



Departamento de Física
Universidad de Jaén

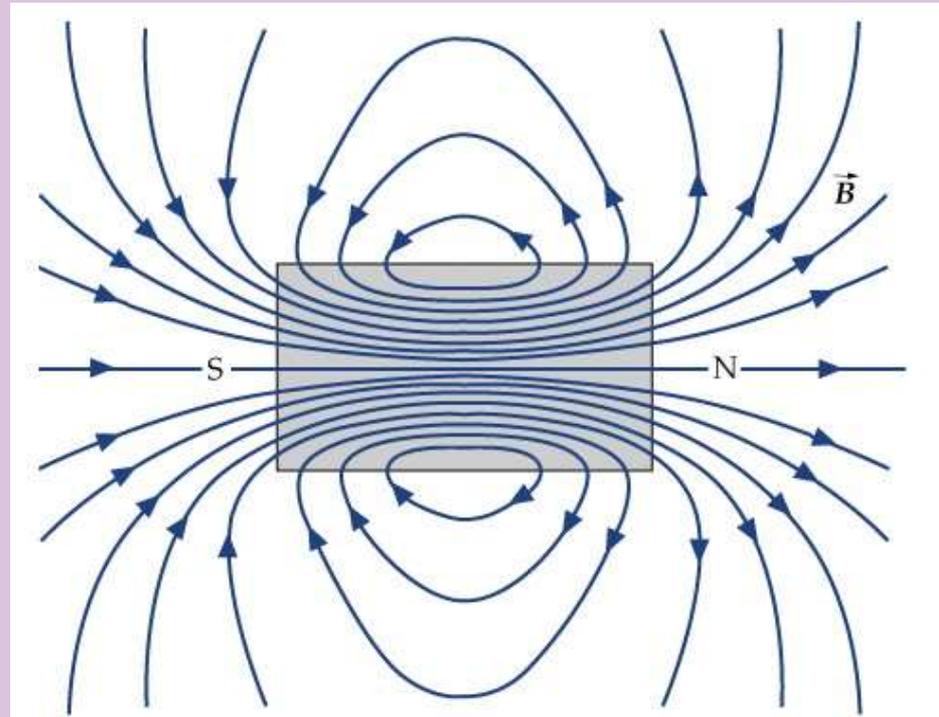
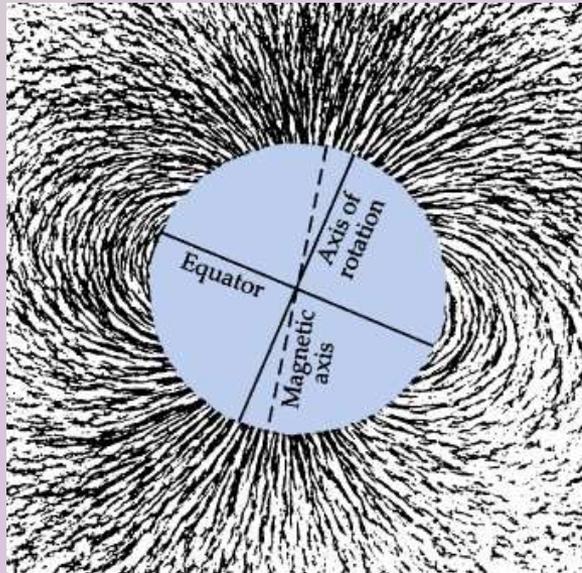
Magnetismo

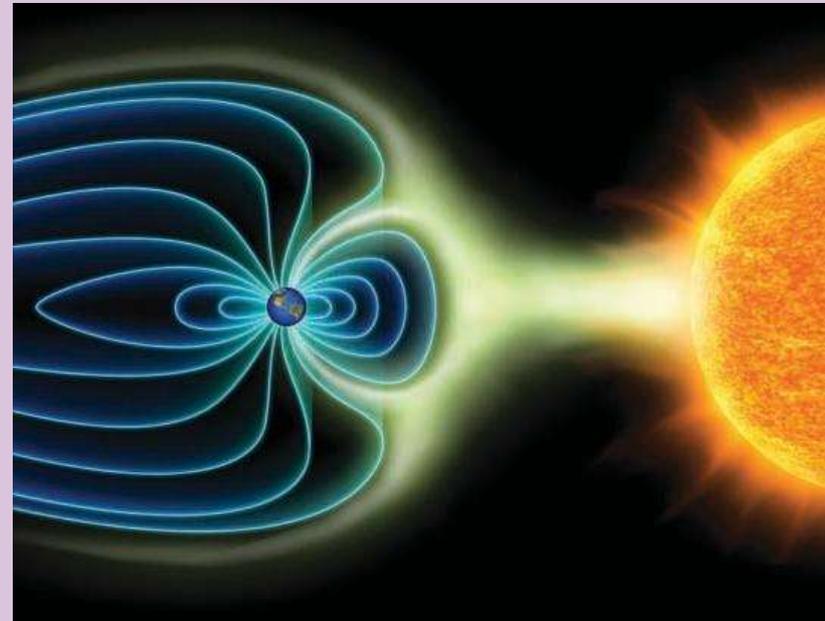
- ❖ **Campo Magnético**
- ❖ **Inducción Electromagnética**
- ❖ **Campo Magnético en la materia**



1- Introducción

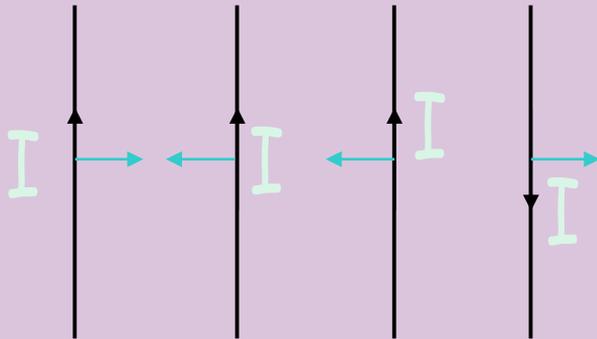
- Magnetismo Natural





1 - Introducción

- Lo que nos interesa ahora realmente son las interacciones entre magnetismo y electricidad:
- Oersted (s. XIX) fue el primero en encontrar la relación entre Electricidad y Magnetismo: la intensidad de corriente en un cable desorienta las brújulas cercanas.
- Se pueden analizar también otras interacciones:



$$q, v = 0 \Rightarrow E \neq 0; B = 0$$

$$q, v \neq 0 \Rightarrow E \neq 0; B \neq 0$$

- Fue Ampère el que enunció que: “la verdadera fuente de campo magnético es la corriente eléctrica”.

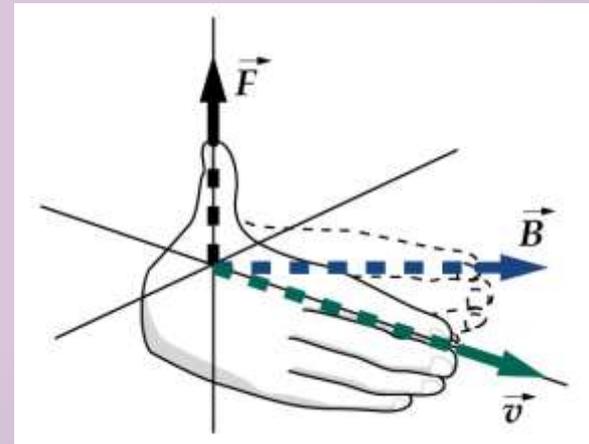
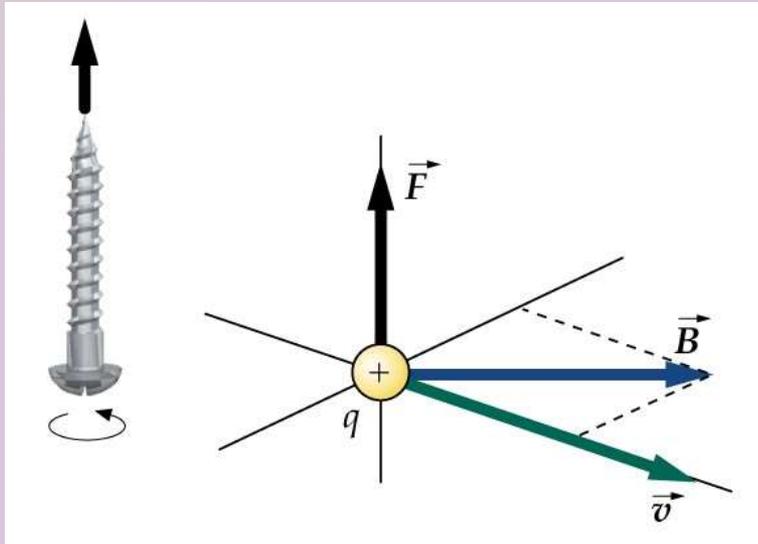


[vídeo](#)

2 - Fuerza Magnética

- Fuerza ejercida por un campo magnético sobre una carga en movimiento:

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$$



- Unidades de B : $\text{N s} / \text{C m} = \text{J s} / \text{C m}^2 = \text{V s} / \text{m}^2 = \text{Tesla}$

2 - Fuerza Magnética

- Si añadimos un campo eléctrico, también se ejercerá fuerza eléctrica, aunque la carga esté en movimiento, **Ley de Lorentz:**

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

- Definimos también el Flujo Magnético: $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$

- Unidades: $\text{m}^2 \text{V s} / \text{m}^2 = \text{V s} = \text{Weber}$

- PROPIEDADES:

1) La fuerza magnética es nula si: $v = 0$ ó $v \parallel B$

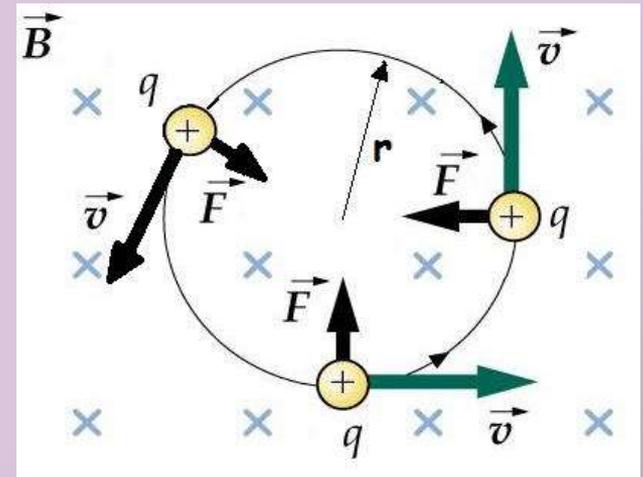
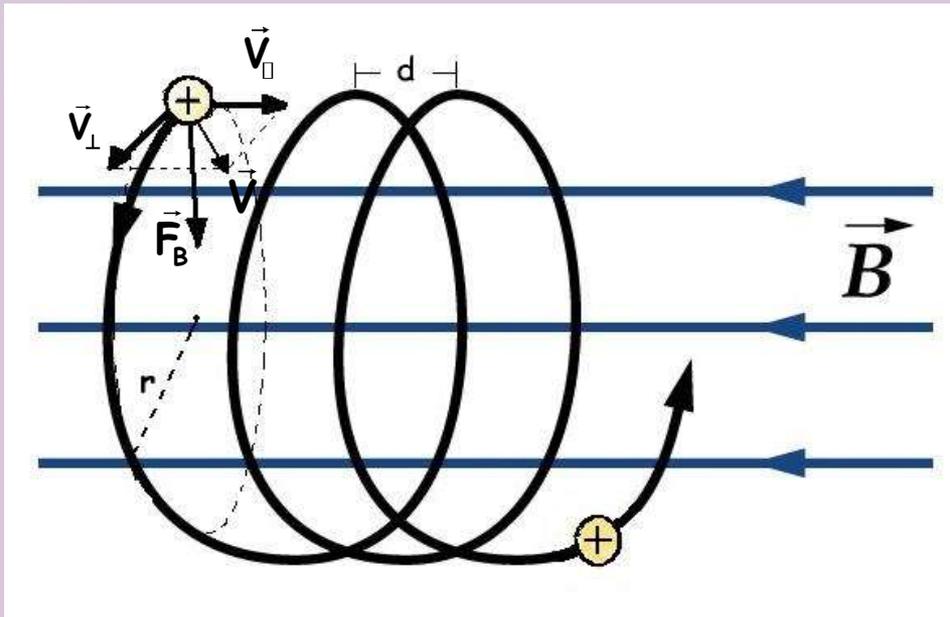
2) Siempre $F_m \perp (v \text{ y } B)$, por tanto, también a la Trayectoria.

$$F_{\parallel} = 0 \Rightarrow |v| = \text{cte} \Rightarrow E_c = \text{cte} \Rightarrow \boxed{W = 0}$$

2 - Fuerza Magnética

3) Dado \vec{B} uniforme, los únicos movimientos posibles son:

- Lineal ($\vec{v} \parallel \vec{B}$)
- Circular ($\vec{v} \perp \vec{B}$)
- Helicoidal



$$F_{mag} = F_{centrif}$$

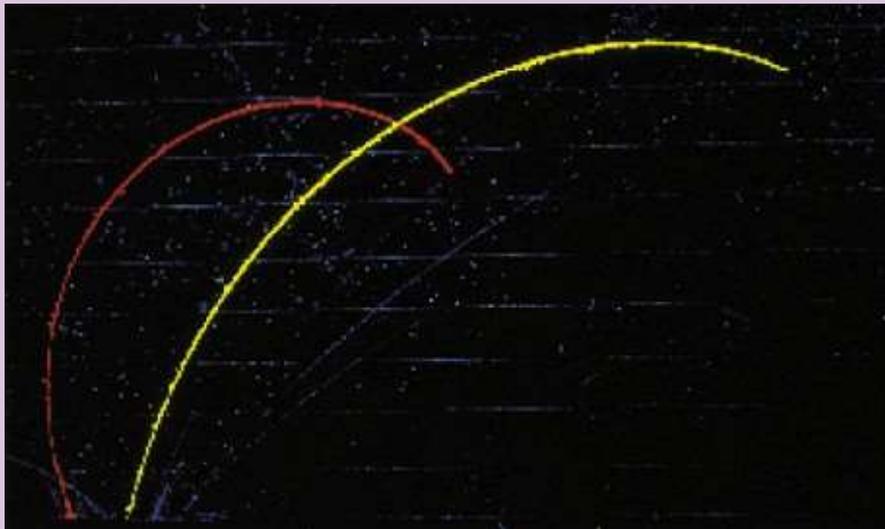
[Simulación](#)

2 - Fuerza Magnética

En el caso de movimiento circular son iguales la fuerza centrífuga y la eléctrica:

$$q v B = m v^2 / R \Rightarrow R = \frac{m v}{q B} \quad \vec{\omega} = \frac{q}{m} \vec{B}$$

- Aplicaciones: espectrómetro de masas, aceleradores.



[Simulación](#)

[Simulación](#)

3 – Interacciones entre corrientes

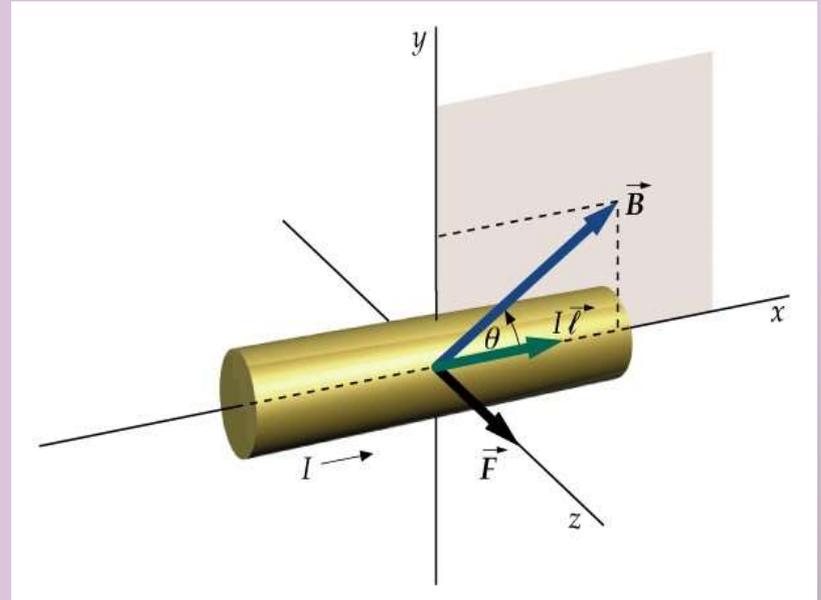
- Si en una zona de campo magnético hay un cable por el que circula una intensidad de corriente I , este sufrirá una fuerza magnética.
- Tenemos: $\vec{F} = q \vec{v} \wedge \vec{B}$

$$d\vec{F} = dq \vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$I = \frac{dq}{dt} \quad v = \frac{dl}{dt}$$

$$dq \vec{v} = dq \frac{d\vec{l}}{dt} = I d\vec{l} \Rightarrow d\vec{F} = I d\vec{l} \wedge \vec{B} \Rightarrow \vec{F} = \int I d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

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



3 – Interacciones entre corrientes

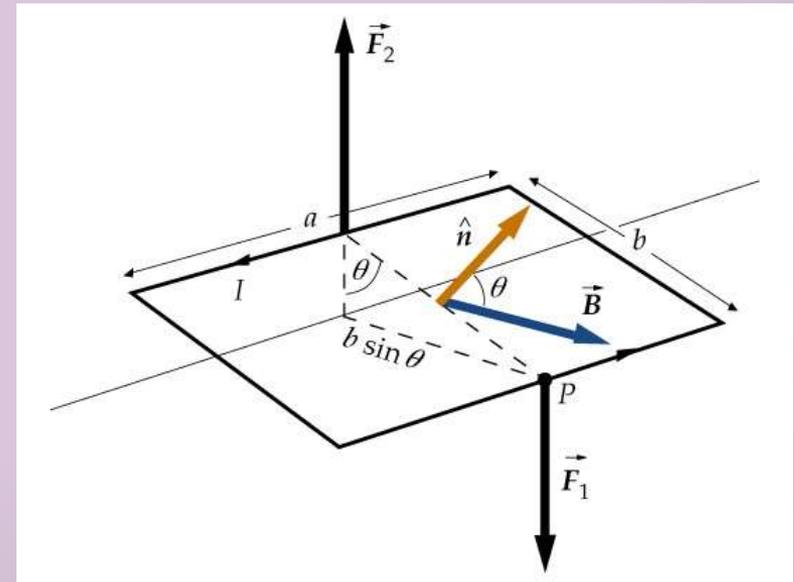
- Si consideramos una espira cuadrada dentro de un campo magnético, sobre cada lado se ejercerá una fuerza:

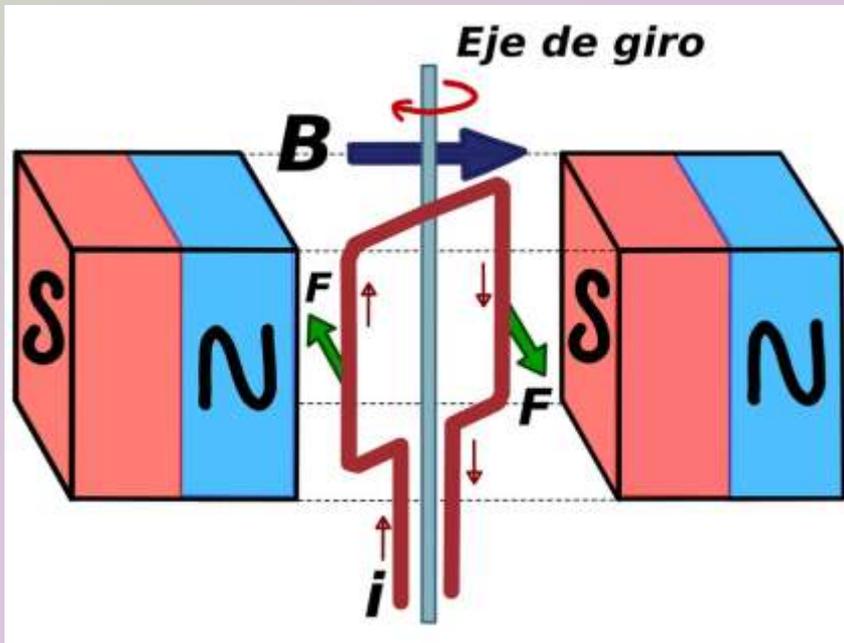
$$\vec{f}_b = I \vec{b} \wedge \vec{B} \quad \rightarrow \quad \text{se anulan}$$

$$\vec{f}_a = I \vec{a} \wedge \vec{B} \quad \rightarrow \quad \text{forman un par} \\ \text{que produce un giro}$$

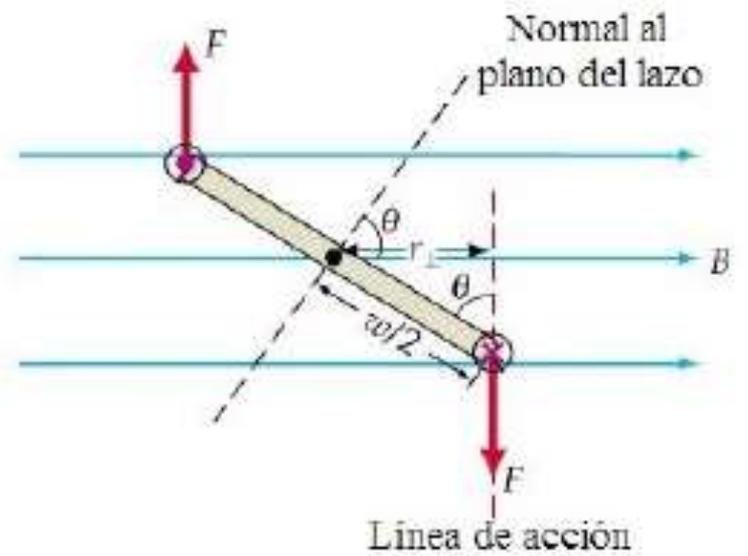
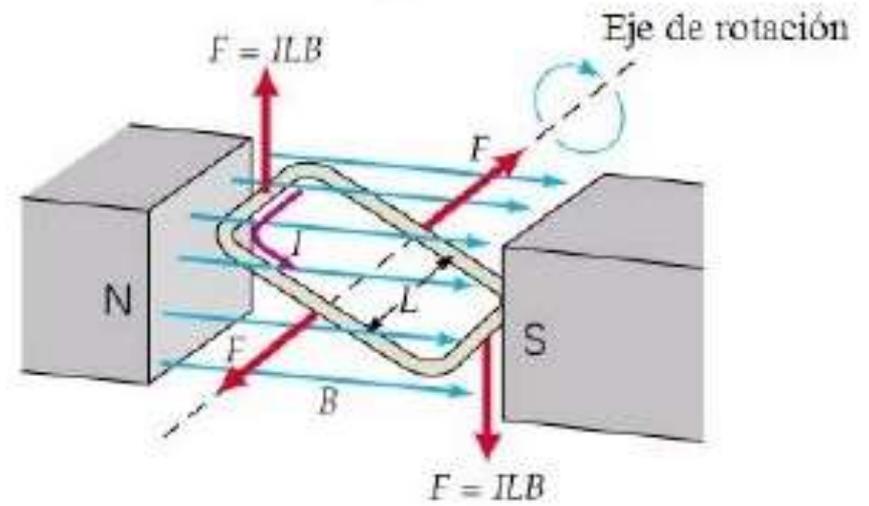
$$\vec{M}_{to} = \vec{b} \wedge \vec{f}_a = b f_a \text{ sen } \theta$$

$$\vec{M}_{to} = I \vec{b} \wedge \vec{a} \wedge \vec{B} = I \vec{S} \wedge \vec{B}$$





[vídeo](#)



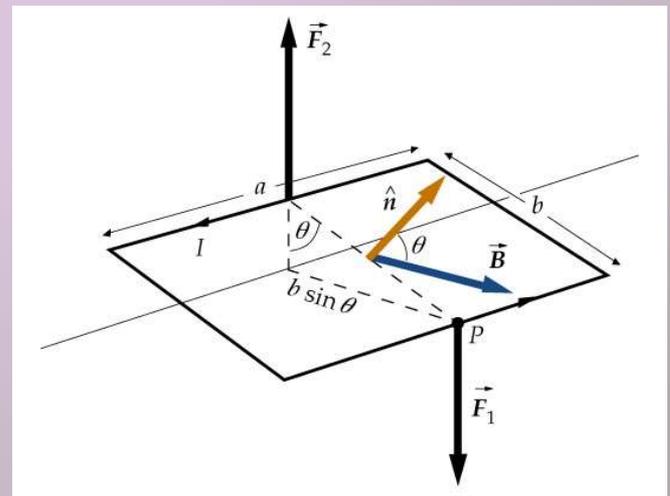
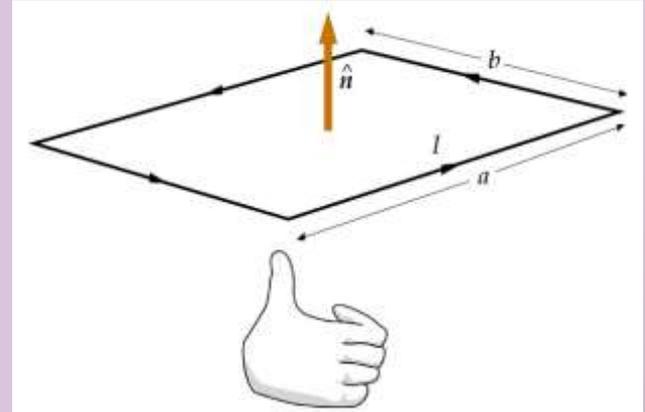
3 – Interacciones entre corrientes

- Se define el **Momento Dipolar Magnético** de una espira, el sentido de \vec{m} depende de I :

$$\vec{m} = I \vec{S}$$

- El efecto producido al aplicar un \vec{B} a una espira es que \vec{m} y \vec{B} se alinean:

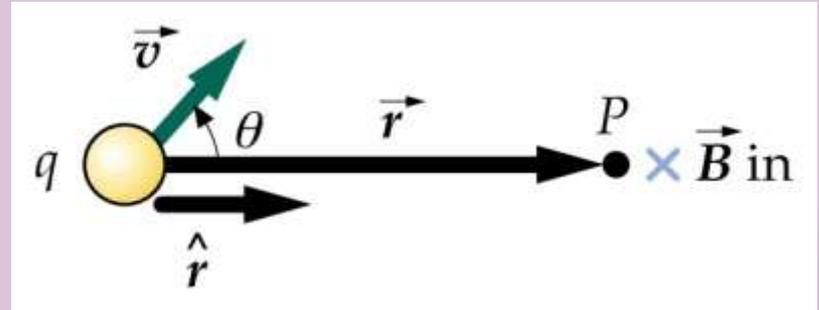
$$\vec{M}_{to} = \vec{m} \wedge \vec{B}$$



4 – Cálculo de Campo Magnético

A] Para Cargas Puntuales:

$$\vec{B} = K \frac{q \vec{v} \wedge \vec{r}}{r^3}$$



Vector Inducción Magnética

$$K = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

$\mu_0 \rightarrow$ **Permeabilidad magnética del vacío** ($4\pi \cdot 10^{-7}$)

Unidades:

$$\frac{\text{wb m}^2}{\text{m}^2 \text{ C m/s}} = \frac{\text{wb}}{\text{C/s m}} = \frac{\text{wb}}{\text{A m}}$$

Ley de Laplace

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

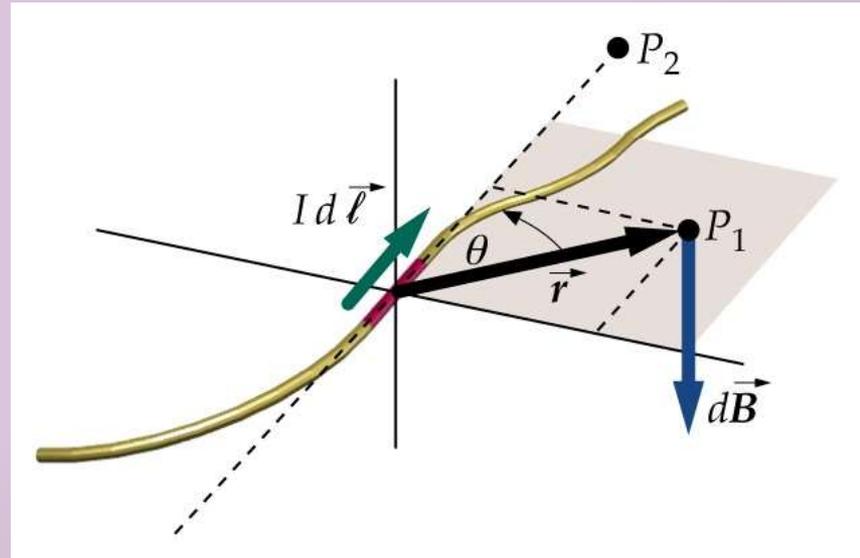
4 – Cálculo de Campo Magnético

B) Para Corrientes: recordando que $dq \vec{v} = I d\vec{l}$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dq \vec{v} \wedge \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

Ley de Biot-Savart

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3}$$



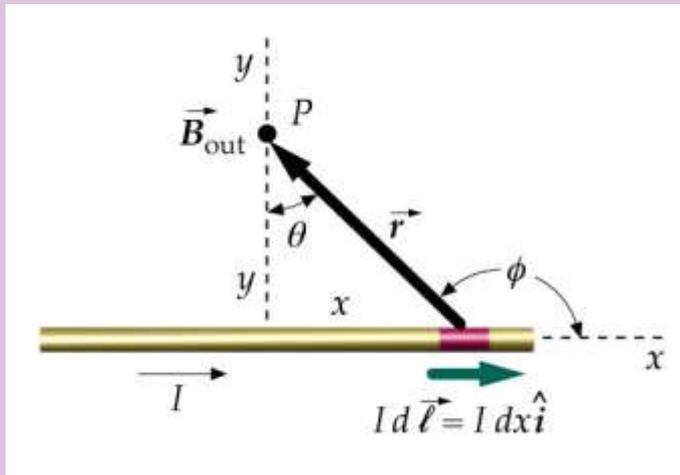
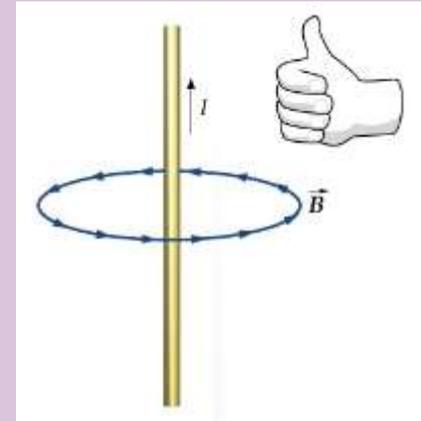
4 – Cálculo de Campo Magnético

Ejemplos:

1) Corriente Rectilínea:

Las líneas de campo son cerradas

- ⇒ no existen fuentes ni sumideros
- ⇒ No es conservativo.



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dx r \text{ Sen } \phi}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dx \text{ Cos } \theta}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dx \text{ Cos } \theta}{r^2}$$

$$\tan \theta = x / y \quad \rightarrow \quad dx = y \sec^2 \theta \, d\theta = y (r/y)^2 d\theta = r^2 d\theta / y$$

4 – Cálculo de Campo Magnético

- Con lo que nos queda:

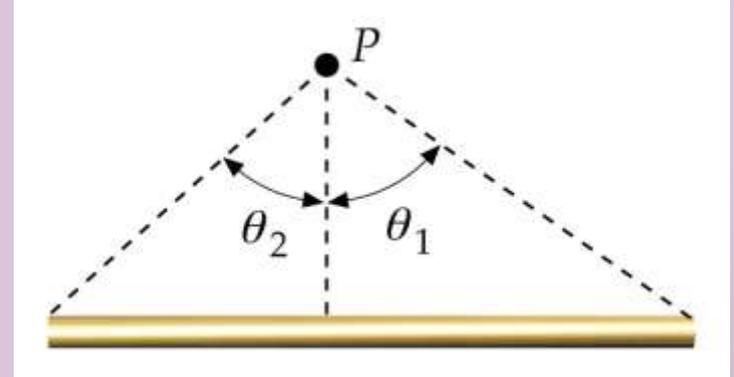
$$B = \frac{\mu_0 I}{4 \pi y} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{r^2 d\theta \cos \theta}{r^2} =$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4 \pi y} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta \Rightarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4 \pi} (\text{Sen } \theta_2 - \text{Sen } \theta_1)$$

Para un conductor indefinido: $\theta_1 = -\pi/2$; $\theta_2 = \pi/2$;

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



4 – Cálculo de Campo Magnético

2) Interacciones entre Corrientes:

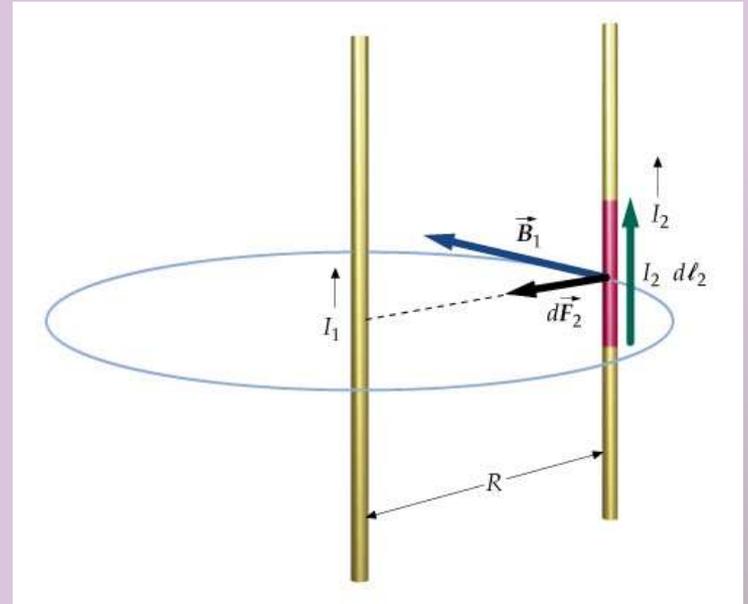
$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2 \pi R} \quad d\vec{F}_2 = I_2 d\vec{l}_2 \wedge \vec{B}_1$$

$$dF_2 = I_2 dl_2 B_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2 \pi R} dl_2$$

$$\boxed{\frac{dF_2}{dl_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2 \pi R}}$$

- Ídem para el otro:

$$\frac{dF_1}{dl_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2 \pi R} \Rightarrow \boxed{\frac{dF_1}{dl_1} = \frac{dF_2}{dl_2}}$$



- Amperio:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{4 \pi 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1}{2 \pi R} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{N}{m}$$

4 – Cálculo de Campo Magnético

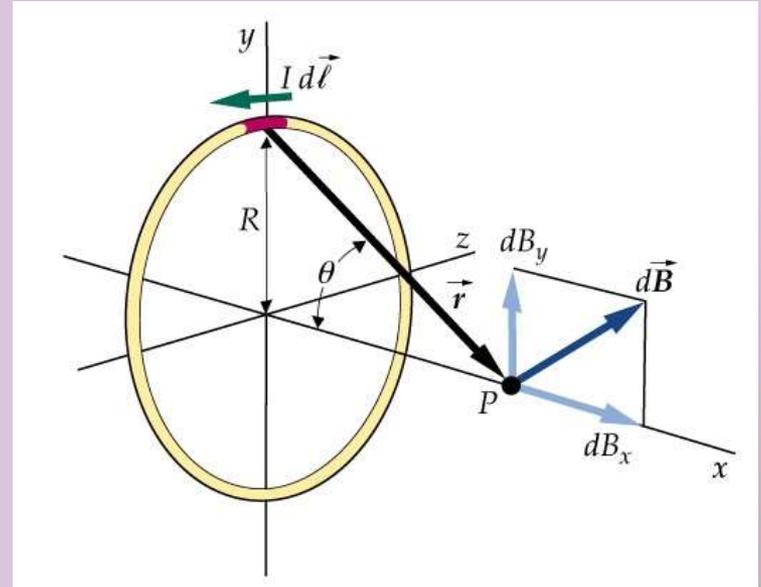
3) Espira Circular:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \wedge \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2}$$

$$dB_x = dB \text{ Sen } \theta = dB \frac{R}{r}$$

$$B_T = \oint dB \text{ Sen } \theta = \oint \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \frac{R}{r} dl$$

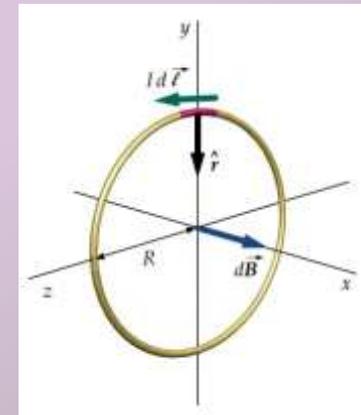
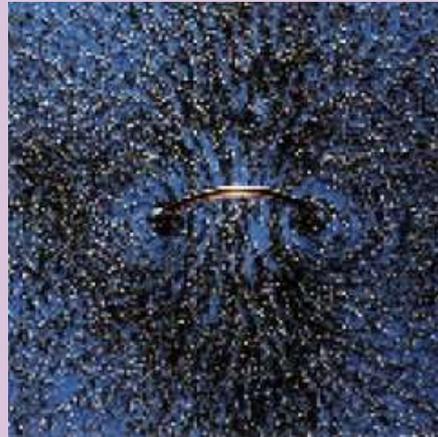
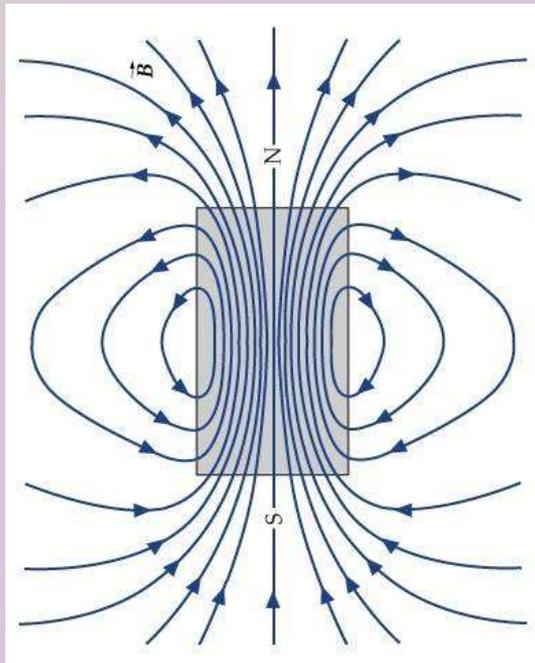
$$B_T = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} 2\pi R \Rightarrow B_T = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}$$



4 – Cálculo de Campo Magnético

- En el centro de la espira $r = R$:

$$B_T = \frac{\mu_0 I}{2R}$$



5 – Ley de Gauss. Ley de Ampère.

- En campos conservativos las líneas de campo son abiertas:

$$\phi = \oint \vec{A} \cdot d\vec{S} \neq 0 \qquad \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = 0$$

- El campo Magnético no es conservativo, las líneas de campo son cerradas:

$$\phi_m = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \qquad \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \neq 0$$

FLUJO

CIRCULACIÓN

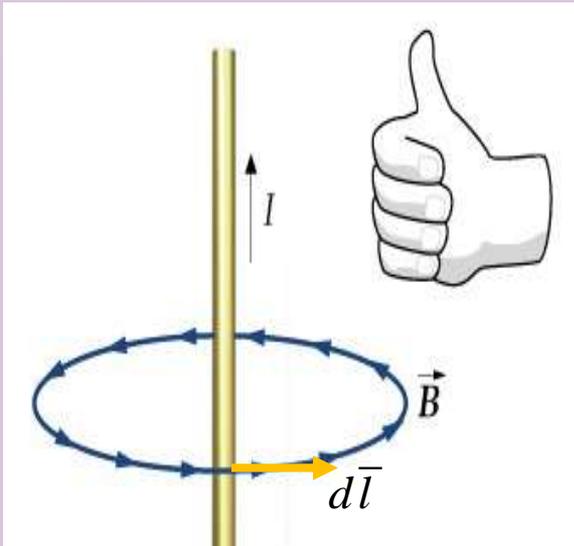
- Podemos, por tanto, usar la circulación como herramienta de cálculo del Campo Magnético. Lo hacemos primero para un conductor rectilíneo indefinido:

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

5 – Ley de Gauss. Ley de Ampère.

- Circulación:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi R} dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} 2\pi R \Rightarrow$$



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I = \mu_0 \sum I_i$$

Ley de Ampère

6 – Ejemplos de la Ley de Ampère.

- Solenoide Rectilíneo:

$$\bar{B}_{\text{Fuera}} \ll \bar{B}_{\text{Dentro}}$$

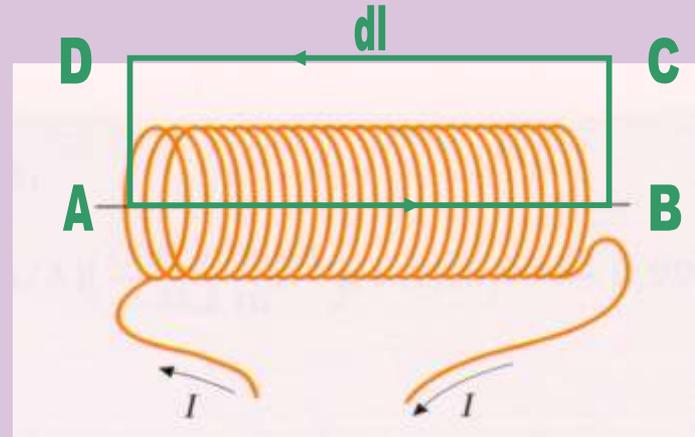
- Aplicamos las Ley de Ampère:

$$\oint \bar{B} \, d\bar{l} = \mu_0 \sum I_i$$

$$\oint \bar{B} \, d\bar{l} = \int_A^B + \int_B^C + \int_C^D + \int_D^A = \int_A^B \mathbf{B} \, dl = \mathbf{B} L$$

$$\mu_0 \sum I_i = \mu_0 N I \quad \longrightarrow \quad \boxed{B = \mu_0 n I}$$

donde n es la densidad de espiras (N/L)



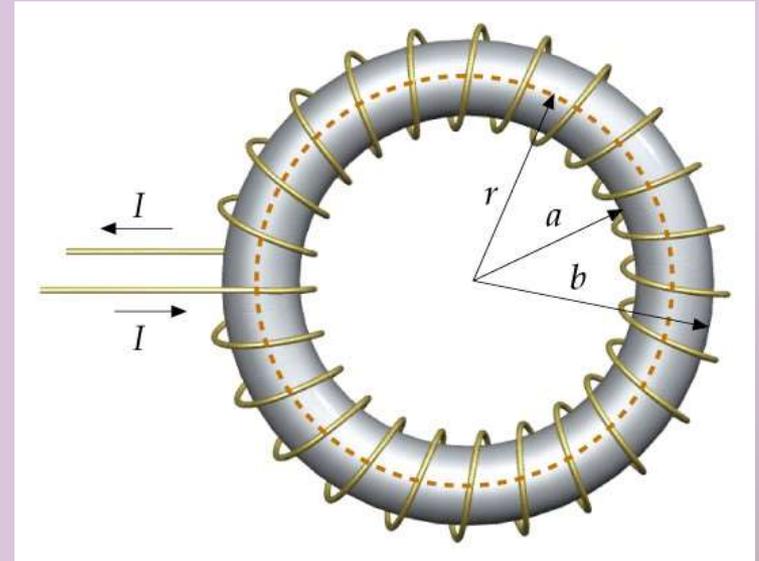
6 – Ejemplos de la Ley de Ampère.

- Solenoide Toroidal:

$$\oint \bar{B} \cdot d\bar{l} = \mu_0 \sum I_i = \mu_0 N I$$

$$\oint \bar{B} \cdot d\bar{l} = B \oint dl = B 2\pi R$$

$$B = \mu_0 \frac{N I}{2\pi R} = \mu_0 n I$$



- Fuera del solenoide:

$$\text{En } R < a \Rightarrow B = 0 \quad \text{pues } I = 0$$

$$\text{En } R > b \Rightarrow B = 0 \quad \text{pues } \sum I_i = 0$$