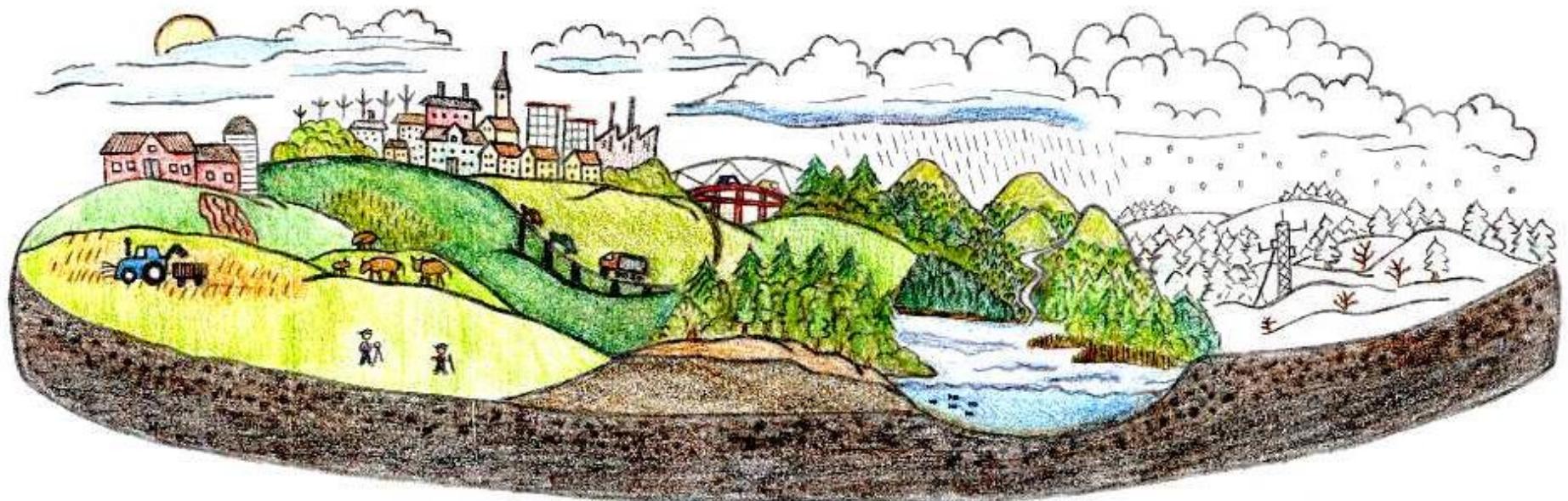


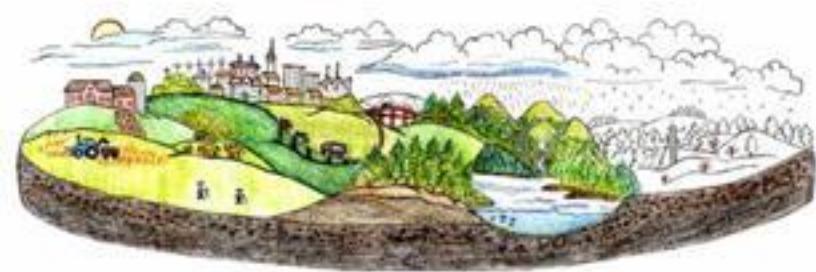
# Bases Físicas del Medio Ambiente

## Campo Magnético



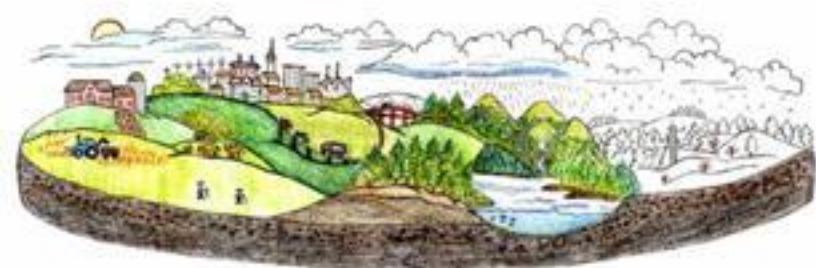
# Programa

- **XIII. CAMPO MAGNÉTICO.(2h)**
- Campo magnético. Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo magnético. Fuerza magnética sobre un elemento de corriente. Imanes en el interior de campos magnéticos. Momento sobre una espira de corriente en el interior de un campo magnético uniforme. Ley de Biot- Savart. Fuerza entre conductores rectilíneos. Ley de Ampère. Campo magnético sobre un solenoide y de un imán en forma de barra. Flujo del campo magnético.



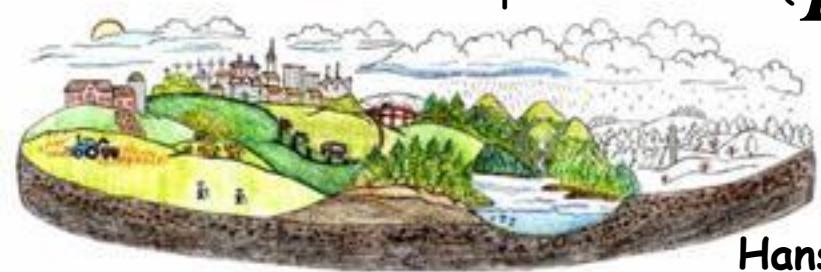
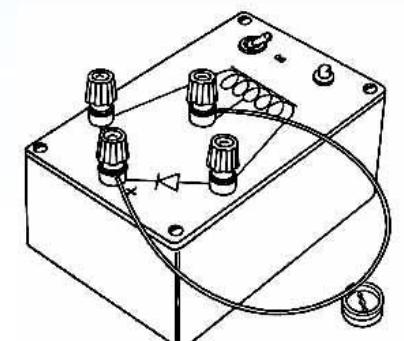
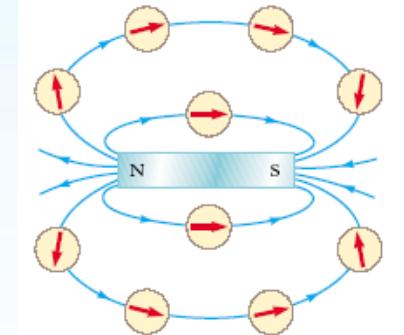
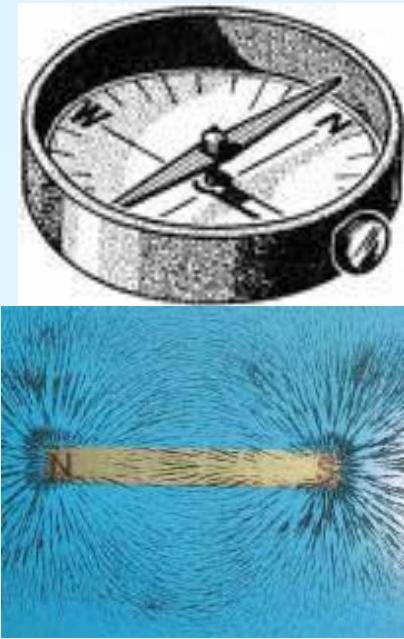
# Programa

- **XIII. CAMPO MAGNÉTICO.(2h)**
- **Campo magnético. Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo magnético. Fuerza magnética sobre un elemento de corriente. Imanes en el interior de campos magnéticos. Momento sobre una espira de corriente en el interior de un campo magnético uniforme. Ley de Biot- Savart. Fuerza entre conductores rectilíneos. Ley de Ampère. Campo magnético sobre un solenoide y de un imán en forma de barra. Flujo del campo magnético.**



# Campo Magnético

- El más conocido: lo de la Tierra
  - Funcionamiento de la brújula
  - Desde hace muchos siglos
- Otros objetos magnéticos (polos N y S)
- Más recientemente (1819)
  - Respuesta de brújula a **corriente** en lazo cercano
  - Empírica: **carga en movimiento** → magnetismo
- Física:
  - **Fuerzas** mutuales entre brújula y lazo
    - El campo de la brújula (imán) **en el alambre**
  - **relaciones íntimas/dinámicas entre**
    - El campo magnético ( $B$ ) orientado de N hacia S
    - El campo eléctrico ( $E$ )

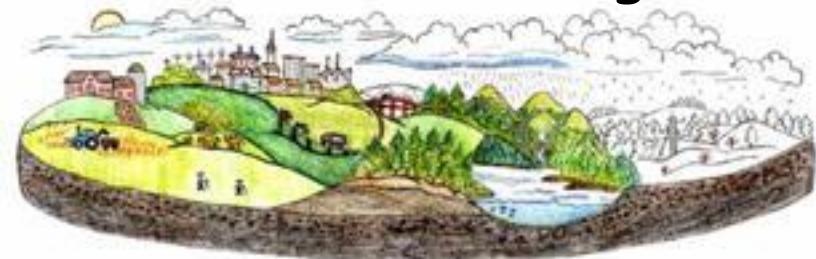


Hans Christian Oersted (1777-1851)

Enfoque

# Campo Magnético Observaciones Empíricas

- Definiremos el campo magnético ( $\vec{B}$ )
  - En función de la fuerza magnética  $\mathbf{F}_B$
  - en una partícula con carga  $q$  y velocidad  $\mathbf{v}$
- Primero, observamos de  $\mathbf{F}_B$  que
  - su magnitud  $F_B$  depende de  $q$  y  $\mathbf{v}$  (corriente)
  - el signo de  $F_B$  cambia con el signo de  $q$
  - tanto  $F_B$  como su dirección depende de  $\vec{B}$
  - si  $\mathbf{v}$  es paralelo a  $\vec{B}$ , entonces  $\mathbf{F}_B = 0$
  - si  $\mathbf{v}$  no es paralelo a  $\vec{B}$  entonces  $\mathbf{F}_B$  es  $\perp$  a  $\mathbf{v}$ , y a  $\vec{B}$
  - si  $\theta$  es el ángulo entre  $\mathbf{v}$  y  $\vec{B}$ , entonces  $F_B \propto \sin \theta$



Resumen matemático

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

# Campo Magnético

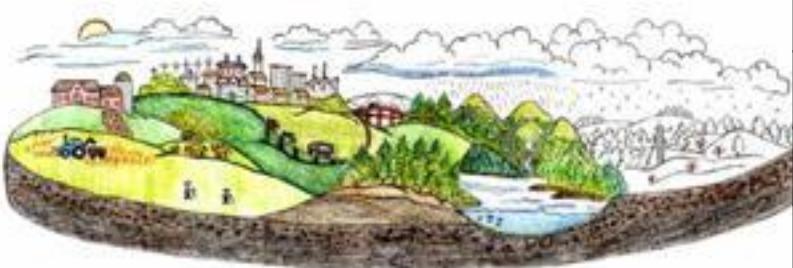
## Unidades

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

↑      ↑      ↑      ↑  
(N) = (C) (m s<sup>-1</sup>) (T)

Un tesla: la magnitud necesaria en un campo para producir una fuerza de 1N en un alambre de 1m (longitud; perpendicular al campo) con una corriente de 1A.

A veces se usa la unidad no S.I. el gauss:  $1 G = 10^{-4} T$



Definimos la unidad S.I. denominada el Tesla (T):

$$1 T = 1 N / (C \text{ ms}^{-1})$$

$$1 T = 1 N / (m \text{ Cs}^{-1})$$

$$1 T = 1 N / (m \text{ A})$$

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

Ejemplos de magnitudes de  $\vec{B}$

Fuente	Magnitud (T)
Imán fuerte superconductor	30
Imán fuerte convencional	2
Resonancia Magnética (RM)	1.5
Imán de barra	$10^{-2}$
Superficie solar	$10^{-2}$
Superficie terrestre	$0.5 \times 10^{-4}$
Cerebro humano (nervios)	$10^{-13}$

# Fuerza Magnética Magnitud y Dirección

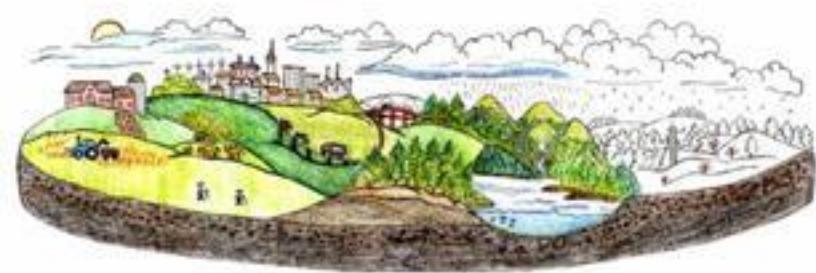
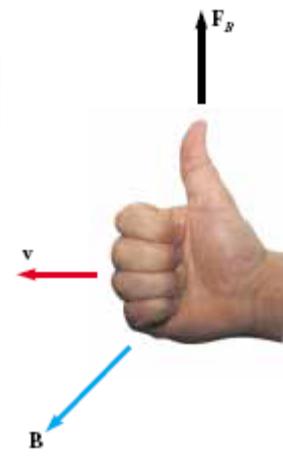
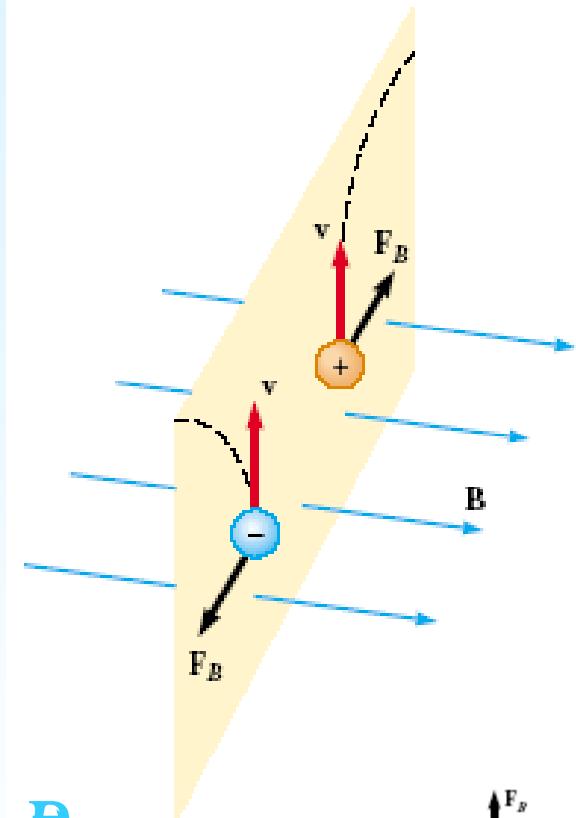
$$F_B = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$
$$F_B = |q| v B \sin \theta$$

- Magnitud
  - Proporcional a  $q$ ,  $v$ ,  $B$
  - Depende del ángulo  $\theta$  entre  $v$  y  $B$ 
    - Ninguna fuerza con  $\theta = 0^\circ$
    - Máxima magnitud con  $\theta = 90^\circ$
- Dirección
  - La regla de la mano derecha

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

pulgar

dedos



# Fuerzas Magnéticas y Fuerzas Eléctricas

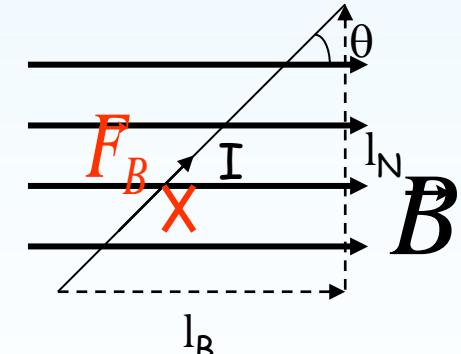
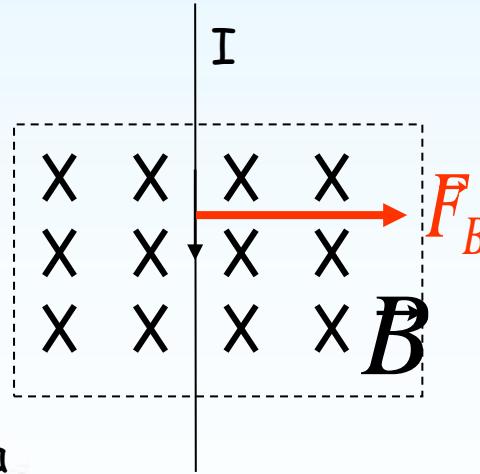
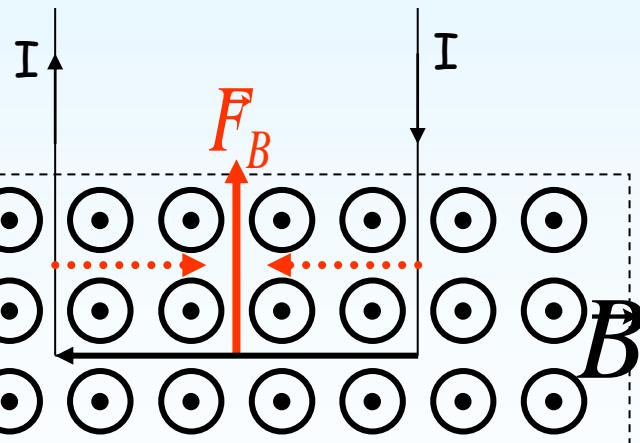
- Diferencias importantes
  - Fuerza eléctrica ( $F_E$ ):
    - Actúa en la dirección de  $E$
    - Actúa en una carga independiente de su movimiento
    - Puede realizar trabajo ( $F_E$  en la dirección del desplazamiento)
  - Fuerza magnética ( $F_B$ ):
    - Actúa perpendicular a  $B$
    - Actúa sólo en cargas en movimiento
    - Incapaz de realizar trabajo (fuerza  $\perp$  al desplazamiento)
- La energía cinética de una partícula cargada que se mueve en un campo magnético no se puede modificar por  $B$  actuando solo (únicamente cambia la velocidad)



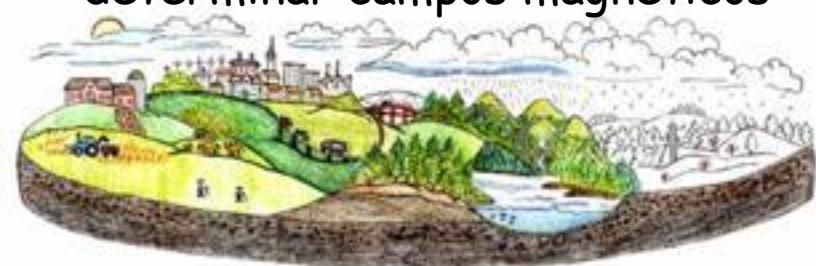
# Práctica con la dirección de $\vec{F}_B$

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

- Convenios para dibujar vectores orientados:
  - Hacia la izquierda:  $\leftarrow$
  - Hacia la derecha:  $\longrightarrow$
  - Hacia el lector:  $\odot$
  - Desde el lector:  $\times$



Alambre rígido: método preciso para determinar campos magnéticos



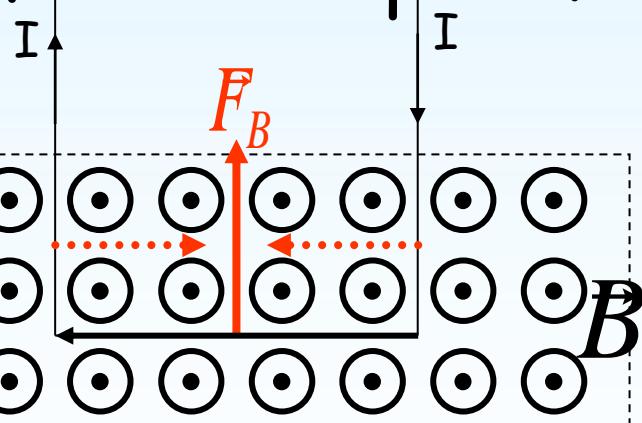
$$\vec{l} \times \vec{B} = l_N B$$

(requiere más práctica)

# Práctica con la dirección de $\vec{F}_B$

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

- En este caso, si la corriente es  $0.3A$ , el alambre tiene una longitud de  $10cm$ , y la fuerza experimentada es  $0.03N$ , halla  $\vec{B}$

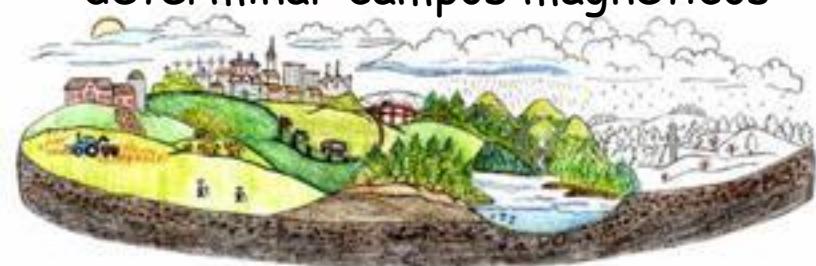


$$B = \frac{F}{Il} = \frac{0.03N}{(0.1m)(0.3A)}$$

Alambre rígido: método preciso para determinar campos magnéticos

$$= 1 T$$

saliendo de la pantalla



# Alambre de forma arbitraria

- Para un segmento pequeño

$$d\vec{F}_B = I \, ds \times \vec{B}$$

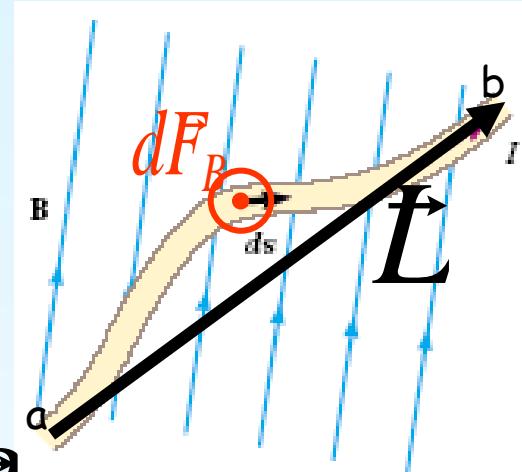
- Para el segmento entero a-b:

$$\vec{F}_B = I \int_a^b ds \times \vec{B}$$

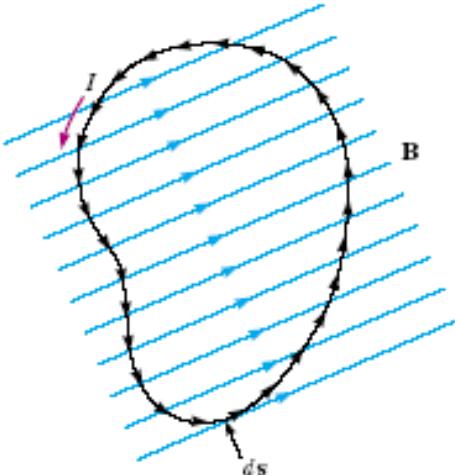
- Para campo constante:  $\vec{F}_B = I \left( \int_a^b ds \right) \times \vec{B}$

$$\vec{F}_B = I \vec{L} \times \vec{B}$$

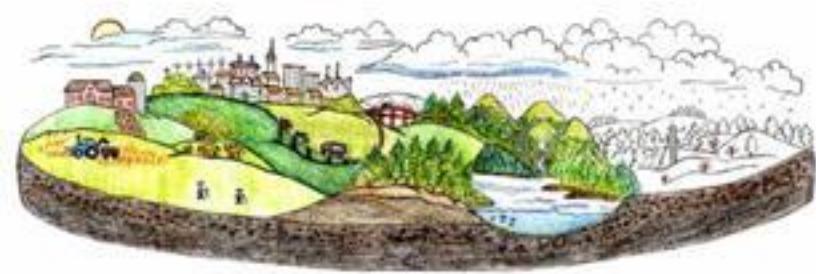
- Donde  $\vec{L}$  es la suma vectorial de los pequeños segmentos



La fuerza magnética para un lazo curvado en un campo uniforme es lo mismo que la de un alambre recto con los mismos terminales y la misma corriente



La fuerza magnética neta en un lazo cerrado es cero



# Fuerzas Magnéticas y Eléctricas Conjuntas

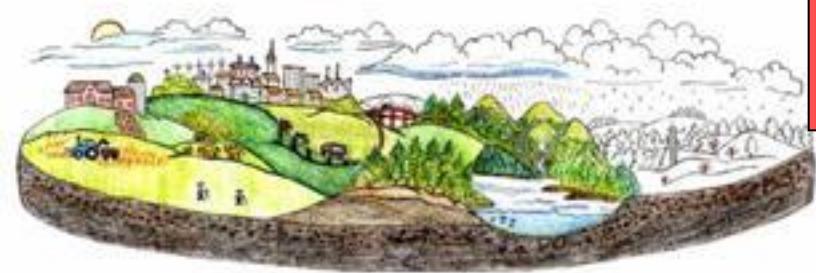
- Para una carga moviéndose en la presencia de campos  $E$  y  $B$ :

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

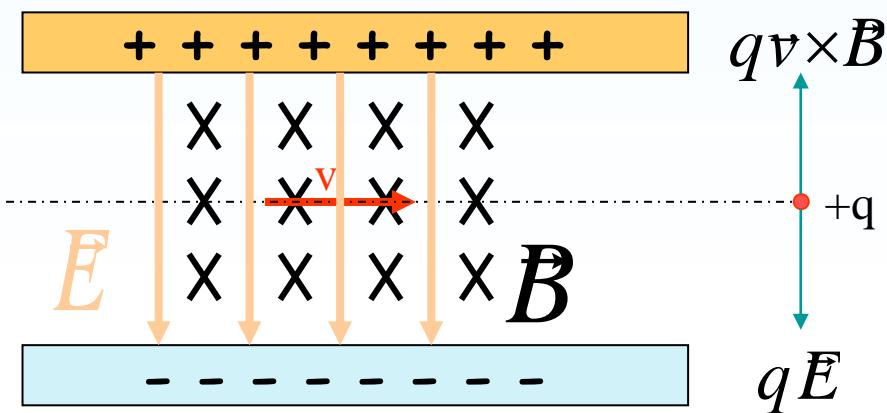
- la Fuerza de Lorentz

- Aplicaciones

- Selector de velocidades (conseguir partículas con velocidad uniforme)
- Útil para los espectrómetros de masas

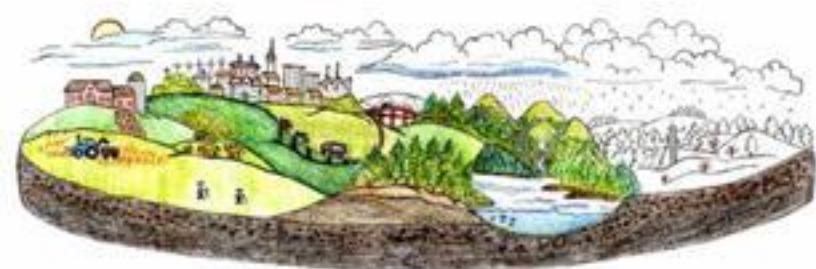


Fuente



# Programa

- **XIII. CAMPO MAGNÉTICO.(2h)**
- Campo magnético. Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo magnético. Fuerza magnética sobre un elemento de corriente. Imanes en el interior de campos magnéticos. **Momento sobre una espira de corriente en el interior de un campo magnético uniforme. Ley de Biot- Savart. Fuerza entre conductores rectilíneos. Ley de Ampère. Campo magnético sobre un solenoide y de un imán en forma de barra. Flujo del campo magnético.**

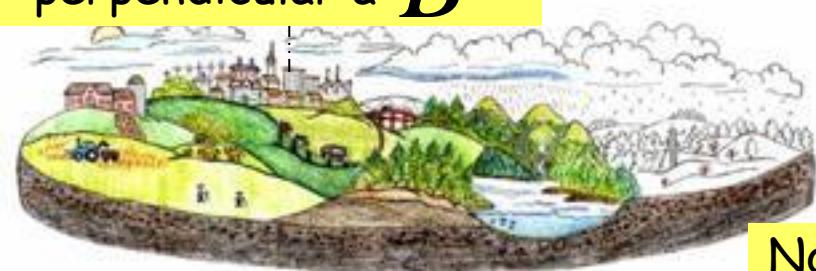


# Momento sobre una espira de corriente en un campo magnético

- Consideramos la figura:
  - Paralelo a  $\vec{B}$ ,  $F_1 = F_3 = 0$
  - Perpendicular,  $F_2 = F_4 = I a B$
  - Direcciones según regla mano derecha
- Momento  $\tau$  respecto al eje vertical



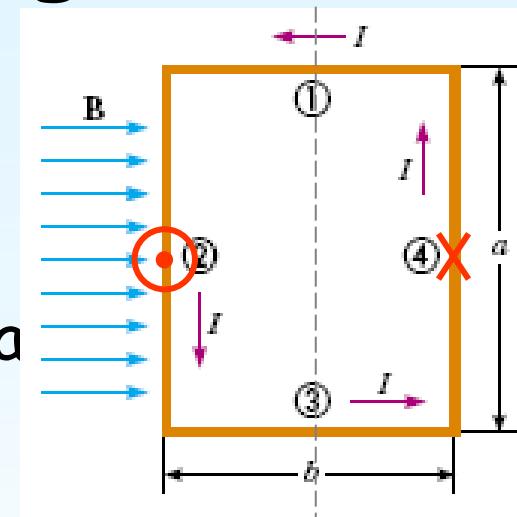
\*superficie con normal perpendicular a  $\vec{B}$



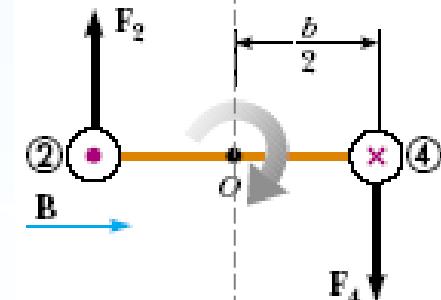
$$\begin{aligned}
 \tau &= F_2 \frac{b}{2} + F_4 \frac{b}{2} \\
 &= (IaB) \frac{b}{2} + (IaB) \frac{b}{2} \\
 &= Iab \\
 &= IA
 \end{aligned}$$

Superficie del lazo

No importa como se distribuye vertical-horizontal\*



Vista desde abajo



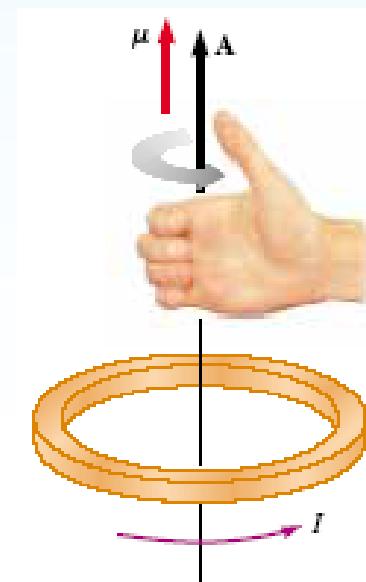
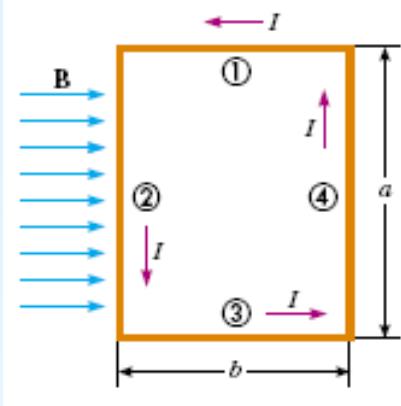
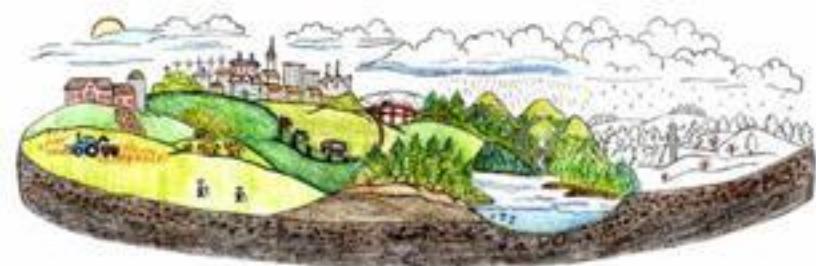
Motores electromagnéticos

# Momento magnético

- Si la superficie es perpendicular a  $\vec{B}$ , entonces no hay ningún momento ( $\tau=0$ )
- En general:  $\tau = IA \times \vec{B}$

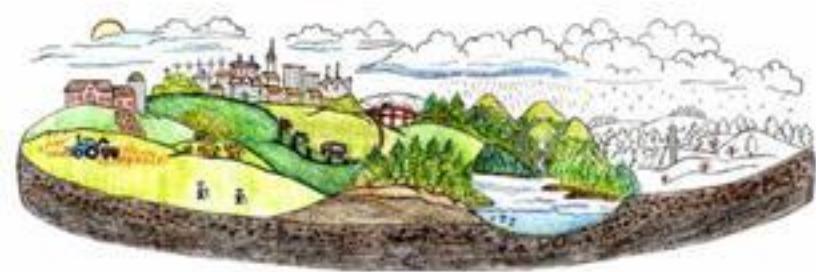
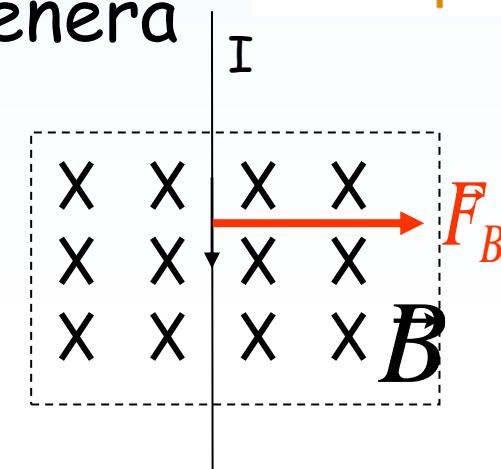
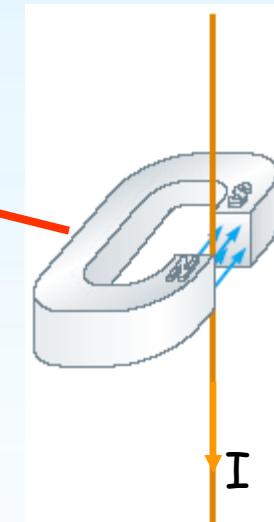
$$\tau = \mu \times \vec{B}$$

- Donde  $\mu = IA$  es el momento magnético (orientado normal a la superficie y normal al campo  $B$ )
- (será de interés cuando lleguemos a materiales magnéticas)



# Campo Magnético y Corriente

- Fuerza (de  $B$ ) en un alambre con corriente
- Ley de Acción/Reacción (3<sup>a</sup> de Newton)
  - Fuerza del campo en un alambre con corriente
  - Fuerza del alambre en el campo
    - O en el imán que genera el campo
- La corriente afecta al campo (brújula)
- Cualquier alambre con corriente  $I$  genera un campo a su rededor



# Ley de Biot-Savart

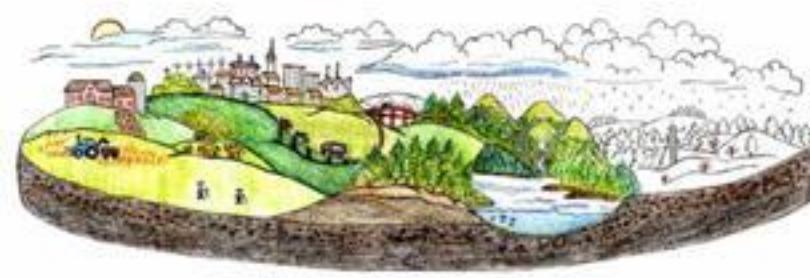
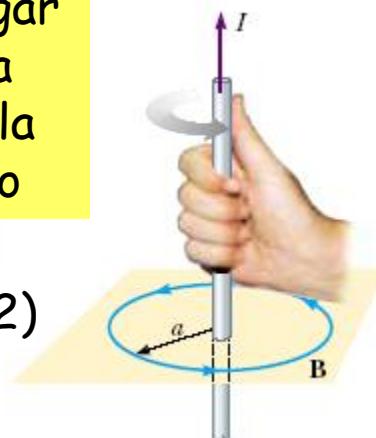
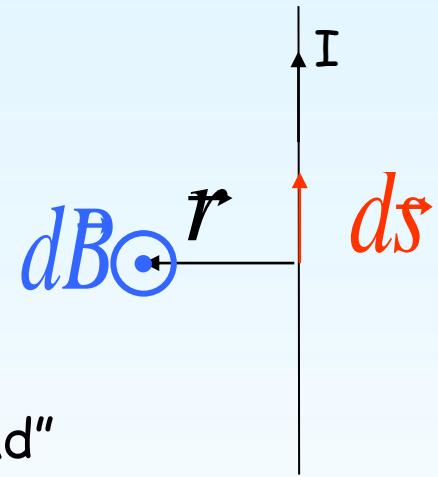
- Para un alambre con
  - Corriente  $I$
  - Segmento de longitud/dirección  $ds$
- El campo  $B$  que genera es proporcional a
  - La distancia,  $r$  (cuadrada, inversamente)
  - Alguna propiedad del medio ( $\mu$ ): la "permeabilidad"

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2}$$

La regla de la mano derecha:  
cogiendo el alambre con el pulgar  
derecho en la dirección de la  
corriente, los dedos apuntan la  
dirección del campo generado

Jean-Baptiste Biot (1774-1862)

Félix Savart (1791-1841)

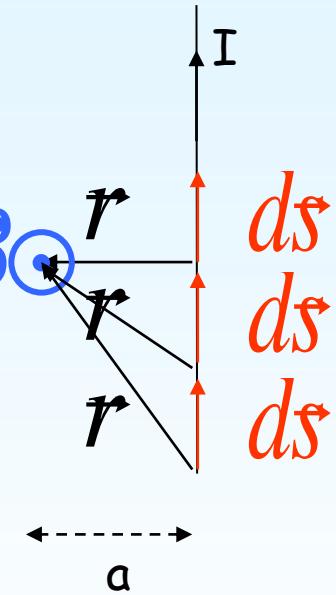


# Integración de la Ley de Biot-Savart (al largo del alambre)

- Para un alambre infinitamente largo
  - Examinamos el campo  $\vec{B}$  que genera
  - La suma de muchos segmentos  $d\vec{s}_i$
- Aplicamos la Ley B-S para cada segmento:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$$

- Son invariables:  $\mu_0, \pi, I$  e incluso  $d\vec{s} \times \hat{r}$
- Solo varía la distancia (cuadrada;  $r^2$ ); y así  $dE$
- Hay que sumar (un poco de cálculo que os ahorro):



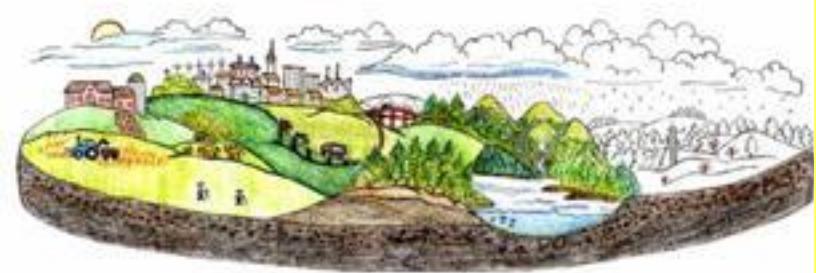
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Magnitud del campo magnético en cualquier punto a distancia  $a$  de un alambre infinito con corriente  $I$



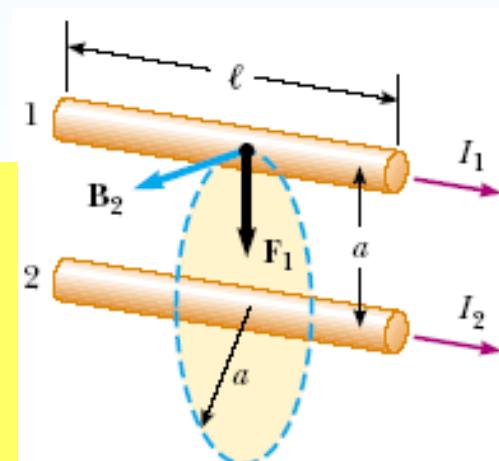
# Corrientes en alambres paralelos

- Par de alambres largas (longitud  $l$ )
  - Corrientes  $I_1, I_2$
  - Separados por una distancia  $a$
- Campo  $\vec{B}_2$  generado por alambre 2, a distancia  $a$ :
- La Fuerza  $F_1$  en el alambre 1  $\vec{F}_1 = I_1 \vec{L} \times \vec{B}_2$
- Por geometría simple ( $\vec{B} \perp$  a alambres):
- Sustitución:
- Simetría (y la 3<sup>a</sup> Ley de Newton):  $F_1 = F_2$
- Dirección: atractiva si  $I_1$  y  $I_2$  misma dirección



Definición del amperio:  
1A es la corriente que causa  $2 \cdot 10^{-7}$  N de fuerza entre dos alambres a 1m de distancia

$$\vec{B}_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \vec{L}$$
$$F_1 = I_1 L \vec{B}_2$$
$$F_1 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l$$



# Corriente y campo magnético

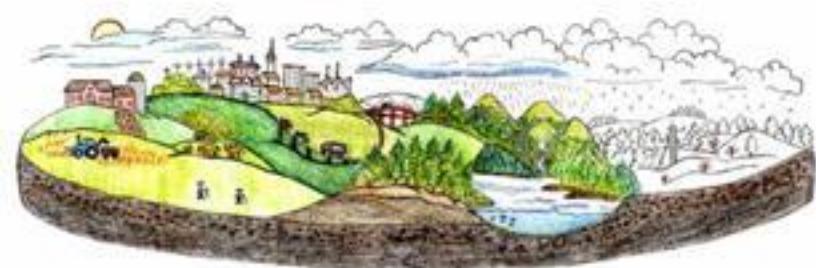
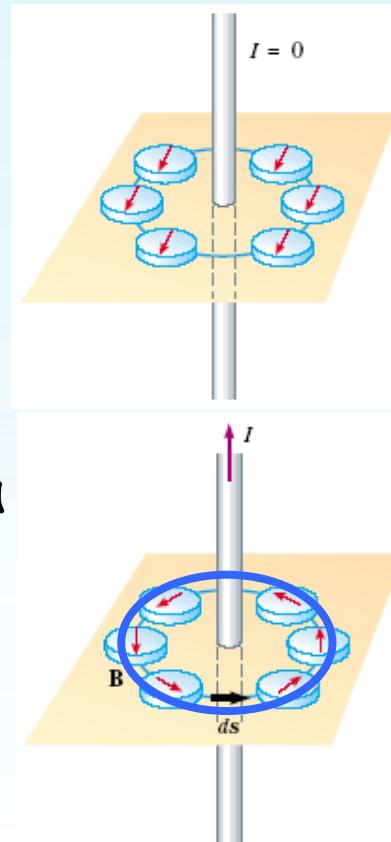
## Ley de Ampere

- Un alambre y su efecto en  $\vec{B}$ 
  - Sin corriente, el  $\vec{B}$  es lo de la tierra
  - Corriente: produce un  $\vec{B}$  giratorio
- ¿Cómo detectar una corriente?
  - $\vec{B}$  giratorio: definir una superficie cerrada
  - Para el **camino cerrado circular**  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ 
    - $\vec{B}$  es constante y paralelo a  $d\vec{s}$  en todo sitio

$$= B \oint d\vec{s}$$

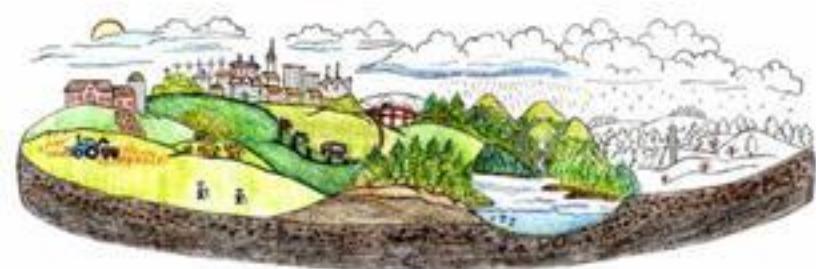
$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} 2\pi r = \mu_0 I$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$



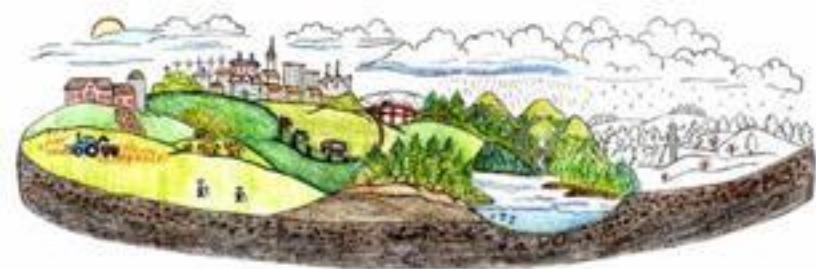
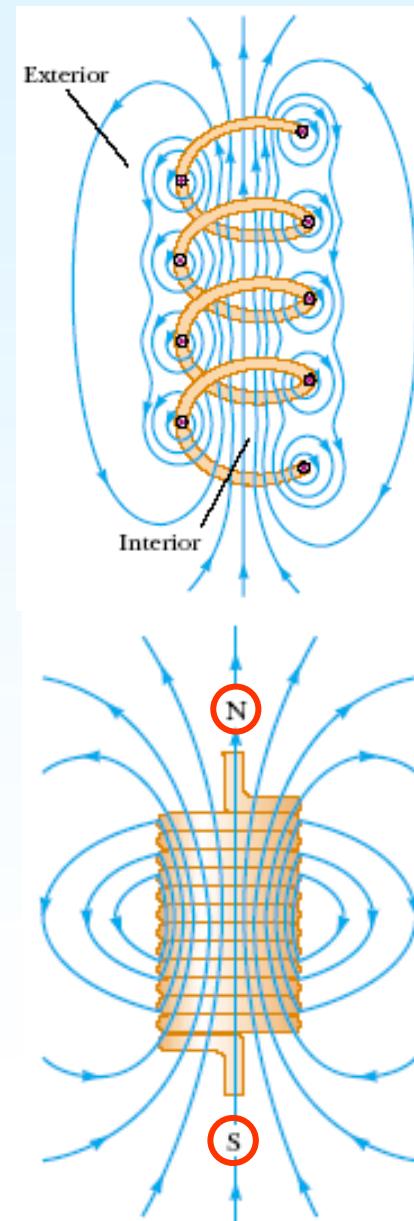
# Programa

- **XIII. CAMPO MAGNÉTICO.(2h)**
- Campo magnético. Fuerza de Lorentz. Movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo magnético. Fuerza magnética sobre un elemento de corriente. Imanes en el interior de campos magnéticos. Momento sobre una espira de corriente en el interior de un campo magnético uniforme. Ley de Biot- Savart. Fuerza entre conductores rectilíneos. Ley de Ampère. **Campo magnético sobre un solenoide y de un imán en forma de barra.** Flujo del campo magnético.



# Campo magnético sobre un solenoide

- Solenoide: un alambre largo bobinado en forma de hélice
  - Corriente: hacia arriba, en espiral
  - $\vec{B}$ , según Biot-Savart en general
- Solenoide más apretado
  - Alambres aislados (cubierto de plástico)
  - $\vec{B}$  se acerca a lo de un imán de **varita**

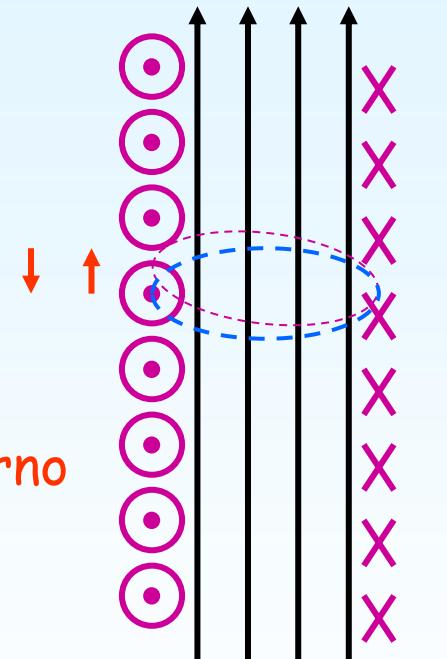


# Campo magnético en un solenoide

- Solenoide *ideal*
  - Muy apretado, con longitud  $\gg$  radio
  - $B$  en el interior se acerca al uniforme
- La corriente  $I$  es helicoidal, con
  - Gran componente tangencial/circular
  - Pequeño componente vertical
    - Se puede anular, añadiendo otro hélice externo
      - Mismo sentido tangencial/circular
      - Sentido vertical apuesto
- Para una sección con  $N$  espirales
  - Se determina (cálculo trigonométrico) que

$$\int B ds = \mu_0 NI$$
$$Bl = \mu_0 NI$$

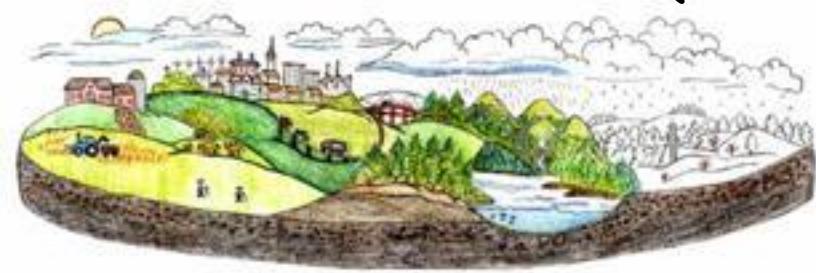
Vista transversal



$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

$$B = \mu_0 n I$$

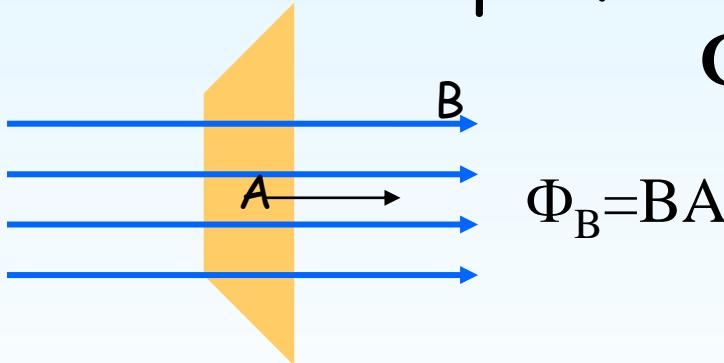
Espirales por unidad de longitud



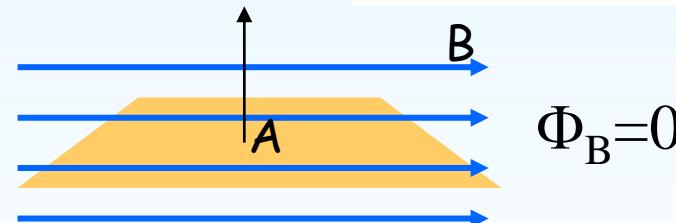
# Flujo magnético

- Análoga al flujo eléctrico
- El flujo magnético,  $\Phi_B = \int B \cdot dA$
- Para una superficie plana

$$\Phi_B = B A \cos \theta$$

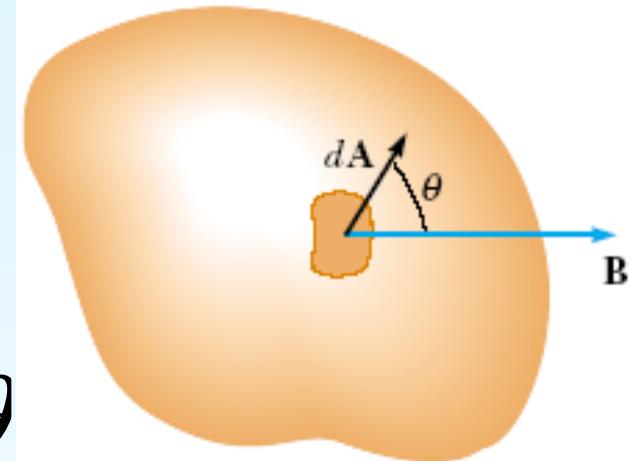


$$\Phi_B = BA$$



$$\Phi_B = 0$$

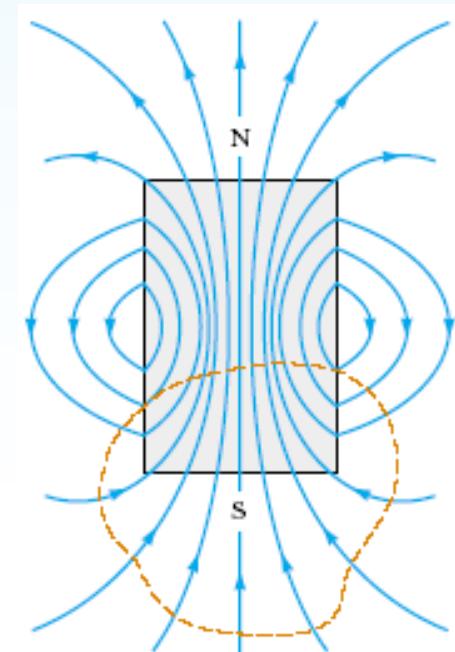
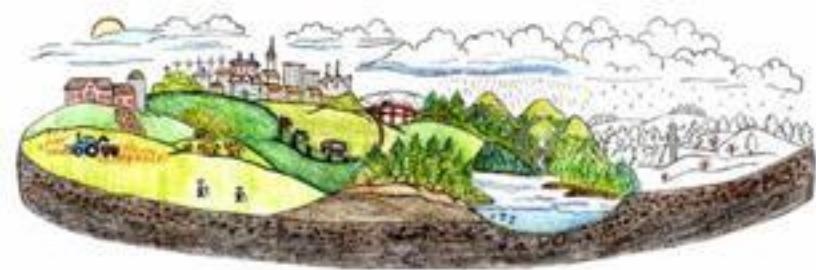
- Hincapié en la diferencia entre:
  - Densidades de flujo:  $E, B$ , radiación solar **aquí**
  - Flujos:  $\Phi_E, \Phi_B$ , radiación solar *total*



Vectores  
Escalares

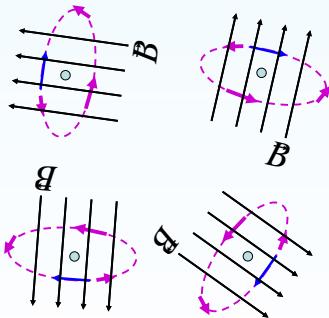
# Ley de Gauss en Magnetismo

- Características de los campos magnéticos
  - Continuos (no empiezan ni terminan en ningún punto)
  - Siempre forman lazos cerrados
- Para cualquier superficie cerrada:  
$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$
- Incluso si se trata de un imán
- Diferencia fundamental entre  $B$  y  $E$

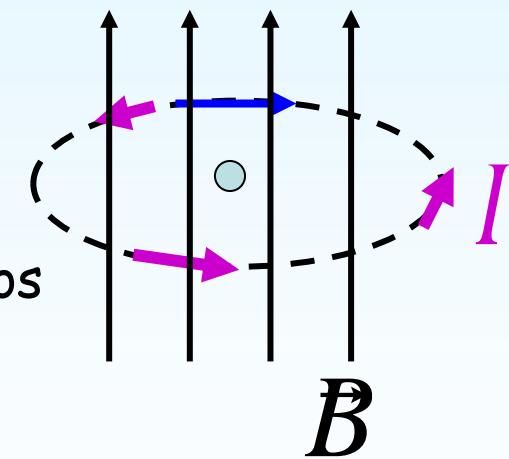


# El Magnetismo en la Materia

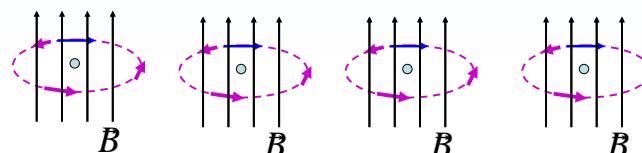
- Biot-Savart:  $\vec{B}$  debido a cualquier corriente  $I$
- Cada átomo tiene una corriente
  - Movimiento circular de un electrón (o más)
  - Carga negativa; corriente opuesta
- Cada átomo puede generar un campo  $\vec{B}$
- Dos tipos de materia



Materia no magnética



Materia magnética



# Magnetismo de un átomo por un electrón en órbita

- La corriente alrededor:

( $e$  = carga de un electrón)

$$I = \frac{e}{T} = \frac{ev}{2\pi}$$

- Momento magnético

$$\mu = IA = \left( \frac{ev}{2\pi} \right) \pi r^2 = \frac{1}{2} evr$$

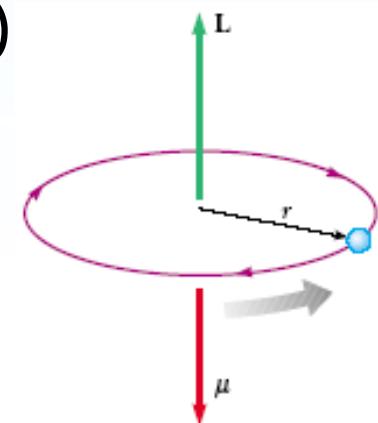
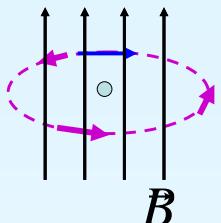
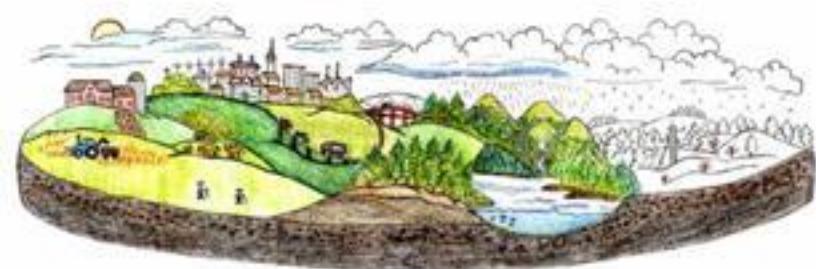
- Momento angular

( $m_e$  = masa de un electrón)

$$L = m_e v r \quad \mu = \frac{e}{2m_e} L$$

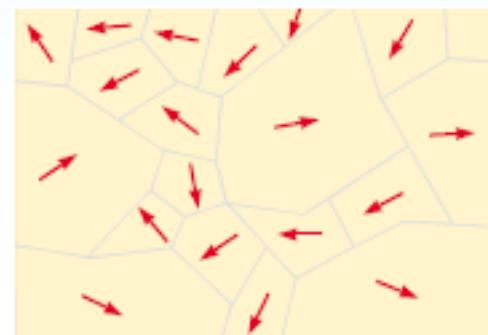
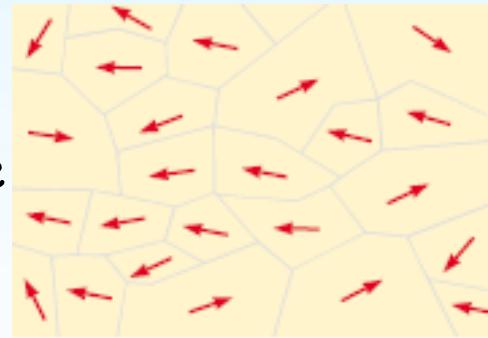
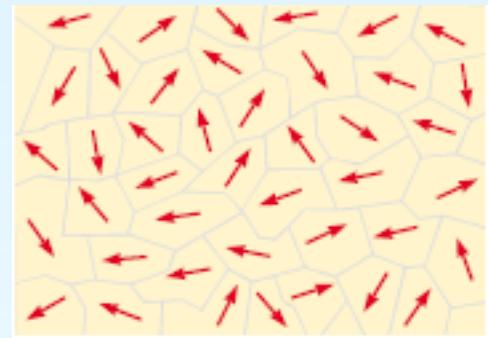
- Momento magnético de un electrón

- Magnitud: proporcional a su momento angular
- Dirección: opuesto al momento angular ( $e < 0$ )

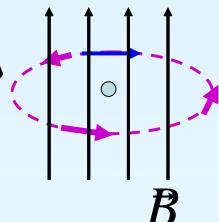


# Ferromagnetismo

- Materia ferromagnética
  - Contiene pequeños dominios con  $B$
  - Al principio el magnetismo *neto* puede ser 0
  - Al aplicar un campo externo  $B_0$ 
    - Los dominios orientados crecen en tamaño
    - La materia adquiere magnetismo
  - Conforme el campo externo  $B_0$  sea más fuerte
    - Los dominios no orientados se reducen tamaño
    - Al quitar el campo externo  $B_0$  ciertos dominios mantienen su orientación (y magnetismo)
- La materia adquiere magnetismo
  - Ahora: caracterización de los dominios



# Intensidad del campo magnético en una sustancia



- Ya que conocemos el momento magnético:
- Definimos el estado magnético de una sustancia
  - La magnetización:  $M = \frac{\mu}{V}$ 
    - Momento magnético por unidad de volumen
- El campo total magnético ( $B$ ) depende en
  - El campo externo aplicado,  $B_0$  y
  - La magnetización  $M$ , que aporta un factor  $B_m$ , donde

$$M = \frac{B_m}{\mu_0}$$

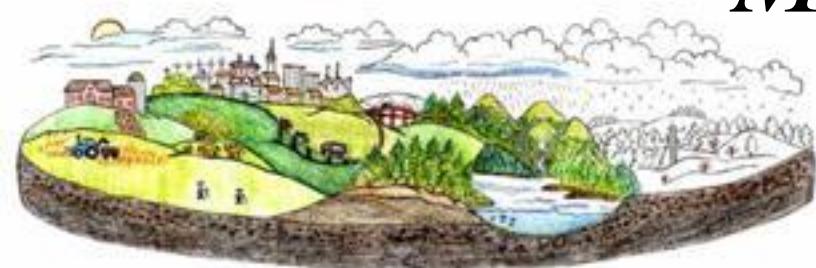
$$H = \frac{B_0}{\mu_0}$$

$$B = B_0 + \mu_0 M$$

$$B = \mu_0 (H + M)$$

intensidad del campo magnético

$\mu_0$  = permeabilidad del vacío

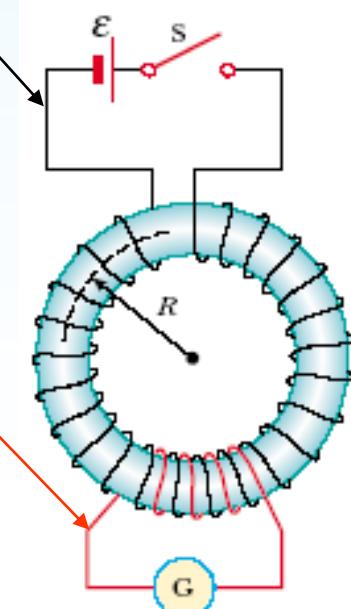


# Caracterización de una materia ferromagnética

- El anillo de Rowland

- Un torus ferromagnético
  - Lazos de corriente (alambres negros) en una espira primaria, producen el campo ~~externo~~
  - Magnetización de la materia ferromagnética ( $M$ )
  - Medir el campo en el torus
    - Espira secundaria (alambres rojos)
    - Galvanómetro ( $G$ ), para medir
    - Inducción magnética  $B = \mu_0(H+M)$

- Características de magnitud ( $B$ ) y inercia/resistencia a cambios

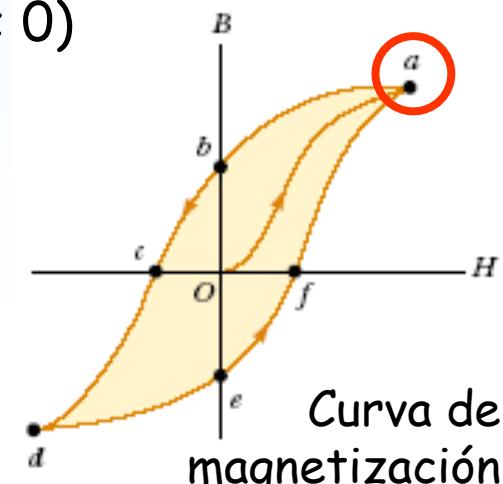
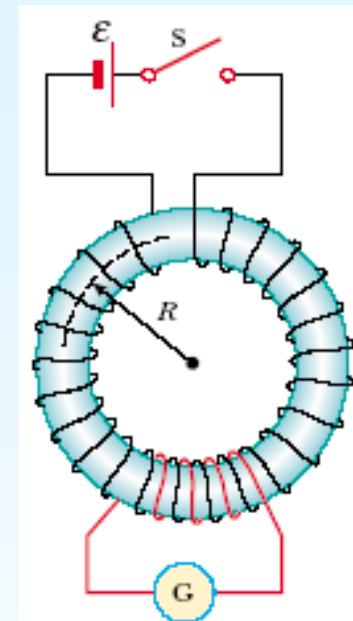


Asunto de la próxima lección

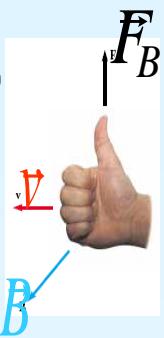
# Características de una materia ferromagnética

$$B = \mu_0(H+M)$$

- Empezar con materia no magnetizada ( $M=0$ )
- En el punto 0;  $I = 0$   $\rightarrow H=0$
- Punto a: subir corriente en espira primaria de 0 a  $I$ 
  - Intensidad magnética sube (linealmente):  $H=nI$
  - El campo  $B$  sube desde el punto 0 hasta el punto a
    - Todos los dominios orientados como puedan
    - El torus está en saturación
- Punto b: ahora la corriente  $I$  vuelve a 0  $H=0$   $B=M \neq 0$ 
  - La materia está magnetizada: *magnetización remanente*
- Punto c: corriente al revés en espira primaria ( $I < 0$ )
  - $M=-H \rightarrow B=0$
- Puntos d-e-f-a : etc. (histéresis magnética)
- La materia magnética "tiene memoria"

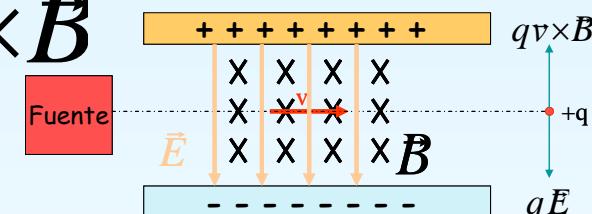


# Conceptos/Ecuaciones a Dominar



- Partícula con carga  $q$  y velocidad  $\mathbf{v}$ 
  - La regla de la mano derecha

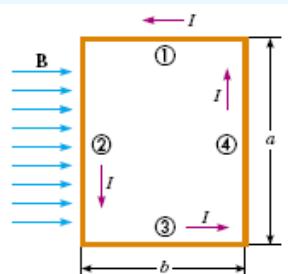
$$\mathbf{F}_B = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$



- Fuerza de Lorentz  $\mathbf{F} = q \mathbf{E} + q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$

- Momento en una espira  $\tau = I A l$

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds \times \hat{r}}{r^2}$$



$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$$

$$B = \mu_0 n I$$

- Ley de Biot-Savart

- Para un alambre entero

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

- Ley de Ampere

- Campo Magnético en un solenoide

- Flujo Magnético

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

- Ley de Gauss

$$\int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

- Momento magnético

$$\mu = IA$$

- Intensidad y magnetización

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$



fin

