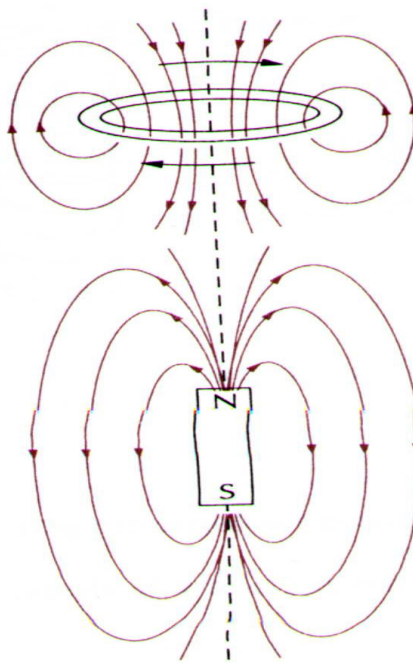


### 3. PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS MATERIALES

#### 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:  $H$  [ $\text{Am}^{-1}$ ]**, es el campo magnético aplicado externamente.

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

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

- **Inducción magnética o densidad de flujo magnético, B** [Wb m<sup>-2</sup>] 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,  $\mu$**  [Wb A<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>]

$$B = \mu H$$

- En el vacío:  $B = \mu_0 H$ , donde  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Wb A<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>
- En general:  **$\mu_r$  : 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  $H$ :

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

$$M = \chi_m H$$

- **$\chi_m$  : susceptibilidad magnética**

$$\chi_m = \mu_r - 1$$

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

Magnitud	Símbolo	Unidades SI	Unidades cgs	Conversión
Inducción magnética	B	Tesla ( $\text{Wb m}^{-2}$ ) $\text{kg s}^{-1}\text{C}^{-1}$	gauss	$1 \text{ Wb m}^{-2} = 10^4 \text{ gauss}$
Intensidad de campo magnético	H	$\text{Am}^{-1}$ $\text{C m}^{-1} \text{s}^{-1}$	oersted	$\text{Am}^{-1} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oersted}$
Magnetización	M	$\text{Am}^{-1}$ $\text{C m}^{-1} \text{s}^{-1}$	maxwell $\text{cm}^{-2}$	$\text{Am}^{-1} = 10^{-3} \text{ maxwell cm}^{-2}$
Permeabilidad del vacío	$\mu_0$	henrio $\text{m}^{-1}$ ( $\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$ ) $\text{kg m C}^{-2}$	sin unidades (uem)	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1} = 1 \text{ uem}$
Permeabilidad relativa	$\mu_r$ $\mu' \text{ (cgs)}$	sin unidades	sin unidades	$\mu_r = \mu'$
Susceptibilidad	$\chi_m$ $\chi'_m \text{ (cgs)}$	sin unidades	sin unidades	$\chi_m = 4\pi \chi'_m$

### 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  $\chi_m$  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:  $\chi_m \approx -10^{-5}$ )
  - $\Rightarrow B < B_o$
- 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**

<b>Material</b>	<b><math>\chi_m</math></b>
Oxido de aluminio, $\text{Al}_2\text{O}_3$	$-1,81 \times 10^{-5}$
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

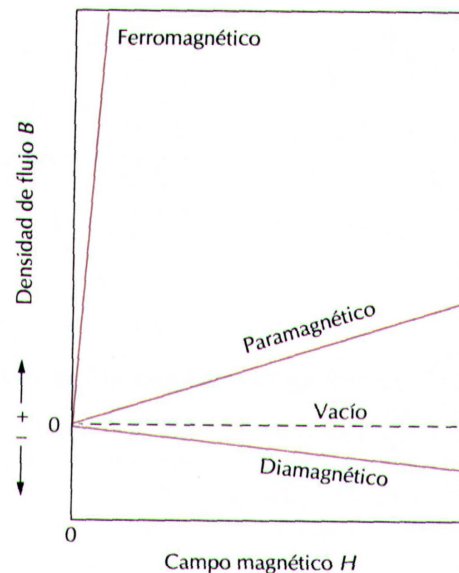
- En algunos sólidos: cada átomo posee momento magnético dipolar permanente.
- **¿Por qué?** Hay cancelación incompleta del spin y/o de momentos magnéticos orbitales.
- En ausencia de H: momentos magnéticos están orientados al azar  
⇒ no hay magnetización neta permanente.
- Estos momentos magnéticos 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	$\chi_m$
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	$1,09 \times 10^{-4}$



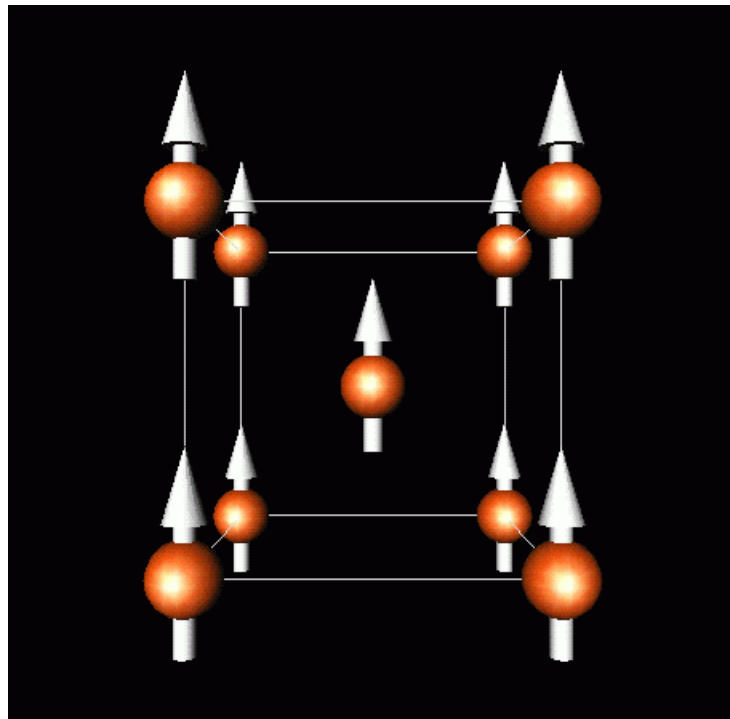
- **Materiales diamagnéticos y paramagnéticos son considerados no magnéticos: sólo presentan magnetización en presencia de campo externo.**
- **Densidad de flujo es baja:  $B \approx B_0$**



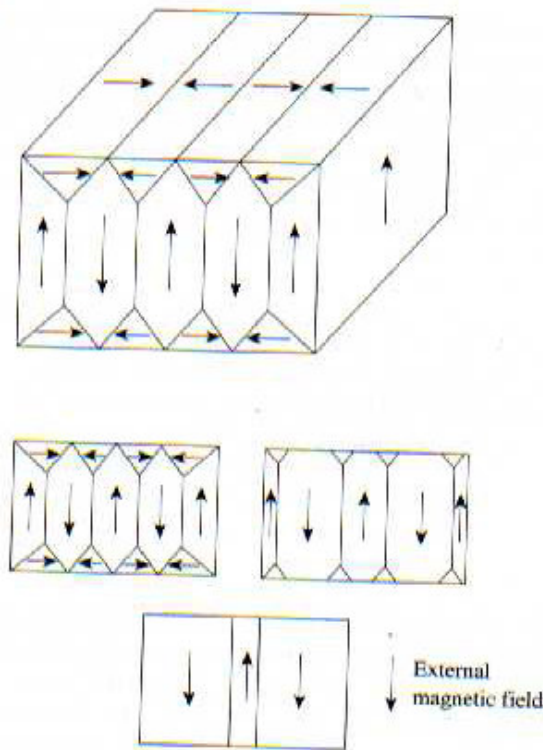
### 3.4 FERROMAGNETISMO

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

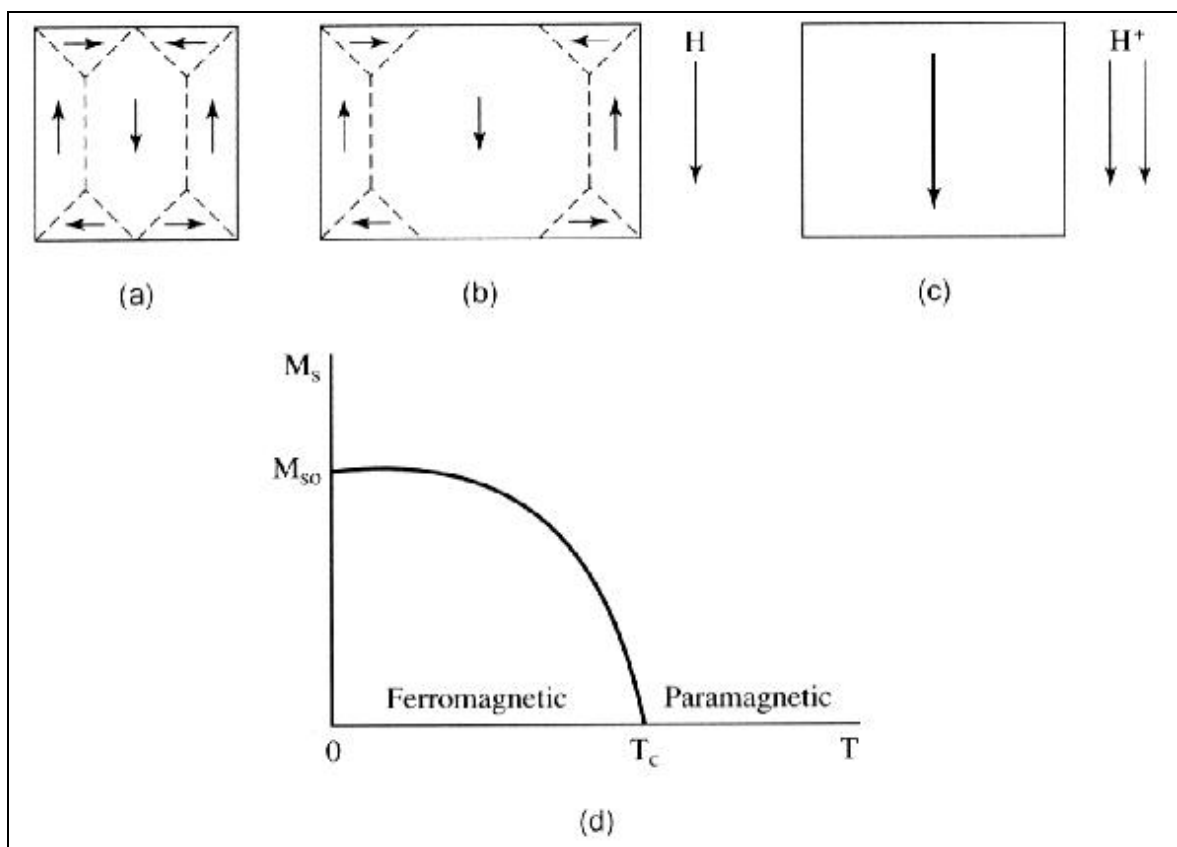
- $\chi_m \approx 10^6 \Rightarrow H \gg M \Rightarrow \mathbf{B} \approx \mu_0 \mathbf{M}$
- Origen:
  - Momentos magnéticos debido a spin de e- no cancelado en la estructura electrónica.
  - Momento orbital también contribuye (poco)
  - Acoplamientos spin-spin hacen que se alineen en ausencia de campo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



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



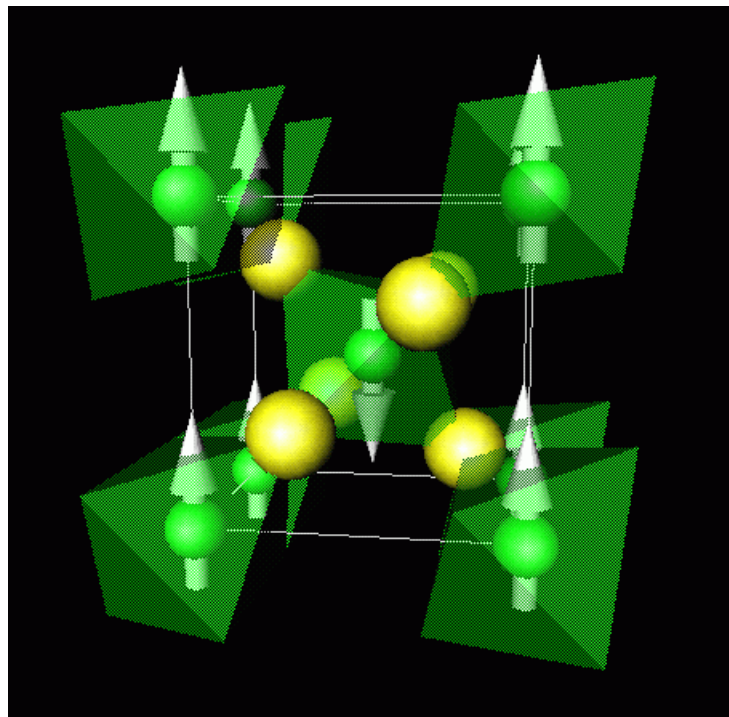
- **Magnetización de saturación,  $M_s$ :** máxima magnetización posible.
- Resulta cuando todos los dipolos magnéticos de un sólido están orientados en la dirección del campo externo.
- $M_s = (\text{magnetización de cada átomo}) \times (N^\circ \text{ áts.})$ 
  - **Fe:**  $M_a = 2,22 \mu_B$
  - **Co:**  $M_a = 1,72 \mu_B$
  - **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:  $\text{MnO}$  ( $\text{Mn}^{2+}\text{O}^{2-}$ ).
  - Iones  $\text{O}^{2-}$  no presentan momento magnético neto.
  - Iones  $\text{Mn}^{2+}$  tienen momento magnético neto (por el spin, fundamentalmente)



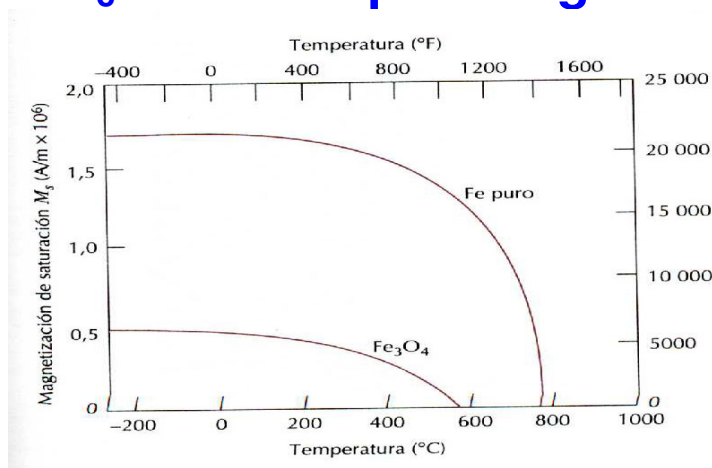
### 3.5.2 FERRIMAGNETISMO

- 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-itrio (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 ( $\Theta$ )
  - Para  $T > T_c$ : material paramagnético



$M_s(T)$  del  $Fe_3O_4$

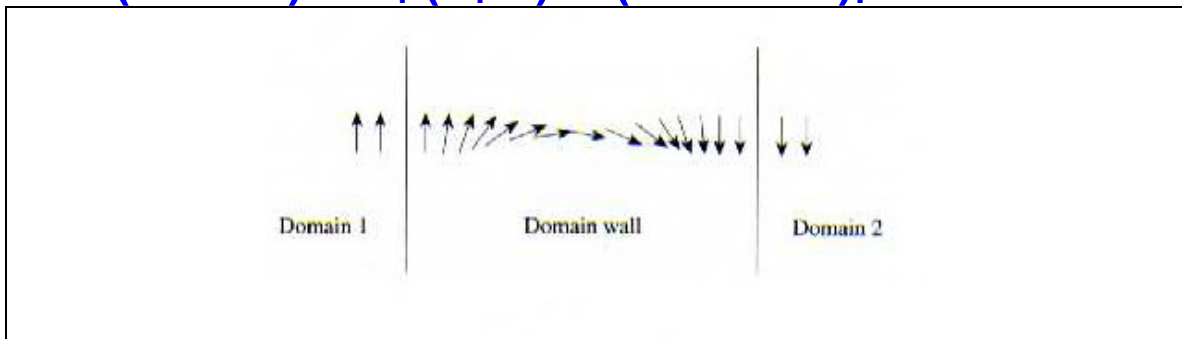
- **$T_c$  varía de un material a otro:**
  - **Fe: 768 °C**
  - **Co: 1120 °C**
  - **Ni: 335 °C**
  - **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>: 585 °C**
- **Antiferromagnetismo también es afectado por vibraciones térmicas:**
  - **Temperatura de Néel ( $T_N$ )**
  - **Si  $T > T_N$ : paramagnético**

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 $t^\circ$ 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

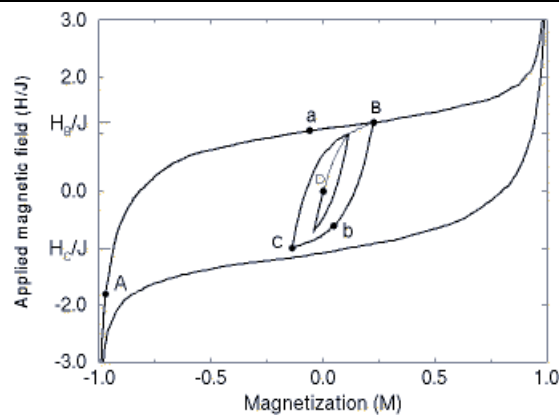
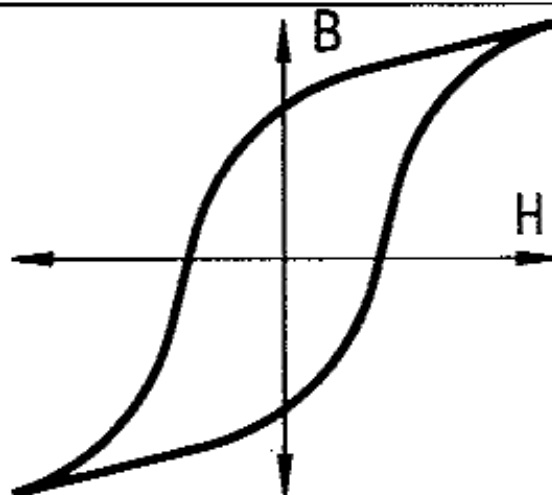
- $T < T_c$ : materiales ferro y ferrimagnéticos están formados por pequeñas regiones 3-D donde los momentos magnéticos están alineados: **dominios**.
- En cada dominio  $M = M_s$
- Son microscópicos.
- En policristal, cada grano puede contener más de un dominio.
- $M(\text{sólido}) = \sum_i (V_i/V)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



- 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

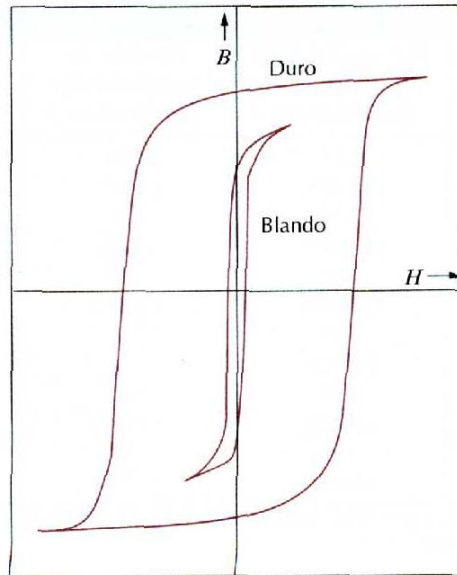


### 3.7 ANISOTROPÍA MAGNÉTICA

- 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

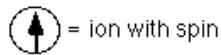
- **Depende de la dificultad para mover los dominios magnéticos: coercividad.**
- **Imanes blandos: son menos coercivos**
  - ⇒ fáciles de magnetizar y desmagnetizar (mediante inversión del campo externo)
- **Aplicación típica: núcleo de transformador**
  - **Es el acoplamiento entre espiras**
  - **Eficiencia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



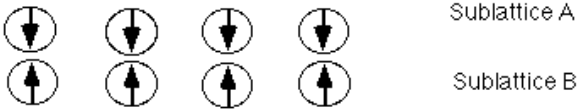
Ferromagnetism (Ordered spins)

*Net magnetic moment*



Antiferromagnetism (Sublattices cancel)

*No net magnetic moment*



Ferrimagnetism (Incomplete cancellation)

*Net magnetic moment*

