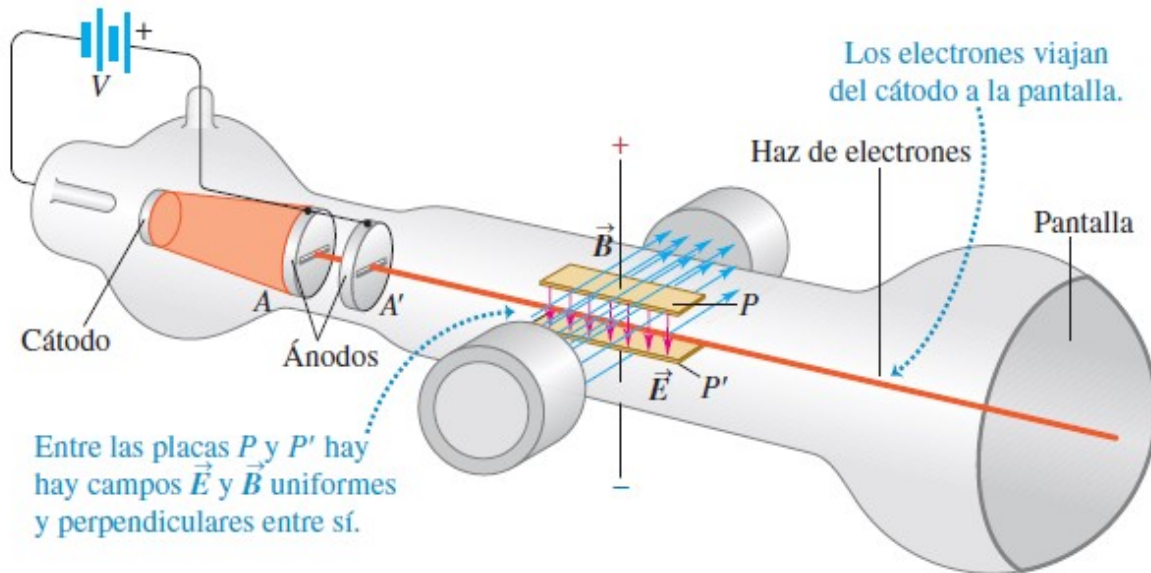
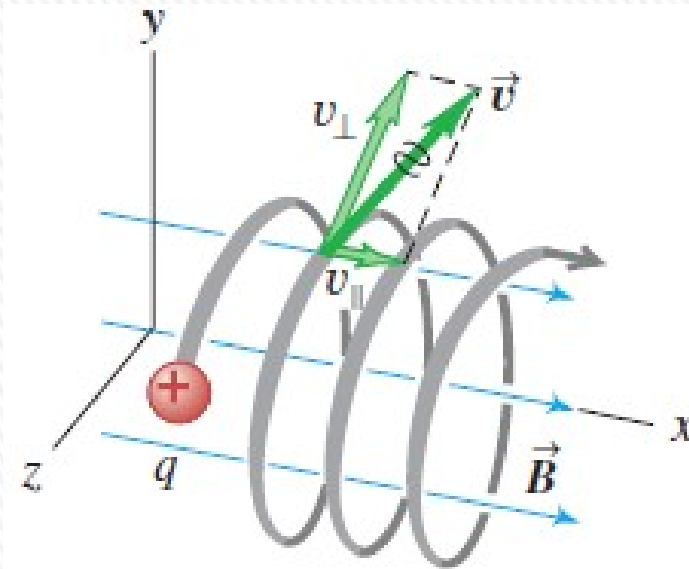


6-CAMPO MAGNÉTICO



MAGNETISMO E IMANES

La naturaleza *fundamental del magnetismo es la interacción entre las cargas eléctricas en movimiento.*

Todo imán, cualquiera que fuera su forma, tiene dos polos, uno *norte (N)* y otro *sur (S)*, que ejercen fuerzas sobre otros polos magnéticos de manera similar a como las cargas eléctricas ejercen fuerzas entre sí.

Polos iguales (N-N o S-S) se repelen y polos opuestos (N-S) se atraen.

El Polo Norte geográfico terrestre representa un polo sur magnético.

Como los polos magnéticos opuestos se atraen, el polo de un imán que es atraído hacia el Polo Norte geográfico de la Tierra es el polo norte del imán.

Los polos magnéticos siempre se encuentran en pares, no existen los monopolos magnéticos.

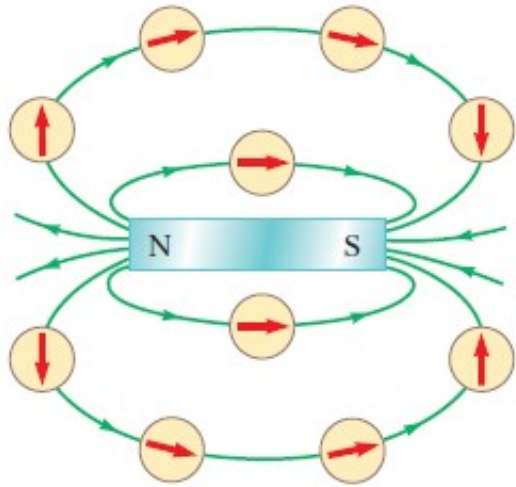
CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE: Se extiende desde el núcleo interno de la Tierra hasta el límite en el que se encuentra con el viento solar, la magnetósfera (desde los 500 km altura)

Magnitud sobre la superficie de la Tierra entre 20 y 67 μT .

Máxima en los polos y mínima en región de Sudamérica:

Uruguay tiene uno de los valores más bajo del planeta: 22 a 23 μT !!!

CAMPO MAGNÉTICO



Espacio que rodea a cualquier sustancia magnética (imán permanente) o a cualquier carga eléctrica *en movimiento* contiene un **campo magnético (B)**.

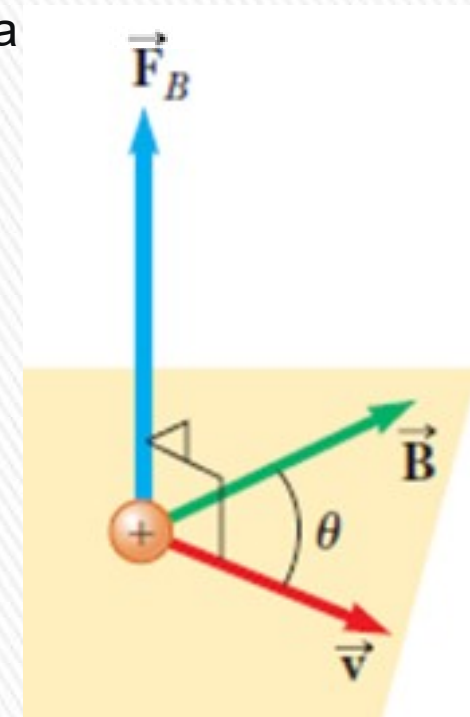
La dirección de **B** en cualquier sitio es la dirección a la cual apunta la aguja de una brújula colocada en dicha posición.

Es posible representar el campo magnético gráficamente utilizando **líneas de campo magnético**.

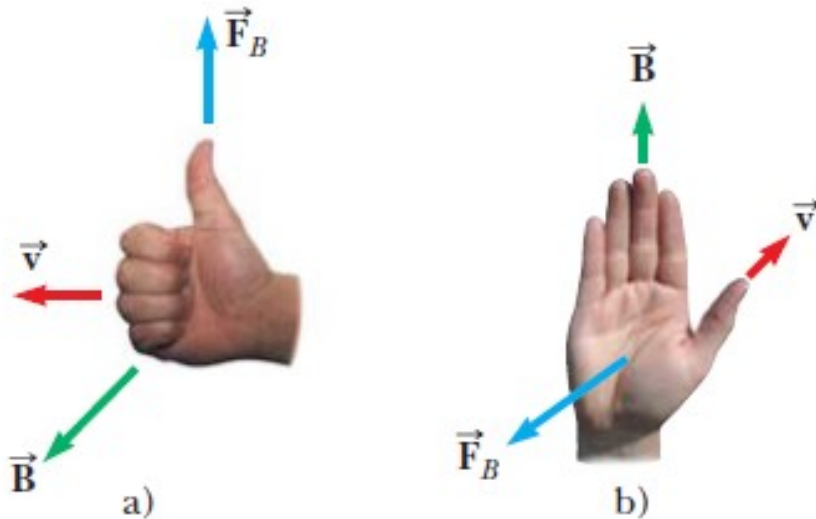
Supondremos que no existen ni **E** ni campo gravitacional en la ubicación del objeto de prueba.

Definimos el **campo magnético B** en algún punto en el espacio en función de la fuerza magnética **F_B** que ejerce el campo sobre una partícula con carga que se mueve con una velocidad **v**, la cual se identifica como el objeto de prueba.

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



Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles



donde θ es el ángulo menor entre \mathbf{v} y \mathbf{B} . Por esta expresión puede que \mathbf{F}_B sea igual a cero cuando \mathbf{v} es paralela o antiparalela a \mathbf{B} ($\theta = 0$ o 180°) y es máxima cuando \mathbf{v} es perpendicular a \mathbf{B} ($\theta = 90^\circ$).

A partir de la definición se ve que la unidad del SI del campo magnético es newton por cada coulomb-metro por cada segundo, o **tesla (T)**:

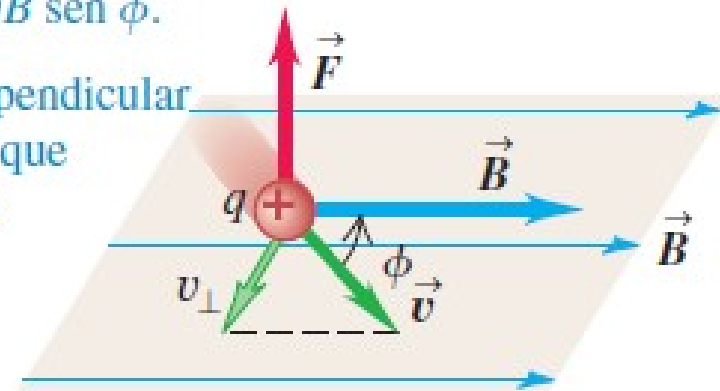
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

El módulo vale:

$$F_B = |q|vB \sin \theta$$

Una carga que se mueve con un ángulo ϕ con respecto a un campo magnético experimenta una fuerza magnética de magnitud $F = |q|v_{\perp} B = |q|vB \sin \phi$.

\vec{F} es perpendicular al plano que contiene \vec{v} y \vec{B} .



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

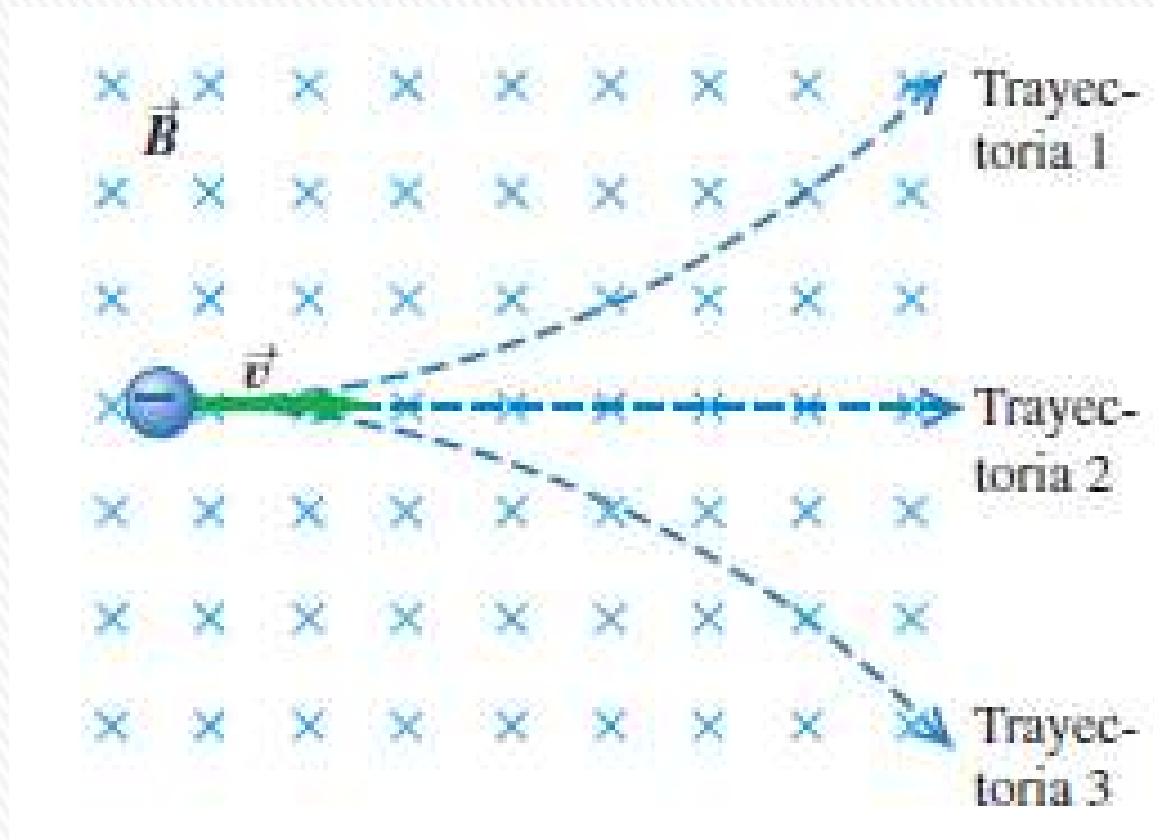
Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

Diferencias entre fuerzas eléctrica y magnética:

- La fuerza eléctrica actúa a lo largo de la dirección del campo eléctrico, en tanto que **la fuerza magnética actúa perpendicularmente al campo magnético**.
- La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula con carga sin importar si ésta se encuentra en movimiento, **fuerza magnética actúa sólo si la partícula con carga está en movimiento**.
- La fuerza eléctrica efectúa trabajo al desplazar una partícula con carga, **la fuerza magnética asociada con un campo magnético estable no efectúa trabajo cuando se desplaza una partícula** (la fuerza es perpendicular al desplazamiento).
- A partir del teorema trabajo-energía cinética, se concluye que la energía cinética de una partícula con carga que se mueve a través de un campo magnético no puede ser modificada por el campo magnético solo. El campo magnético, puede modificar la dirección del vector velocidad pero no puede cambiar la rapidez ni la energía cinética de la partícula.



1-CUESTIONARIO RÁPIDO



La figura muestra un campo magnético uniforme \mathbf{B} dirigido hacia el plano de la hoja (se muestra con símbolos \times celestes), en ese plano se mueve una partícula con carga negativa. ¿Cuál de las trayectorias sigue la partícula: 1, 2 ó 3?

Respuesta: Trayectoria 3 (tener en cuenta que la partícula es negativa)

2-CUESTIONARIO RÁPIDO

Un electrón se mueve en el plano de la pantalla hacia la parte superior. Además en el plano de la pantalla existe un campo magnético que está dirigido hacia la derecha.

¿Cuál es la dirección de la fuerza magnética sobre el electrón?

- a) hacia la parte superior,
- b) hacia la parte inferior,
- c) hacia el borde izquierdo,
- d) hacia el borde derecho,
- e) hacia fuera alejándose de la pantalla,
- f) hacia adentro de la pantalla.

e) hacia fuera alejándose de la pantalla,

EJEMPLO: ejercicio 3.1.5

3.1.5- La fuerza sobre una carga eléctrica que se mueve en un campo magnético:

- a) Aumenta la energía cinética de la carga si esta es positiva.
- b) Disminuye la energía cinética de la carga si esta es negativa.
- c) Aumenta la energía cinética de la carga independientemente de su signo.
- d) Disminuye la energía cinética de la carga independientemente de su signo.
- e) No cambia la energía cinética de la carga.

Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

Partícula: masa m , q positiva en el punto O , se mueve con velocidad \mathbf{v} en **campo magnético uniforme \mathbf{B}** .

\mathbf{v} y \mathbf{B} son perpendiculares, por tanto: $F = qvB$.

La fuerza siempre es perpendicular a \mathbf{v} :

no puede cambiar la *magnitud de la velocidad*, solo su *dirección*.

•nunca realiza *trabajo* sobre la partícula.

La trayectoria de la partícula es un *círculo*, con *rapidez v* constante.

La aceleración centrípeta es v^2/R , y la *única fuerza que actúa es la fuerza magnética*, por lo que de acuerdo con la segunda ley de Newton

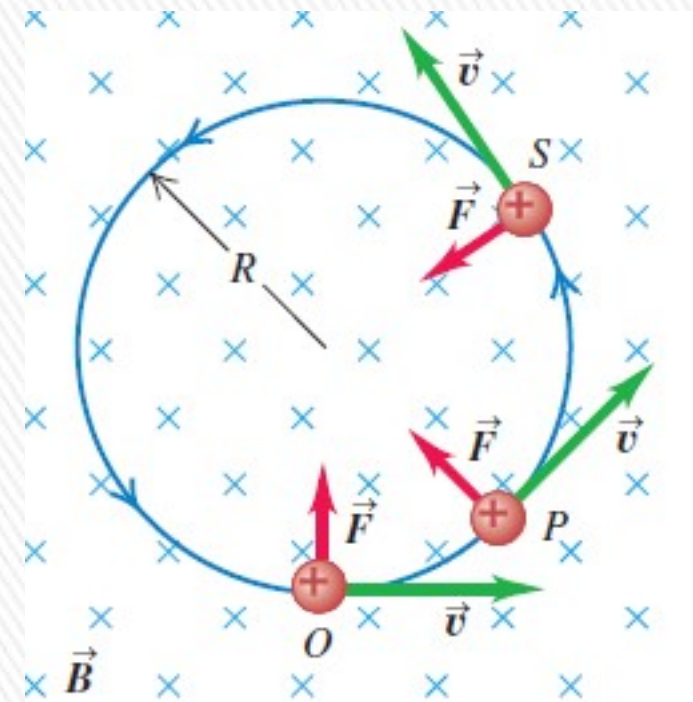
Radio de la órbita circular en un campo magnético uniforme:

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

Rapidez angular ω de la partícula se calcula con $v = R\omega$

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

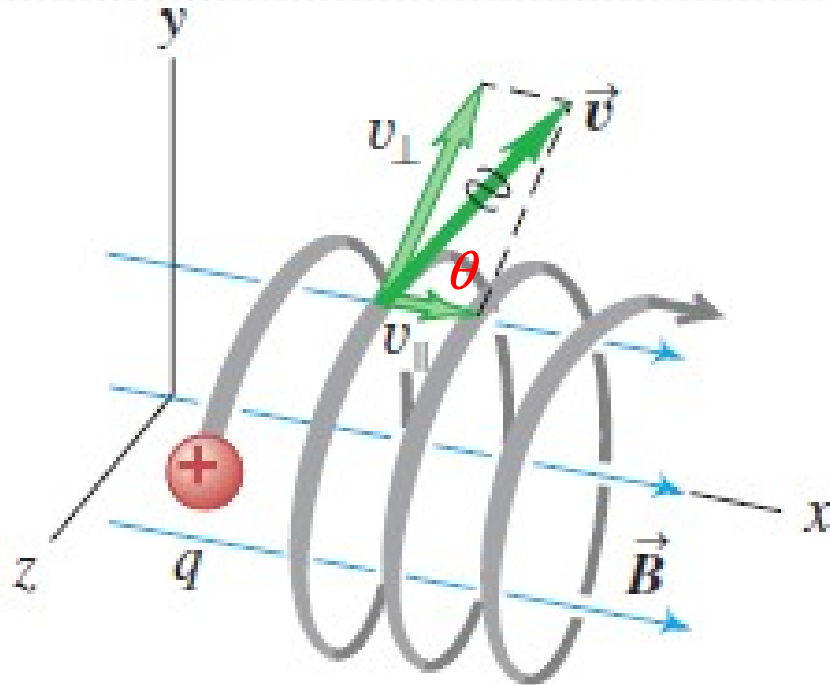
Periodo T vale:
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$F = qvB = m \frac{v^2}{R}$$



Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético



Si la dirección de la velocidad inicial *no es perpendicular al campo*, la *componente* de la velocidad paralela al campo es constante porque no hay fuerza paralela al campo.

Así que la partícula se mueve en un patrón **helicoidal**.

El radio de la hélice está dado por la ecuación anterior donde *v ahora es la componente de la velocidad perpendicular al campo* (v_{\perp})

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \theta$$

El paso de la hélice, es decir la distancia entre dos puntos de la hélice situados sobre una generatriz del cilindro imaginario sobre la que se enrolla, vale:

$$\text{paso} = v_{\parallel} T = v \cos \theta T$$

Con T el periodo de la órbita

El movimiento de una partícula cargada en un campo magnético no uniforme es más complejo.

Selector de velocidad

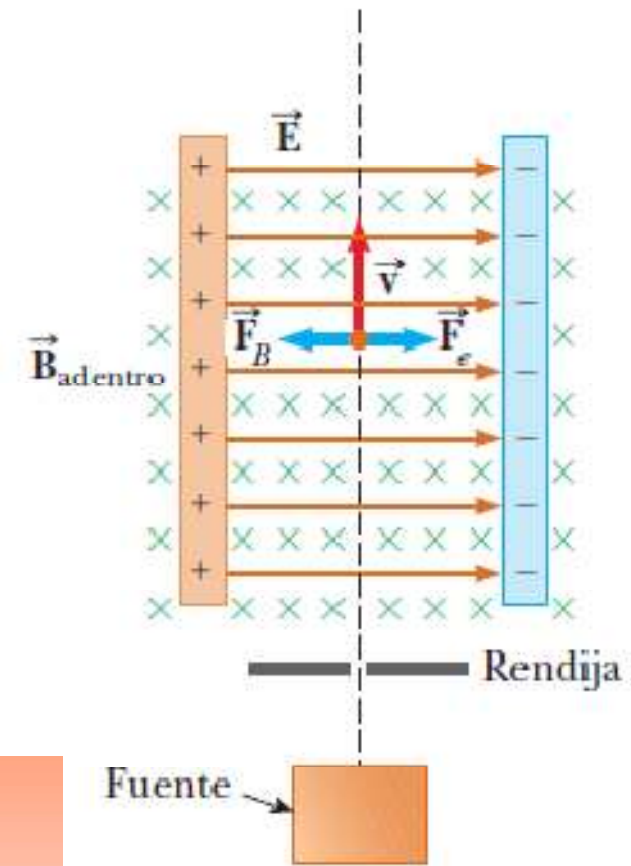
Cuando una partícula con carga positiva se mueve con velocidad \mathbf{v} ante la presencia de un campo magnético dirigido hacia la página y un campo eléctrico dirigido hacia la derecha, experimenta una fuerza eléctrica $q\mathbf{E}$ hacia la derecha y una fuerza magnética $q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$ hacia la izquierda.

$$F_E = F_B \Rightarrow qE = qvB$$

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

Solo las partículas con rapidez igual a E/B pasan sin ser desviadas por los campos.

Un selector de velocidad para partículas con carga positiva también funciona para electrones u otras partículas cargadas negativamente



Espectrómetros de masas

1919 Francis Aston – permitió descubrir isótopos de distintos elementos.

Iones positivos de una fuente pasan a través de las ranuras S_1 y S_2 para formar un haz estrecho.

Pasan a través de selector de velocidad con campos E y B cruzados (iones con rapidez $v = E/B$).

Por último, los iones pasan hacia una región con un campo magnético perpendicular a la figura, donde se mueven en arcos circulares con radio $R = mv/qB'$.

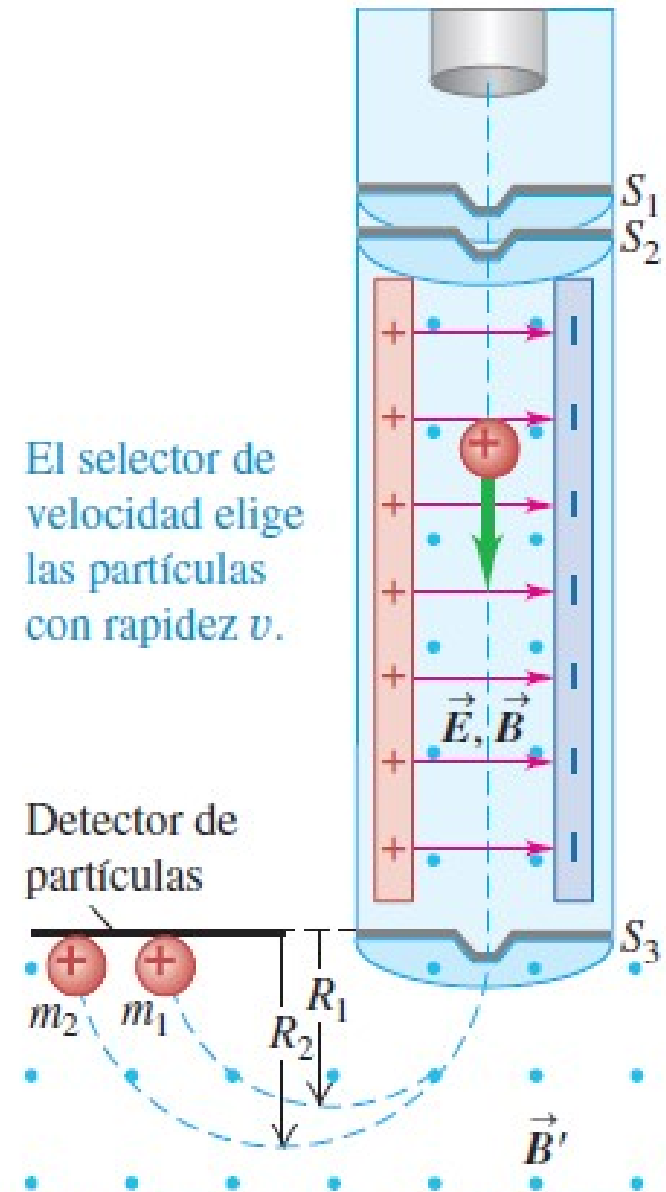
Los iones con masas diferentes golpean al detector en diferentes puntos, y se miden los valores de R .

Se supone que cada ion perdió un electrón, por lo que la carga neta de cada ion es simplemente $+e$.

Con todos los parámetros conocidos en esta ecuación, excepto m , se calcula la masa m del ion.

$$R = \frac{mv}{qB'} = \frac{m}{qB'} \frac{E}{B}$$

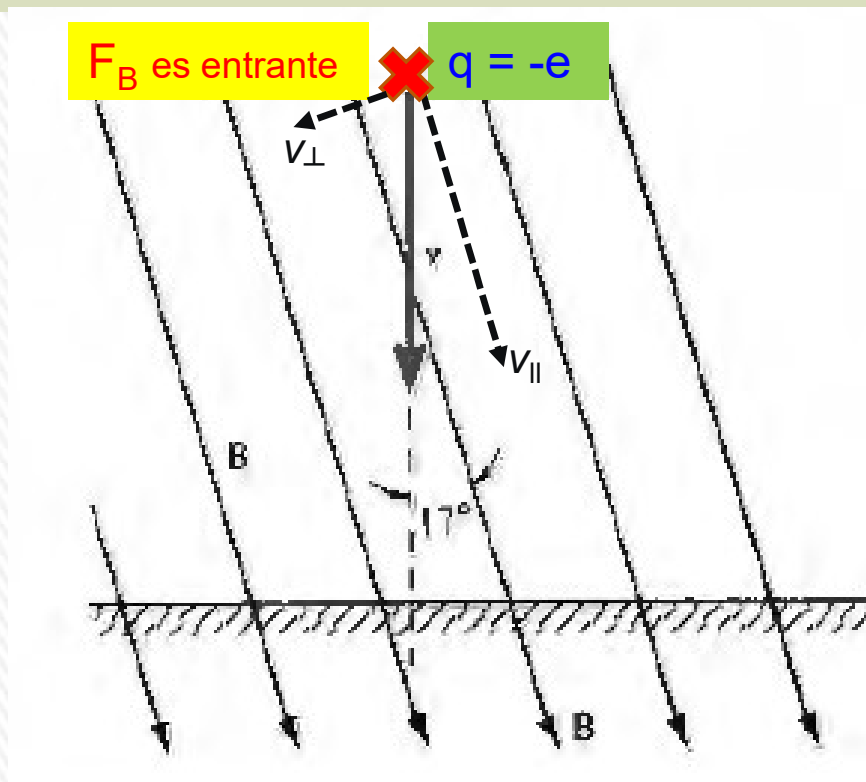
$$m = \frac{qBB'R}{E}$$



EJEMPLO: ejercicio 3.1.1

En un punto sobre la superficie de la Tierra el campo magnético terrestre forma un ángulo de 17° con la vertical y tiene una magnitud de $5,8 \times 10^{-5}$ T.

- Halle la fuerza magnética sobre un electrón proveniente de los rayos cósmicos que se mueve verticalmente hacia abajo a $1,0 \times 10^5$ m/s.
- Halle el cociente entre la fuerza magnética y el peso del electrón.
- Si el campo eléctrico atmosférico en dicho lugar es vertical, entrante a la superficie terrestre y de una magnitud de 120 V/m ¿cuánto vale la fuerza eléctrica que actúa sobre el electrón y la fuerza resultante total?



EJEMPLO: ejercicio 3.1.1

En un punto sobre la superficie de la Tierra el campo magnético terrestre forma un ángulo de 17° con la vertical y tiene una magnitud de $5,8 \times 10^{-5}$ T.

a) Halle la fuerza magnética sobre un electrón proveniente de los rayos cósmicos que se mueve verticalmente hacia abajo a $1,0 \times 10^5$ m/s.

b) Halle el cociente entre la fuerza magnética y el peso del electrón.

c) Si el campo eléctrico atmosférico en dicho lugar es vertical, entrante a la superficie terrestre y de una magnitud de 120 V/m ¿cuánto vale la fuerza eléctrica que actúa sobre el electrón y la fuerza resultante total?

$$a) \bar{F}_B = q\bar{v} \times \bar{B} = -e\bar{v} \times \bar{B}$$

$$F_B = evB \sin \theta = (1,60 \times 10^{-19})(1,0 \times 10^5)(5,8 \times 10^{-5}) \sin 17^\circ = 2,71 \times 10^{-19} \text{ N}$$

$$F_B = 2,7 \times 10^{-19} \text{ N}$$

Esta fuerza es perpendicular al plano que forman \mathbf{v} y \mathbf{B}

b) masa del electrón: $9,11 \times 10^{-31}$ kg $W = mg = (9,11 \times 10^{-31}) \times 9,8 = 8,93 \times 10^{-30}$ N

$$\frac{F_B}{W} = \frac{2,71 \times 10^{-19}}{8,93 \times 10^{-30}} = 3,03 \times 10^{10}$$

$$F_B = 3,0 \times 10^{10} \text{ mg}$$

c) Fuerza eléctrica: $F_E = eE = (1,60 \times 10^{-19})(120) = 1,92 \times 10^{-17}$ N

$$F_E = 1,9 \times 10^{-17} \text{ N (vertical hacia arriba)}$$

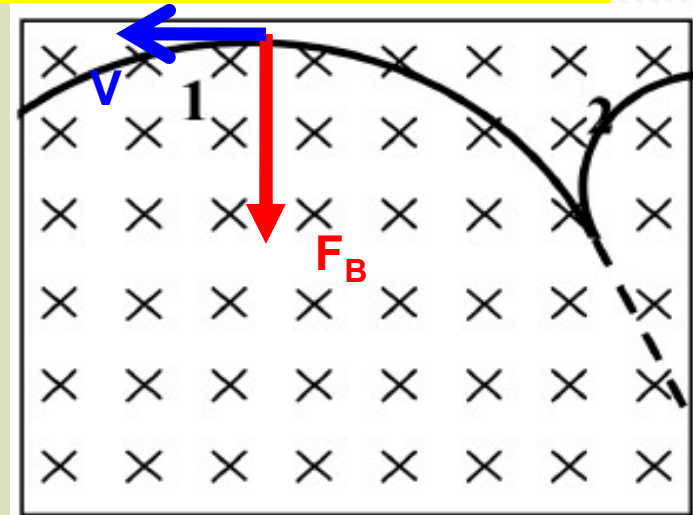
Como F_B y F_E son perpendiculares, la resultante valdrá

$$F = \sqrt{F_B^2 + F_E^2} = \sqrt{(2,71 \times 10^{-19})^2 + (1,92 \times 10^{-17})^2} = 1,92 \times 10^{-17} \text{ N}$$

$$F = 1,9 \times 10^{-17} \text{ N}$$

EJEMPLO: ejercicio 3.1.6

Una partícula neutra choca con un átomo de hidrógeno en reposo que se encuentra en un campo magnético uniforme, disociándose en un electrón y un protón. En la figura, la trayectoria de la partícula neutra está indicada por la línea quebrada, y las trayectorias de las partículas cargadas están indicadas por los arcos 1 y 2.



- ¿Cuál de las trayectorias corresponde al protón y cuál al electrón?
- ¿Cuál de los dos tiene mayor cantidad de movimiento?
- Expresa el cociente entre las velocidades de las partículas en función de los radios de ambas trayectorias.

a) Analizando la curvatura 1, deducimos que corresponde al protón, ya que debe tener carga positiva, la 2 corresponde al electrón.

b) $R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$ qB es constante, el de mayor p , es el que tiene R mayor. Por tanto el protón tiene mayor cantidad de movimiento.

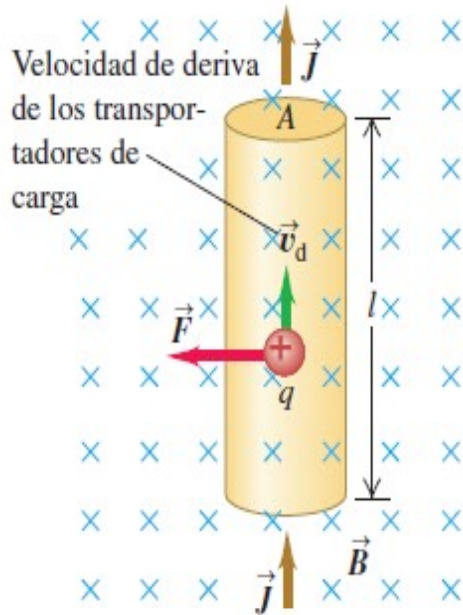
c) $v = \frac{qBR}{m}$

$$v_p = \frac{qBR_p}{m_p} \quad v_e = \frac{qBR_e}{m_e}$$

$$\frac{v_p}{v_e} = \frac{qBR_p}{m_p} \frac{m_e}{qBR_e} = \frac{m_e R_p}{m_p R_e}$$



Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente



Segmento rectilíneo alambre conductor, de longitud l y área A ; la corriente I va de abajo hacia arriba.

Campo magnético uniforme \mathbf{B} perpendicular al plano del diagrama y dirigido *hacia el plano*.

Suponemos que las cargas móviles son positivas.

Velocidad de deriva \mathbf{v}_d es hacia arriba, perpendicular a \mathbf{B} .

Fuerza media sobre cada carga es dirigida a la izquierda y como \mathbf{B} y \mathbf{v}_d son perpendiculares: $F = q v_d B$.

Fuerza sobre todos los portadores del segmento del alambre: n número de cargas por unidad de volumen volumen del segmento: Al , Número de cargas igual a nAl .

Como $I = nqv_d A$: $F = IlB$

$$F = (nAl)(qv_d B) = (nqv_d A)(lB)$$

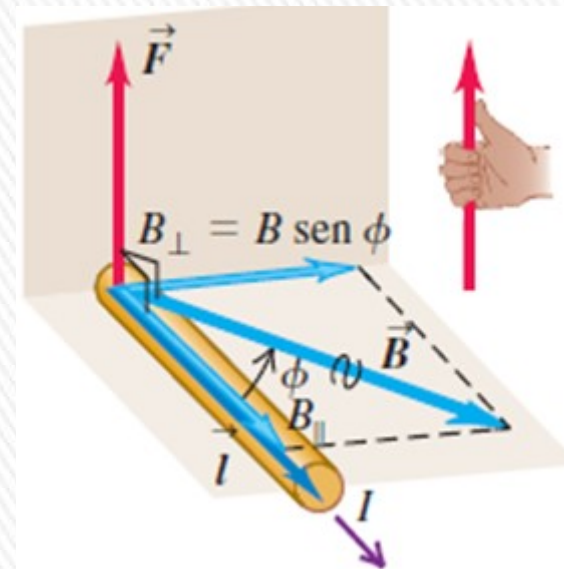
Si \mathbf{B} no es perpendicular al alambre, forma un ángulo Φ con él, solo la componente de \mathbf{B} perpendicular al alambre ejerce una fuerza; tal componente es $B_{\perp} = B \sin \Phi$:

$$F = IlB_{\perp} = IlB \sin \Phi$$

Si el segmento de alambre se representa con un vector l a lo largo del alambre y en el sentido de la corriente:

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = BiL\text{sen}\phi$$



Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente

Si el conductor no es recto, se divide en segmentos infinitesimales $d\vec{l}$.

La fuerza $d\vec{F}$ en cada segmento es

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

Esta expresión se integra (integral de línea) a lo largo del alambre para obtener la fuerza total sobre un conductor de cualquier forma.

¿Qué sucede cuando las cargas móviles son negativas, como los electrones en un metal?

Una corriente ascendente corresponde a una velocidad de deriva descendente.

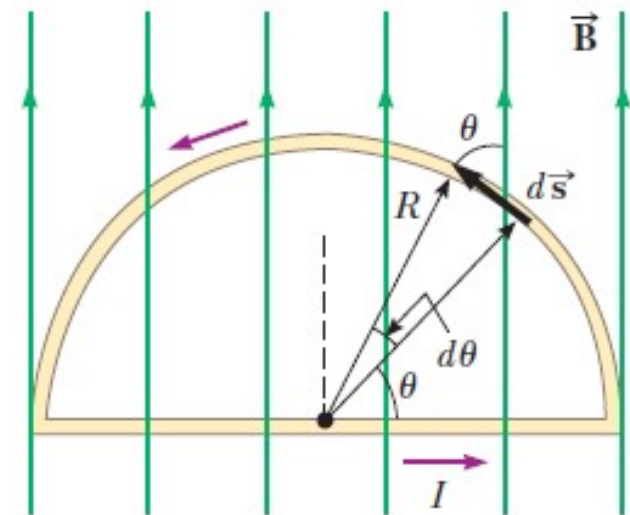
Pero como q ahora es *negativa*, el sentido de la fuerza es la misma que antes.

Las ecuaciones son válidas para cargas *tanto positivas como negativas*, e incluso cuando los dos signos de carga están presentes a la vez.

Se puede probar que en general que:

La fuerza magnética sobre un alambre portador de corriente curvo en un campo magnético uniforme es igual a la de un alambre recto que conecta los puntos finales y porta la misma corriente.

La fuerza magnética neta que actúa sobre cualquier espira de corriente cerrado en un campo magnético uniforme es cero.



Fuerza y torque en una espira de corriente

Espira rectangular que transporta corriente I , de lados a y b , en \mathbf{B} uniforme. \mathbf{B} forma un ángulo Φ con la normal al plano de la espira.

La fuerza neta \mathbf{F} sobre la espira es nula ya que la fuerza sobre uno de los lados es igual y opuesta a la fuerza que surge en el lado opuesto.

Área de la espira: $A=a.b$

El producto IA se denomina **momento dipolar magnético** o **momento magnético** de la espira, el cual se denota: μ

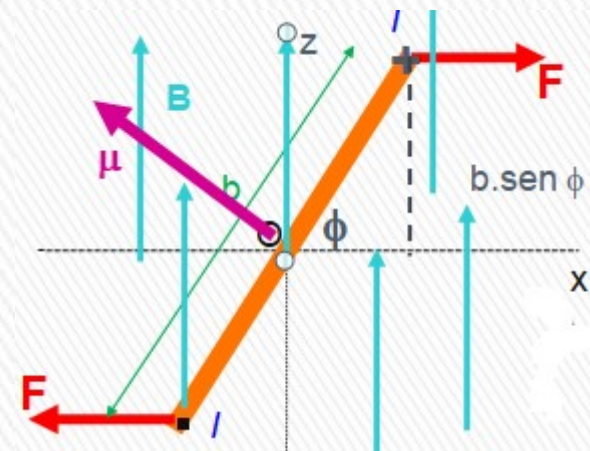
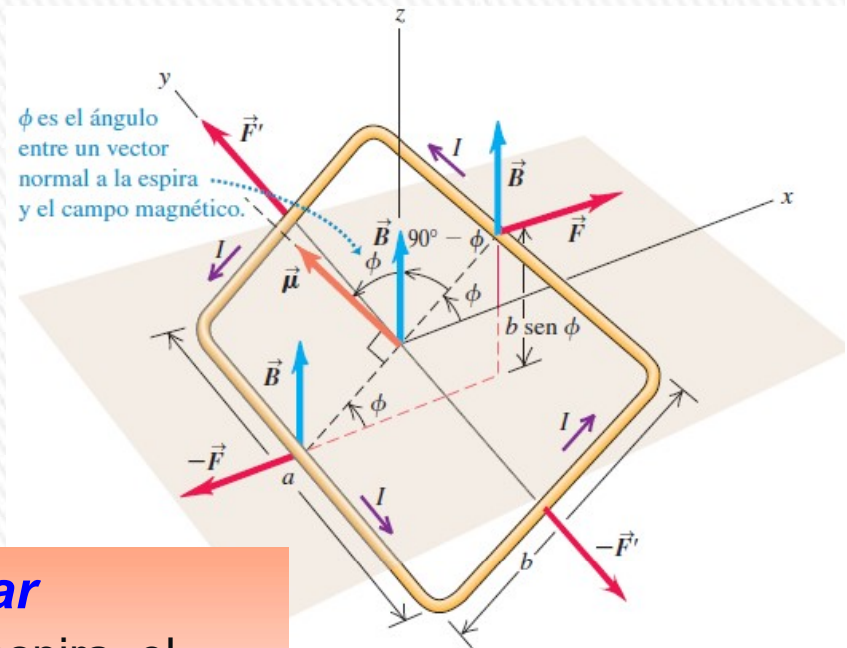
$$\mu = IA$$

\mathbf{F}' y $-\mathbf{F}'$ están en la misma línea, por lo que originan un torque neto igual a cero con respecto a cualquier punto. \mathbf{F} y $-\mathbf{F}$ quedan a lo largo de distintas líneas de acción, y cada una origina un torque con respecto al eje y , con sentido $+y$. El brazo de palanca para cada una de estas fuerzas es $(b/2)\sin\Phi$. $\tau = 2F \left(\frac{b}{2}\right) \sin\Phi = (IBa)(b \sin\Phi)$

$$\tau = IBA \sin\Phi$$

$$\tau = \mu B \sin\Phi$$

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



Fuerza y torque en una espira de corriente

$$\tau = \mu B \sin \Phi$$

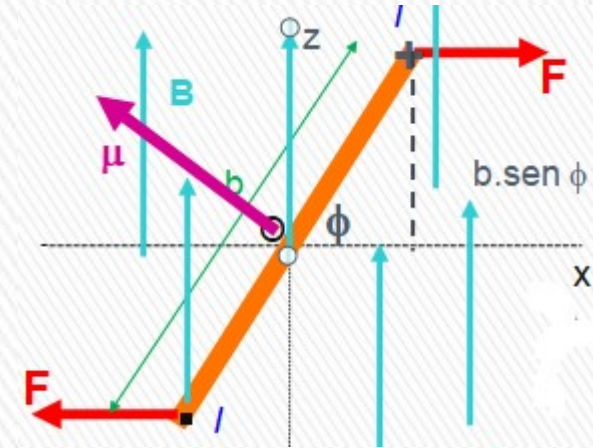
En forma vectorial:

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

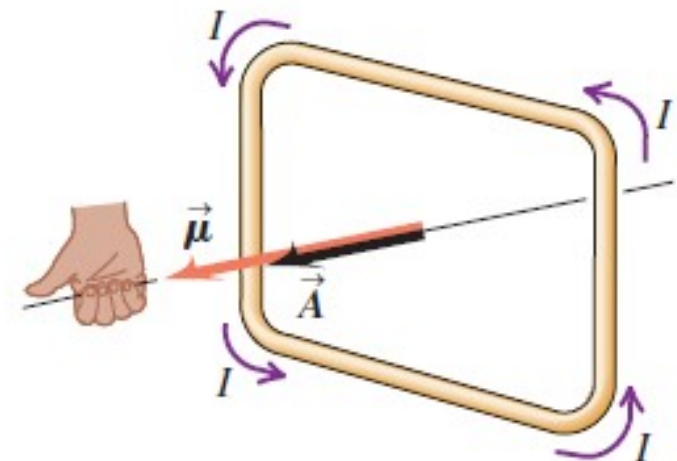
El torque tiende a hacer girar la espira en la dirección en que *disminuye* Φ , es decir, hacia su posición de equilibrio estable donde la espira queda en el plano xy *perpendicular* a la dirección del campo (en la figura sentido horario).

Una espira de corriente, o cualquier otro cuerpo que experimenta un torque magnético dada por la ecuación anterior también recibe el nombre de **dipolo magnético**.

donde Φ es el ángulo entre la normal a la espira (dirección del área vectorial \mathbf{A} y \mathbf{B} .



Regla de la mano derecha para determinar μ



EFECTO HALL

Descubierto en 1879 por Edwin Hall.

Conductor de forma de banda ancha, I según $+x$,
 B uniforme según $+y$; velocidad de deriva v_d de
portadores de carga $|q|$.

Figuras: a) portadores negativos (electrones) y
b) portadores positivos.

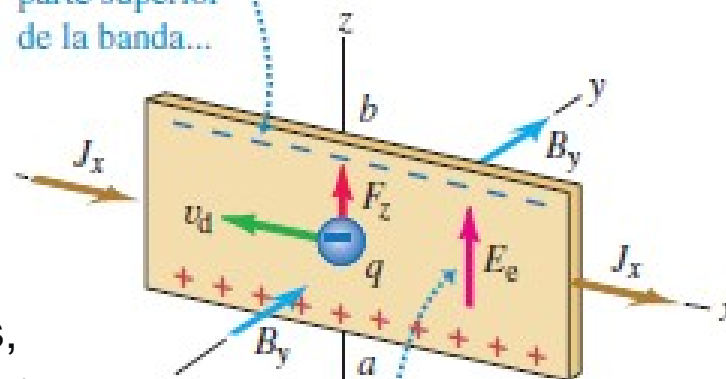
La fuerza magnética va hacia arriba en ambos casos,
Una carga móvil es impulsada hacia el borde *superior*
de la banda por la fuerza magnética $F_z = |q|v_d B$.
En a) en la parte superior se acumulan electrones, y
queda exceso de cargas positivas en el borde inferior.
Surge un campo eléctrico transversal E_e , que en un
momento hace que la fuerza eléctrica equilibre la
magnética, y ya no se desvían las cargas móviles.

Ese campo eléctrico provoca una diferencia de
potencial transversal entre los bordes opuestos:
el **voltaje de Hall** o **fem de Hall**.

Los experimentos demuestran que para
metales, el borde superior de la banda se
**carga negativamente, lo cual demuestra que
los portadores de carga en un metal son en
verdad electrones.**

a) Portadores de carga negativa (electrones)

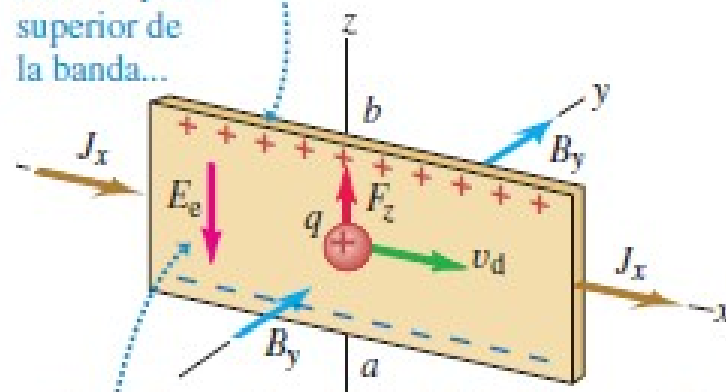
Los portadores de carga son empujados hacia la
parte superior
de la banda...



... por lo que el punto a tiene un potencial mayor
que el punto b.

b) Portadores de carga positiva

Los portadores de carga otra vez son empujados
hacia la parte
superior de
la banda...



... de modo que la polaridad de la diferencia de
potencial es opuesta a la de los portadores
de carga negativa.

EJEMPLO: ejercicio 3.1.7

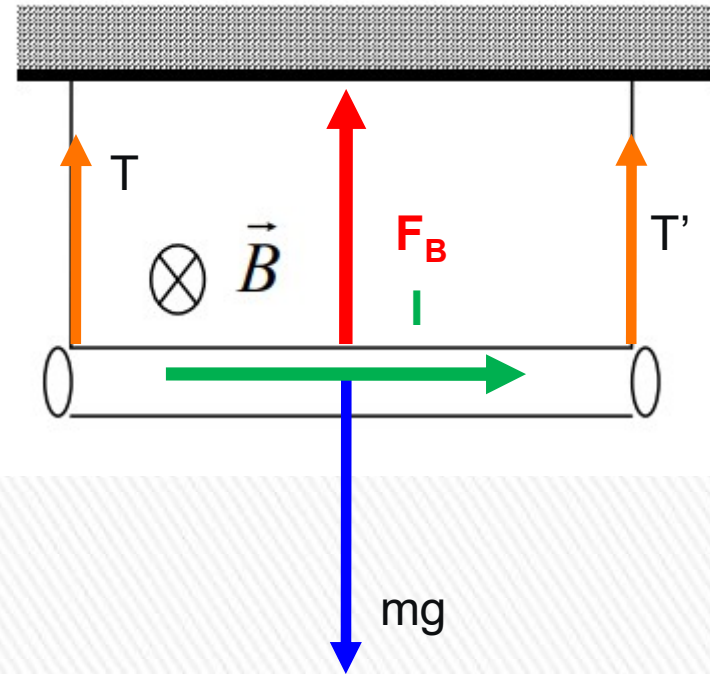
Un conductor suspendido por dos cuerdas tiene una masa por unidad de longitud de $0,040 \text{ kg/m}$. Determine el sentido y módulo de la corriente en el conductor para que la tensión en los alambres de soporte sea cero, si el campo magnético sobre la región es de $3,6 \text{ T}$ entrante.

Para que la tensión en los alambres de soporte sean cero, la fuerza magnética F_B debe ser igual y opuesta al peso del conductor.

Sea $\lambda = 0,040 \text{ kg/m}$ la masa por unidad de longitud.

$$m \cdot g = F_B$$
$$\lambda \cdot L \cdot g = B \cdot I \cdot L$$

$$I = \frac{mg}{LB} = \frac{\lambda g}{B} = 0,040 \frac{9,80}{3,6} = 0,109 \text{ A}$$



**$I = 0,11 \text{ A}$ en el sentido
mostrado en la figura**