

Campos Magnéticos

Eduardo Flández¹

¹Departamento de Física,
Facultad de ciencias,
Universidad de Chile.

Electromagnetismo

- 1 Campos y fuerzas magnéticas
- 2 Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme
- 3 Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético
- 4 Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente
- 5 Momento de torsión sobre una espira de corriente en un campo magnético uniforme
- 6 El efecto Hall

1. Campos y fuerzas magnéticas

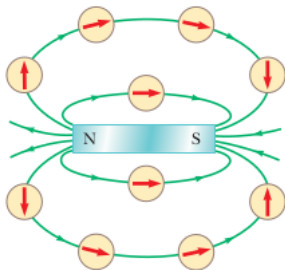
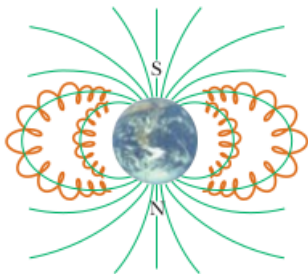


Figure: (Serway)

- 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.
- Esto es, polos iguales (N-N o S-S) se repelen y polos opuestos (N-S) se atraen.

1. Campos y fuerzas magnéticas



- Observe que el Polo Norte geográfico de la Tierra es magnéticamente un polo sur, en tanto que su Polo Sur geográfico es su polo norte.
- Dado que los polos magnéticos opuestos se atraen, el polo de un imán que es atraído por el Polo Norte de la Tierra es el polo norte del imán, y el polo atraído por el Polo Sur geográfico de la Tierra es el polo sur del imán.

1. Campos y fuerzas magnéticas



Figure: fuente: IAU Symposium 337

- A pesar de que la \vec{F} entre polos magnéticos es de otro modo similar a la \vec{F} entre dos cargas eléctricas, estas últimas pueden aislarse (recuerde el electrón y el protón), considerando que nunca ha sido posible aislar un solo polo magnético.
- Es decir, los polos magnéticos siempre se encuentran en pares. Independientemente de cuántas veces se divida un imán, cada trozo resultante tendrá siempre un polo norte y un polo sur.

1. Campos y fuerzas magnéticas

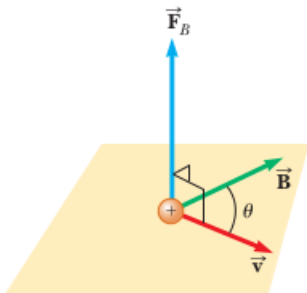


Figure: fuente: IAU Symposium 337

- Recuerde que cualquier carga eléctrica está rodeada por un \vec{E} . Además de contener un \vec{E} , el espacio que rodea a cualquier carga eléctrica en movimiento, también contiene un \vec{B} .
- También cualquier sustancia magnética que forma parte de un imán permanente está rodeada de un \vec{B} .
- Igual que en el caso del \vec{E} , es posible representar el \vec{B} gráficamente utilizando líneas de \vec{B} .

1. Campos y fuerzas magnéticas

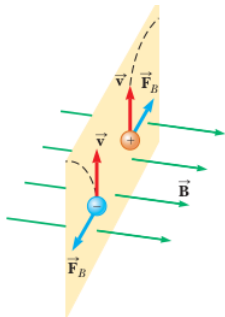
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$



- Es posible definir un \vec{B} en algún punto en el espacio en función de la fuerza magnética \vec{F}_B que ejerce el \vec{B} sobre una partícula con carga que se mueve con una velocidad \vec{v} , misma que se identifica como el objeto de prueba.

1. Campos y fuerzas magnéticas

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$



- La \vec{F}_B ejercida sobre una carga positiva tiene dirección opuesta a la dirección de la fuerza magnética ejercida sobre una carga negativa que se mueva en la misma dirección
- \vec{F}_B queda en la dirección del pulgar si q es positiva y en la dirección opuesta si q es negativa.
- La magnitud de la \vec{F}_B sobre una partícula cargada.

$$F_B = |q|vB \sin \theta \quad (3)$$

1. Campos y fuerzas magnéticas

- 1 El vector fuerza eléctrica actúa a lo largo de la dirección del campo eléctrico, en tanto que el vector fuerza magnética actúa perpendicularmente al campo magnético.
- 2 La fuerza eléctrica actúa sobre una partícula con carga sin importar si ésta se encuentra en movimiento, en tanto que la fuerza magnética actúa sobre una partícula con carga sólo cuando está en movimiento.
- 3 La fuerza eléctrica efectúa trabajo al desplazar una partícula con carga, en tanto que la fuerza magnética asociada con un campo magnético estable no efectúa trabajo cuando se desplaza una partícula, debido a que la fuerza es perpendicular al desplazamiento. El campo magnético, puede modificar la dirección del vector velocidad pero no puede cambiar la rapidez ni la energía cinética de la partícula.

1. Campos y fuerzas magnéticas

La unidad del SI del campo magnético es la tesla (T):

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

Dado que un ampere se define como un coulomb por cada segundo,

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

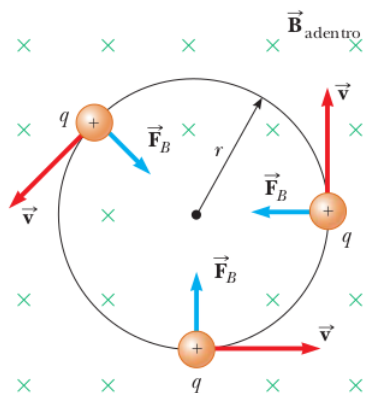
Otra unidades es el gauss (G), se relaciona con la tesla :

$$1 T = 10^4 G.$$

Superficie del sol: 10^{-2} Tesla

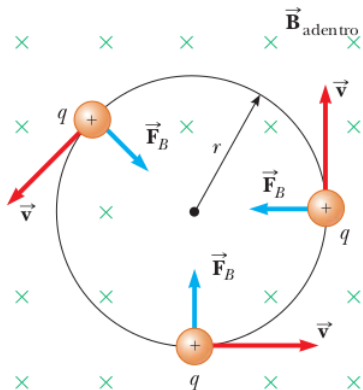
Superficie de la Tierra: 0.5×10^{-4} Tesla.

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



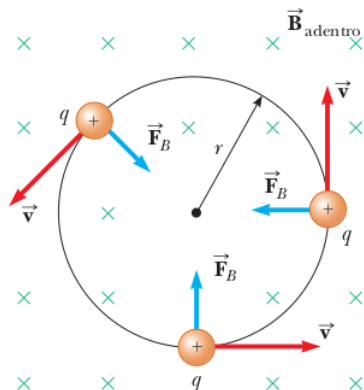
- Considere una partícula con carga positiva que se mueve en un \vec{B} uniforme (dirigido hacia la página), estando el vector de \vec{v} inicial de la partícula en posición \perp al \vec{B} .
- Conforme la partícula cambia la dirección de su \vec{v} como respuesta a la \vec{F}_B , ésta se mantiene en posición \perp a la \vec{v} .
- Si la \vec{F}_B es siempre \perp a la \vec{v} , la trayectoria de la partícula ¡es un círculo! \perp al \vec{B}

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- La rotación para una carga positiva es en dirección antihoraria.
- Si q fuera negativa, la rotación sería horaria.

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



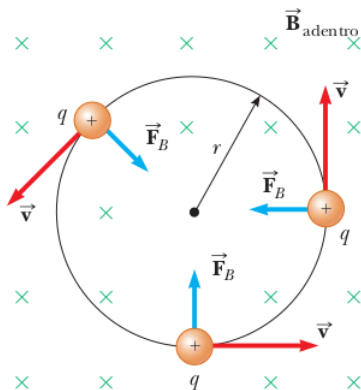
- La segunda ley de Newton para la partícula:

$$\sum F = F_B = ma \quad (4)$$

- q es una partícula en movimiento circular uniforme, la aceleración es centrípeta.

$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (5)$$

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- Luego el radio de una trayectoria circular

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (6)$$

- es proporcional a la cantidad de movimiento lineal mv de la partícula.
- La rapidez angular de la partícula

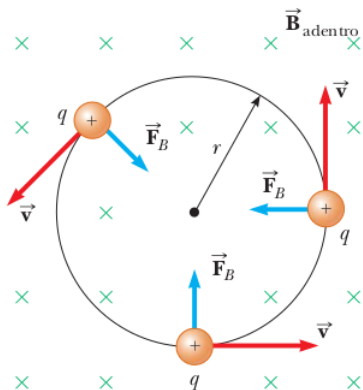
$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \quad (7)$$

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme

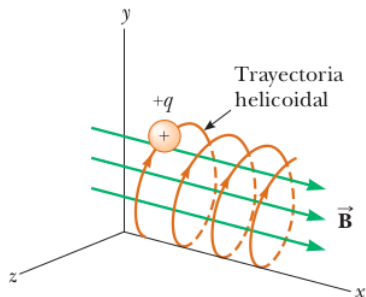
- El período de la partícula es

$$T = \frac{2\pi r}{L} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (8)$$

- la ω de la partícula y el T no dependen de la rapidez de la partícula ni del radio de la órbita.
- La ω se denomina frecuencia de ciclotrón, porque las partículas con carga circulan con esta frecuencia angular en un acelerador conocido como ciclotrón.

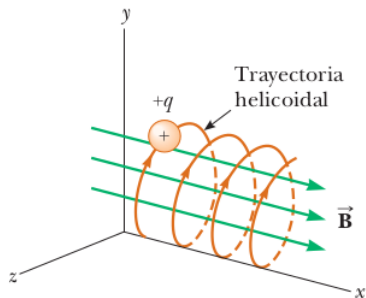


2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- Si una partícula con carga se mueve en un \vec{B} uniforme con su \vec{v} orientada en algún ángulo arbitrario respecto a \vec{B} , su trayectoria será una espiral.
- Si \vec{B} está dirigido en x , no hay componente en x de la $\vec{F}_B \implies a_x = 0$ y v_x es cte.
- Pero la $F_B = qvB$ hace que cambien las v_y y v_z , resultando un mov. espiral cuyo eje es paralelo al \vec{B} .

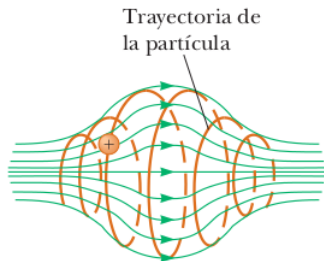
2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- La proyección de la trayectoria sobre el plano yz es un círculo.
- Las proyecciones de la trayectoria en los planos xy y xz son senoidales.
- Se debe reemplazar v por

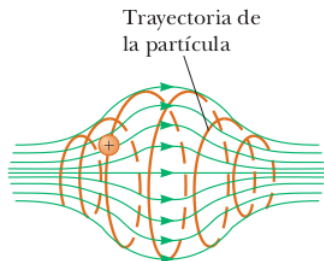
$$v_{\perp} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (9)$$

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



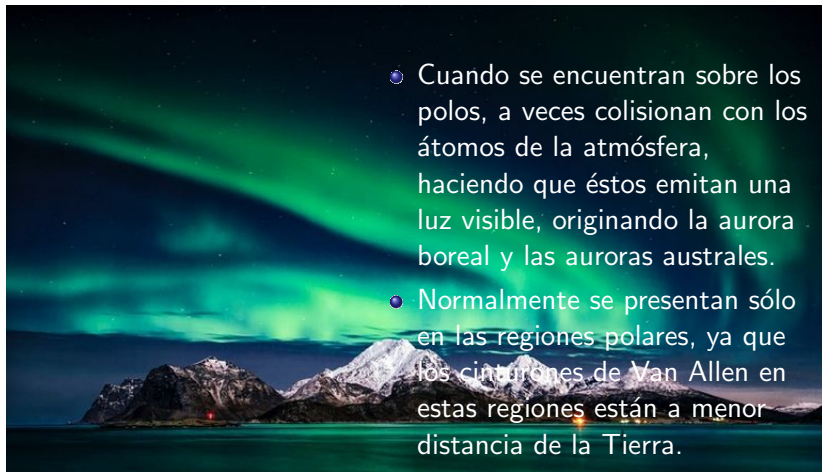
- q en presencia de un \vec{B} no uniforme, intenso en sus extremos y débil en su parte media
- Una partícula con carga sale de un extremo de la espiral a lo largo de las líneas de campo hasta llegar al otro extremo, donde invierte su trayectoria y de regreso en la espiral.
- Botella magnética, ya que las partículas con carga pueden quedar atrapadas en su interior.

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- Para confinar plasma.
- Este esquema de confinamiento de plasma podría jugar un papel crucial en el control de la fusión nuclear. (Fuente de energía casi infinita).
- Problemas: Si un gran número de partículas está atrapado, las colisiones que se presentan entre ellas hacen que se fugen del sistema.

2. Movimiento de una partícula con carga en un campo magnético uniforme



- Cuando se encuentran sobre los polos, a veces colisionan con los átomos de la atmósfera, haciendo que éstos emitan una luz visible, originando la aurora boreal y las auroras australes.
- Normalmente se presentan sólo en las regiones polares, ya que los cinturones de Van Allen en estas regiones están a menor distancia de la Tierra.

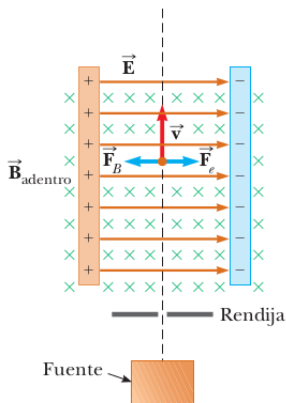
3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}} \quad (10)$$

- Una carga con una \vec{v} en presencia tanto de un \vec{E} y un \vec{B} experimenta una Fuerza de Lorentz.

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

Selector de velocidades:

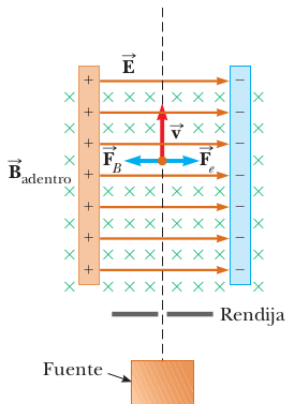


- Cuando es necesario que todas las cargas se muevan con misma \vec{v} .
- Esto se puede lograr aplicando la combinación de un \vec{E} con uno \vec{B} orientados como en la figura.
- Se escogen las magnitudes de los dos campos, de forma que

$$qE = qvB.$$

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

Selector de velocidad:



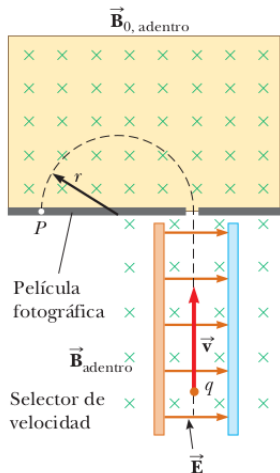
- La partícula con carga se modela como una partícula en equilibrio y se mueve en línea recta vertical.

$$v = \frac{E}{B} \quad (11)$$

- Sólo aquellas partículas que tengan esta v pasarán sin desviarse a través de los campos.
- La \vec{F}_B que se ejerce sobre partículas que se mueven con v más elevadas es $>$ a la \vec{F}_E , lo que desvía las partículas hacia la izquierda.

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

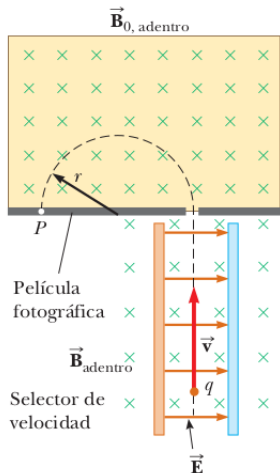
Espectrómetro de masas:



- Separa iones según su relación masa a carga.
- El haz de iones pasa primero a través de un selector de velocidad y después entra a un segundo \vec{B}_0 uniforme que tiene la misma dirección que el \vec{B} en el selector.
- Los iones se mueven en un semicírculo de radio r antes de que se impacte en la película fotográfica en P .

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

Espectrómetro de masas:



- Si los iones están con carga positiva, el haz se desviará hacia la izquierda.
- la relación m/q se expresa

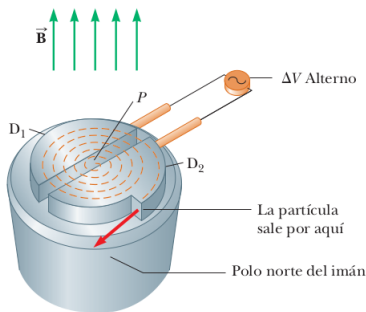
$$\frac{m}{q} = \frac{rB_0}{v} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \frac{m}{q} = \frac{rBB_0}{E} \quad (13)$$

así es posible determinar m/q midiendo el radio de curvatura y conociendo los valores del campo \vec{B} , \vec{B}_0 y \vec{E} .

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

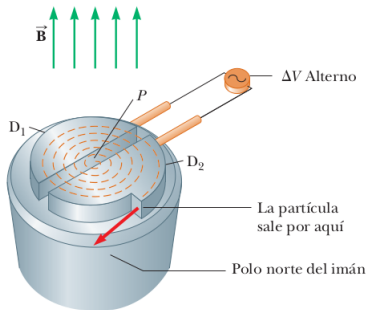
Ciclotrón:



- Se les aplica una ΔV alternante de alta f y se dirige un \vec{B} uniforme en dirección \perp .
- Una carga liberada en P , realiza trayectoria semi circular en cada "de" en un tiempo $T/2$.
- La f de la ΔV aplicada se ajusta de manera que la polaridad de las "des" se invierta en el mismo Δt que utiliza el ion para recorrer una "de".

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

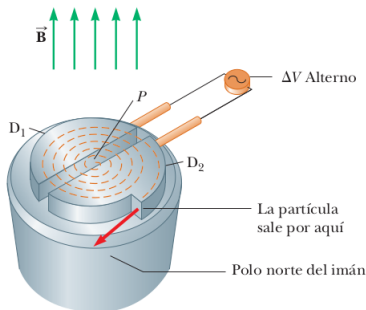
Ciclotrón:



- Si ΔV aplicado se ajusta de manera que D_2 esté a un $\Delta V < D_1$ en una magnitud V , el ion se acelerará a través del espacio hasta D_2 y su K se incrementará en la cantidad $q\Delta V$.
- Pasa después alrededor de D_2 en una trayectoria semicircular de un radio más grande(v). Después de un intervalo de $T/2$, otra vez llega al espacio entre las “des”.
- En este instante, la polaridad entre las “des” se ha invertido, y se le da al ion otro “impulso” a través del espacio.

3. Aplicaciones del movimiento de partículas con carga en un campo magnético

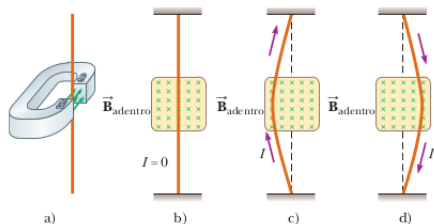
Ciclotrón:



- Cuando el radio de su trayectoria es prácticamente el de las “des”, el ion sale del sistema a través de la ranura de salida.
- Observe que la operación del ciclotrón se basa en que T es independiente de la rapidez del ion y del radio de la trayectoria circular.
- Se puede obtener una expresión de la K del ion cuando sale del ciclotrón, en función del radio R de las “des”

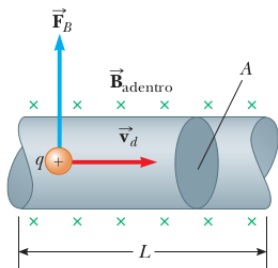
$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} \quad (14)$$

4. Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



- Acción de una \vec{F}_B sobre un conductor de I colgando entre los polos de un imán.
- $I = 0$ el alambre se mantiene vertical.
- Cuando el alambre conduce una I este se flexiona.

4. Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



- \vec{F}_B que se ejerce sobre una q en mov.

$$\vec{F}_B = q\vec{v}_d \times \vec{B} \quad (15)$$

- La \vec{F} total se obtiene al multiplicar \vec{F}_B por el número de q en el segmento.

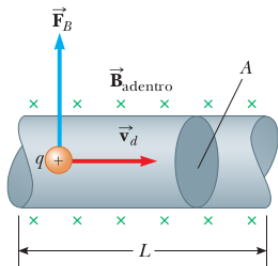
$$Vol = AL$$

el número de cargas en el segmento es igual a

$$nAL$$

n : n de q / u. vol.

4. Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



- La \vec{F}_B total sobre el alambre es

$$\vec{F}_B = (q\vec{v}_d \times \vec{B})nAL \quad (16)$$

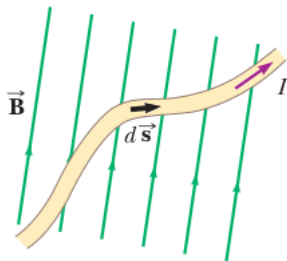
- Como $I = nq\vec{v}_d A$

$$\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (17)$$

\vec{L} apunta en la dirección de la I .

- Se aplica sólo a un segmento de alambre recto en un \vec{B} uniforme.

4. Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



La \vec{F}_B neta que actúa sobre cualquier espira de I cerrado en un \vec{B} uniforme $= 0$.

- La $d\vec{F}_B$ es:

$$d\vec{F}_B = I d\vec{s} \times \vec{B} \quad (18)$$

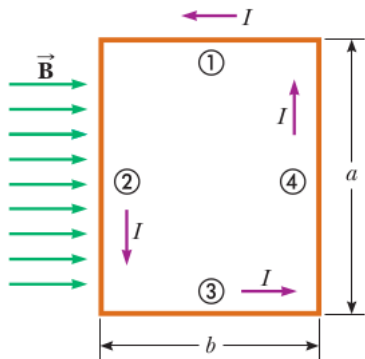
$d\vec{F}_B$ apunta hacia afuera.

- La \vec{F}_B es:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b d\vec{s} \times \vec{B} \quad (19)$$

- La \vec{F}_B sobre un alambre portador de I curvo en un \vec{B} uniforme es igual a la de un alambre recto que conecta los puntos finales.

5. Momento de torsión sobre una espira de \vec{I} en un \vec{B} uniforme



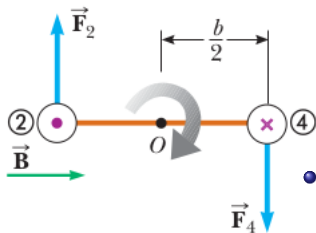
- En lados (1) y (3) no actúa \vec{F}_B , ya que $\vec{L} \times \vec{B} = 0$
- En lados (2) y (4) sí actúa \vec{F}_B ,

$$F_2 = F_4 = Iab$$

- Dirección \vec{F}_2 : hacia afuera
- \vec{F}_4 : hacia adentro.
- Observando la espira desde el lado (3) se verá lo siguiente.

5. Momento de torsión sobre una espira de \vec{I} en un \vec{B} uniforme

Observando la espira desde el lado (3) se verá lo siguiente:



- Las \vec{F} y \vec{F}_4 apuntan en direcciones opuestas pero no actúan a lo largo de la misma línea de acción.
- Momento de torsión, la espira gira en sentido horario.

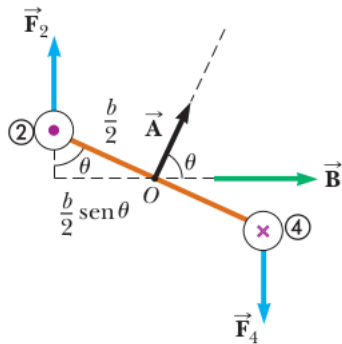
$$\tau_{max} = F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} = (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2} = IabB \quad (20)$$

- El área contenida por la espira $A = ab$

$$\tau_{max} = IAB \quad (21)$$

5. Momento de torsión sobre una espira de \vec{I} en un \vec{B} uniforme

\vec{B} uniforme forma un ángulo $\theta < 90^\circ$ con una línea \perp al plano de la espira.



- Las \vec{F}_1 y \vec{F}_3 se cancelan entre sí y no producen un τ .
- Ya que $F_2 = F_4 = IaB$

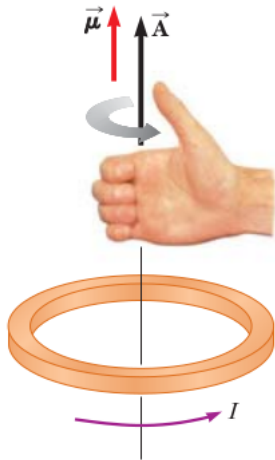
$$\tau = F_2 \frac{b}{2} \sin \theta + F_4 \frac{b}{2} \sin \theta$$

$$\tau = IaB \left(\frac{b}{2} \sin \theta \right) + IaB \left(\frac{b}{2} \sin \theta \right)$$

$$\tau = IabB \sin \theta = IAB \sin \theta$$

- τ_{max} cuando $\theta = 0$.

5. Momento de torsión sobre una espira de \vec{I} en un \vec{B} uniforme



$$\vec{\tau} = I \vec{A} \times \vec{B} \quad (22)$$

- Con momento dipolar magnético:

$$\vec{\mu} \equiv I \vec{A} \quad (23)$$

- Unidad SI: (Am^2).
- Bobina de alambre de N espiras de = área

$$\vec{\mu}_{\text{Bobina}} = NI \vec{A} \quad (24)$$

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (25)$$

- Válido para cualquier forma de espira.

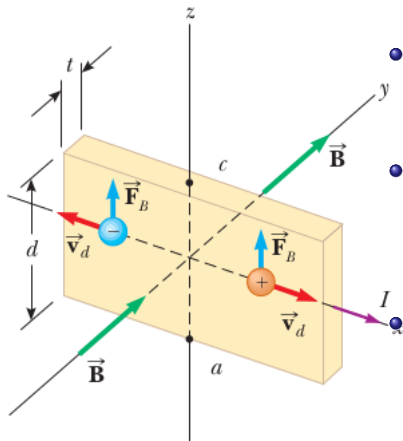
5. Momento de torsión sobre una espira de \vec{I} en un \vec{B} uniforme

- Energía potencial del sistema de un dipolo magnético en un campo magnético es

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} \quad (26)$$

- $U_{\text{mín}} = -\mu B$, cuando μ apunta en la misma dirección que B .
- El sistema tiene su máxima energía $U_{\text{máx}} = \mu B$, cuando μ apunta en la dirección opuesta a \vec{B} .
- El $\vec{\tau}$ en una espira de corriente hace girar la espira; en un motor.

6. El efecto Hall



- Cuando se coloca un conductor de I en un \vec{B} , se genera una ΔV en una dirección \perp tanto a la I como al \vec{B} .
 - Si los portadores de carga son electrones, se acumulan en el borde superior del conductor, dejando exceso de carga positiva en el inferior.
- Esta acumulación de carga en los bordes establece un \vec{E} en el conductor.