

# Campo magnético

Generación y medición.

Estudio del campo magnético  
generado por un imán y por un  
solenoides.

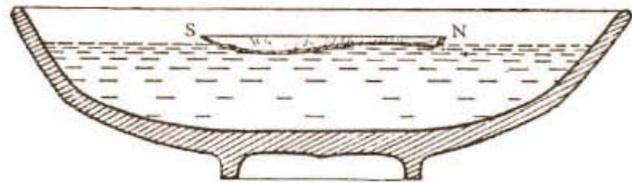
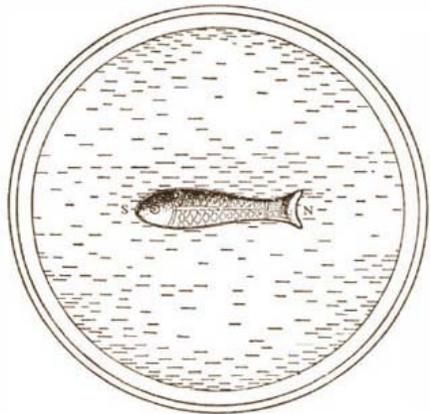


LABORATORIO 3  
1er cuatrimestre 2022

# Campo Magnético

Fenómenos magnéticos → 2600 años  
Magnesia del Meandro → Magnetita  
(imán permanente natural)

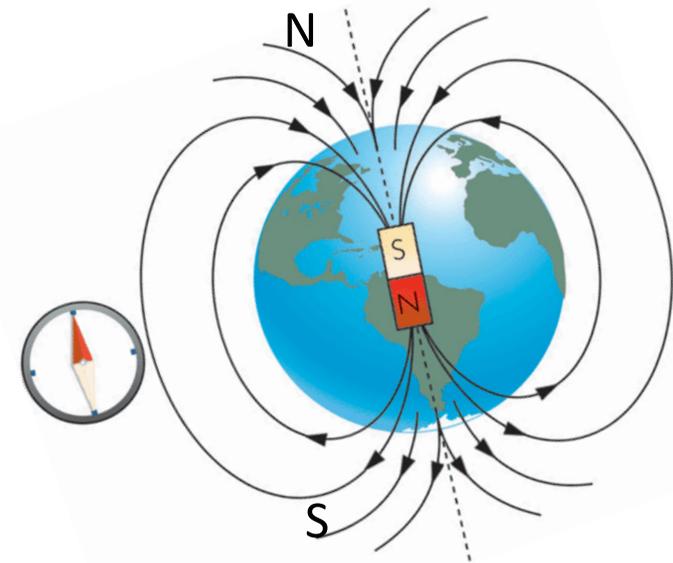
Brújula → China 1000 DC → Europa 1200 DC



Brújula de agua



Brújula seca  
1300

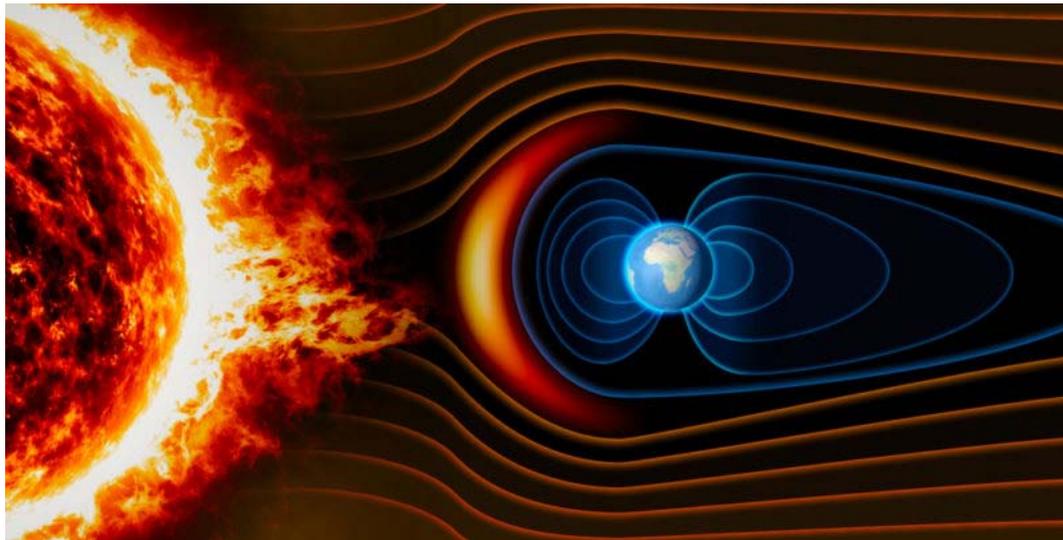
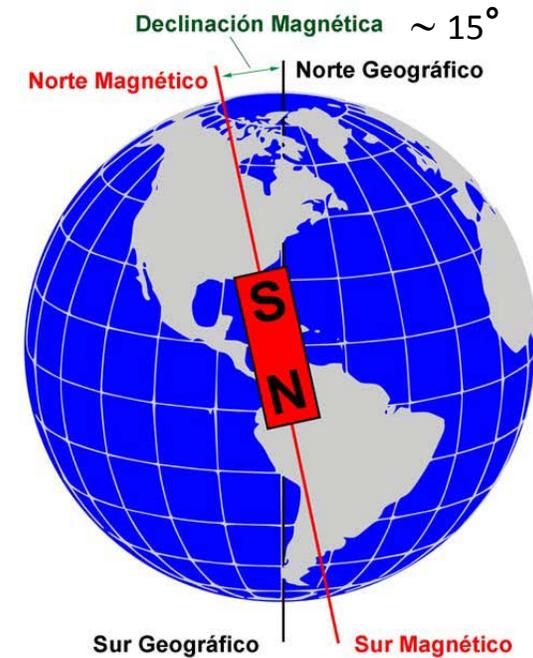


La Tierra se comporta como un imán  
1600 – William Gilbert

# Campo Magnético terrestre

- 25 a 65  $\mu\text{T}$
- Más fuerte en los polos
- Más débil en el ecuador

Unidades: 1 Tesla [T] = 10 000 Gauss [G]



Protege a la Tierra del viento solar



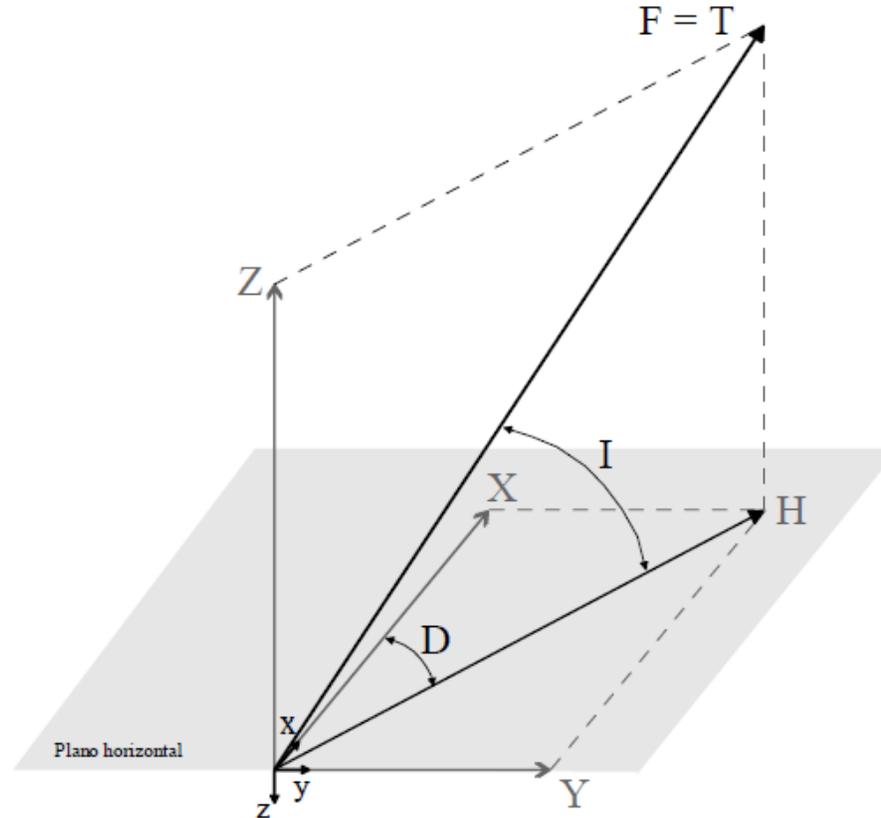
Aurora Boreal o Austral

# Campo magnético terrestre

## Representación del campo en coordenadas cartesianas

X= Norte geográfico  
 Y= Este geográfico  
 Z= + hacia el centro de la Tierra

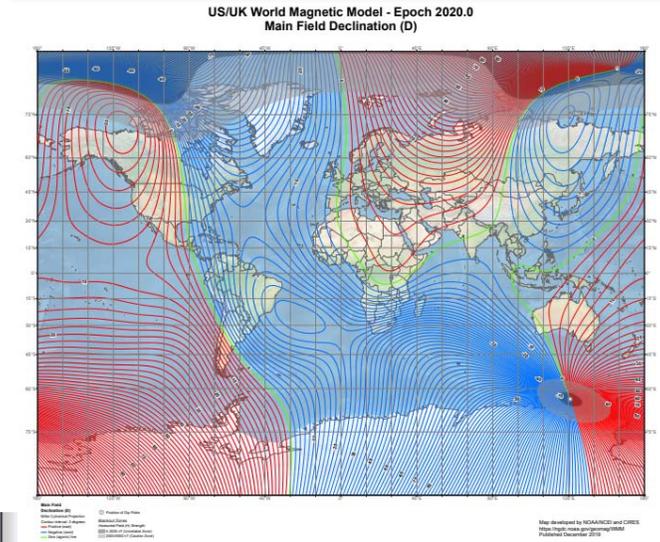
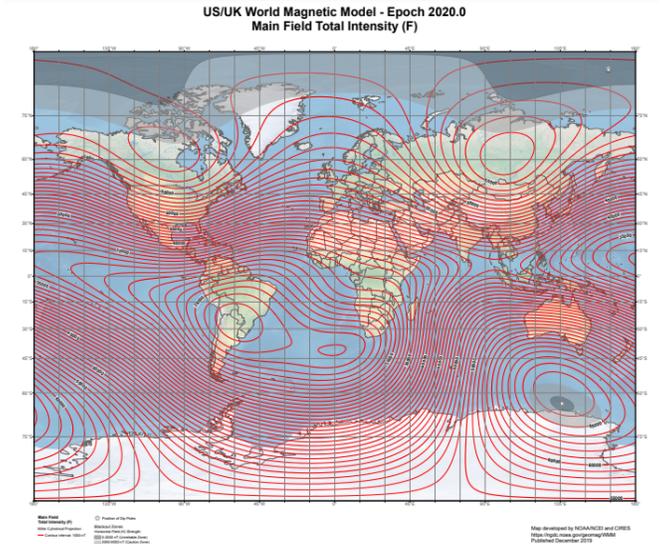
H= Componente horizontal /  
 Norte magnético  
 F = Intensidad total  
 I = Inclinación /- en  
 hemisferio Sur  
 D = Declinación / + hacia el  
 Este



Buenos Aires:

Date	Declination ( + E   - W )	Inclination ( + D   - U )	Horizontal Intensity	North Comp ( + N   - S )	East Comp ( + E   - W )	Vertical Comp ( + D   - U )	Total Field
2022-04-25	-9° 40' 13"	-40° 37' 23"	17,223.2 nT	16,978.5 nT	-2,893.1 nT	-14,774.1 nT	22,691.7 nT
<b>Change/year</b>	-0° 9' 41"/yr	-0° 13' 38"/yr	-82.2 nT/yr	-89.2 nT/yr	-34.0 nT/yr	-48.1 nT/yr	-31.1 nT/yr
<b>Uncertainty</b>	0° 25'	0° 13'	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>

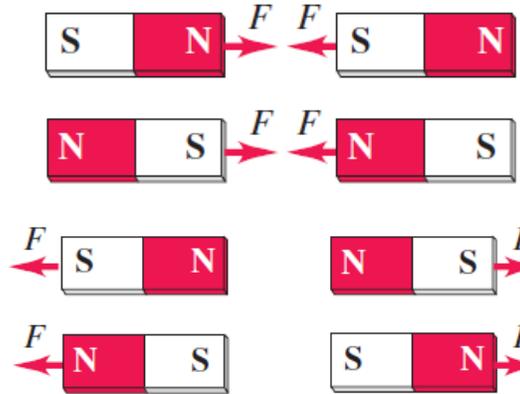


Isógonas – pto de igual D  
 Isóclinas – pto de igual I

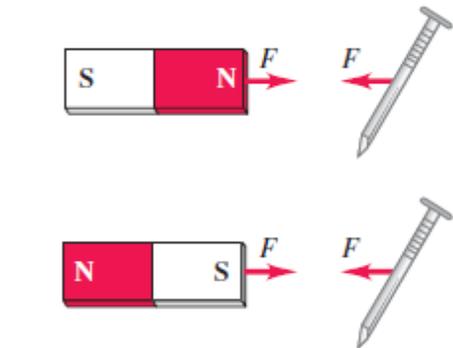
I=0 Ecuador magnético

# Campo Magnético

## Imanes Permanentes Gilbert 1600



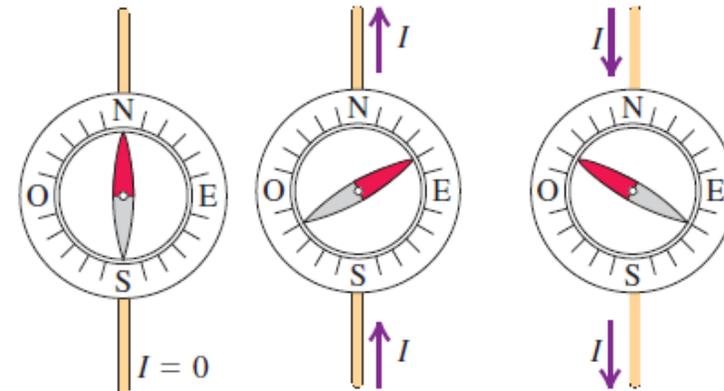
Fuerzas entre sí



Atracción de fragmentos de  
hierro no magnetizados

## Experimento de Oersted 1819

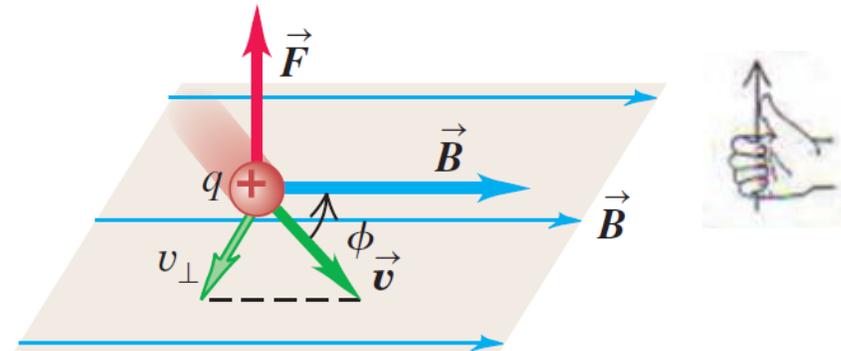
Cuando por un cable circula corriente, genera un campo magnético que modifica la dirección de la brújula



# Fuerza magnética – Lorentz 1880

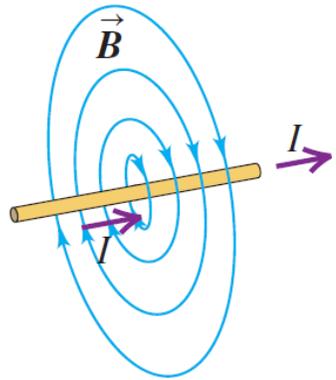
- Una carga en movimiento o corriente genera un campo magnético en el espacio circundante (además de su campo eléctrico)
- El campo magnético ejerce una fuerza  $F$  sobre cualquier otra carga en movimiento o corriente presente en el campo

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

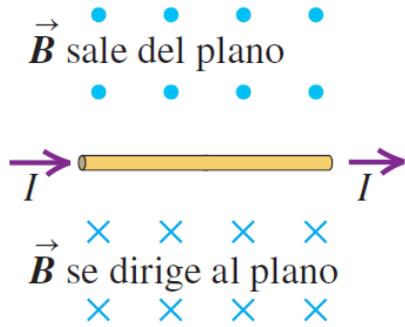


Fuerza sobre una carga en movimiento

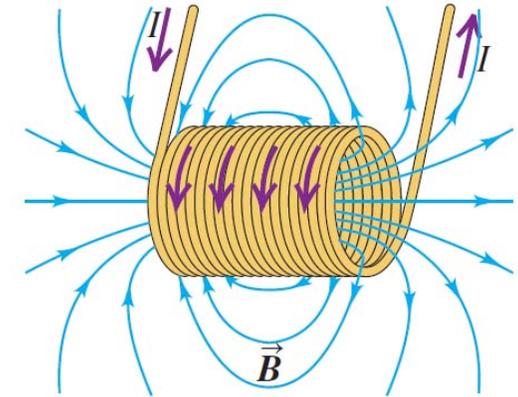
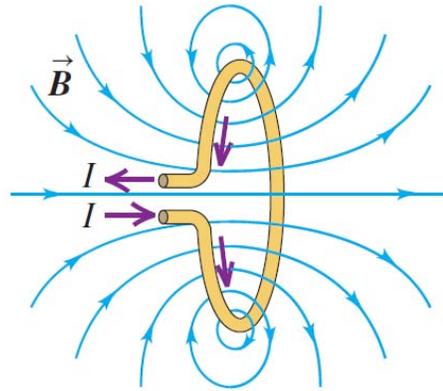
# Generación de campos magnéticos



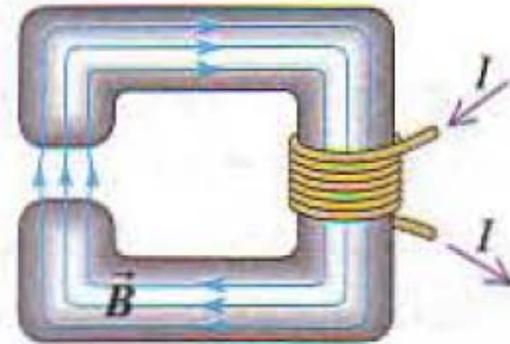
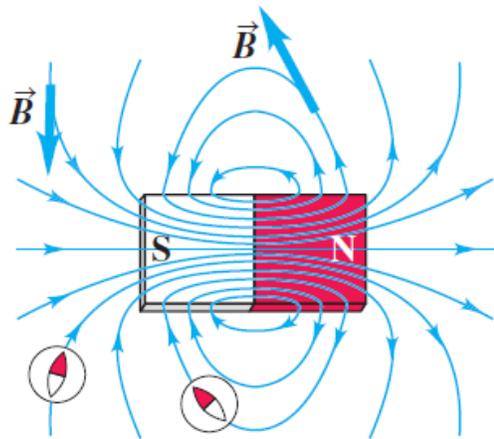
Vista en perspectiva



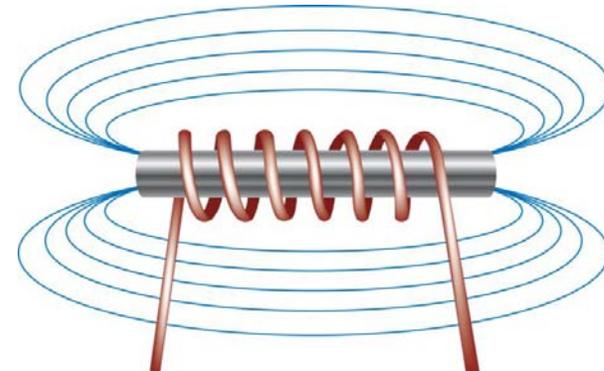
El alambre está en el plano del papel



## En medios materiales



Electroimán



# Materiales Ferromagnéticos: Hierro, Níquel, Cobalto

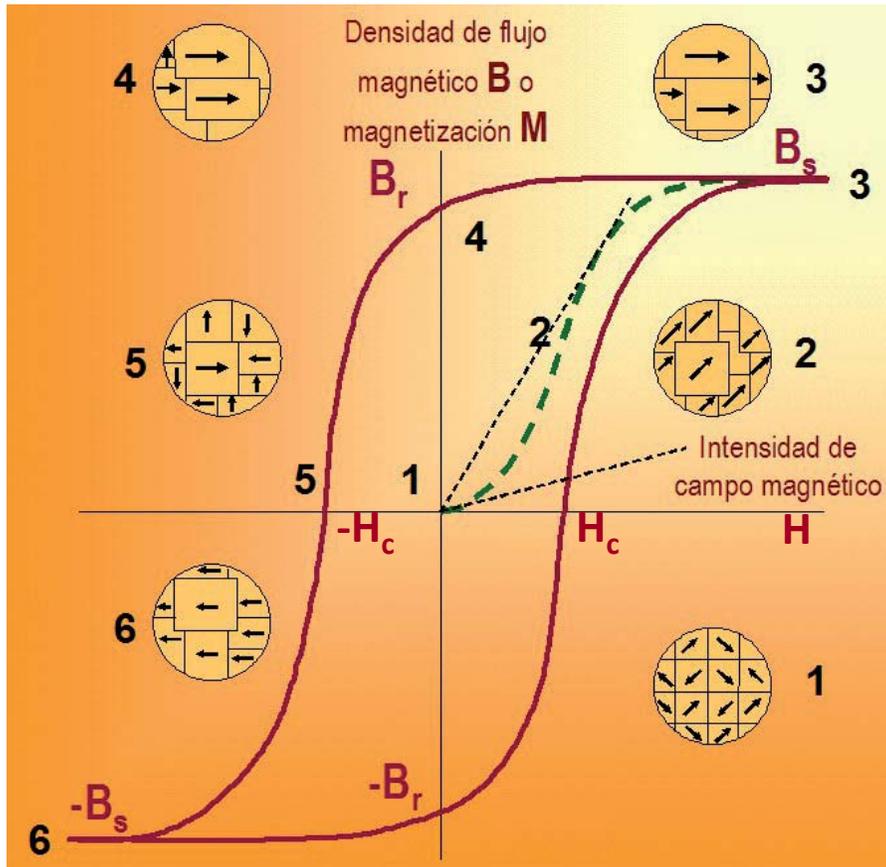
Aumento del tamaño de dominios magnéticos orientados en la dirección de H



Orientación de los dominios magnéticos



Persisten aun en ausencia de campos externos



Relación entre  $\vec{B}$  (o  $\vec{M}$ ) y  $\vec{H}$  depende de la historia del material



**Histéresis**

Campo magnético en MKS

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

$$[B] = T$$

$$[H] = A/m$$

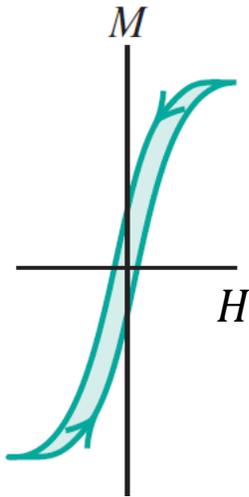
$$[M] = A/m$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

# Materiales Ferromagnéticos: Histéresis

Hierro Dulce poca histéresis

$$B \approx \mu H$$



$$H_C \sim 2400 \text{ A/m}$$

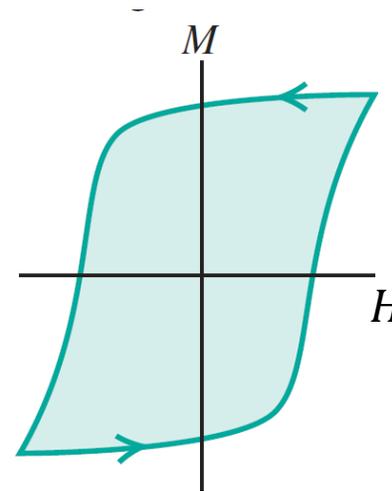
$$B_S > 0.4 \text{ T}$$

electroimanes

núcleos de transformadores

Alnico (Cobalto, aluminio y níquel)

Gran Campo magnético residual



$$H_C \sim 10^6 \text{ A/m}$$

$$B_S > 0.4 \text{ T}$$

Imanes permanentes

# Generación de campos magnéticos

## Fuente de B

Campo magnético terrestre

Campo magnético de un imán de heladera

Imanes de laboratorio

Solenoides en aire

Electroimanes industriales

Campos magnéticos generados por superconductores en laboratorios

Campos magnéticos usados para resonancias en Institutos médicos

## Valor de campo [T]

$5 \times 10^{-5}$

$5 \times 10^{-3}$

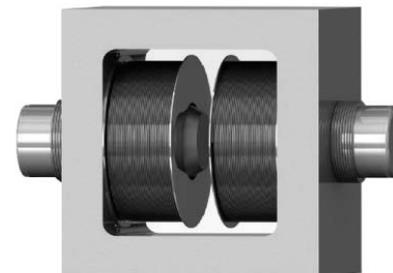
0.01 a 1

0.0001 a 0.01

2

18

1.5 a 3

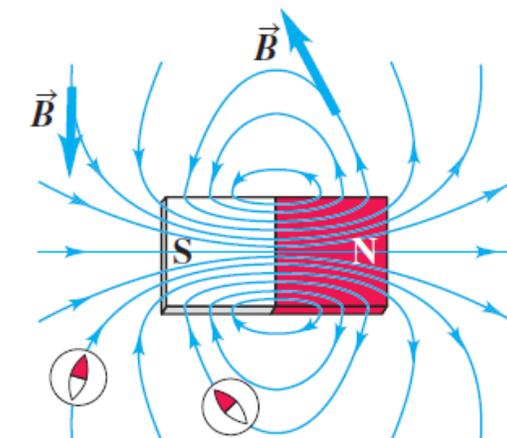
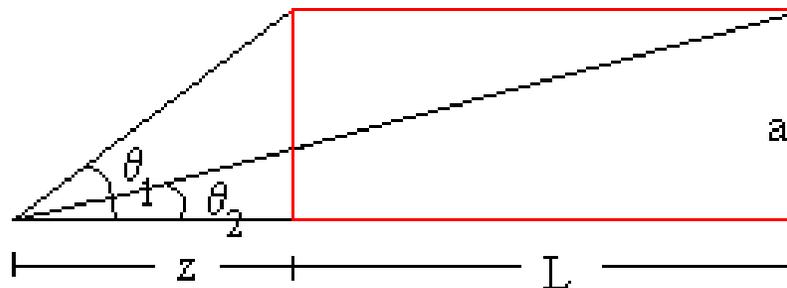


# Campo magnético en el eje de un imán

Radio  $a$  y largo  $L$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \hat{z}$$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} \left( \frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right) \hat{z}$$



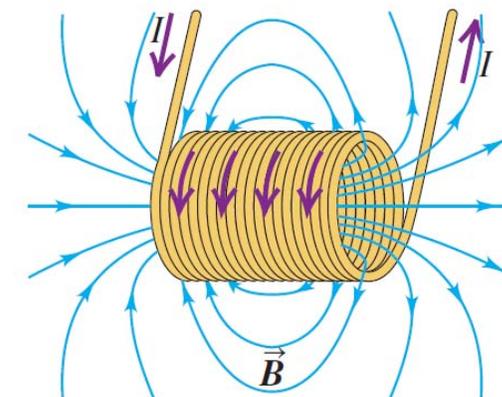
$$\vec{B}_s(z) = \frac{\mu_0 \cdot M}{2} \left( \frac{L}{\sqrt{L^2 + a^2}} \right) \hat{z} \quad z = 0 \quad (\text{en la superficie})$$

Si  $L \gg a$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot a^2}{4} \left( \frac{1}{z^2} - \frac{1}{(z+L)^2} \right) \hat{z}$$

Si  $z \gg L$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 \cdot M \cdot a^2 \cdot L}{2} \cdot \frac{1}{z^3} \hat{z}$$



Dipolo magnético de momento dipolar  $m$  obtenemos la misma expresión reemplazando

$$M = \frac{m}{\pi \cdot a^2 \cdot L}$$

Solenoides con corriente  $I$  y densidad de espiras  $n$  obtenemos la misma expresión reemplazando

$$M = I \cdot n$$

# Campo magnético en el eje de un solenoide

Radio  $a$  y largo  $L$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \hat{z}$$

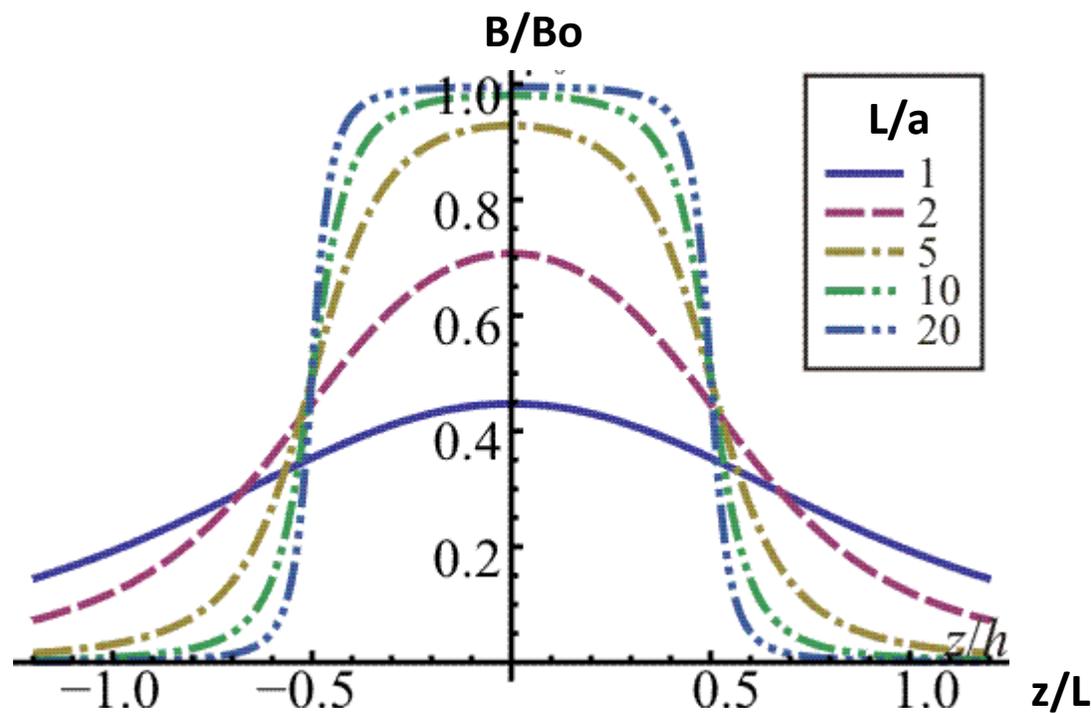
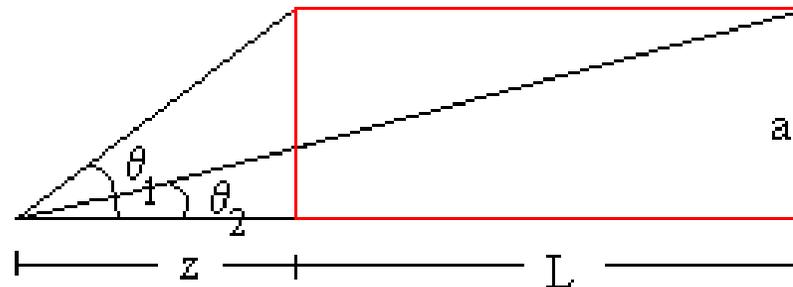
$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I}{2} \left( \frac{z+L}{\sqrt{(z+L)^2 + a^2}} - \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \right) \hat{z}$$

Si  $z \gg L, a$

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0 n I a^2 L}{2} \frac{1}{z^3} \hat{z}$$

Solenoide infinito:  $\theta_1 = \pi, \theta_2 = 0$

$$B_0 = \mu_0 n I$$

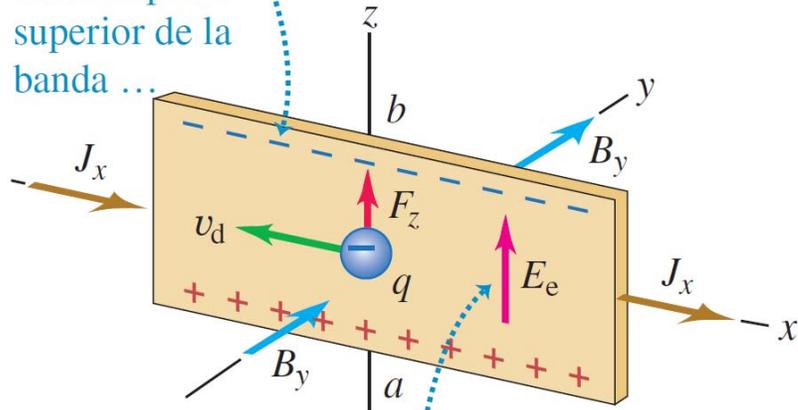


Si  $L \gg a$ ,  
en la zona  
central vale la  
aproximación de  
solenoide  
infinito

# Efecto Hall

## Conducción de electrones

Los portadores de carga son empujados hacia la parte superior de la banda ...



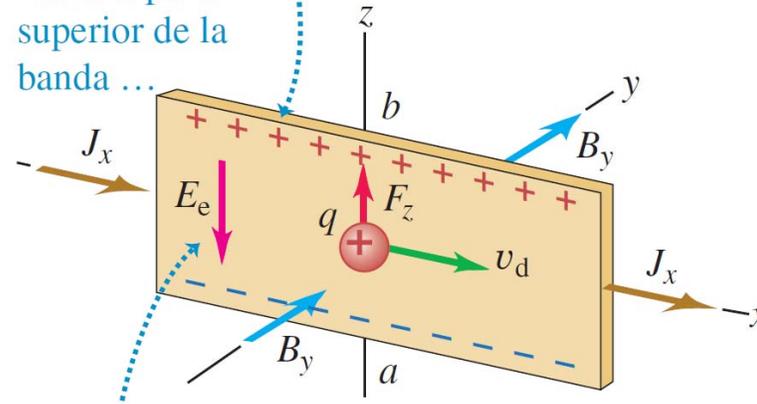
... por lo que el punto *a* tiene un potencial mayor que el punto *b*.

Acumulación de carga

$$J_x = n \cdot q \cdot v_d$$

## Conducción de Huecos

Los portadores de carga otra vez son empujados hacia la parte superior de la banda ...



... de modo que la polaridad de la diferencia de potencial es opuesta a la de los portadores de carga negativa.

Generación de campo eléctrico  
Que contrarrestara a  $F_z$

$$\text{Equilibrio: } q \cdot E_z + q \cdot v_d \cdot B_y = 0$$

$q$ : Carga electrón  
 $n$ : Concentración de cargas

Fuerza magnética siempre hacia arriba

$$F_z = |q|v_d B$$

Diferencia de potencial  
Voltaje de Hall

$$B_y = \frac{-E_z \cdot n \cdot q}{J_x}$$

# Sonda Hall

- Aprovecha el efecto Hall para medir el campo magnético
- Dada una corriente fija, esta tensión resulta proporcional a la componente normal del campo magnético.



$$V(B_{\perp}) = V_0 + ASB_{\perp}$$

- $S$ : Sensibilidad (en mV/T)
- $A$ : Ganancia del amplificador
- $V_0$ : Offset

# Medición del campo magnético

-Magnetic Field Sensor – Vernier  
(Hoja de datos en la página de la materia)

12-bit resolution	$\pm 0.32 \text{ mT}$ range: 0.0002 mT $\pm 6.4 \text{ mT}$ range: 0.004 mT
-------------------	--

Rango:  $\pm 0,32 \text{ mT}$   
 $\pm 6,4 \text{ mT}$

-Adquisición con DAQ  
(Conversor analógico digital de 12 bits)

-Software: SensorDAQ

Permite variar:

- Tiempo de medición
- Frecuencia de adquisición (Max 10 kHz)

Al medir señales con valor “constante” se puede hacer un análisis estadístico

# Actividades propuestas

- Medir el campo magnético terrestre.

Calibrar y chequear el funcionamiento de la sonda Hall.

¿Es apropiada esta calibración para medir el campo generado por el imán y/o por el solenoide?

- Medir el campo magnético generado por un imán cilíndrico en el eje del imán.

- Medir el campo magnético generado por un solenoide en el eje del solenoide.

Proponer modelos para ajustar los resultados.

¿Qué magnitudes conviene graficar?

¿Depende del rango de posiciones estudiadas?