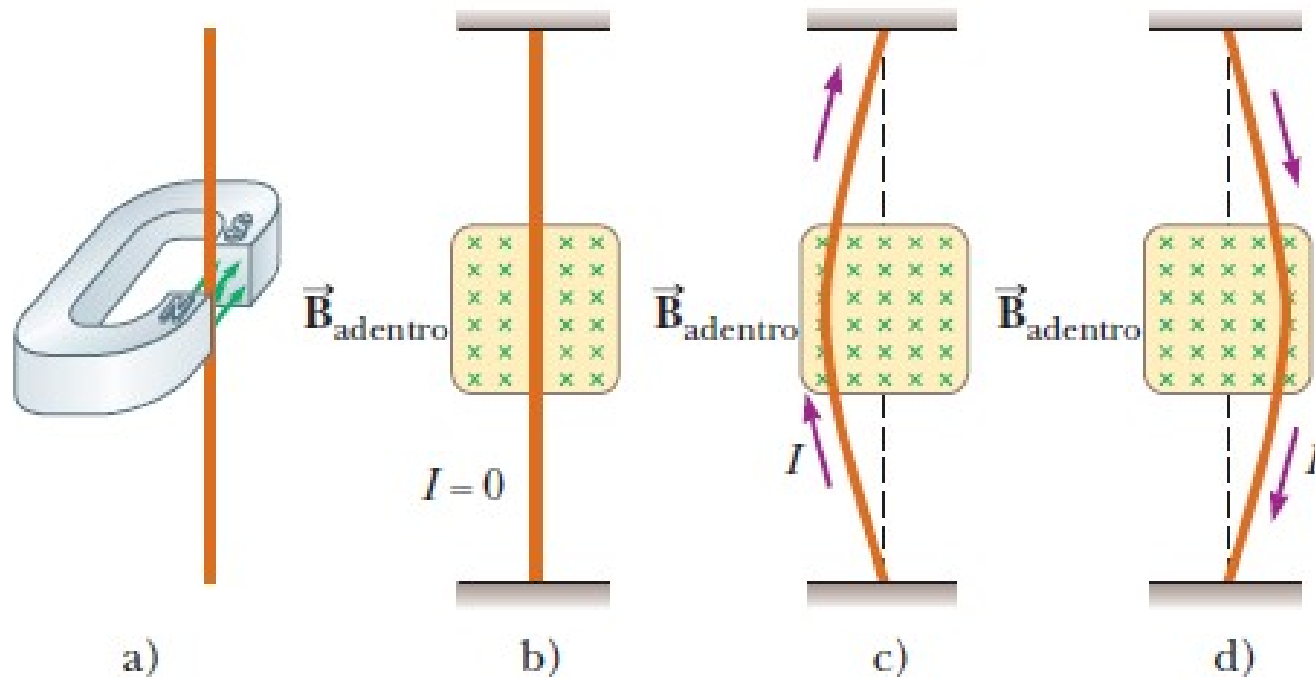


## 03.2- CAMPO MAGNÉTICO (II)



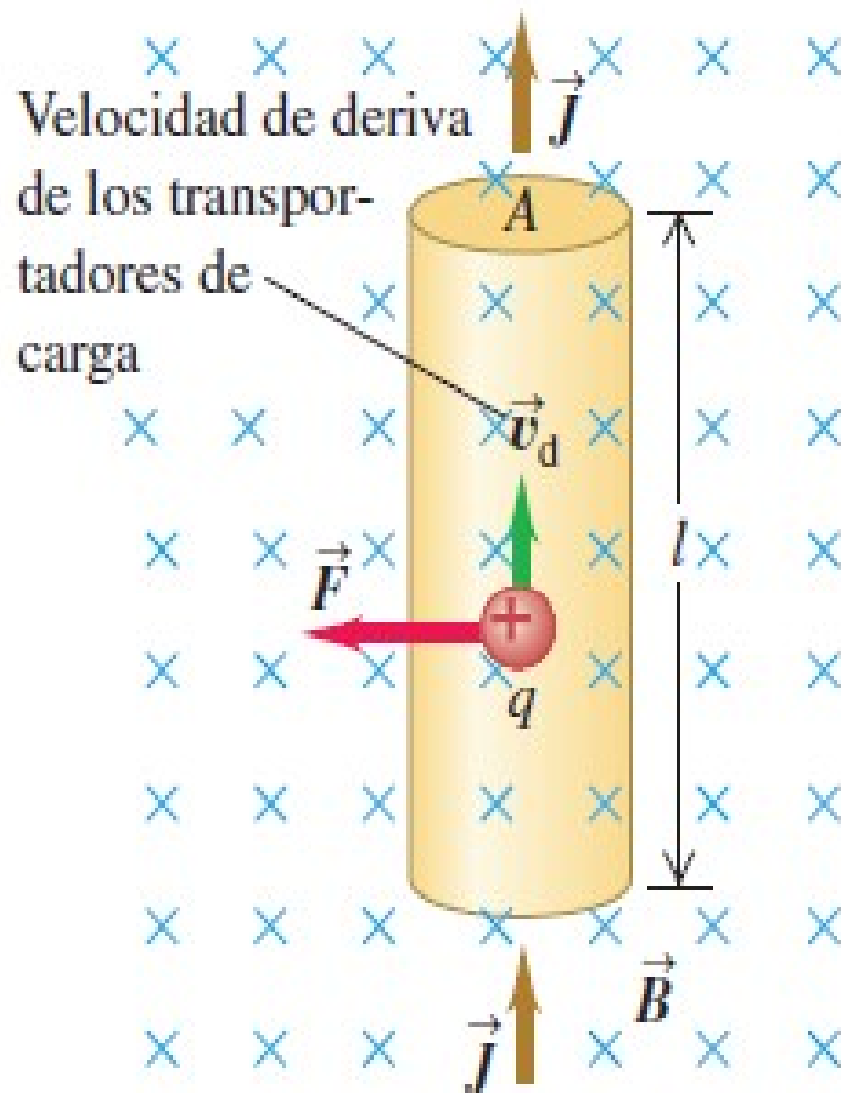
Las auroras polares aparecen cuando el viento solar (eyección de partículas solares cargadas producidas por las reacciones de fusión que se producen en el Sol) choca con la magnetósfera de la Tierra, "esfera" que nos rodea generada por el campo magnético terrestre. Cuando dicha masa solar choca con nuestra esfera protectora, estas radiaciones solares se desplazan a lo largo de las líneas de campo magnético. En el hemisferio que se encuentra en la etapa nocturna de la Tierra en los polos, donde están las otras líneas de campo magnético, se va almacenando dicha energía hasta que no se puede almacenar más, y esta energía almacenada se dispara en forma de radiaciones electromagnéticas sobre la ionósfera terrestre, creando estos efectos visuales.

# Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



- Alambre suspendido verticalmente entre los polos de un imán.
- El arreglo que se muestra en el inciso a) mira hacia el polo sur del imán, de manera que el campo magnético (cruces verdes) se dirige hacia adentro de la página. Cuando no existe corriente en el alambre, éste sigue vertical.
- Cuando la corriente se dirige hacia arriba, el alambre se flexiona hacia la izquierda.
- Cuando la corriente se dirige hacia abajo, el alambre se flexiona hacia la derecha.

## Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente



Sea un segmento rectilíneo de alambre conductor, con una longitud  $l$  y área de sección transversal  $A$ ; la corriente va de abajo hacia arriba.

El alambre está en un campo magnético uniforme perpendicular al plano del diagrama y dirigido hacia el plano.

En primer lugar, supondremos que las cargas móviles son positivas.

La velocidad de deriva  $\vec{v}_d$  es hacia arriba, perpendicular a  $\vec{B}$ .

La fuerza media sobre cada carga es dirigida a la izquierda, como se muestra en la figura; como  $\vec{B}$  y  $\vec{v}_d$  son perpendiculares, la magnitud de la fuerza es  $F = q v_d B$ .





## Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente

Si la fuerza sobre cada portador vale  $F = q v_d B$

Podemos calcular la fuerza sobre todos los portadores del segmento del alambre. El número de cargas por unidad de volumen es  $n$ ; el segmento tiene un volumen  $Al$  y contiene un número de cargas igual a  $nAl$ . La fuerza total sobre todas las cargas en movimiento en este segmento tiene una magnitud

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

Como la densidad de corriente es  $J = nqv_d$ . El producto  $JA$  es la corriente total  $I$ :

$$F = IlB$$

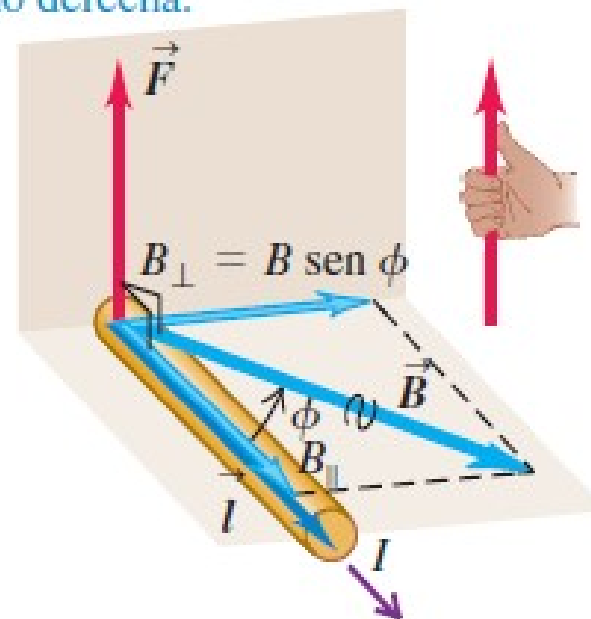
Si el campo  $\mathbf{B}$  no es perpendicular al alambre sino que forma un ángulo  $\Phi$  con él, solo la componente de  $\mathbf{B}$  perpendicular al alambre (y a las velocidades de deriva de las cargas) ejerce una fuerza; tal componente es  $B_{\perp} = B \sin \Phi$ .

Entonces, la fuerza magnética sobre el segmento de alambre es

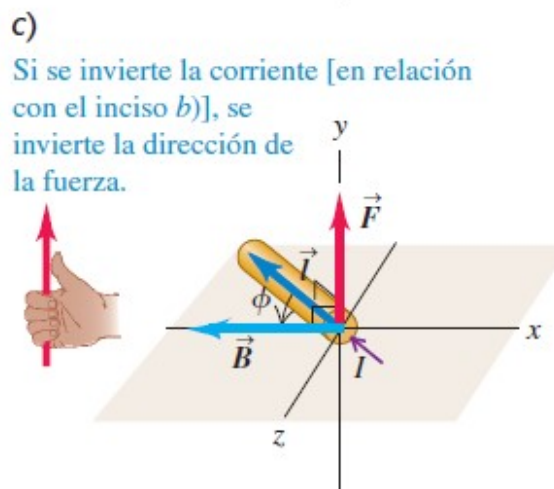
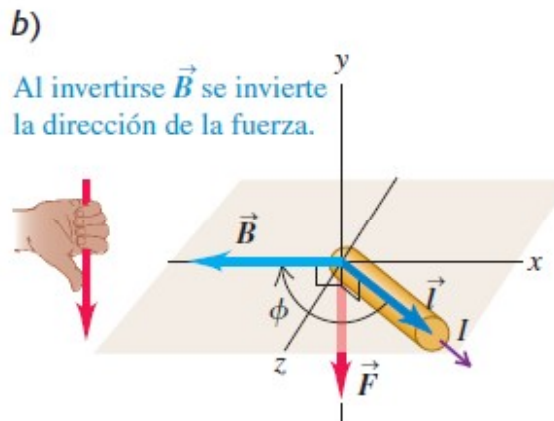
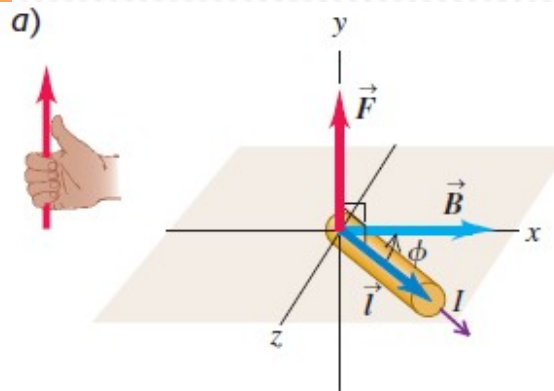
$$F = IlB_{\perp} = IlB \sin \Phi$$

Fuerza  $\vec{F}$  sobre un alambre recto que conduce corriente positiva y está orientado a un ángulo  $\phi$  con respecto al campo magnético  $\vec{B}$ :

- La magnitud es  $F = IlB_{\perp} = IlB \sin \phi$ .
- La dirección de  $\vec{F}$  está dada por la regla de la mano derecha.



# Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente



Si el segmento de alambre se representa con un vector  $\vec{l}$  a lo largo del alambre y en el sentido de la corriente; entonces, la fuerza sobre este segmento es:

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

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 a lo largo del alambre para obtener la fuerza total sobre un conductor de cualquier forma.

La integral es una **integral de línea**, la misma operación matemática que se empleó para definir el trabajo y el potencial eléctrico.

¿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.

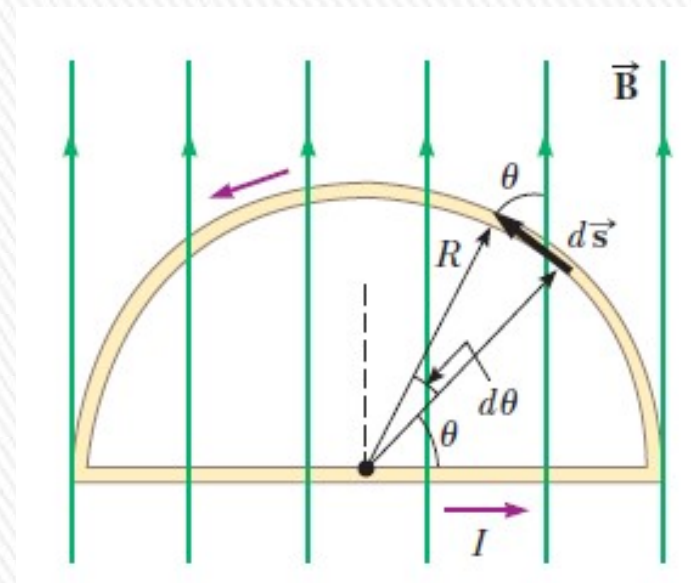


# Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente

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.

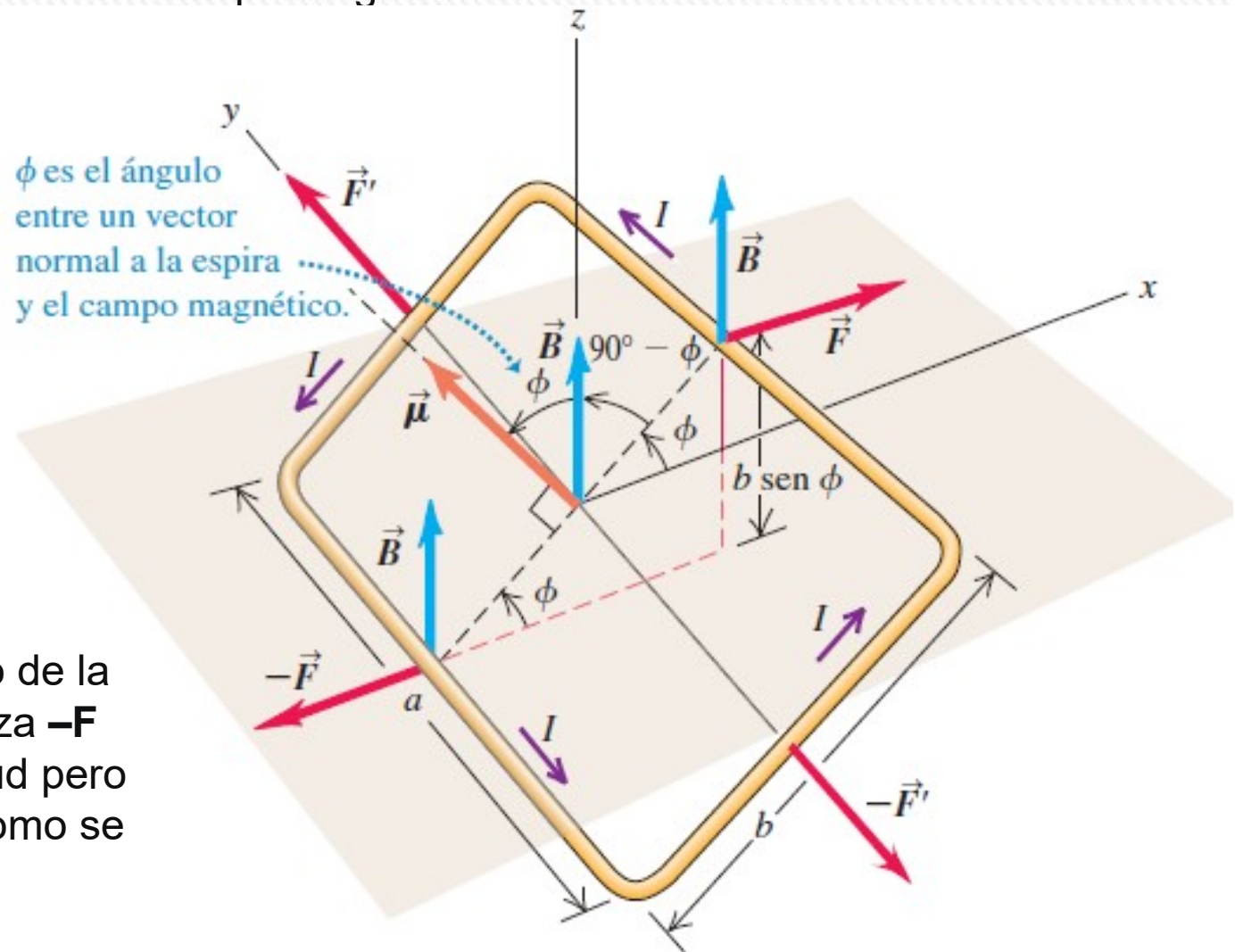


# Fuerza y torque en una espira de corriente

Vamos a analizar una espira rectangular de corriente cuyos lados tienen longitudes  $a$  y  $b$ . en un campo magnético uniforme. Suponemos que la espira transporta una corriente  $I$ . Una línea perpendicular al plano de la espira (*normal al plano*) forma un ángulo  $\Phi$  con la dirección del campo magnético.

La fuerza  $\mathbf{F}$  sobre el lado derecho de la espira (longitud  $a$ ) va hacia la derecha, según  $+x$ . En este lado,  $\mathbf{B}$  es perpendicular a la dirección de la corriente, y la fuerza sobre este lado tiene magnitud:  $F = I \cdot a \cdot B$ .

Sobre el lado opuesto de la espira actúa una fuerza  $-\mathbf{F}$  con la misma magnitud pero dirección contraria, como se observa en la figura.





# Fuerza y torque en una espira de corriente

Los lados de longitud igual a  $b$  forman un ángulo  $(90^\circ - \Phi)$  con la dirección de  $\vec{B}$ .

Las fuerzas sobre estos lados son los vectores  $\vec{F}'$  y  $-\vec{F}'$  su magnitud  $F'$  está dada por:

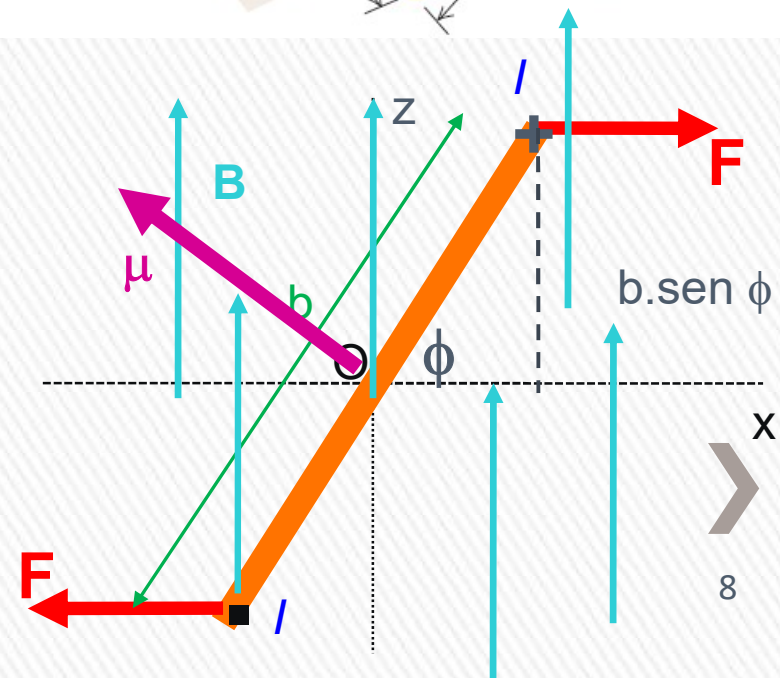
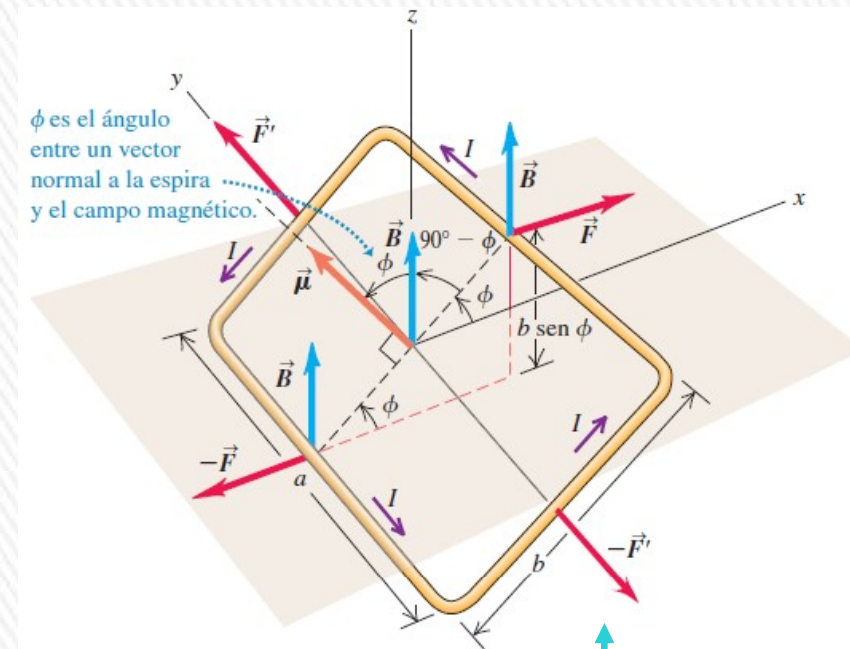
$$F' = lbB \sin(90^\circ - \Phi) = lbB \cos \Phi$$

Las líneas de acción de ambas fuerzas están sobre el eje  $y$ .

La fuerza total en la espira es igual a cero porque las fuerzas en lados opuestos se cancelan por pares.

La fuerza neta sobre una espira de corriente en un campo magnético uniforme es igual a cero.

Sin embargo, el torque neto, en general, no es igual a





# Fuerza y torque en una espira de corriente

Las dos fuerzas  $\vec{F}'$  y  $-\vec{F}'$  están en la misma línea, por lo que originan un torque neto igual a cero con respecto a cualquier punto. Las dos fuerzas  $\vec{F}$  y  $-\vec{F}$  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  $(b/2)\sin\Phi$ .

Entonces la magnitud del torque neto es:

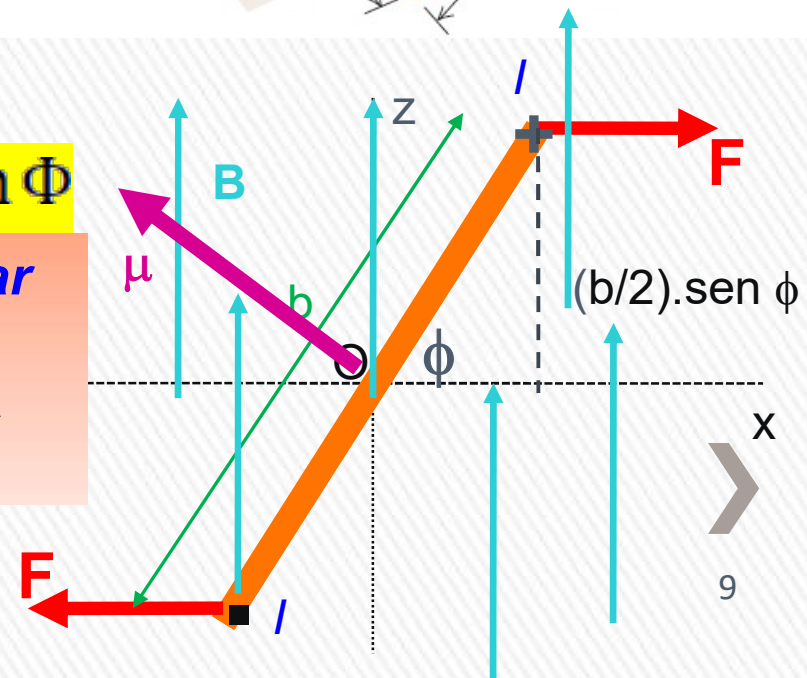
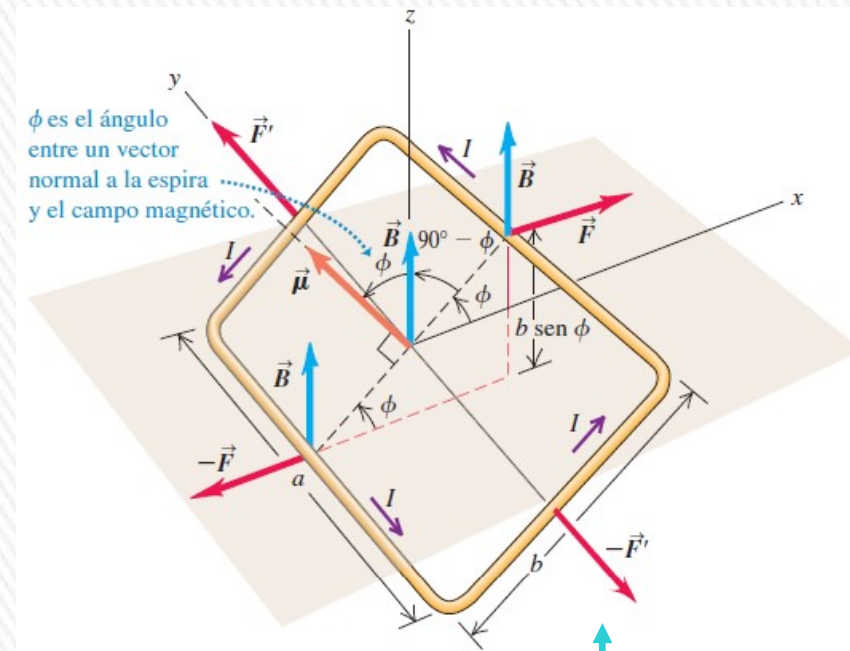
$$\tau = 2F \left(\frac{b}{2}\right) \sin \Phi = (IBa)(b \sin \Phi)$$

El área  $A$  de la espira es igual a  $ab$ :

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

El producto  $IA$  se denomina **momento dipolar magnético** o **momento magnético** de la espira, el cual se denota con el símbolo  $\mu$  (letra griega mu).

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

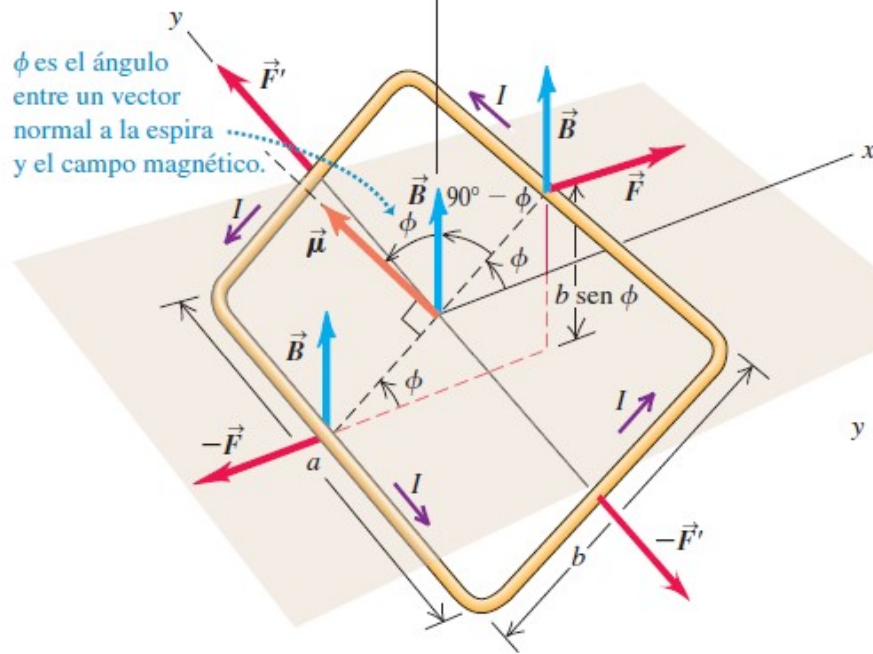


# Fuerza y torque en una espira de corriente

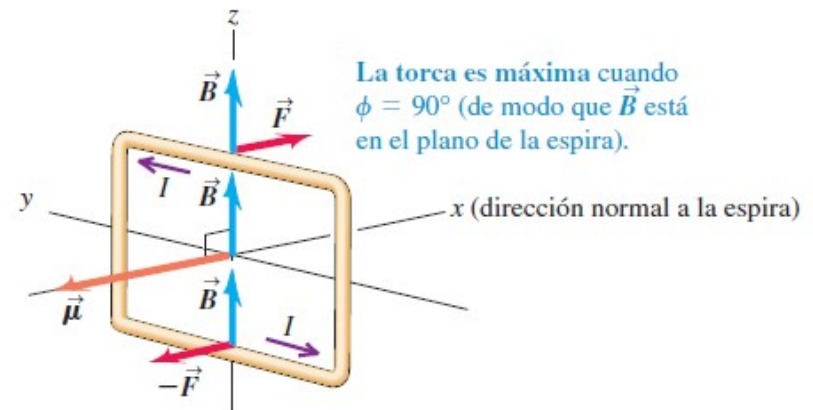
a)

Los dos pares de fuerzas que actúan sobre la espira se cancelan, por lo que no hay fuerza neta que actúe sobre ella.

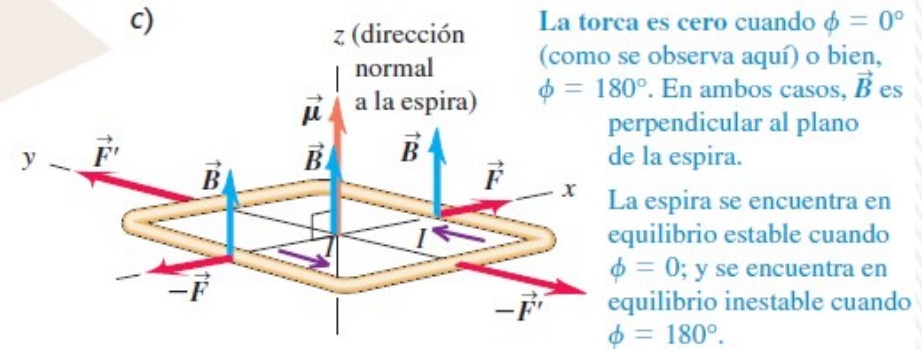
Sin embargo, las fuerzas en los lados  $a$  de la espira ( $\vec{F}$  y  $-\vec{F}$ ) producen una torca  $\tau = (IBa)(b \sin \phi)$  en la espira.



b)



c)



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

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

En forma vectorial:

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

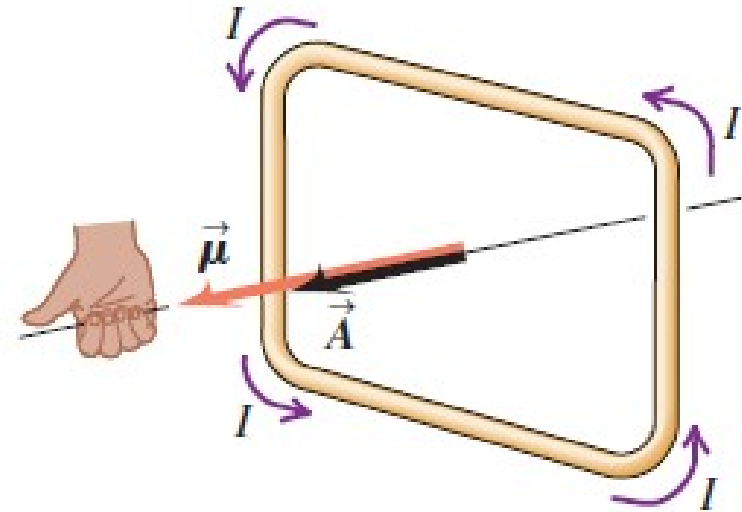


# Fuerza y torque en una espira de corriente

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

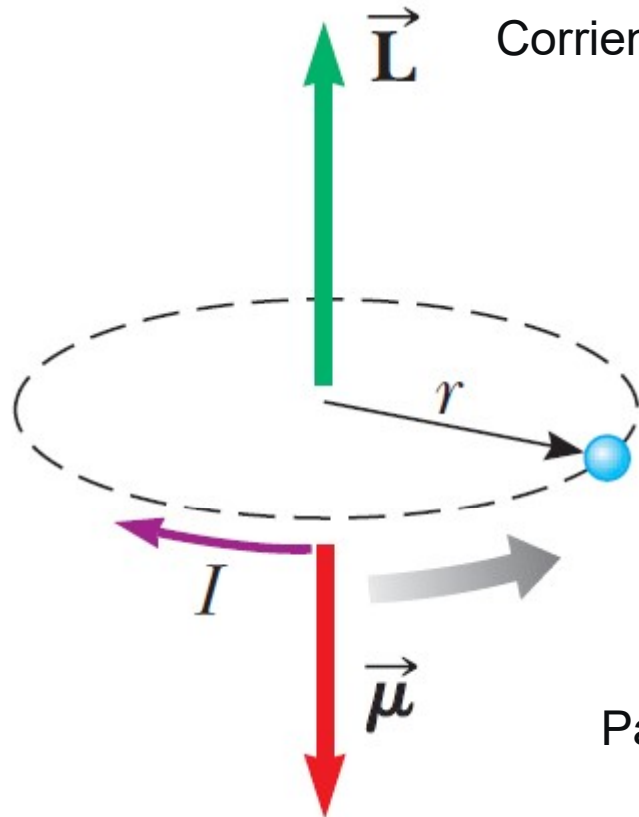
El torque tiende a hacer girar la espira en la dirección en que *disminuye*  $\Phi$ , es decir, hacia su posición de equilibrio estable donde la espira queda en el plano *xy perpendicular* a la dirección del campo.

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**.





# Momento dipolar magnético de una carga en movimiento orbital



Corriente equivalente de una carga eléctrica que orbita :

$$I = \frac{q}{T} = \frac{q}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{q\omega}{2\pi} = \frac{qv}{2\pi r}$$

$$\mu = IA = \frac{qv}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{qvr}{2}$$

Introduciendo el momento angular  $L = mvr$ :

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{qmvvr}{m} = \frac{1}{2} \left( \frac{q}{m} \right) L$$

Para un electrón (carga negativa):

$$\bar{\mu} = - \left( \frac{e}{2m_e} \right) \bar{L}$$

Un electrón que se mueve en la dirección de la flecha gris en una órbita circular de radio  $r$  tiene un momento angular  $L$  en una dirección y un momento magnético  $\mu$  en la dirección opuesta. Porque el electrón tiene una carga negativa, la dirección de la corriente debida a su movimiento alrededor del núcleo es opuesta a la dirección de dicho movimiento.

## Momento dipolar magnético de una carga en movimiento orbital

El momento angular orbital está cuantizado y es igual a múltiplos de  $\hbar = h/2\pi = 1,05 \times 10^{-34}$  J.s (h constante de Planck).

El valor diferente de cero más pequeño del momento magnético del electrón que resulta de su movimiento orbital es

$$\mu = \sqrt{2} \frac{e}{2m_e} \hbar$$

En general el momento magnético de un electrón en un átomo es cancelado por el correspondiente de otro electrón en órbita en dirección opuesta. El resultado neto es que, para la mayor parte de los materiales, **el efecto magnético producido por el movimiento orbital de los electrones es cero o muy pequeño.**

Momento magnético característicamente asociado con el espín de un electrón tiene el valor

$$\mu_{\text{espín}} = \mu_{\text{Bohr}} = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$$



# Momento dipolar magnético de una carga en movimiento orbital

En átomos con muchos electrones, forman parejas con espines opuestos entres sí; por lo que los momentos magnéticos del espín se cancelan. Átomos con número impar de electrones deben tener por lo menos un electrón sin par, por lo que el espín deberá tener algún momento magnético. El momento magnético total de un átomo es la suma vectorial de los momentos magnéticos orbitales y del espín.

Momentos magnéticos de algunos átomos y iones

Átomo o ion	Momento magnético ( $10^{-24}$ J/T)
H	9.27
He	0
Ne	0
Ce <sup>3+</sup>	19.8
Yb <sup>3+</sup>	37.1

El núcleo de un átomo también tiene un momento magnético asociado con sus protones y neutrones constitutivos. Sin embargo, el momento magnético de un protón o un neutrón es mucho más pequeño que el de un electrón y por lo general no se considera, ya que las masas del protón y del neutrón son mucho mayores que la del electrón, sus momentos magnéticos son  $10^3$  veces menores que los del electrón.



# EFECTO HALL

Descubierto en 1879 por el estudiante de posgrado Edwin Hall.

Sea un conductor de forma de banda ancha, con la corriente  $I$  según  $+x$ , un campo magnético  $B$  uniforme según  $+y$ ; y velocidad de deriva  $v_d$  de portadores de carga  $|q|$ .

La figura a) muestra portadores de carga negativos (electrones) y la b) portadores positivos.

En ambos casos, la fuerza magnética va hacia arriba, del mismo modo en que la fuerza magnética en un conductor es la misma sin que importe que las cargas en movimiento sean positivas o negativas.

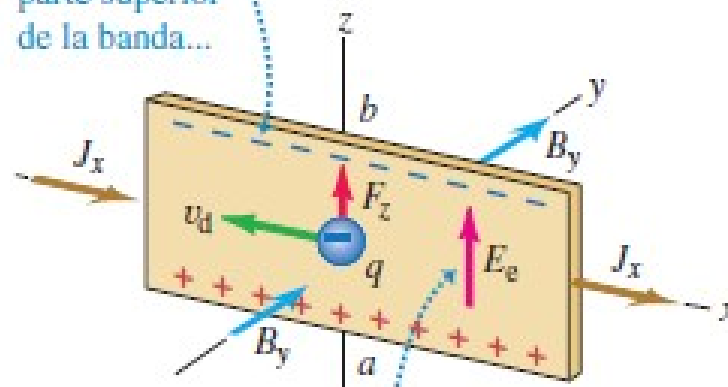
Una carga móvil es impulsada hacia el borde superior de la banda por la fuerza magnética

$$F_z = |q|v_d B.$$

En el caso a) en la parte superior se acumulan electrones, dejando un 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.

a) Portadores de carga negativa (electrones)

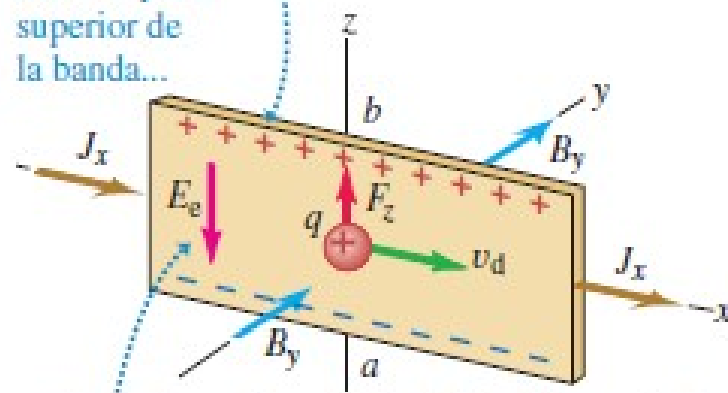
Los portadores de carga son empujados hacia la parte superior de la banda...



... 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.

# EFEECTO HALL

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

La polaridad depende de si las cargas móviles son positivas o negativas.

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

En el estado estable (de equilibrio), cuando las fuerzas  $qE$  y  $qv_d B$  tienen la misma magnitud y sentido opuesto

Suponiendo que cuando se alcanza el equilibrio,  $E$  es uniforme, entonces  $\Delta V_H = E \cdot d$

Siendo  $\Delta V_H$  el voltaje Hall

$$\Delta V_H = Ed = Bv_d d = B \left( \frac{J}{nq} \right) d$$

Como:  $J = I/A = I/(d \cdot t)$

$$\Delta V_H = B \left( \frac{I}{Anq} \right) d = Bd \frac{I}{nq(d \cdot t)} = \frac{BI}{nqt}$$

