



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

“PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE MATERIALES”

MATERIALES

Prof. Titular: Dra. Ing. María J. Santillán

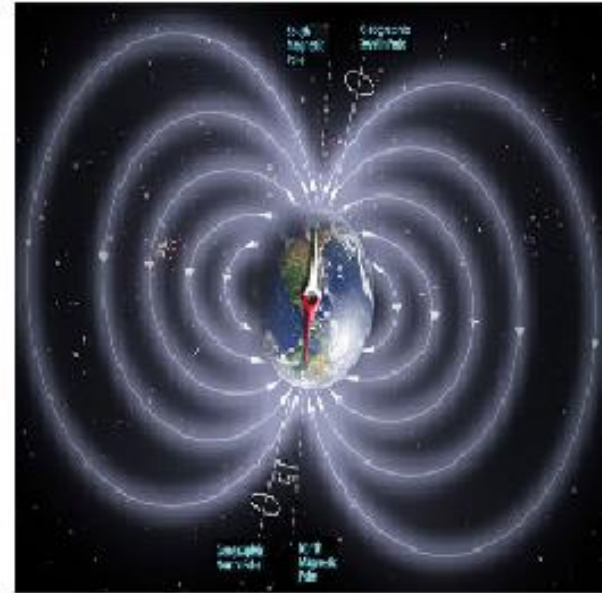
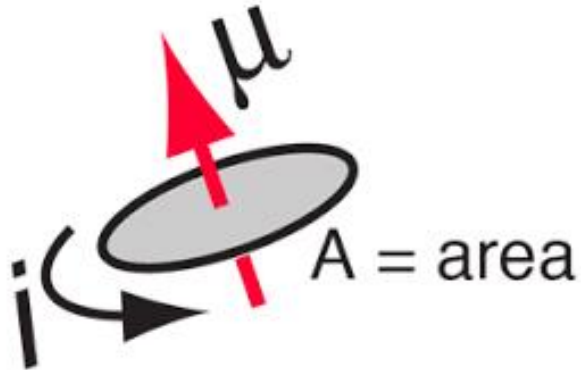
Prof. Adjunto: Dr. Ing. Claudio Careglio

Campo Magnético terrestre

Recordando...

Es un fenómeno natural originado por los movimientos de metales líquidos en el núcleo del planeta

DIPOLO MAGNÉTICO



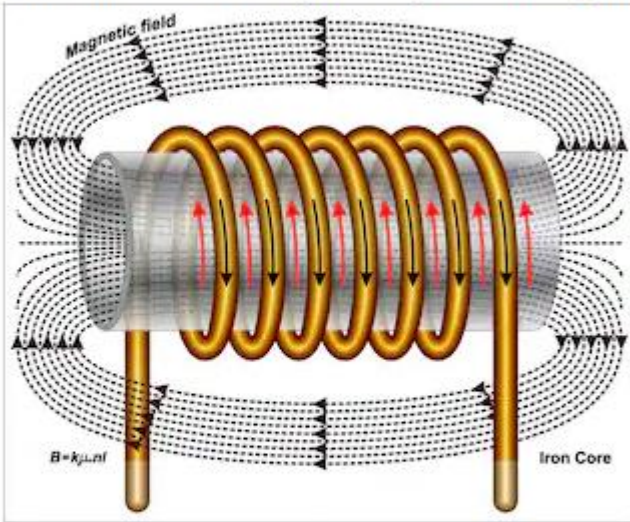
Los dipolos magnéticos se orientan según las líneas de campo. Las cargas e- viajan a lo largo de ellas

La dirección del campo magnético es aquella en la cual ha de moverse una carga para que el campo no ejerza fuerza alguna sobre ella.

Campo Magnético producido por un hilo conductor

Recordando...

Solenoide o bobina de hilo de Cu enrollada de n espiras y de longitud l



Intensidad de Campo magnético

$$H = 0,4 \pi \cdot n \cdot i / l$$

DENSIDAD DE FLUJO MAGNETICO O INDUCCIÓN MAGNÉTICA

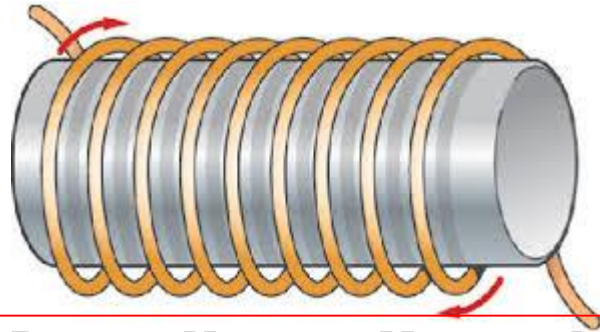
$$B = \mu \cdot H$$

μ ==> Permeabilidad Magnética

El campo H produce líneas de fuerza
La densidad de estas líneas

$$\frac{F}{q \cdot v \cdot \sin \varphi} = \text{cte}'' = B = |\vec{B}|$$

Barra de hierro dentro de un solenoide = ELECTROIMÁN



$$B = \mu \cdot H = \mu_0 \cdot H + \mu_0 \cdot M$$

Campo externo Campo inducido

La magnetización aparece cuando se aplica B a un cuerpo
 Densidad de momentos dipolares magnéticos

$$\vec{M} = \frac{d\vec{\mu}}{dV}$$

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

N: número total de espiras
 l: longitud del solenoide
 i: intensidad de corriente.

Unidades de magnitudes magnéticas

Magnitud magnética	Unidades de SI	Unidades CGS
B (inducción magnética)	Weber/metro ² (Wb/m ²) o tesla (T)	Gauss (G)
H (campo aplicado)	Amperio/metro (A/m)	Oersted (Oe)
M (imanación)	Amperio/metro (A/m)	

Campo magnético producido por Materiales

Susceptibilidad Magnética χ

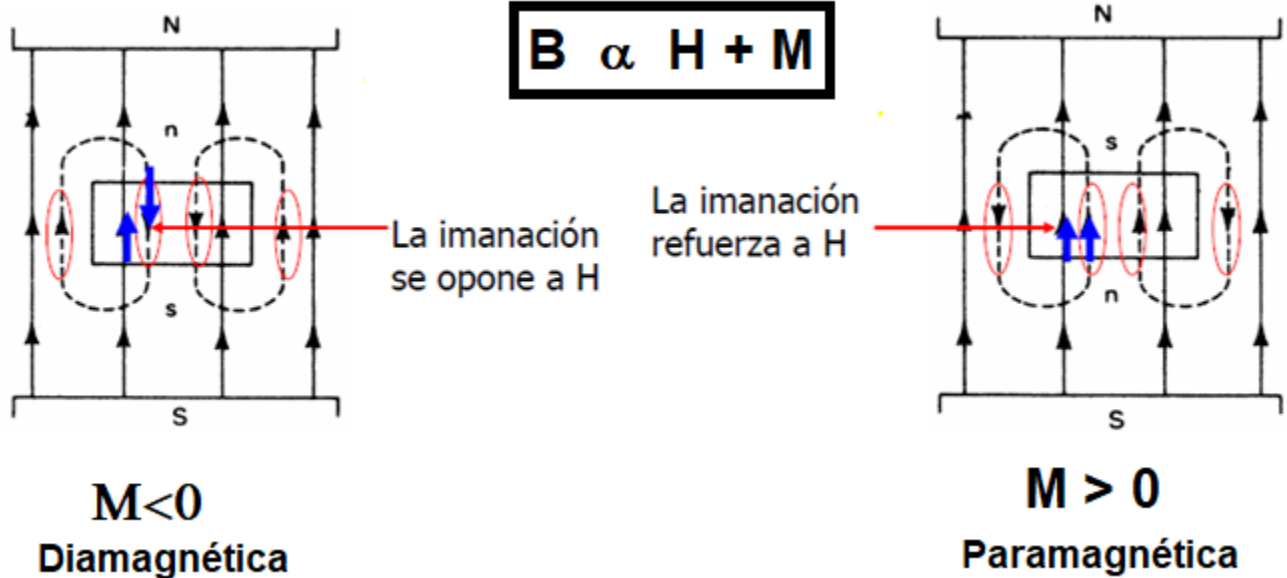
χ_v = Susceptibilidad magnética por unidad de volumen.

$$\chi_v = M/H$$

Sensibilidad a la magnetización

+ ó - negativo si la imanación de la muestra refuerza o si se opone al campo.

Inducción magnética (B)

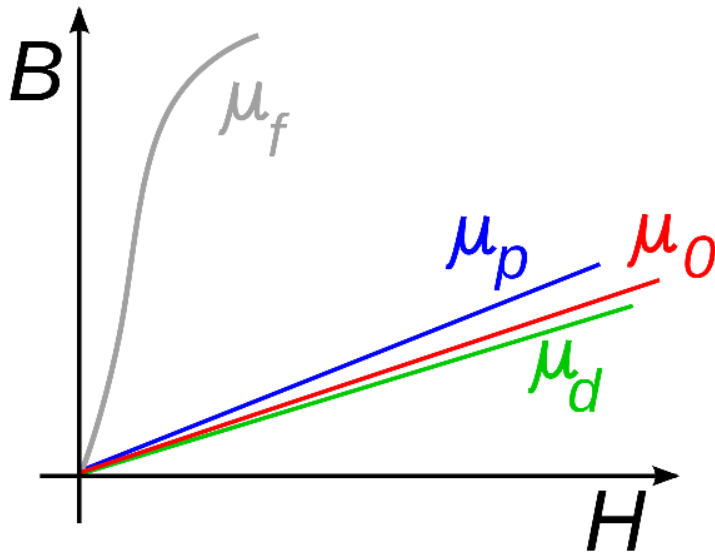


Materiales Magnéticos

Se caracterizan por su permeabilidad:

$$\mu = B/H$$

Mide el incremento del campo magnético debido a la presencia de un material imantado



$$\mu = \mu_0(1 + X_m)$$

$$\mu_r = \mu/\mu_0(1 + X_m)$$

μ = permeabilidad magnética absoluta

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío

X_m = susceptibilidad magnética del material

Paramagnéticos o no magnéticos, $\mu \sim 1$
Aire, Al, Pd

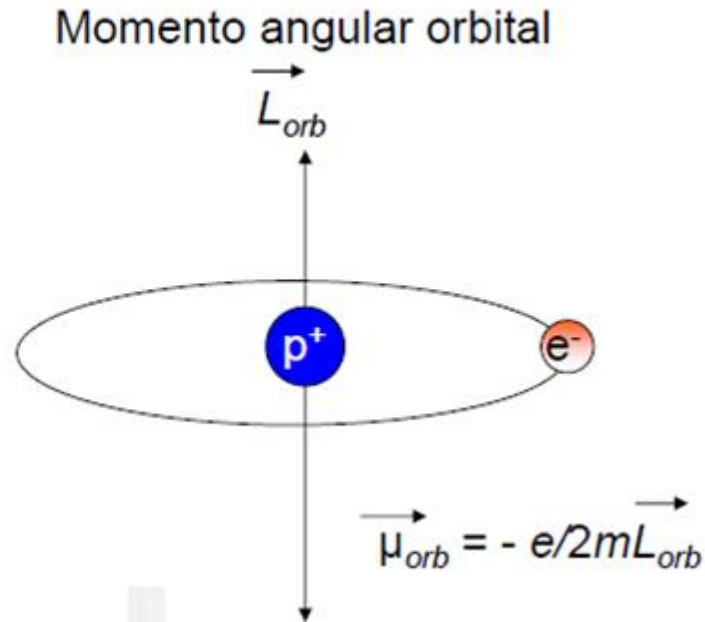
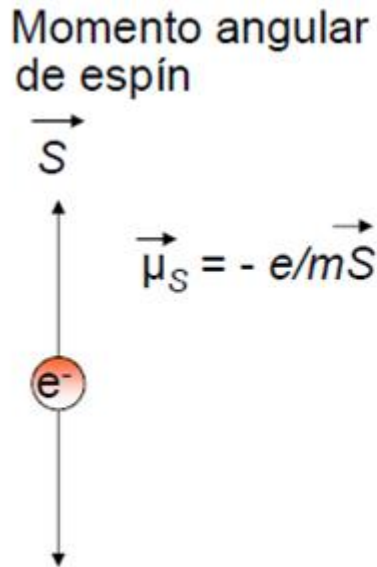
Diamagnéticos o magnéticos débiles, $\mu < 1$
Cu, He, Bi, Ag, Pb, agua

Magnetismo en sólidos

Describe diferentes comportamientos de materiales sometidos a la acción de B externo.

Electrones \rightarrow propiedades magnéticas (es un imán)

$H \rightarrow$ interactúa con los e^- del material $\left\{ \begin{array}{l} \text{Momento angular orbital} \\ \text{Momento angular espín} \end{array} \right.$



MOMENTOS MAGNÉTICOS ATÓMICOS

- Electrón girando en torno a un núcleo

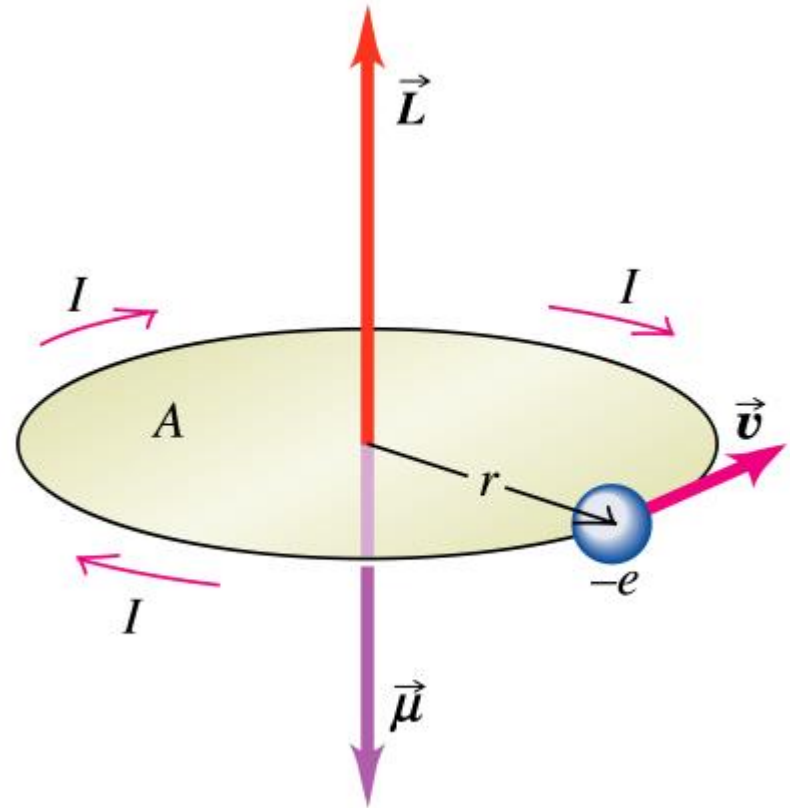
Momento magnético

$$m = IA = -e v (\pi r^2) = \frac{-e \hbar L}{2m \hbar}$$

$$\vec{m} = -\mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$$

Magnetón de Bohr

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$$



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Magnetón de Bohr: Unidad cuántica del momento magnético

- El electrón tiene además momento interno (spín)
- Momento magnético total

$$\vec{m} = -\mu_B \left(\frac{\vec{L}}{\hbar} + \gamma \frac{\vec{S}}{\hbar} \right)$$

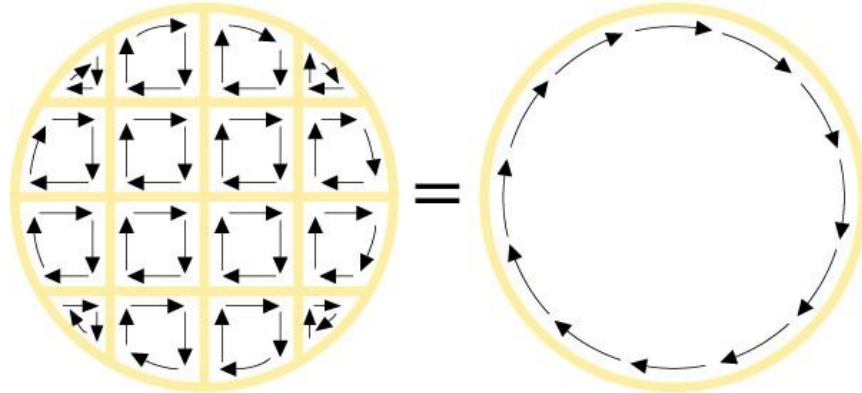
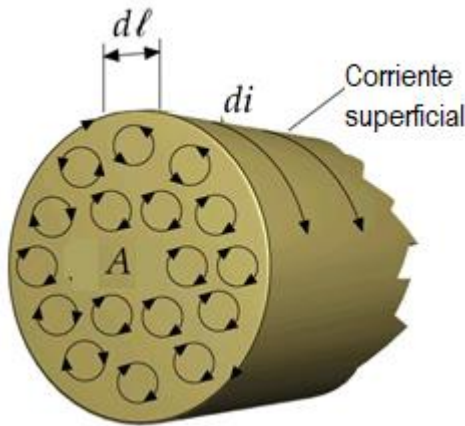
Factor giromagnético γ para
e-: -2,0024

- **Átomos:**

- Crean campos magnéticos.
- Pueden tener momentos dipolares inducidos.
- Se orientan según el campo magnético.

MAGNETIZACIÓN

- Cuando el material presenta momento magnético aparecen corrientes microscópicas.
- Se crea una corriente superficial de carga.



En el interior la corriente es nula!!!

Magnetización: Momento dipolar magnético por unidad de volumen.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dVol}$$

$$d\vec{m} = di \vec{A}$$

$$dVol = A dl$$

Corriente / longitud

$$M = \frac{di}{dl}$$

Magnetización de saturación → Todos los dipolos orientados

$$\vec{M}_s = n \vec{m}$$

n= moléculas/volumen

CAMPO DE IMANTACIÓN y \vec{H}

- La magnetización en casi todos los materiales es proporcional al campo aplicado B_0 .

$$\vec{B}_m = \mu_0 \vec{M}$$

- Si el material está imantado crea un campo de imantación
- El campo total resulta:

$$\vec{M} = \chi_m \frac{B_0}{\mu_0}$$

$$\vec{B}_T = B_0 + B_m$$

Excitación magnética (H)

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

$$\vec{B}_T = \mu_r \vec{B}_0$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

$$\vec{B}_m = \chi_m \vec{B}_0$$

Tipos de Materiales Magnéticos

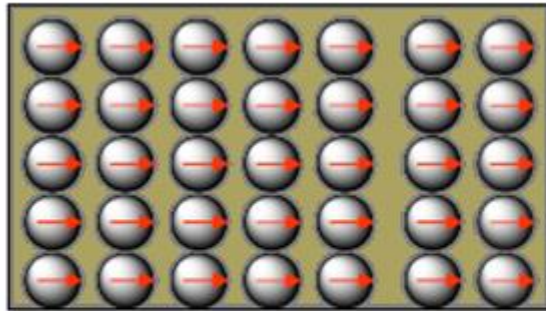
Diamagnéticos

Paramagnéticos

Ferromagnéticos

Depende del comportamiento de sus momentos magnéticos frente a un campo magnético externo

DIAMAGNETISMO



Material

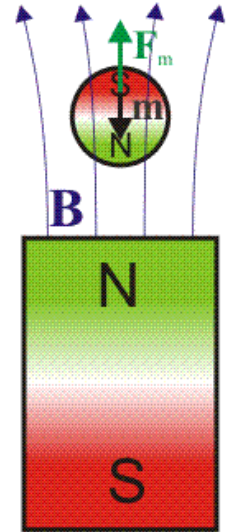
H externo



$$\chi < 0$$

- Desequilibrio ligero de los electrones en movimiento
- Pequeños dipolos magnéticos en los átomos que se oponen al H aplicado.

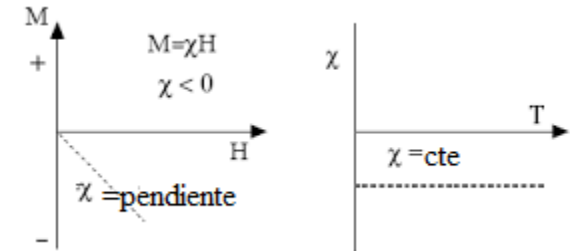
- Faraday (1846).
- El campo de magnetización es opuesto al aplicado ($\chi_m < 0$)
- Efecto presente en todos los materiales.
- Se observa en *materiales que no tienen momentos magnéticos permanentes*
- Las “espiras” atómicas crean corrientes magnéticas inducidas.



- Determinada por la movilidad de electrones.
- Mayor con el incremento en el número de electrones del átomo

En materiales con momento magnético permanente este efecto está enmascarado.
 Los materiales **superconductores** son diamagnéticos perfectos $\chi_m = -1$

$$\vec{B}_m = -\vec{B}_0 \Rightarrow \vec{B}_T = 0$$



- antiferromagnético
- ferromagnético
- diamagnético
- paramagnético

1																	18
1	2											13	14	15	16	17	18
H 1.008	He 4.003											B 10.81	C 12.01	N 14.01	O 16.00	F 18.99	Ne 20.18
3	4											13	14	15	16	17	18
Li 6.94	Be 9.012											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.95
11	12											13	14	15	16	17	18
Na 22.99	Mg 24.31											Al 26.98	Si 28.09	P 30.97	S 32.06	Cl 35.45	Ar 39.95
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K 39.10	Ca 40.08	Sc 44.96	Ti 47.88	V 50.94	Cr 51.99	Mn 54.94	Fe 55.85	Co 58.93	Ni 58.69	Cu 63.55	Zn 65.38	Ga 69.72	Ge 72.64	As 74.92	Se 78.96	Br 79.90	Kr 83.80
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.91	Zr 91.22	Nb 92.91	Mo 95.94	Tc 98.91	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.90	Xe 131.29
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs 132.91	Ba 137.33	Lantánidos	Hf 178.49	Ta 180.94	W 183.85	Re 186.21	Os 190.23	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po 209	At 210	Rn 222	
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr 223	Ra 226	Actínidos	Rf 261	Db 262	Sg 263	Bh 264	Hs 265	Mt 266	Ds 267	Rg 268	Cn 272	Uut 273	Fl 274	Uup 275	Lv 276	Uus 277	Uuo 278
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
La 138.91	Ce 140.12	Pr 140.91	Nd 144.24	Pm 144.91	Sm 150.36	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.93	Dy 162.50	Ho 164.93	Er 167.26	Tm 168.93	Yb 173.05	Lu 174.97			
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
Ac 227.03	Th 232.04	Pa 231.04	U 238.03	Np 237.04	Pu 244.06	Am 243.06	Cm 247.07	Bk 247.07	Cf 251.08	Es 252.08	Fm 257.09	Md 258.10	No 259.10	Lr 260.10			

χ_A (contrib diamagn de los átomos)		χ_B (contrib diamagn de los enlaces)	
Átomo	χ_A ($10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)	Enlace	χ_B ($10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)
H	-2,93	C=C	+5,5
C	-6,00	C≡C	+0,8
C (aromático)	-6,24	C=N	+8,2
N	-5,57	C≡N	+0,8
N (aromático)	-4,61	N=N	+1,8

Puede suceder que el efecto magnético negativo se cancele por efectos positivos

Diamagnetismo: aplicaciones

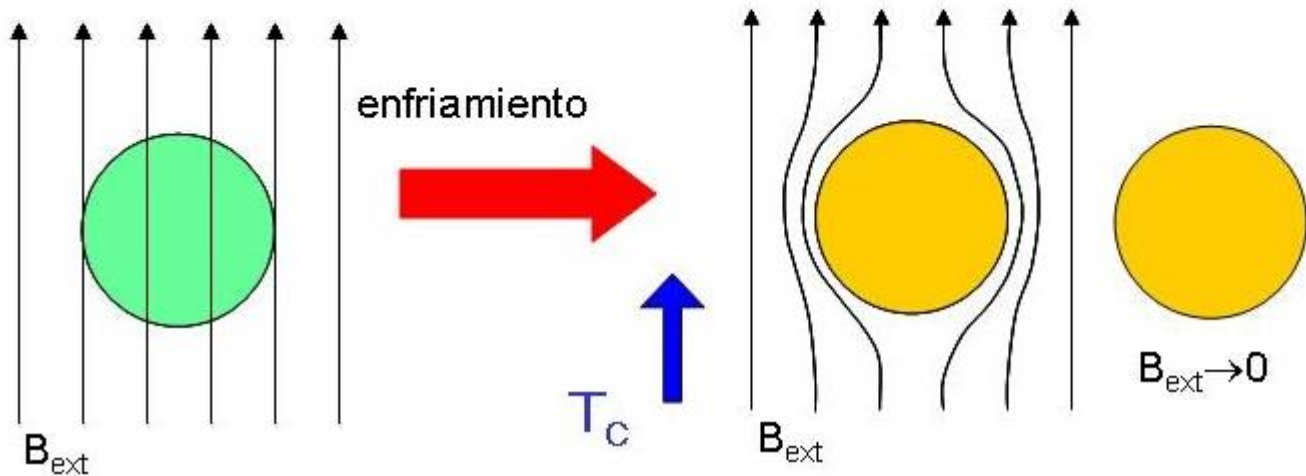
Trenes de levitación magnética usan poderosos electroimanes superconductores para flotar sin tocar la pista.



Superconductor

- Material con $R = 0$
- Diamagnético: repele el campo magnético

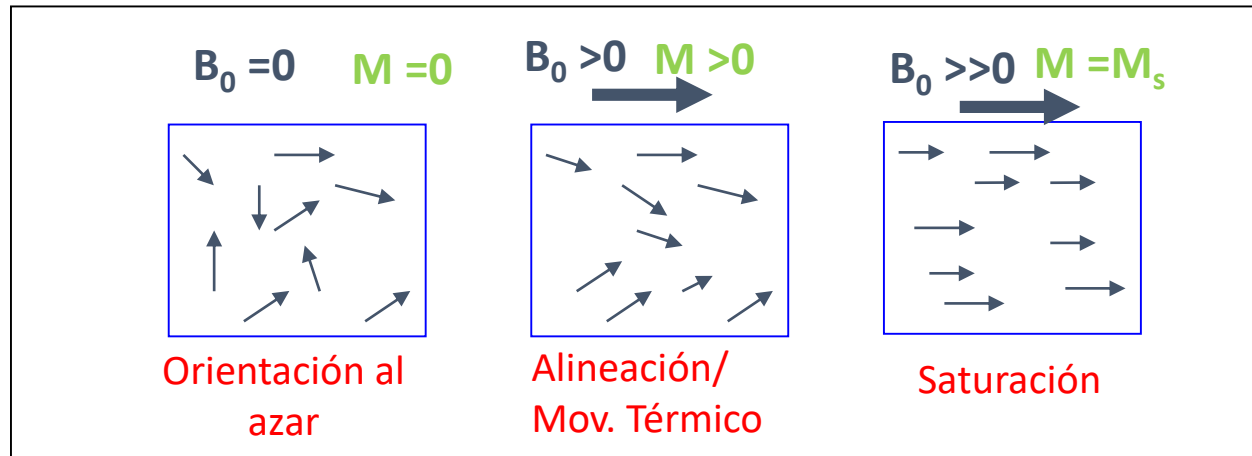
Pero se necesita enfriar.....



PARAMAGNETISMO

- Materiales con momentos magnéticos permanentes que interactúan débilmente entre sí $\chi_m > 0$ (pequeña)
- Magnetización baja
- [permeabilidad magnética](#) es similar a la del [vacío](#).
- Originado por el alineamiento parcial de los spines del electrón o de momentos magnéticos atómicos o moleculares por un campo magnético aplicado

$$\vec{M} = \chi_m \frac{B_0}{\mu_0}$$

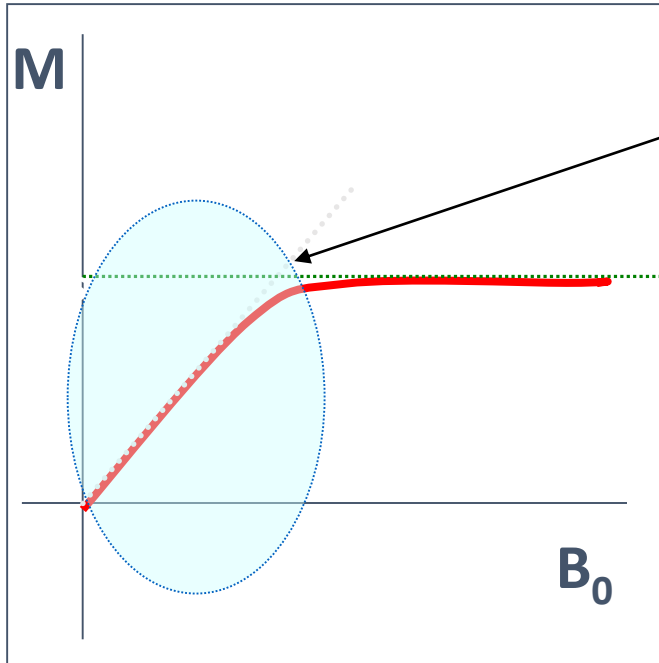


El núcleo atómico posee carga y puede tener momento magnético el cual es mucho menor que el momento angular que genera el electrón. $\mu = 10^{-3}$

[aire](#), [magnesio](#), [aluminio](#), [titanio](#), [wolframio](#).

Ley de Curie

Magnetización frente a campo externo



$$M = \frac{1}{3} \frac{\vec{m} \cdot \vec{B}_0}{KT} M_s$$

$$\chi_m = \frac{1}{3} \frac{m M_s}{KT} \mu_0$$

- Válida para bajos valores del campo aplicado.
- Hay competencia entre la agitación térmica y la alineación magnética.

En un electrón, $\vec{\mu}_L$ y $\vec{\mu}_S$ contribuyen al paramagnetismo.

El $\vec{\mu}$ del electrón desapareado tiende a alinearse con H_{ext} reforzándolo.

$$\chi > 0$$

$$\chi_{\text{paramagnética}} = \chi_M - \chi_{\text{diamagnética}}$$

Paramagnetismo y Ley de Curie

★ En ausencia de H, $M = 0$

Los momentos magnéticos individuales de los electrones, μ_i , se orientan al azar anulándose mutuamente

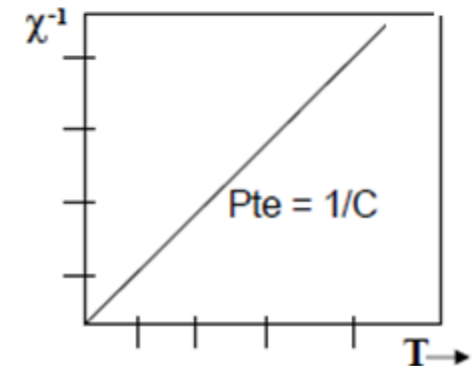
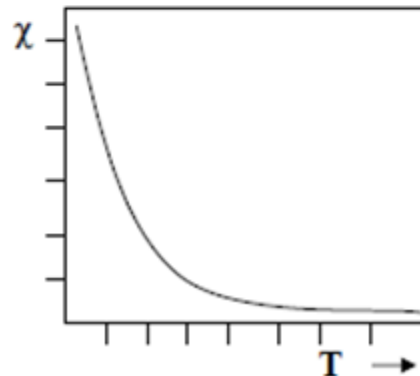
★ En presencia del H, $M \neq 0$

Mayor estabilidad de los estados electrónicos que alinean el momento magnético con H

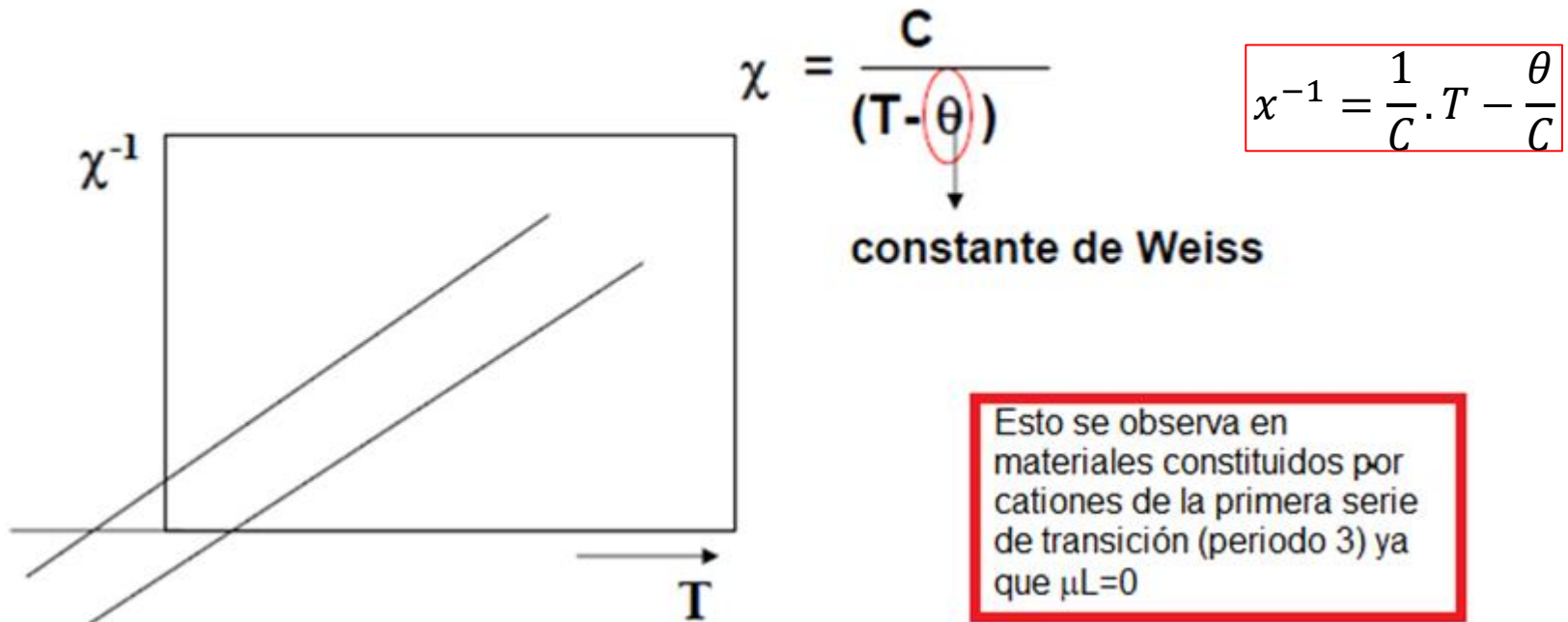
A mayor I del H \Rightarrow más poblados

★ La diferencia de población entre estados y la $\chi <$ al $> T$

Ley de Curie: $\chi = C/T$,
donde C es la cte de Curie,
propia del material



Mejor aproximación se obtiene Ley de Curie-Weiss



$$\mu_{\text{exp}(MB)} = \sqrt{8C}$$

Independiente de T

$$\mu_{\text{teor}(MB)} = \sqrt{\mu_L + \mu_s}$$

FERROMAGNETISMO

- Se presenta en Fe, Co, Ni y aleaciones.

1 1 H 1.00794 1.008 1.00784	2 4 Li 6.941 6.941	3 9 Be 9.0122 9.0122	4 11 Na 22.98976928 22.98976928	5 12 Mg 24.304 24.304	6 19 K 39.0983 39.0983	7 20 Ca 40.078 40.078	8 21 Sc 44.955912 44.955912	9 22 Ti 47.88 47.88	10 23 V 50.9415 50.9415	11 24 Cr 51.9961 51.9961	12 25 Mn 54.938044 54.938044	13 26 Fe 55.845 55.845	14 27 Co 58.933195 58.933195	15 28 Ni 58.6934 58.6934	16 29 Cu 63.546 63.546	17 30 Zn 65.38 65.38	18 31 Ga 69.723 69.723	19 32 Ge 72.64 72.64	20 33 As 74.9216 74.9216	21 34 Se 78.96 78.96	22 35 Br 79.904 79.904	23 36 Kr 83.80 83.80	24 37 Rb 85.468 85.468	25 38 Sr 87.62 87.62	26 39 Y 88.906 88.906	27 40 Zr 91.224 91.224	28 41 Nb 92.906 92.906	29 42 Mo 95.94 95.94	30 43 Tc 98.906 98.906	31 44 Ru 101.07 101.07	32 45 Rh 102.905 102.905	33 46 Pd 106.42 106.42	34 47 Ag 107.868 107.868	35 48 Cd 112.411 112.411	36 49 In 114.818 114.818	37 50 Sn 118.710 118.710	38 51 Sb 121.757 121.757	39 52 Te 127.60 127.60	40 53 I 126.905 126.905	41 54 Xe 131.29 131.29	42 55 Cs 132.905 132.905	43 56 Ba 137.327 137.327	44 57 La 138.905 138.905	45 58 Ce 140.12 140.12	46 59 Pr 140.90764 140.90764	47 60 Nd 144.242 144.242	48 61 Pm 144.91264 144.91264	49 62 Sm 150.358 150.358	50 63 Eu 151.964 151.964	51 64 Gd 157.25 157.25	52 65 Tb 158.92534 158.92534	53 66 Dy 162.50033 162.50033	54 67 Ho 164.93032 164.93032	55 68 Er 167.259 167.259	56 69 Tm 168.93032 168.93032	57 70 Yb 173.05446 173.05446	58 71 Lu 174.96706 174.96706	59 72 Hf 178.49 178.49	60 73 Ta 180.94788 180.94788	61 74 W 183.84 183.84	62 75 Re 186.207 186.207	63 76 Os 190.23 190.23	64 77 Ir 192.222 192.222	65 78 Pt 195.084 195.084	66 79 Au 196.966569 196.966569	67 80 Hg 200.59 200.59	68 81 Tl 204.38 204.38	69 82 Pb 207.2 207.2	70 83 Bi 208.980386 208.980386	71 84 Po 209 209	72 85 At 210 210	73 86 Rn 222 222	74 87 Fr 223 223	75 88 Ra 226 226	76 89 Ac 227 227	77 90 Th 232.0375 232.0375	78 91 Pa 231.036888 231.036888	79 92 U 238.02891 238.02891	80 93 Np 237.048173 237.048173	81 94 Pu 244.06422 244.06422	82 95 Am 243.061381 243.061381	83 96 Cm 247.070353 247.070353	84 97 Bk 247.070353 247.070353	85 98 Cf 251.083208 251.083208	86 99 Es 252.083208 252.083208	87 100 Fm 257.103756 257.103756	88 101 Md 258.103756 258.103756	89 102 No 259.103756 259.103756	90 103 Lr 262.103756 262.103756
--	--------------------------------	----------------------------------	---	-----------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	---	---------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	--	------------------------------------	--	--------------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--	--------------------------------------	--	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--	--	--	--------------------------------------	--	--	--	------------------------------------	--	-----------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	--	------------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	--	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	---	---	---	---

También aceros y aleaciones

58 82 Ce 140.12 140.12	59 83 Pr 140.90764 140.90764	60 84 Nd 144.242 144.242	61 85 Pm 144.91264 144.91264	62 86 Sm 150.358 150.358	63 87 Eu 151.964 151.964	64 88 Gd 157.25 157.25	65 89 Tb 158.92534 158.92534	66 90 Dy 162.50033 162.50033	67 91 Ho 164.93032 164.93032	68 92 Er 167.259 167.259	69 93 Tm 168.93032 168.93032	70 94 Yb 173.05446 173.05446	71 95 Lu 174.96706 174.96706	90 104 Th 232.0375 232.0375	91 105 Pa 231.036888 231.036888	92 106 U 238.02891 238.02891	93 107 Np 237.048173 237.048173	94 108 Pu 244.06422 244.06422	95 109 Am 243.061381 243.061381	96 110 Cm 247.070353 247.070353	97 111 Bk 247.070353 247.070353	98 112 Cf 251.083208 251.083208	99 113 Es 252.083208 252.083208	100 114 Fm 257.103756 257.103756	101 115 Md 258.103756 258.103756	102 116 No 259.103756 259.103756	103 117 Lr 262.103756 262.103756
------------------------------------	--	--------------------------------------	--	--------------------------------------	--------------------------------------	------------------------------------	--	--	--	--------------------------------------	--	--	--	---	---	--	---	---	---	---	---	---	---	--	--	--	--

No observable en elementos de la 2ª y 3ª serie de transición.

Los orbitales 4d y 5d son más difusos y dan origen a bandas más anchas

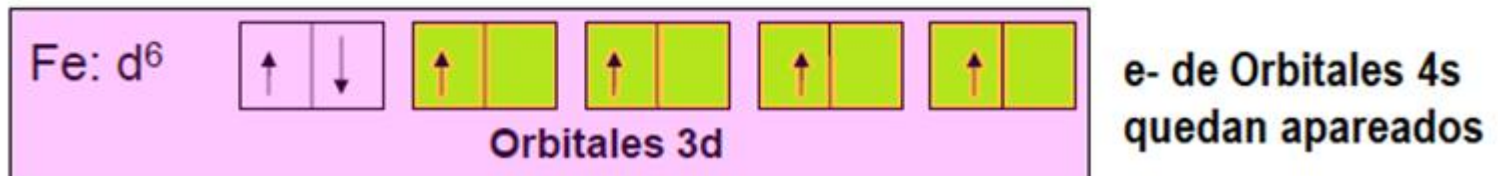
FERROMAGNETISMO

- Existen interacciones entre los espines de los electrones. → alto grado de alineamiento → Fuerte interacción entre dipolos magnéticos vecinos
- La susceptibilidad $\chi_m > 0$ (grande)
- Magnetización alta aún para valores del campo externo bajos.
- En ausencia de campo existen dominios magnéticos con magnetización no es nula.
→ **tienen sus momentos alineados → magnetos permanentes.**

Presentan imanación espontánea.

Materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con $T_c \gg$

Alineamiento en la red cristalina de electrones desapareados situados en los orbitales 3d



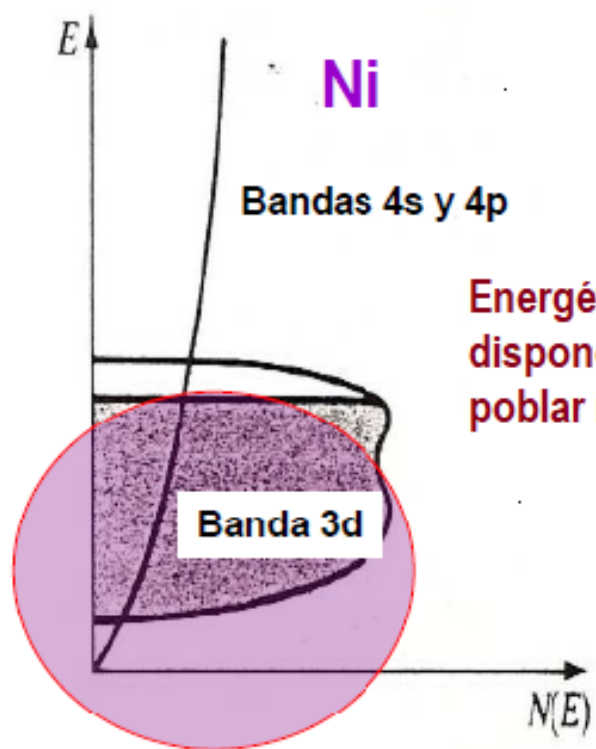
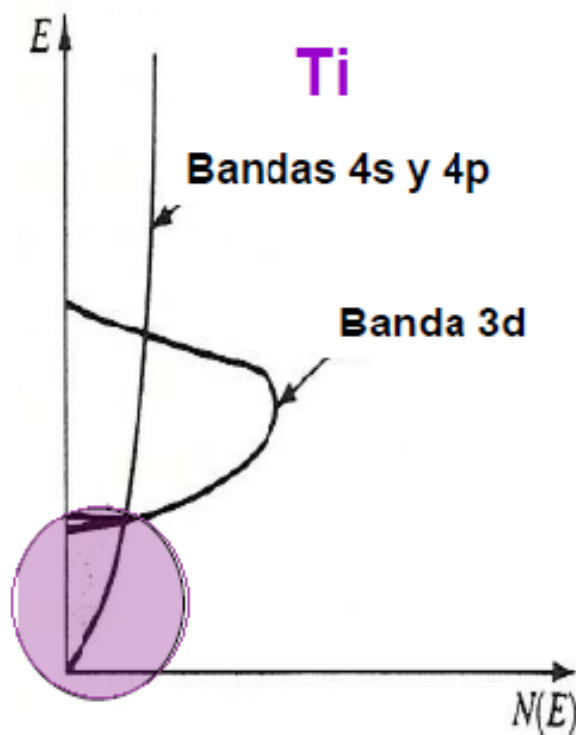
Ojo... Con ferrimagnetismo!!!

Electrones desapareados 3d	Átomo	Número de electrones	Configuración electrónica de los orbitales 3d	Electrones 4s
2	Ti	22		2
2	Ni	28		2

Ocurre en bandas parcialmente llenas con alta densidad de estados cerca del nivel de Fermi



$Fe: 3d^6$, $Co: 3d^7$, $Ni: 3d^8$



Energéticamente favorable es disponer de e- no apareados para poblar niveles de $E >$

Fe (4e-); $T_c = 1043$ K
 Co (3e-); $T_c = 1388$ K
 Ni (2e-); $T_c = 627$ K


Ferromagnetismo

$T < T_c$ **Magnetización**

Alineación de espines de e- en regiones microscópicas



Dominios magnéticos



Tamaños entre 10^{-12} y 10^{-8} m³
y contienen entre 10^{21} y 10^{27} átomos

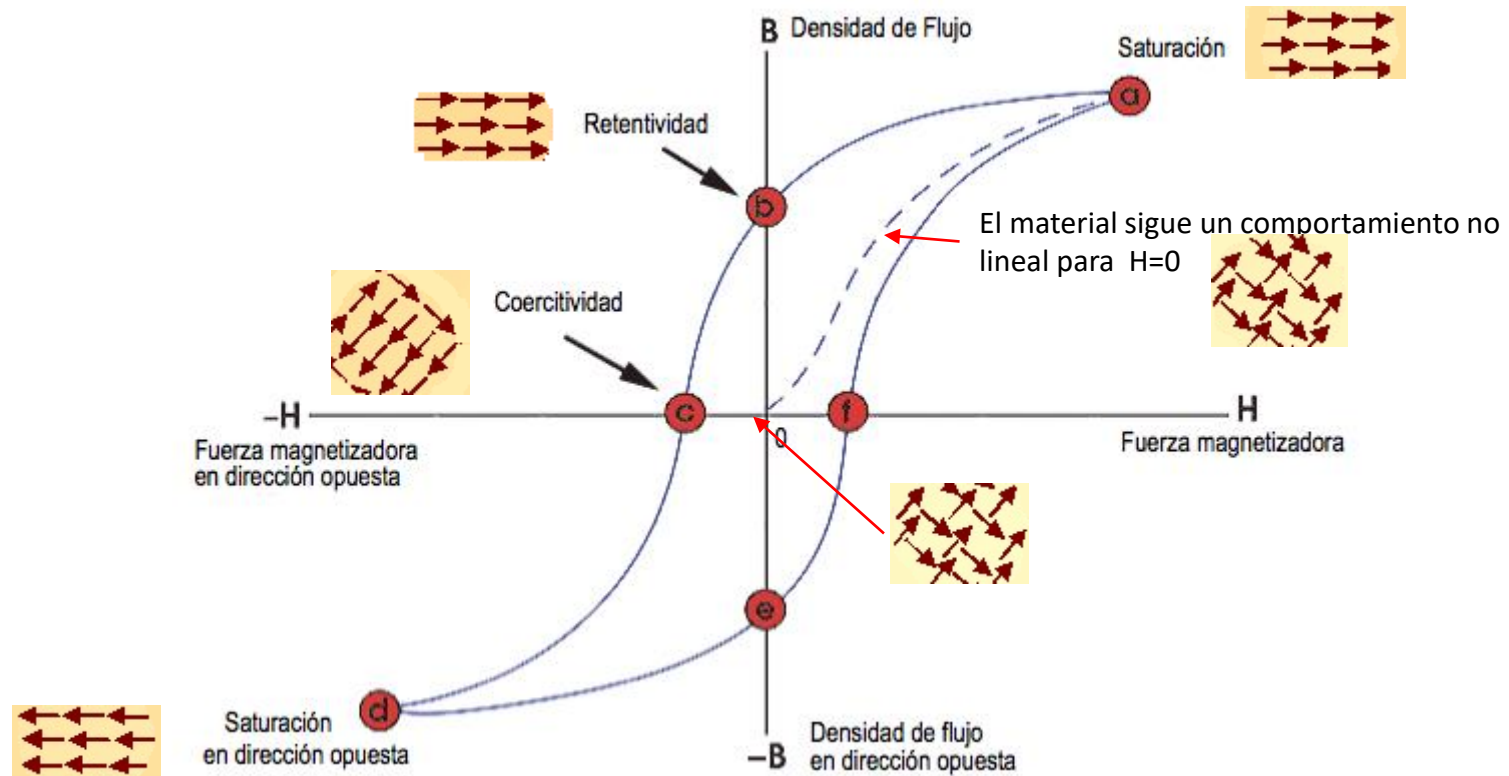
$T > T_c$ **Desmagnetización**

Analizar Ciclo de Histéresis !!!

Ciclo de Histéresis

Una propiedad característica de los materiales ferromagnéticos

Cambio de la magnetización al variar H



a) Alineación de dominios magnéticos

b) $H=0$

Material Ferromag (MF) retiene un grado de magnetización

c) Campo impulsor mag. debe invertirse \rightarrow Magnetiz (B)=0

d) Alineación de dominios magnéticos (sentido opuesto)

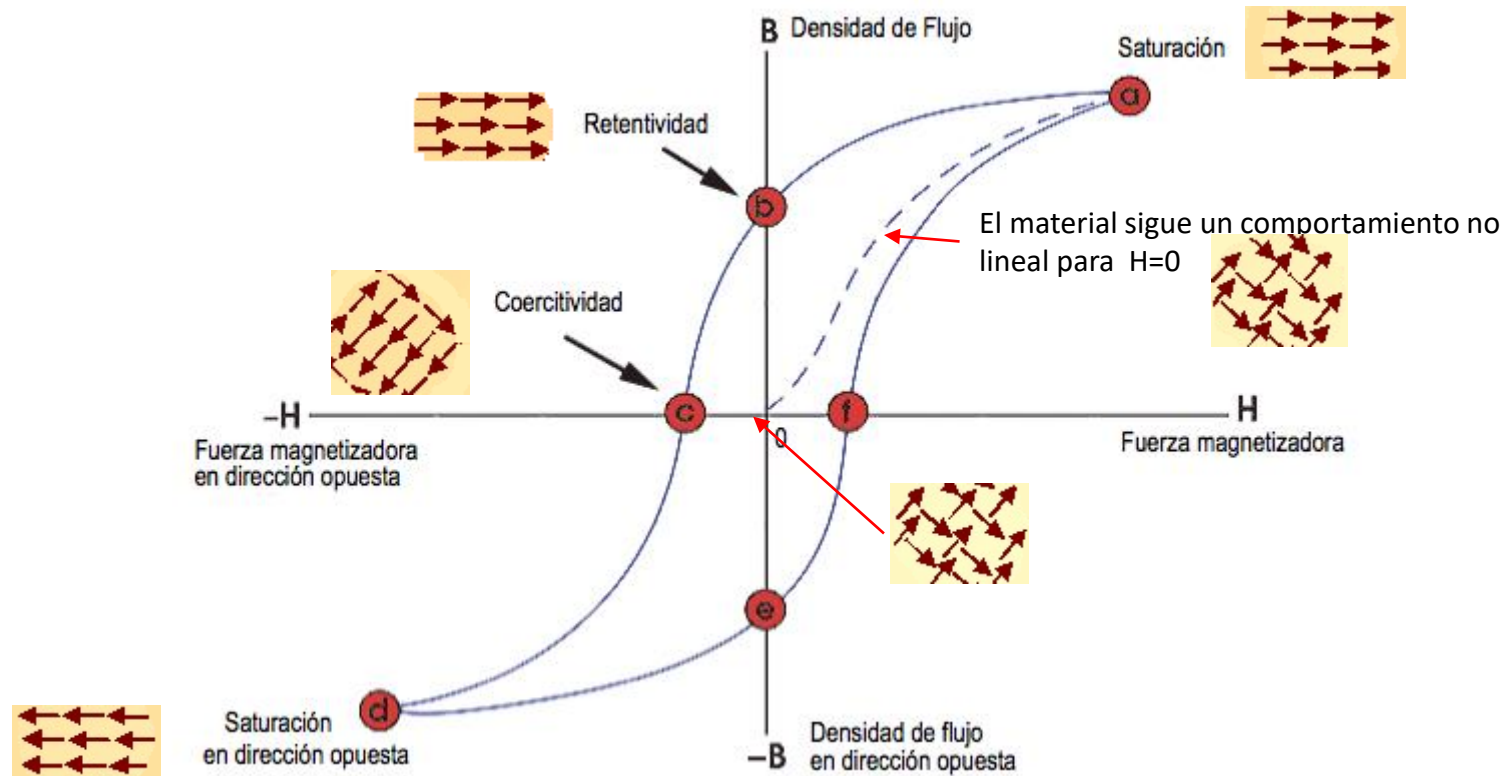
e) La pendiente de histéresis muestra la memoria de magnetización del mat FM

f) Intensidad de H aplicado

Ciclo de Histéresis

Una propiedad característica de los materiales ferromagnéticos

Cambio de la magnetización al variar H



a) Alineación de dominios magnéticos

b) $H=0$

Material Ferromag (MF) retiene un grado de magnetización

c) Campo impulsor mag. debe invertirse \rightarrow Magnetiz (B)=0

d) Alineación de dominios magnéticos (sentido opuesto)

e) La pendiente de histéresis muestra la memoria de magnetización del mat FM

f) Intensidad de H aplicado

Magnetización- Desmagnetización

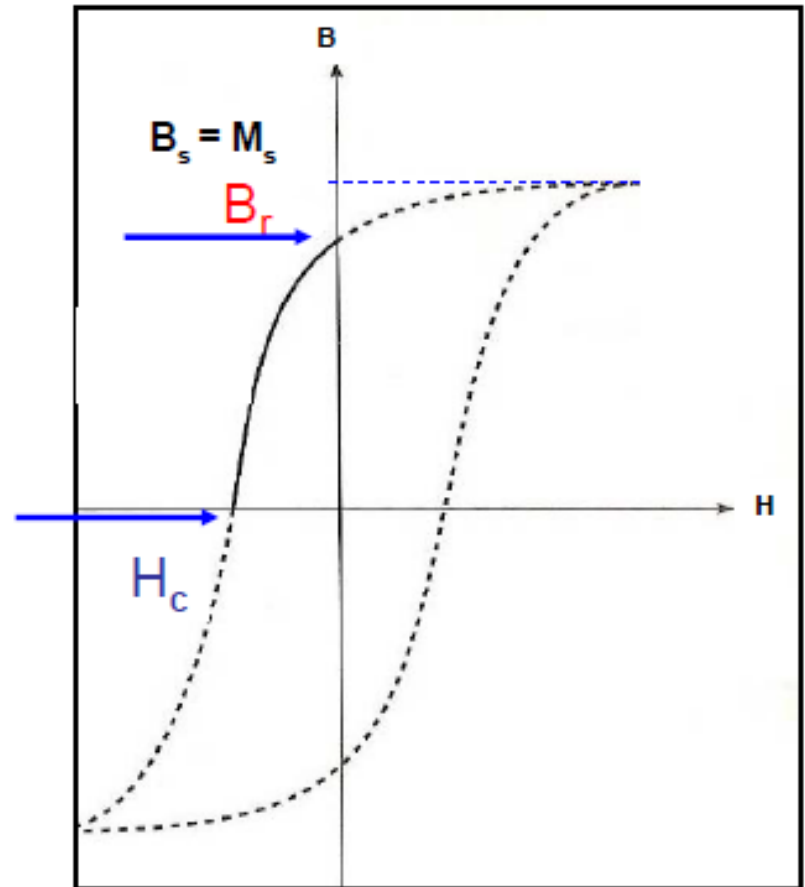
Magnetización remanente B_r ($H = 0$)

Indicativo de la habilidad del material para actuar como imán permanente.

Campo coercitivo H_c

Campo magnético necesario para anular el flujo magnético dentro del imán.

Indicativo de la habilidad del imán para soportar factores desmagnetizantes.



Material Ferromagnético Duro o Blando

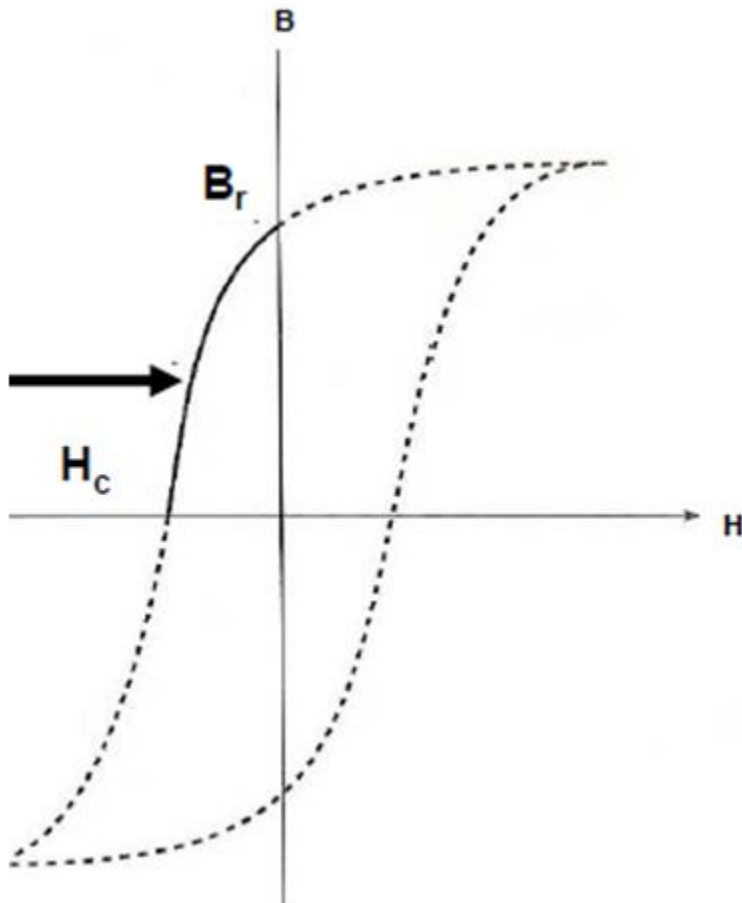


Duros → Imanes permanentes.

Blandos → imanes temporarios.

Cambia su ciclo de histéresis → Analizar!!

Magnetización- Desmagnetización



Potencial de material magnético duro

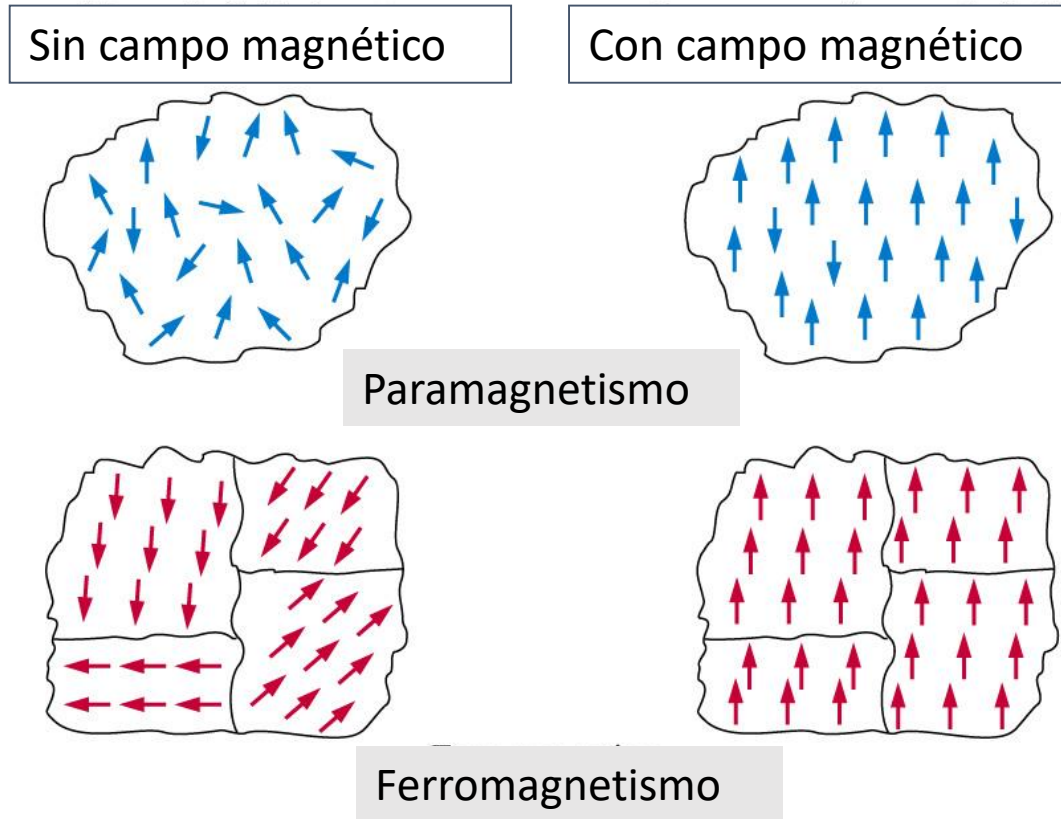
$$E_{\text{máx}} = [B \times H]_{\text{máx}}$$

Evalúo en cuadrante desmagnetizador de H-B

Imán = Material capaz de almacenar E

$$E = (B_r \times H_c)_{\text{max}}$$

- Al aplicar H, los dominios se orientan todos en dirección al campo externo.



A temperaturas altas ($T > T_{\text{Curie}}$) se convierten en materiales paramagnéticos a causa de la agitación térmica.

Energías involucradas en la estructura de dominios FM

- E° de transformación.
- E° magnetostática
- E° anisotropía magnética (E° cristalina)
- E° de pared de dominio
- E° magnetoestricción

ESTRUCTURA MAGNÉTICA ESTABLE

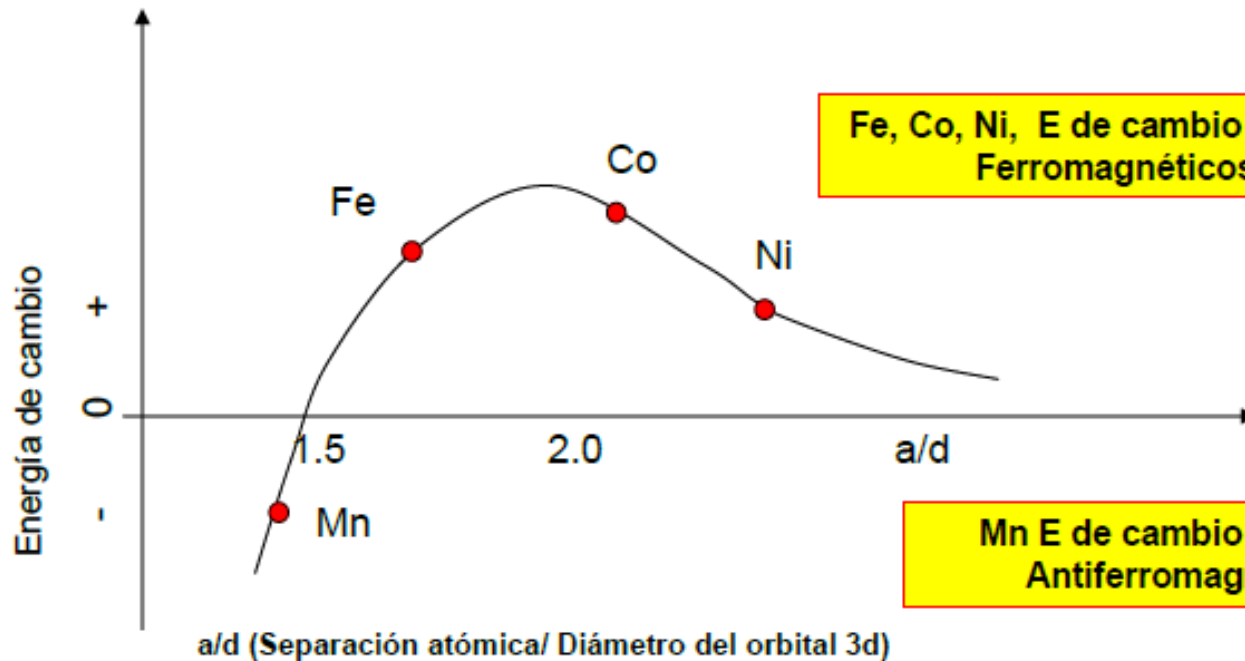
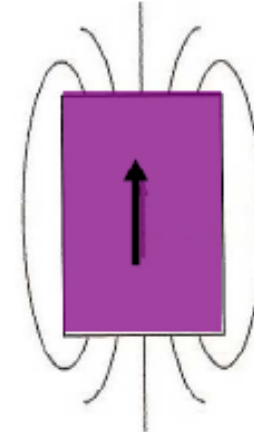


E° potencial total mínima

- **E° de transformación de los dominios**

Energía asociada a la alineación de los dipolos atómicos en la misma dirección

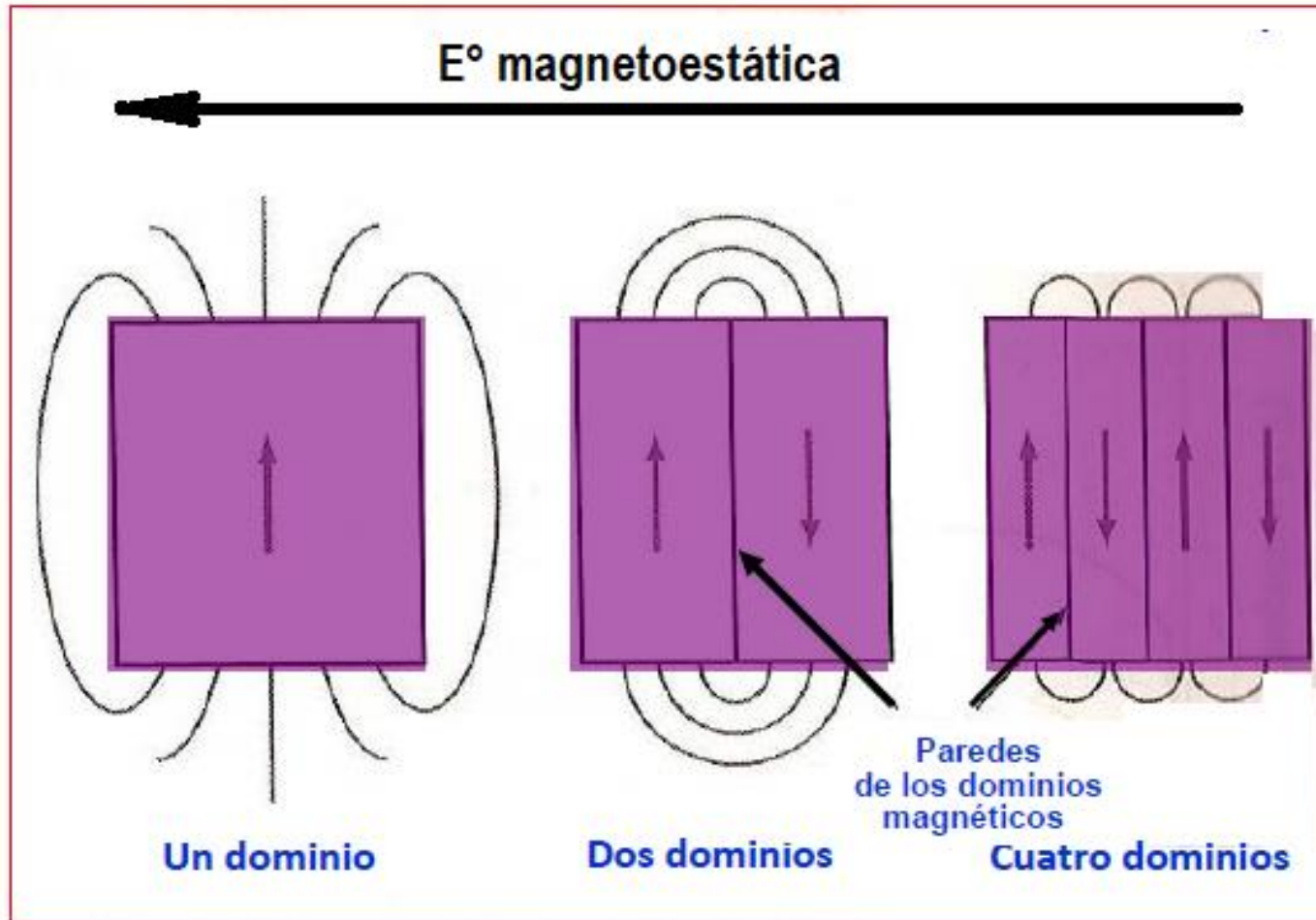
La formación de un solo dominio minimiza la E dentro de un material ferromagnético



Fe, Co, Ni, E de cambio positiva
Ferromagnéticos

Mn E de cambio negativa
Antiferromagnético

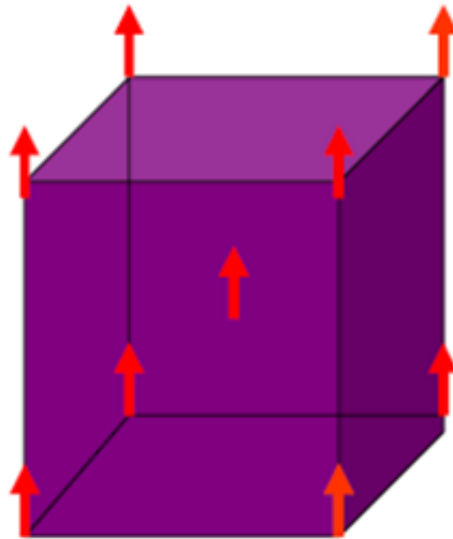
- **E° Magnetoestática**



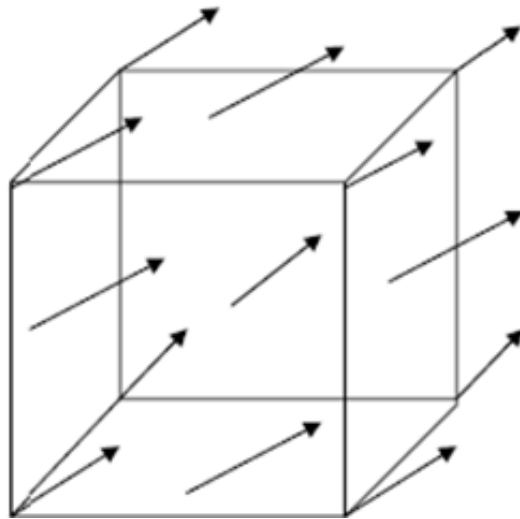
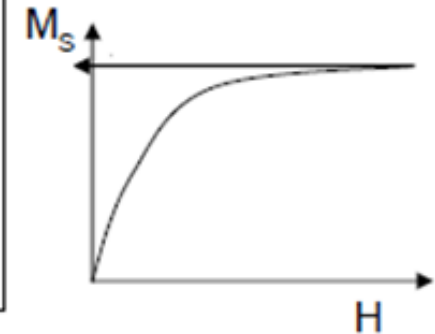
La formación de dominios múltiples reduce la E magnetos

- **E° de anisotropía magnetocristalina**

*Trabajo para girar los dominios



α -Fe
Momentos magnéticos
debidos al espín del Fe
alineados y la
orientación coincide
con la red cristalográfica

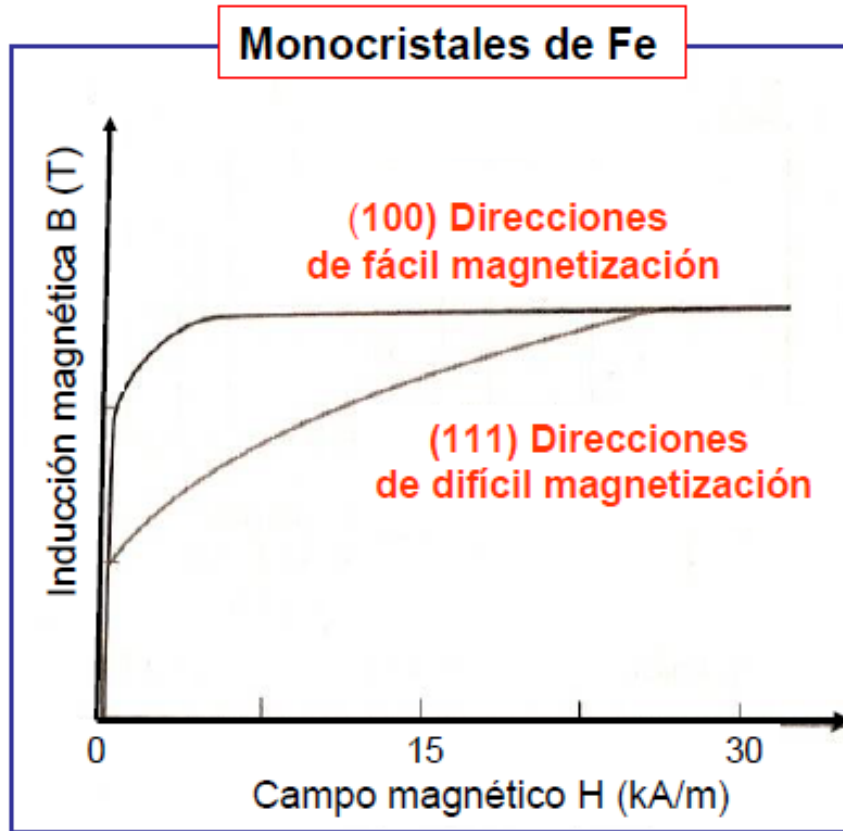


Ni (FCC)

La dirección de magnetización no es una
dirección simple!!

> anisotropía => preferencia en dirección de imantación

- **E° de anisotropía magnetocristalina**



Granos que saturan a $\ll H$

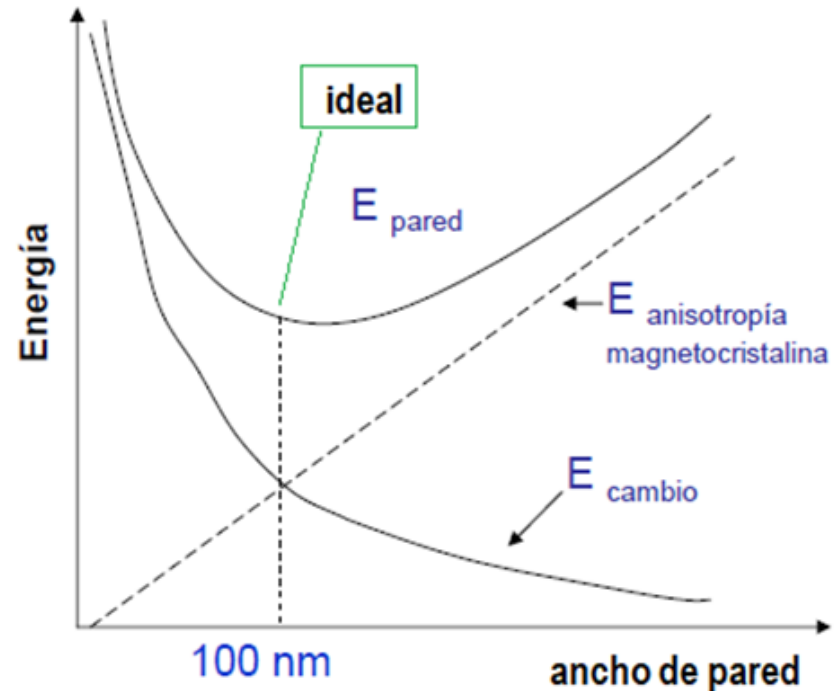
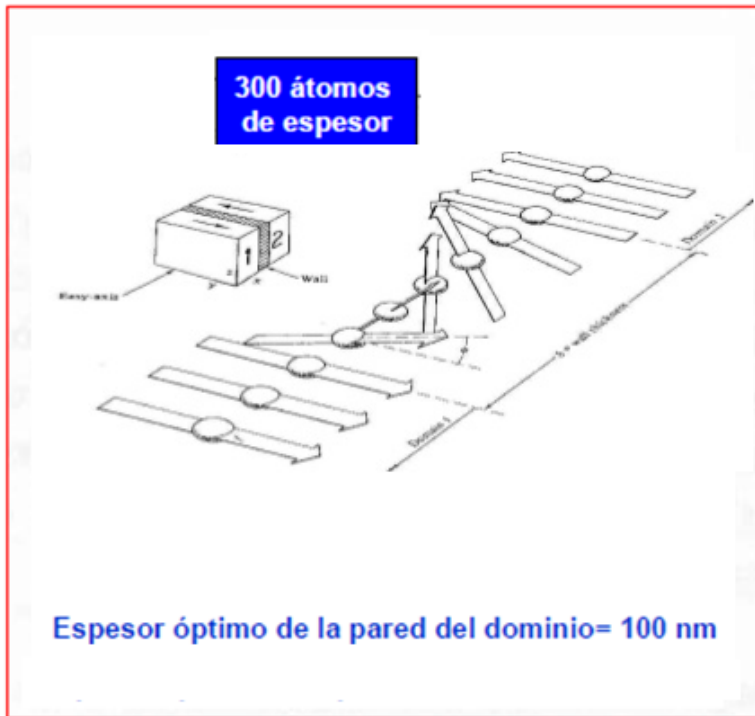
Los granos deben girar su momento resultante en la dirección del H_{aplicado} para alcanzar alcanzar la M_s a $\gg H$

Esencial para la posterior aplicación de los materiales ferromagnéticos duros y blandos

Ideal es tener monocristales

• E° de Pared de Dominio

* Cambio de 180° que experimenta el dominio en dirección de H



Rotación de m entre dominios a 180° implica un incremento de energía. Se puede estimar que la energía de las paredes de los dominios debido a esa rotación por unidad de área es

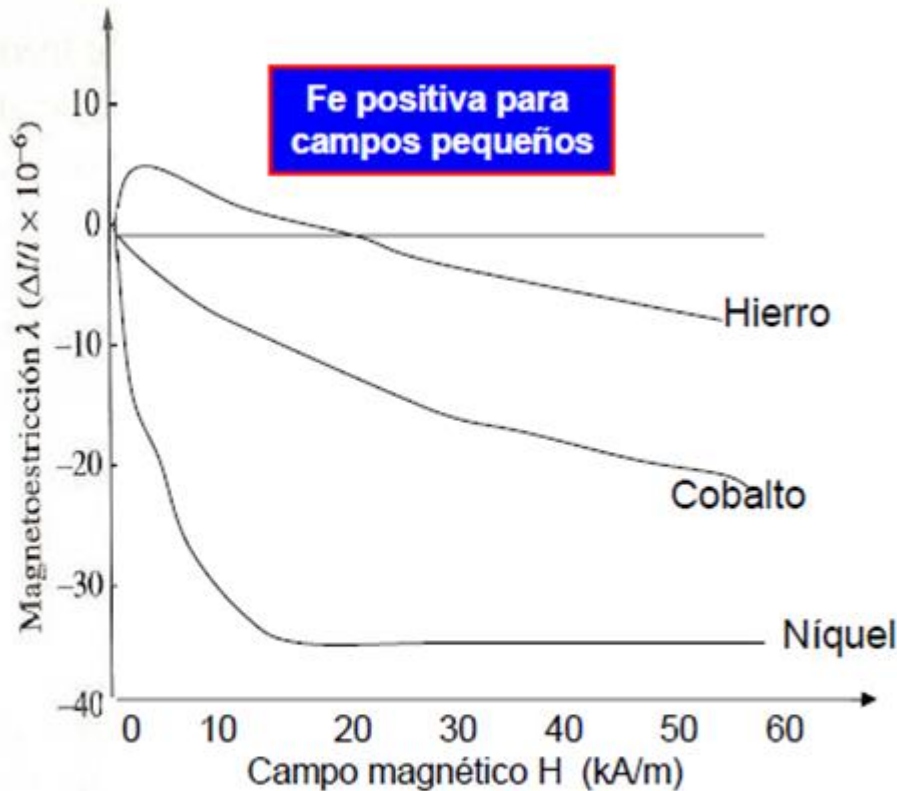
$$\gamma = 4(A K_1)^{1/2} = 4 \left(\frac{k T_C K_1}{a} \right)$$

Donde A es el parámetro de canje magnético

Importante porque si hay pequeñas variaciones de A o K_1 dentro del material (por bordes de grano, segundas fases, inclusiones o defectos) $\Rightarrow \delta$ dependerá de la posición de la pared

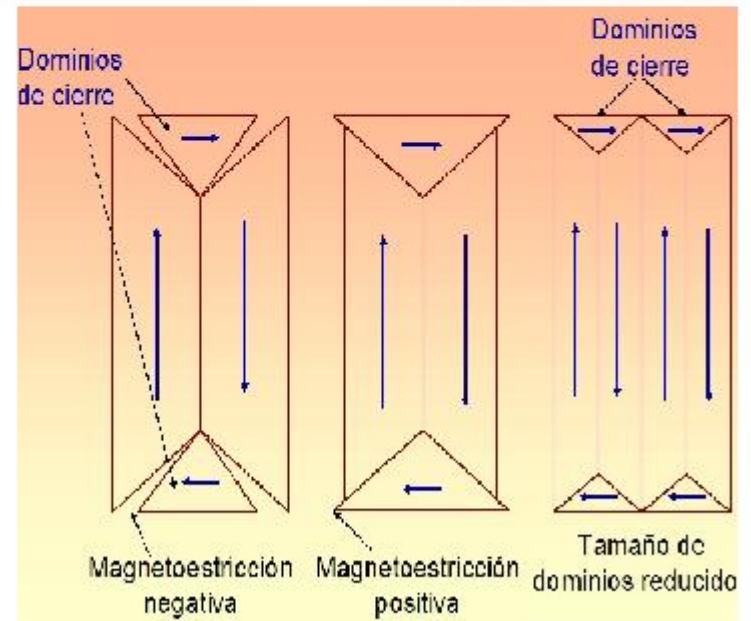
• E° Magnetoestrictiva

*A causa de las tensiones mecánicas generadas por magnetización



Fe positiva para campos pequeños

Contracción o expansión en la dirección de magnetización

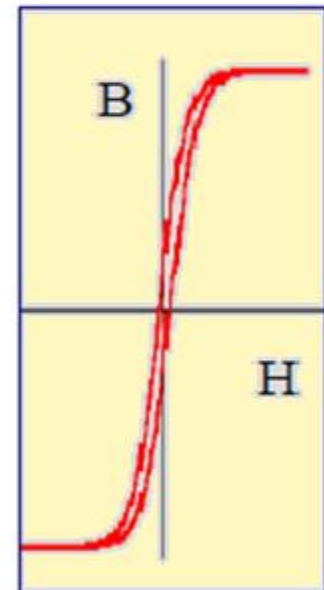


< magnetoestricción por creación de Dominios reducidos

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS

PROPIEDADES DESEABLES

- Ciclo de histéresis lo más fino posible
El material se magnetiza con H poco intenso \Rightarrow alta $\mu = B/H$
- Bajo campo coercitivo, H_c , para desimanar
- Alta inducción de saturación, B_s
- Libre de defectos (monocristal)



Cuando un material ferromagnético blando es imanado y desimanado repetidas veces

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Ferritas blandas de composición $MO \times Fe_2O_3$
($M = Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$) y estructura espinela inversa

Materiales cerámicos ferromagnéticos



➡ Muestran $\phi_{\text{eléctrica}} \gg \sim$ aislantes

Bajas pérdidas de energía
por corrientes parásitas

➡ Presentan $B_s >$ aunque menor que la
mostrada por materiales ferromagnéticos

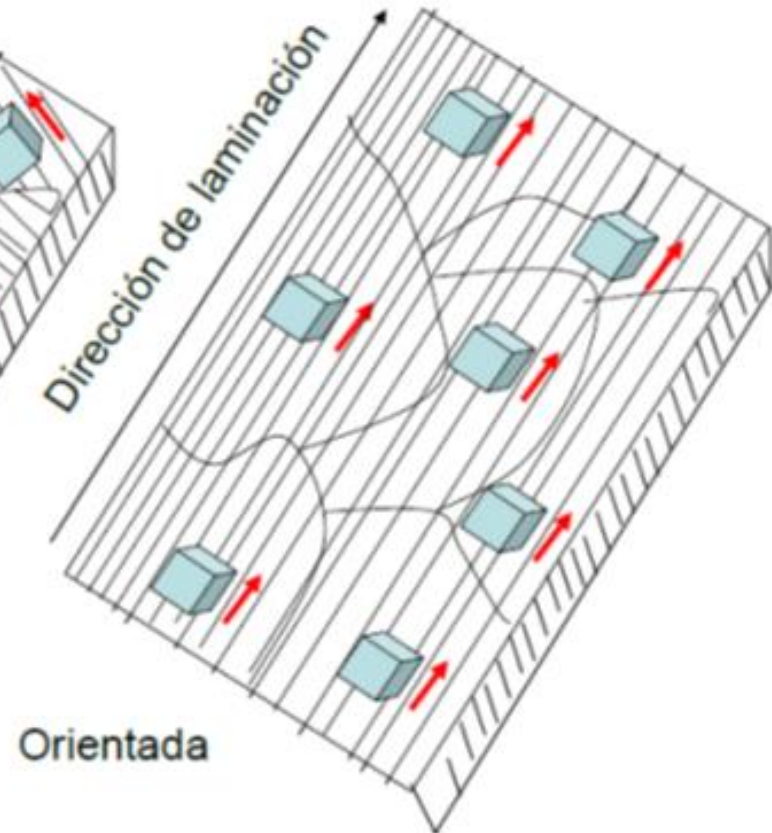
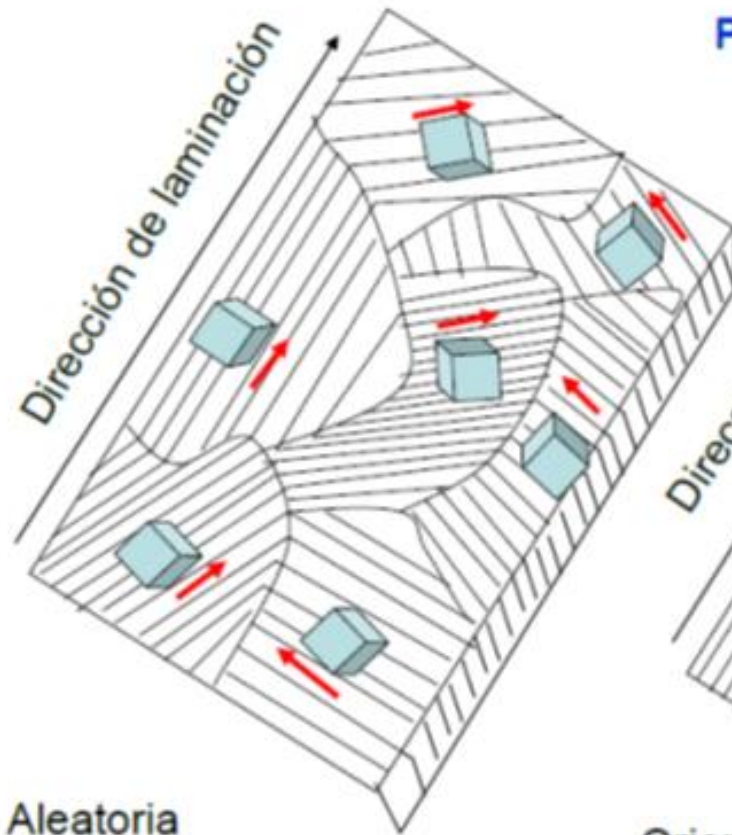
Material y composición	Inducción de saturación, B_s, T	Campo coercivo, $H_c, A/cm$	Permeabilidad relativa inicial μ_i
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,800	250
48% MnO- Fe_2O_3 , 52% ZnO- Fe_2O_3 (ferrita suave)	0,36		1.000
36% NiO- Fe_2O_3 , 64% ZnO- Fe_2O_3 (ferrita suave)	0,29		650

Se utilizan como guía de ondas para comunicaciones

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Aleaciones de Fe con 3-4% de Si
Materiales magnéticos blandos más utilizados

Procesado por laminado en frío



MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: Aplicaciones

Aleaciones de Fe con 3-4% de Si



\ll intersticiales de oxígeno
defectos que dificultan el
movimiento de las paredes
de los dominios

\ll la E anisotropía magnetocristalina
y E magnetoestrictiva

$\gg \mu$

Efecto negativo

- $\ll M_s$ y la T_c de la aleación
- \ll La ductilidad del Fe y para $[Si] \gg 4\%$ no se puede laminar el material

Se utilizan en motores, transformadores ó generadores

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS:

Aplicaciones

Aleaciones de Fe y Ni

- Permalloy (Fe + 45%Ni)
- Supermalloy (79% Ni)

$\ll E_{a. \text{ magnetocristalina}} \text{ y } E_{\text{magnetostrictiva}}$

En relación a Aleaciones de Fe-Si

A bajos H

$\gg \mu$

Material y composición	Inducción de saturación, B_s , T	Campo coercivo, H_c , A/cm	Permeabilidad relativa inicial μ_r
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,60	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0,80	0,012	30.000
+79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5 Mn (Supermalloy)	0,78	0,004	100.000

Aplicación más importante \Rightarrow comunicación de alta sensibilidad
 \Rightarrow el equipo ha de recibir o transmitir pequeñas señales.

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS:

Aplicaciones

Vidrios metálicos

Combinaciones de los metales ferromagnéticos Fe, Co y Ni con los metaloides B y Si...

Estructura amorfa que se forma por enfriamiento rápido del fundido



Se producen cintas a una rapidez de un kilómetro por minuto



- Son muy fuertes y muy duros aunque muestran alguna flexibilidad
- Muy resistentes a la corrosión.
- Magnéticamente son materiales muy blandos

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS: VIDRIOS metálico



**Dominios magnéticos
inducidos en un vidrio metálico**

- $\Phi_{\text{eléctrica}} \gg \gg$ \Rightarrow Pérdidas por corrientes parásitas $\ll \ll$

AMORFOS: No existen fronteras de grano. Las paredes de los dominios se mueven con facilidad

- $E_{\text{anisotropía}} \sim 0$
- Pérdidas de histéresis son \ll } $\gg \gg \mu$

Aleación (% atómico)	B_s (T)	μ_{max}	Aplicaciones
$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$	1.56	600.000	Transformadores de potencia con bajas pérdidas en el núcleo.
$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$	1.61	300.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.
$\text{Fe}_{87}\text{Co}_{18}\text{B}_{14}\text{Si}_1$	1.80	4000.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.

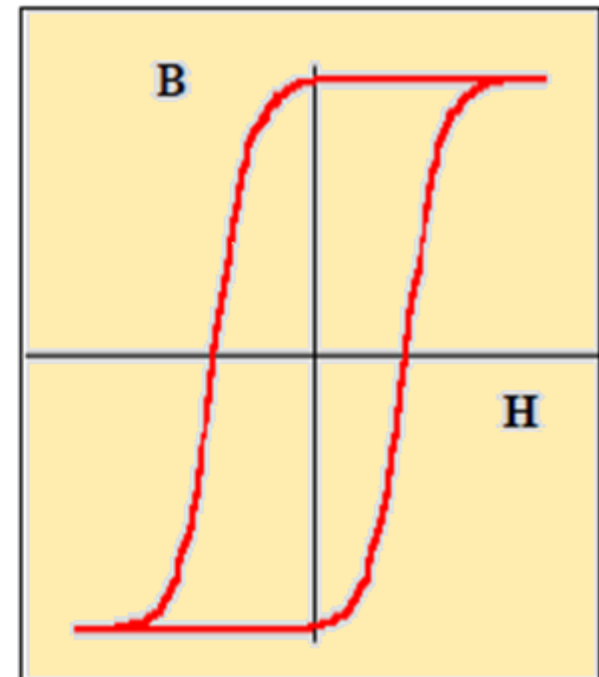
La estructura atómica desordenada también hace que los vidrios metálicos sean muy eficaces como imanes, porque carecen de los tipos de defectos encontrados en los metales con estructura cristalina.

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

Propiedades deseables para su aplicación

- Baja permeabilidad magnética inicial, μ_i
- Alto campo coercitivo, H_c , para desimantar
- Alta inducción de saturación, B_s
- Alta remanencia, B_r

Maximizar $E = [B \times H]_{\text{máx}}$

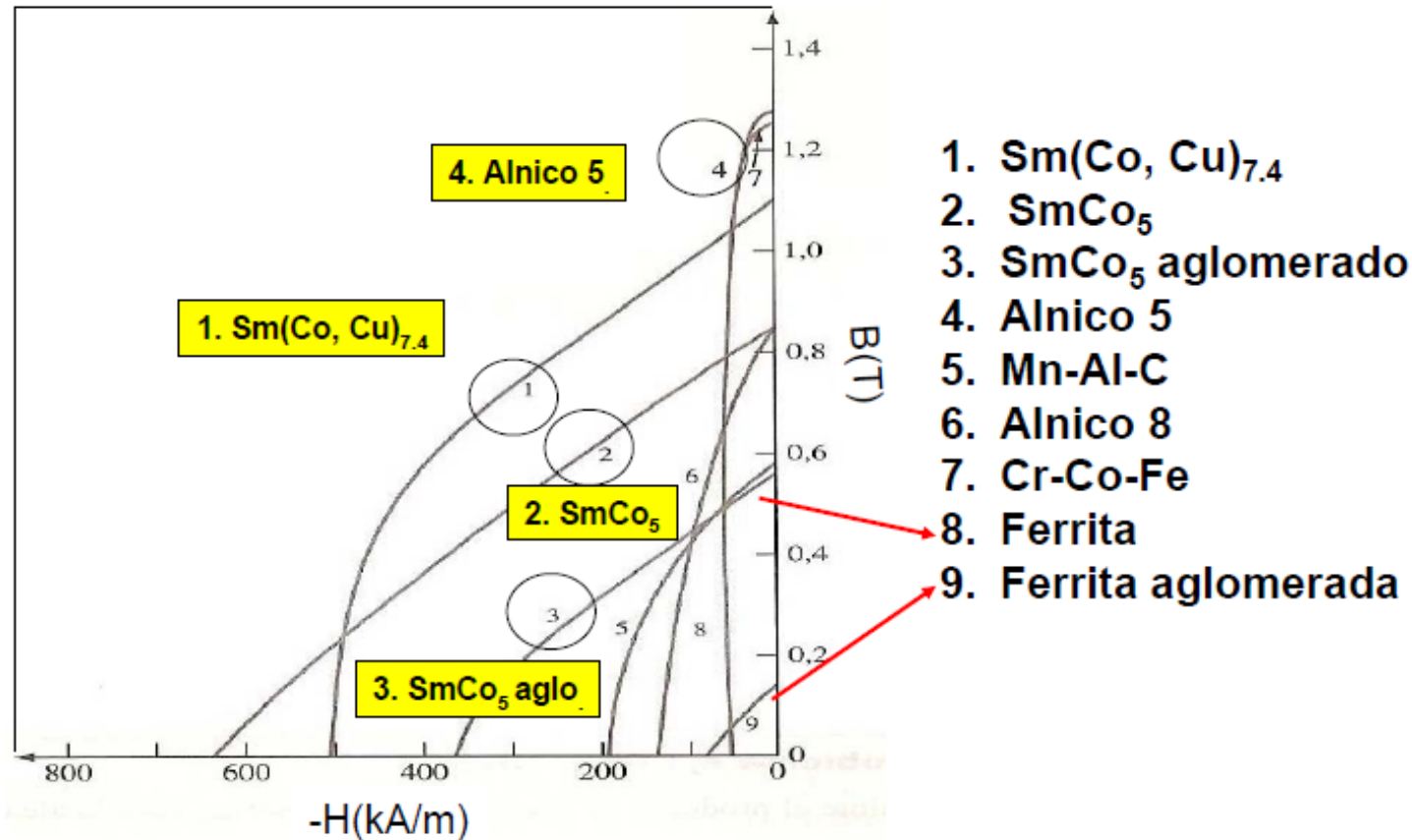


MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

Aplicaciones

- **Ferritas Duras**
- **Aleaciones de Alnico**
- **Aleaciones de Tierras Raras**
- **Aleaciones Nd-Fe-B**
- **Aleaciones Co-Pt-Cr**

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones



En función de cual vaya a ser la aplicación se hará uso de uno u otro

Ferritas hexagonales de composición $\text{MO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($\text{M} = \text{Ba}^{2+}, \text{Sr}^{2+}$)

Altavoces, timbres

Ba^{2+} : Imanes heladera

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

Aplicaciones

Alnico (aleaciones de Al, Ni y Co)

Material base de la aleación: Al, Ni y Co + Fe

Muchas variantes en función de la proporción de sus elementos

Mejores imán permanente

Materiales magnéticos duros mas importantes a nivel comercial

Buena resistencia a la T

- Alta inducción remanente, B_r
- Moderada coercitividad, H_c
- Alto producto de E, $(B \times H)_{\max}$

Material y composición	Inducción remanente. B_r , T	Campo coercitivo H_c , kA/m
Alnico 1, 12 Al, 21 Ni, 5 Co, 2 Cu, Fe	0,72	37
Alnico 5, 8 Al, 14 Ni, 25 Co, 3 Cu, Fe	1,28	51
Alnico 8, 7 Al, 15 Ni, 24 Co, 3 Cu, Fe	0,72	150

Aleaciones frágiles fabricadas en forma de polvo \Rightarrow formas complejas.

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

Aplicaciones

Aleaciones de las Tierras Raras

Los $\vec{\mu}$ de la mayoría de las tierras raras \gggg que los de los elementos de transición Fe, Co y Ni

Valores altos de B_r

Las tierras raras \Rightarrow grandes constantes de anisotropía magnetocristalina

Valores altos de H_c

$(B_r \times H_c)_{\max}$ altos

Inconveniente: orbitales 4f \Rightarrow permanecen paramagnéticos a T ambiente

\Rightarrow Excepción del Gd con $T_c = 293$ K

Aleaciones ferromagnéticas de Co y Fe con lantánidos SmCo_5 y aleaciones endurecidas por precipitación de composición $\sim \text{Sm}(\text{Co}, \text{Cu})_{7.5}$

$T_c \gg$ y $[B \times H]$ es 3 [AlNiCo]

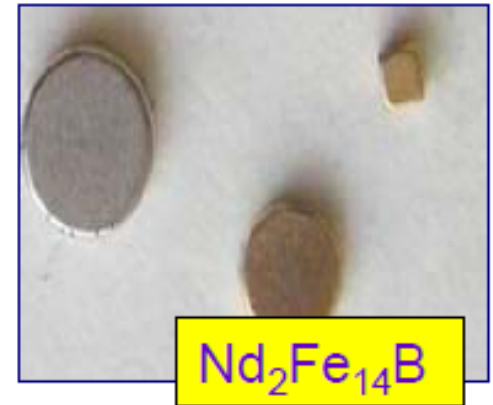
***Dispositivos biomédicos ; válvulas**

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS:

Aplicaciones

Aleaciones magnéticas de Nd-Fe-B

- 1984, encarecimiento del precio del Co
- Búsqueda de nuevos imanes
- Poseen H_c aunque T_c no sea elevada $\Rightarrow [B \times H] \gg \gg$



B, necesario para conseguir la anisotropía estructural, define un eje alargado

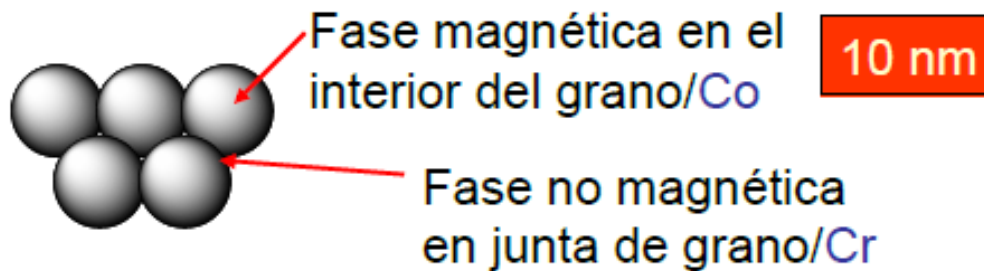
Fases intergranulares ricas en Nd no ferromagnéticas, alineados en los granos constitutivos de la matriz Nd2Fe14

Bajo Peso, compactidad \Rightarrow Motores eléctricos de arranque de automoción

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

Aleaciones magnéticas de Co-Pt-Cr

Sputtering



Pt reduce tamaño de grano \Rightarrow mayor FnM \Rightarrow separa granos

Material y composición	Inducción remanente. B_r , T	Campo coercitivo H_c , kA/m
Fe-Cr-Co, 30 Cr, 10 Co, 1 Si, 59 Fe	1,17	46

Interacción débil de granos \Rightarrow
transiciones magnéticas definidas
(bit de almacenamiento)

+

Tamaño cristalita
pequeño

\Rightarrow

\gg densidad de
integración

Soporte magnético

MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS: Aplicaciones

Sistemas magnéticos granulares

1990: 20Gb/ 500 Gb

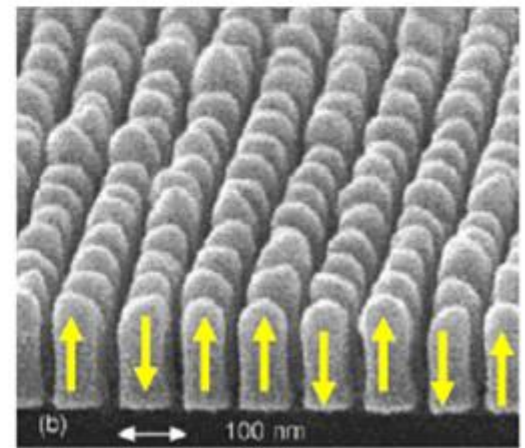
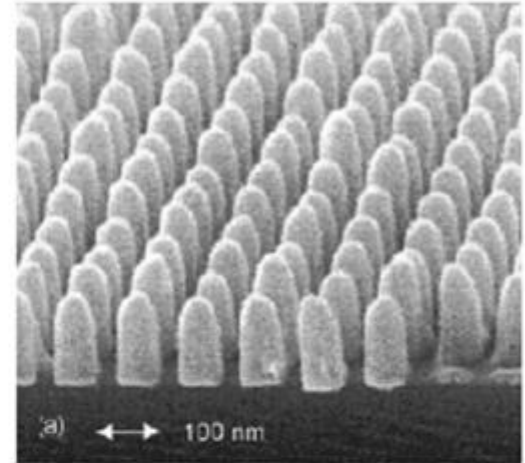
2003: 100Gb/ 2010: teras

Discos de aluminio + sistemas granulares de aleaciones ferromagnéticas separados por cabezales de lecto-escritura



Generan señales eléctricas que alteran los campos magnéticos del disco → información

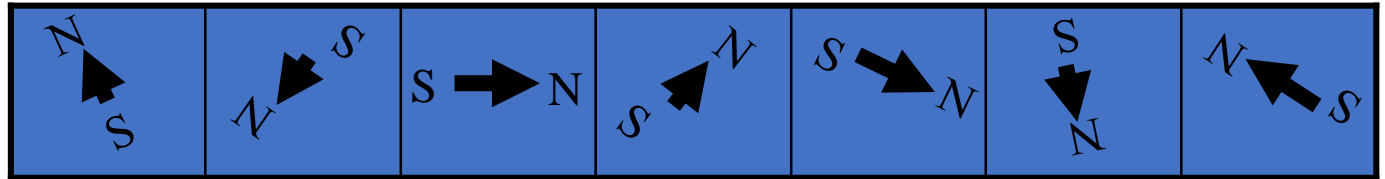
0 ó 1 en función a a orientación



1 0 1 1 0 1 0 1

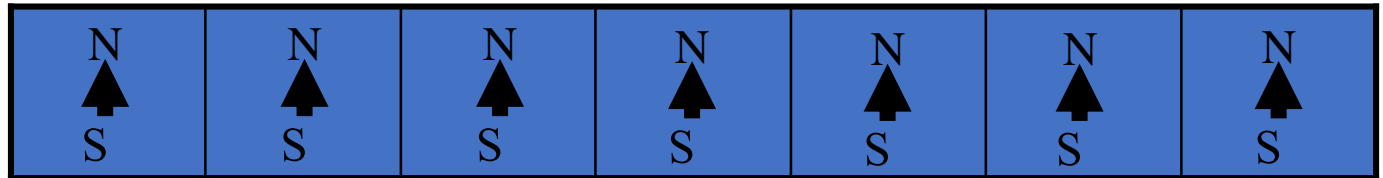
Arreglos de spín en materiales paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos y ferrimagnéticos

Paramagnético



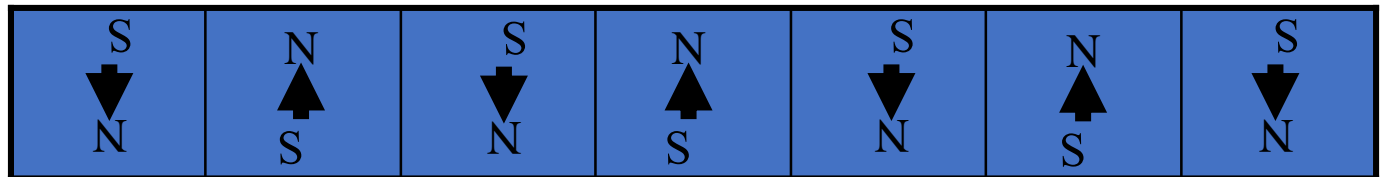
Orientados al azar

Ferromagnético



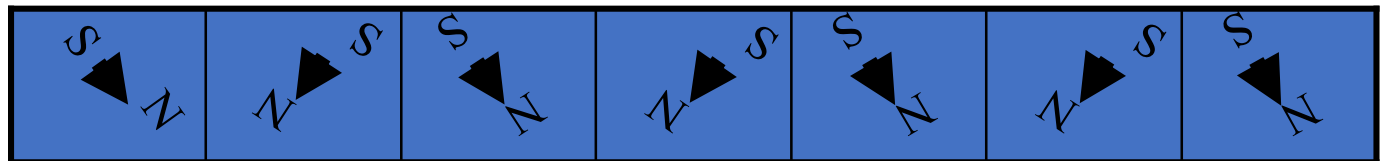
Orientados en una sola dirección

Antiferromagnético



Orientados en sentidos contrarios

Ferrimagnético



La alineación no es paralela