

Clases de Trabajos Prácticos

Electromagnetismo y Optica



UBA
1821 Universidad
de Buenos Aires

Docentes de los prácticos:

Jefe de TP:

Adriana Gulisano

Ayudantes:

Agustina

Alejandro



Haremos un break
Luego de una hora
de clase



CAMPO MAGNÉTICO

Interacciones eléctricas

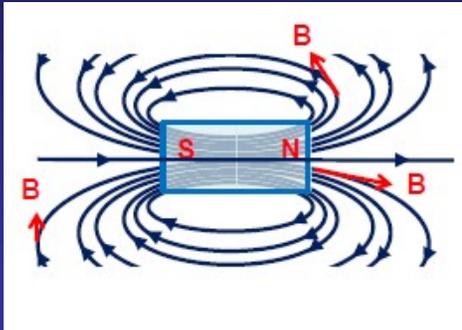
- ✓ Una distribución de carga eléctrica en reposo genera un campo eléctrico \mathbf{E} en el espacio circundante.
- ✓ El campo eléctrico ejerce una fuerza $\mathbf{F}=q\mathbf{E}$ sobre cualquier otra carga q presente en el campo.

Interacciones magnéticas

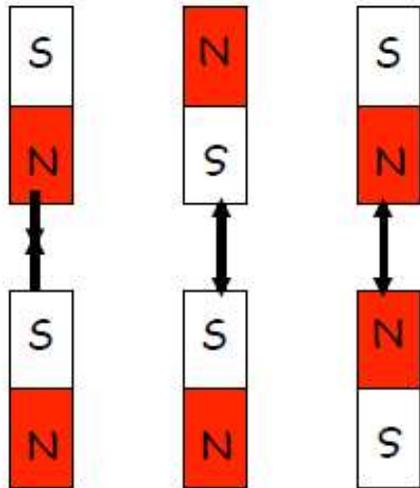
- ✓ Una carga en movimiento o una corriente genera un campo magnético en el espacio circundante.
- ✓ El campo magnético ejerce una fuerza \mathbf{F} sobre cualquier otra carga q en movimiento o corriente presente en el campo.

El campo magnético \mathbf{B} , al igual que el campo eléctrico, es un **campo vectorial**.

CAMPO MAGNÉTICO



- El campo magnético es una **MAGNITUD VECTORIAL**
- El campo magnético se denota por la letra **B**
- **B** es tangente en cada punto a la línea de campo que pasa por ese punto
- **B** es más intenso (el módulo del vector mayor) donde la densidad de líneas de campo es mayor
- Las líneas de campo son cerradas
- Las líneas de campo salen del polo norte del imán (**N**) y entran por el sur (**S**)

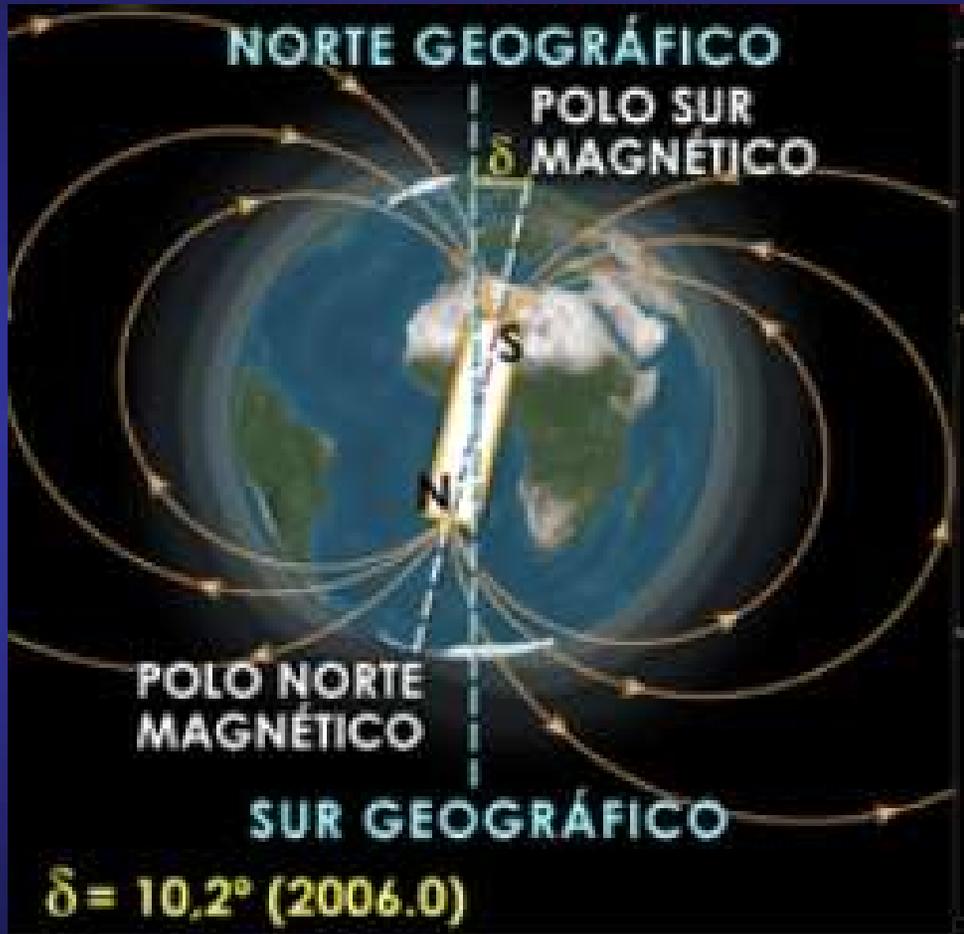


Se atraen

Se repelen

El concepto de polos magnéticos puede parecer similar al de carga eléctrica, y los polos norte y sur parecerían ser análogos a la carga positiva y negativa. Pero **NO** hay indicios experimentales de que exista un polo magnético individual aislado, los polos siempre aparecen en pares. El "MONOPOLO" MAGNÉTICO parece no existir.

EL CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA



La fuente de campo magnético son las cargas en movimiento

Las corrientes eléctricas son cargas en movimiento



Las corrientes eléctricas generan campos magnéticos

Unidad : el Tesla [T]

| | |
|-------------|------------------------------|
| Tierra | $\sim 1\text{E-}4 \text{ T}$ |
| Imán fuerte | 0.1-0.5 T |
| Electroimán | 1-2 T |

Unidad: Tesla (T)

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

Otra unidad de uso es el gauss: $1G = 10^{-4} \text{ T}$

El campo magnético de la Tierra es del orden de 1 G

Hemos llamado por simplicidad campo magnético \mathbf{B} , o simplemente campo \mathbf{B} o campo magnético, al campo responsable de la interacción magnética.

La denominación estricta del campo \mathbf{B} es **inducción magnética**, para diferenciarlo claramente de otros campos relacionados en presencia de medios materiales.

Fuerza de Lorentz

Cuando una partícula con carga se traslada a través de una región del espacio donde están presentes un campo eléctrico y un campo magnético, ambos campos ejercen fuerzas sobre la partícula:

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

Un electrón se traslada a $2.5 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ a través de una región en la que hay un campo magnético de dirección no especificada y cuya magnitud es de $7.4 \cdot 10^{-2} \text{ T}$.

a) ¿Cuáles son las magnitudes máxima y mínima posibles de la aceleración del electrón debida al campo magnético?

b) Si la aceleración real del electrón es de $\frac{1}{4}$ de la magnitud máxima del inciso (a), ¿cuál es el ángulo entre la velocidad del electrón y el campo magnético?

$$a) \quad \vec{F} = m\vec{a} = qvB \sin(\varphi)$$

$$a_{\max} = \frac{qvB}{m} = \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(2.5 \cdot 10^6 \text{ m/s})(0.074 \text{ T})}{9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 3.25 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$$

$$a_{\min} = 0$$

$$b) \quad a = 0.812 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2$$

$$a = \frac{qvB \sin(\phi)}{m} \Rightarrow \sin(\phi) = \frac{ma}{qvB}$$

$$\sin(\phi) = \frac{(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(0.812 \cdot 10^{16} \text{ m/s}^2)}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(2.5 \cdot 10^6 \text{ m/s})(0.074 \text{ T})} = 0.25 \quad \phi = 14.4^\circ$$

Una partícula con una carga de $6.4 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ recorre una órbita circular de 4.68 mm de radio debido a la fuerza que sobre ella ejerce un campo magnético uniforme $B=1.65 \text{ T}$ y perpendicular a la órbita.

a) ¿Cuál es la magnitud de la cantidad de movimiento lineal $p=mv$ de la partícula?

b) ¿Cuál es la magnitud de la cantidad de movimiento angular L de la partícula?

$$a) \quad R = \frac{mv}{qB} \Rightarrow mv = RqB = (0.00468\text{m})(6.4 \cdot 10^{-19} \text{ C})(1.65\text{T}) = 0.0494 \cdot 10^{-19} \text{ kg}(m / s)$$

$$b) \quad L = R(mv) = 2.31 \cdot 10^{-23} \text{ kg}(m^2 / s)$$

El deuterón (el núcleo de un isótopo de hidrógeno) tiene una masa de $3.34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ y una carga de $+1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Un deuterón recorre una trayectoria circular de 6.96 mm de radio en un campo magnético cuya magnitud es de 2.5 T .

a) Halle la rapidez del deuterón;

b) Halle el tiempo que requiere para completar media revolución;

c) ¿A través de qué diferencia de potencial habría que acelerar el deuterón para que adquiriese esta rapidez?

$$a) \quad qvB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow v = \frac{qBR}{m} = \frac{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(2.5 \text{ T})(0.0069 \text{ m})}{3.34 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 8.33 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$b) \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi(3.34 \cdot 10^{-27} \text{ kg})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(2.5 \text{ T})} = 5.24 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

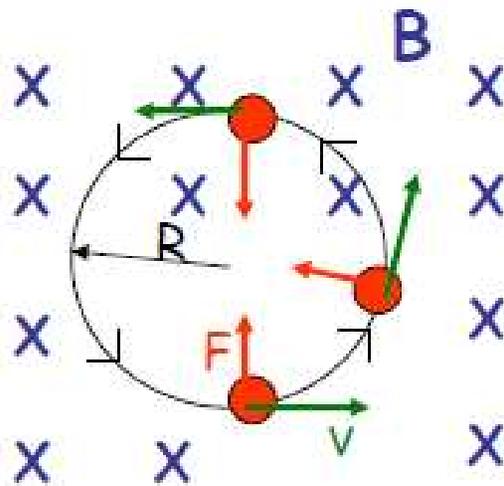
$$t = \frac{T}{2} = 2.62 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

c)
$$K = \frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

$$\Delta V = \frac{1}{2} \frac{mv^2}{q} = \frac{1}{2} \frac{(3.34 \cdot 10^{-27} \text{ kg})(8.33 \cdot 10^5 \text{ m/s})^2}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 7242 \text{ V}$$

MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS EN UN CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Cuando una partícula con carga se traslada en un campo magnético, actúa sobre ella la fuerza magnética y el movimiento está determinado por las leyes de Newton.



Una partícula con carga positiva q se desplaza con velocidad v en un campo B uniforme dirigido hacia el plano de la figura. Los vectores v y B son perpendiculares, la fuerza magnética $F = qvB$ tiene la dirección que se muestra. Fuerza y velocidad son siempre perpendiculares, la fuerza no puede alterar la magnitud de la velocidad, sólo su dirección.

El movimiento de una partícula con carga en un campo magnético siempre es con rapidez constante.

Convención:



campo afuera del plano

campo adentro del plano

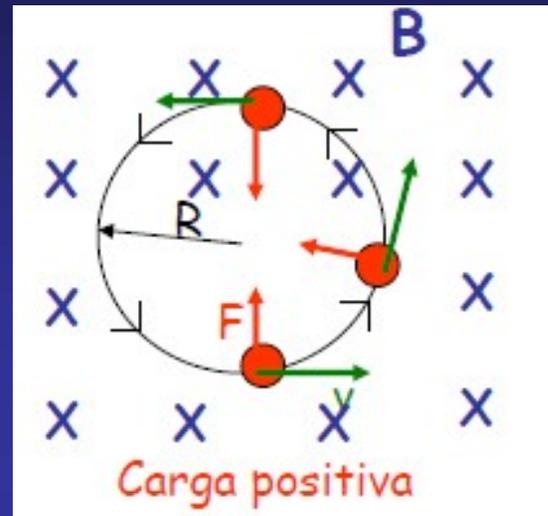
(el punto es la punta de una flecha que viene directamente hacia usted, la cruz son las plumas de una flecha que se aleja de usted)

Si v y B son perpendiculares la partícula se mueve en un círculo:

$$F = |q|vB = m\frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

Si la carga es negativa, la partícula se traslada en el sentido del reloj



La rapidez angular ω de la partícula y su frecuencia son:

$$\omega = \frac{v}{R} = v \frac{|q|B}{mv} = \frac{|q|B}{m}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{|q|B}{2\pi m}$$

Frecuencia de ciclotrón

Como la fuerza magnética $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$; es perpendicular a los vectores velocidad y campo magnético, y apuntará siempre hacia un punto **O**, actuando como una fuerza centrípeta y la partícula describirá una circunferencia. Igualando el módulo de $|\vec{F}_m|$ a la expresión mecánica de

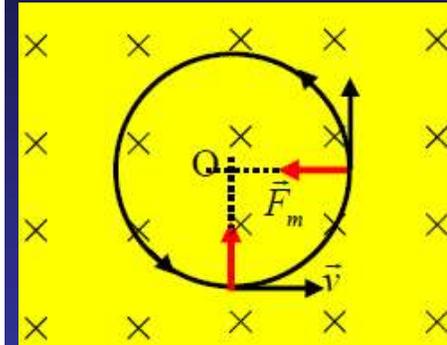
una fuerza centrípeta $m v^2/R$ resulta: $q v B \text{ sen } 90^\circ = m \frac{v^2}{R}$

De donde se obtiene para el radio de la trayectoria circular que describe la partícula:

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

En algunos experimentos se puede medir directamente el radio R de la trayectoria descrita por la partícula, y si se conoce su velocidad v y el valor del campo magnético B , la anterior ecuación permite determinar el cociente entre la carga q y la masa m de la partícula, conocida como relación q/m .

$$\frac{q}{m} = \frac{v}{RB}$$

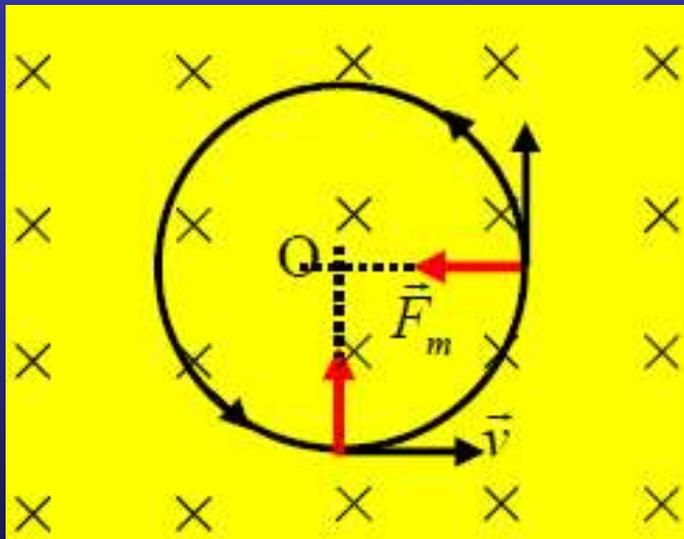


El periodo o tiempo que tarda en dar una vuelta T , vale:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv/qB}{v} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

Y la frecuencia ciclotrónica ω .

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



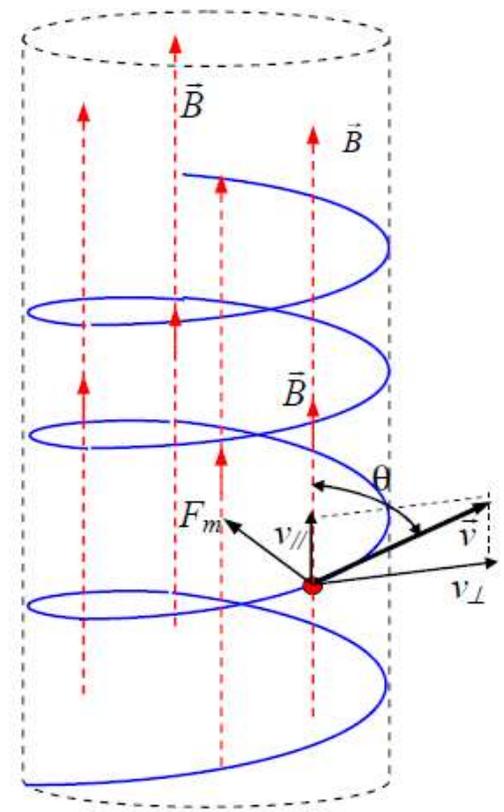
Cuando el vector velocidad, no es perpendicular al campo magnético

Si el vector velocidad \vec{v} de la carga, forma con \vec{B} un ángulo θ distinto de 0° ó de 90° , entonces la velocidad se puede descomponer en una componente en la dirección del campo \vec{B} que no es afectada por el campo y otra componente perpendicular que experimenta la fuerza magnética. La partícula describe en el campo una hélice, cuyo eje está en la dirección del campo magnético \vec{B}

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{B} = q(\vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}) \times \vec{B} = q \vec{v}_{\parallel} \times \vec{B} + q \vec{v}_{\perp} \times \vec{B} = q \vec{v}_{\perp} \times \vec{B}$$

Al ser \vec{v}_{\parallel} y \vec{B} vectores de la misma dirección, su producto vectorial es nulo. La carga avanza según el campo magnético con una velocidad que vale:

$$|\vec{v}_{\parallel}| = |\vec{v}| \cos \theta$$



El radio de la hélice se determina considerando que la fuerza magnética solo afecta a la componente perpendicular al campo magnético, del vector velocidad \vec{v}_\perp . Operando:

$$qv_\perp B \text{ sen } 90^\circ = m \frac{v_\perp^2}{R};$$

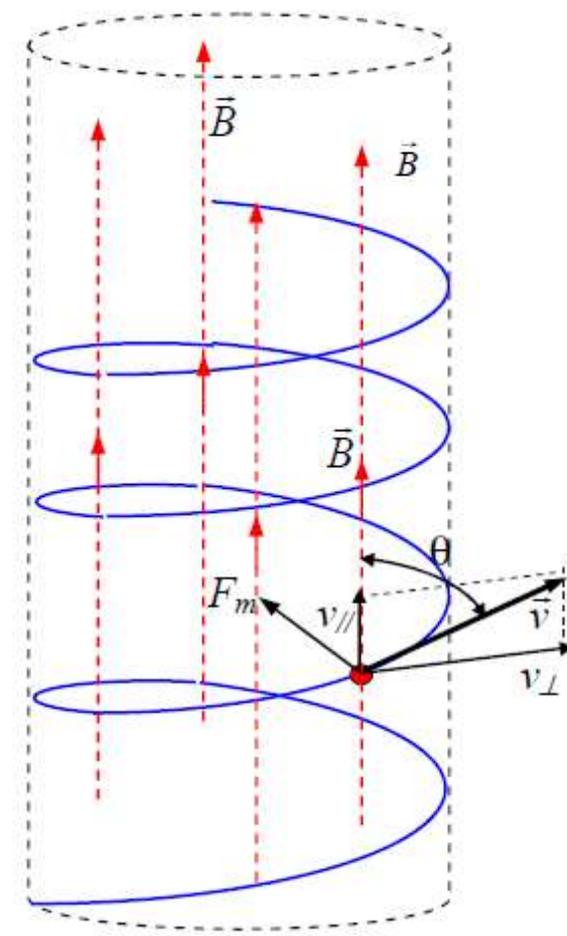
$$R = \frac{m v_\perp}{q B}$$

El periodo T será:

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = 2\pi \frac{mv_\perp / qB}{v_\perp} = 2\pi \frac{m}{qB}$$

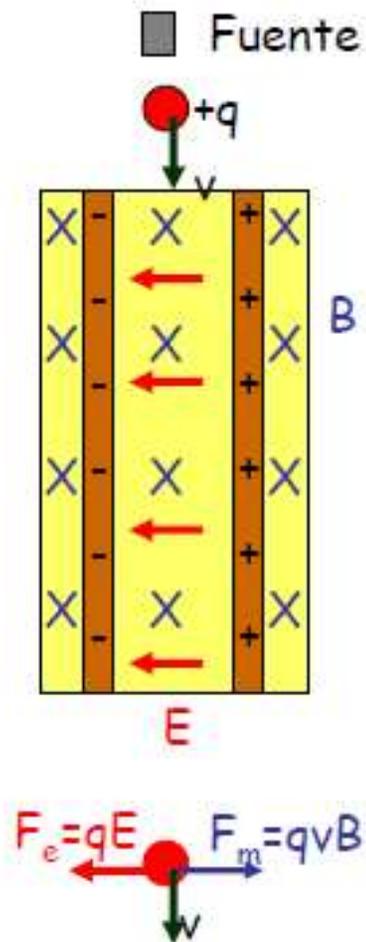
Y la distancia que recorre la carga en la dirección del campo \vec{B} durante un periodo, llamada *paso de hélice* h , vale:

$$h = v_{\parallel} \cdot T = (v \cos \theta) \cdot 2\pi \frac{m}{qB} = 2\pi \frac{m}{qB} v \cos \theta$$



APLICACIONES DEL MOVIMIENTO DE PARTÍCULAS CON CARGA

SELECTOR DE VELOCIDAD



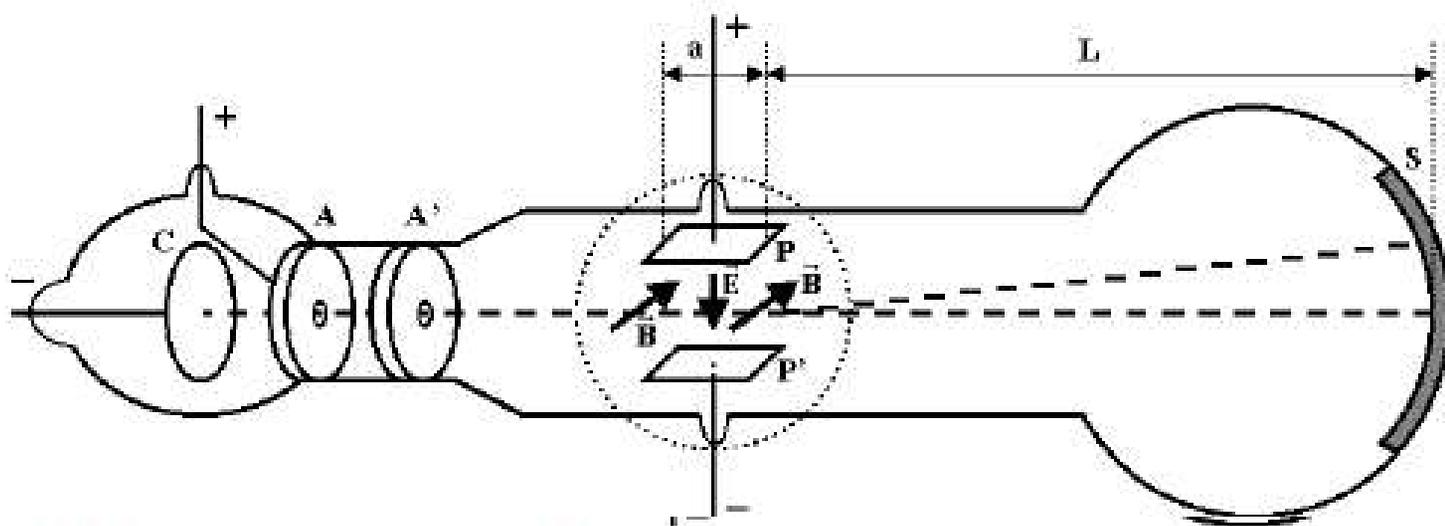
En un haz de partículas con carga producido por un cátodo caliente o un material radioactivo no todas las partículas se trasladan con la misma rapidez. En muchas aplicaciones se requiere un haz en que la rapidez de todas las partículas sea la misma. Se pueden seleccionar partículas del haz con una rapidez específica mediante una configuración de campos eléctricos y magnéticos llamada **selector de velocidad**.

Para magnitudes de campo dadas E y B , con respecto a un valor particular de v las fuerzas eléctrica y magnética serán de igual magnitud:

$$qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B}$$

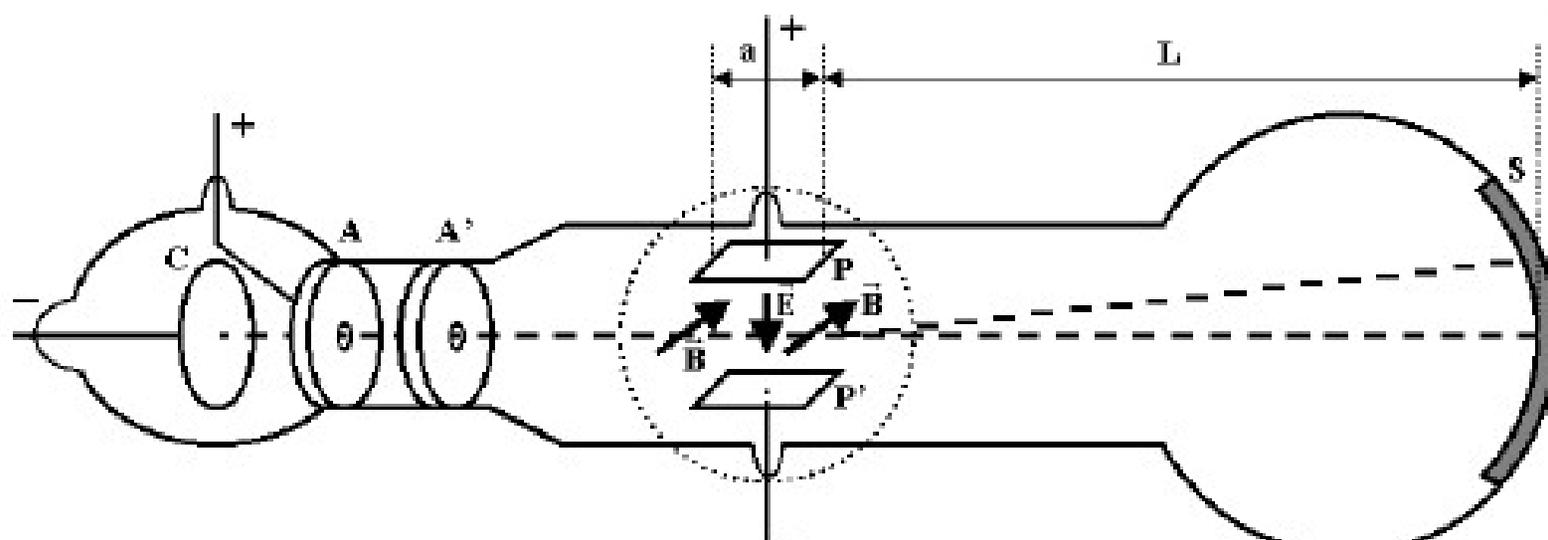
EXPERIMENTO DE THOMSON



J.J. Thomson logró medir la relación e/m de carga a masa del electrón en 1897. En un recipiente de vidrio al alto vacío, se aceleran electrones provenientes del cátodo C y se reúnen en un haz mediante una diferencia de potencial V entre los ánodos A y A'. La rapidez v de los electrones está determinada por el potencial V :

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

Los electrones pasan entre las placas P y P' e inciden en la pantalla del extremo del tubo, la cual está recubierta de un material fluorescente que emite luz en el punto de impacto.



Los electrones pasan en línea recta entre las placas cuando:

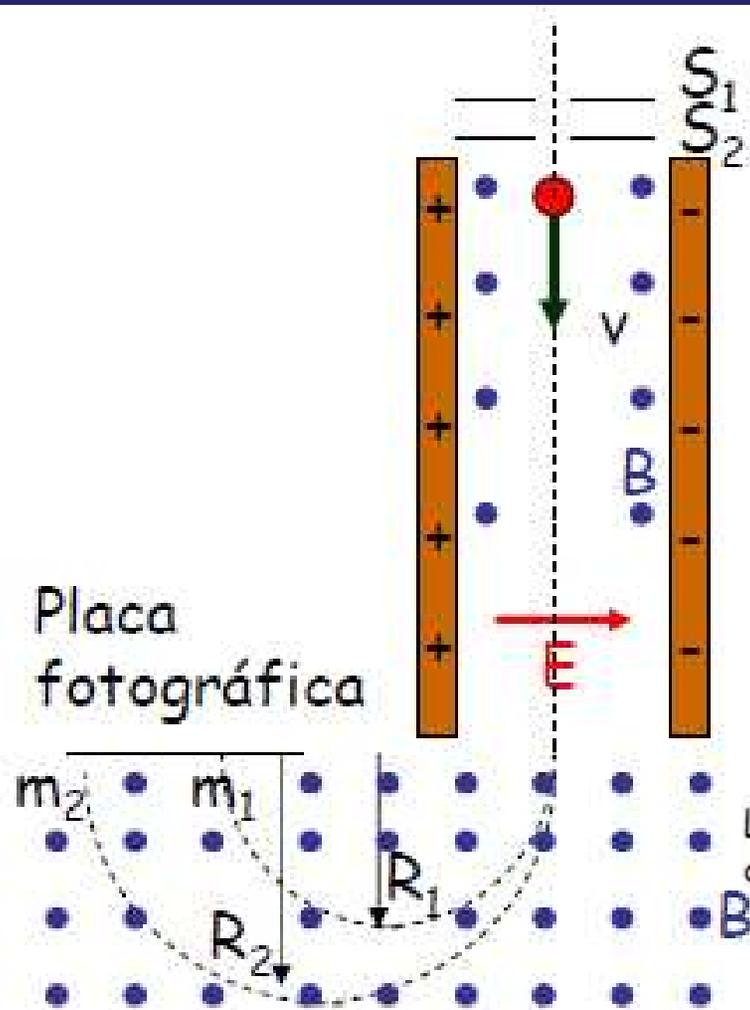
$$v = \frac{E}{B} = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad \frac{q}{m} = \frac{E^2}{2VB^2}$$

Thomson encontró un solo valor de esta magnitud, no dependía ni del material del cátodo, ni del gas residual presente en el tubo, ni de ningún otro aspecto del experimento. Esta independencia demostró que las partículas del haz (electrones) son un componente de toda la materia.

$$\frac{q}{m} = 1.758820174 \cdot 10^{11} \text{ C / kg}$$

ESPECTRÓMETROS DE MASAS

Se pueden emplear técnicas similares al experimento de Thomson para medir masas de iones, y de este modo, medir masas atómicas y moleculares.



Los iones positivos provenientes de una fuente pasa a través de las ranuras S_1 y S_2 , y forman un haz estrecho. Los iones atraviesan un selector de velocidad para bloquear todos los iones salvo aquellos con rapidez $v=E/B$.

Los iones entran en una región con campo magnético donde se trasladan en arcos circulares de radio R :

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

Los iones con masas diferentes inciden en la placa fotográfica en puntos diferentes y se pueden medir los valores de R .

- Zona 1: Campos E y B ortogonales. *Selector de velocidades* $\rightarrow F_e = F_m$

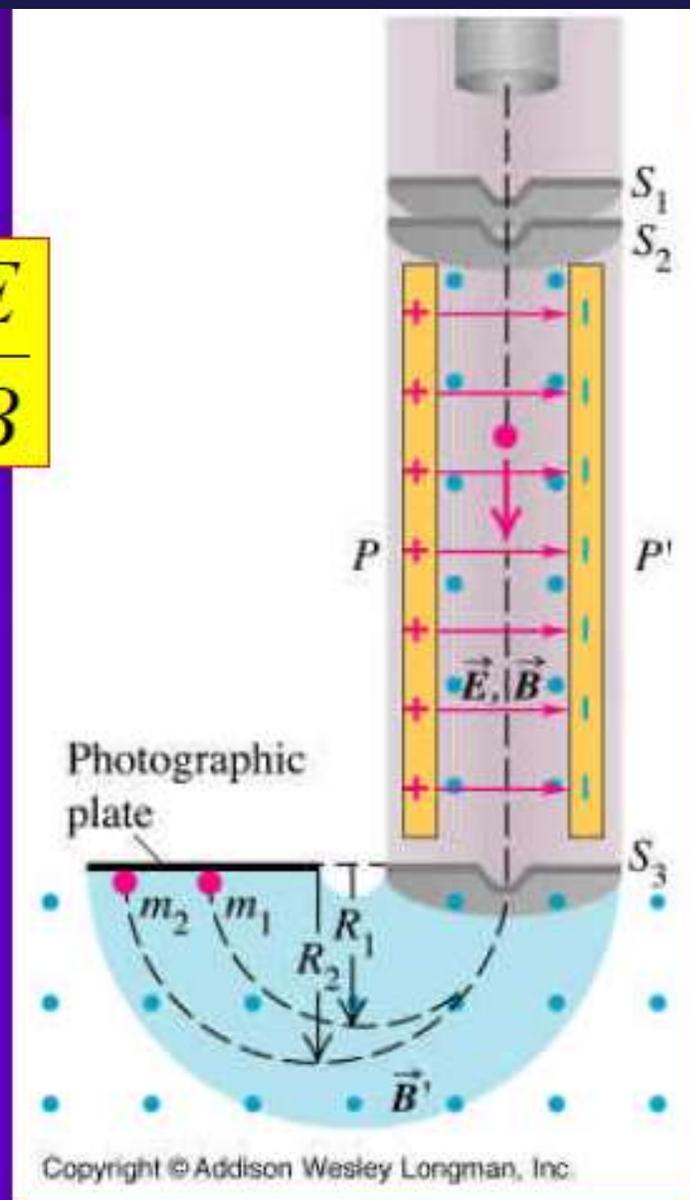
$$v = \frac{E}{B}$$

- Zona 2: Campo B
 \rightarrow Trayectoria curva $F_e = F_c$

$$qB = m \frac{v^2}{R}$$

- Radio dependiente de la masa

$$R = m \frac{E^2}{qB^3}$$



a) ¿Cuál es la rapidez de un haz de electrones cuando la influencia simultánea de un campo eléctrico de $1.56 \cdot 10^4 \text{ V/m}$ y un campo magnético de $4.62 \cdot 10^{-3} \text{ T}$, con ambos campos normales al haz y entre sí, no desvían los electrones? b) Cuando se elimina el campo eléctrico, ¿cuál es el radio de la órbita del electrón? ¿Cuál es el periodo de la órbita?

$$a) \quad qE = qvB$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{1.56 \cdot 10^4 \text{ V/m}}{4.62 \cdot 10^{-3} \text{ T}} = 3.3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$b) \quad qvB = m \frac{v^2}{R} \quad R = \frac{mv}{qB} = \frac{(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(3.3 \cdot 10^6 \text{ m/s})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(4.62 \cdot 10^{-3} \text{ T})} = 4.06 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})}{(1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(4.62 \cdot 10^{-3} \text{ T})} = 7.73 \cdot 10^{-9} \text{ s}$$

Un selector de velocidad se compone de un campo eléctrico y uno magnético. a) ¿Cuál debe ser la intensidad del campo magnético para que sólo los iones con una rapidez de 2000 km/s emerjan sin desviación, si el campo eléctrico es $2 \cdot 10^5 \text{ V/m}$? ¿Se separarán los iones positivos de los iones negativos? b) En cierto selector de velocidad, el campo eléctrico se produce mediante una batería de voltaje variable, conectada a dos placas metálicas paralelas grandes separadas 3.25 cm, y el campo magnético proviene de un electroimán de intensidad de campo variable. Si el voltaje de la batería puede fluctuar entre 120 V y 560 V, y el campo magnético entre 0.054 T y 0.18 T, ¿cuál es el intervalo de velocidades de iones que puede producir este selector con los ajustes correspondientes?

$$\text{a) } \frac{E}{B} = v \quad B = \frac{E}{v} = \frac{2 \cdot 10^5 \text{ V/m}}{2 \cdot 10^6 \text{ m/s}} = 0.1 \text{ T} \quad \text{No se separan}$$

$$\text{b) } E = \frac{V}{d}$$

$$E_{\min} = \frac{120 \text{ V}}{0.0325 \text{ m}} = 36.9 \cdot 10^2 \text{ V/m} \quad E_{\max} = \frac{560 \text{ V}}{0.0325 \text{ m}} = 172.3 \cdot 10^2 \text{ V/m}$$

$$B_{\min} = 0.054 \text{ T}, B_{\max} = 0.18 \text{ T}$$

$$v_{\max} = \frac{E_{\max}}{B_{\min}} = \frac{172.3 \cdot 10^2 \text{ V / m}}{0.054 \text{ T}} = 3190.8 \cdot 10^2 \text{ m / s}$$

$$v_{\min} = \frac{E_{\min}}{B_{\max}} = \frac{36.9 \cdot 10^2 \text{ V / m}}{0.18 \text{ T}} = 2.05 \cdot 10^4 \text{ m / s}$$

En un espectrómetro de masas, la magnitud del campo magnético del selector de velocidad es de 0.650 T y los iones cuya rapidez es $1.82 \cdot 10^6$ m/s lo atraviesan sin desviarse.

- a) ¿Cuál es la magnitud del campo eléctrico del selector de velocidad?
b) ¿Cuál es el cociente entre la masa y la carga de los iones cuyo radio de la trayectoria circular hacia la placa fotográfica es de 0.2 mm, si el campo magnético es $B=0.8$ T?

$$E = Bv = (0.65T)(1.82 \cdot 10^6 \text{ m/s}) = 1.18 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \frac{m}{q} = \frac{RB}{v} = \frac{(0.2 \cdot 10^{-3} \text{ m})(0.8T)}{1.82 \cdot 10^6 \text{ m/s}} = 0.29 \cdot 10^{-9} \text{ kg/C}$$

CAMPO MAGNÉTICO DE UN ELEMENTO DE CORRIENTE

Como en el caso del campo eléctrico, existe un **principio de superposición de campos magnéticos**: el campo magnético total generado por varias cargas en movimiento es la suma vectorial de los campos generados por las cargas individuales.

Con este principio se puede calcular el campo magnético creado por una corriente en un conductor.

Consideremos un segmento de conductor de longitud dl y volumen Adl . Si hay n partículas con carga en movimiento por unidad de volumen, cada una con carga q , la carga total en movimiento en el segmento es:

$$dQ = nqAdl$$

Las cargas en movimiento equivalen a una sola carga dQ que viaja con velocidad igual a la velocidad de deriva v_d :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|dQ| v_d \sin \phi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{n|q|v_d Adl \sin \phi}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \phi}{r^2}$$

LEY DE BIOT-SAVART

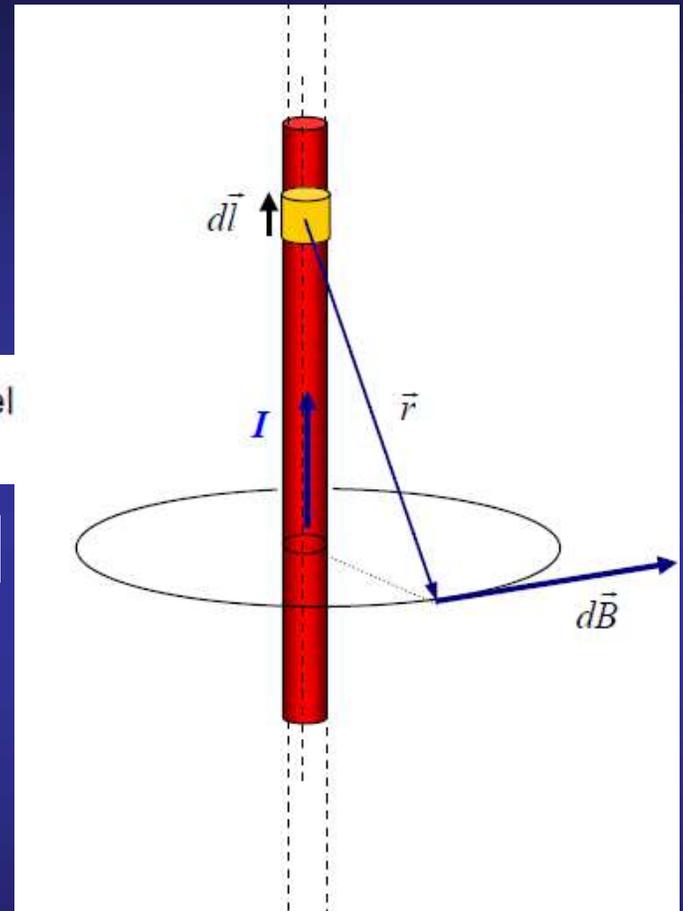
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dq \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dt \vec{v} \times \vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

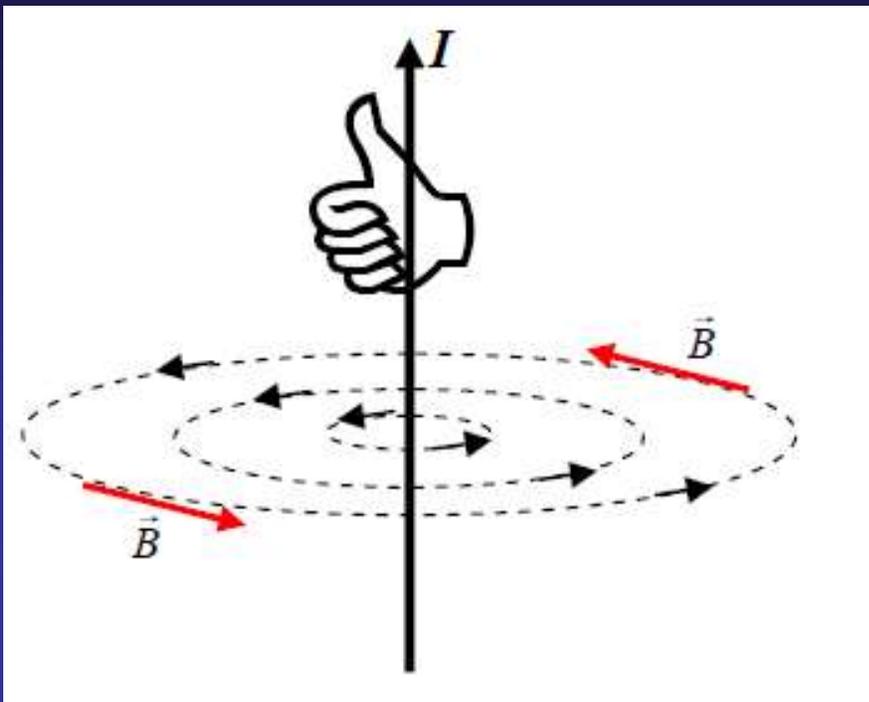
Donde $dt\vec{v} = d\vec{l}$ es el desplazamiento efectuado por las cargas en el tiempo dt

Sumando todas las contribuciones de los trozos pequeños $d\vec{l}$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

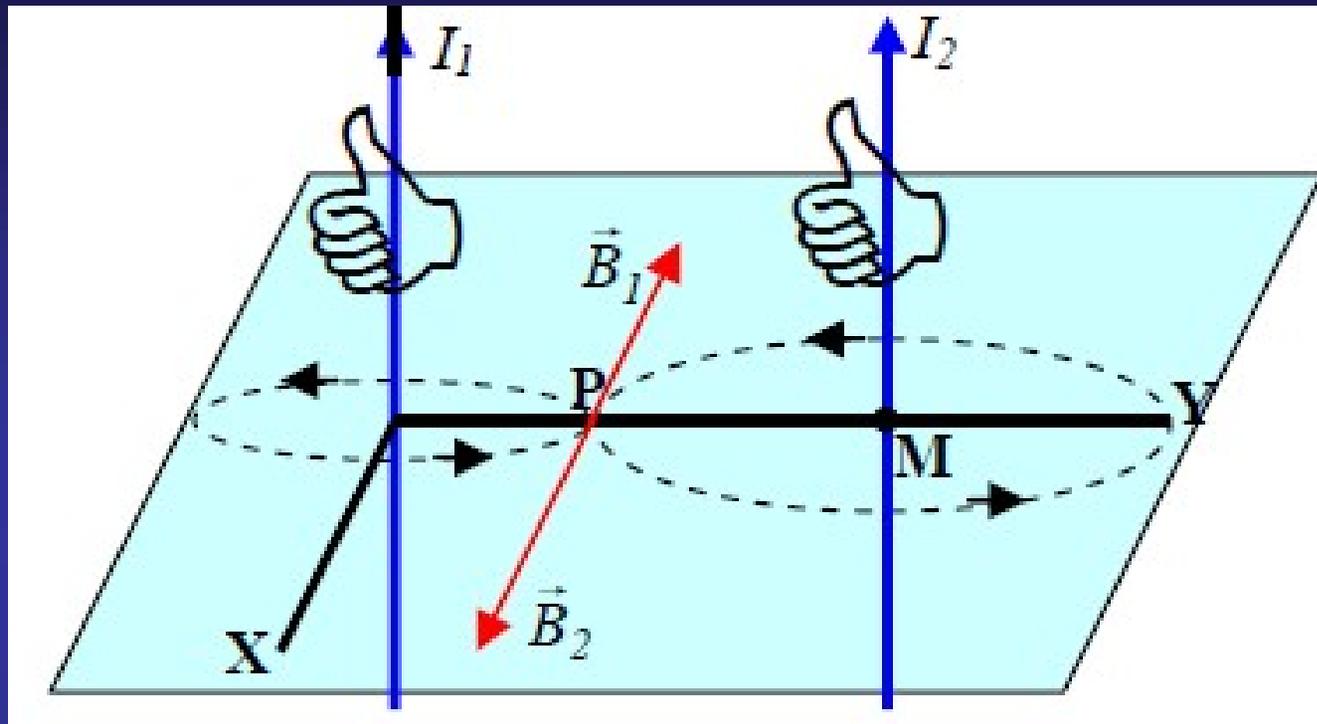
en donde $r = |\vec{r}|$ es la distancia del elemento del hilo $d\vec{l}$ al punto de observación, y \vec{u}_r un vector unitario en la dirección y sentido de \vec{r} .



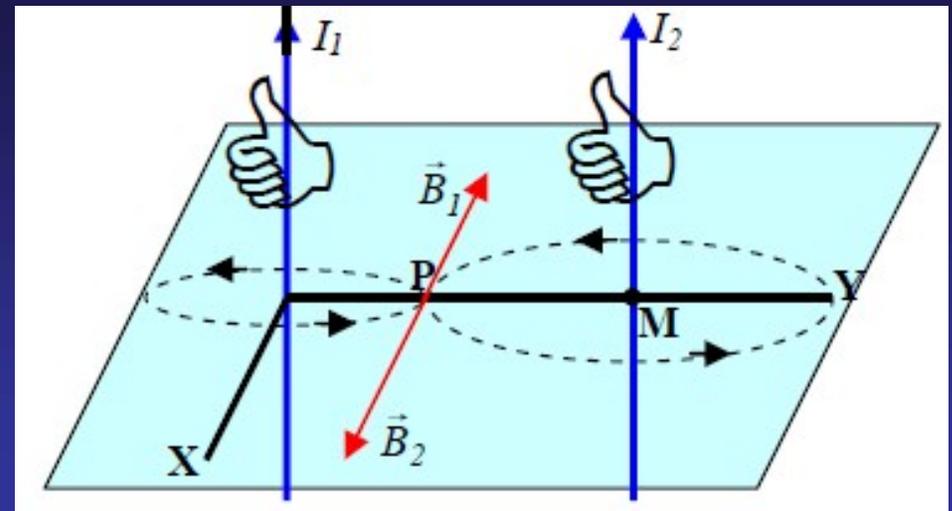


tenemos una espira y hacemos coincidir los dedos con el sentido de la corriente I , el pulgar nos da la dirección y sentido del campo magnético \vec{B} y la determinación de sus caras Norte y Sur.

Aplicación de la regla de la mano derecha.



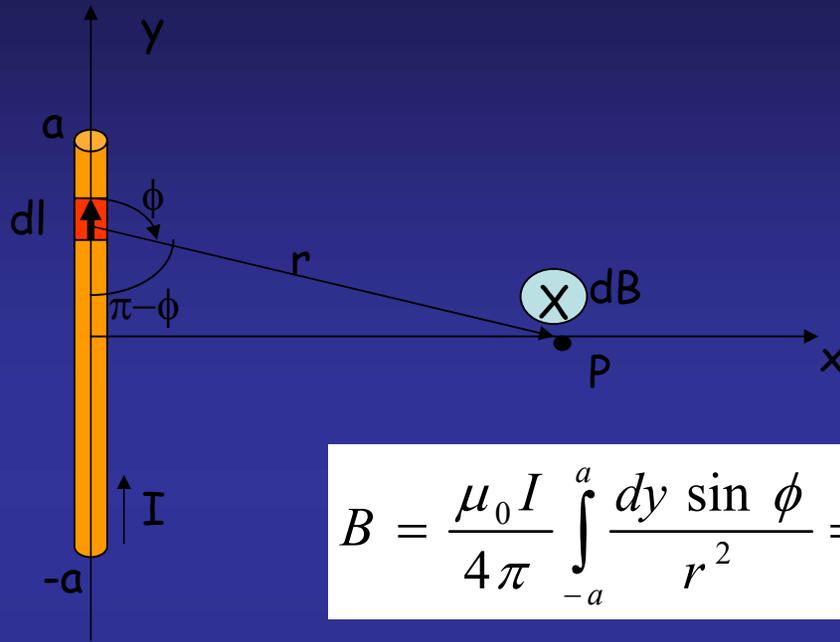
- Una corriente de 2 A circula en sentido positivo, por un conductor rectilíneo de gran longitud situado sobre el eje Z. Otra corriente de 4 A circula por un conductor paralelo al anterior en el mismo sentido, pero pasando el conductor por el punto M(0, 2,0). Determina el campo magnético en el punto P(0, 0.75, 0).*



$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R_1} (-\vec{i}) + \frac{\mu_0 I_2}{2\pi R_2} \vec{i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{I_2}{R_2} - \frac{I_1}{R_1} \right) \vec{i} = 1,1 \cdot 10^{-7} \vec{i} \text{ T}$$

Verifique, que cuando I_2 circule en sentido contrario. $\vec{B} = -1,17 \cdot 10^{-6} \vec{i} \text{ T}$

CAMPO MAGNÉTICO en el punto P del eje X DE UN CONDUCTOR RECTO QUE TRANSPORTA CORRIENTE



$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\sin \phi = \sin(\pi - \phi) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

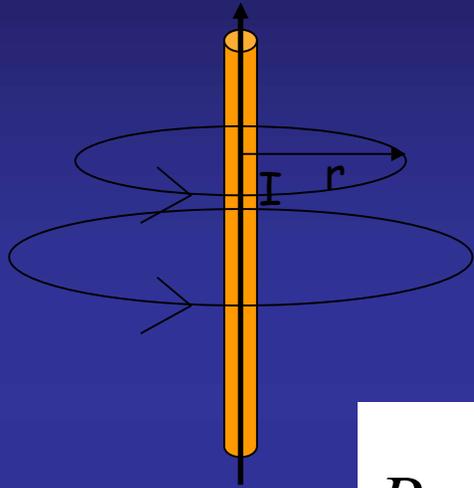
$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{dy \sin \phi}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{x dy}{(x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{2a}{x \sqrt{x^2 + a^2}}$$

Cuando la longitud $2a$ del conductor es muy grande en comparación con x , la ecuación se convierte en:

$$a \gg x \quad \sqrt{x^2 + a^2} \approx a$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

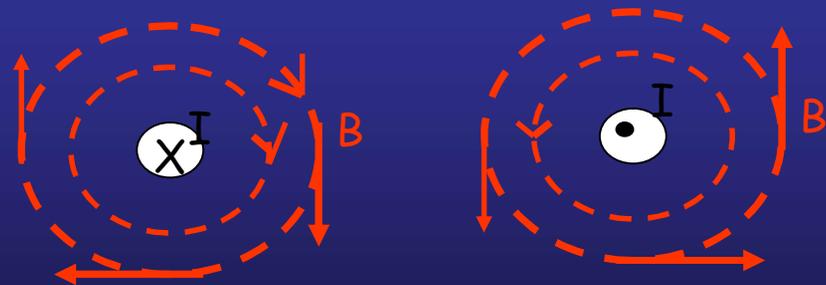
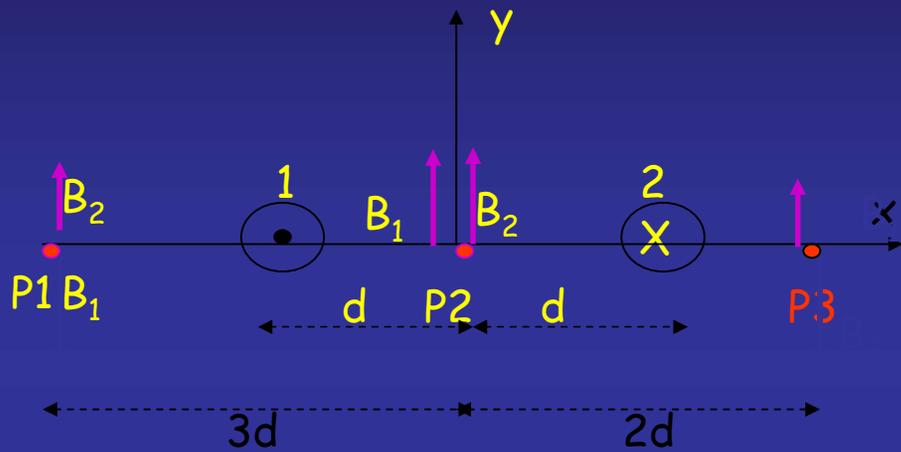
Un conductor largo y recto transporta una corriente de 1 A. ¿A qué distancia del eje del conductor es la magnitud del campo magnético generado por la corriente igual a la del campo magnético terrestre en Pittsburgh (alrededor de $0.5 \cdot 10^{-4} \text{T}$)?



$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2 \pi r} \quad \Rightarrow \quad r = \frac{\mu_0 I}{2 \pi B}$$
$$r = \frac{(4 \pi 10^{-7} \text{ Tm} / \text{A})(1 \text{ A})}{2 \pi (0.5 \cdot 10^{-4} \text{ T})} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 4 \text{ mm}$$

La figura es una vista de los extremos de dos alambres rectos paralelos largos, perpendiculares al plano xy , cada uno de los cuales conduce una corriente I , pero en sentidos opuestos. a) Encuentre la magnitud y dirección de B en los puntos P1, P2 y P3.



$$P1) \quad B_1 = -\frac{\mu_0 I}{2\pi(2d)} \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(4d)}$$

$$B_{TOT} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi(2d)} + \frac{\mu_0 I}{2\pi(4d)} = -\frac{\mu_0 I}{8\pi d}$$

$$P2) \quad B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(d)} \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(d)}$$

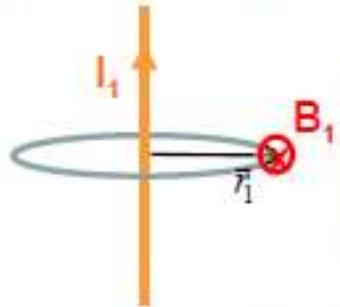
$$B_{TOT} = \frac{\mu_0 I}{2\pi(d)} + \frac{\mu_0 I}{2\pi(d)} = \frac{\mu_0 I}{\pi d}$$

$$P3) \quad B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(3d)} \quad B_2 = -\frac{\mu_0 I}{2\pi(d)}$$

$$B_{TOT} = \frac{\mu_0 I}{2\pi(3d)} - \frac{\mu_0 I}{2\pi(d)} = -\frac{\mu_0 I}{3\pi d}$$

FUERZAS MAGNÉTICAS ENTRE CORRIENTES:

I_1 crea un campo B_1 en r_1 :

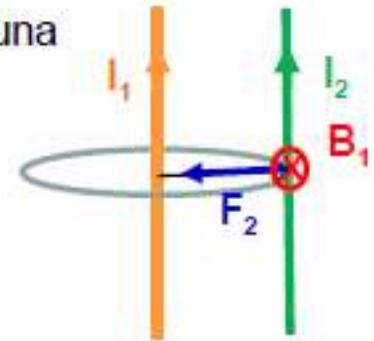


$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}$$

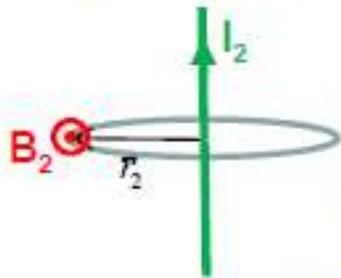


La corriente I_2 situada en r_1 experimenta una fuerza F_2 debida al campo magnético B_1

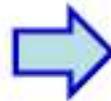
$$\vec{F}_2 = I_2 \vec{l} \times \vec{B}_1 \Rightarrow |\vec{F}_2| = I_2 l B_1 = I_2 l \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r_1}$$



I_2 crea un campo B_2 en r_2 :

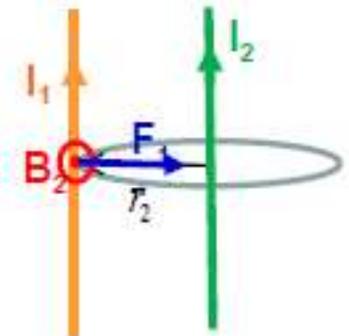


$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi R}$$



La corriente I_1 situada en r_2 experimenta una fuerza F_1 debida al campo B_2

$$|\vec{F}_1| = I_1 l \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r_2}$$

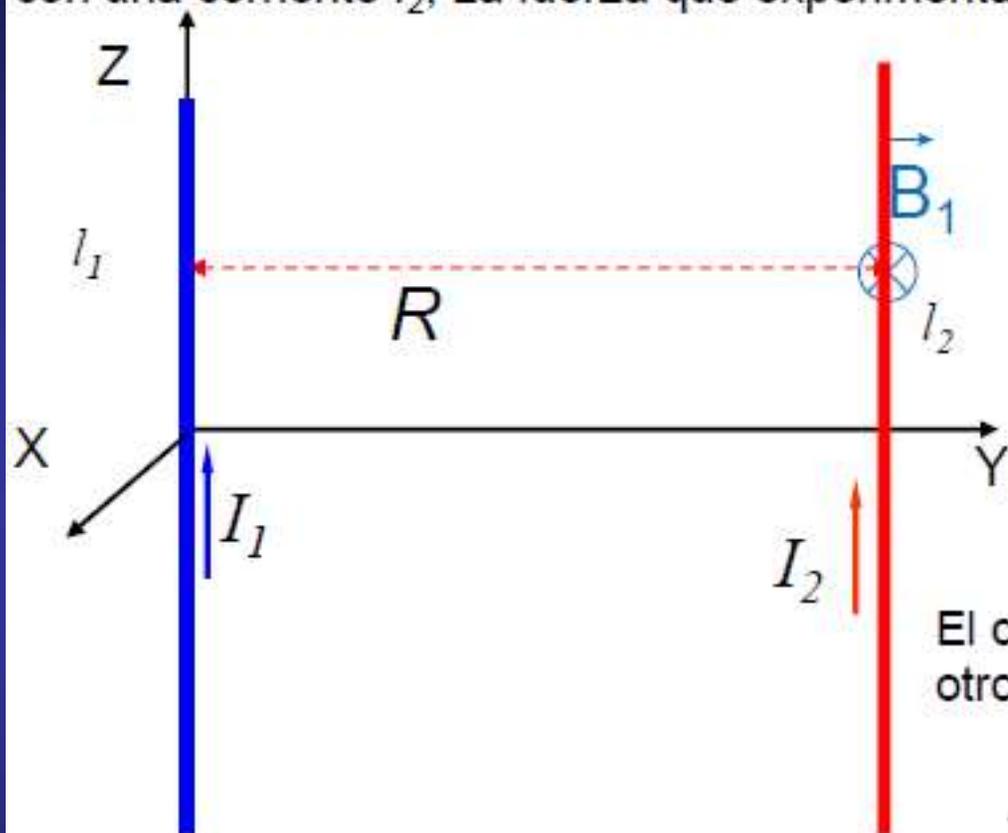


$$|\vec{r}_1| = |\vec{r}_2| \Rightarrow |\vec{F}_2| = |\vec{F}_1| = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi R}$$

El módulo de las fuerzas es igual

Si I_1 tiene igual sentido que I_2 las corrientes se atraen y si tienen sentido distinto sentido se repelen

Si tenemos dos corrientes paralelas I_1 y I_2 la corriente I_1 crea un campo B_1 en sobre el cable con una corriente I_2 , La fuerza que experimenta la corriente I_2 en ese campo magnético es:



$$\vec{F} = \int I_2 d\vec{l}_2 \times \vec{B}_1$$

Como la corriente y el campo es constante, y el cable es rectilíneo:

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

El campo magnético creado por cada hilo en el otro es:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R} (-\vec{i})$$

$$\vec{B}_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi R} (\vec{i})$$

$$\vec{F}_1 = I_2 \vec{l}_2 \times \vec{B}_1 = I_2 l_2 B_1 \sin \frac{\pi}{2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} (-\vec{j})$$

$$\vec{F}_2 = I_1 \vec{l}_1 \times \vec{B}_2 = I_1 l_1 B_2 \sin \frac{\pi}{2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} \vec{j}$$

Por tanto, la fuerza que ejerce una corriente sobre otra es:

Igual en módulo y de sentido contrario

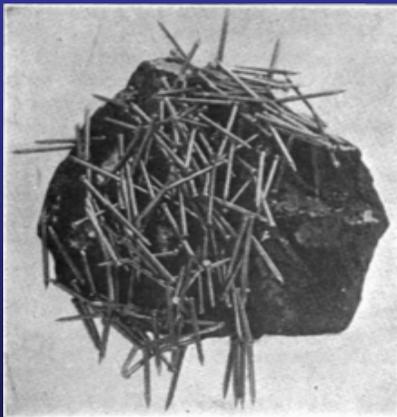
Dos corrientes paralelas por las que circula una corriente experimentan una fuerza de atracción si las corrientes circulan en el mismo sentido, mientras que si las corrientes circulan en sentidos opuestos experimentan una repulsión.

¿Porqué vale la pena estudiar esto para Biólogos y Geólogos?

Fenómenos magnéticos



Primer reporte sobre piedra *magneto* (proveniente de Magnesia, Anatolia). Atracción de hierro y otras piedras magneticas. Tales de Mileto (VI AC)

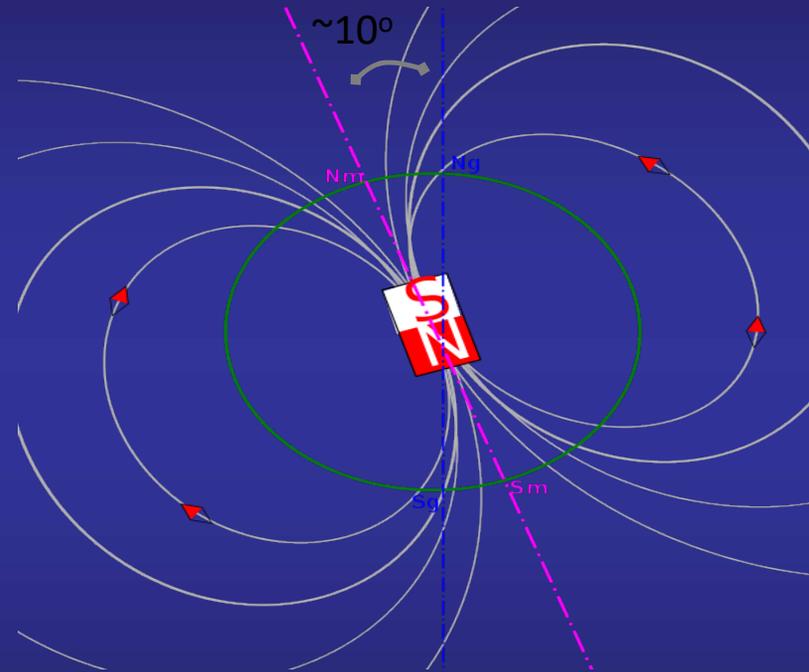
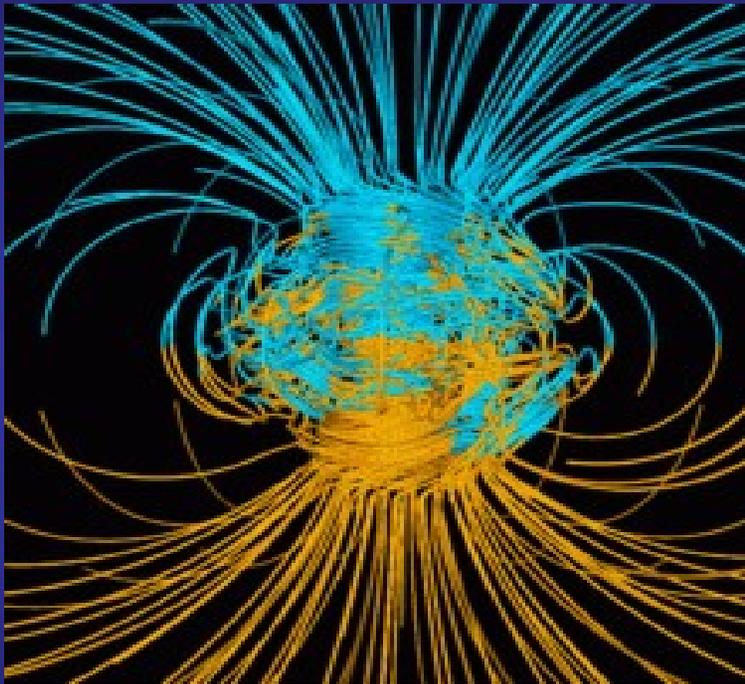


Primer compás magnético
Dinastia Han 206AC



Uso en navegación desde siglo XI

Aproximación dipolar

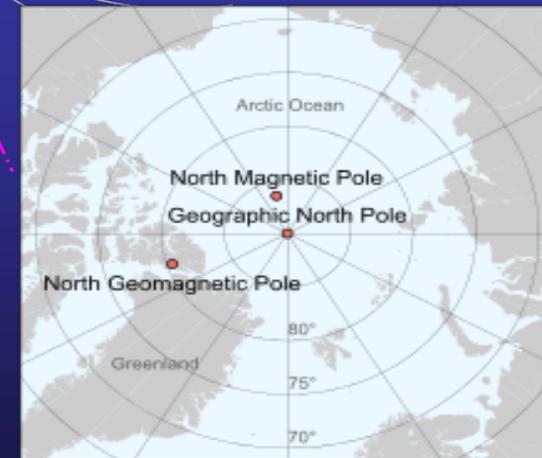
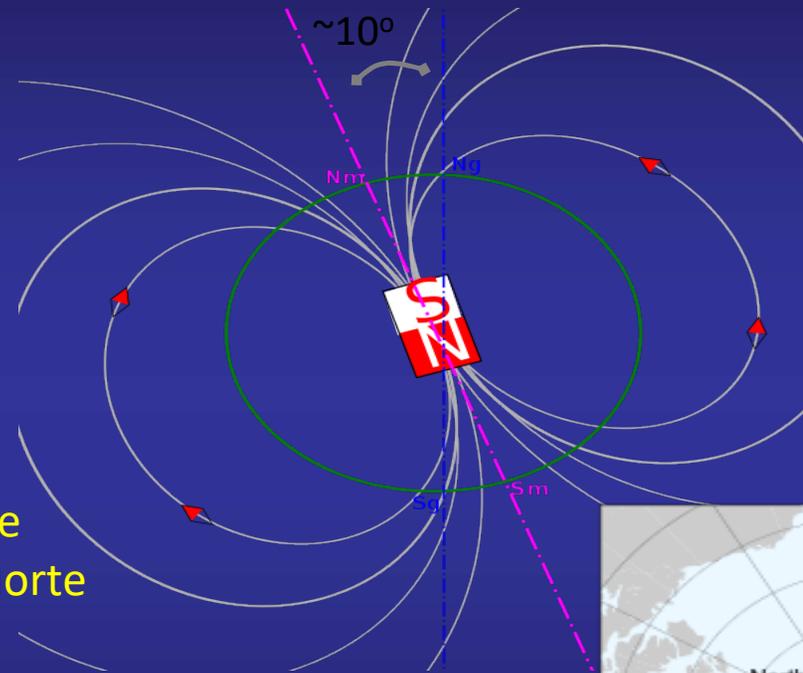


Campo magnético terrestre

Polos Geomagnéticos

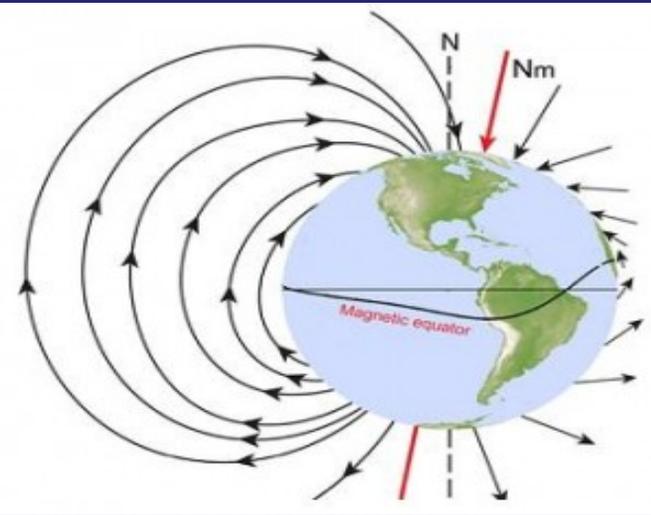
Polos geomagnéticos (Nm, Sm)

- puntos donde la dirección asociada al dipolo que mejor aproxima el **B** terrestre ,intersecan a la superficie
- Son antipodales por construcción por lo que presentan igual latitud y longitud complementaria.
- Como el **B** no es exactamente dipolar:
 - El polo **Norte Geo-Magnético** no coincide con el polo **Norte Magnético** (ni con el Norte Geográfico)
 - las líneas de campo no son completamente verticales en los polos geomagnéticos

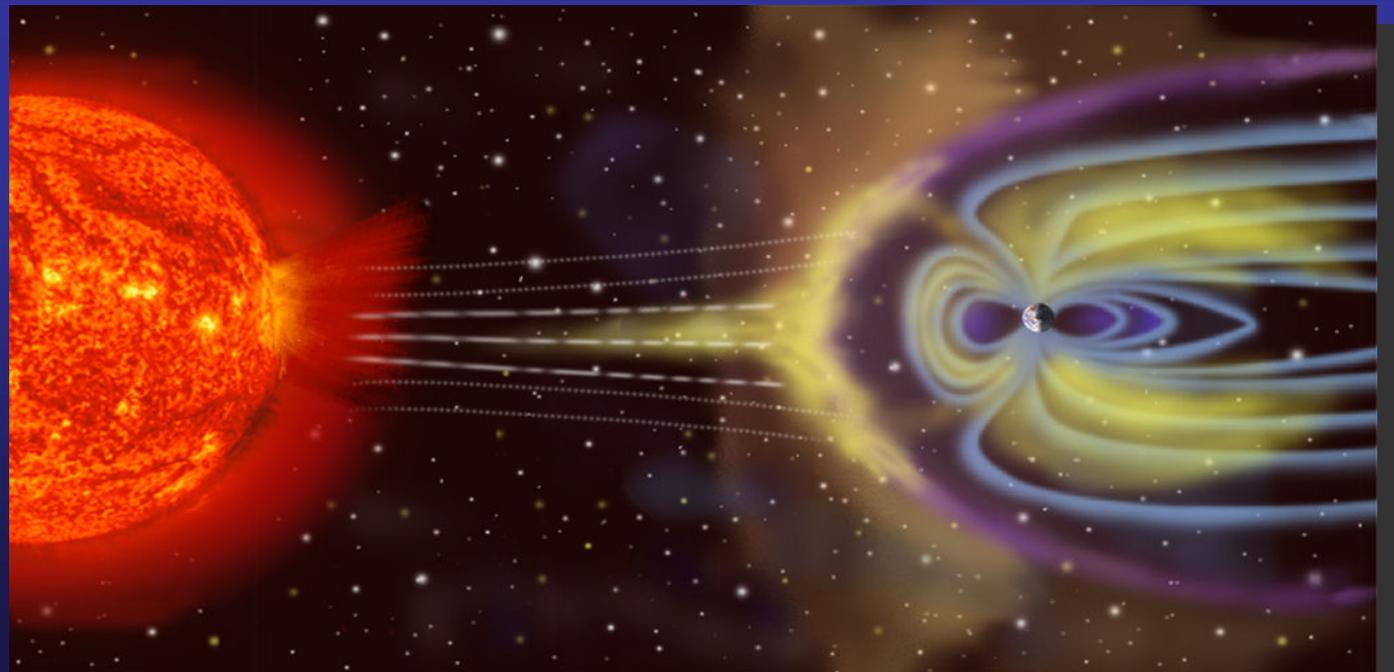


Notar: Por convención el Norte geomagnético y magnético asociados en realidad al polo sur del dipolo del núcleo terrestre (para que las brujulas apunten al Norte geográfico)

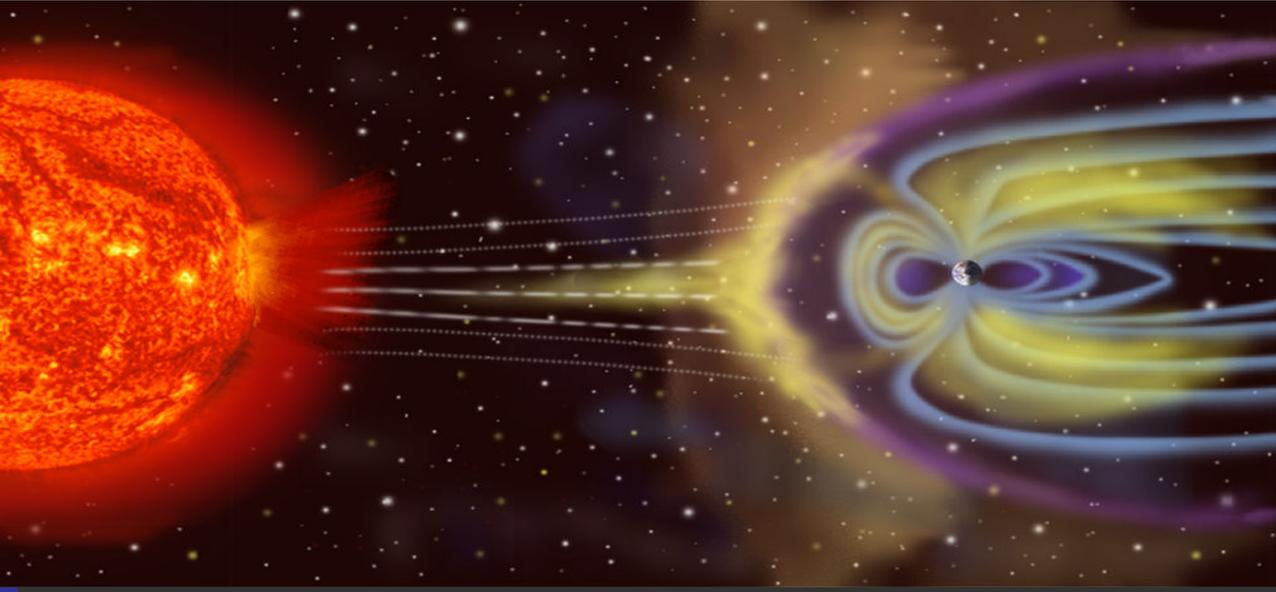
Magnetósfera



El campo **B** es de tipo dipolar cerca de la superficie....pero en realidad es alterado **por el viento solar** : flujo de **partículas cargadas** emitidas por el sol a muy alta velocidad (200-1000 km/s)



Magnetósfera



- Área del espacio, cercana a un objeto astronómico, en la cual **partículas cargadas interactúan con el campo magnético** del objeto.
- Partículas cargadas de alta energía ($\sim 200-1000$ km/s) son emitidas desde el Sol dando lugar al **viento solar**, que deforma al campo magnético terrestre.
- Proceso involucra: flujos de masa + flujos de carga + fluidos conductores + campos electromagnéticos: **magnetohidrodinámica**

Se distinguen varias zonas de acuerdo a las características de la interacción entre viento solar y campo magnético.

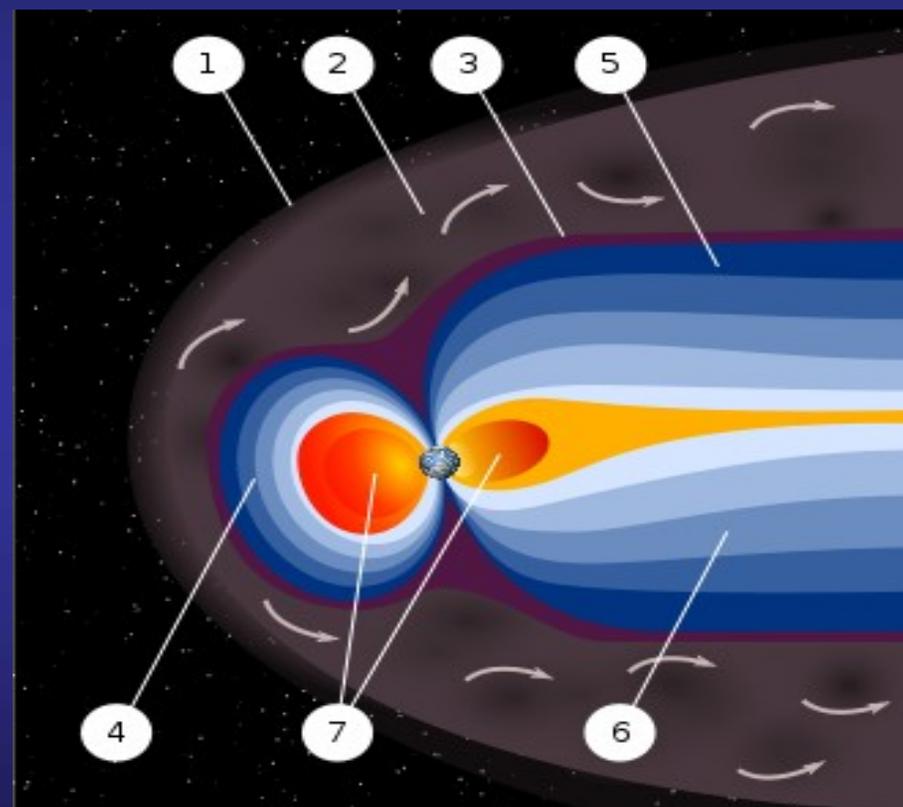
(1) *Bow shock*: zona de frenado del viento.

(3) *Magnetopausa*: zona donde se igualan presiones, límite de la magnetosfera

(5,6) *Magnetotails*: zona de *sombra* muy extendida ($\sim 200 R_T$) opuesta al Sol

(7) *Plasmasphere*: zona tipo dona desde 60km de altura hasta 3-4 radios terrestres. Esta región rota con la Tierra, incluye a la *ionosphere*. Los anillos de van Allen se encuentran en esta región

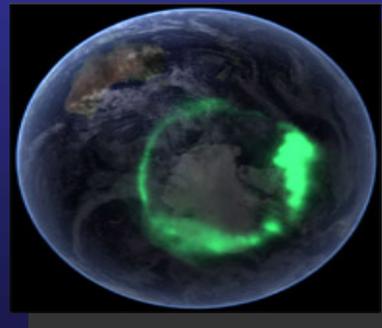
Magnetósfera



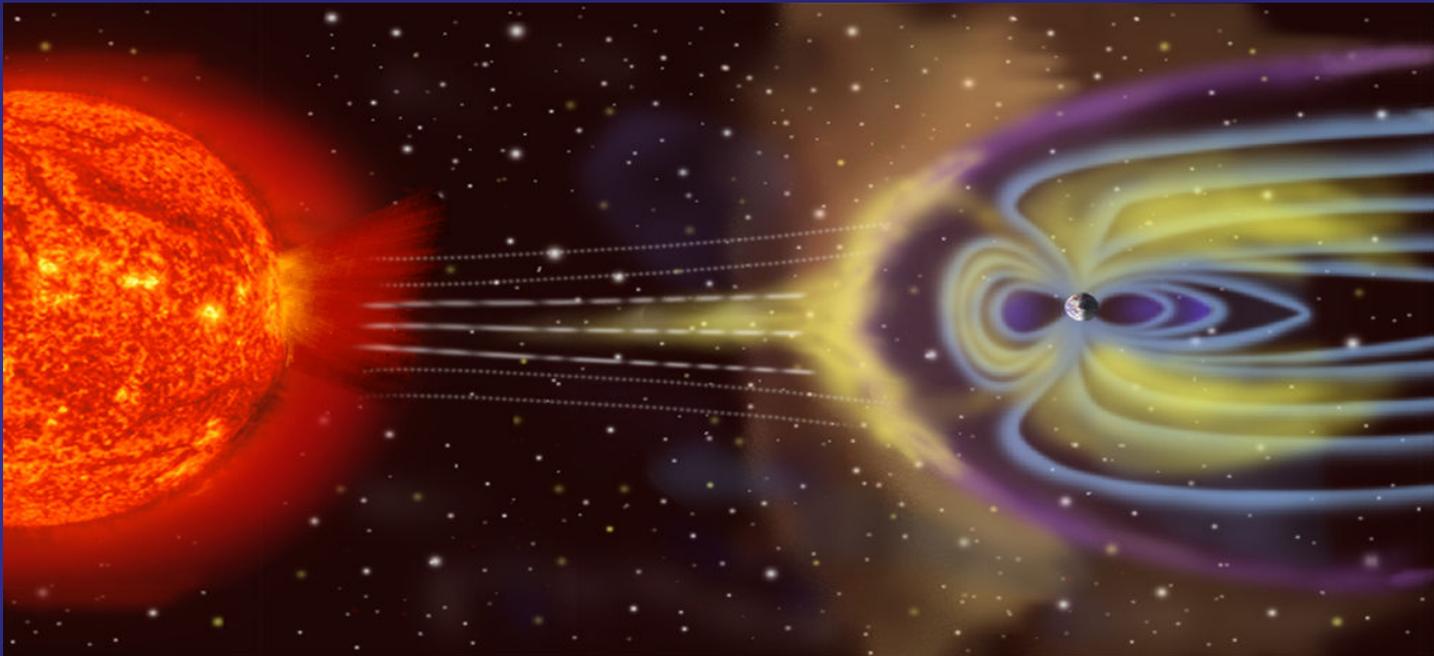
Como resultado de *blindaje magnético* partículas cargadas (viento solar y rayos cósmicos) **no pueden ingresar** a la atmósfera y erosionarla

Anillos de Van Allen

- ✓ Algunas partículas sí logran atravesar la magnetosfera y se mueven en trayectorias espirales a lo largo de líneas de campo, rebotando varias veces por segundo entre polos.
- ✓ Las corrientes que se generan pueden hacer disminuir el campo sobre la superficie,
- ✓ Cuando algunas partículas pueden ingresar a la atmosfera, colisionan con átomos dando lugar a auroras boreales/australes



Magnetic Weather



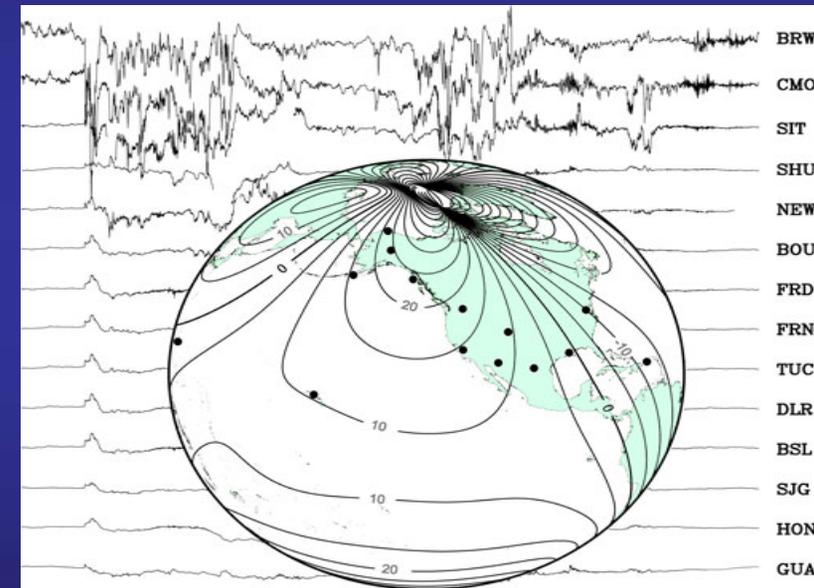
- La magnetosfera surge de un proceso dinámico, guiado por la actividad solar
- Baja actividad solar, la magnetosfera se extiende.
- Mucha actividad solar: tormentas magnéticas, efectos en la Tierra

El **B** terrestre varía en el tiempo

Variaciones rápidas (10^{-3} s - 10^7 s)

- ✓ Corrientes en la magnetósfera / ionósfera ($\tau \sim$ seg)
- ✓ Tormentas magnéticas ($\tau \sim$ hora)
- ✓ Cambios en el núcleo terrestre ($\tau < \sim$ año)

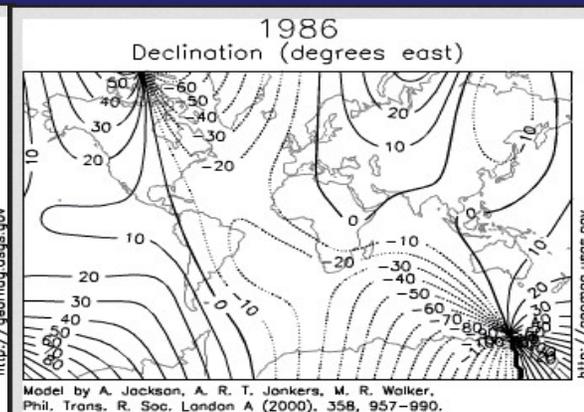
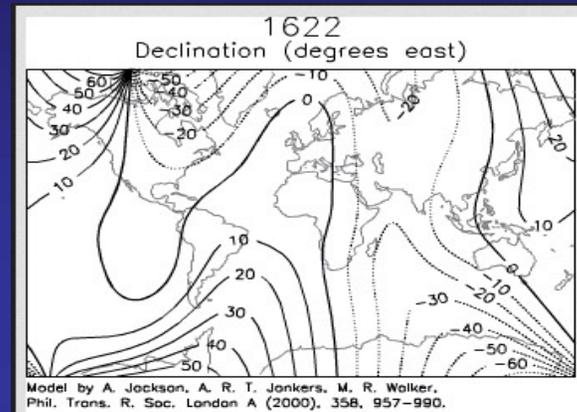
Registros de tormenta magnética (2000)



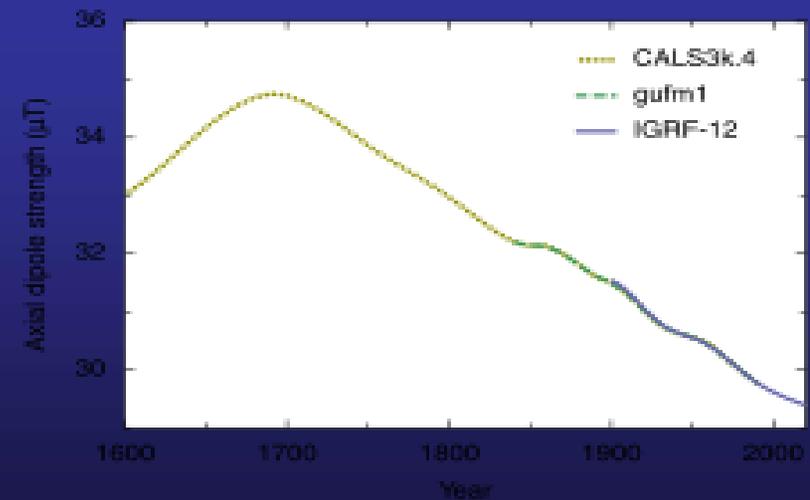
Lineas de intensidad de campo magnético paralelo a la superficie

El B terrestre varía en el tiempo

Variaciones seculares ($\tau > \text{año}$)
✓ Cambio continuo de intensidad y orientación del *dipolo magnético* terrestre, mayormente causado por alteraciones en el sistema dentro del núcleo terrestre que genera el campo planetario.



✓ El campo viene disminuyendo en intensidad un 6-10% los últimos 200 años



✓ Evidencia geológica de **inversión de polaridad!**

Reversión del campo B

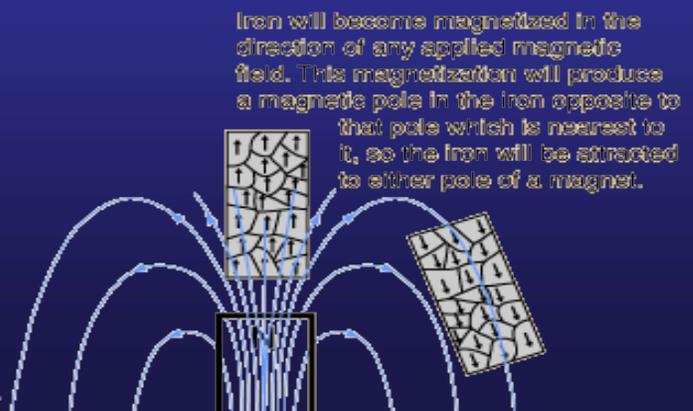
- ✓ Evidencia geológica de reversión del campo: basaltos, suelos de fondos marinos.
- ✓ Campos magnéticos ´registrados´ en orden magnético de materiales
 - ✓ Evidencia geológica de reversión del campo: basaltos, suelos de fondos marinos.
- ✓ Campos magnéticos ´registrados´ en orden magnético de
 - ✓ materiales ferromagnético como la *magnetita*,
 - ✓ Flujos de lava donde al enfriarse pequeñas partículas magnéticas quedan alineadas al B del momento: **magnetización termo-remanente**
 - ✓ Sesgo de alineamiento de partículas magnéticas en sedimentos **detrital remanent magnetization**



In bulk material the domains usually cancel, leaving the material unmagnetized.



Externally applied magnetic field.

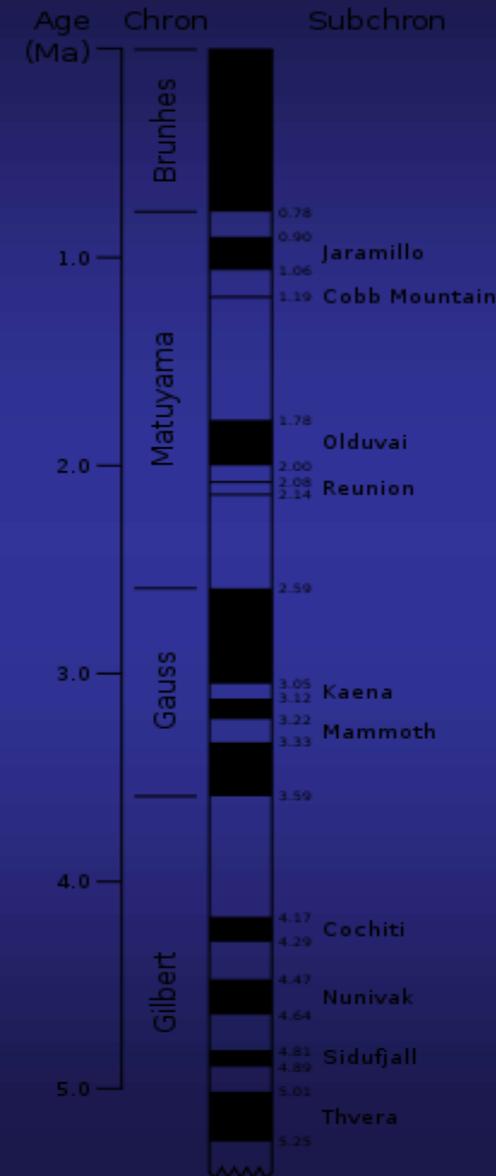
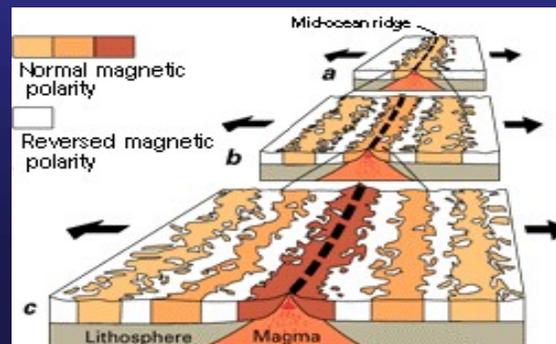


Iron will become magnetized in the direction of any applied magnetic field. This magnetization will produce a magnetic pole in the iron opposite to that pole which is nearest to it, so the iron will be attracted to either pole of a magnet.

Reversión del campo B

- ✓ Evidencia geológica de reversión del campo: basaltos, suelos de fondos marinos.
- ✓ Campos magnéticos ´registrados´ en orden magnético de
 - ✓ materiales ferromagnético como la *magnetita*,
 - ✓ Flujos de lava donde al enfriarse pequeñas partículas magnéticas quedan alineadas al **B** del momento: *magnetización termo-remanente*
 - ✓ Sesgo de alineamiento de partículas magnéticas en sedimentos *detrital remanent magnetization*
- ✓ Evidencia **fundamental** para sostener la teoría de tectónica de placas

Tiras magnéticas



Origen del **B** terrestre

Ingredientes para generar (y sostener) un campo **B**

Núcleo interno:

- ✓ De hierro sólido
- ✓ Muy caliente (5000K)
- ✓ Gira a su propio ritmo (0.2° /año más rápido que la sup.)

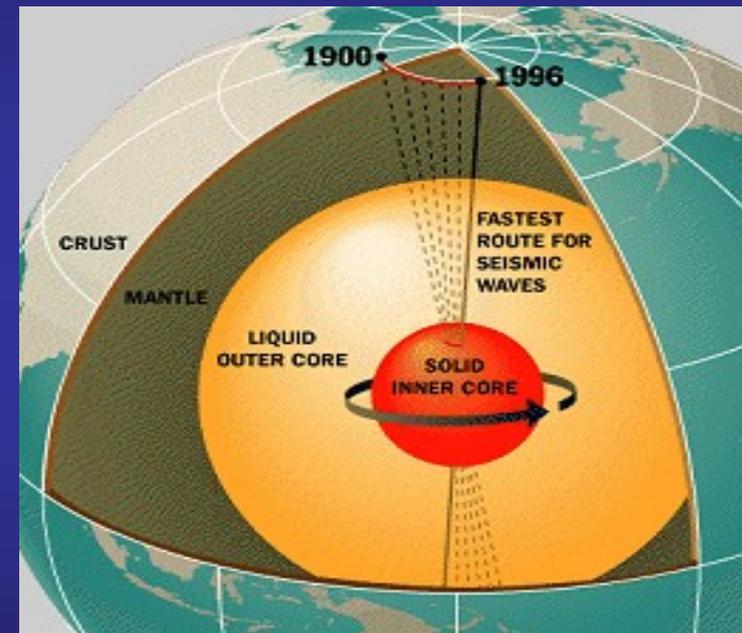
Núcleo externo:

- ✓ mar de hierro líquido (3800K)
- ✓ Convección, turbulencia...

Rotación de la Tierra

- ✓ Fzas de Coriolis para la dinámica del núcleo externo. Formación de vorticidad, efectos tipo columnas de Taylor.
- ✓ Notar que Venus (día de 243 días terrestres) no tiene **B**
- ✓ Notar que Marte (mas frío) tampoco (10^{-4} veces el terrestre)

Campo Magnético Interplanetario

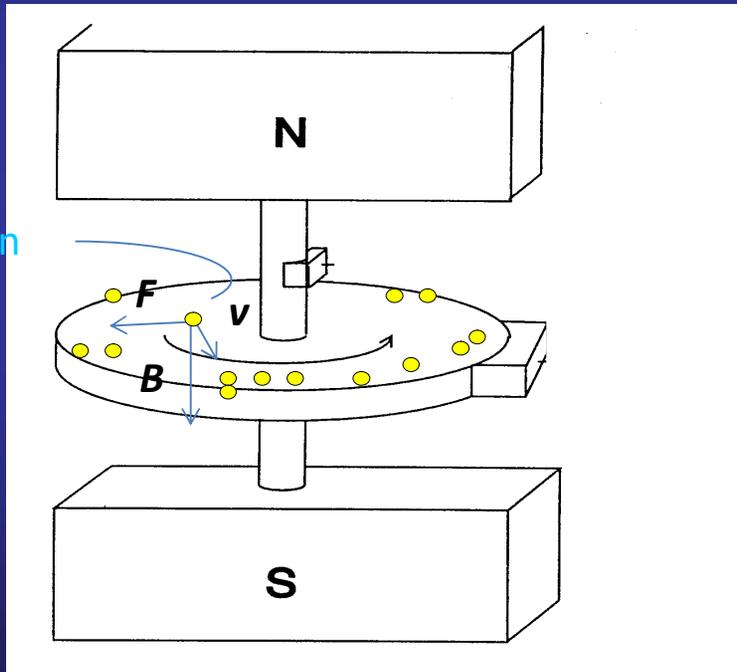


Modelo magnetohidrodinámico: el geodínamo

Efecto Dínamo

Disco de Faraday

Generación de corrientes a partir de **B** y conductor en movimiento



$$F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



Dos ingredientes para generar corriente:

- ✓ conductor en movimiento
- ✓ campo magnético (fijo y externo)

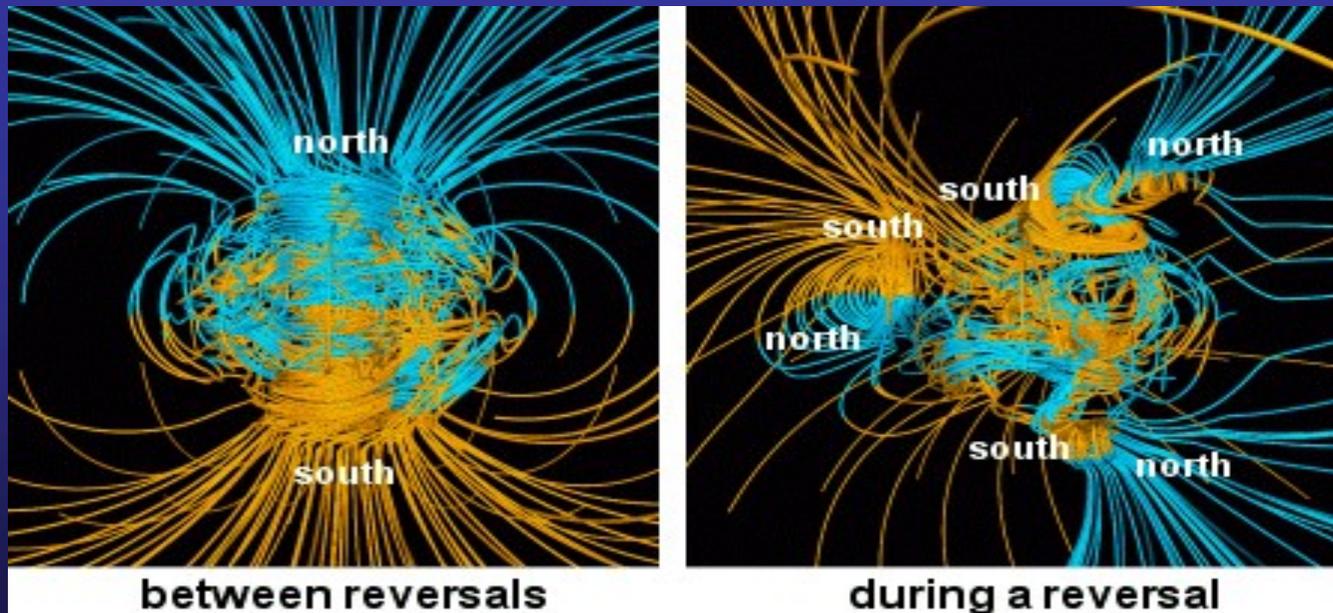
Geodínamo

Rotation and Magnetism of Earth's Inner Core

Gary A. Glatzmaier* and Paul H. Roberts

Three-dimensional numerical simulations of the geodynamo suggest that a super-rotation of Earth's solid inner core relative to the mantle is maintained by magnetic coupling between the inner core and an eastward thermal wind in the fluid outer core. This mechanism, which is analogous to a synchronous motor, also plays a fundamental role in the generation of Earth's magnetic field.

Science 1996



Magnetismo animal

- ✓ Existe evidencia de especies animales sensibles al **B**. Utilización para orientación y navegación.



Petirrojo europeo

Science 7 April 1972:
Vol. 176 no. 4030 pp. 62-64
DOI: 10.1126/science.176.4030.62

REPORTS

Magnetic Compass of European Robins

Wolfgang Wiltschko¹, Roswitha Wiltschko¹

NATURE | LETTER

日本語要約

Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird

Svenja Engels, Nils-Lasse Schneider, Nele Lefeldt, Christine Maira Hein, Manuela Zapka, Andreas Michalik, Dana Elbers, Achim Kittel, P. J. Hore & Henrik Mouritsen

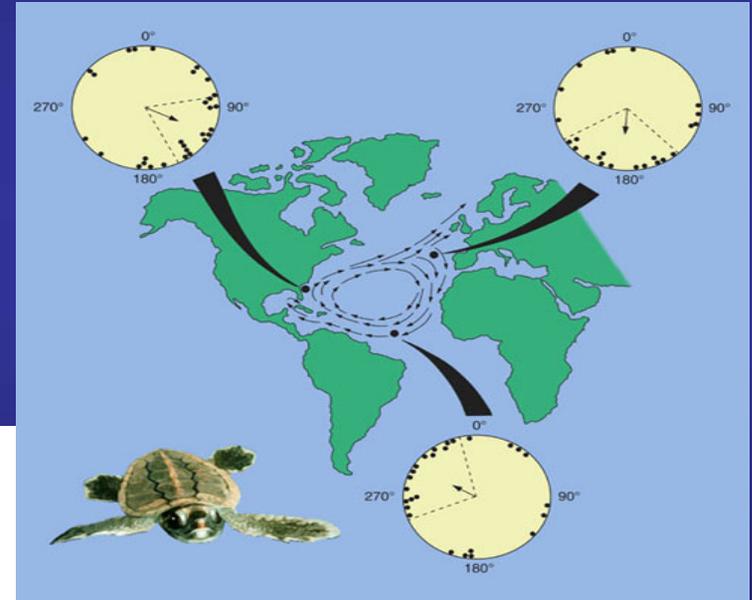
[Affiliations](#) | [Contributions](#) | [Corresponding author](#)

Nature **509**, 353–356 (15 May 2014) | doi:10.1038/nature13290

Received 28 January 2014 | Accepted 28 March 2014 | Published online 07 May 2014

Magnetismo animal

- ✓ Existe evidencia de especies animales sensibles al B. Utilización para orientación y navegación.



Geomagnetic imprinting: A unifying hypothesis of long-distance natal homing in salmon and sea turtles

Kenneth J. Lohmann¹, Nathan F. Putman, and Catherine M. F. Lohmann

Department of Biology, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599

Edited by Ran Nathan, The Hebrew University of Jerusalem, Jerusalem, Israel, and accepted by the Editorial Board July 1, 2008 (February 25, 2008)

Several marine animals, including salmon and sea turtles, disperse movement ecology linkage between

The Journal of Experimental Biology 199, 75–81 (1996)
Printed in Great Britain © The Company of Biologists Limited 1996
10261110

ORIENTATION AND OPEN-SEA NAVIGATION IN SEA TURTLES

KENNETH J. LOHMANN AND CATHERINE M. F. LOHMANN

Department of Biology, University of North Carolina, Chapel Hill, NC 27599-3280, USA

Magnetismo animal

- ✓ Existe evidencia de especies animales sensibles al B. Utilización para orientación y navegación.



Magnetismo animal

- ✓ Existe evidencia de especies animales sensibles al **B**. Utilización para orientación y navegación.



Guía 3. Magnetismo

Constantes:

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$; $eV = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$; $m_e = 9 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$; $q_e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Unidades:

Campo magnético: [B] - SI: $T \equiv N/(Am) = A/m = \text{Wb}/m^2$; CGS: Gs; $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}$

Notación: T : Tesla ; Gs : Gauss.

Esfera de radio R. Superficie: $S = 4\pi R^2$; volumen: $V = 4\pi R^3/3$

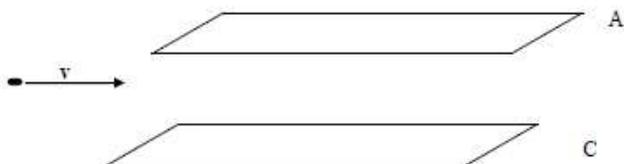
Cilindro de radio R y largo L. Superficie lateral: $S = 2\pi R L$; volumen: $V = \pi R^2 L$

A. Fuerza de Lorentz

- 1) Un protón es lanzado con una velocidad de $3 \times 10^7 \text{ m/s}$ dentro de una zona del espacio donde hay un campo magnético uniforme, perpendicular a la velocidad, de magnitud 10 T. Calcule la magnitud de la fuerza magnética ejercida sobre el protón y compárela con su peso.

Resp. $4,8 \times 10^{-11} \text{ N} = 2,87 \times 10^{15} m_p g$

- 2) En un tubo de rayos catódicos un haz de electrones con velocidad $v = 5,7 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ en la dirección indicada en la figura, es dirigido hacia la región del espacio comprendido entre las dos placas metálicas plano-paralelas A y C, entre las que se puede establecer un campo eléctrico E.



- a) ¿Cuál es la trayectoria de un electrón si $E=0$ y se aplica un campo magnético B uniforme de $5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, en dirección paralela a la superficie de las placas y perpendicular al haz de electrones? Calcule la frecuencia de rotación de los electrones.

Resp. 88 MHz

- b) ¿Es posible elegir E y B para que el electrón no se desvíe? Calcule el valor de E.

- 3) Suponga que se tiene un campo magnético B uniforme en dirección z.

- a) En qué plano se podrá mantener un electrón describiendo trayectorias circulares?

- b) Si $B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ y se requiere que el radio de las circunferencias sea de 0,5 m, ¿cuál debe ser la frecuencia de giro del electrón? ¿Cuál es entonces el módulo de su velocidad?

Resp. $f = 560 \text{ kHz}$; $v = 1,76 \cdot 10^6 \text{ m/s}$

Pueden hacer los ejercicios de fuerza de Lorentz, e intentar dibujar los campos magnéticos de los ejercicios de Ampere