

# 03.1-CAMPO MAGNÉTICO (I)



# INTRODUCCIÓN

Todos conocemos diversas aplicaciones magnéticas: imanes permanentes, brújulas, motores eléctricos, hornos de microondas, parlantes (bocinas), impresoras y unidades lectoras de discos.

Los imanes permanentes atraen objetos de hierro que no son magnéticos y que atraen o repelen otros imanes.

Un ejemplo de esta interacción es la aguja de una brújula que se alinea con el magnetismo terrestre.

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

A diferencia de las fuerzas eléctricas, que actúan sobre las cargas eléctricas, estén en movimiento o no, las fuerzas magnéticas solo actúan sobre cargas que se *mueven*.

Una carga o *una corriente eléctrica* produce un campo *magnético* y a continuación, *una segunda corriente o carga en movimiento* responde a ese campo magnético, experimentando así una fuerza magnética.

Veremos el modo en que las cargas y corrientes en movimiento *responden a los campos* magnéticos.



# MAGNETISMO

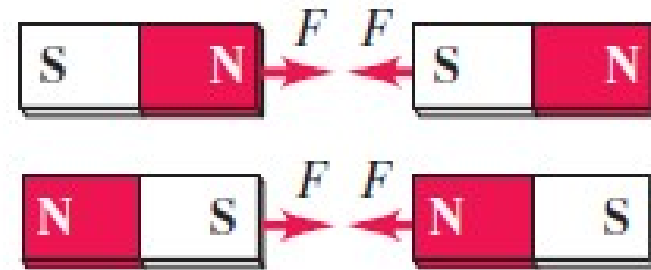
Se observa que los imanes permanentes ejercen fuerza uno sobre otro y también sobre trozos de hierro que no estaban magnetizados.

**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.**

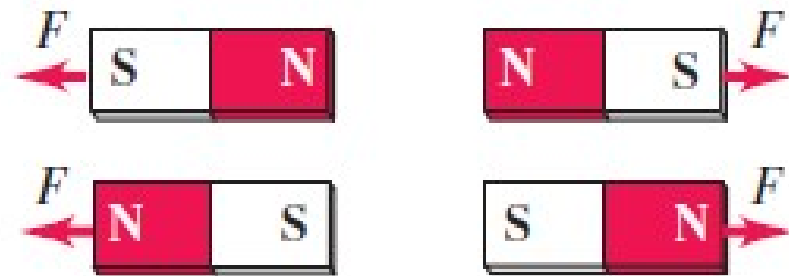
**Polos iguales (N-N o S-S) se repelen y polos opuestos (N-S) se atraen.**

Un imán en forma de barra suspendido de su punto medio de manera que pueda oscilar en un plano horizontal, girará de forma que su **polo norte apunte al Polo Norte geográfico de la Tierra** y su polo sur señale al Polo Sur geográfico de la Tierra.

a) Los polos opuestos se atraen.



b) Los polos iguales se repelen.



# MAGNETISMO

**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.

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

También hay interacciones *eléctricas entre los dos cuerpos*, pero estas son más débiles que las interacciones magnéticas debido a que los dos cuerpos son eléctricamente neutros.

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



# MAGNETISMO

A pesar de que la fuerza entre polos magnéticos es de otro modo similar a la fuerza 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.**

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



# CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Se extiende desde el núcleo interno de la Tierra hasta el límite en el que se encuentra con el viento solar.

Su magnitud en la superficie de la Tierra varía de 20 a 65  $\mu\text{T}$ . Es máxima en los polos y mínima en Sudamérica:

**Uruguay tiene el valor más bajo del planeta: 22 a 23  $\mu\text{T}$ !!!**

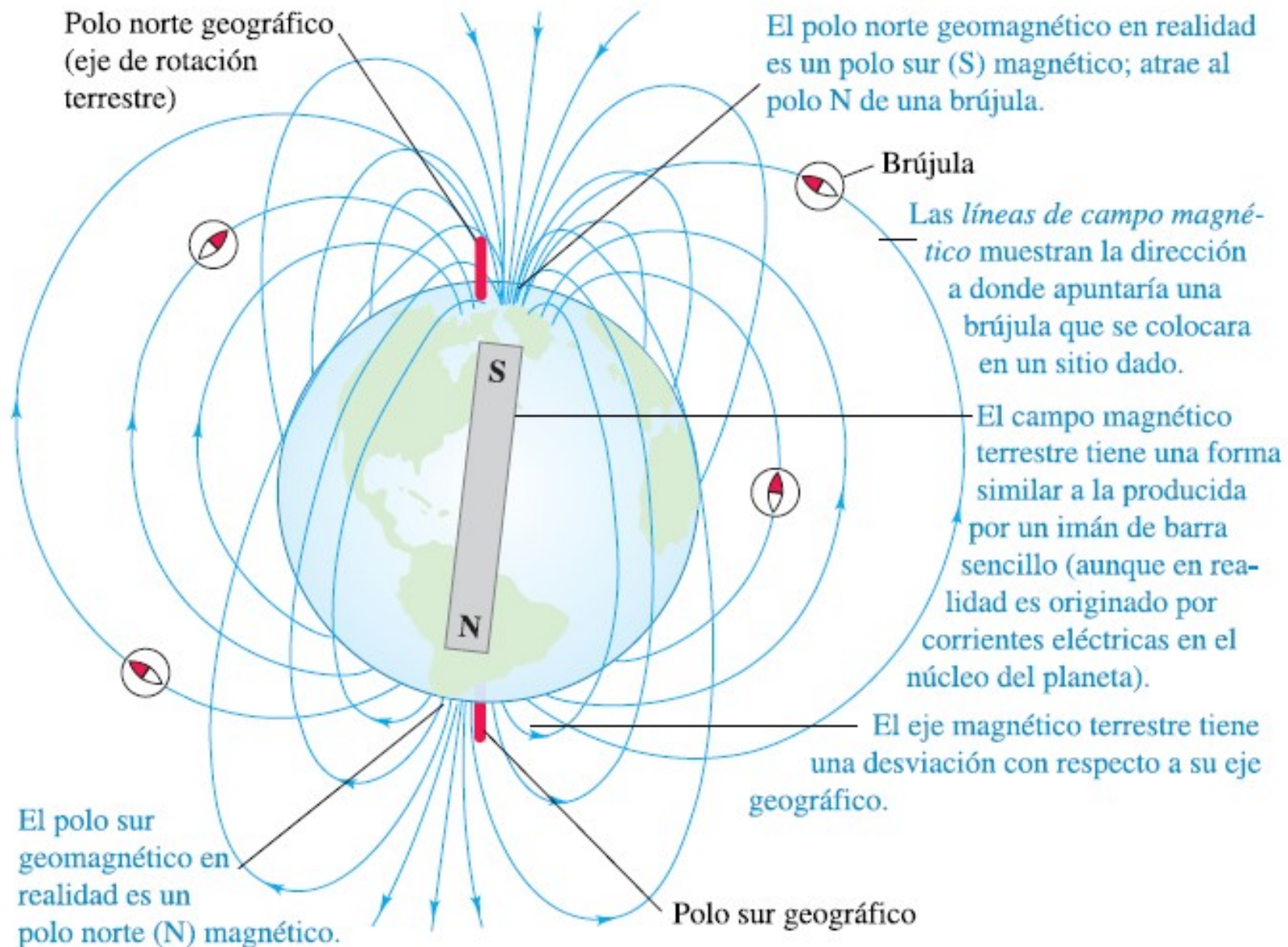
**Modelo: campo creado por dipolo magnético (imán de barra).  
inclinado un ángulo de  $11,5^\circ$  con respecto al eje de rotación, con  
polo sur apuntando hacia el polo norte geomagnético.**

El campo de la Tierra se genera por el movimiento de aleaciones de hierro fundido en el núcleo externo del planeta tierra (la geodínamo).

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

**Inversión de polos:** Al cabo de ciertos periodos de duración aleatoria (con un promedio de duración de varios cientos de miles de años), el campo magnético de la Tierra se invierte (el polo norte y sur geomagnético permutan su posición).

# CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



# CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La **inclinación magnética** es el ángulo que forma el campo magnético respecto a la horizontal. Tiene valores entre  $-90^\circ$  (hacia arriba en el polo sur magnético) y  $90^\circ$  (hacia abajo, en el polo norte magnético). En el polo norte magnético apunta completamente hacia abajo, y va rotando hacia arriba al disminuir la latitud hasta la horizontal (inclinación  $0^\circ$ ) en el ecuador magnético.

La **declinación**, es la desviación entre la dirección de los polos magnéticos respecto a la dirección de los polos geográficos. Es decir la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula.

Los dos polos se desplazan independientemente del otro y no están situados perfectamente enfrentados en puntos opuestos del globo. Su desplazamiento puede ser rápido: se han detectado movimientos del polo norte magnético por encima de los 40 km por año.

En los últimos 180 años, el polo norte magnético se ha movido hacia el noroeste: desde Cabo Adelaida (península Boothia) en 1831 hasta la bahía Resolute a 600 km de distancia en 2001.

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

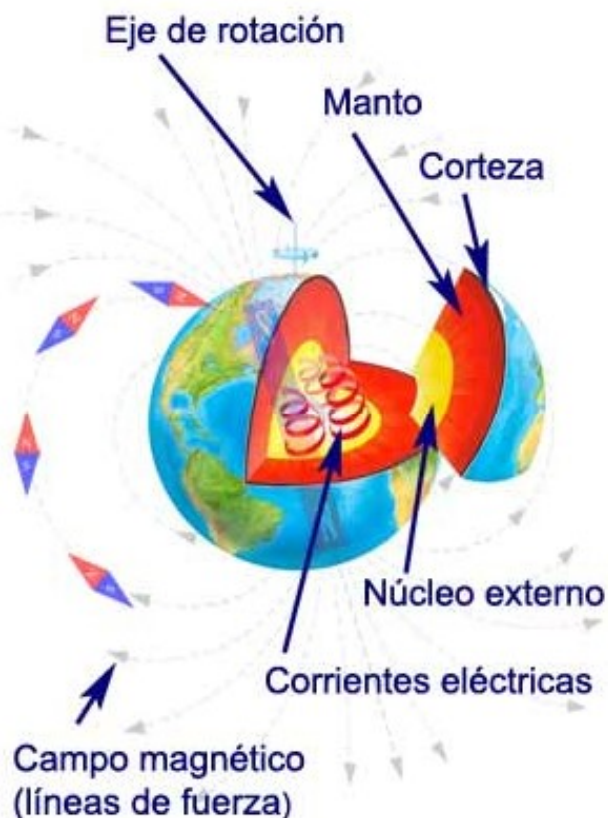
Estos eventos se denominan **inversiones geomagnéticas**.

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 con los movimientos de metales líquidos en el núcleo del planeta. Dicho campo se extiende desde el núcleo, atenuándose progresivamente en el espacio exterior.

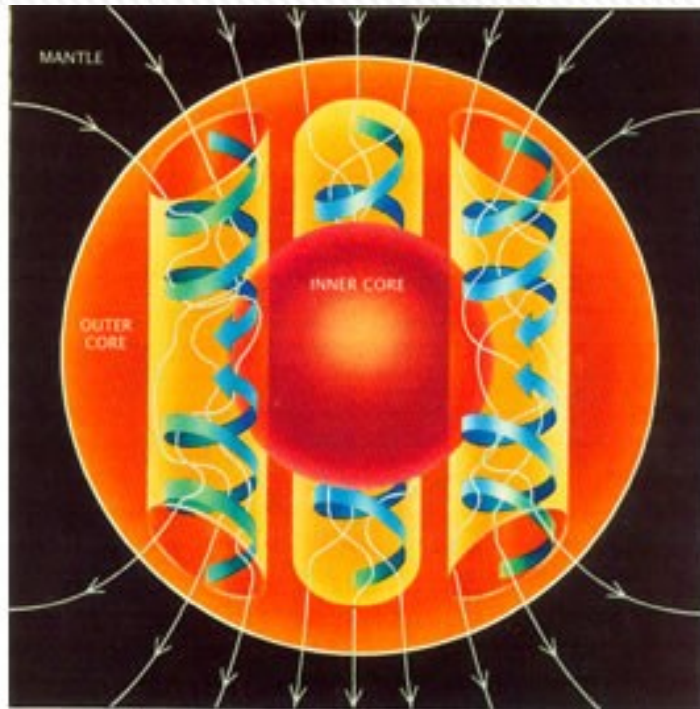


Walter Maurice Elsasser (1904–1991) con la “Teoría de la Dínamo Auto-sostenida”, fue el primero en sugerir que la rotación de la Tierra crea, en el núcleo de hierro fundido, lentos remolinos que giran de oeste a este, generando una corriente.

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). Se piensa que la parte interior, que incluye el centro de la Tierra, es sólida. En cambio, en la capa exterior, en el denominado *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. Éste 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.

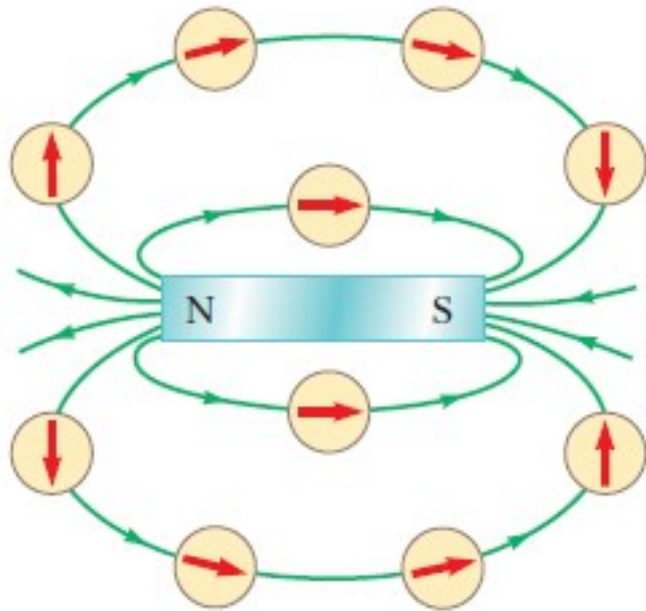
# CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



Por medio de corrientes ascendentes y descendentes el metal líquido transporta calor desde el núcleo interno hasta el manto. Entonces ascienden 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 de nuestro planeta, 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.

Es la rotación terrestre la que fuerza esa orientación y es por ello por lo que los polos magnéticos prácticamente coinciden con los geográficos. Los geofísicos responden a esta pregunta recurriendo al llamado *efecto dinamo*. 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**.

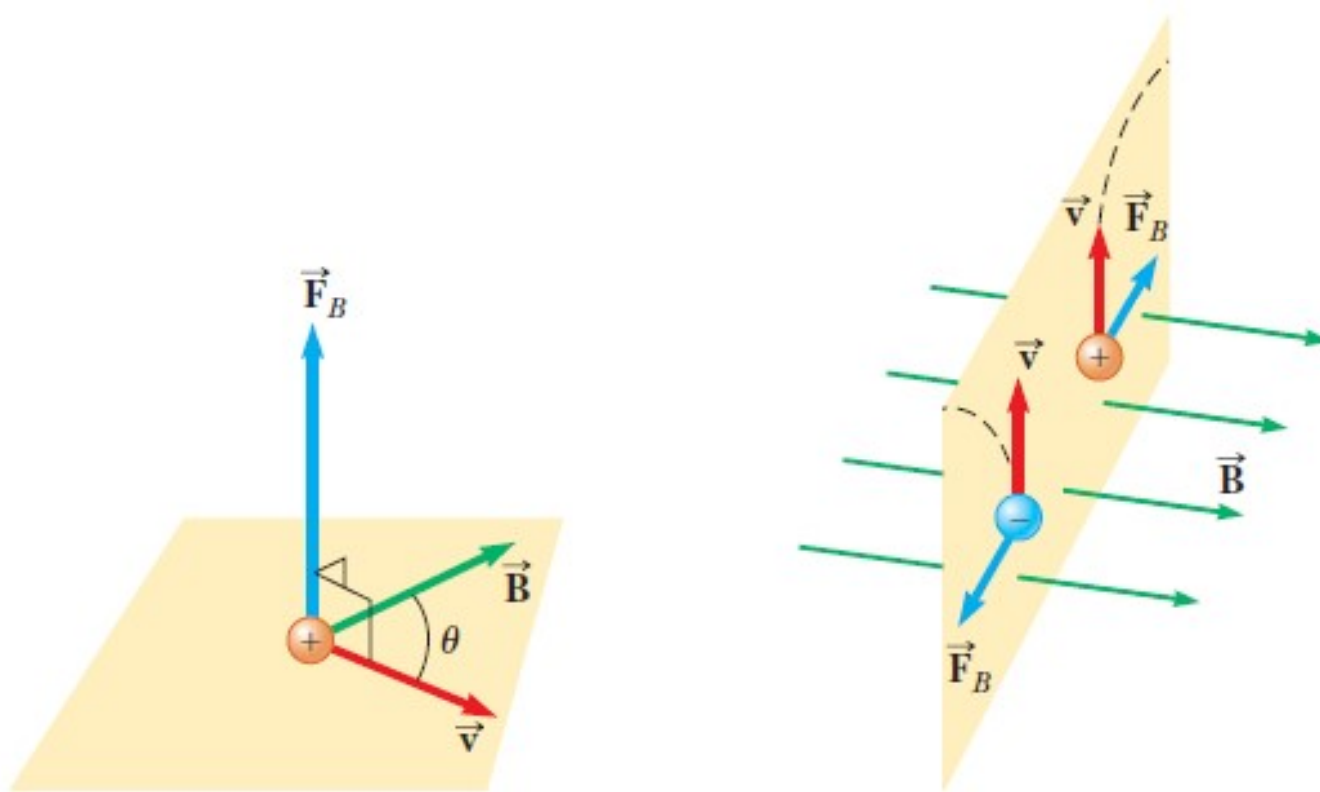
Al igual que el campo eléctrico, el magnético es un *campo vectorial*, es decir, una cantidad vectorial asociada con cada punto del espacio.

En cualquier posición, la dirección y el sentido de **B** se define como aquella en la que el polo norte de la aguja de una brújula tiende a apuntar.



# 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.



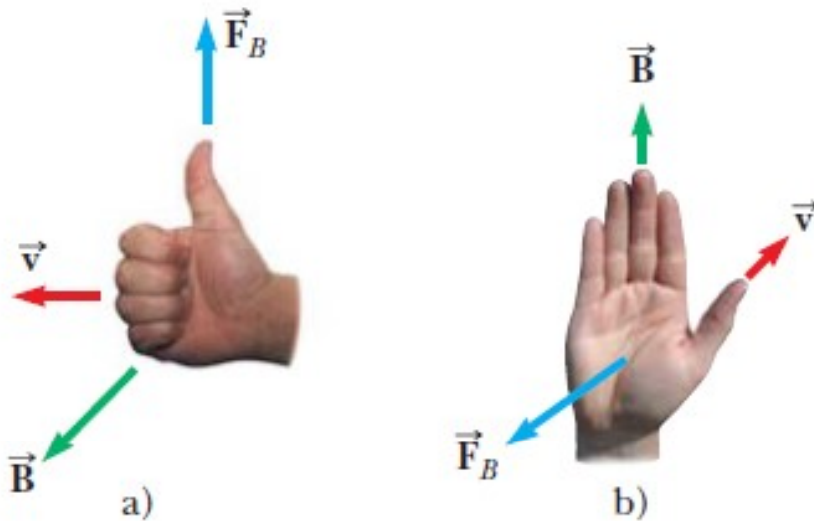
Supondremos que no existen ni  $E$  ni campo gravitacional en la ubicación del objeto de prueba.

# Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

Los experimentos dan los siguientes resultados:

1. La magnitud  $F_B$  de la fuerza magnética ejercida sobre la partícula es proporcional a la carga  $q$  y a la rapidez  $v$  de dicha partícula y a  $\sin \theta$ , donde  $\theta$  es el ángulo que el vector de velocidad de la partícula forma con la dirección de  $\mathbf{B}$ .
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  $\theta$  es el ángulo menor entre  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{B}$ . Por esta expresión puede que  $F_B$  sea igual a cero cuando  $\mathbf{v}$  es paralela o antiparalela a  $\mathbf{B}$  ( $\theta = 0$  o  $180^\circ$ ) y es máxima cuando  $\mathbf{v}$  es perpendicular a  $\mathbf{B}$  ( $\theta = 90^\circ$ ).

Resumiendo:

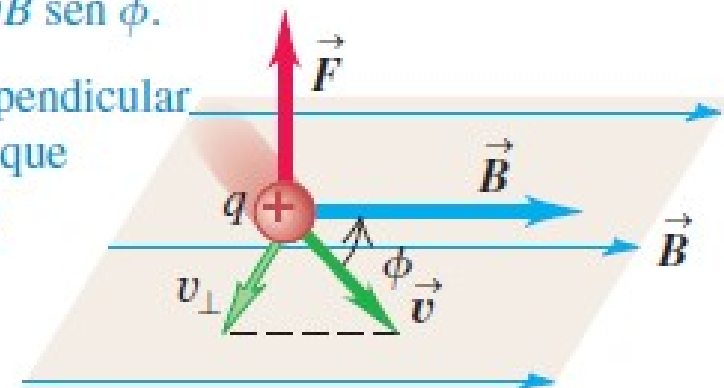
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

El módulo vale:

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

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

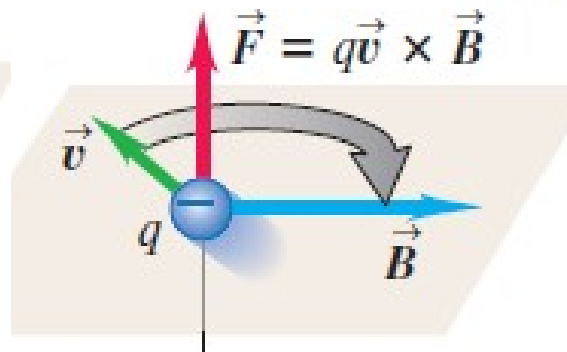
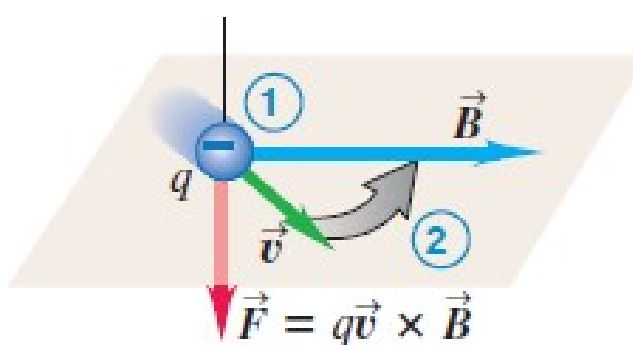
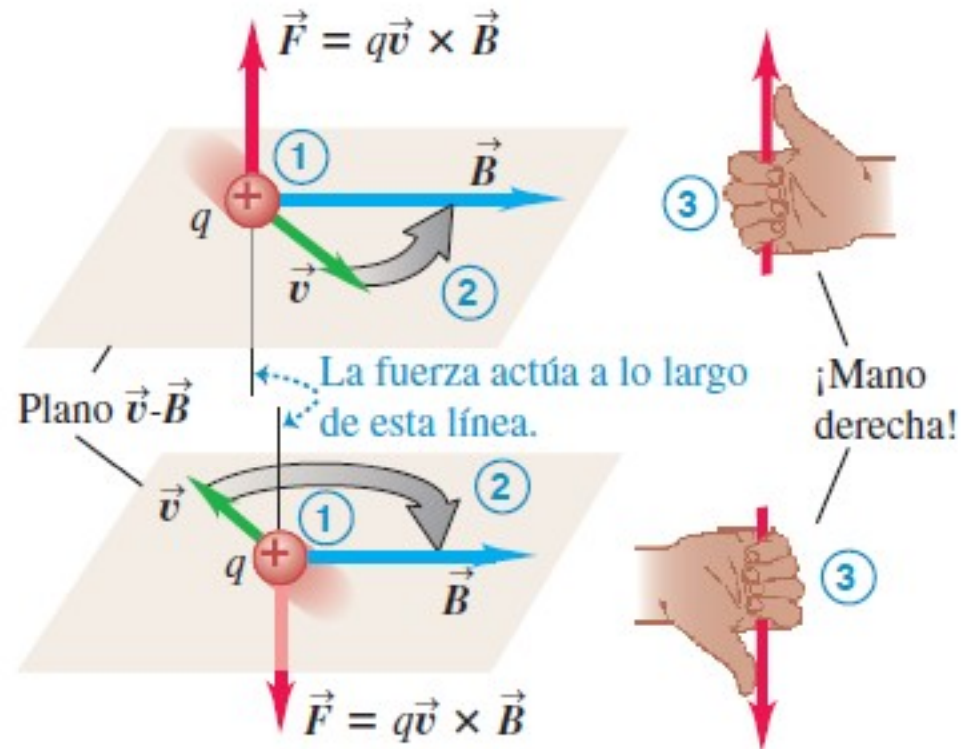
$\vec{F}$  es perpendicular al plano que contiene  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$ .



# Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

Regla de la mano derecha para la dirección de la fuerza magnética sobre una carga positiva que se mueve en un campo magnético:

- 1 Coloque los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  cola con cola.
- 2 Imagine que gira  $\vec{v}$  hacia  $\vec{B}$  en el plano  $\vec{v}-\vec{B}$  (en el menor ángulo).
- 3 La fuerza actúa a lo largo de una línea perpendicular al plano  $\vec{v}-\vec{B}$ . Enrolle los dedos de su mano derecha en torno a esta línea en la misma dirección que giró a  $\vec{v}$ . Ahora, su pulgar apunta en la dirección que actúa la fuerza.



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

# 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)**:

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

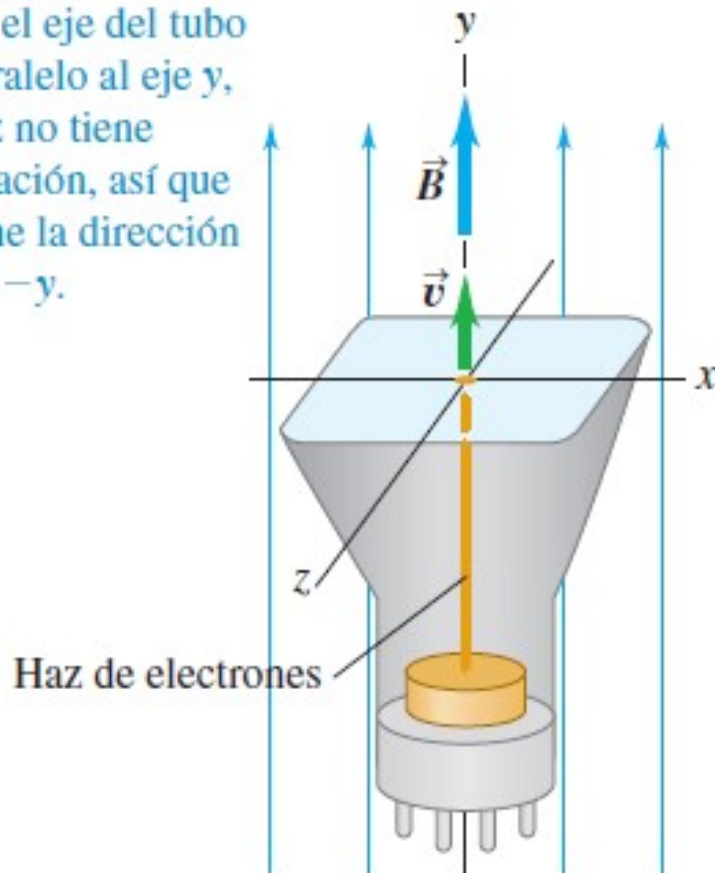
Otra unidad (no del SI) el *gauss* (G), se relaciona con la tesla mediante la conversión  $1 T = 10^4 G$ .

## Algunas magnitudes aproximadas del campo magnético

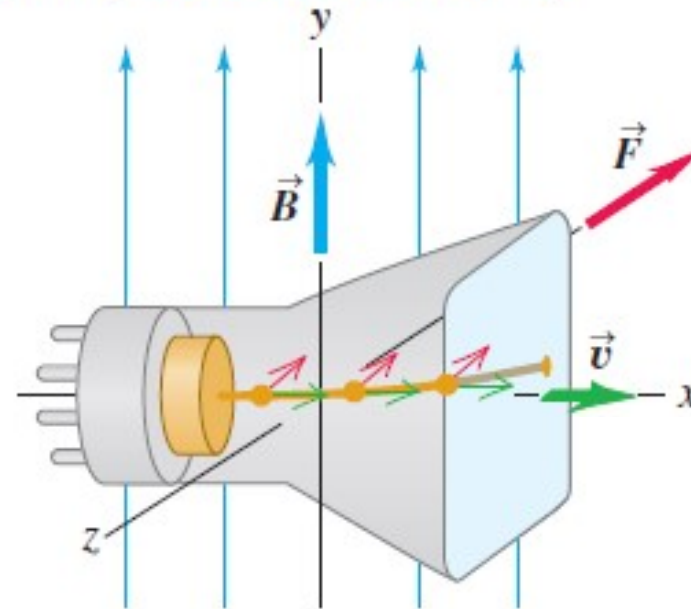
Fuente del campo	Magnitud del campo (T)
Poderoso imán de laboratorio superconductor	30
Poderoso imán de laboratorio convencional	2
Unidad médica MRI (resonancia magnética)	1.5
Imán de barra	$10^{-2}$
Superficie del Sol	$10^{-2}$
Superficie de la Tierra	$0.5 \times 10^{-4}$
Interior del cerebro humano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

# Medición de campos magnéticos con cargas de prueba

a) Si el eje del tubo es paralelo al eje  $y$ , el haz no tiene desviación, así que  $\vec{B}$  tiene la dirección  $+y$  o  $-y$ .



b) Si el eje del tubo es paralelo al eje  $x$ , el haz experimenta una desviación en la dirección  $-z$  por lo que  $\vec{B}$  tiene la dirección  $+y$ .



Haz estrecho de electrones emitido por tubo de rayos catódicos (antiguos televisores) con una velocidad conocida  $\mathbf{v}$ , en una región donde hay un  $\mathbf{B}$ .

Cuando una partícula cargada se mueve en una región del espacio en que están presentes los campos eléctrico y magnético, ambos ejercerán fuerzas sobre la partícula

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

## Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

Partícula de masas  $m$  con  $q$  positiva se encuentra en el punto  $O$ , moviéndose con velocidad  $\vec{v}$  en un campo magnético uniforme  $\vec{B}$  dirigido hacia el plano de la figura. Los vectores  $\vec{v}$  y  $\vec{B}$  son perpendiculares, por lo que la fuerza magnética tiene una magnitud  $F = qvB$  y el sentido que se indica en la figura.

La fuerza siempre es perpendicular a  $\vec{v}$  por lo que no puede cambiar la magnitud de la velocidad, solo su dirección.

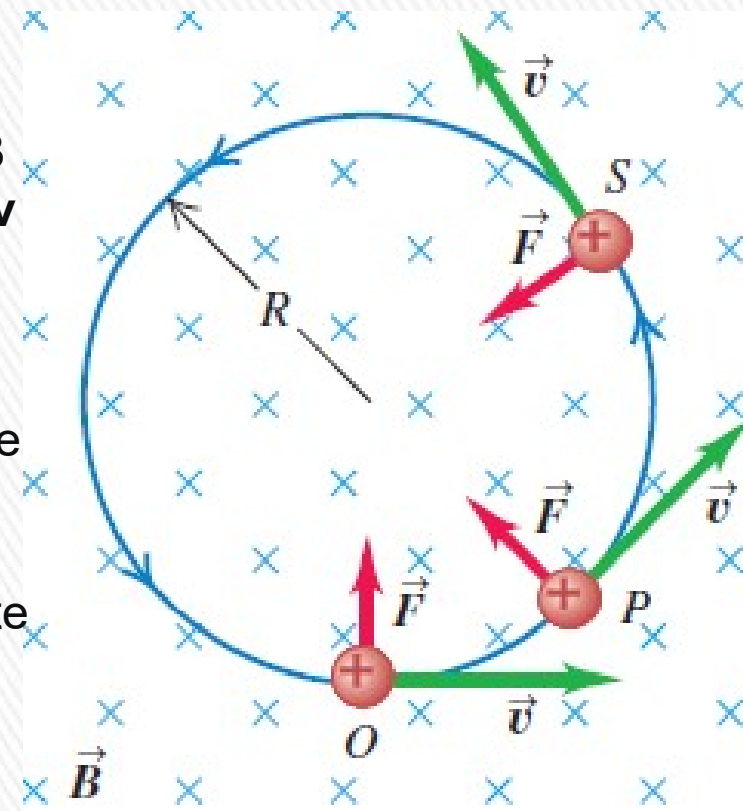
La fuerza magnética nunca tiene una componente paralela al movimiento de la partícula, de modo que la fuerza magnética nunca realiza *trabajo* sobre la partícula. Esto se cumple aun si el campo magnético no es uniforme.

La partícula se mueve bajo la influencia de una fuerza de magnitud constante que siempre es perpendicular con la velocidad de la partícula.

Por tanto 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

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



## Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

$F = qvB = m \frac{v^2}{R}$  radio de una órbita circular en un campo magnético:

La rapidez angular  $\omega$  de la partícula se calcula con  $v = R\omega$   $R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$

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

Y el periodo  $T$  vale:

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

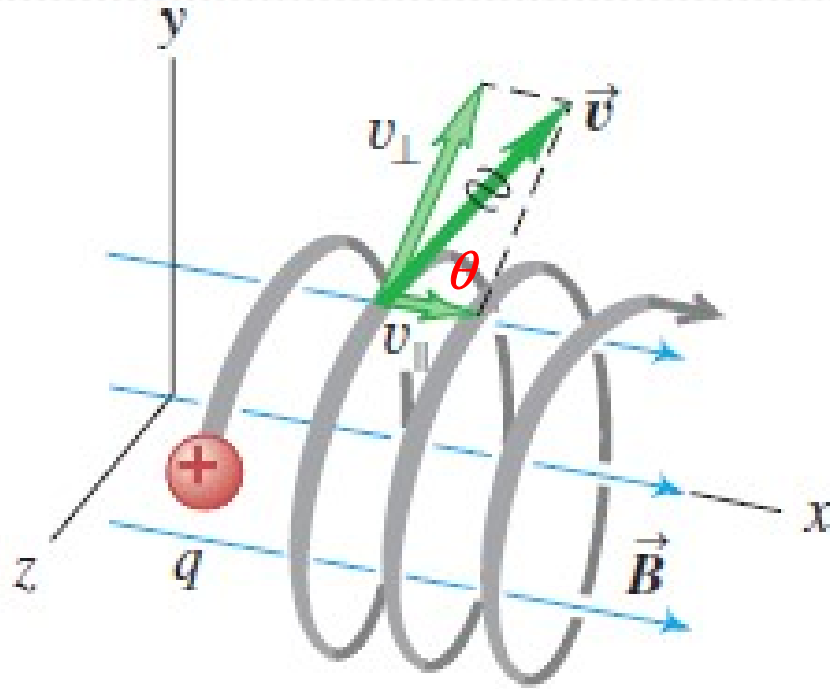
El número de revoluciones por unidad de tiempo es  $f = \omega/2\pi$ .

*Esta frecuencia  $f$  es independiente del radio  $R$  de la trayectoria.*

*Se denomina **frecuencia de ciclotrón**; en un acelerador de partículas llamado **ciclotrón**, las partículas que se mueven en trayectorias casi circulares reciben un impulso que se duplica en cada revolución, lo cual incrementa su energía y sus radios orbitales, pero no su rapidez angular ni su frecuencia.*

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 con 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*.

## 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* ( $v_{\perp}$ )

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

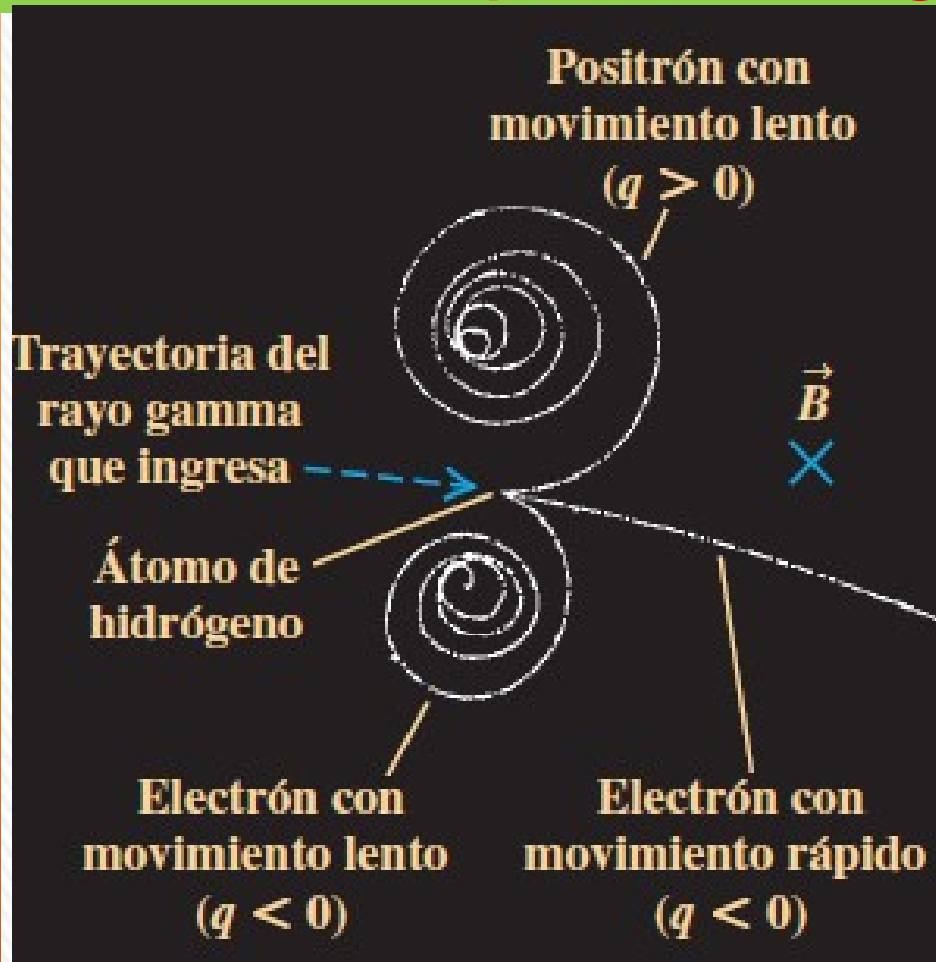
El paso de la hélice, es decir la distancia entre dos puntos de la hélice situados sobre una generatriz del cilindro imaginario sobre la que se enrolla, vale:

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

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



La figura muestra una cámara llena de hidrógeno líquido y con un campo magnético que entra al plano de la fotografía.

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).**

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.

Experimentos similares permiten a los físicos determinar la masa y la carga de partículas recién descubiertas

# Selector de velocidad

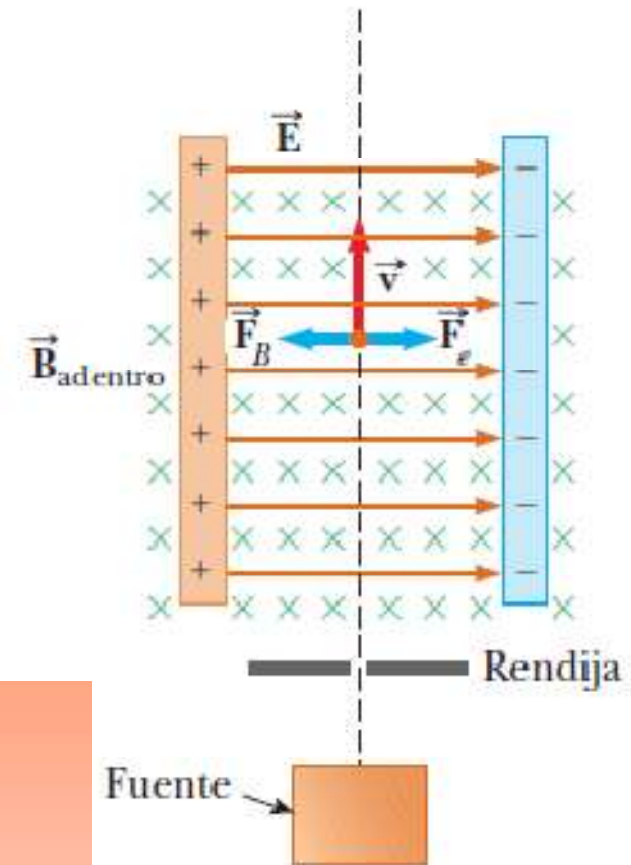
Cuando una partícula con carga positiva se mueve con velocidad  $\mathbf{v}$  ante la presencia de un campo magnético dirigido hacia la página y un campo eléctrico dirigido hacia la derecha, experimenta una fuerza eléctrica  $q\mathbf{E}$  hacia la derecha y una fuerza magnética  $q\mathbf{v}\times\mathbf{B}$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

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

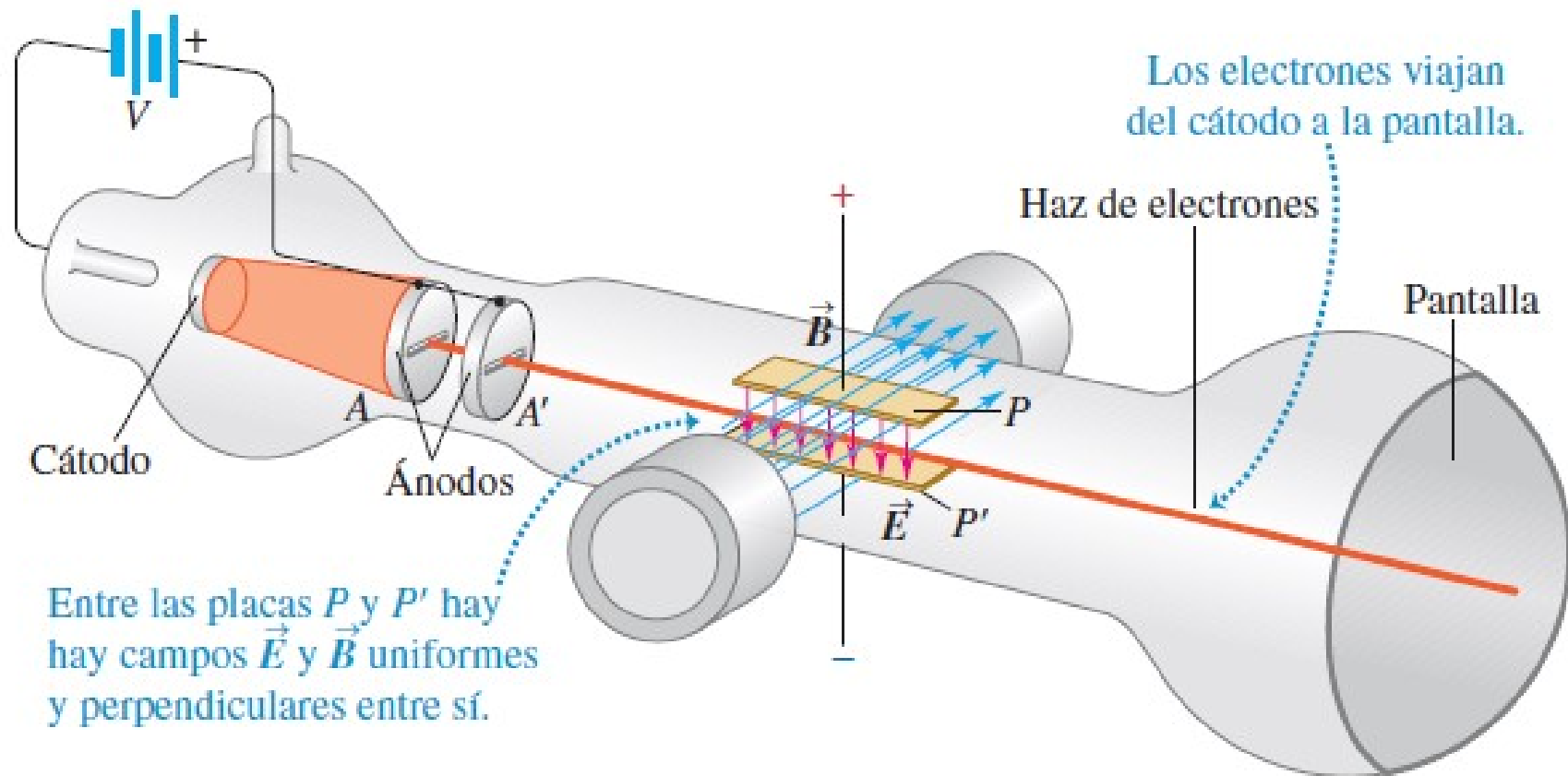
Solo las partículas con rapidez igual a  $E/B$  pasan sin ser desviadas por los campos.

Al ajustar  $E$  y  $B$  de manera adecuada, es posible seleccionar partículas que tengan una rapidez específica para usarlas en otros experimentos.

Como la ecuación no depende de  $q$ , un selector de velocidad para partículas con carga positiva también funciona para electrones u otras partículas cargadas negativamente



## 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  $e/m$ :

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

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.

Así, a **Thomson se le da el crédito por descubrir la primera partícula subatómica: el electrón**

# Espectrómetros de masas

En 1919 Francis Aston construyó la primera de una familia de instrumentos llamada **espectrómetros de masas**. En la figura se muestra una variante construida por Bainbridge.

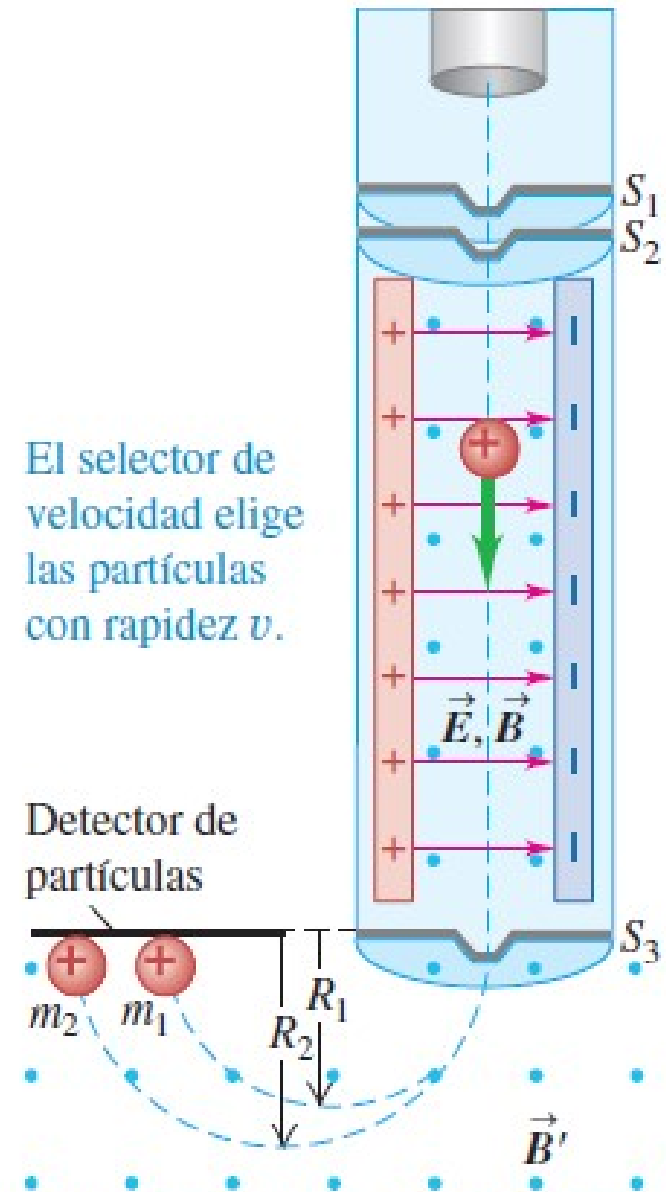
Los iones positivos de una fuente pasan a través de las ranuras  $S_1$  y  $S_2$  para formar un haz estrecho.

Después, los iones pasan a través de un selector de velocidad con campos y cruzados (sólo siguen los 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 (que en el diseño de Bainbridge es una placa fotográfica) 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  $+e$ .



El selector de velocidad elige las partículas con rapidez  $v$ .

Detector de partículas

El campo magnético separa las partículas por masa; cuanto más grande sea la masa de una partícula, mayor será el radio de su trayectoria.

## 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.

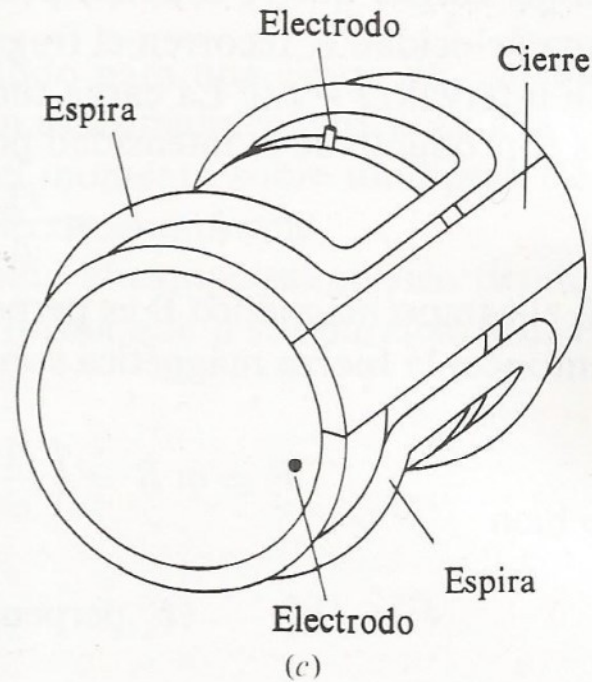
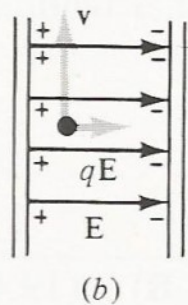
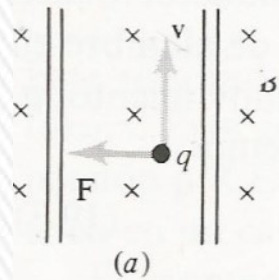
Las cargas se acumulan en las paredes del vaso sanguíneo.

Se llega al equilibrio cuando el campo eléctrico debido a esta separación de cargas produce una fuerza eléctrica  $qE$  sobre un ion de carga  $q$  que contrarresta la fuerza magnética  $qvB$ , es decir cuando

$$E = vB.$$

La diferencia de potencial asociada al campo eléctrico es proporcional a la velocidad media  $v$  de la sangre, la cual puede medirse con un voltímetro suficientemente sensible.

# MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS DE FLUJO



Medidor electromagnético de flujo usado para medir flujos de sangre.

a) Cuando el campo magnético está dirigido hacia la página, la fuerza magnética sobre un ion positivo se dirige hacia la izquierda.

b) 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.

c) 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 entre los electrodos es proporcional al caudal.

## ORIENTACIÓN MAGNÉTICA DE LOS ANIMALES: MAGNETORRECEPCIÓN

Capacidad que tienen algunos seres vivos de detectar la dirección y sentido del campo magnético, obteniendo información sobre dirección, ubicación o altitud de un objeto.

Primeros descubrimientos: palomas mensajeras un importante (pero no el único) medio de orientación (se desorientan si se les colocan pequeños imanes)

Otras aves, algunas tortugas y peces, e insectos como las abejas y hasta ciertas bacterias presentan esta capacidad.

Los seres humanos tienen depósitos de materiales magnéticos en el hueso etmoides de la nariz, y hay indicios de capacidad de **magnetorrecepción**.

En palomas mensajeras como en truchas y en ciertas bacterias, sensor consiste en cristales de magnetita, conectados con orgánulos transductores.

Las bacterias magnetostáticas y los hongos contienen órganos llamados **magnetosomas** que contienen la magnetita.

Abejas; magnetita está embutida en las membrana celular de ciertos grupos de neuronas y se cree que cuando se reorienta siguiendo al campo magnético terrestre se induce corrientes que modifican la polarización celular.



# MATERIALES MAGNÉTICOS

Cuando se introduce un dieléctrico en un campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , el campo eléctrico se reduce a  $\mathbf{E}/\kappa$ , siendo  $\kappa$  la constante dieléctrica.

Similarmente, si se introduce un material en un campo magnético  $\mathbf{B}$ , el campo cambia a  $K_m \mathbf{B}$ , siendo  $K_m$  la constante magnética.

Hay tres tipos principales de materiales magnéticos:

**diamagnéticos** ( $K_m$  ligeramente inferior a 1). Se caracterizan por ser repelidos por los imanes. Ejemplos: antimonio, bismuto, cobre, oro, silicio, germanio, gases nobles, hidrógeno, agua,

**paramagnéticos** ( $K_m$  ligeramente superior a 1). Se caracteriza por ser levemente atraído por imanes. Ejemplos: aire, magnesio, aluminio, titanio, wolframio.

**ferromagnéticos** ( $K_m$  varía con el campo aplicado y con el modo como ha sido tratado el material, pero su valor típico es muy superior a 1). Ejemplos: hierro, cobalto, níquel, gadolinio y disprosio.

# MATERIALES MAGNÉTICOS: DIAMAGNETISMO

Son repelidos por los imanes.

1845 Faraday: interacción del bismuto con un imán.

Se explica a través de la Ley de Lenz a nivel molecular o atómico: los átomos contienen electrones que se mueven libremente y cuando se aplica un B exterior se induce una corriente superpuesta cuyo efecto magnético es opuesto al campo aplicado.

Aparece en sistemas moleculares que contengan todos sus electrones apareados y sistemas atómicos o iónicos que contengan orbitales llenos (espines de electrones de último nivel apareados con momento magnético prácticamente nulo).

$K_m$  es menor a 1 en un factor de sólo 0,001 al 0,01 % . Se presenta en todos los materiales, aunque muchas veces es contrarrestado por otros efectos.



Rana levita en un campo magnético de 16 T en laboratorio. La fuerza de suspensión es ejercida sobre las moléculas diamagnéticas del agua existentes en el cuerpo de la rana. La rana no sufrió ningún daño por causa de esta experiencia.

# MATERIALES MAGNÉTICOS: PARAMAGNETISMO

La suma neta de los momentos magnéticos permanentes de sus átomos o moléculas es nula, en ausencia de un campo magnético externo.

Los momentos interactúan sólo de manera débil entre sí y se orientan al azar en ausencia de un campo magnético externo. Cuando la sustancia paramagnética se coloca en un campo magnético externo, sus momentos atómicos tienden a alinearse con el campo.

El proceso de alineamiento compite con el movimiento térmico, que tiende a orientar al azar a los momentos magnéticos.

Al colocarse en un campo magnético externo, los dipolos tienden a alinearse dirigiendo sus momentos paralelamente al campo, aumentando así el campo total en el interior del material.

Como los efectos de los dipolos permanentes son en general mayores que los de las corrientes inducidas, el paramagnetismo cuando está presente, enmascarará por completo los efectos diamagnéticos.

El valor de  $K_m$  sobrepasa la unidad en un factor pequeño del orden de 0,01 %.



# MATERIALES MAGNÉTICOS: FERROMAGNETISMO

## Exhiben efectos magnéticos intensos.

Contienen momentos magnéticos atómicos permanentes que tienden a alinearse paralelamente en presencia de un  $B$  externo, lo que se mantiene después de haberse retirado el  $B$  externo.

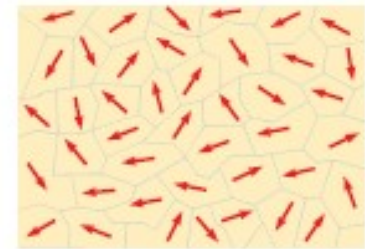
La alineación permanente se debe a un fuerte acoplamiento entre momentos vecinos, el cual puede entenderse sólo en términos de la mecánica cuántica.

Constituidos por **dominios**: regiones microscópicas en las cuales todos los momentos magnéticos están alineados, con volúmenes de  $10^{-12}$  a  $10^{-8}$  m<sup>3</sup> y contienen  $10^{17}$  a  $10^{21}$  átomos.

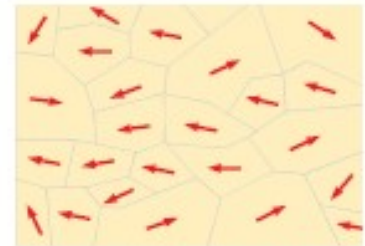
A temperaturas normales, la agitación térmica no es suficiente para alterar esta orientación de los momentos magnéticos.

Cuando una sustancia ferromagnética alcanza o excede una temperatura crítica (**temperatura Curie**), pierde su magnetización residual.

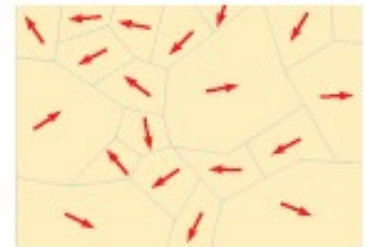
Por debajo de esta temperatura los momentos magnéticos están alineados y la sustancia es ferromagnética.



a)



b)



c)

- a) Orientación azar dipolos magnéticos atómicos en dominios de sustancia no magnetizada.
- b) Al aplicar un  $B$  externo, los dominios con componentes de momento magnético en la misma dirección que  $B$  se vuelven más grandes, dando a la muestra una magnetización neta.
- c) Conforme el campo se hace aún más intenso, los dominios con vectores de momentos magnéticos no alineados con el campo externo se vuelven muy pequeños.