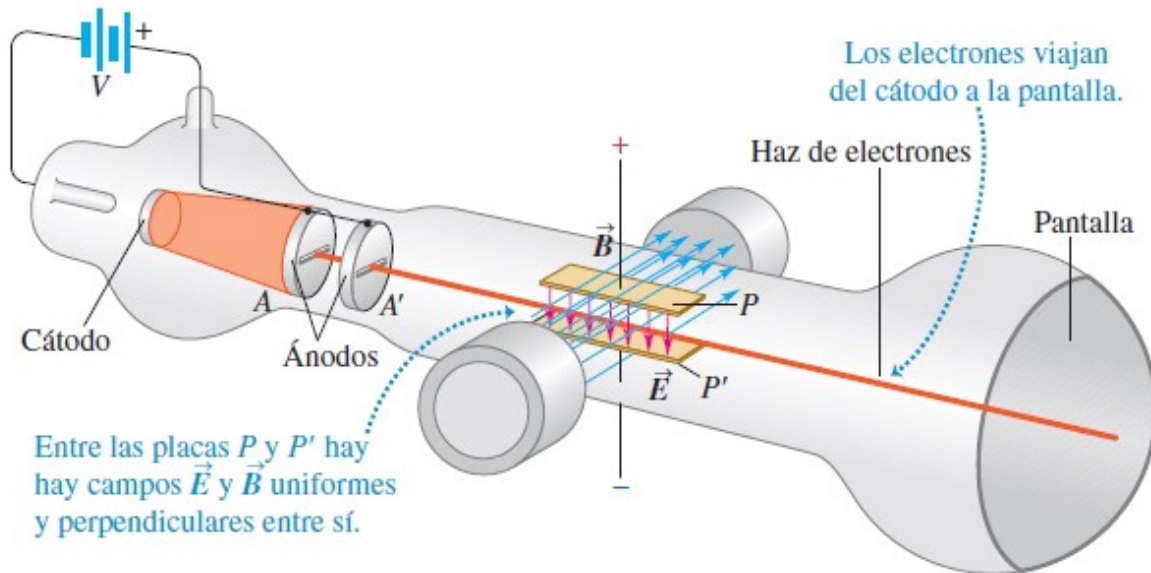
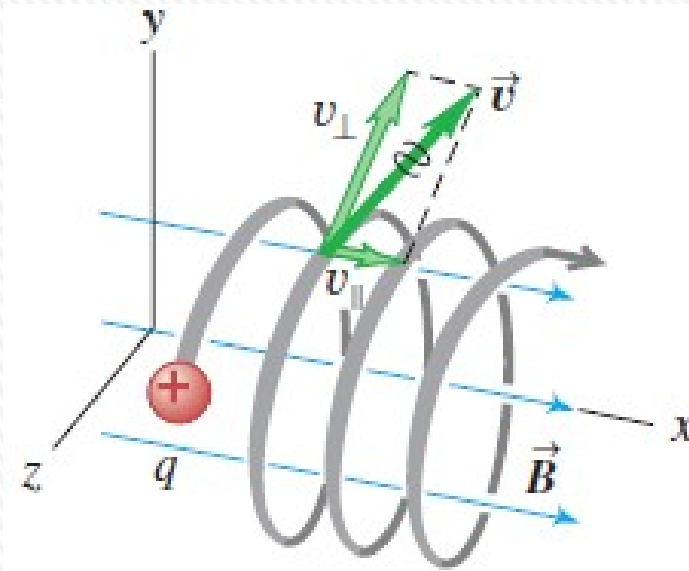


11-CAMPO MAGNÉTICO I



MAGNETISMO

Los imanes permanentes ejercen fuerza uno sobre otro y también sobre trozos de hierro que no estaban magnetizados.

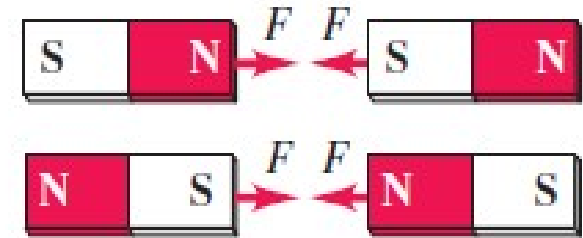
Todo imán, cualquiera que fuera su forma, tiene dos polos, uno *norte* (N) y otro *sur* (S), que ejercen fuerzas sobre otros polos magnéticos de manera similar a como las cargas eléctricas ejercen fuerzas entre sí.

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

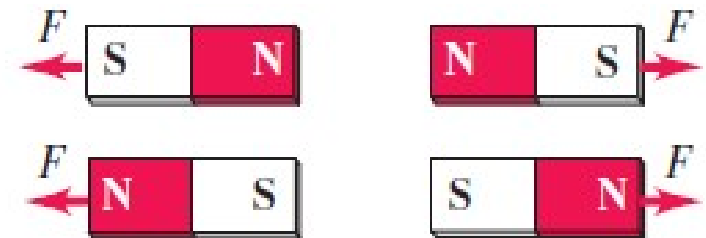
Las fuerzas magnéticas entre dos cuerpos se deben fundamentalmente a interacciones entre los electrones en movimiento en los átomos de los cuerpos.

En el interior de un cuerpo magnetizado, hay un movimiento *coordinado de algunos electrones atómicos*; en un cuerpo no magnetizado los movimientos no están coordinados.

a) Los polos opuestos se atraen.



b) Los polos iguales se repelen.



MAGNETISMO

A pesar de que la fuerza entre polos magnéticos es similar a la fuerza entre dos cargas eléctricas, éstas pueden aislarse (como el electrón y el protón), en cambio **nunca ha sido posible aislar un solo polo magnético.**

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

Hasta ahora todos los intentos hechos para detectar la presencia de un polo magnético aislado han sido desafortunados (**no se han descubierto los monopolos magnéticos**).

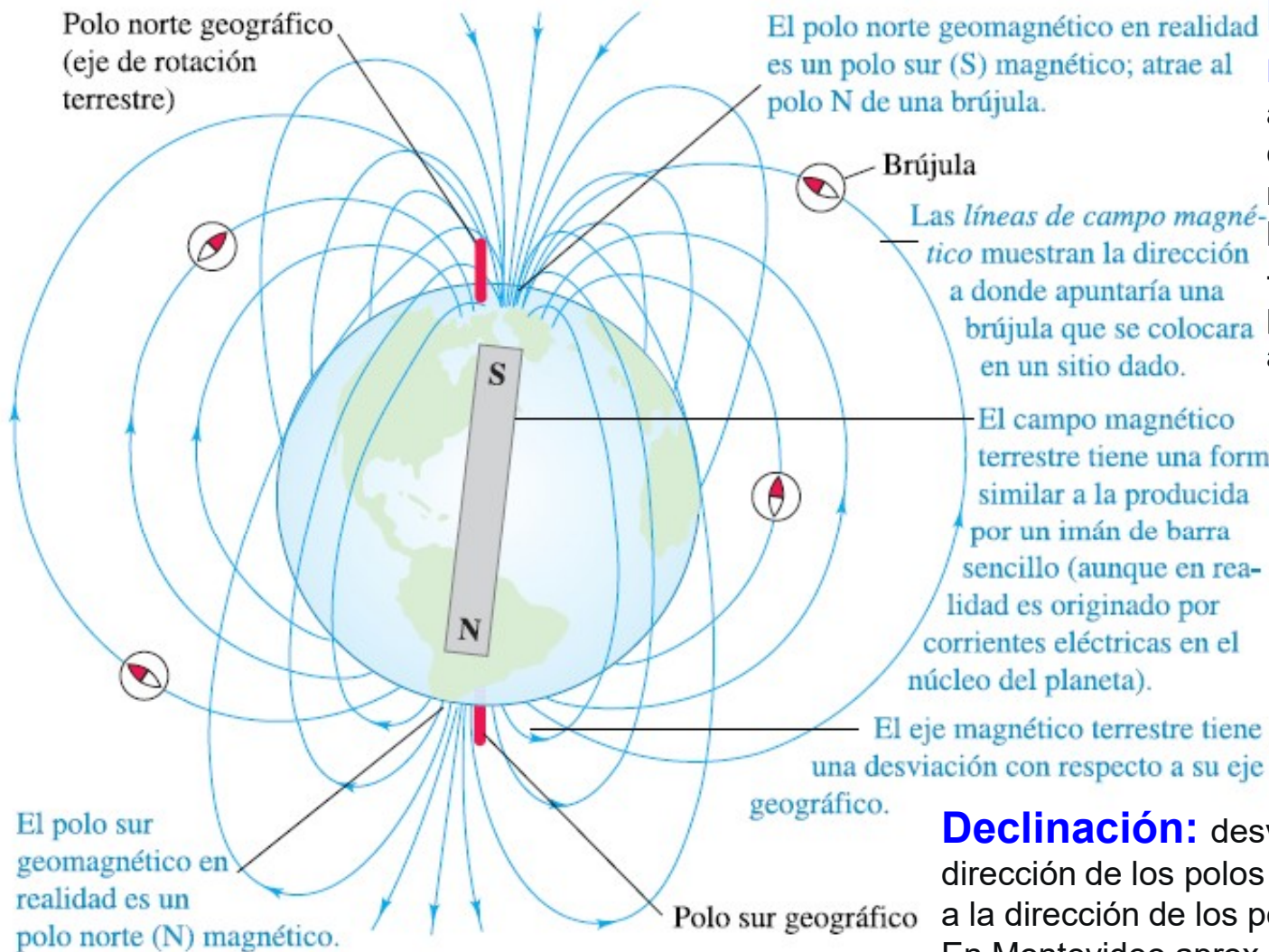
Independientemente de cuántas veces se divida un imán, cada trozo resultante tendrá siempre un polo norte y un polo sur.



El Polo Norte geográfico de la Tierra es magnéticamente 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.

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



Inclinación magnética:

ángulo que forma el campo magnético respecto a un plano horizontal. Varía entre -90° (hacia arriba en el polo sur) y 90° (hacia abajo, en el polo norte)

En Montevideo aprox. -40°

Declinación: desviación entre la dirección de los polos magnéticos respecto a la dirección de los polos geográficos. En Montevideo aprox, $10^\circ 50' W$.

Modelo: campo creado por dipolo magnético (imán de barra). Inclinado un ángulo de $11,5^\circ$ (declinación) con respecto al eje de rotación, con polo sur apuntando hacia el polo norte geomagnético.

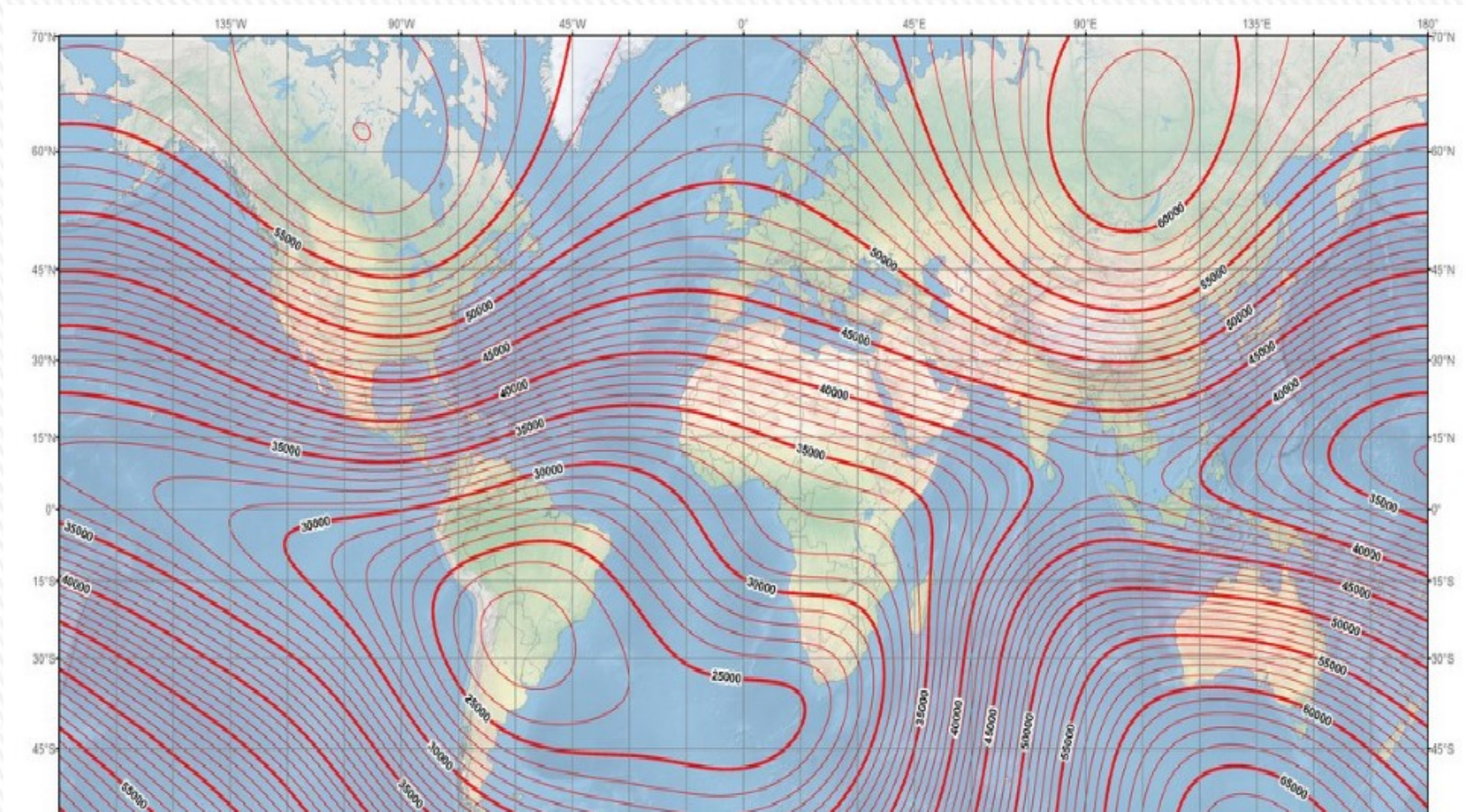
CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

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 el valor más bajo del planeta: 22 a 23 μT !!!



CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Los polos magnéticos se desplazan: pero de manera muy lenta como para que las brújulas sean útiles en la orientación.

No están situados perfectamente enfrentados en puntos opuestos del globo.



Su desplazamiento puede ser hasta mayor a 40 km/año. Entre 1831 y 2001 se ha movido unos 600 km.

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La intensidad del campo magnético está disminuyendo...

De manera ocasional ocurren dramáticos eventos en los que los polos norte y sur geomagnético se intercambian.

Estos eventos se denominan **inversiones geomagnéticas**.

La evidencia de estos eventos se encuentra en basaltos, testigos de sedimentos obtenidos del lecho oceánico, y de anomalías magnéticas del fondo marino.

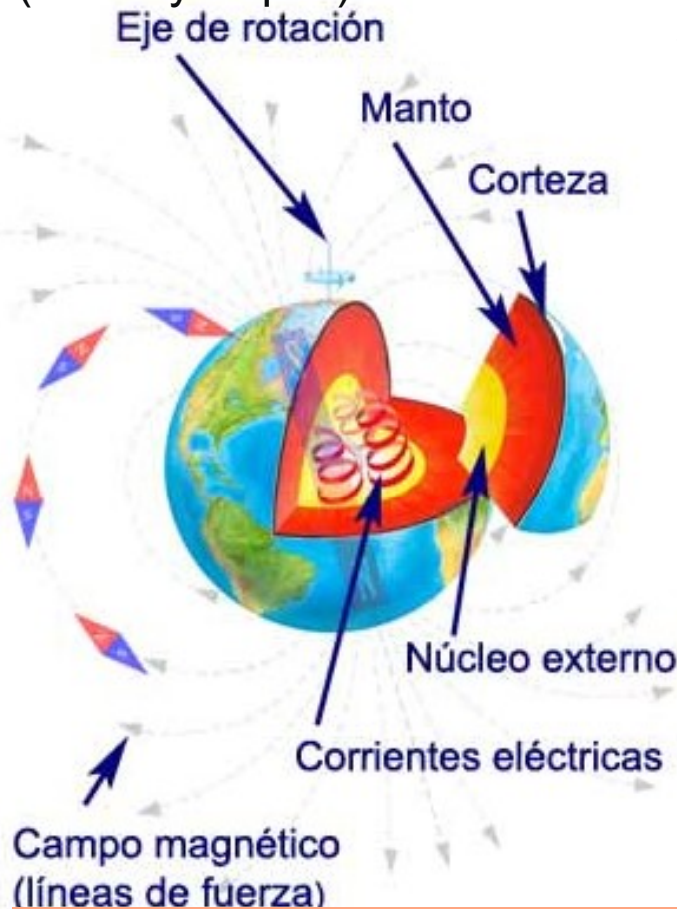
Las inversiones ocurren aparentemente a intervalos aleatorios de tiempo que varían entre menos de 100.000 años hasta 50 millones de años.

El evento más reciente, denominado la inversión Brunhes-Matuyama, ocurrió hace 780.000 años.



CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

El campo magnético terrestre se originó por los movimientos de metales líquidos (hierro y níquel) en el núcleo.



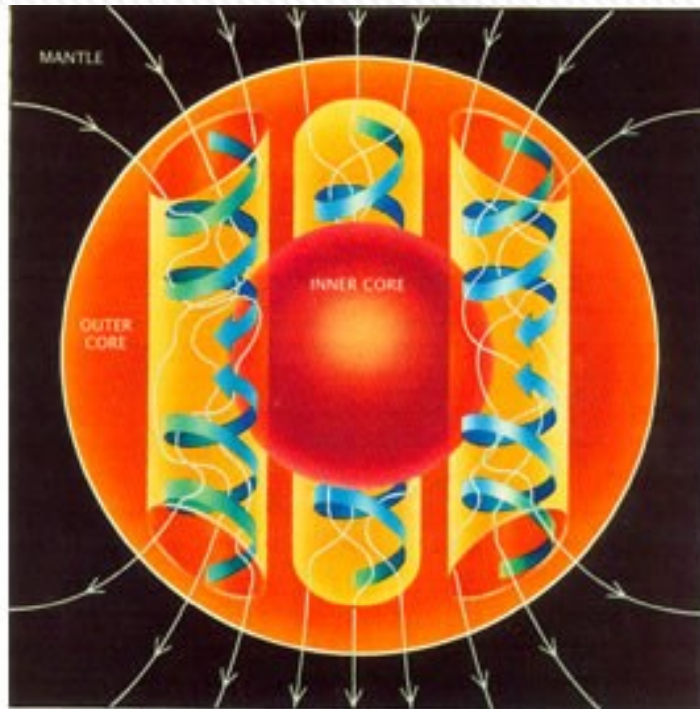
W. Maurice Elsasser (1904–1991) con la “Teoría de la Dínamo Auto-sostenida”, fue el primero en sugerir que la rotación de la Tierra crea, en el núcleo remolinos que giran de oeste a este, generando una corriente. El **núcleo terrestre** es una enorme esfera metálica con un radio de unos 3400 km. Está compuesto mayoritariamente por hierro y níquel, que son metales (buenos conductores de la electricidad).

La parte interior, el **núcleo interno** (6.360 a 5.150 km de profundidad), que incluye el centro de la Tierra, es sólida.

La capa exterior (5.150 a 2.890 km), el **núcleo externo**, estos metales se encuentran en estado líquido y en continuo movimiento.

El movimiento se produce a causa de la rotación terrestre, pero no es menos importante el movimiento de convección del metal fundido, que se produce por la diferencia de temperaturas entre la parte alta (en contacto con el manto y a 3500°C) y baja (en contacto con el núcleo interno y a más de 6000°C) del núcleo externo.

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



Por medio de corrientes ascendentes y descendentes el metal líquido transporta calor desde el núcleo interno hasta el manto, desplazando al fluido que se encuentra en la parte superior, más frío y más denso, que desciende hacia el núcleo interno.

El origen del campo se encuentra justamente en el núcleo externo y está causado por corrientes eléctricas.

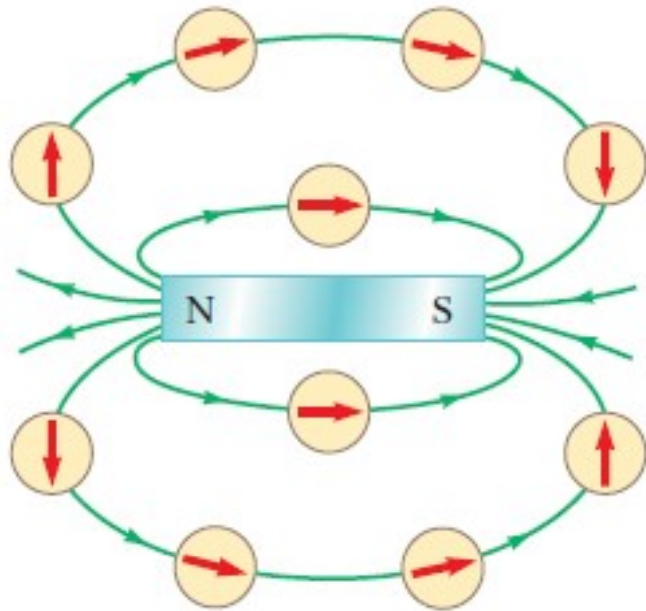
En el núcleo externo las corrientes eléctricas describen trayectorias helicoidales similares a las bobinas de los electroimanes de tal forma que el campo magnético que inducen está orientado preferentemente según el eje de rotación N-S.

La rotación terrestre fuerza la orientación y es por ello por lo que los polos magnéticos prácticamente coinciden con los geográficos.

Efecto dínamo: cuando un material conductor de la electricidad se desplaza en el seno de un campo magnético, se inducen en él corrientes eléctricas.

En el caso de la Tierra, el conductor en movimiento serían los metales líquidos del núcleo externo y el campo magnético sería el propio campo magnético de la Tierra.

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.

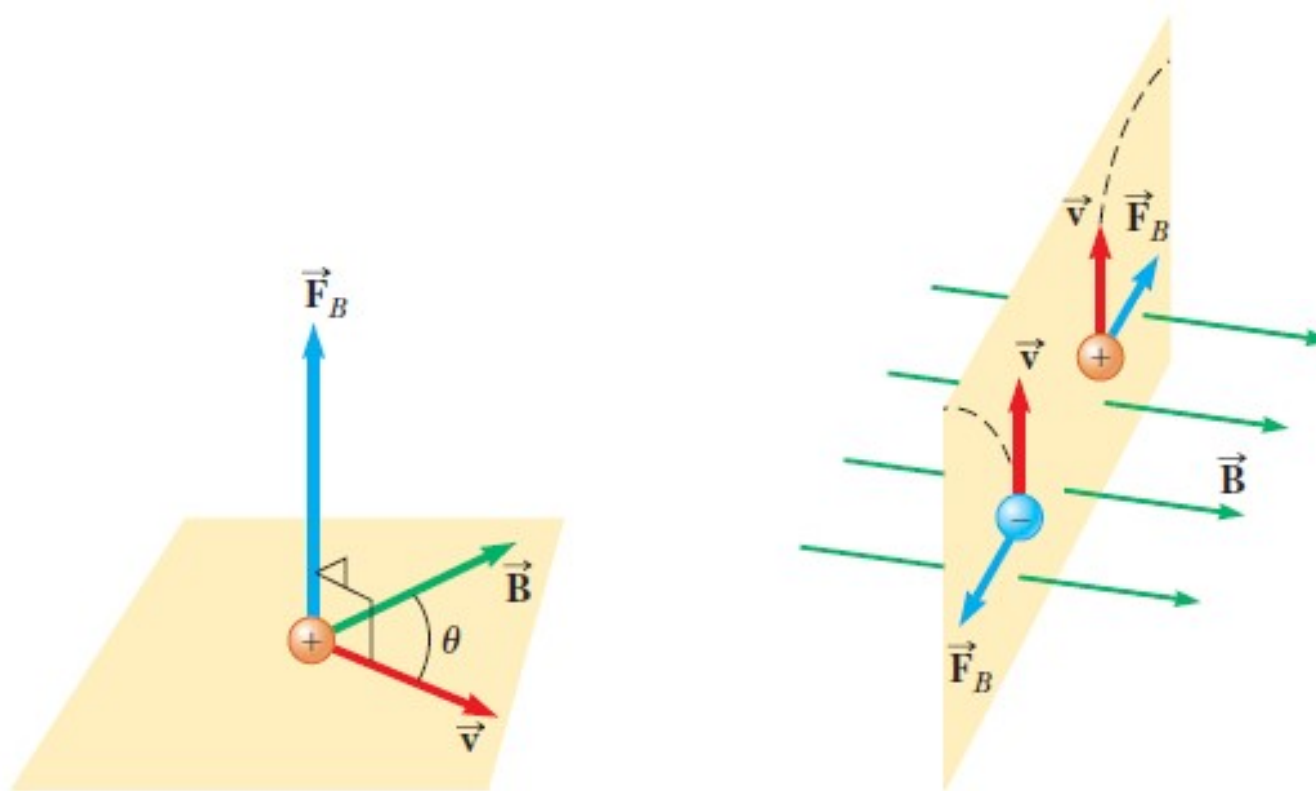
Es posible representar el campo magnético gráficamente utilizando **líneas de campo magnético**.

El magnético es un **campo vectorial**, es decir, una *cantidad* vectorial asociada con cada punto del espacio.



Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

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



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

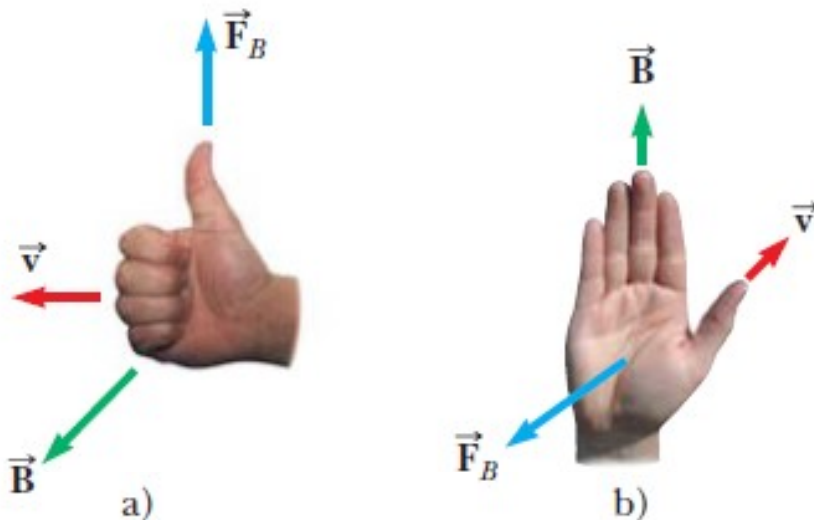
Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

Los experimentos dan los siguientes resultados:

1. F_B sobre la partícula es proporcional a q y a su rapidez v y al $\sin \theta$, (θ ángulo que forma \mathbf{v} de la partícula con \mathbf{B}).
2. Cuando una partícula con carga se mueve paralela al vector de campo magnético, la fuerza magnética que actúa sobre ella es igual a cero.
3. Cuando la velocidad \mathbf{v} de la partícula forma un ángulo $\theta \neq 0$ con \mathbf{B} , \mathbf{F}_B es perpendicular al plano formado por \mathbf{v} y \mathbf{B} (perpendicular a ambos vectores).
4. La \mathbf{F}_B ejercida sobre una carga positiva tiene sentido opuesto al que se ejerce sobre una carga negativa que se mueva en la misma sentido



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} ($\theta = 90^\circ$).

Si la carga es negativa, el sentido de la fuerza es opuesta a la que da la regla de la mano derecha.

Resumiendo:

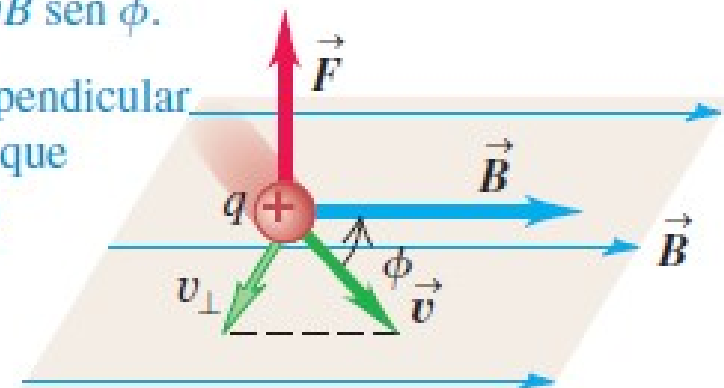
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

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} .



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.



Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

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)**:

$$B = F_B / (q \cdot v \cdot \sin\theta)$$

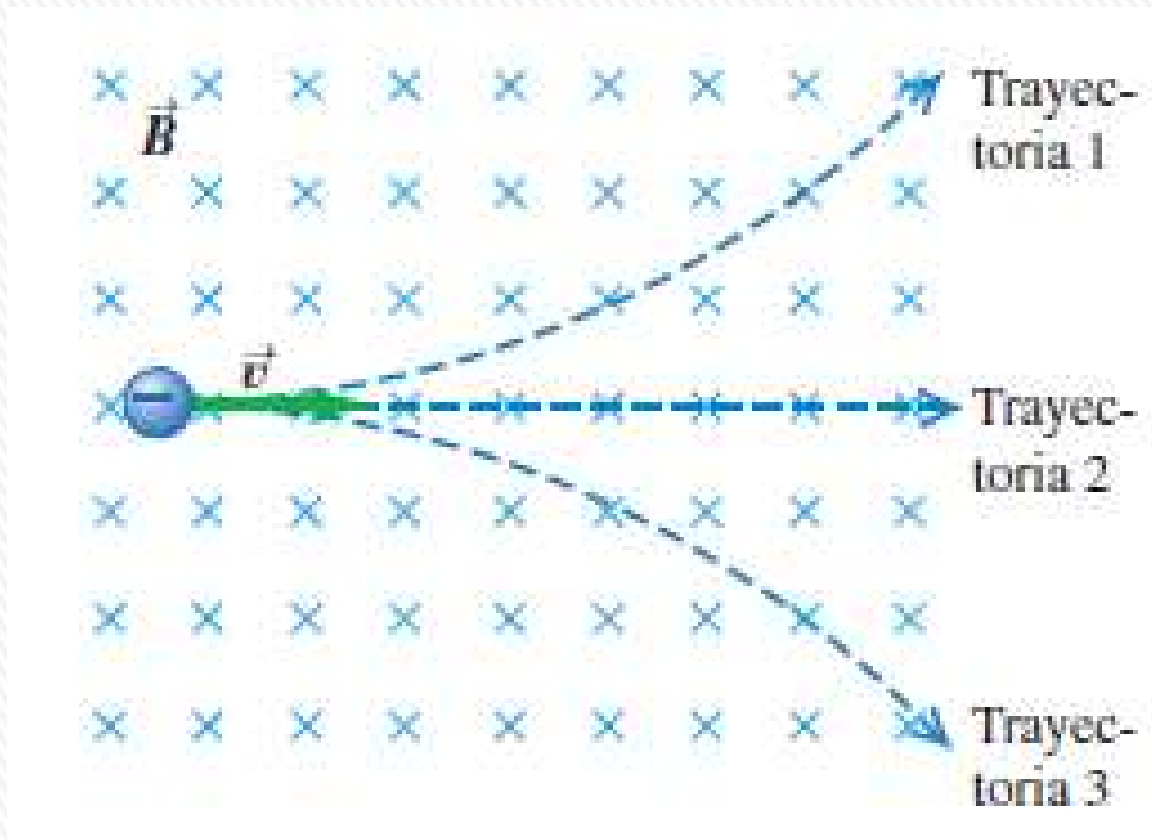
$$1T = 1 \frac{N}{C \cdot m/s} = 1 \frac{N}{A \cdot m}$$

Otra unidad (no del SI) el *gauss* (G), se relaciona con la tesla mediante la conversión $1 T = 10^4 G$.

Algunas magnitudes aproximadas del campo magnético

Fuente del campo	Magnitud del campo (T)
Poderoso imán de laboratorio superconductor	30
Poderoso imán de laboratorio convencional	2
Unidad médica MRI (resonancia magnética)	1.5
Imán de barra	10^{-2}
Superficie del Sol	10^{-2}
Superficie de la Tierra	0.5×10^{-4}
Interior del cerebro humano (debido a impulsos nerviosos)	10^{-13}

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}** .

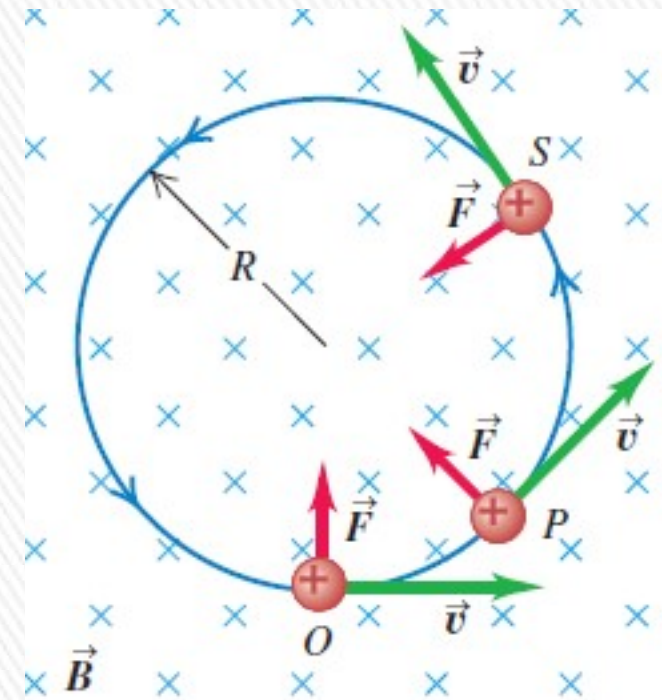
\mathbf{v} y \mathbf{B} son perpendiculares, por tanto: $F = qvB$.

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

no puede cambiar la *magnitud de la velocidad*, solo su *dirección* (origina una *aceleración centrípeta*).

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



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

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

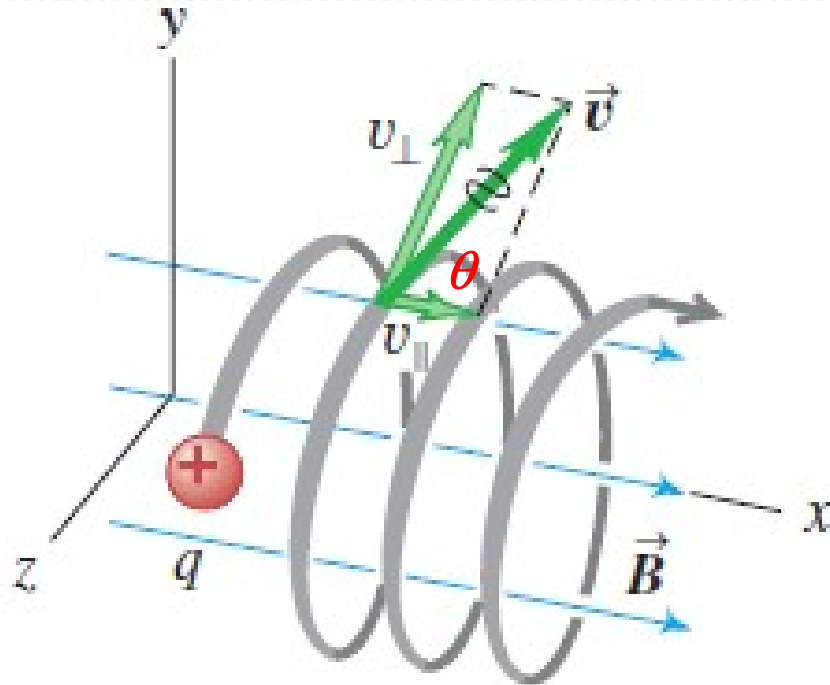
Radio de la órbita circular en un campo magnético uniforme:

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

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

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

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})

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

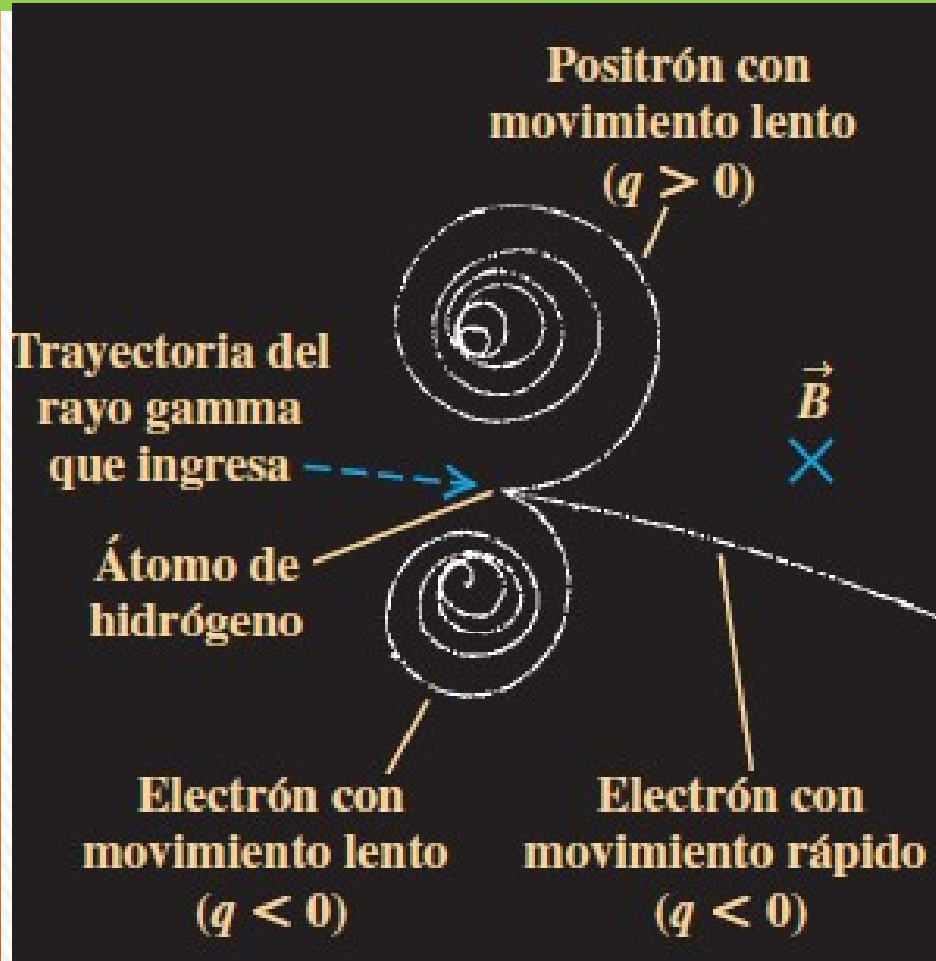
El paso de la hélice, es decir la distancia entre dos puntos de la hélice situados sobre una generatriz del cilindro imaginario sobre la que se enrolla, vale:

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

Con T el periodo de la órbita

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

Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético



Cámara llena de hidrógeno líquido y con un B entrante

Un rayo gamma de alta energía desprende el electrón de un átomo de hidrógeno y lo lanza con gran rapidez creando un rastro visible en el hidrógeno líquido.

El rastro muestra al electrón que se curva hacia abajo debido a la fuerza magnética.

La energía de la colisión también produce otro electrón y un *positrón* (electrón con carga positiva): *creación de pares*.

Se requiere una energía mínima de 1,022 MeV

Debido a sus cargas opuestas, las trayectorias del electrón y del positrón se curvan en direcciones opuestas.

A medida que estas partículas se abren paso a través del hidrógeno líquido, chocan contra otras partículas cargadas, perdiendo energía y rapidez.

Como resultado, disminuye el radio de curvatura.

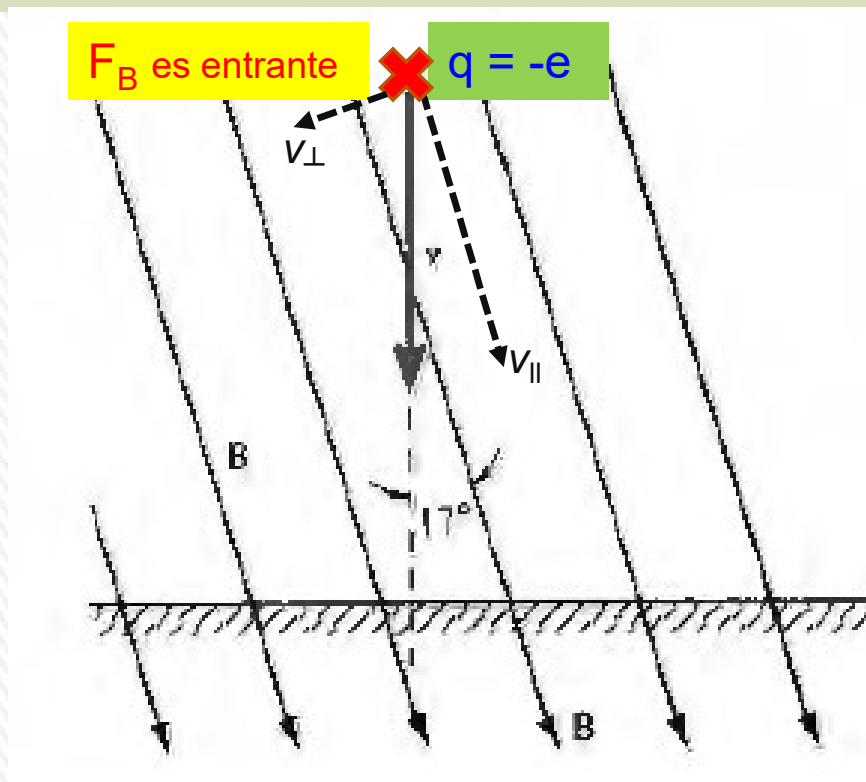
EJEMPLO: ejercicio 3.1.1

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?



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?

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

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

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

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

$$F = \sqrt{F_B^2 + F_E^2} = \sqrt{(2,71 \times 10^{-19})^2 + (3,03 \times 10^{-17})^2} = 1,92 \times 10^{-17} \text{ N}$$

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

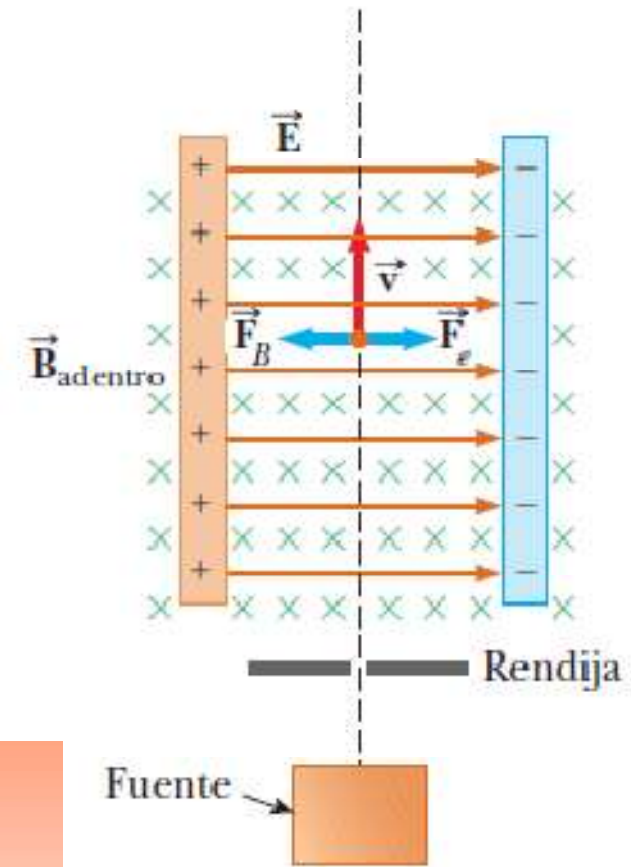
Selector de velocidad

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.

$$F_E = F_B \Rightarrow qE = qvB \quad v = \frac{E}{B}$$

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 $R = mv/qB'$.

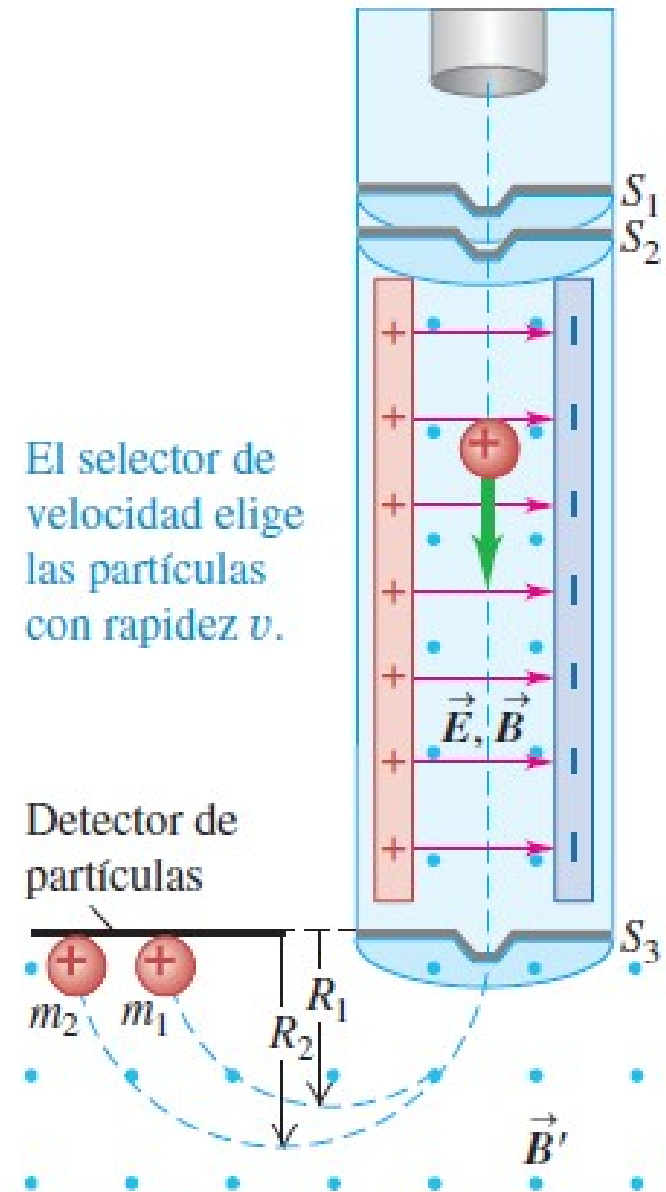
Los iones con masas diferentes golpean al detector en diferentes puntos, y se miden los valores de R .

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

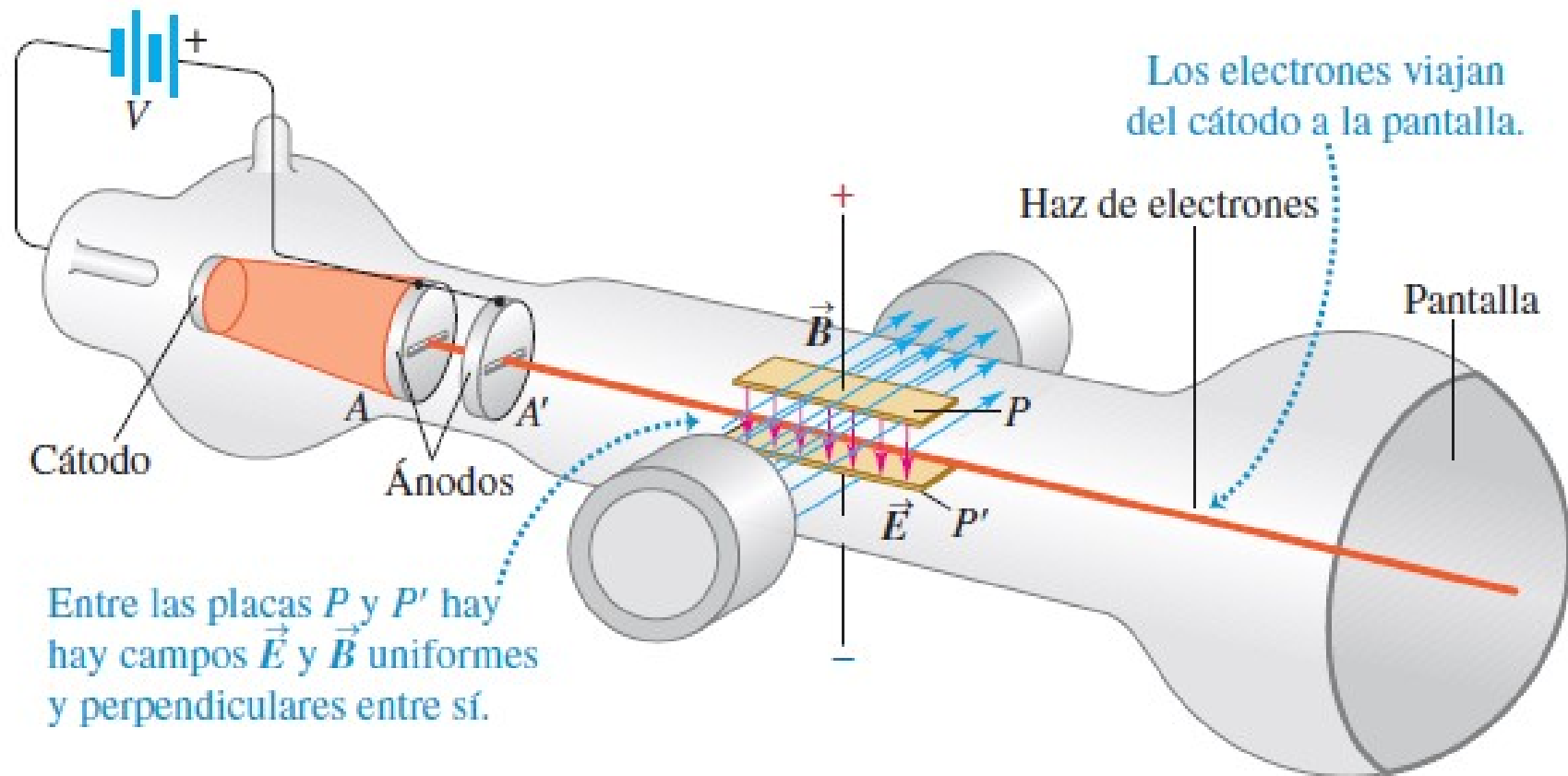
Con todos los parámetros conocidos en esta ecuación, excepto m , se calcula la masa m del ion.

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

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



Experimento de e/m de Thomson



En 1897 J.J. Thomson realizó uno de los experimentos cruciales de la física basándose en la idea anterior y midió la razón e/m que hay entre la carga y la masa del electrón. En un contenedor de vidrio al alto vacío se aceleraron electrones provenientes de un cátodo caliente, para formar un haz mediante una diferencia de potencial V entre los dos ánodos A y A' . La rapidez v de los electrones estaba determinada por el potencial acelerador V .

Experimento de e/m de Thomson

La energía cinética ganada era igual a la pérdida de energía potencial eléctrica

eV :

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

Los electrones pasan entre las placas P y P' y *chocan contra la pantalla al final del tubo*, que está recubierto de un material que emite fluorescencia (brilla) en el lugar del impacto.

Cuando se satisface la ecuación $vB = E$, los electrones viajan en línea recta entre las placas; al combinar esto con la ecuación anterior, se obtiene

Despejando e/m :
$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2VB^2}$$

$$E = B \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Todas las cantidades del lado derecho se pueden medir, así que se determina la razón e/m *entre la carga y la masa*.

El aspecto más significativo de las mediciones de e/m de Thomson fue que *descubrió un valor único para tal cantidad, el cual no dependía del material del cátodo, ni del gas residual en el tubo ni de algo más en el experimento*.

Esta independencia demostró que las partículas en el haz, que ahora llamamos electrones, son un componente común de toda la materia.

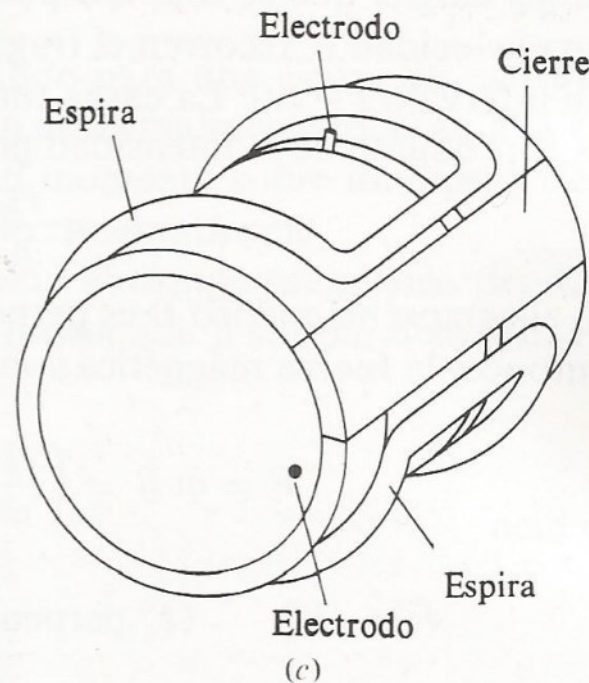
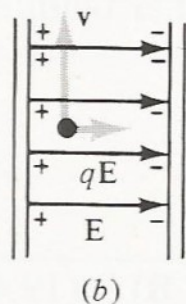
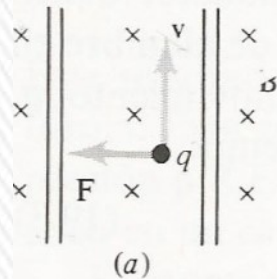
J.J. Thomson tiene el crédito por descubrir la primera partícula subatómica: el electrón

MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS DE FLUJO

Utilizan la fuerza sobre las cargas que se mueven en un campo magnético para medir flujos sanguíneos.

No necesitan insertar ninguna sonda en los vasos sanguíneos y pueden emplearse para flujos turbulentos.

Se aplica un campo magnético B perpendicular al flujo de sangre. Sobre los iones que se desplazan a una velocidad media v se origina una fuerza magnética (qvB) que deposita los iones en lados opuestos. Las cargas se acumulan en las paredes del vaso sanguíneo.

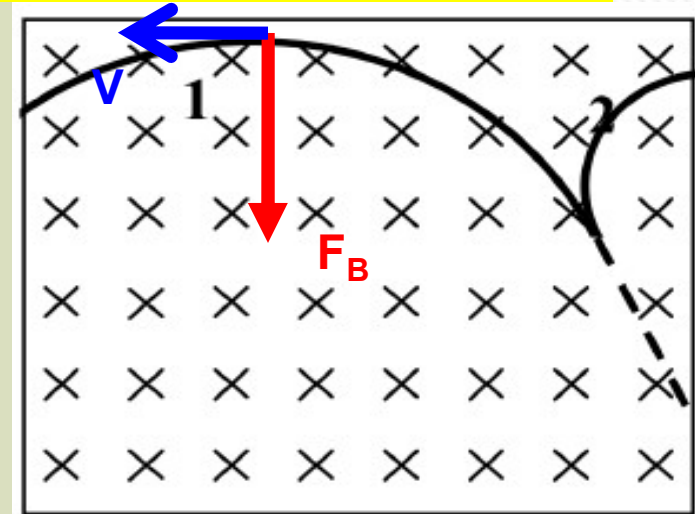


- Cuando el campo magnético B está dirigido hacia la página, la fuerza magnética sobre un ion positivo se dirige hacia la izquierda.
- Las cargas se acumulan en las paredes produciendo un campo eléctrico E que ejerce sobre un ion positivo una fuerza hacia la derecha. En el equilibrio la fuerza eléctrica contrarresta la fuerza magnética.
- La arteria se inserta en un manguito metálico abriendo un cierre. El campo magnético viene suministrado por la corriente en una sola espira. El voltaje que se mide entre los electrodos es proporcional a la velocidad y por tanto caudal.

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.

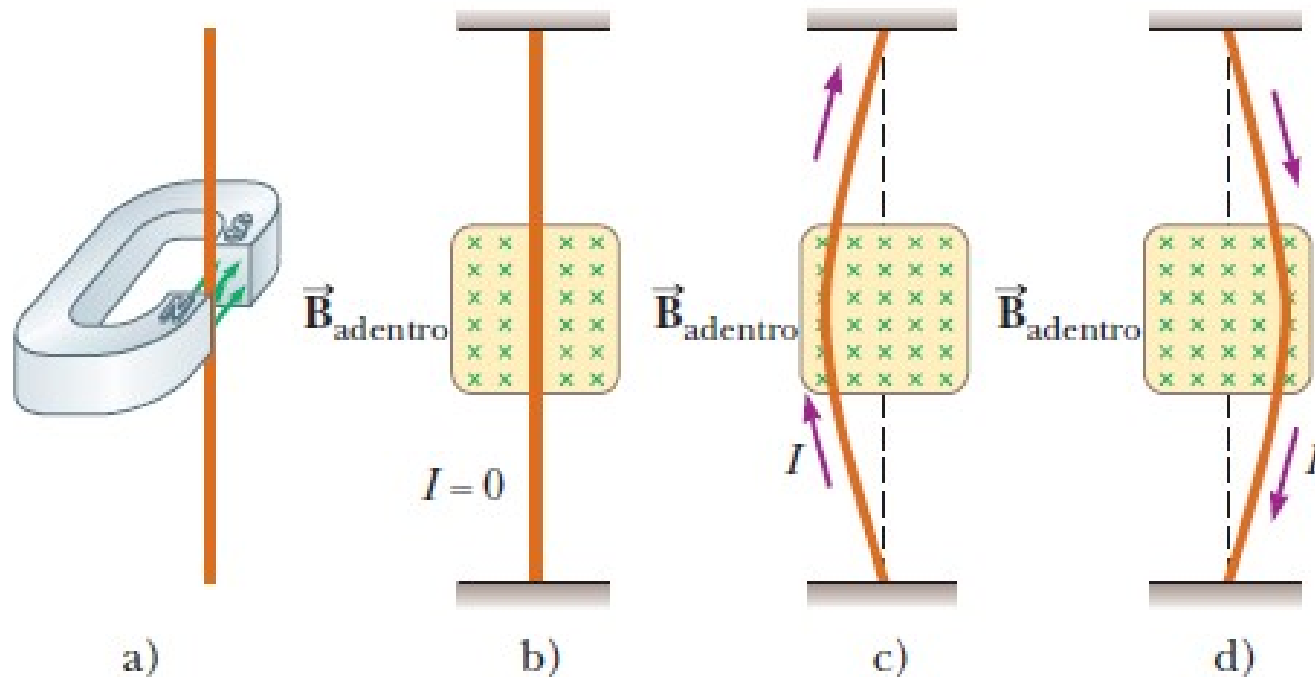
c) $v = \frac{qBR}{m}$

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

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

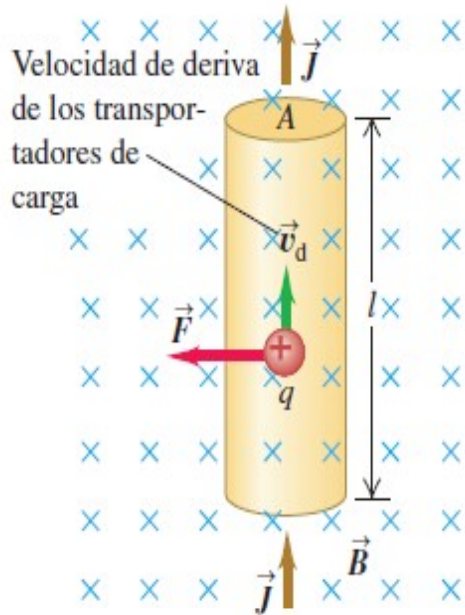


Fuerza magnética que actúa sobre un conductor que transporta corriente



- a) Alambre suspendido verticalmente entre los polos de un imán.
- b) El campo magnético (cruces verdes) se dirige hacia adentro de la página. Cuando no existe corriente en el alambre, éste sigue vertical.
- c) Cuando la corriente se dirige hacia arriba, el alambre se flexiona hacia la izquierda.
- d) Cuando la corriente se dirige hacia abajo, el alambre se flexiona hacia la derecha.

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

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

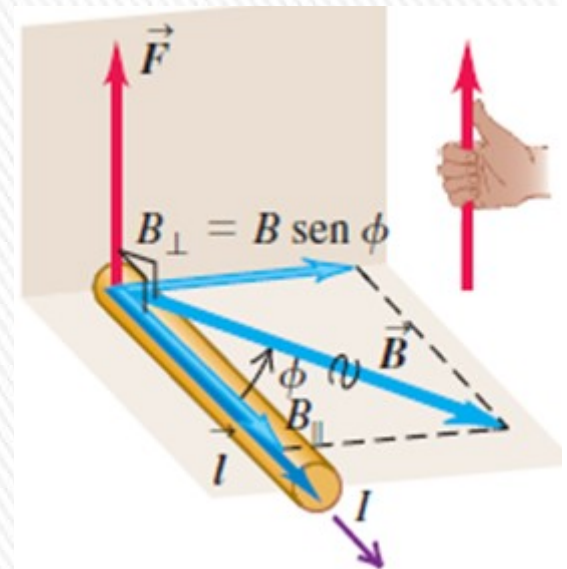
Si \mathbf{B} no es perpendicular al alambre, forma un ángulo Φ con él, solo la componente de \mathbf{B} perpendicular al alambre ejerce una fuerza; tal componente es $B_{\perp} = B \sin \Phi$:

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

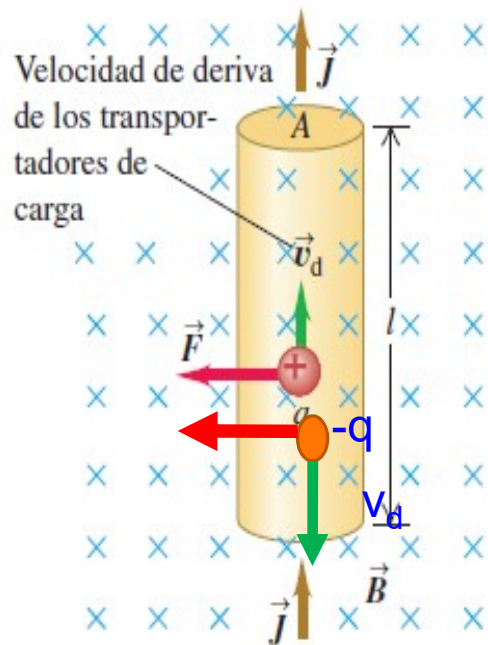
Si el segmento de alambre se representa con un vector l a lo largo del alambre y en el sentido de la corriente:

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

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



Fuerza magnética sobre un conductor que transporta corriente



¿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.

