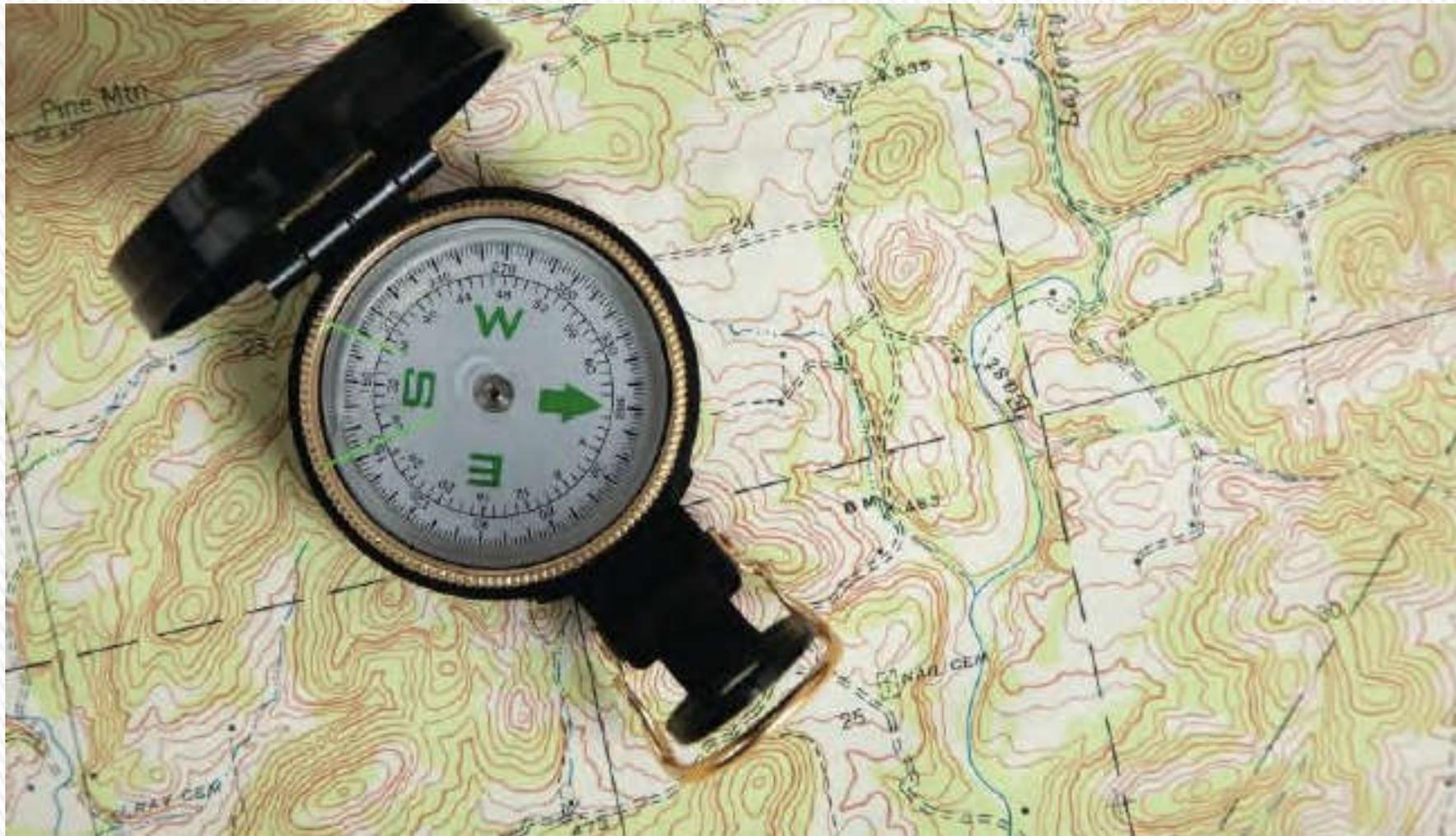


03.1-CAMPO MAGNÉTICO (I)



INTRODUCCIÓN

Aplicaciones magnéticas: imanes permanentes, brújulas, electromimanes, motores eléctricos, dínamos, parlantes, impresoras y unidades lectoras de discos, trenes magnéticos, IRM...

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



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



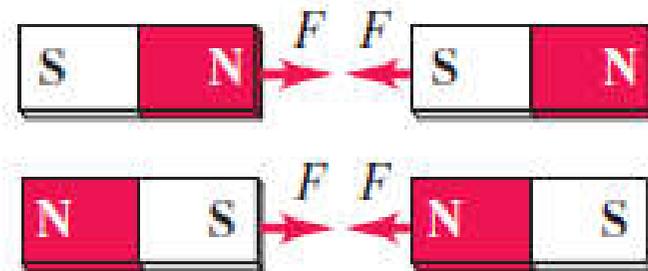
MAGNETISMO

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

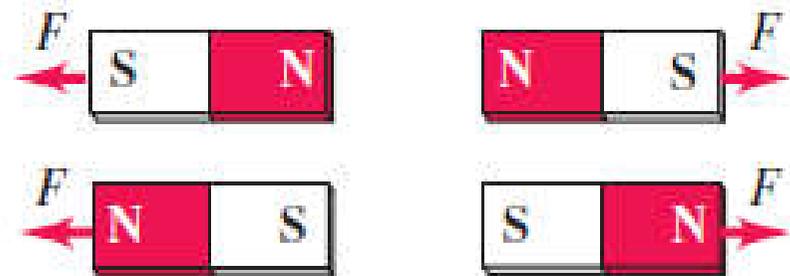
Todo imán, cualquiera que fuera su forma, tiene dos polos, uno *norte* (N) y otro *sur* (S), que ejercen fuerzas sobre otros polos magnéticos de manera similar a como las cargas eléctricas ejercen fuerzas entre sí.

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

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 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.



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.

MAGNETISMO

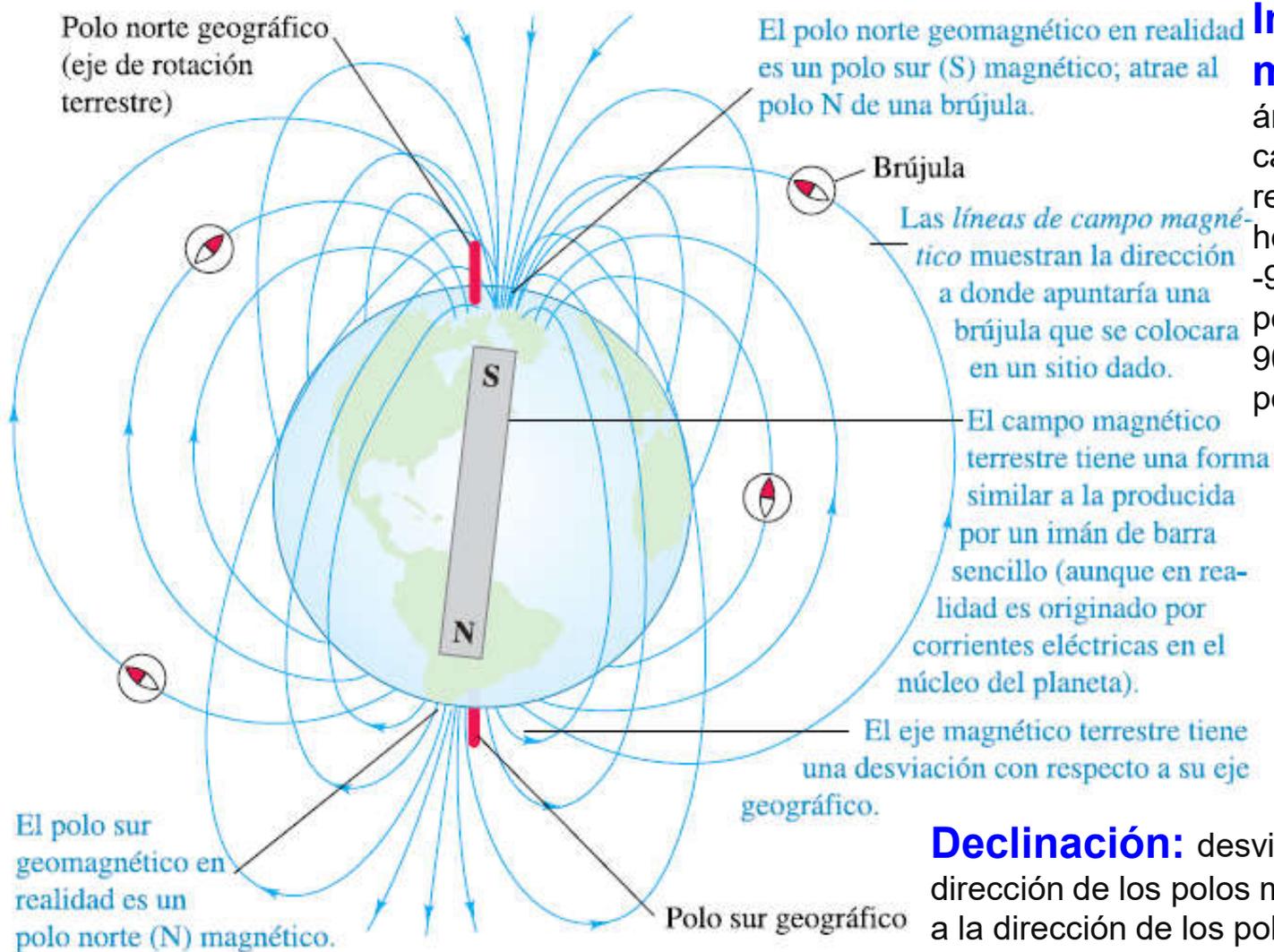
A pesar de que la fuerza entre polos magnéticos es similar a la fuerza entre dos cargas eléctricas, éstas pueden aislarse (como el electrón y el protón), en cambio **nunca ha sido posible aislar un solo polo magnético.**

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



CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



Inclinación magnética:

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

Declinación: desviación entre la dirección de los polos magnéticos respecto a la dirección de los polos geográficos.

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.

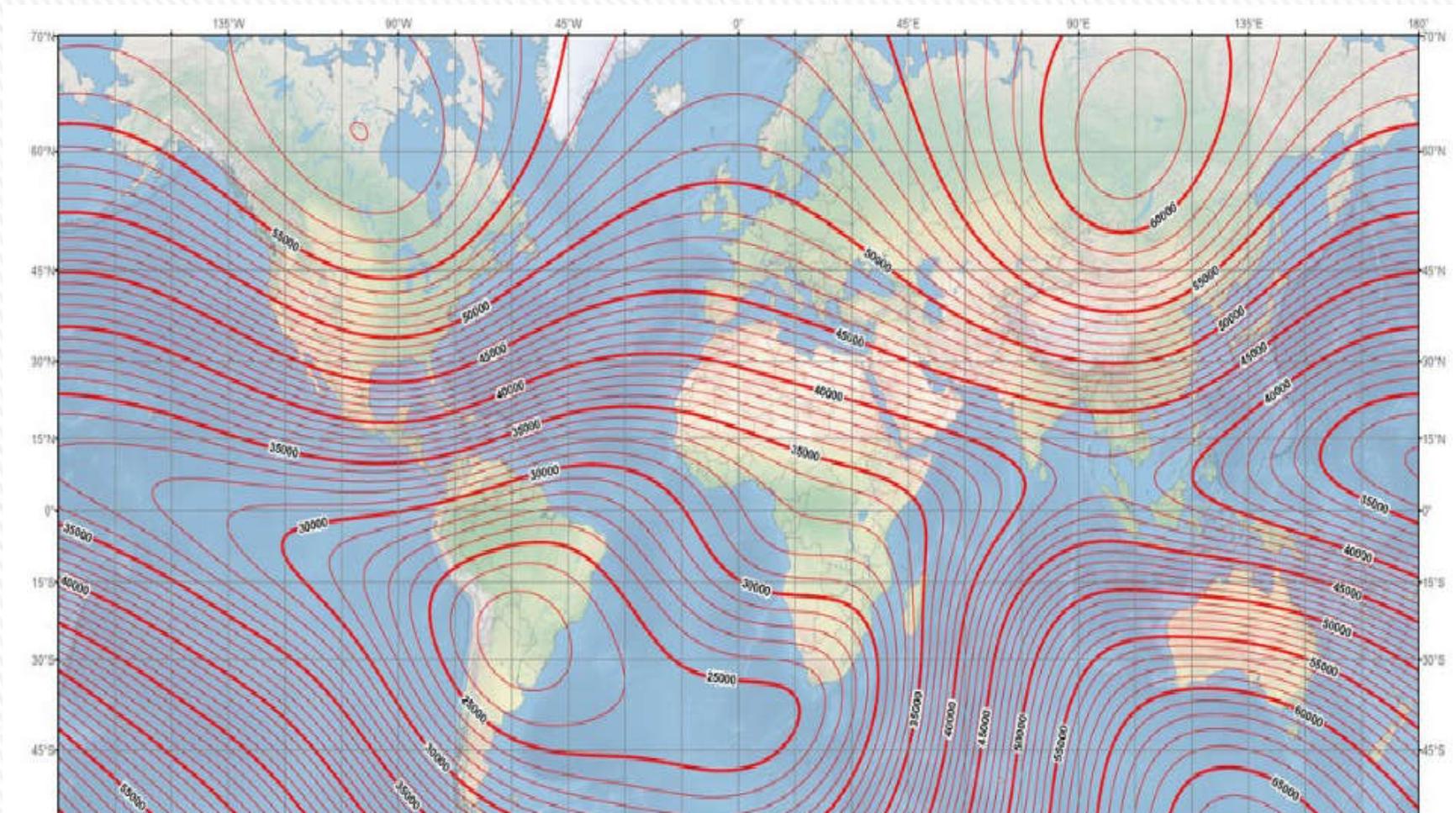
CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

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.

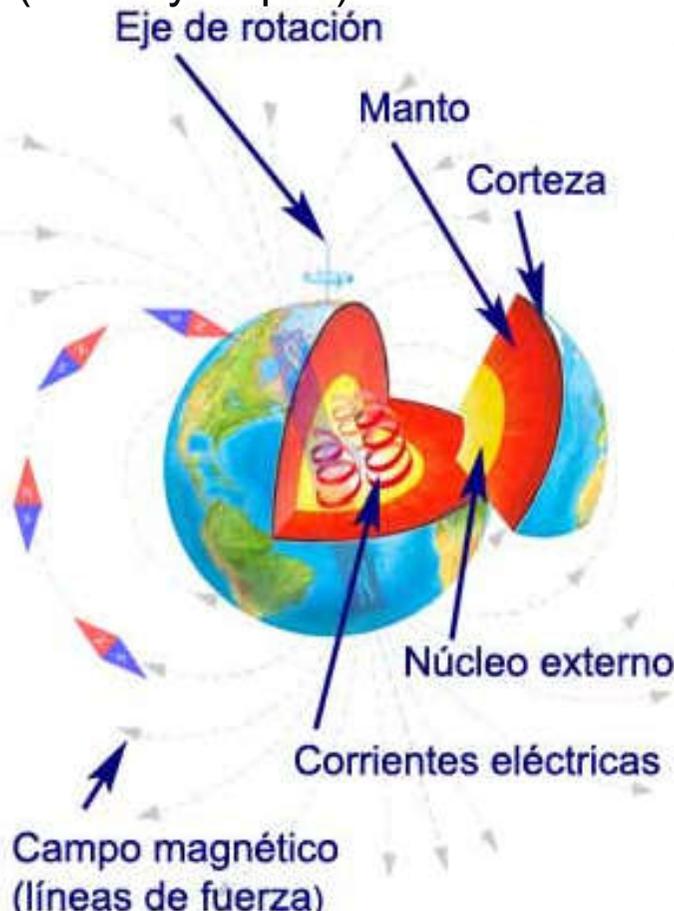
Las inversiones ocurren aparentemente a intervalos aleatorios de tiempo que varían entre menos de 100.000 años hasta 50 millones de años.

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.



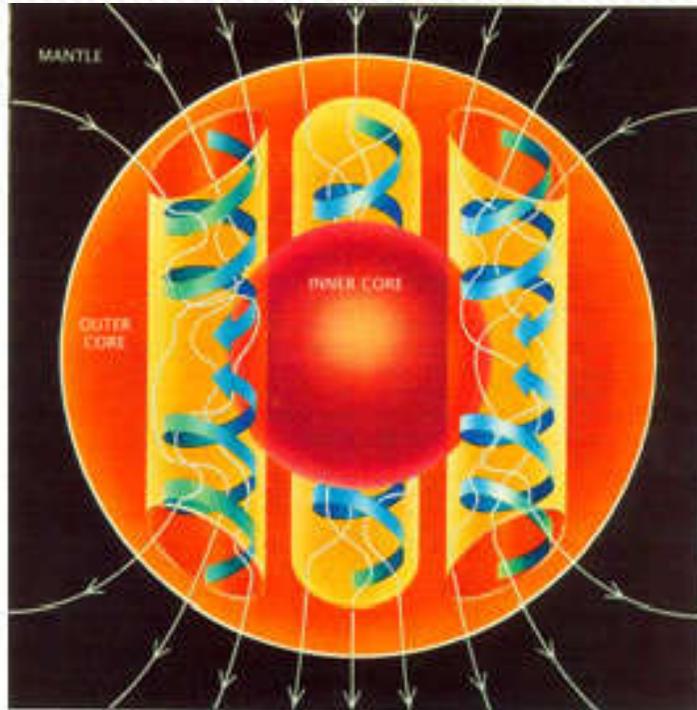
W. Maurice Elsasser (1904–1991) con la “Teoría de la Dínamo Auto-sostenida”, fue el primero en sugerir que la rotación de la Tierra crea, en el núcleo remolinos que giran de oeste a este, generando una corriente. El **núcleo terrestre** es una enorme esfera metálica con un radio de unos 3400 km. Está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

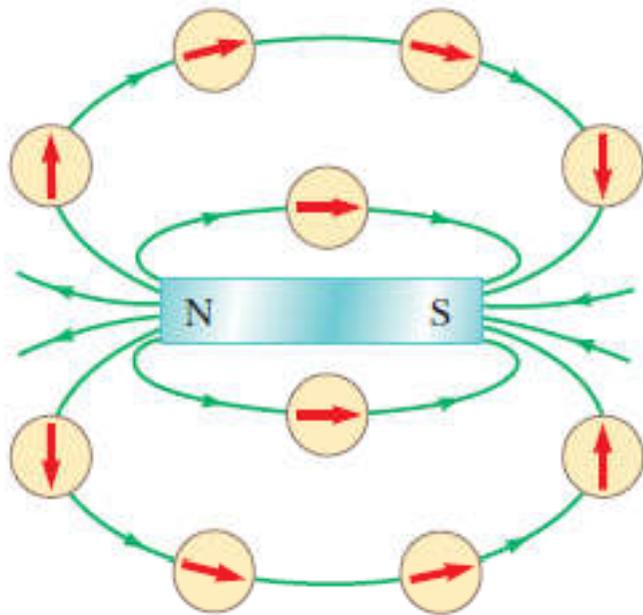
En el núcleo externo las corrientes eléctricas describen trayectorias helicoidales similares a las bobinas de los electroimanes de tal forma que el campo magnético que inducen está orientado preferentemente según el eje de rotación N-S.

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.

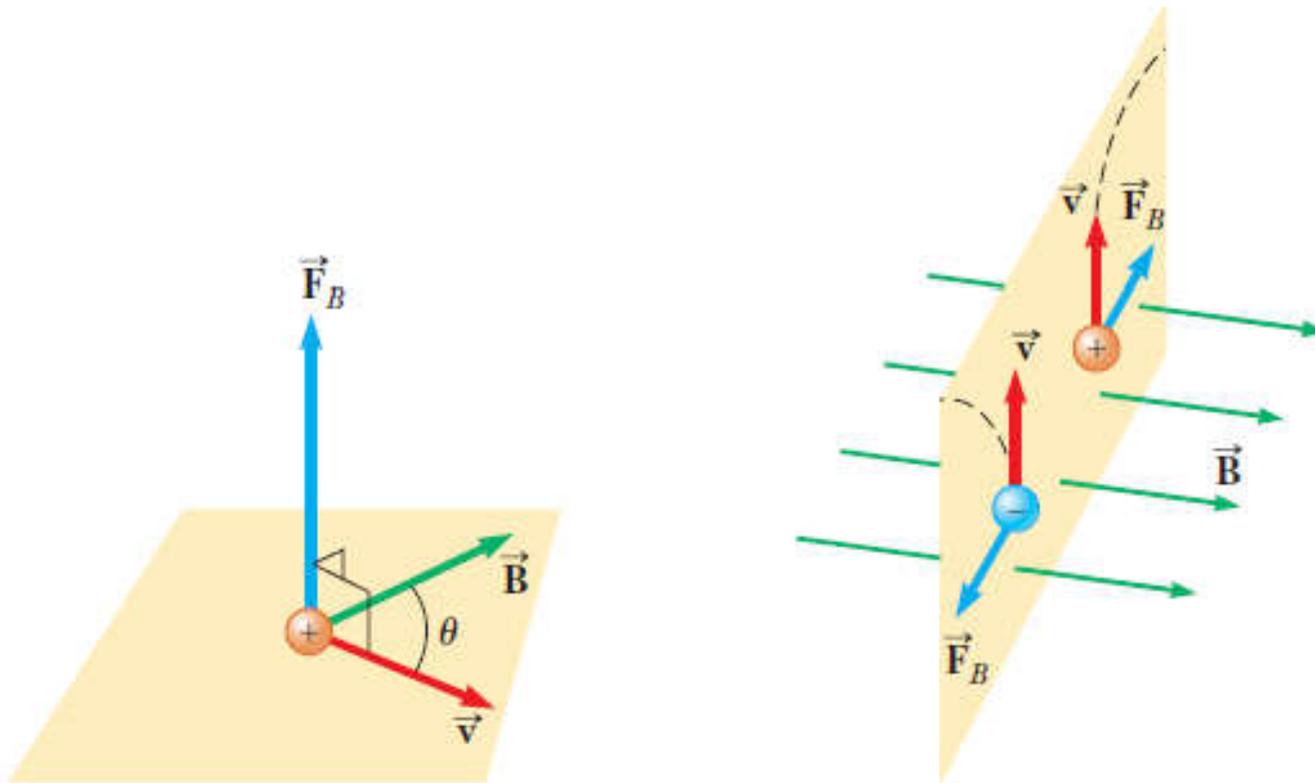
Es posible representar el campo magnético gráficamente utilizando **líneas de campo magnético**.

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.

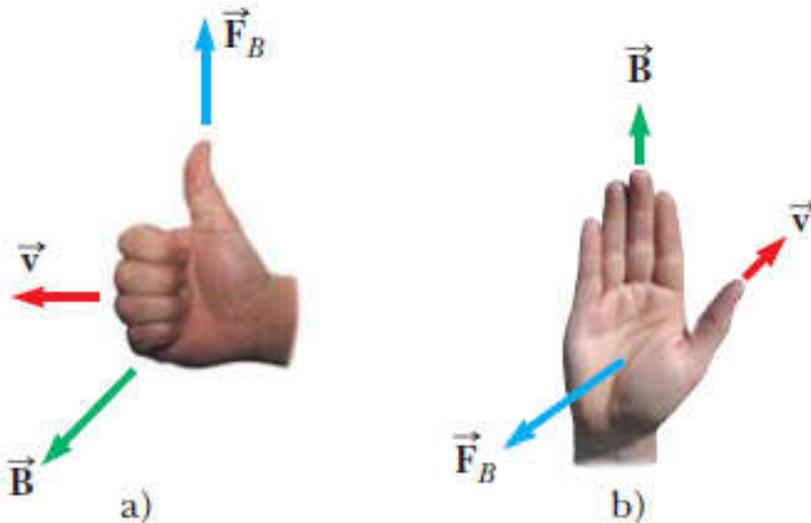
Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

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

Resumiendo:

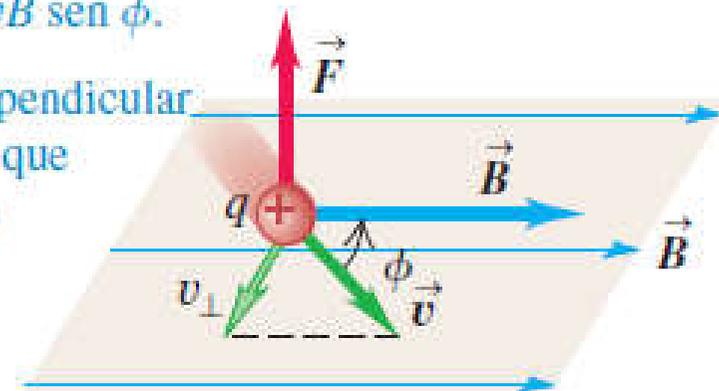
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

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 $F = |q|v_{\perp} B = |q|vB \sin \phi$.

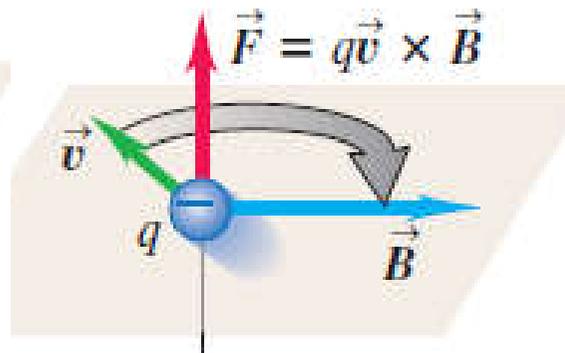
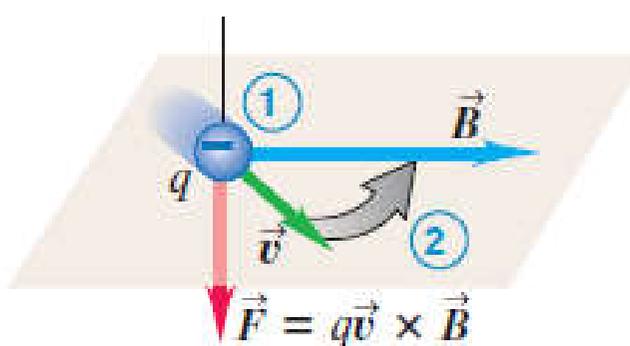
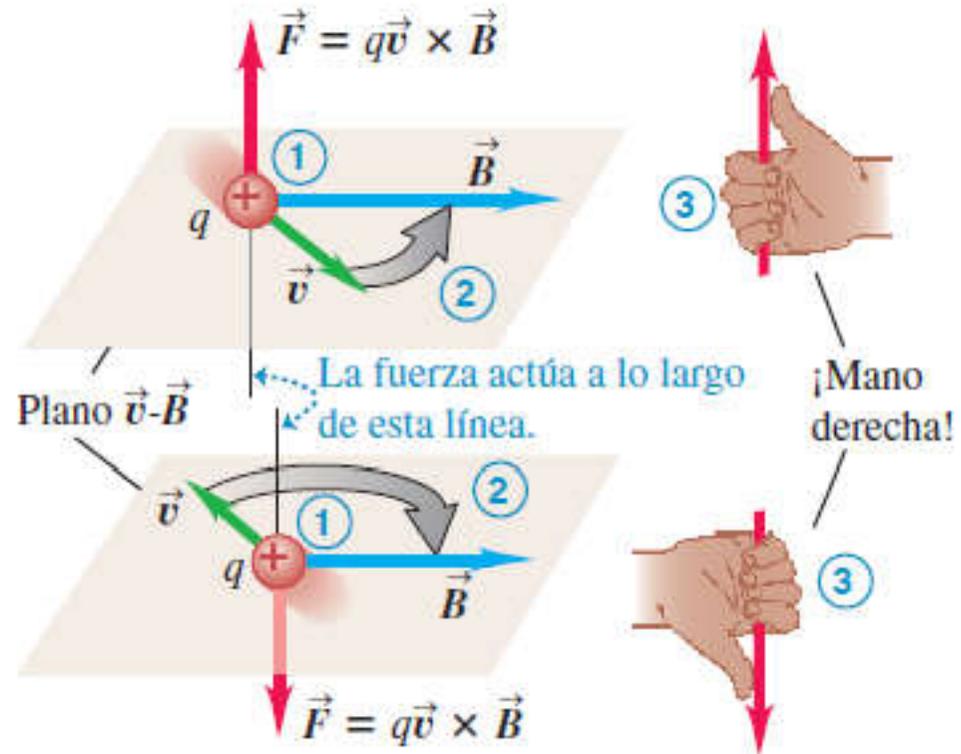
\vec{F} es perpendicular al plano que contiene \vec{v} y \vec{B} .



Fuerzas magnéticas sobre cargas móviles

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)**:

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

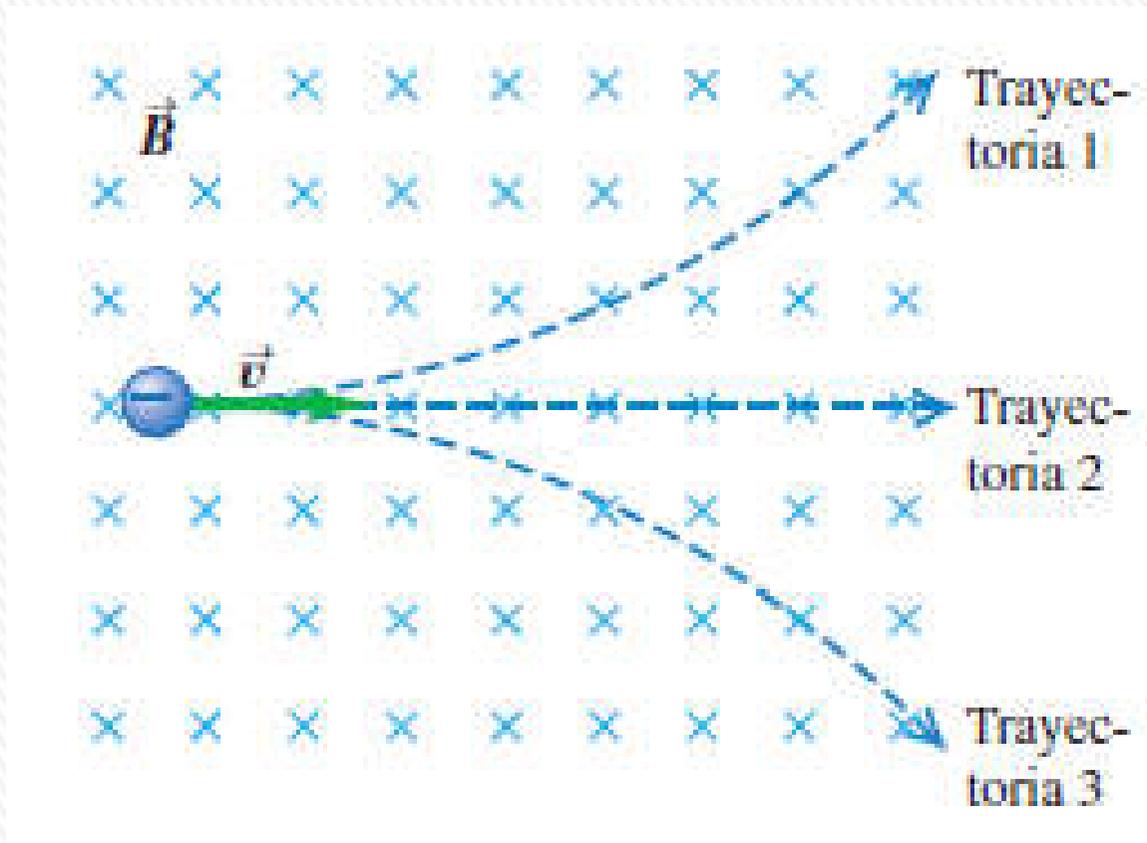
$$1T = 1 \frac{N}{C \cdot m/s} = 1 \frac{N}{A \cdot m}$$

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.

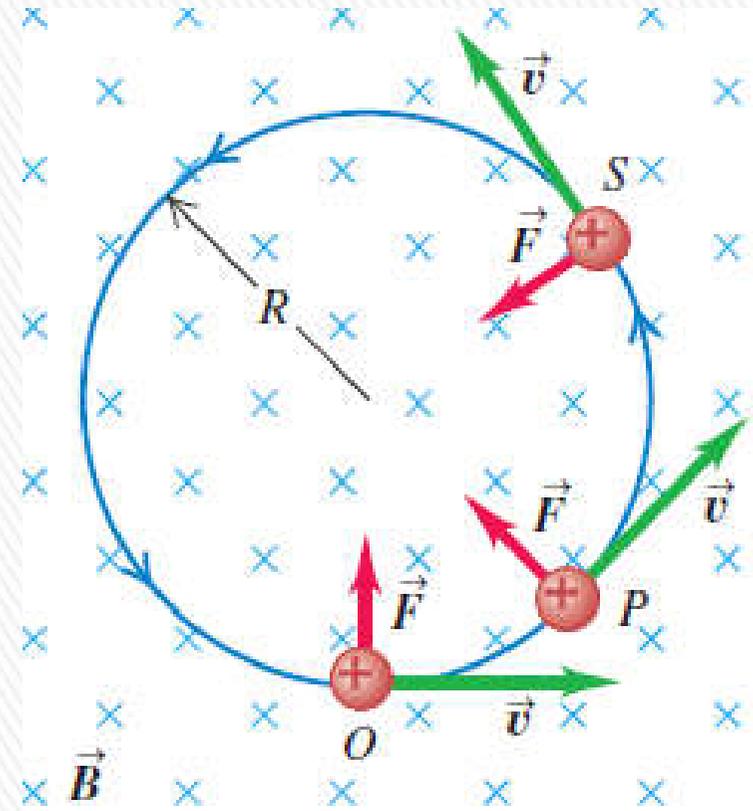
Movimiento de partículas cargadas en un campo magnético

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*.
- nunca realiza *trabajo* sobre la partícula.



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

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

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

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 ω 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:

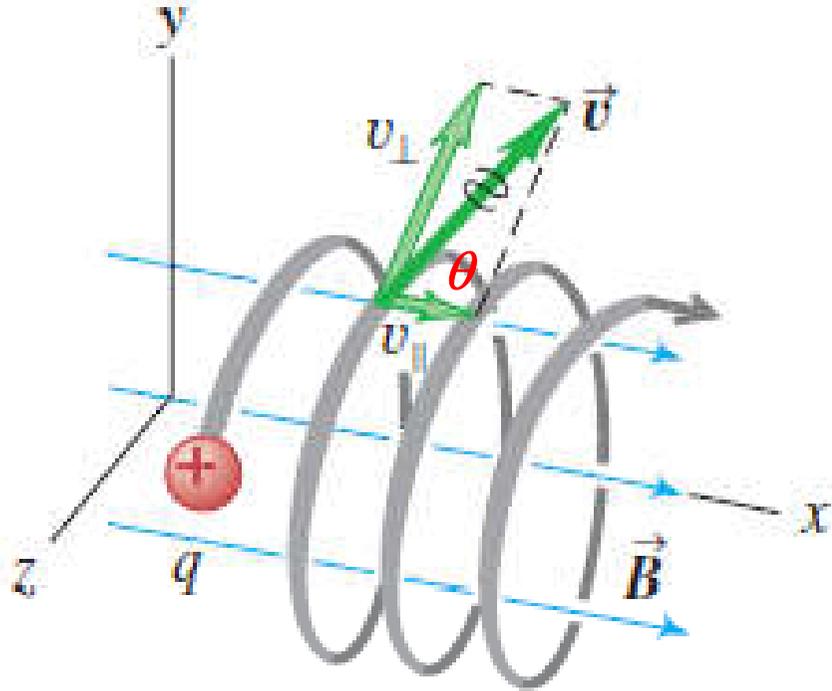
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

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

*Esta frecuencia f es independiente del radio R de la trayectoria y se denomina **frecuencia de ciclotrón***



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})

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

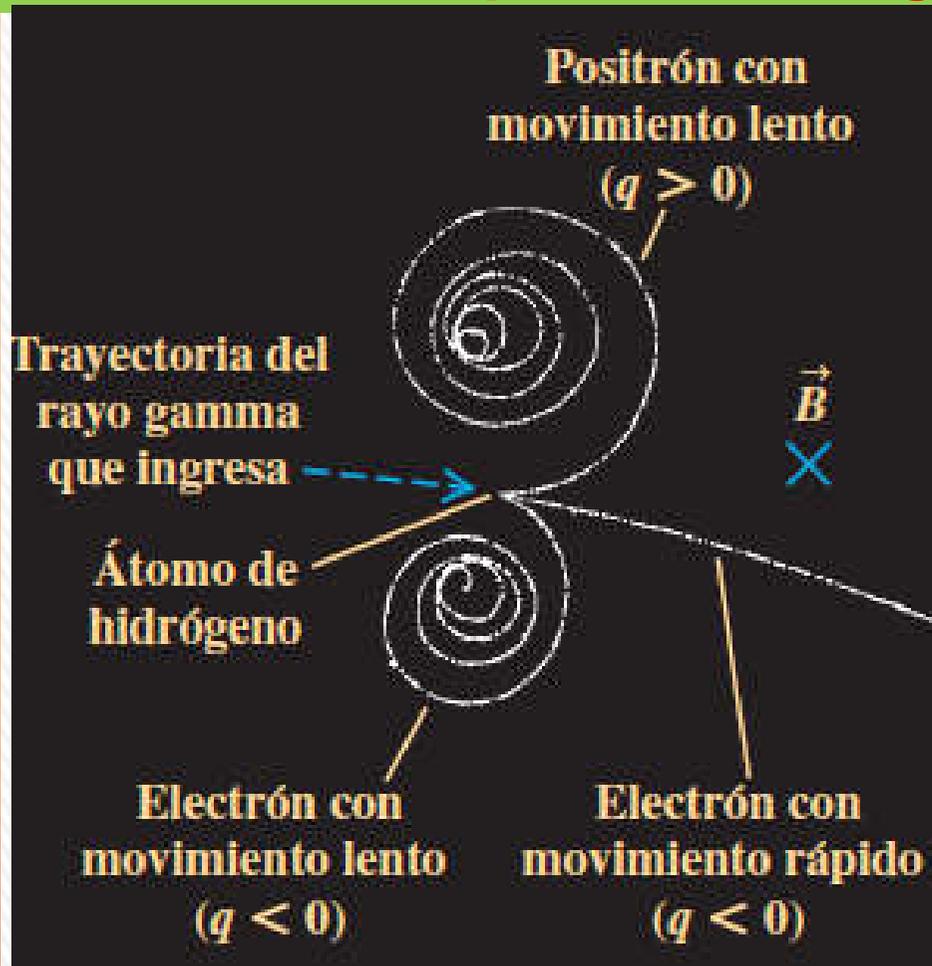
El paso de la hélice, es decir la distancia entre dos puntos de la hélice situados sobre una generatriz del cilindro imaginario sobre la que se enrolla, vale:

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

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*.

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.

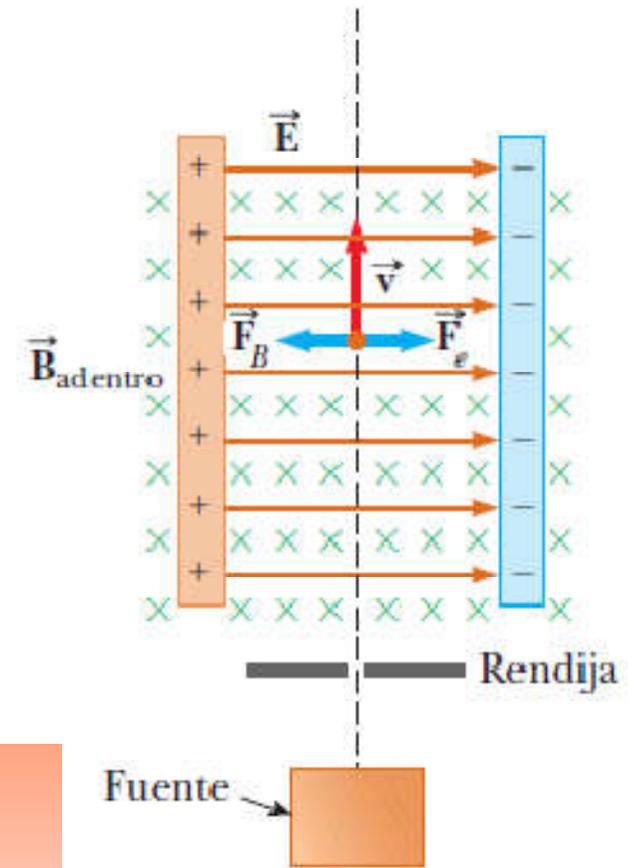
Selector de velocidad

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

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.

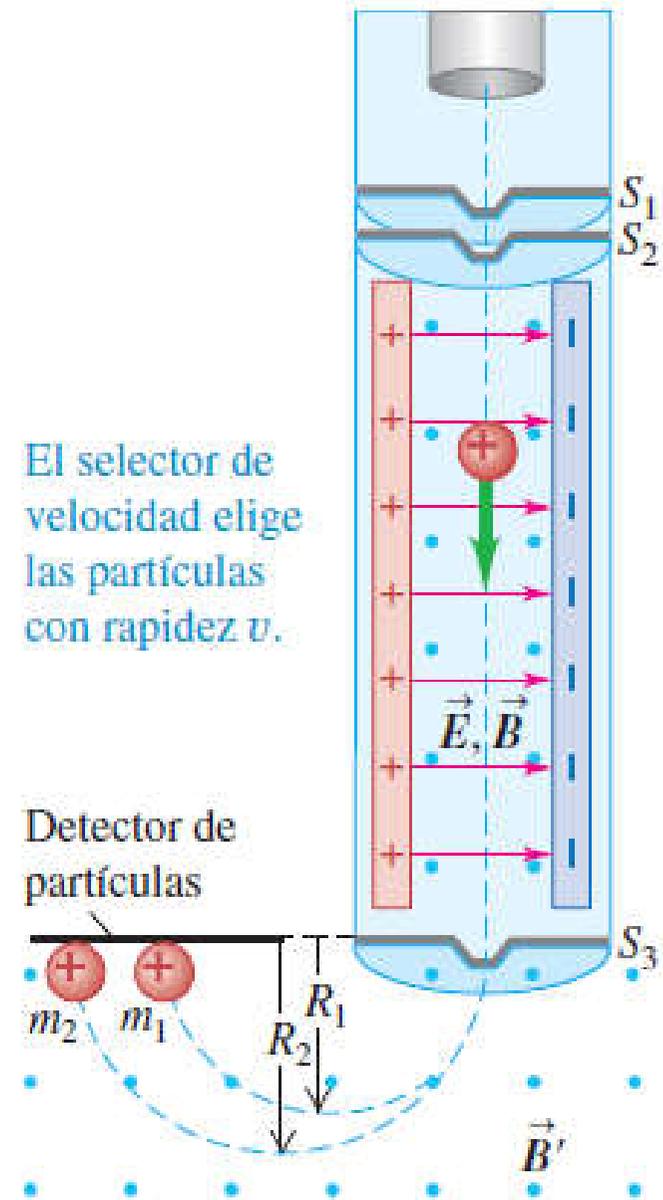
Los iones positivos de una fuente pasan a través de las ranuras S_1 y S_2 para formar un haz estrecho.

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.

Espectrómetros de masas

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

Uno de los primeros resultados de este trabajo fue el descubrimiento de que el neón tiene dos clases de átomos, con masas atómicas de 20 y 22 g/mol.

Ahora llamamos a estas especies **isótopos del elemento**.

Experimentos posteriores han demostrado que muchos elementos tienen varios isótopos, es decir, átomos que son idénticos en cuanto a su comportamiento químico, pero diferentes en su masa debido a que tienen distinto número de neutrones en su núcleo.

Esta es tan solo una de las múltiples aplicaciones de los espectrómetros de masa en química y física.

En el 2do. campo magnético, los iones se mueven en un semicírculo de radio r antes de que se impacte en la película fotográfica en P . Si los iones están con carga positiva, el haz se desviará hacia la izquierda

$$r = \frac{mv}{qB} \Rightarrow \frac{m}{q} = \frac{Br}{v}$$