnética se equilibran, los portadores de carga dejan de moverse hacia arriba. Como el campo eléctrico apunta en el sentido del potencial decreciente, la parte superior de la cinta está a mayor potencial que la parte inferior. Esta diferencia de potencial se puede medir con un voltímetro.

Si al corriente consta de **partículas negativamente cargadas**, los portadores de carga se moverán hacia la izquierda. La fuerza magnética $\mathbf{F}_m = q\mathbf{v}_d \times \mathbf{B}$ se dirige de nuevo hacia arriba, pues los signos de ambos, q y \mathbf{v}_d , se han cambiado. De nuevo los portadores son forzados a la parte superior de la cinta, pero ahora éstos son negativos, la carga negativa se acumula en la parte superior de la cinta y la carga positiva en la parte inferior.

Una **medida del signo de la diferencia de potencial** entre la parte superior e inferior de la cinta nos dirá el signo de los portadores de carga. En un conductor metálico los portadores de cargas son negativos (electrones).