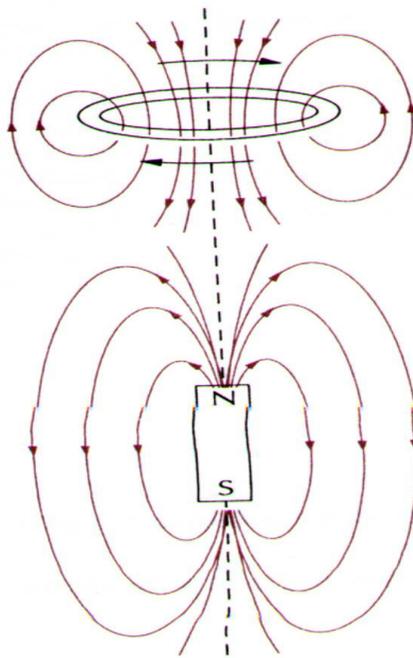


3. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS

- **Fuerzas magnéticas:** movimiento de partículas cargadas eléctricamente.
- Existen **dipolos magnéticos** (análogos a dipolos eléctricos): son influenciados por campos magnéticos.



- Campo magnético ejerce fuerza que tiende a orientar los dipolos en dirección del campo.
- **Intensidad de campo magnético: H [Am^{-1}]**, es el campo magnético aplicado externamente.

- **Definición de H:** integral de línea en una curva cerrada es igual a la corriente encerrada:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

- **Inducción magnética o densidad de flujo magnético, B [Wb m⁻²] o [Tesla]:**

Es magnitud de la intensidad de campo magnético dentro de una sustancia sometida a campo H.

- **B y H están relacionados por la permeabilidad, μ [Wb A⁻¹m⁻¹]**

$$B = \mu H$$

- **En el vacío: $B = \mu_0 H$, donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Wb A⁻¹m⁻¹**
- **En general: μ_r : permeabilidad relativa**

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

- **Es medida del grado con que un material puede ser magnetizado.**
- **Facilidad con que se puede inducir un campo B en presencia de un campo H aplicado externamente.**

- **Magnetización de un sólido:**
 - Cuando existe H
 - dipolos magnéticos en el material tienden a alinearse con el campo
 \Rightarrow hay contribución adicional proporcional a H :

$$B_o = \mu_o H + \mu_o M$$

$$M = \chi_m H$$

- **χ_m : susceptibilidad magnética**

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

- **Analogía con dieléctricos:**
 - $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \leftrightarrow \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ (desplazamiento dieléctrico)
 - $\mathbf{H} \leftrightarrow \mathbf{E}$
 - $\mu \leftrightarrow \epsilon$
 - $\mathbf{M} \leftrightarrow \mathbf{P}$

Magnitud	Símbolo	Unidades SI	Unidades cgs	Conversión
Inducción magnética	B	Tesla (Wb m ⁻²) kg s ⁻¹ C ⁻¹	gauss	1 Wb m ⁻² = 10 ⁴ gauss
Intensidad de campo magnético	H	Am ⁻¹ C m ⁻¹ s ⁻¹	oersted	Am ⁻¹ = 4π×10 ⁻³ oersted
Magnetización	M	Am ⁻¹ C m ⁻¹ s ⁻¹	maxwell cm ⁻²	Am ⁻¹ = 10 ⁻³ maxwell cm ⁻²
Permeabilidad del vacío	μ ₀	henrio m ⁻¹ (Wb A ⁻¹ m ⁻¹) kg m C ⁻²	sin unidades (uem)	4π×10 ⁻⁷ H m ⁻¹ = 1 uem
Permeabilidad relativa	μ _r μ' (cgs)	sin unidades	sin unidades	μ _r =μ'
Susceptibilidad	χ _m χ' m (cgs)	sin unidades	sin unidades	χ _m =4πχ' m

3.2 ORIGEN DE LOS MOMENTOS MAGNÉTICOS

- **Propiedades magnéticas macroscópicas: consecuencia de momentos magnéticos asociados a electrones individuales.**
- **Orígenes:**
 - **Movimiento orbital** alrededor del núcleo (analogía con espira): momento magnético a lo largo de eje de rotación.
 - Rotación en torno a su eje: **spin** del e⁻; momento magnético a lo largo de eje de spin (spin hacia “arriba” o “abajo”).

- **Momento magnético fundamental: magnetón de Bohr:**
$$\mu_B = 9,27 \times 10^{-24} \text{ A m}^{-2}$$
- **Momento magnético de spin en un átomo: $\pm\mu_B$**
- **Momento magnético orbital: $m_l\mu_B$ (m_l : número cuántico magnético del e-)**

Callister 21.4

- **Momento magnético de un átomo = suma momentos magnéticos de c/u de sus e- (incluye contribuciones orbitales y de spin)**
- **Atomo con sus niveles electrónicos completamente llenos: no puede ser magnetizado en forma permanente**
 - **Ejemplos:**
 - **Gases nobles: He, Ne, Ar, etc.**
 - **Algunos materiales iónicos**

- Ahora clasificaremos a los sólidos según:
 - Magnitud de la susceptibilidad
 - Dependencia de χ_m con la temperatura

3.3 DIAMAGNETISMO Y PARAMAGNETISMO

3.3.1 DIAMAGNETISMO

- Forma muy débil de magnetismo
- No es permanente
- Persiste sólo mientras campo externo está presente (H)
- Magnitud de momento magnético inducido es muy pequeña (en dirección opuesta a campo aplicado)
 - $\Rightarrow \mu_r < \approx 1$
- $\chi_m < 0$ (en sólidos diamagnéticos: $\chi_m \approx -10^{-5}$)
 - $\Rightarrow B < B_0$
- En presencia de electroimán fuerte: son atraídos hacia regiones donde el campo es más débil.

- Presente en todos los materiales.
- Pero, es tan débil, que sólo puede ser observado cuando otros tipos de magnetismo están totalmente ausentes.
- No tiene importancia práctica.

Callister 21.6

MATERIALES DIAMAGNÉTICOS

Material	χ_m
Oxido de aluminio, Al_2O_3	$-1,81 \times 10^{-5}$
Cobre, Cu	$-0,96 \times 10^{-5}$
Oro, Au	$-3,44 \times 10^{-5}$
Mercurio, Hg	$-2,85 \times 10^{-5}$
Silicio, Si	$-0,41 \times 10^{-5}$
Plata, Ag	$-2,38 \times 10^{-5}$
Cloruro de sodio, NaCl	$-1,41 \times 10^{-5}$
Zinc, Zn	$-1,56 \times 10^{-5}$

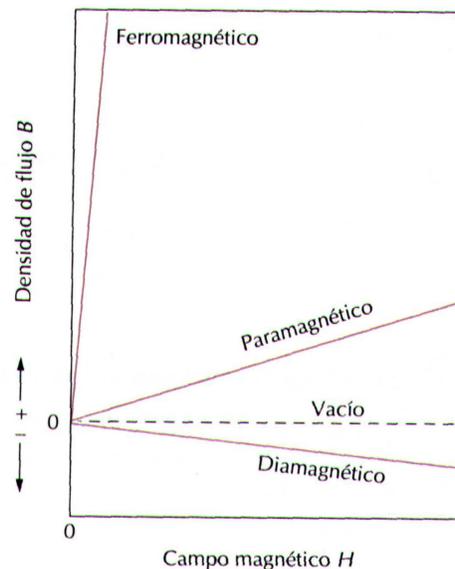
3.3.2 PARAMAGNETISMO

- En algunos sólidos: cada átomo posee momento magnético dipolar permanente.
- **¿Por qué?** Hay cancelación incompleta del spin y/o de momentos magnéticos orbitales.
- En ausencia de H: momentos magnéticos están orientados al azar
⇒ no hay magnetización neta permanente.
- Estos momentos magnéticos están libres para girar.
- Cuando se alinean mediante rotación (de preferencia con campo magnético externo): **PARAMAGNETISMO**.
- Como se alinean con H:
⇒ lo aumentan
⇒ $\mu_r > 1$ y $\chi_m > \approx 0$.

MATERIALES PARAMAGNÉTICOS

Material	χ_m
Aluminio	$2,07 \times 10^{-5}$
Cromo	$3,13 \times 10^{-4}$
Cloruro de Cromo	$1,51 \times 10^{-3}$
Sulfato de manganeso	$3,70 \times 10^{-3}$
Molibdeno	$1,19 \times 10^{-4}$
Sodio	$8,48 \times 10^{-6}$
Titanio	$1,81 \times 10^{-4}$
Zirconio	$1,09 \times 10^{-4}$

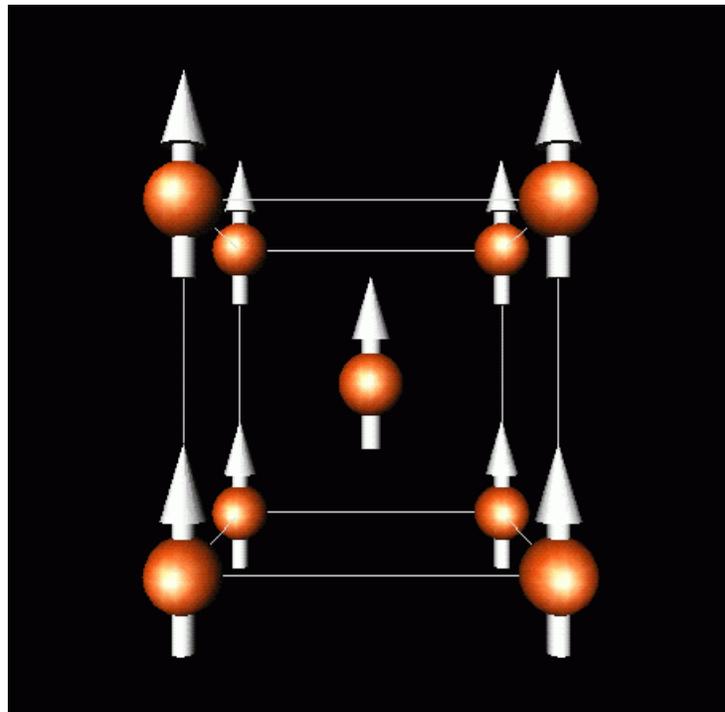
- **Materiales diamagnéticos y paramagnéticos son considerados no magnéticos: sólo presentan magnetización en presencia de campo externo.**
- **Densidad de flujo es baja: $B \approx B_0$**



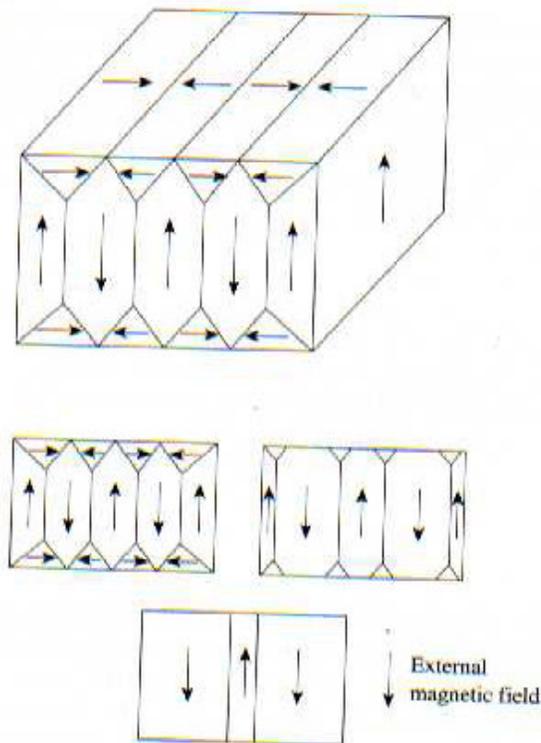
3.4 FERROMAGNETISMO

- **Algunos materiales poseen:**
 - **momento magnético permanente en ausencia de H**
 - **magnetizaciones muy grandes**
- **¿Qué materiales?**
 - **Fe (con estructura bcc, ferrita α)**
 - **Co**
 - **Ni**
 - **Algunos elementos de tierras raras (e.g. Gd)**

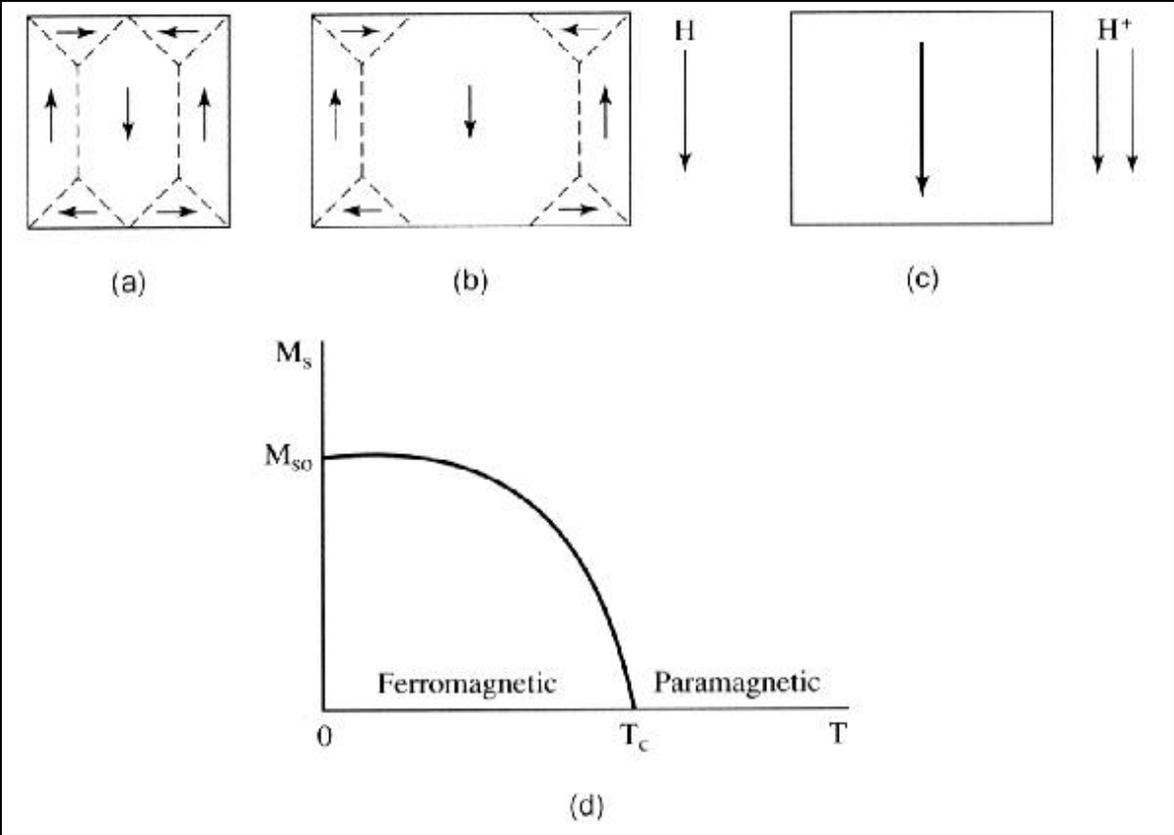
- $\chi_m \approx 10^6 \Rightarrow H \gg M \Rightarrow \mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{M}$
- **Origen:**
 - Momentos magnéticos debido a spin de e- no cancelado en la estructura electrónica.
 - Momento orbital también contribuye (poco)
 - Acoplamientos spin-spin hacen que se alineen en ausencia de campo magnético externo.



- La alineación de spins se presenta en volúmenes relativamente grandes: **dominios ferromagnéticos.**



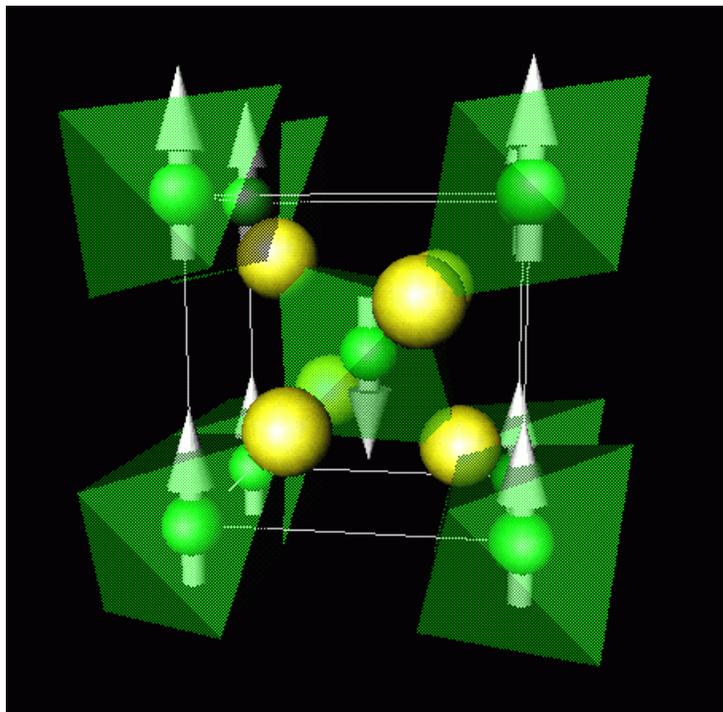
- **Magnetización de saturación, M_s : máxima magnetización posible.**
- **Resulta cuando todos los dipolos magnéticos de un sólido están orientados en la dirección del campo externo.**
- **$M_s = (\text{magnetización de cada átomo}) \times (N^\circ \text{ áts.})$**
 - **Fe: $M_a = 2,22 \mu_B$**
 - **Co: $M_a = 1,72 \mu_B$**
 - **Ni: $M_a = 0,60 \mu_B$**



3.5 ANTIFERROMAGNETISMO Y FERRIMAGNETISMO

3.5.1 ANTIFERROMAGNETISMO

- Ocurre en materiales distintos a los ferromagnéticos.
- En estos materiales: ocurre **alineamiento antiparalelo** de spins de átomos o iones vecinos.
- Ejemplo: MnO ($\text{Mn}^{2+}\text{O}^{2-}$).
 - Iones O^{2-} no presentan momento magnético neto.
 - Iones Mn^{2+} tienen momento magnético neto (por el spin, fundamentalmente)



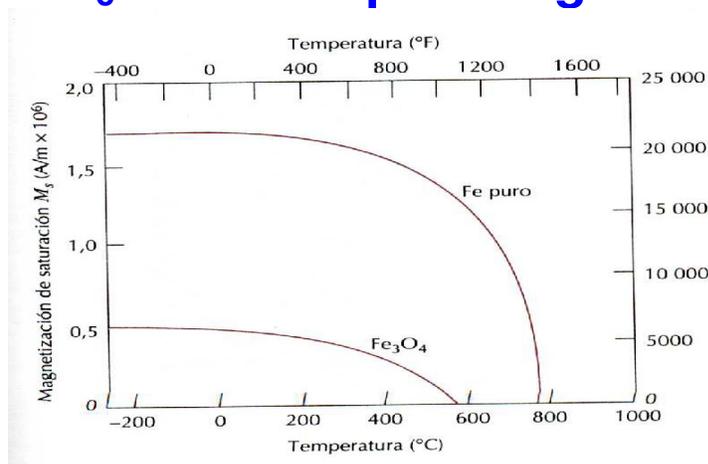
3.5.2 FERRIMAGNETISMO

- Es un tipo de magnetización permanente.
- Diferencia con ferromagnéticos reside en el origen de los momentos magnéticos.
- Ejemplos: ferritas cúbicas, MFe_2O_4 (M=Ni, Mn, Co,Cu)
- Prototipo es **magnetita** (piedra imán): Fe_3O_4
 - $Fe^{2+}O^{2-}-(Fe^{3+})_2(O^{2-})_3$
 - Proporción valencias +2:+3=1:2
 - $\mu(Fe^{2+}) = 4\mu_B$ - $\mu(Fe^{3+}) = 5\mu_B$
 - Iones O^{2-} son magnéticamente neutros
 - Entre iones Fe se producen interacciones de acoplamientos de spines en las direcciones antiparalelas (similar a antiferromagnetismo).
 - Pero existe momento ferromagnético neto: momentos de spin no se cancelan completamente.
- Otros ejemplos:
 - Ferritas hexagonales: $AB_{12}O_{19}$
 - A: metal divalente. Ej.: Ba, Pb, Sr
 - B: metal trivalente. Ej.: Al, Ga, Cr, Fe
 - Ejemplos más comunes:
 - $PbFe_{12}O_{19}$
 - $BaFe_{12}O_{19}$

- **Granates: $M_3Fe_5O_{12}$**
 - **M: ión de tierra rara. Ej.: Sm, Eu, Gd, Y**
 - **Granate de hierro-itrío (YIG): $Y_3Fe_5O_{12}$**
- **Características generales:**
 - **$M_s(\text{ferri}) < M_s(\text{ferro})$**
 - **Ferritas son buenos aisladores eléctricos (uso en transformadores)**

3.6 EFFECTO DE LA TEMPERATURA

- **Agitación térmica tiende a desalinearse los momentos magnéticos.**
 - ⇒ **disminución de la magnetización de saturación (ferro y antiferro)**
- **M_s es máxima a 0 K.**
- **$M_s = 0$ a la temperatura de Curie (Θ)**
- **Para $T > T_c$: material paramagnético**



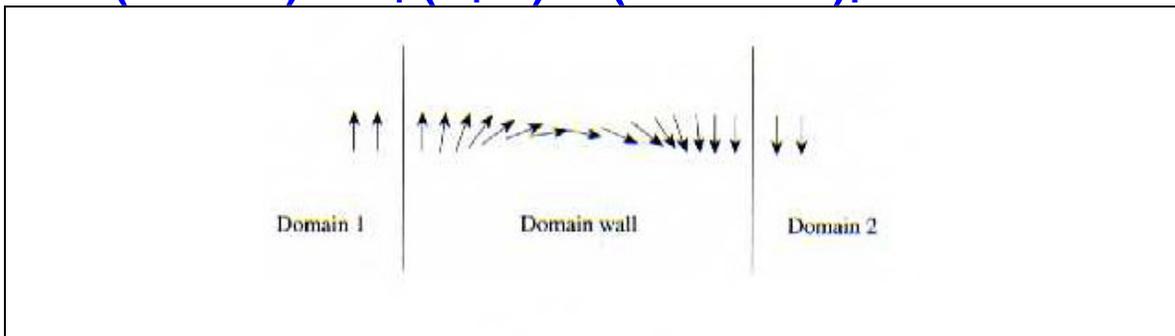
$M_s(T)$ del Fe_3O_4

- T_c varía de un material a otro:
 - Fe: 768 °C
 - Co: 1120 °C
 - Ni: 335 °C
 - Fe₃O₄: 585 °C
- Antiferromagnetismo también es afectado por vibraciones térmicas:
 - Temperatura de Néel (T_N)
 - Si $T > T_N$: paramagnético

Tipo	Magnitud de la susceptibilidad	Dependencia en temperatura	Ejemplos
Diamagnético	Pequeña, negativa	Independiente	Materiales orgánicos, elementos livianos
	Intermedia, negativa	Varía con el campo y $T < 20$ K	Tierras alcalinas, bismuto
	Grande, negativa	Existe sólo bajo t° s críticas	Metales superconductores
Paramagnético	Pequeña, positiva	Independiente	Metales alcalinos, metales transición
	Grande, positiva	$\chi = \frac{C}{T - \Theta}$	Tierras raras
Antiferromagnético	Pequeña, positiva	Cuando $T > T_N$: $\chi = \frac{C}{T + \Theta}$	Sales de metales de transición
		Cuando $T < T_N$: $\chi \propto T_c$	
Ferromagnético	Muy grande, positiva	$T > T_c$: $\chi = \frac{C}{T - \Theta}$	Algunos metales raros y de transición
		$T < T_c$	
Ferrimagnético	Muy grande, positiva	Cuando $T > T_N$: $\chi = \frac{C}{T \pm \Theta}$	Ferritas
		$T < T_N$	

3.7 DOMINIOS E HISTÉRESIS

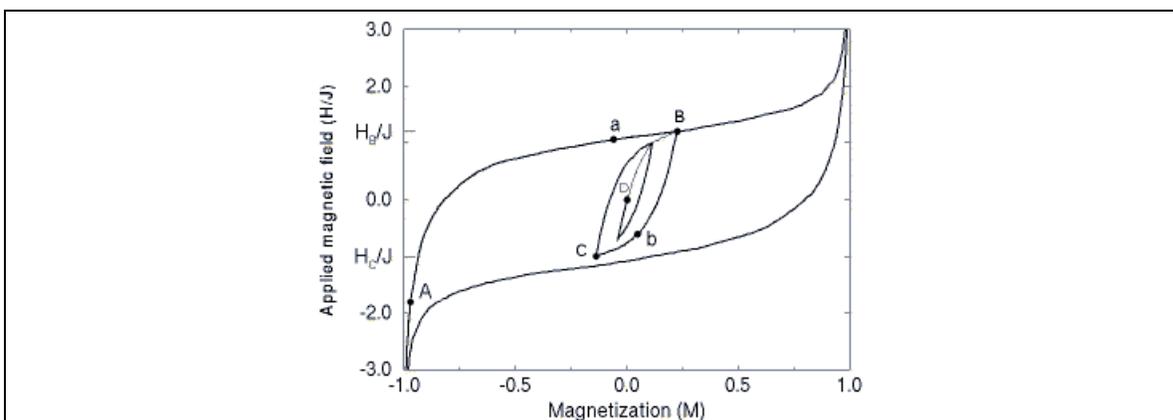
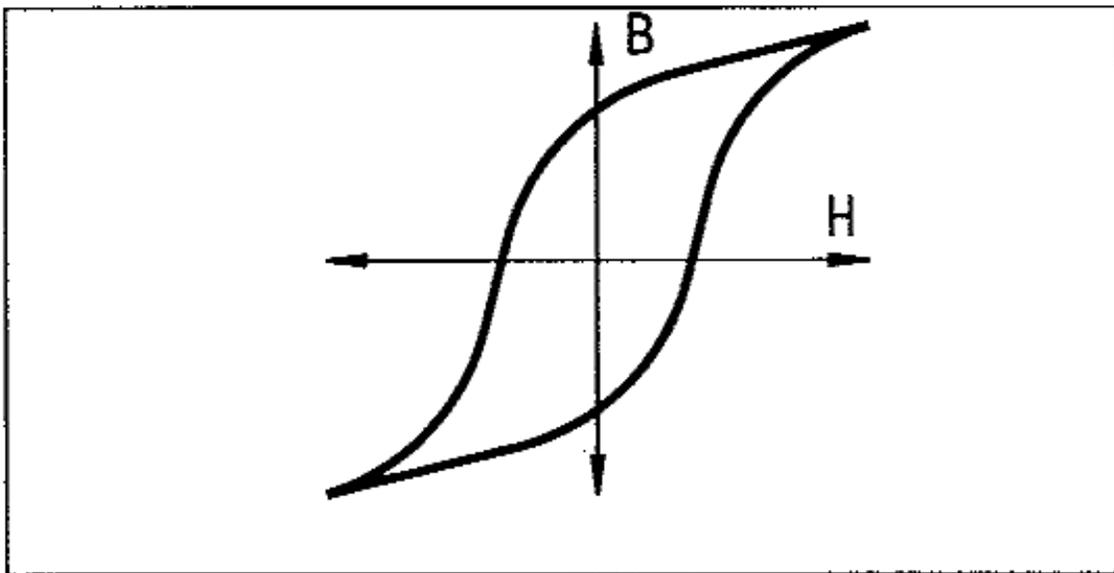
- $T < T_c$: materiales ferro y ferrimagnéticos están formados por pequeñas regiones 3-D donde los momentos magnéticos están alineados: **dominios**.
- En cada dominio $M = M_s$
- Son microscópicos.
- En policristal, cada grano puede contener más de un dominio.
- $M(\text{sólido}) = \sum_i (V_i/V) M(\text{dominio})_i$



- Magnetización es pendiente de curva $B=B(H)$
- Dominios se orientan en la dirección del campo:
 - Inicialmente al azar
 - Luego crecen orientados favorablemente al campo (a expensas de los “desorientados”)
 - Continua hasta convertirse en un solo dominio.

- Saturación se alcanza cuando dominio gira y se orienta en dirección del campo H.

Callister 21.13

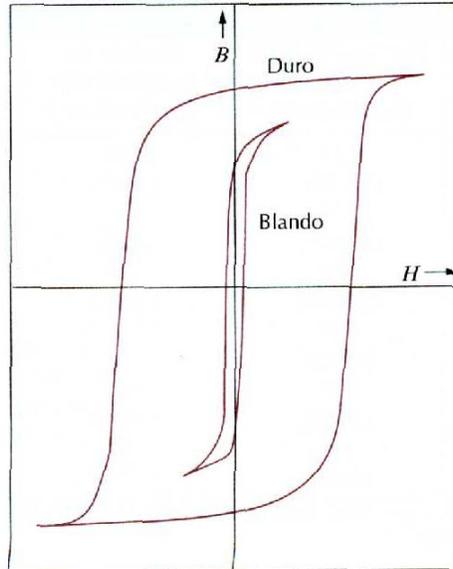


3.7 ANISOTROPÍA MAGNÉTICA

- En general, materiales poseen estructuras cristalinas complejas.
- Ejemplos:
 - Co: Es hcp. Dirección \perp plano c es fácil de magnetizar \Rightarrow anisotrópico
 - Fe: Se magnetiza fácilmente en direcciones $\langle 100 \rangle$
 - Ni: $\langle 111 \rangle$
- La tendencia a alinearse con el eje “fácil” está determinad por la **energía de anisotropía, E_{ai}** .
- Otra fuente de anisotropía: tensiones internas.
 - Una tensión aplicada interactuará con los momentos magnéticos
 \Rightarrow se modificará la magnetización
 - Esto se llama: **magnetostricción**

3.8 IMANES DUROS Y BLANDOS

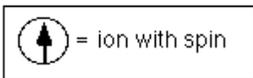
- **Depende de la dificultad para mover los dominios magnéticos: coercividad.**
- **Imanes blandos: son menos coercivos**
 - ⇒ fáciles de magnetizar y desmagnetizar (mediante inversión del campo externo)
- **Aplicación típica: núcleo de transformador**
 - **Es el acoplamiento entre espiras**
 - **Eficiencia del trafo depende críticamente de propiedades del núcleo.**
 - **Ciclo de histéresis pequeño (B-H)**
 - **Resistencia eléctrica elevada:** disminuye corrientes parásitas.
 - **Alta permeabilidad magnética (μ):** para aumentar capacidad de almacenamiento de energía.
- **Materiales:**
 - **Ferroimanes amorfos**
 - ⇒ disminuye la anisotropía
 - ⇒ disminuye la coercividad
 - **Ni-Fe**
 - **Para aumentar ρ : agregar Si**



- **Imanes duros**
 - Aplicación típica: **imanes permanentes** (difíciles de desmagnetizar)
 - **Figura de mérito:** $(BH)_{\text{máx}}$
 - **Materiales:**
 - **NdFeB:** $(BH)_{\text{máx}} > 1 \times 10^5 \text{ Tam}^{-1}$
 - **Impurezas para aumentar coercitividad:** Ti
 - **Cerámicas:** granates (“garnet”)
 - (son buenos aislantes eléctricos)

3.9 APLICACIONES Y DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS

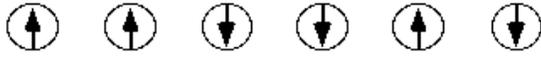
- **Grabación magnética**
- **Efecto magneto-óptico**
- **Memorias de burbuja magnética**
- **Resonancia magnética nuclear (NMR)**
- **Superredes metálicas magnéticas**



Diamagnetism (no spin)

Paramagnetism (random spin orientation)

No net magnetic moment in absence of applied field



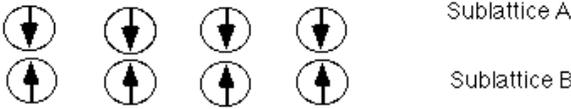
Ferromagnetism (Ordered spins)

Net magnetic moment



Antiferromagnetism (Sublattices cancel)

No net magnetic moment



Ferrimagnetism (Incomplete cancellation)

Net magnetic moment

