

Electromagnetismo Aplicado:

I. Principios de Teoría Electromagnética y Propiedades de Medios Materiales

F.P. Mena

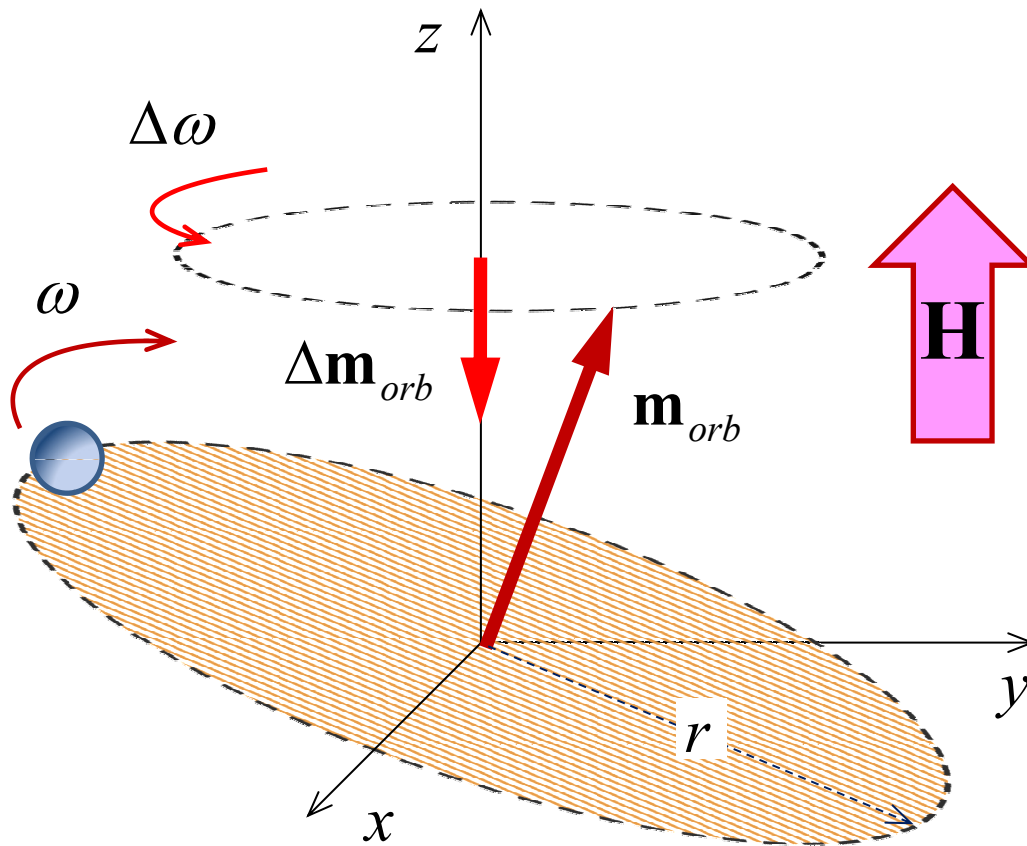
Primavera 2011

I. Teoría E.M. y Materiales

- Ecuaciones de Maxwell
- Materiales
 - Conductores
 - Dieléctricos
 - Materiales magnéticos.
- Condiciones de frontera
- Funciones de potenciales
- Ecuaciones diferenciales para potenciales.

Diamagnetismo

- Descripción micro



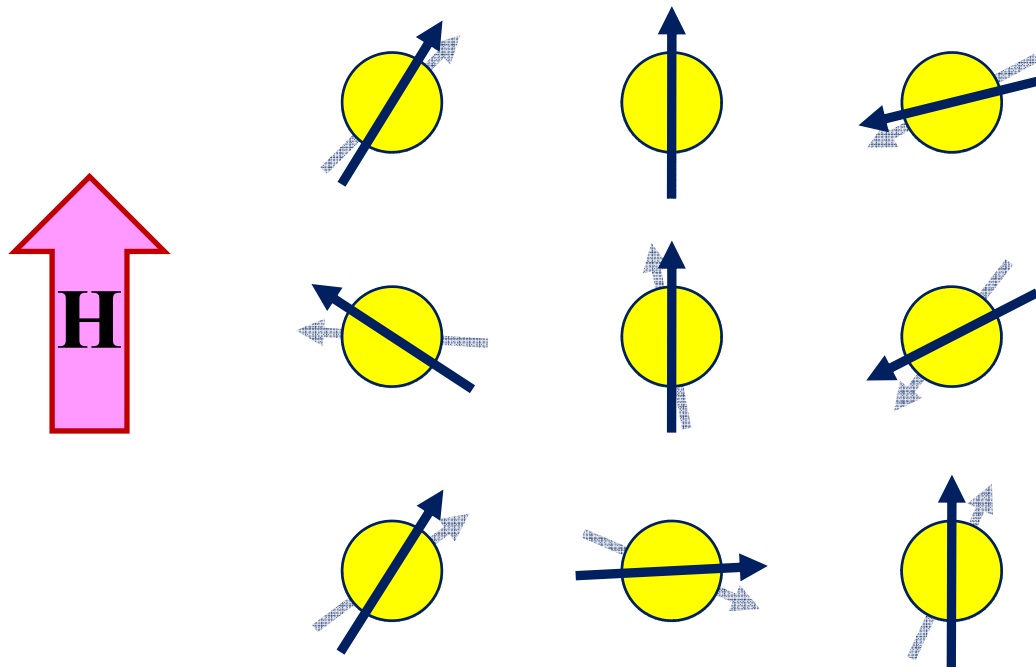
Precesión de la órbita
en un campo
magnético externo.

Contribución pequeña
a la magnetización.

Susceptibilidad
negativa.

Paramagnetismo

- Descripción micro



Orientación del momento atómico magnético en un campo externo.

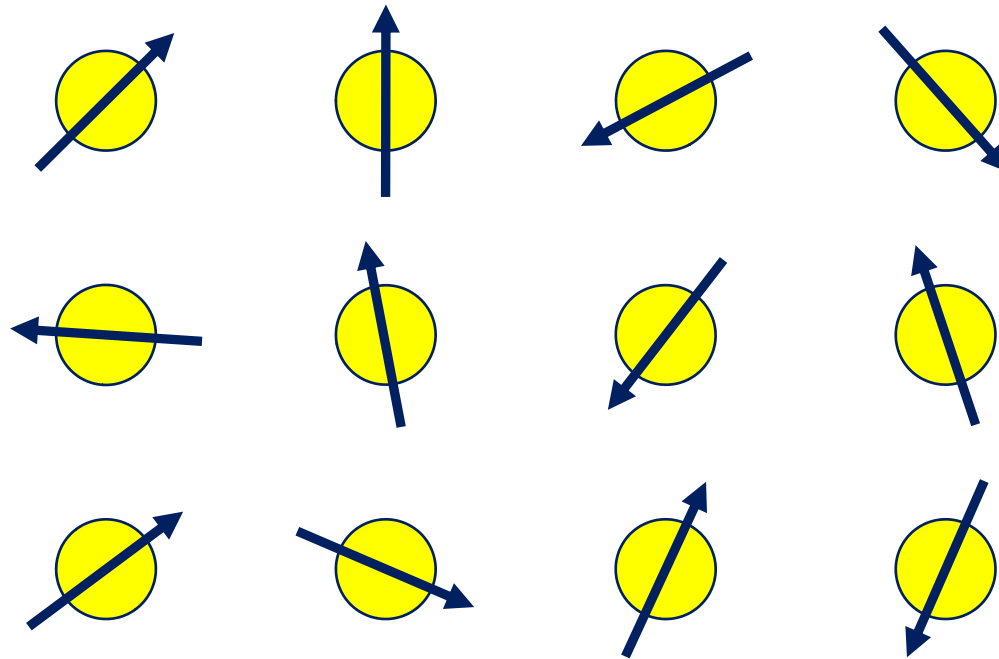
Contribución pequeña a la magnetización.

Susceptibilidad positiva.

Ferromagnetismo

- Descripción micro

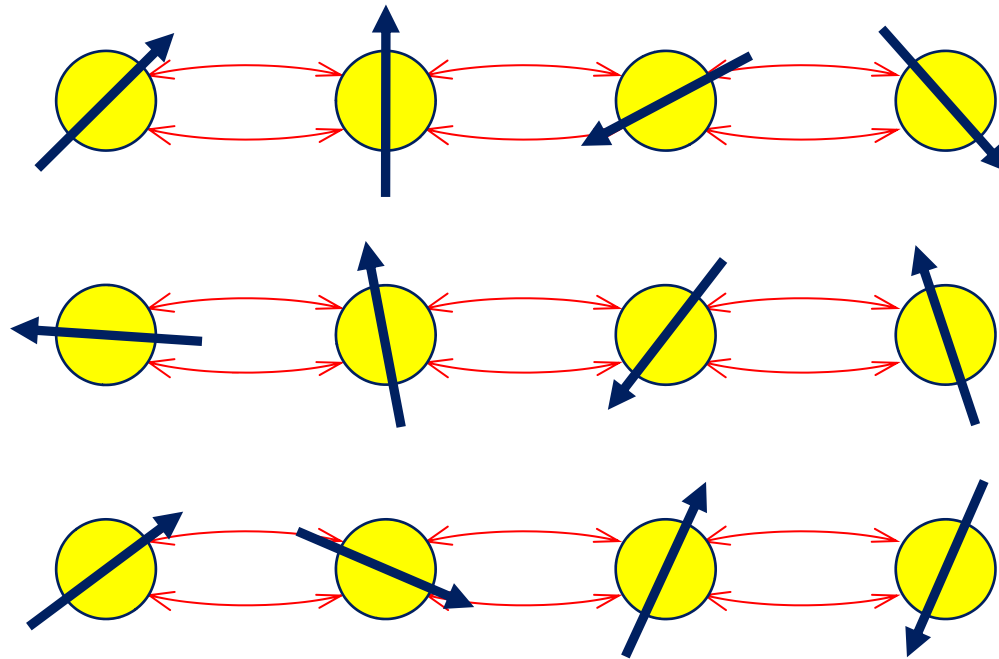
$T > T_C$: No hay interacciones espín-espín



Ferromagnetismo

- Descripción micro

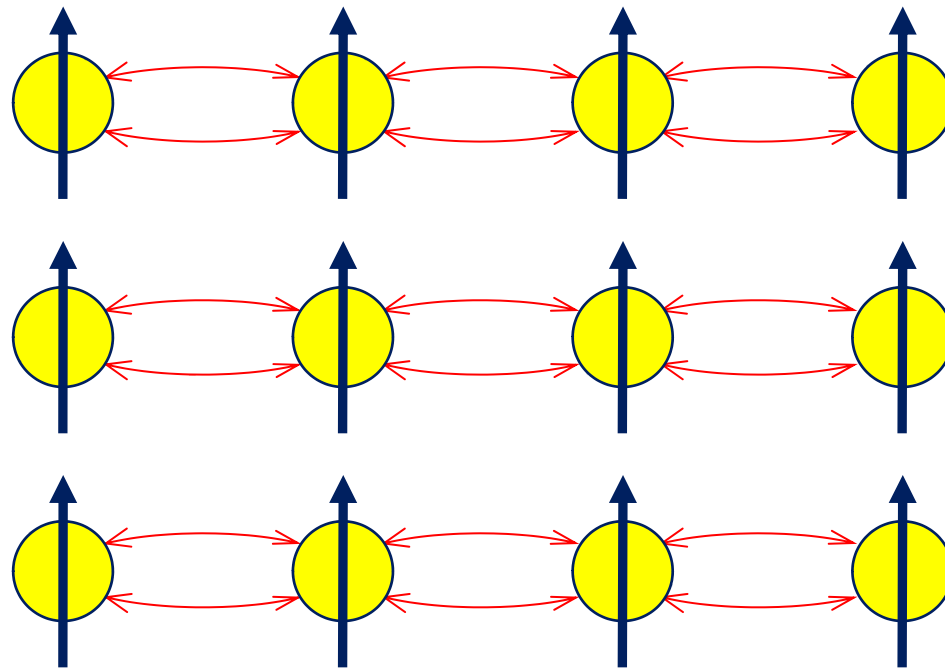
$T = T_C$: Aparecen interacciones espín-espín



Ferromagnetismo

- Descripción micro

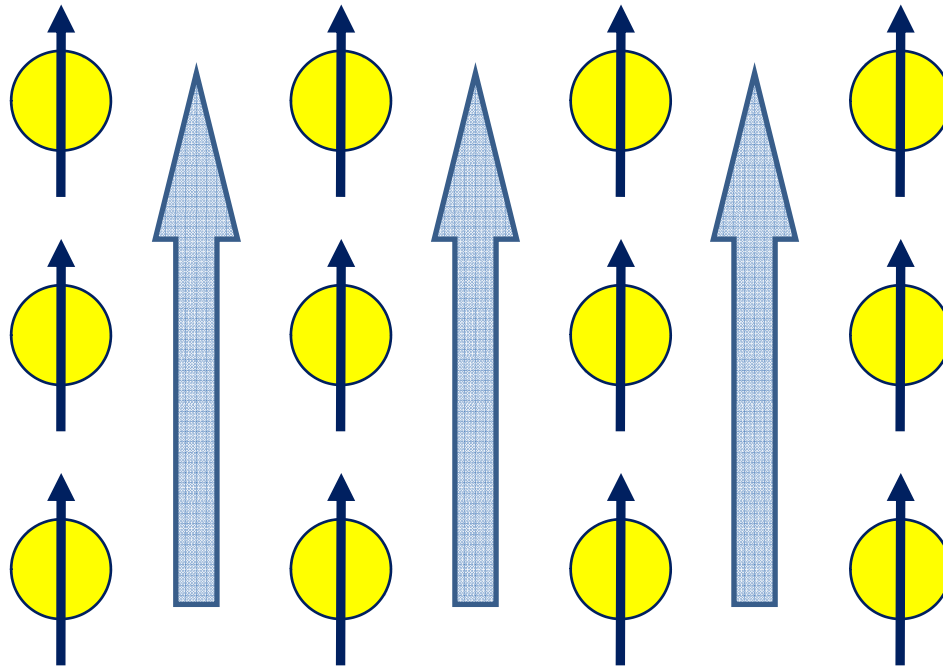
$T < T_C$: Interacciones espín-espín



Ferromagnetismo

- Descripción micro

Interacciones espín-espín \Leftrightarrow Campo medio



Ferromagnetismo


- Descripción micro

Interacciones espín-espín \Leftrightarrow Campo medio

$$H_{loc} = H + H_{mean}$$

NOTA: Esto es parecido al campo local visto en dieléctricos

$$E_{loc} = E + \frac{P}{3\epsilon_0}$$


$$H_{loc} = H + w \frac{M}{\mu_0}$$

Ferromagnetismo

- Descripción micro
 - Igual que paramagnetismo:

$$H \rightarrow H_{loc} = H + w \frac{M}{\mu_0} \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} M = Nm L(\beta) \\ \beta = \frac{\mu_0 m \left(H + w \frac{M}{\mu_0} \right)}{kT} \end{array} \right.$$

Para una temperatura dada, curvas M - H pueden ser extraídas de estas ecuaciones si m y w se conocen.

Ferromagnetismo

- Descripción micro
 - Igual que paramagnetismo:

$$H \rightarrow H_{loc} = H + w \frac{M}{\mu_0} \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} M(\beta) = Nm L(\beta) \\ M(\beta) = \frac{kT}{wm} \beta - \frac{\mu_0 H}{w} \end{array} \right.$$

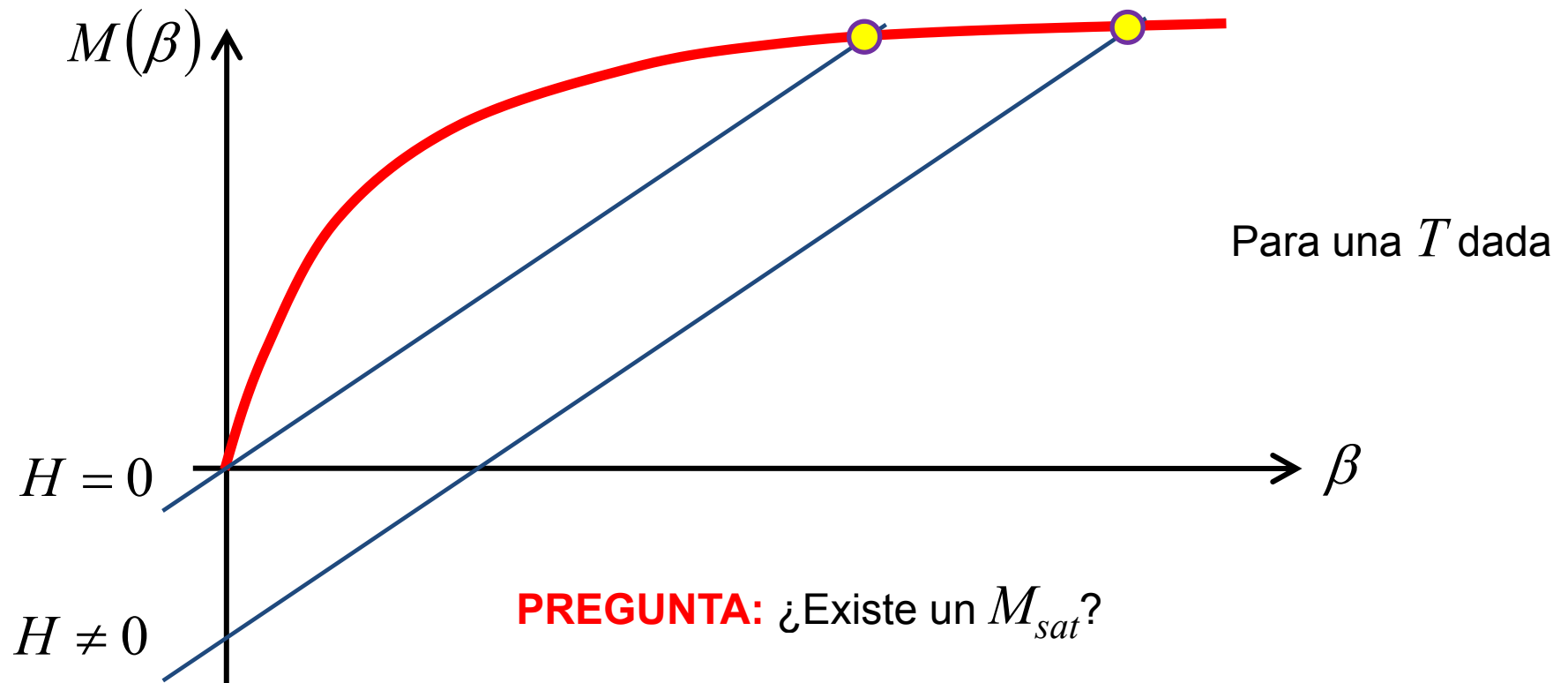
Para una temperatura dada, curvas M - H pueden ser extraídas de estas ecuaciones si m y w se conocen.

Ferromagnetismo

- Descripción micro

$$M(\beta) = Nm L(\beta)$$

$$M(\beta) = \frac{kT}{wm} \beta - \frac{\mu_0 H}{w}$$

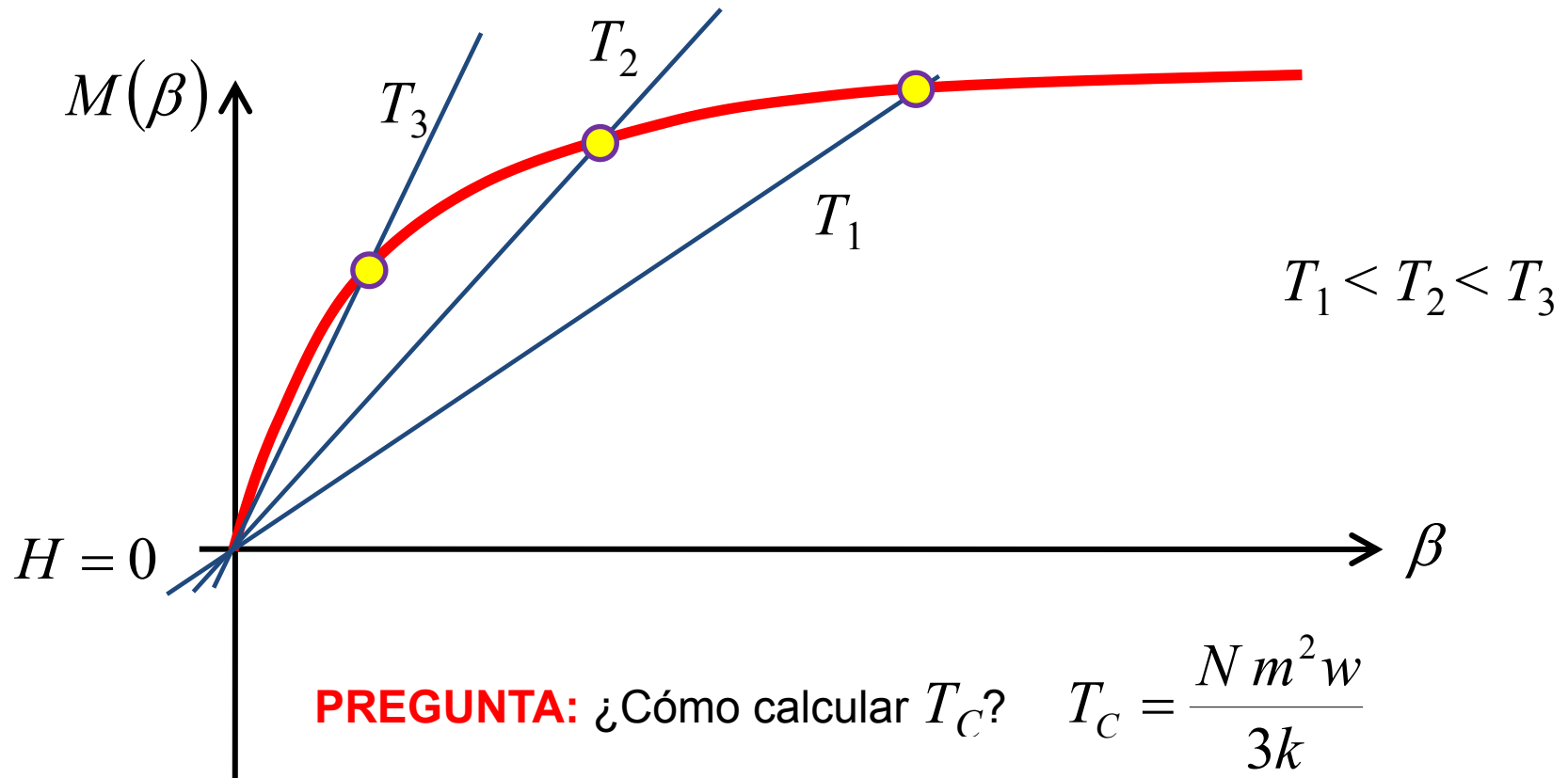


Ferromagnetismo

- Descripción micro

$$M(\beta) = Nm L(\beta)$$

$$M(\beta) = \frac{kT}{wm} \beta - \frac{\mu_0 H}{w}$$



Ferromagnetismo

- Descripción micro

- A temperaturas altas y $T > T_C$ (solución solo para $H \neq 0$):

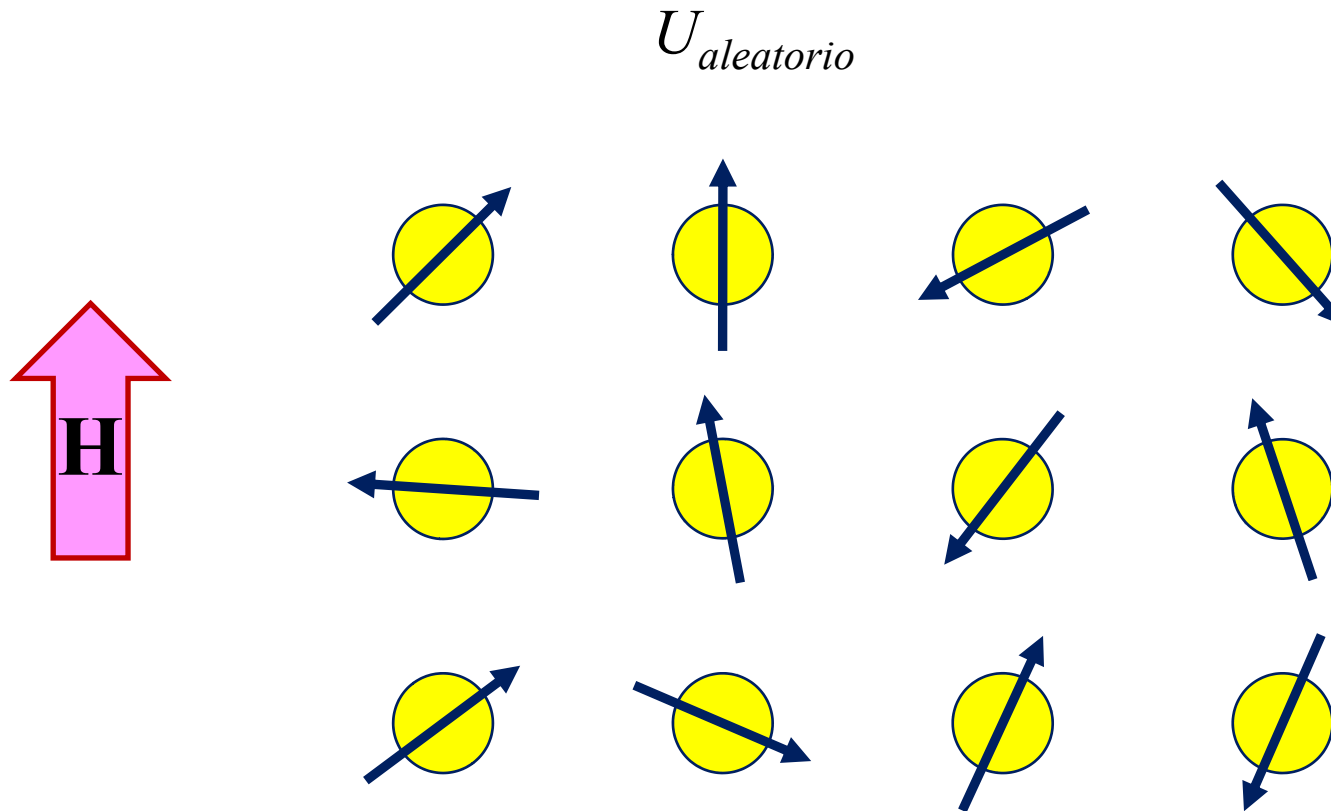
$$\left. \begin{aligned} M(\beta) &= Nm L(\beta) = Nm \beta/3 \\ M(\beta) &= \frac{kT}{wm} \beta - \frac{\mu_0 H}{w} \end{aligned} \right\} M = \frac{kT}{wm} \frac{3M}{Nm} - \frac{\mu_0 H}{w}$$

$$T_C = \frac{N m^2 w}{3k} \quad \Rightarrow \quad \chi_{ferro} = \frac{M}{H} = \frac{\text{const}}{T - T_C}$$

Ley de Curie-Weiss

Ferromagnetismo

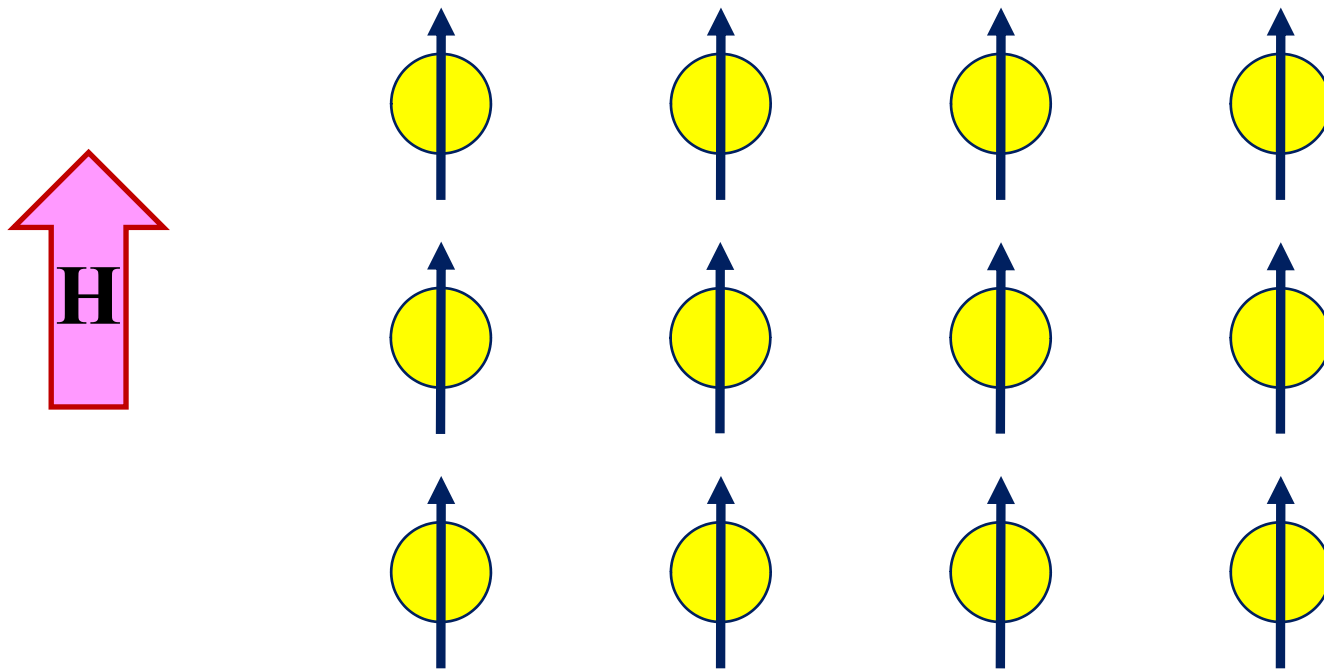
- Ejes preferenciales en materiales cristalinos



Ferromagnetismo

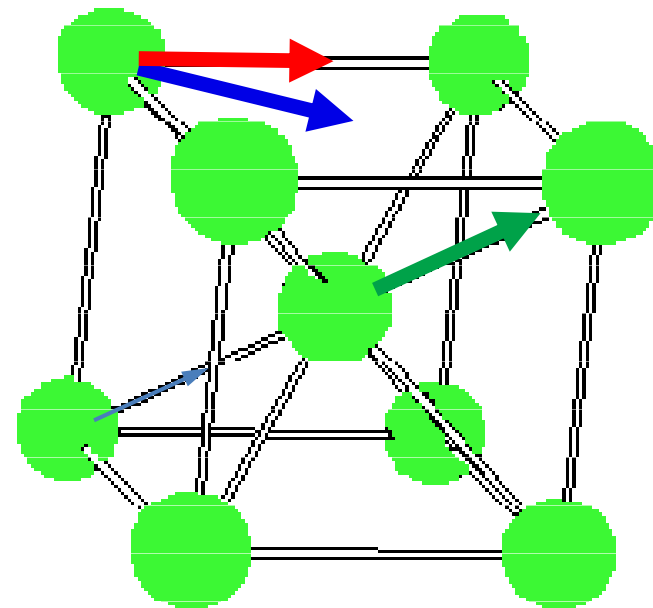
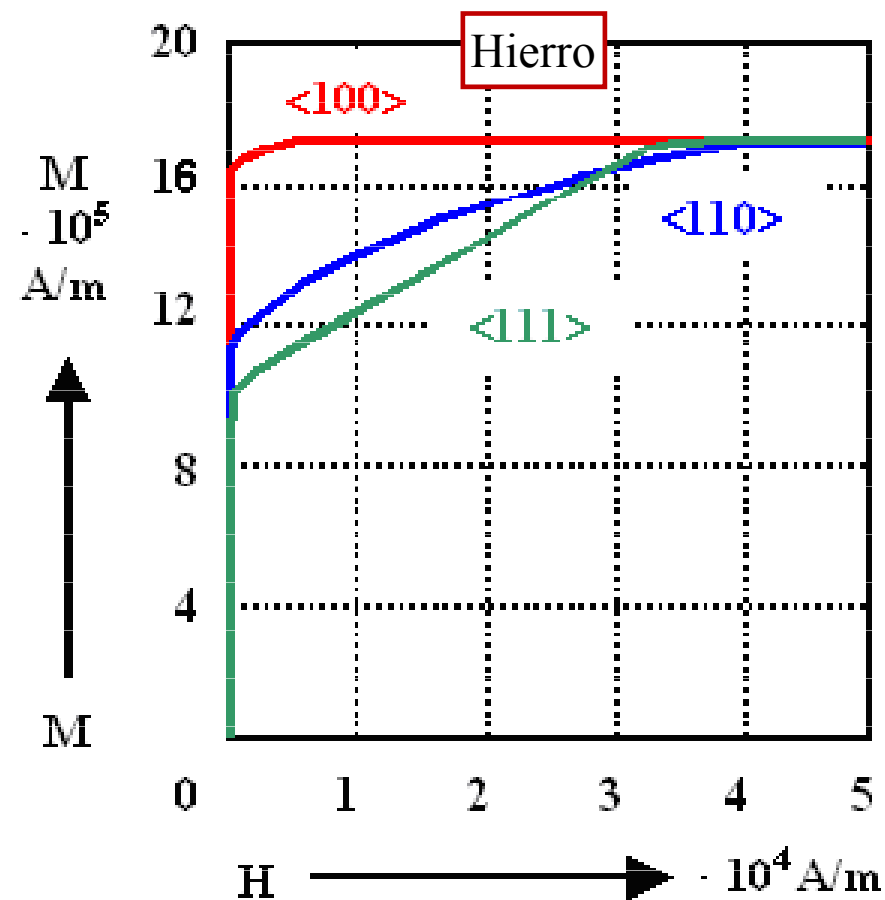
- Ejes preferenciales en materiales cristalinos

$$U_{alineado} = U_{aleatorio} - W_{alineado}$$



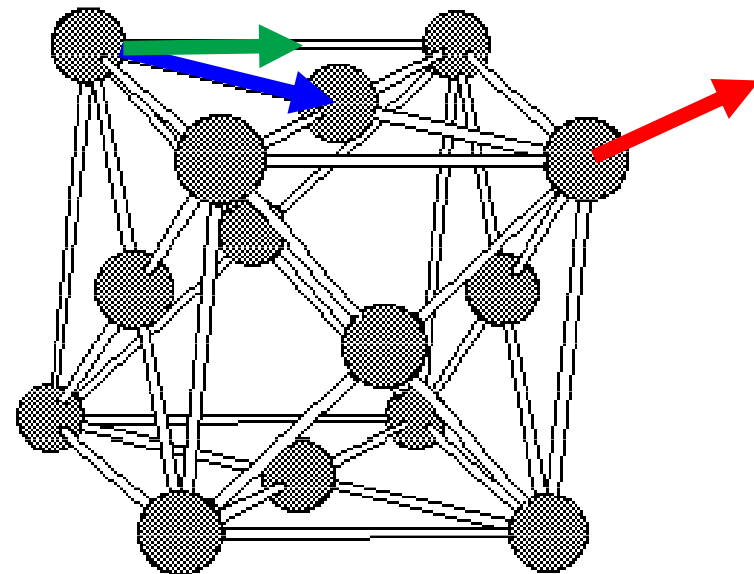
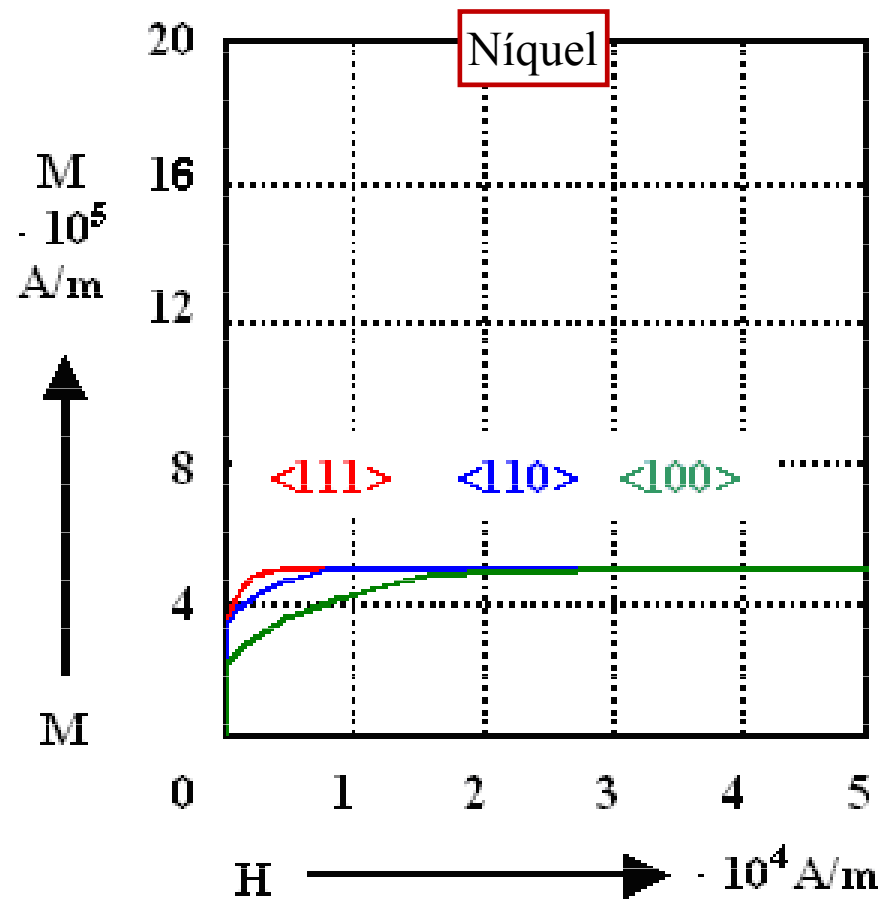
Ferromagnetismo

- Ejes preferenciales en materiales cristalinos



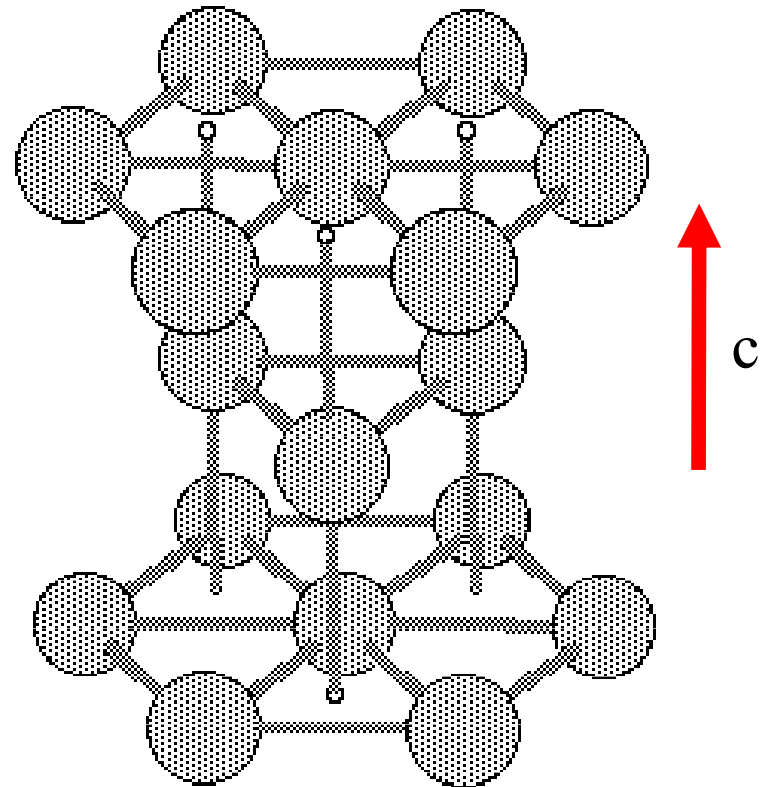
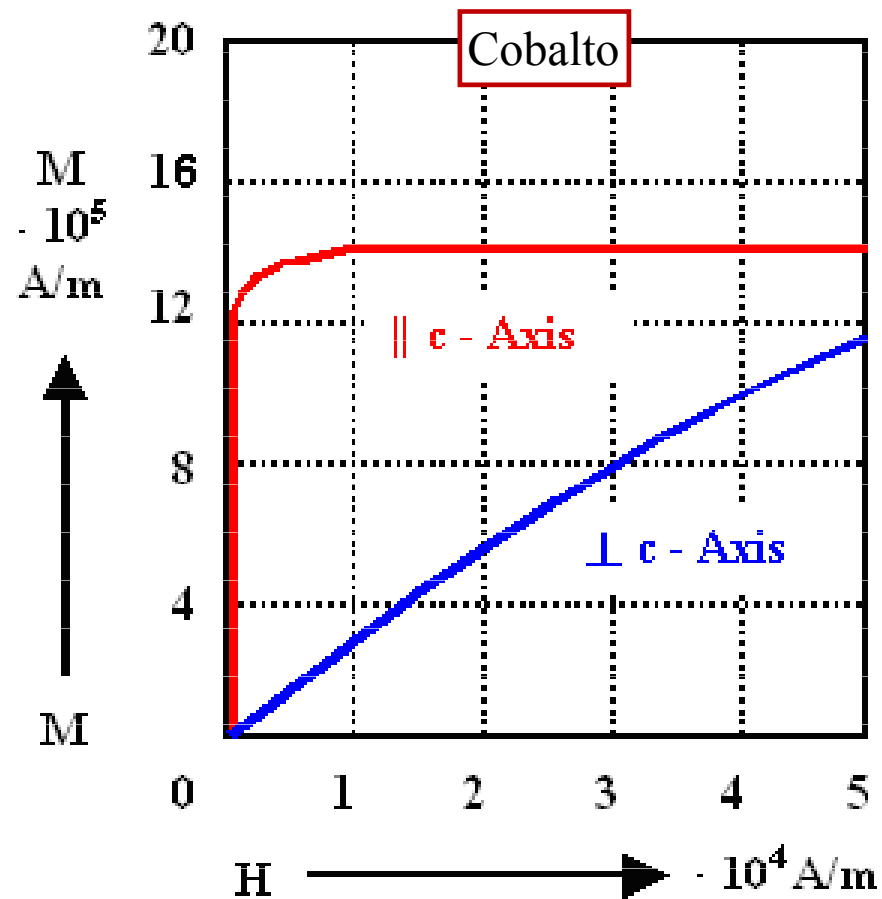
Ferromagnetismo

- Ejes preferenciales en materiales cristalinos



Ferromagnetismo

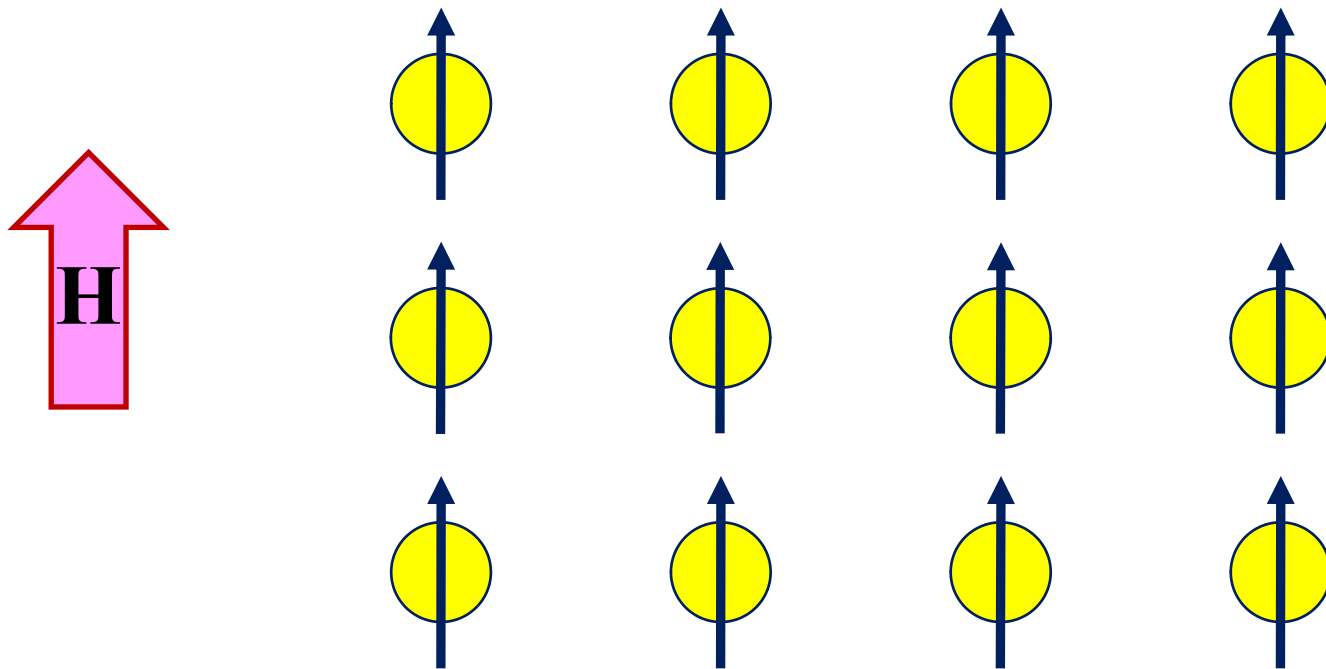
- Ejes preferenciales en materiales cristalinos



Ferromagnetismo

- Dominios

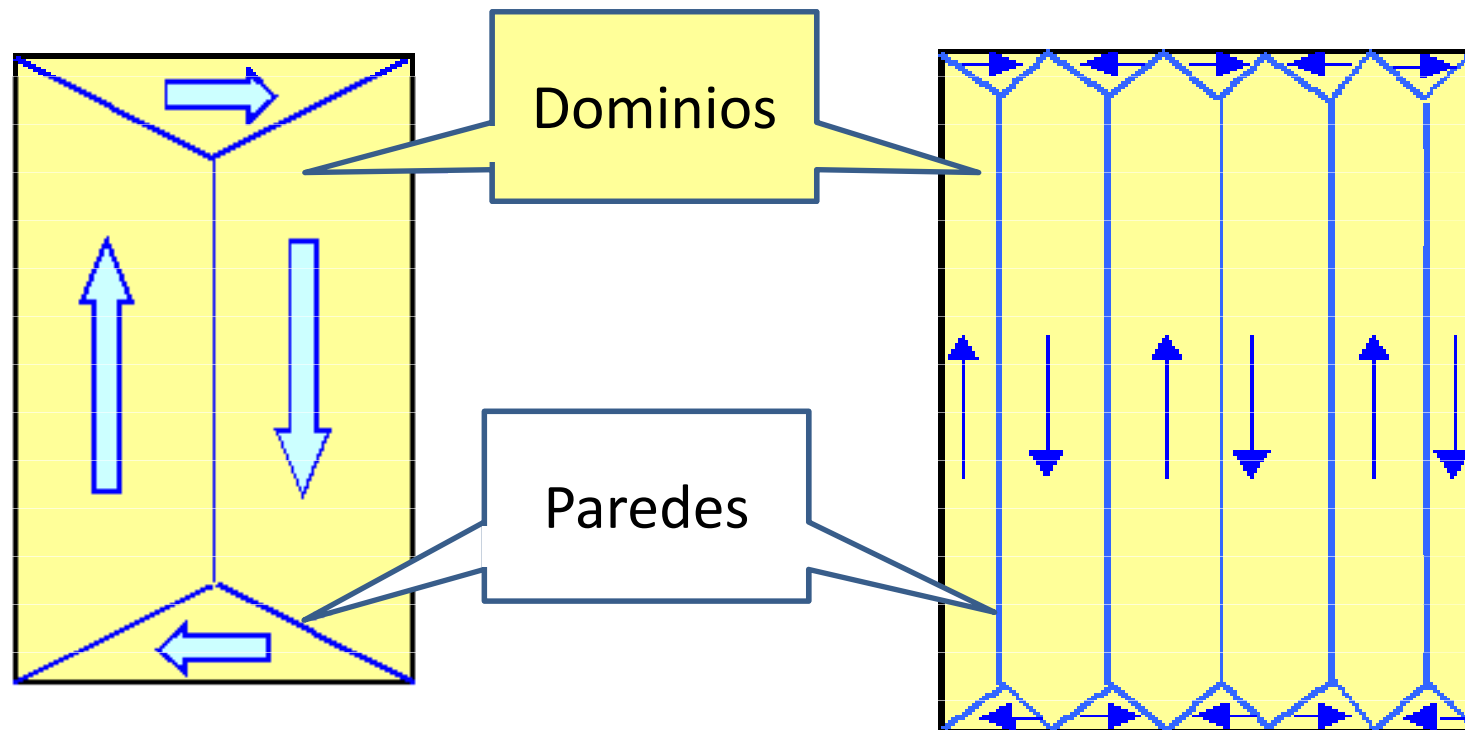
$$U_{alineado} = U_{aleatorio} - W_{alineado} + W_{campo}$$



PREGUNTA: ¿Existe una configuración de menor energía?

Ferromagnetismo

- Dominios

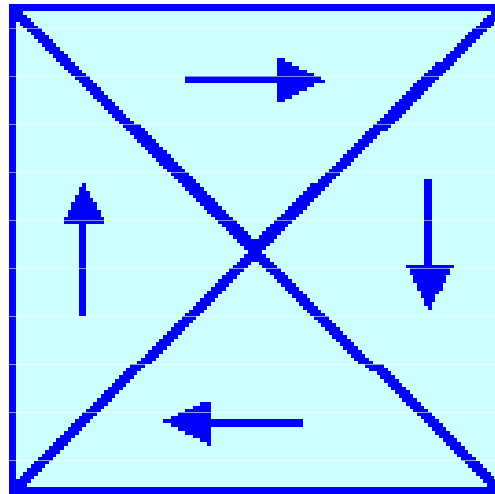


PREGUNTA: ¿Existe una configuración de menor energía?

Ferromagnetismo

- Dominios y magnetostricción

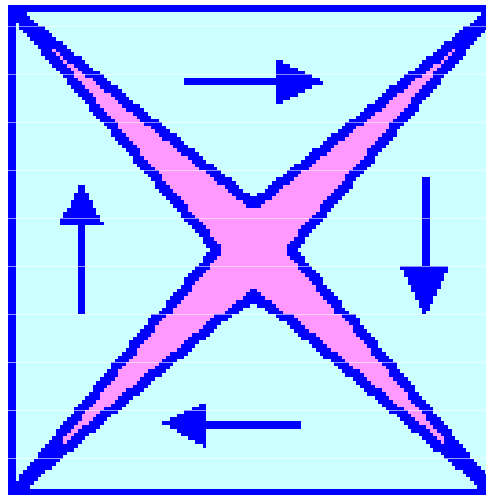
$$U_{alineado} = U_{aleatorio} - W_{alineado} + W_{campo}$$



Ferromagnetismo

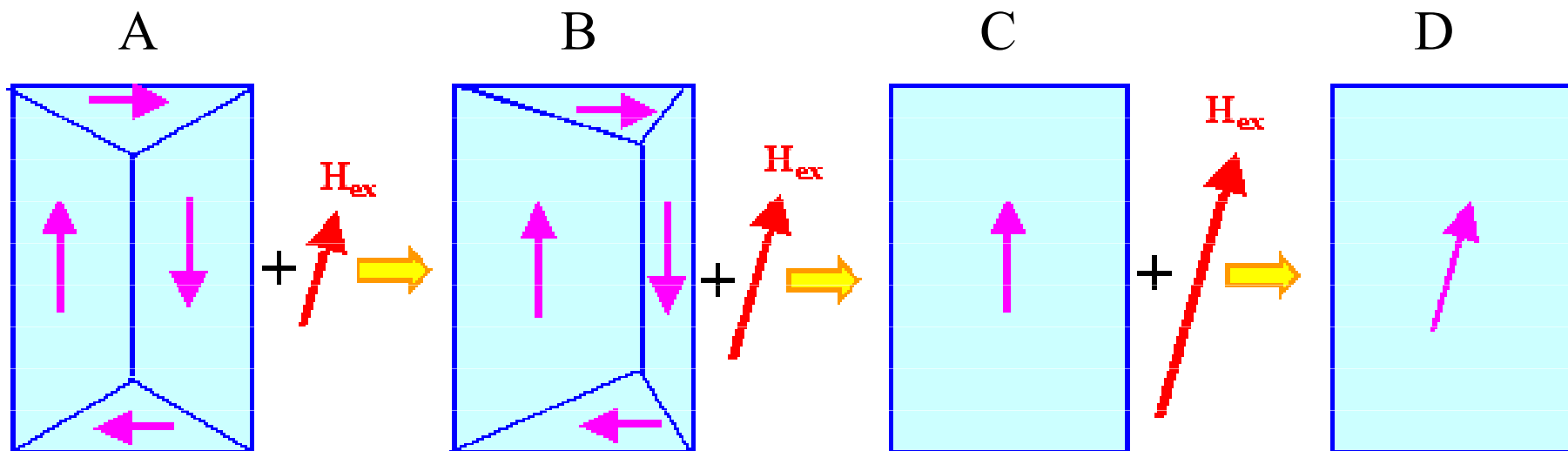
- Dominios y magnetostricción

$$U_{alineado} = U_{aleatorio} - W_{alineado} + W_{campo} + W_{mecánico}$$



Ferromagnetismo

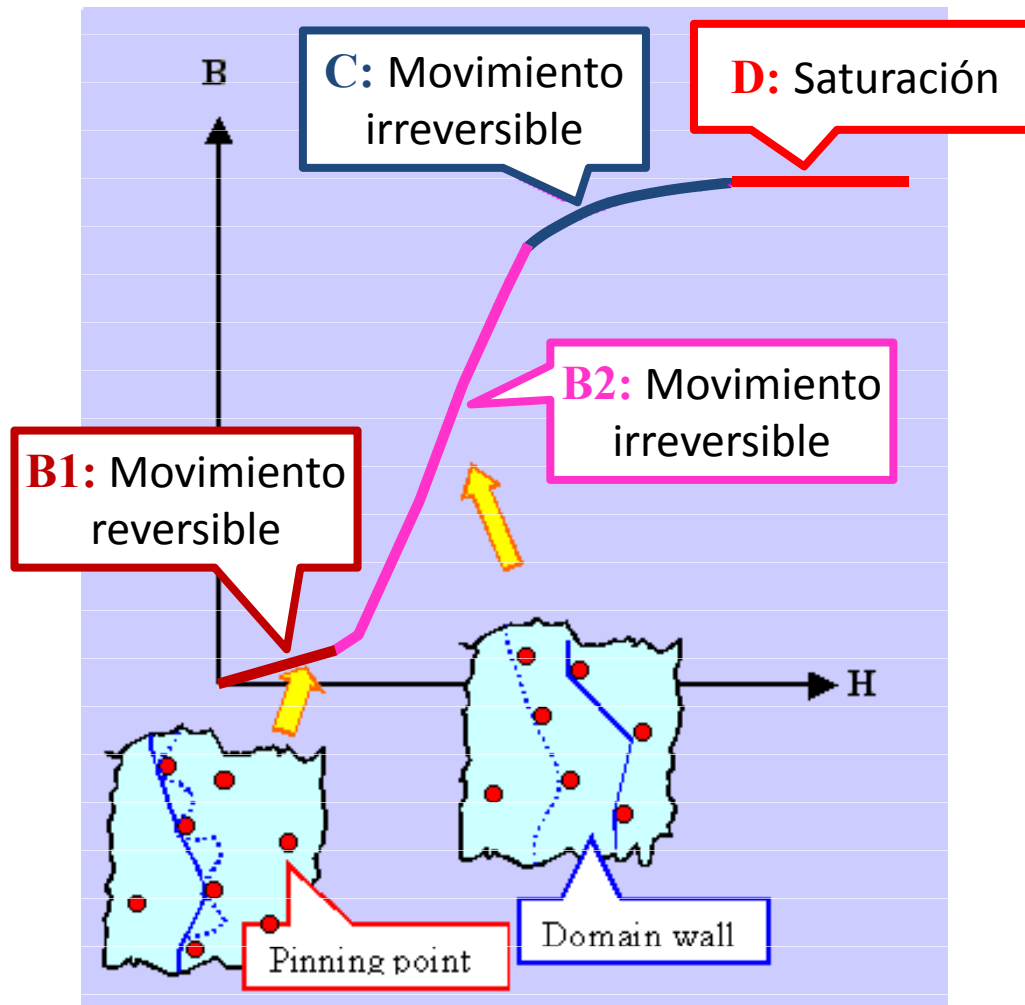
- Dominios e histéresis



Dominios energéticamente más favorables permanecen

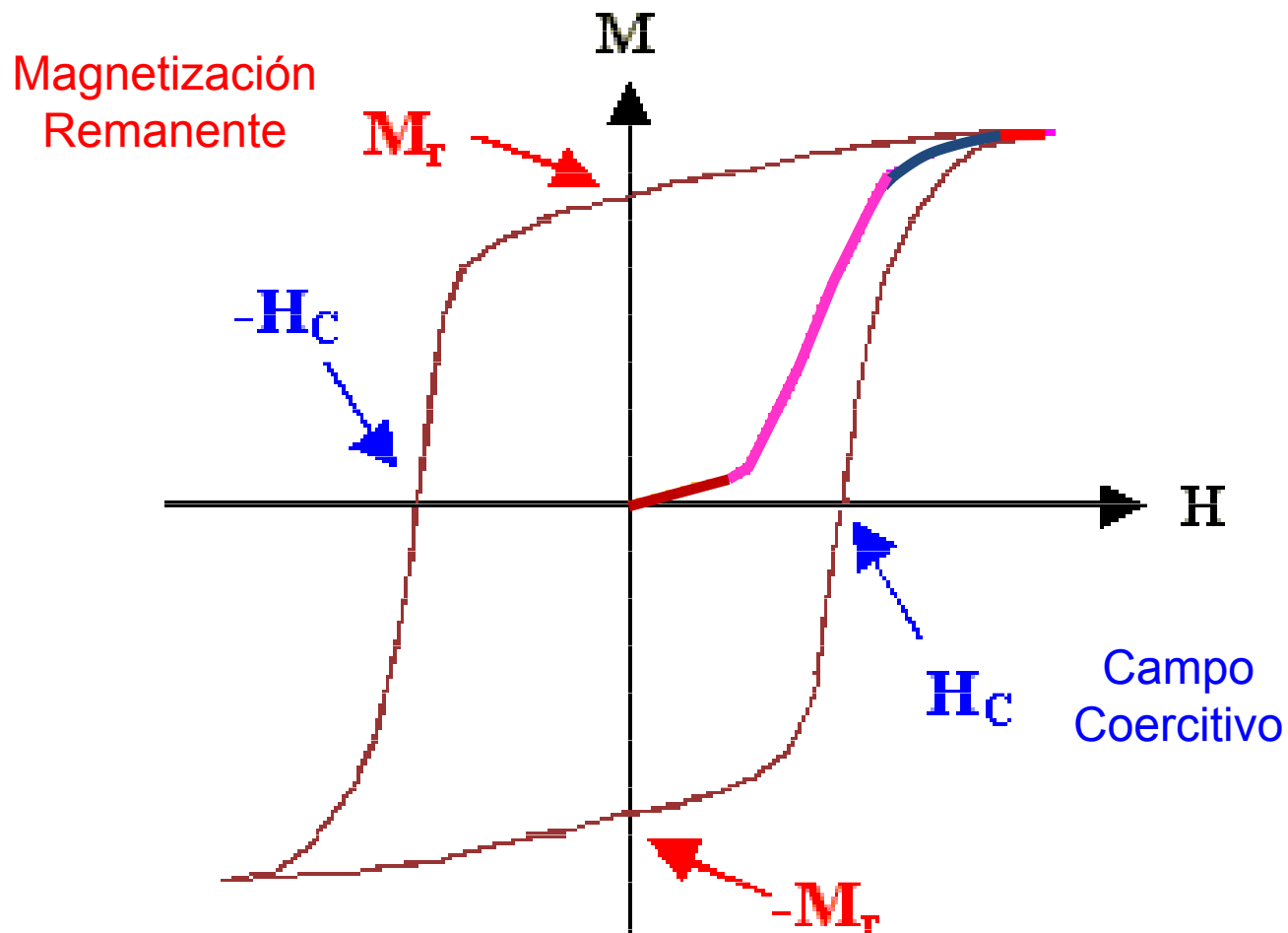
Ferromagnetismo

- Dominios e histéresis



Ferromagnetismo

- Histéresis



Ferromagnetismo

- Pérdidas en campos AC
 - Bajas frecuencias (pérdidas de histéresis)

$$P_{ferro} = P_{parásita} + P_{histéresis}$$

- **Corrientes parásitas** producidas por campos magnéticos cambiantes.
- **Movimiento de las paredes de dominios** necesita/produce energía

Ferromagnetismo

- Pérdidas en campos AC
 - Bajas frecuencias (pérdidas de histéresis)

$$P_{ferro} = P_{parásita} + P_{histéresis} \approx \frac{\pi d^2}{6\rho} (f B_{\max})^2 + 2f H_C B_{\max}$$

d = dimensión perpendicular al campo aplicado

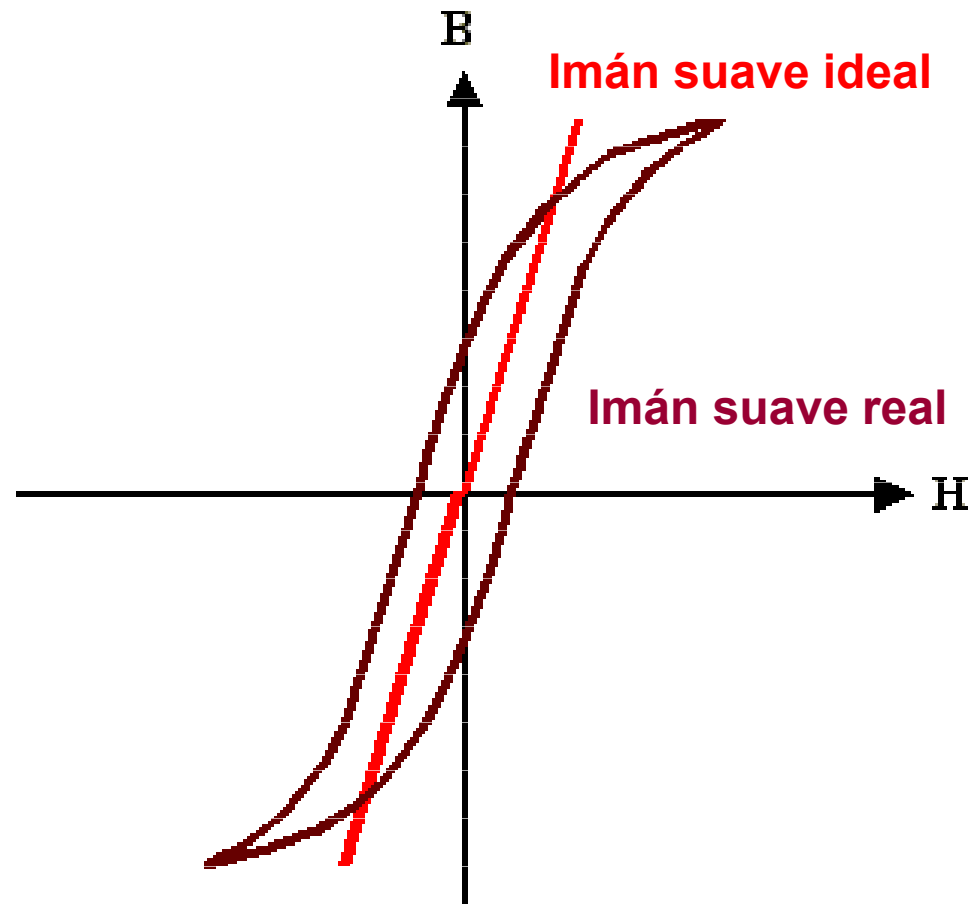
H_C = campo coercitivo

B_{\max} = densidad de flujo de máximo

PREGUNTA: ¿Cómo disminuir pérdidas por histéresis?

Ferromagnetismo

- Imanes suaves



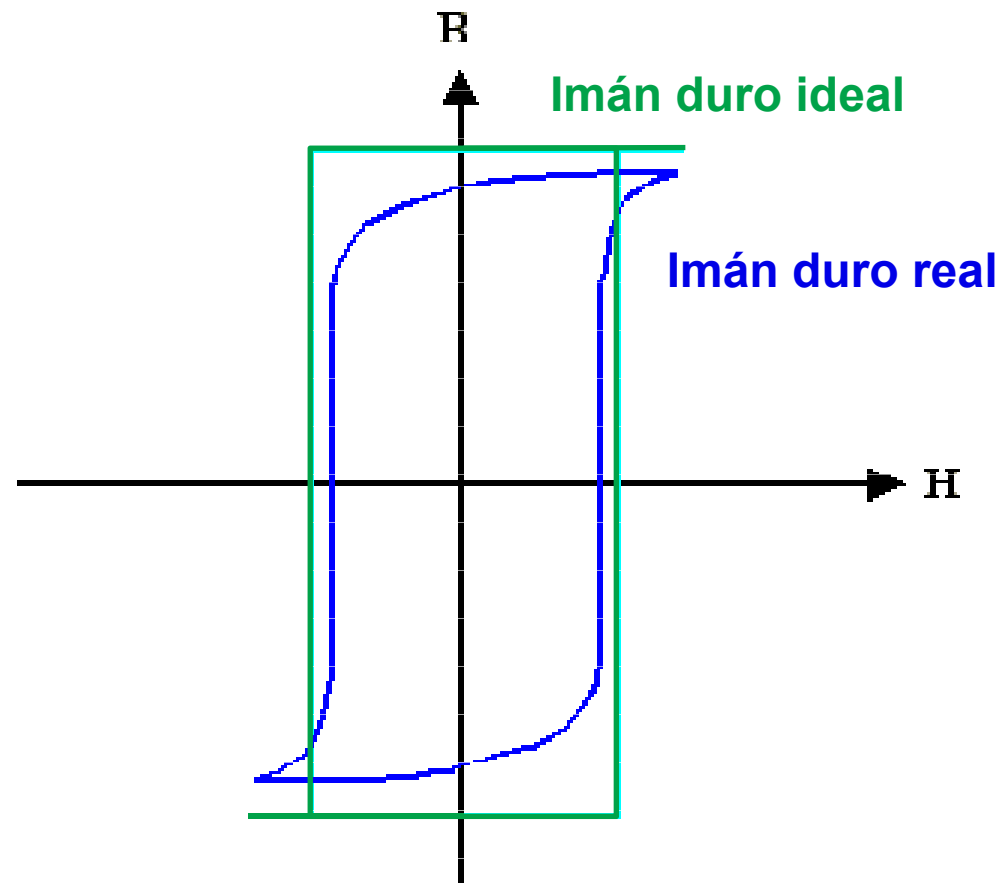
Ferromagnetismo

- Imanes suaves

Aplicación	Productos	Requerimientos	Materiales
Conversión de potencia eléctrica-mecánica	Motores Generadores Electroimanes	M_R grande H_C pequeña Bajas pérdidas = conductividades pequeñas a bajas ω	Fe + (0,7 - 5)% Si Fe + (35 - 50)% Co
Adaptación de potencia	Transformadores		
Transferencia de señales	Transformador	Curva $M-H$ lineal	
	LF : baja frecuencia (f < 100 kHz)	Pequeña conductividad a medias ω	Fe + 36 % Ni/Co \approx 20/40/40
	HF : alta frecuencia (f > 100 kHz)	Muy pequeña conductividad a altas ω	Ferritas Ni - Zn
Apantallamiento de campo magnético	"Metal mu"	dM/dH grande para $H \approx 0$ idealmente $\mu_r = 0$	Ni/Fe/Cu/Cr \approx 77/16/5/2

Ferromagnetismo

- Imanes duros



Ferromagnetismo

- Imanes duros

Campo de aplicación	Productos	Requerimientos	Materiales
Imanes permanentes	Parlantes Generadores pequeños Motores pequeños Sensores	H_C y M_R grandes	Fe/Co/Ni/Al/Cu $\approx 50/24/14/9/3$ SmCo ₅ , Sm ₂ Co ₁₇ "NdFeB" (= Nd ₂ Fe ₁₄ B)
Almacenamiento analógico de datos	Cintas de video Cintas de audio	H_C y M_R medianos. Curvas de histéresis lo más rectangulares posible	NiCo, CuNiFe, CrO ₂ Fe ₂ O ₃
Almacenamiento digital de datos	Memorias Disco duro/flexible		
	Memoria de burbujas	Estructura especial de dominios	Granates magnéticos (AB ₂ O ₄ , A ₃ B ₅ O ₁₂). A = Itrio o mezclas de tierras raras, B = mezclas de Sc, Ga, Al Más común: Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂

Moraleja del Día

- **Diamagnetismo:** Precesión de la órbita
- **Paramagnetismo:** Orientación aleatoria de los momentos permanentes en un campo magnético externo.
- Hay interacciones entre momentos. Orientación permanente