

II Curso de divulgación: Los Avances de la Química y su Impacto en la Sociedad.

LA QUÍMICA Y LA FÍSICA TRABAJAN JUNTAS: MATERIALES CON PROPIEDADES MAGNÉTICAS

4 de noviembre de 2010



Josefa Isasi Marín

Profesora Titular

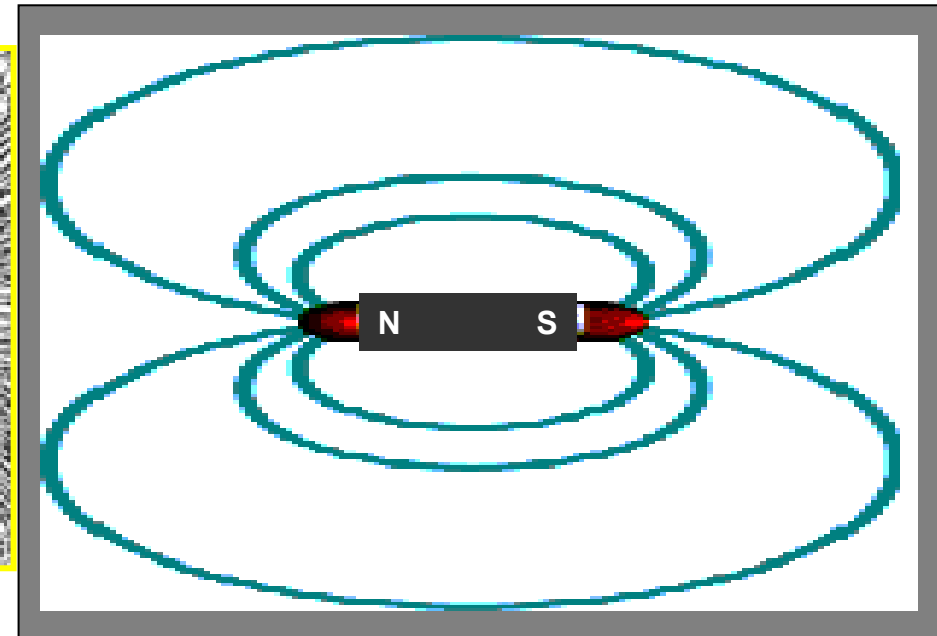
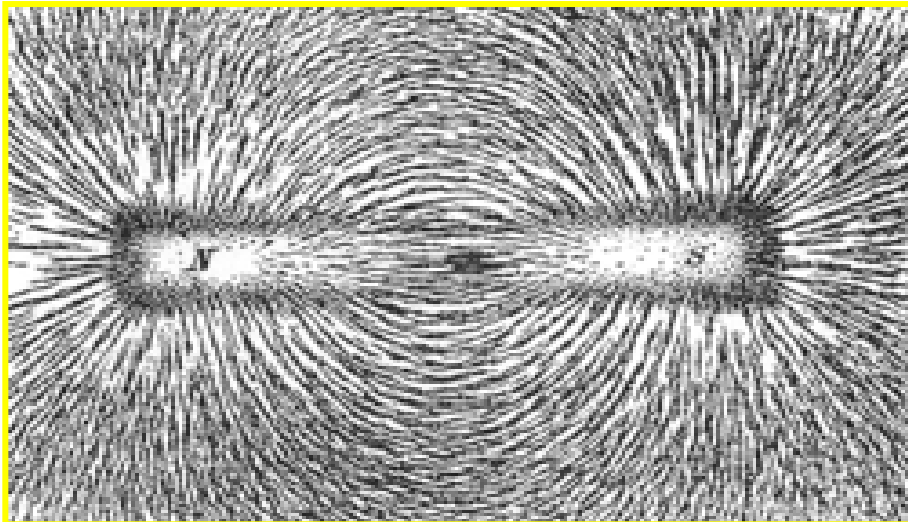
Departamento de Química Inorgánica I

Facultad de CC. Químicas

UCM 28040-MADRID

MAGNETISMO

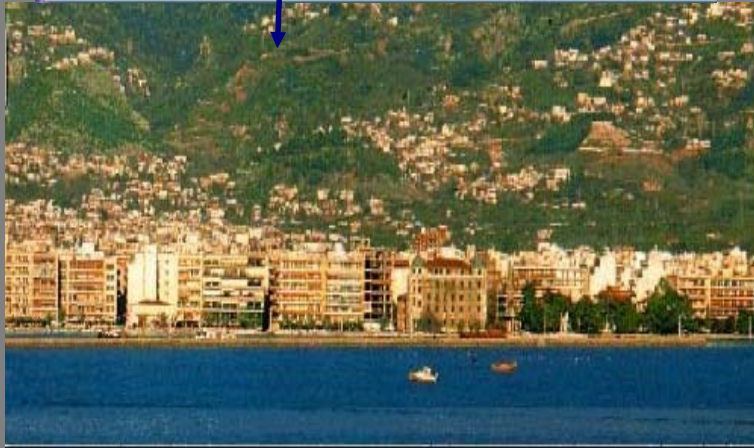
Un imán es un material capaz de atraer... y de producir un campo magnético exterior de intensidad H





HISTORIA DEL MAGNETISMO

Primeros fenómenos magnéticos en la ciudad de Magnesia



Magnetismo

Ciertas piedras (IMANES NATURALES) atraían trocitos de hierro y éstos atraían a su vez a otros

600 a C. Filósofos griegos describieron las características de piedras de óxido de hierro.

Siglo IV a. C. En China primera referencia al magnetismo manuscrito "Libro del amo del valle del diablo": **La magnetita atrae al hierro hacia sí o es atraída por éste.**

Años 20 y 100 de nuestra era. Primera mención en un trabajo: **La magnetita atrae a la aguja.**

En 1187 A. Neckham primer europeo que consigue desarrollar desarrollar la técnica de la navegación empleando la brújula.



El conocimiento del magnetismo limitado a los imanes

En 1820, Øersted, profesor de la Universidad de Copenhague.
Campo magnético producido por un hilo conductor de corriente.

Otros muchos experimentos siguieron con Ampère, Gauss, Faraday,
Maxwell.

Maxwell, encontró vínculos entre el magnetismo y la electricidad,
reflejados en sus ecuaciones → Electromagnetismo.

En 1905, Einstein usó estas ecuaciones para comprobar su teoría
de la relatividad especial.

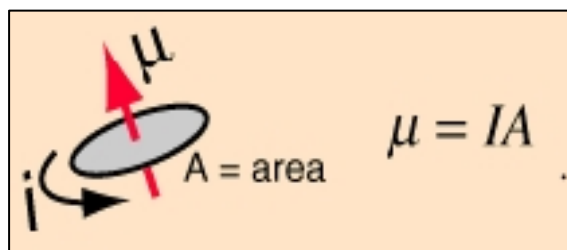
Desde el siglo XX, el electromagnetismo ha continuado
desarrollándose siendo incorporado en las teorías fundamentales....

CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

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



**EQUIVALENTE A UN
DIPOLO MAGNÉTICO**



Los dipolos magnéticos se orientan según las líneas de campo. Las cargas eléctricas viajan a lo largo de las líneas de campo en trayectorias espirales



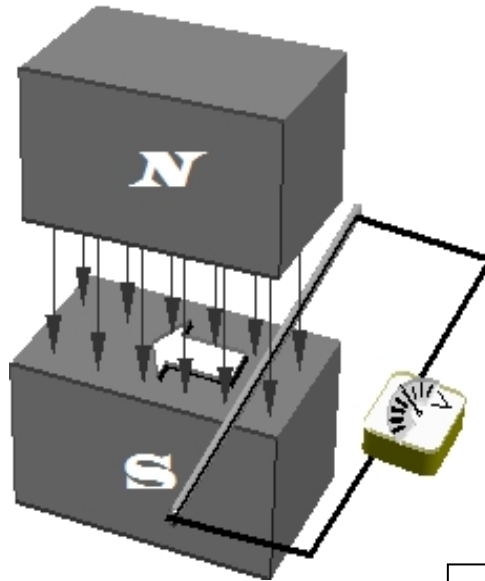
**CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO POR
UN HILO CONDUCTOR DE CORRIENTE**



M. Faraday
1831



Ensayó el campo magnético de Oersted



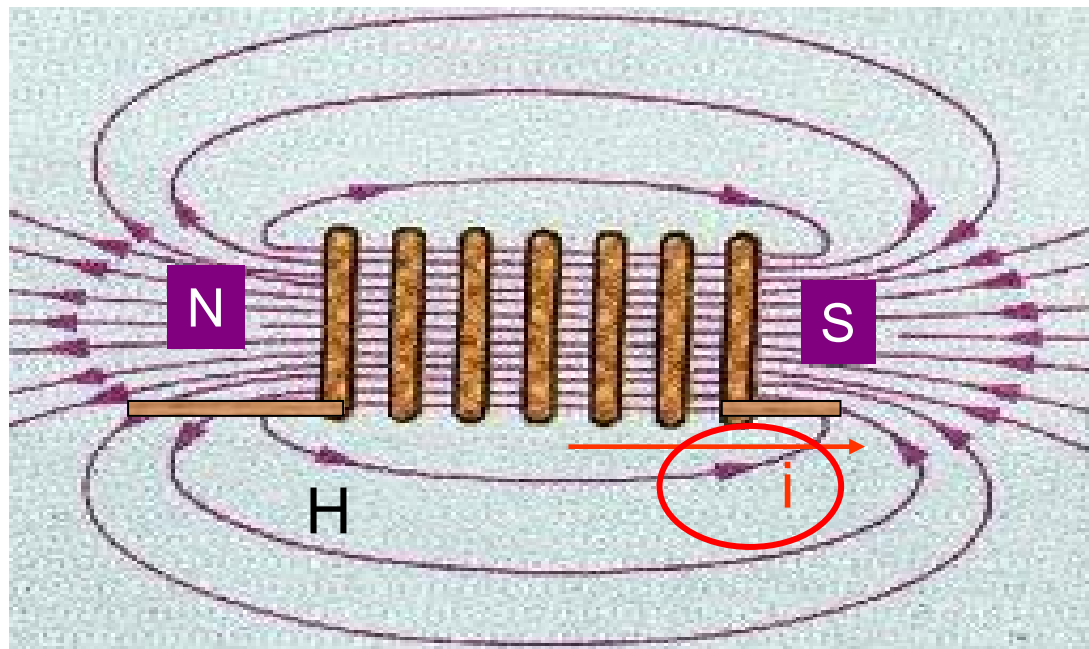
Voltaje aplicado a un medio o cuerpo expuesto a un campo magnético, H .



La magnitud del voltaje inducido \propto a la variación del flujo magnético

Concepto de líneas de fuerza

Solenoides o bobinas de hilo de Cu enrollada de n espiras y de longitud l



INTENSIDAD DEL CAMPO

$$H = 0.4\pi n i / l$$

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



DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO
O INDUCCIÓN MAGNÉTICA

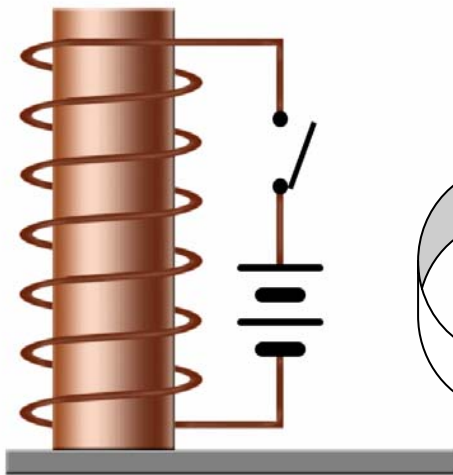
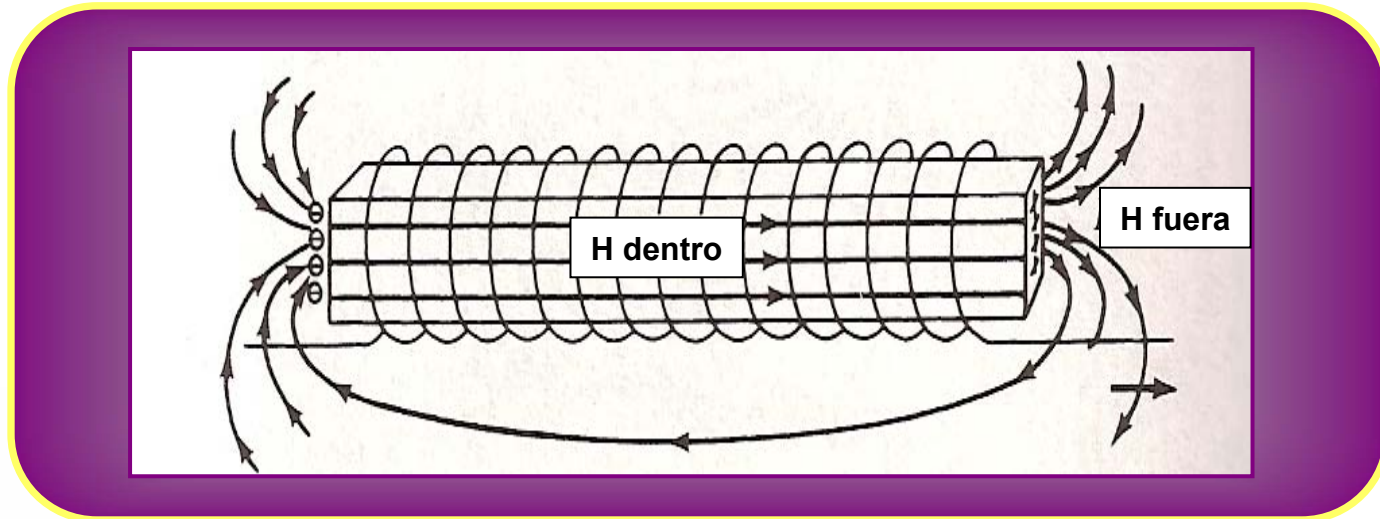
$$B = \mu H$$

μ = permeabilidad magnética

**CAMPO MAGNÉTICO PRODUCIDO
POR UN HILO CONDUCTOR DE CORRIENTE
+
BARRA DE HIERRO**

Barra de hierro dentro de un solenoide = ELECTROIMÁN

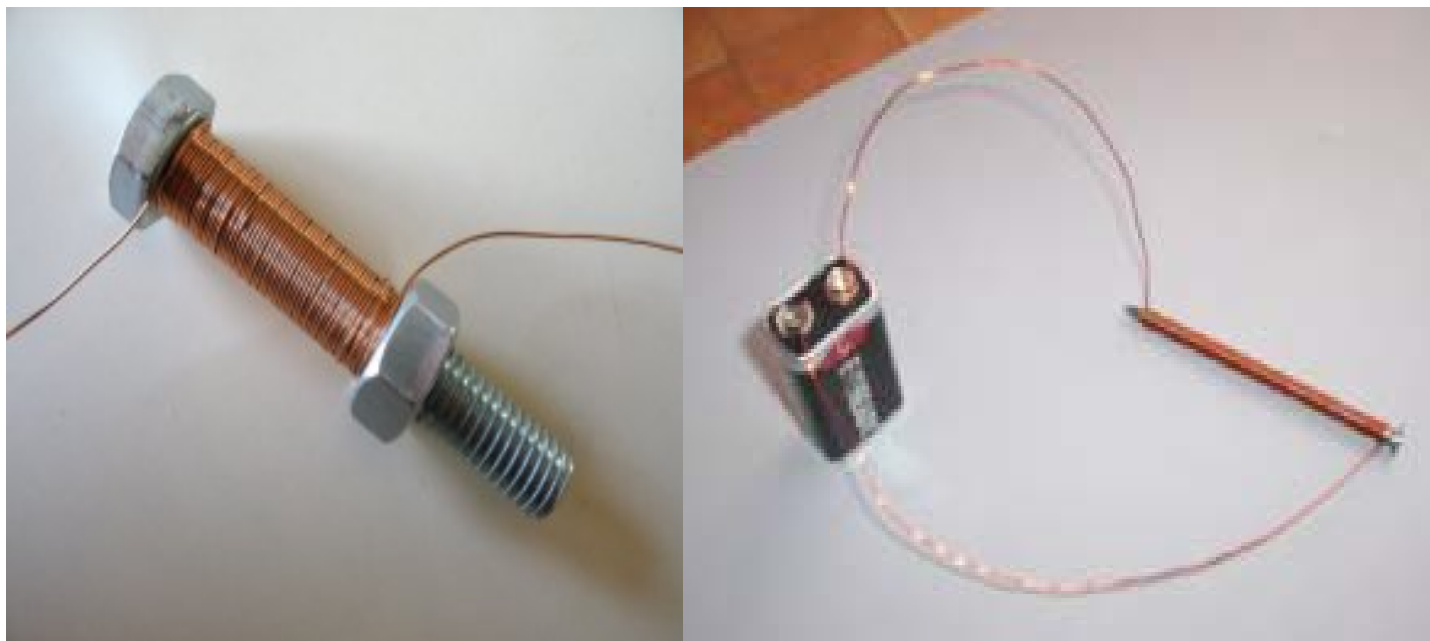
Corriente imanadora



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

(Campo externo + Campo inducido)

MAGNETIZACIÓN, IMANTACIÓN Ó
IMANACIÓN, **M**



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 NATURALES O SINTÉTICOS**

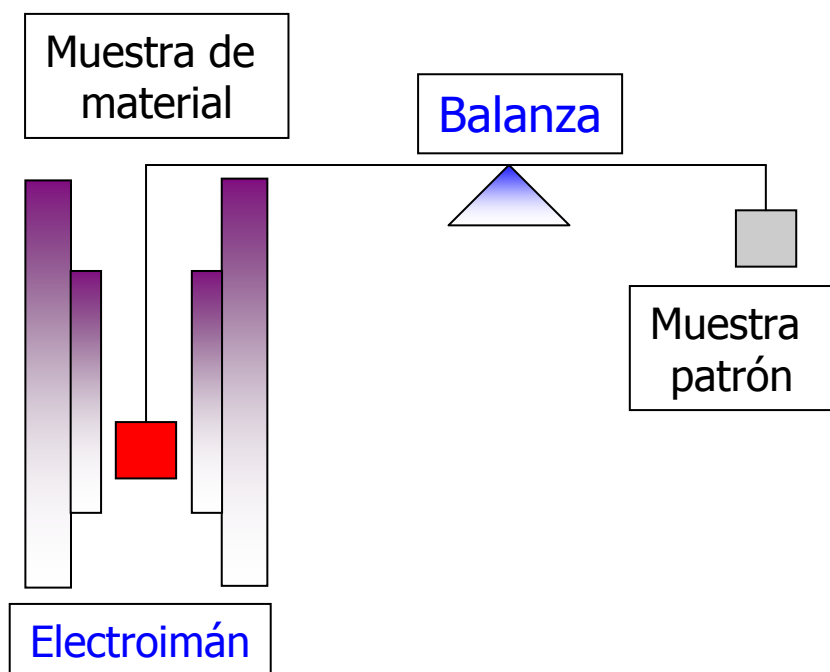
LA MAGNETIZACIÓN SE ANALIZA USUALMENTE EN
TÉRMINOS DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA χ

$$\chi = M/H$$

Métodos experimentales usados
para determinar χ

Balanza de Faraday

Balanza de Gouy



Parámetro que se mide

La modificación del peso
aparente de la muestra al
aplicar un campo H

χ_v = Susceptibilidad magnética por unidad de volumen.

$$\chi_v = M/H$$

Sensibilidad a la magnetización

Susceptibilidad por gramo.

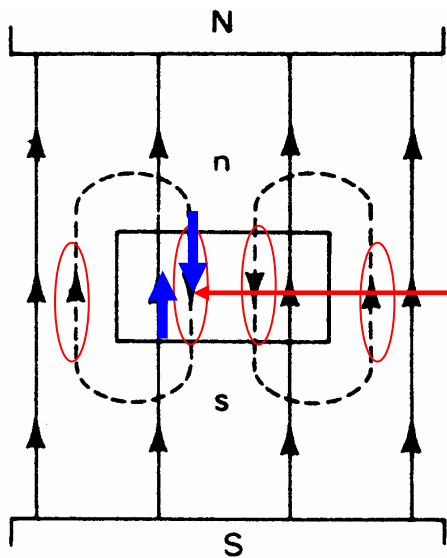
$$\chi_g = \chi_v/d \quad d = \text{densidad de la muestra}$$

Relación de propiedades magnéticas con las atómicas.

$$\chi_M = \chi_g \times M \quad M = \text{peso molecular}$$

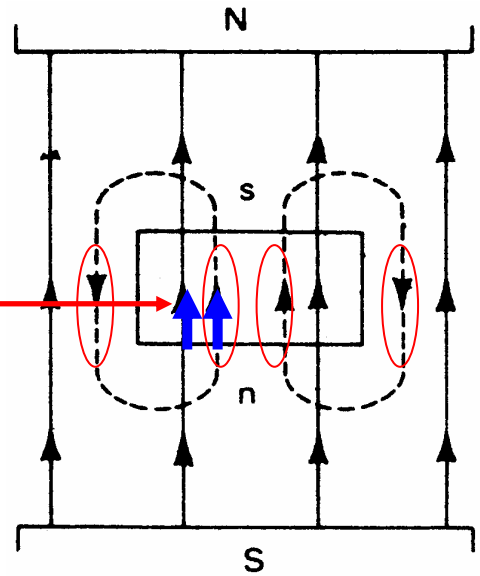
+ ó - negativo si la imanación de la muestra refuerza o si se opone al campo.

$$B \propto H + M$$



La imanación se opone a H

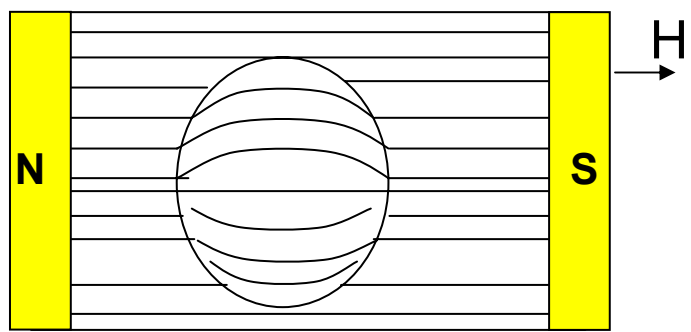
$M < 0$
Muestras diamagnéticas



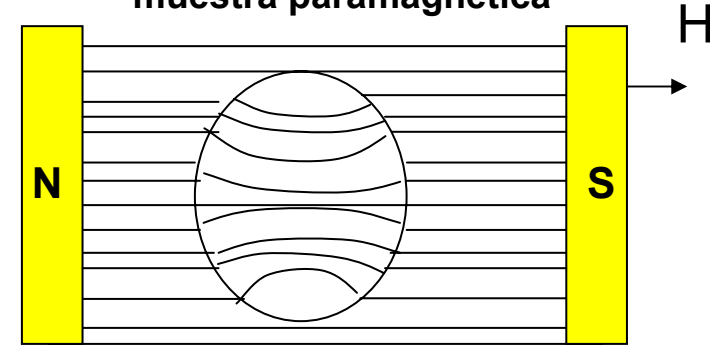
La imanación refuerza a H

$M > 0$
Muestras paramagnéticas

Densidad de flujo en una muestra diamagnética



Densidad de flujo en una muestra paramagnética



MATERIALES MAGNÉTICOS

Se caracterizan por su **permeabilidad:**

$$\mu = B/H$$

Medida del incremento del campo magnético debido a la presencia de un material imanado

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

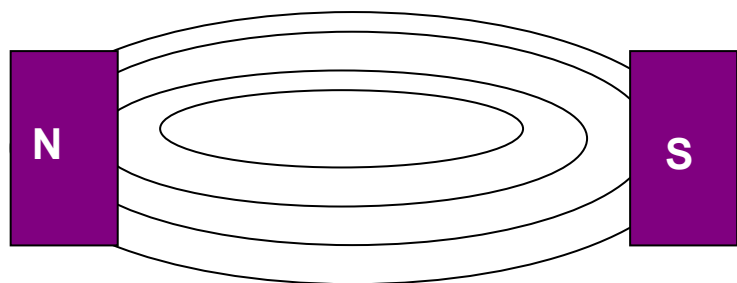
μ = permeabilidad magnética absoluta

μ_0 = permeabilidad magnética del vacío y

χ_m = susceptibilidad magnética del material

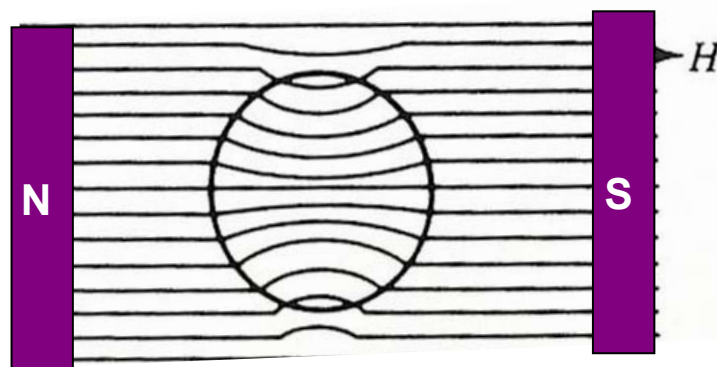
$$\mu_r = \mu / \mu_0 = (1 + \chi_m)$$

MATERIAL NO MAGNÉTICO



El vacío

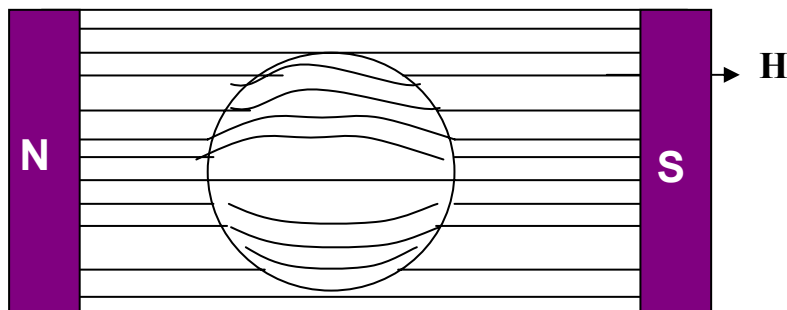
MATERIAL PARAMAGNÉTICO



Aire, Al, Pd

Paramagnéticos o no magnéticos, $\mu \sim 1$

MATERIAL DIAMAGNÉTICO O DÉBILMENTE MAGNÉTICO



Cu, He, Bi, Ag, Pb, agua

$\mu < 1$

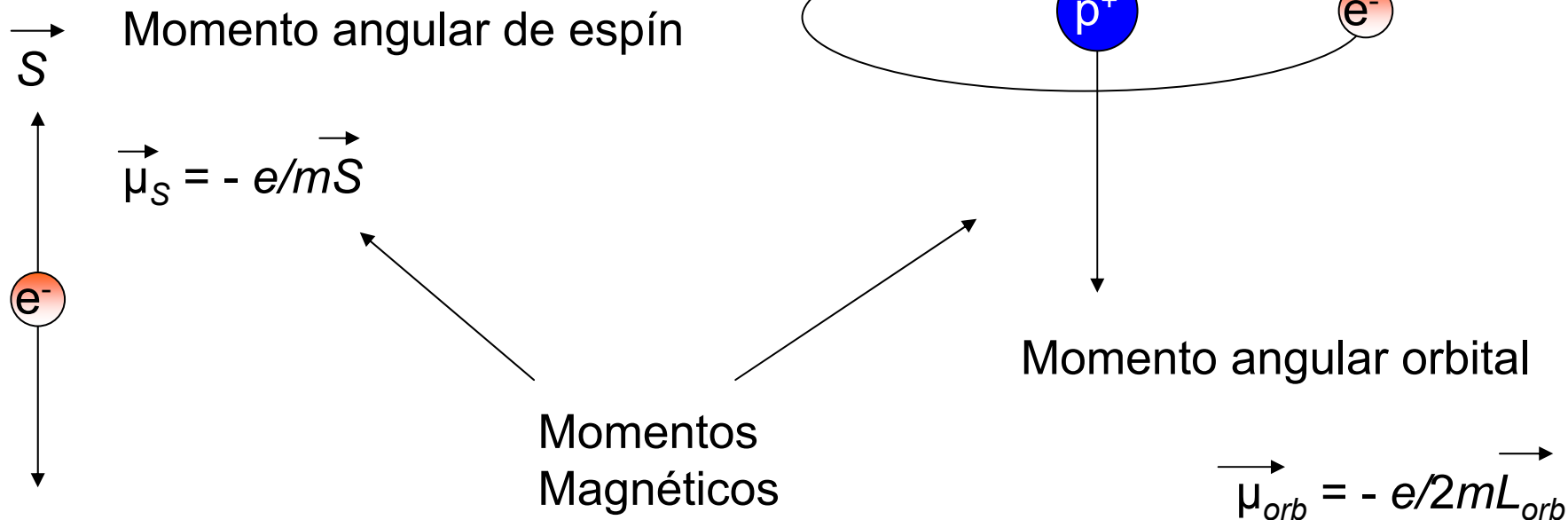
MAGNETISMO EN SÓLIDOS

En física de estado sólido se describen diferentes comportamientos de materiales sometidos a un campo magnético externo.

FISICA CUANTICA: LOS ELECTRONES POSEEN PROPIEDADES MAGNETICAS

H interactúa con los electrones del material:

- Con el momento angular orbital
- Con el momento angular de espín

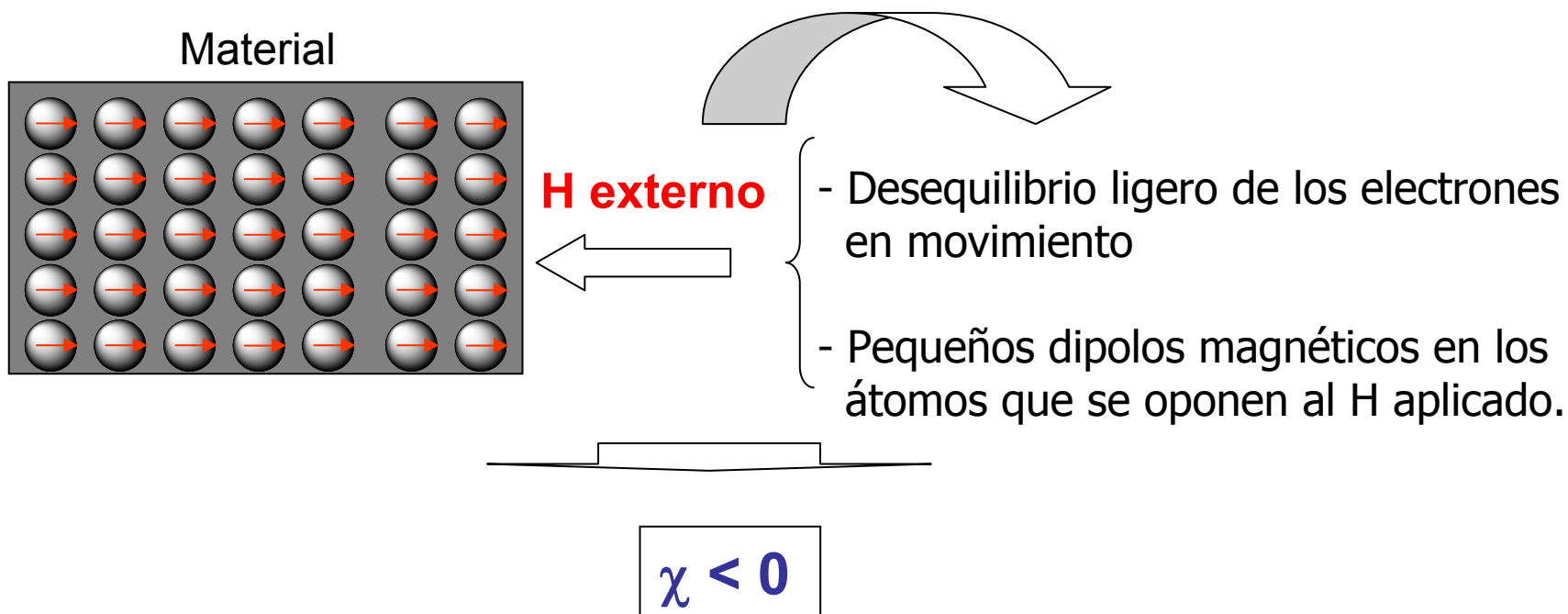


COMPORTAMIENTOS MAGNÉTICOS

DIAMAGNETISMO

PARAMAGNETISMO

DIAMAGNETISMO



$$\chi_{\text{dia}} = \sum \chi_{\text{Ai}} (\text{contrib diamágn de los átomos}) + \sum \chi_{\text{Bj}} (\text{contrib diamágn de los enlaces})$$

Determinada por la movilidad de los electrones >>> en átomos grandes con muchos electrones

DIAMAGNETISMO χ_{Ai} (contrib diamagn de los átomos) χ_{Bj} (contrib diamagn de los enlaces)

<i>Átomo</i>	χ_A ($10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)	<i>Átomo</i>	χ_A ($10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)	<i>Enlace</i>	χ_B ($10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$)
H	-2,93	F	-6,3	C=C	+5,5
C	-6,00	Cl	-20,1	C≡C	+0,8
C (aromático)	-6,24	Br	-30,6	C=N	+8,2
N	-5,57	I	-44,6	C≡N	+0,8
N (aromático)	-4,61	Mg ²⁺	-5	N=N	+1,8
N (monoamida)	-1,54	Zn ²⁺	-15	N=O	+1,7
N (diamida, imida)	-2,11	Pb ²⁺	-32,0	C=O	+6,3
O	-4,61	Ca ²⁺	-10,4		
O ₂ (carboxilato)	-7,95	Fe ²⁺	-12,8		
S	-15,0	Cu ²⁺	-12,8		
P	-26,3	Ce ²⁺	-12,8		

Fenómeno que ocurre en todos los materiales, en muchos el efecto magnético negativo queda cancelado por efectos magnéticos positivos.

Diamagnetismo en Ingeniería de transporte

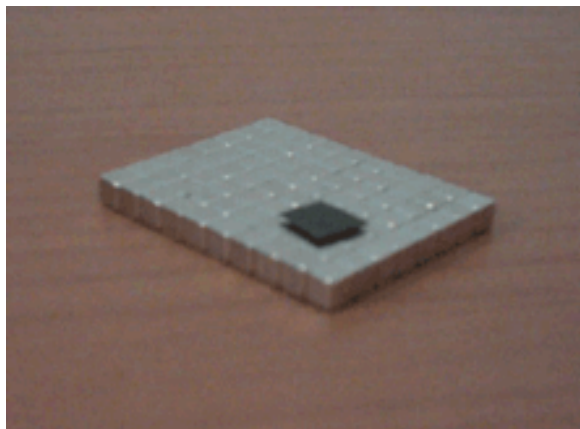
Trenes de levitación magnética

usan poderosos electroimanes superconductores para flotar sin tocar la pista.

Superconductor

Material con $R = 0$

Diamagnético: repele el campo magnético



Se produce el fenómeno de levitación
Pero se necesita enfriar.....

Objeto de Investigación

PARAMAGNETISMO. LEY DE CURIE

⇒ Origen: momentos angulares de las partículas cargadas.

⇒ El núcleo atómico es una partícula cargada y puede tener $\vec{\mu}_S$

$\vec{\mu} (10^{-3}) \lll$ que los generados por un electrón

⇒ En un electrón, $\vec{\mu}_L$ y $\vec{\mu}_S$ contribuyen al paramagnetismo. Generalmente es más significativa.

$$\vec{\mu} = \sqrt{\mu_L + \mu_S}$$

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

$$\chi > 0$$

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

PARAMAGNETISMO. LEY DE CURIE

➡ En ausencia de H, $M = 0$

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

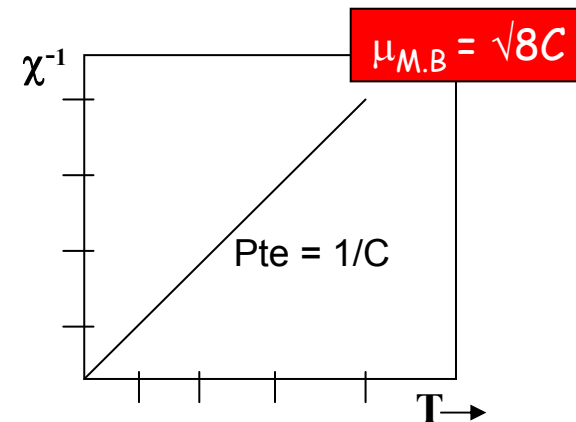
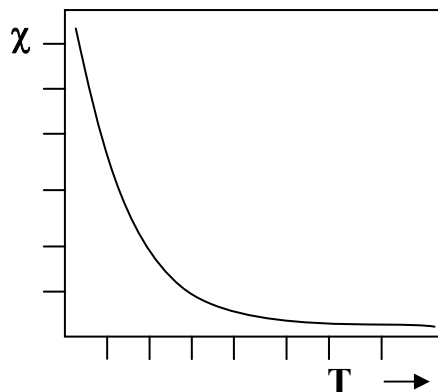
➡ En presencia del H, $M \neq 0$

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

A mayor I del H ➡ más poblados

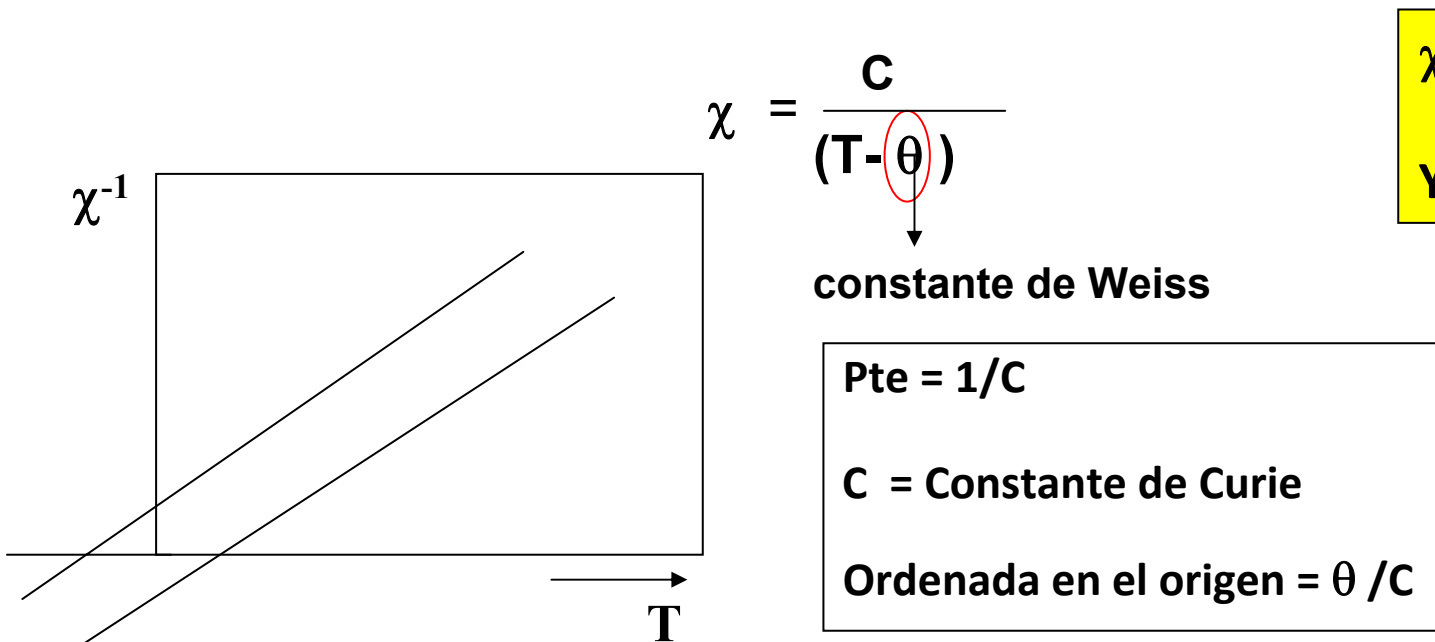
➡ La diferencia de población entre estados y la $\chi <$ al $> T$

Comportamiento que se resume en la Ley de Curie $\chi = C / T$
C = constante de Curie



PARAMAGNETISMO. LEY DE CURIE-WEISS

Mejor aproximación se obtiene Ley de Curie-Weiss



$\chi^{-1} =$	$\frac{1}{C}$	$T -$	$\frac{\theta}{C}$
$Y =$	A	$X +$	B

$$\mu_{M.B. Experimental} = \sqrt{8C}$$

Independiente de T

$$\mu_{M.B. teórico} = \sqrt{\mu_L + \mu_S} = \sqrt{S(S+1/2)} = \sqrt{n(n+2)}$$

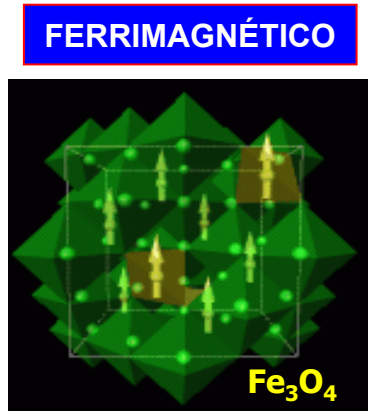
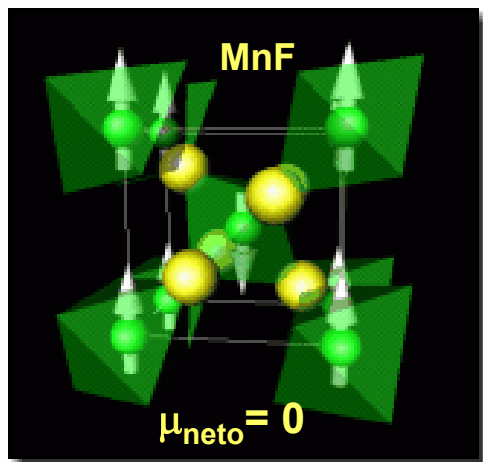
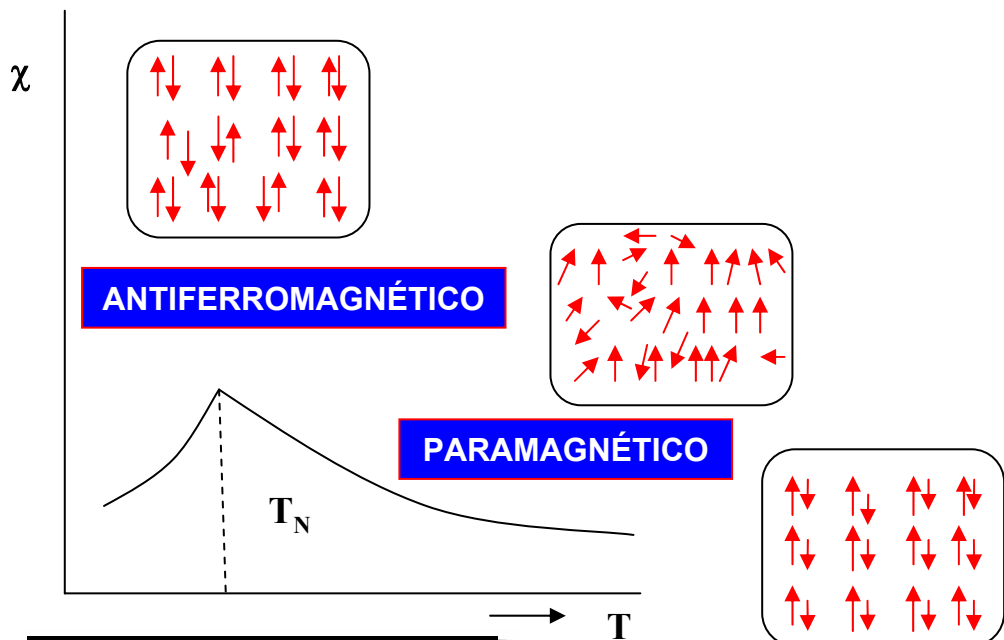
En materiales constituidos por cationes de la primera serie de transición ya que $\mu_L = 0$

FENÓMENOS DE ORDEN COLECTIVO

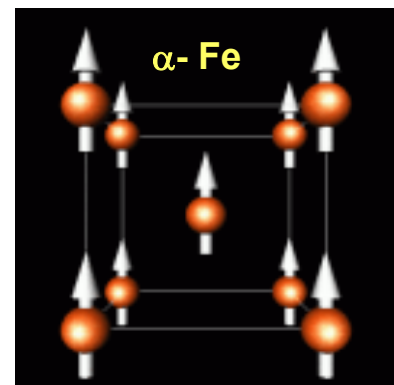
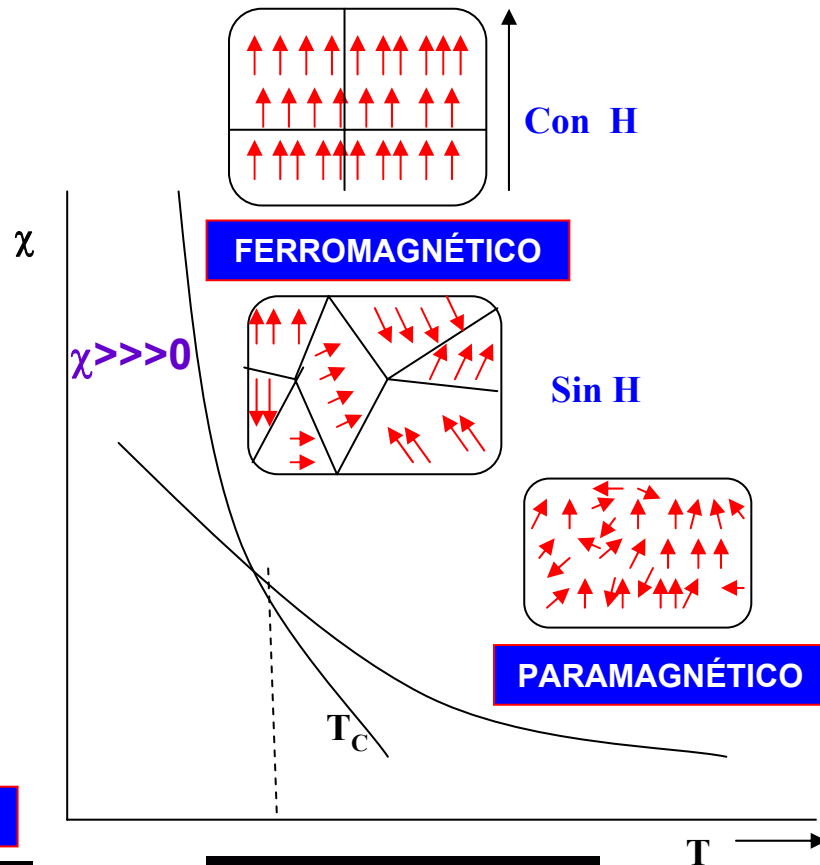
Los átomos de algunos metales de transición y de tierras raras poseen capas internas parcialmente llenas con electrones desapareados que causan fuertes efectos paramagnéticos y en ocasiones producen efectos colectivos.

A bajas temperaturas los sistemas se apartan del comportamiento descrito por la Ley de Curie

ANTIFERROMAGNETISMO



FERROMAGNETISMO



ANTIFERROMAGNETISMO

Compuesto	T_N [K]	Compuesto	T_N [K]
CoCl ₂	25	MnO	122
CoF ₂	38	MnSe	173
CoO	291	MnTe	310-323
Cr	475	NiCl ₂	50
Cr ₂ O ₃	307	NiF ₂	78-83
FeCl ₂	70	NiFeO	180
FeF ₂	79-90	NiO	533-650
FeO	198	TiCl ₃	100
FeMn	490	UCu ₅	15
α -Fe ₂ O ₃	953	V ₂ O ₃	170
MnF ₂	72-75		

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.16$$

FERROMAGNETISMO

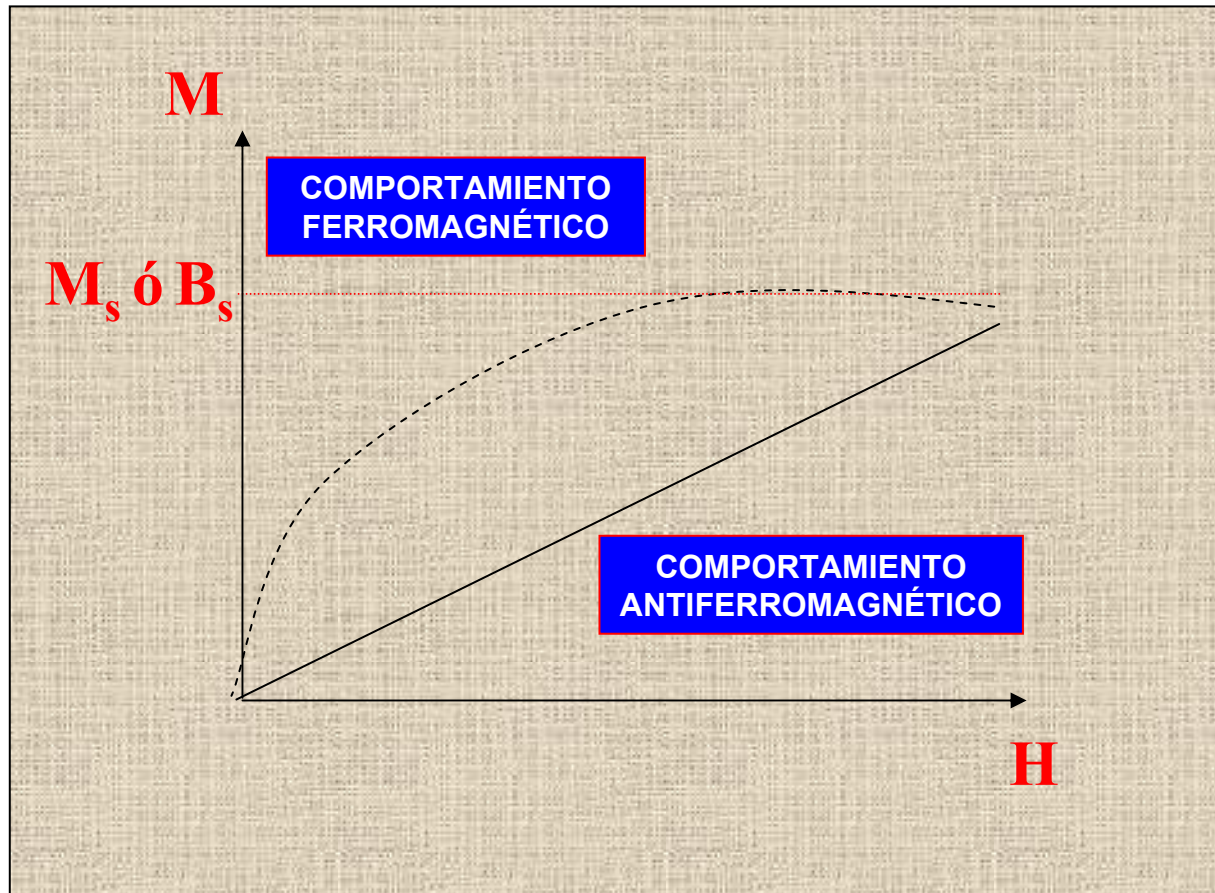
Material	T_c (K)	Material	T_c (K)
Fe	1043	Cu ₂ MnIn	500
Co	1388	EuO	77
Ni	627	EuS	16.5
Gd	293	MnAs	318
Dy	85	MnBi	670
CrBr ₃	37	GdCl	32.2
Au ₂ MnAl	200	Fe ₂ B	1015
Cu ₂ MnAl	630	MnB	578

Los materiales ferromagnéticos **se magnetizan** fuertemente en el mismo sentido que el H aplicado.

$$\chi \gg \gg 0 \quad \text{y} \quad \mu_r \gg \gg 1$$

MAGNETIZACIÓN

- No puede ser mayor de un determinado valor en $M \cdot B$
- Depende del n° total de e^- desapareados por ion





FERRO/FERRIMAGNETISMO

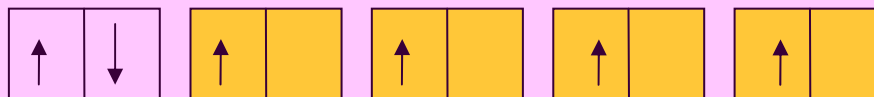
Los materiales magnéticos interesantes para las aplicaciones son los que presentan imanación espontánea.

Materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con $T_c \gg$

Propiedades ferromagnéticas

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

Fe: d^6



Orbitales 3d

Los electrones de los orbitales 4s, más externos, quedan apareados en los enlaces

FERROMAGNETISMO

Observable en elementos de la 1ª serie de transición

H																	He
Li	Be											N	O	F	Ne		
Na	Mg											Al	C	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Si	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uur	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

Además de la mayoría de los aceros y en aleaciones

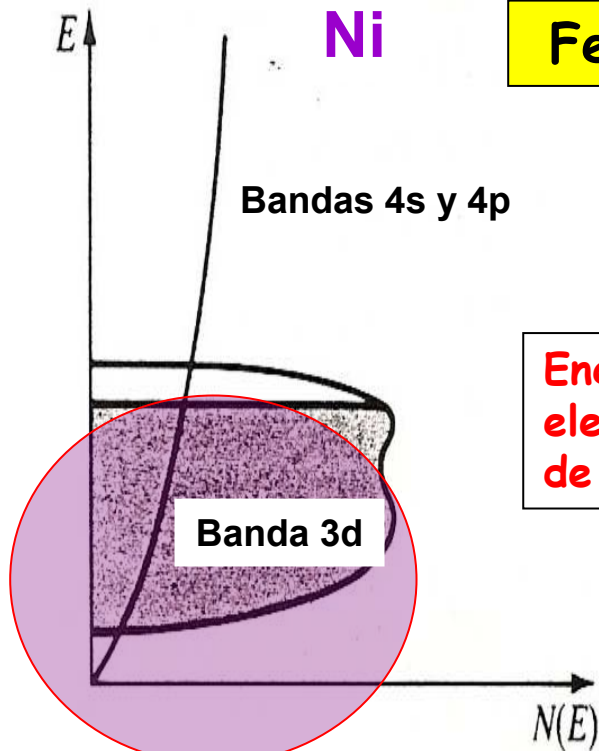
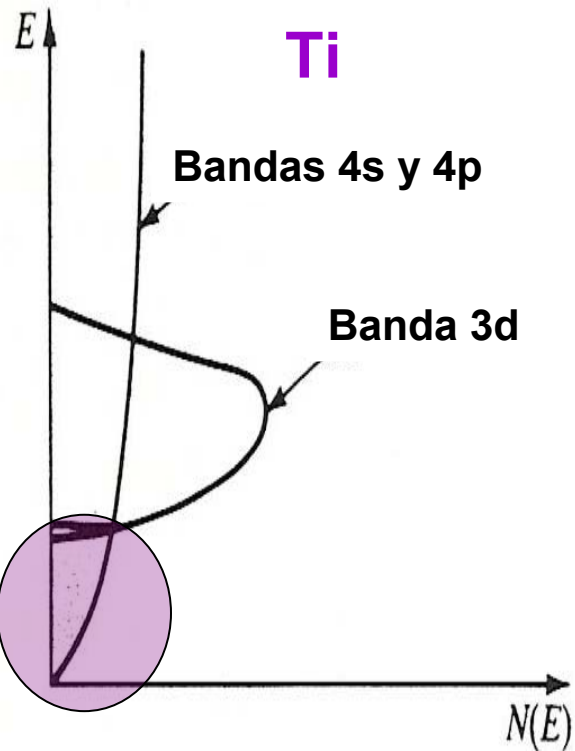
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

**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**

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

FERROMAGNETISMO

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 tener electrones no apareados, a costa de poblar niveles de E más altos

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

FERROMAGNETISMO

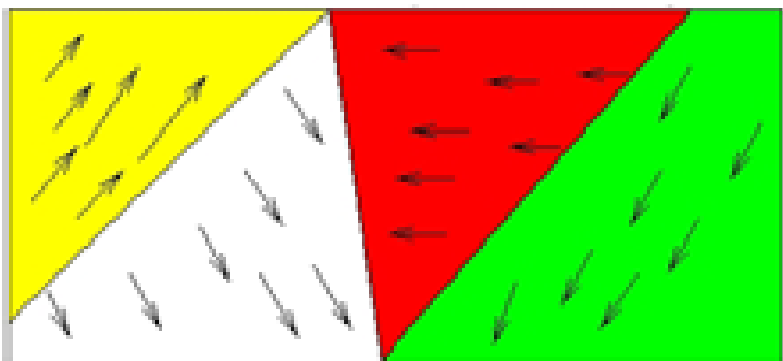
A temperatura $T < T_c$

Alineamiento de los espines de los electrones en regiones microscópicas

DOMINIOS MAGNÉTICOS

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

En materiales constituidos por
Fe, Co, Ni ó Gd

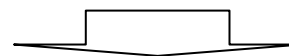
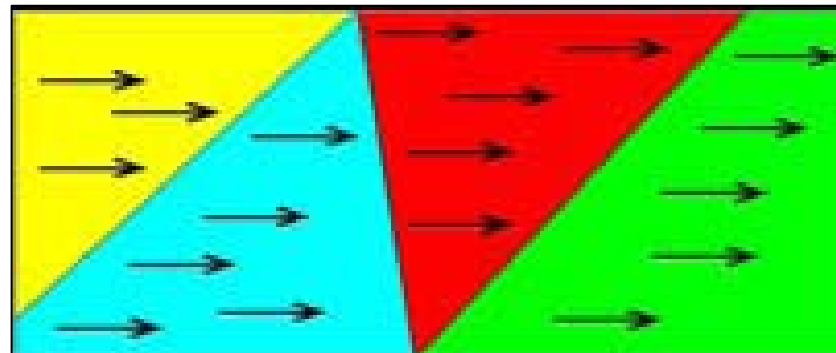


Monodominios magnéticos orientados
de forma aleatoria



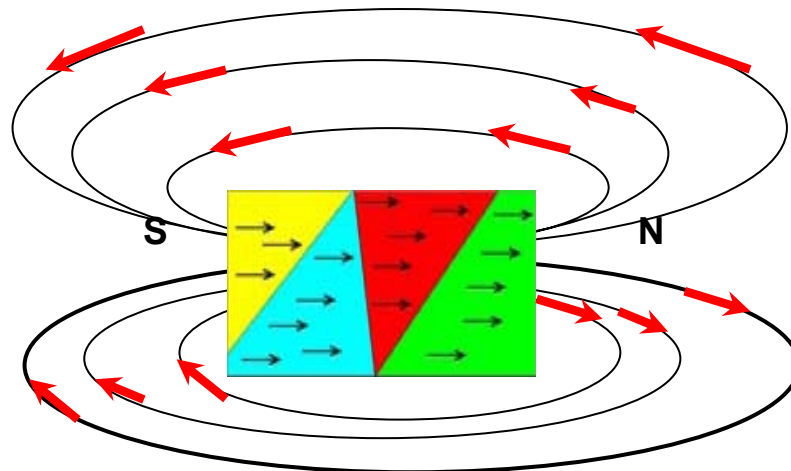
No se genera M_{neta}

Campo magnético externo, H

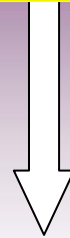


Se genera M_{neta}

El material posee un H muy potente
(~1000 Gauss, Tierra = 0.5 Gauss)



MATERIAL FERROMAGNÉTICO MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN

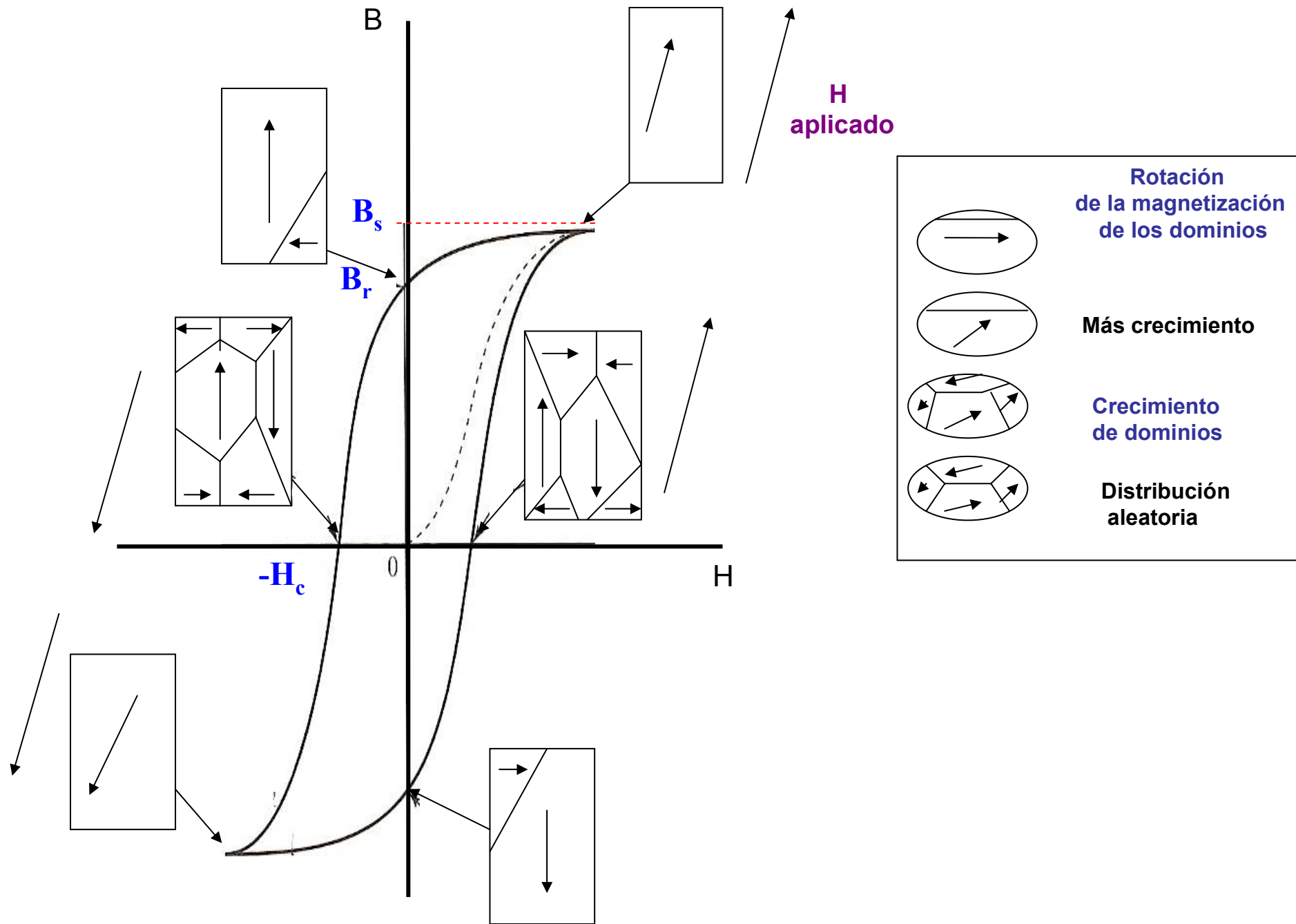


DESMAGNETIZAR
UN MATERIAL
FERROMAGNÉTICO

CALENTARLO A $T > T_C$

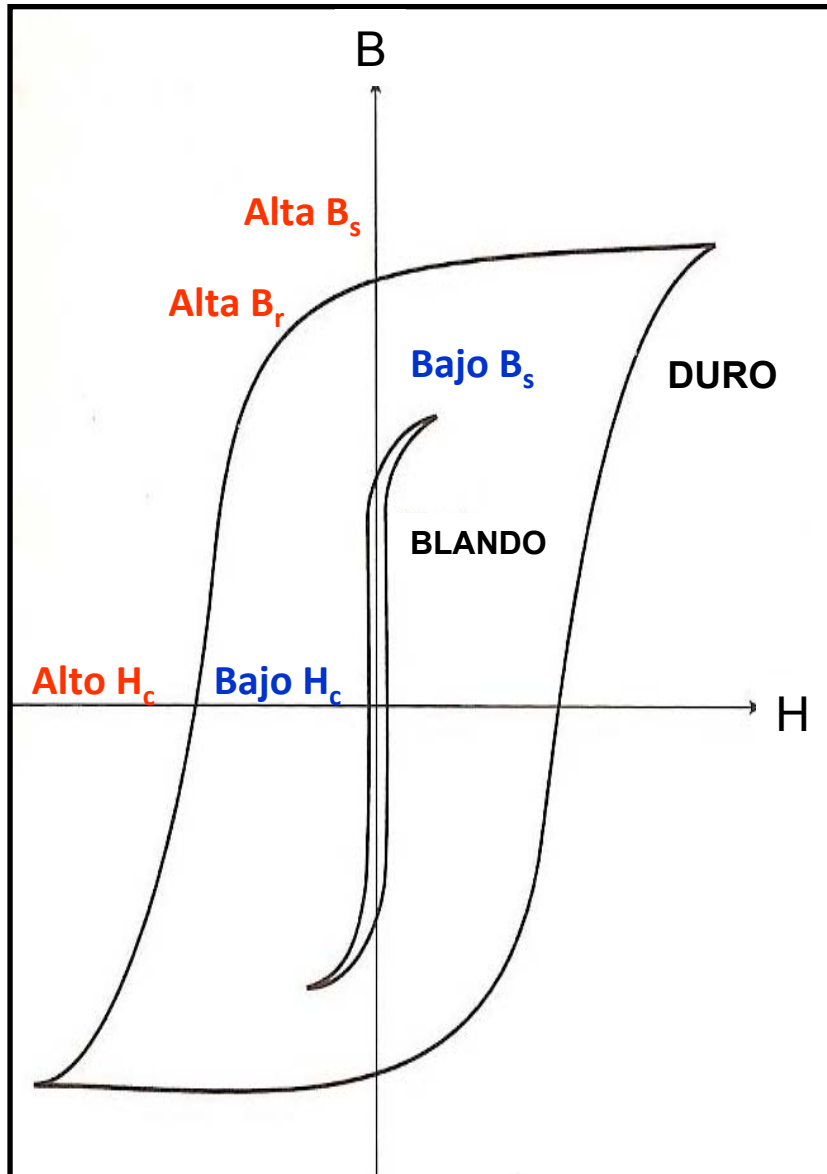


ESTUDIO DE LA MAGNETIZACIÓN:
CÓMO CAMBIA LA MAGNETIZACIÓN
CUANDO EL CAMPO APLICADO VARÍA



MATERIALES FERROMAGNÉTICOS BLANDOS Y DUROS

Según sean fáciles o difíciles de magnetizar y desmagnetizar



Los blandos se emplean en electroimanes, como cintas de registro magnético, etc.

Los duros se usan como imanes permanentes

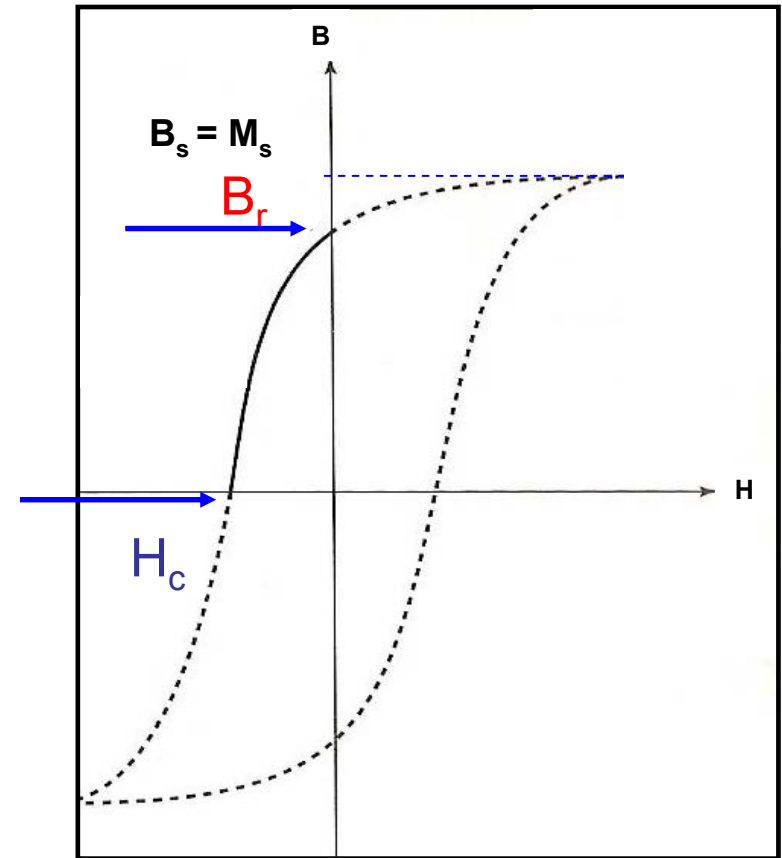
**MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN
DE UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO****Magnetización remanente B_r ($H = 0$)**

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.

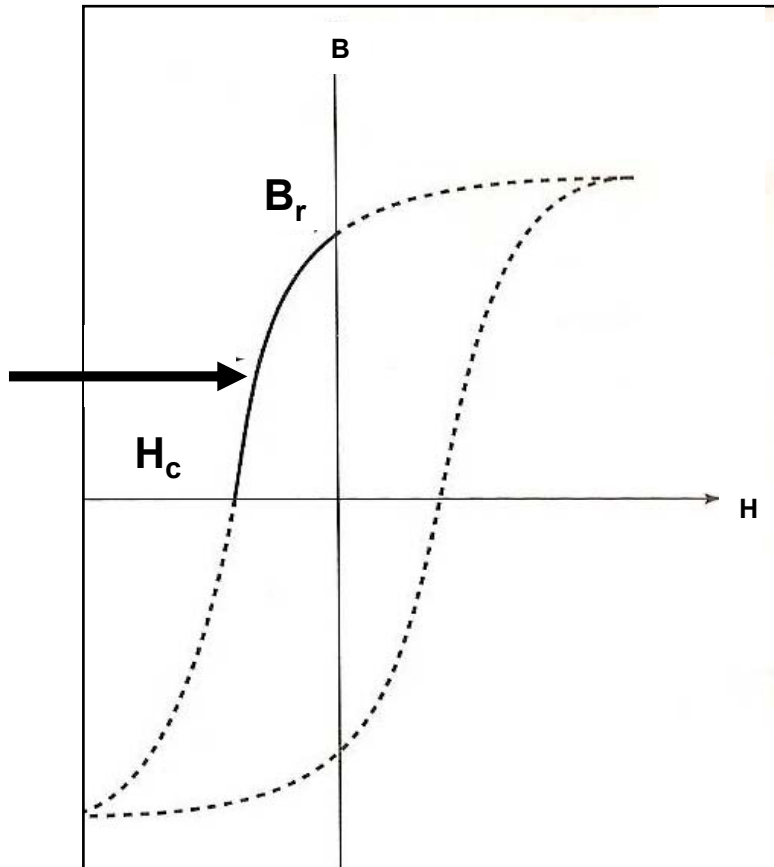


**MAGNETIZACIÓN Y DESMAGNETIZACIÓN
DE UN MATERIAL FERROMAGNÉTICO**

Potencia de un material magnético duro se mide por

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

en el cuadrante desmagnetizador del ciclo de histéresis B-H



Imán = Material capaz de almacenar E
 $E = (B_r \times H_c)_{\text{max}}$

TIPOS DE ENERGÍAS QUE DETERMINAN LA ESTRUCTURA DE LOS DOMINIOS FERROMAGNÉTICOS EN UN MATERIAL

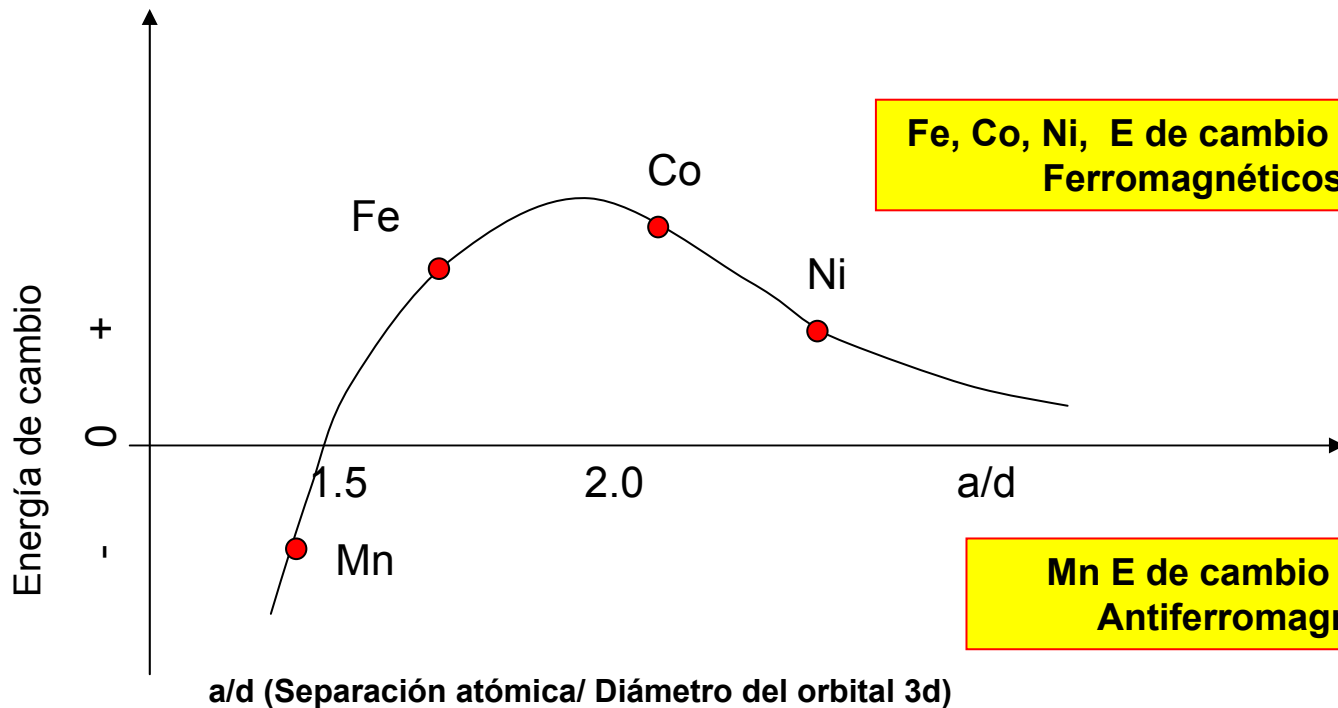
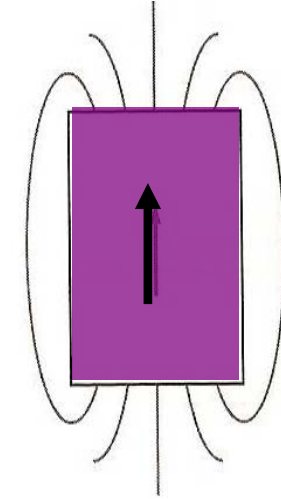
1. E de cambio
2. E magnetostática
3. E de anisotropía magnetocristalina
4. Energía de las paredes del dominio
5. E de magnetoestricción

Se alcanza la estructura magnética más estable cuando la $E_{\text{potencial total}}$ del material se reduce al mínimo

1. ENERGÍA DE CAMBIO /POSITIVA

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

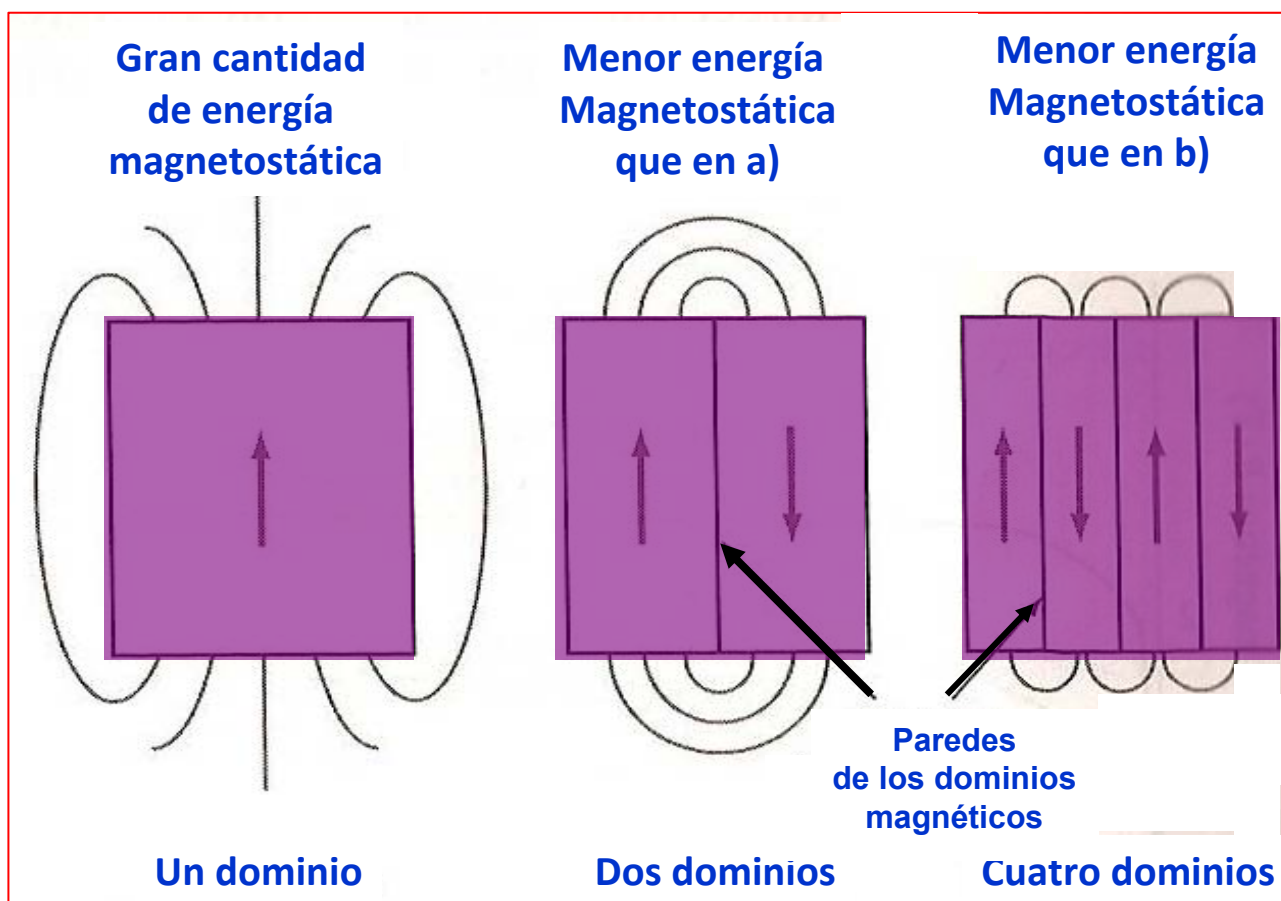


Fe, Co, Ni, E de cambio positiva
Ferromagnéticos

Mn E de cambio negativa
Antiferromagnético

2. ENERGÍA MAGNETOSTÁTICA

Energía magnética de un material ferromagnético producida por su propio campo

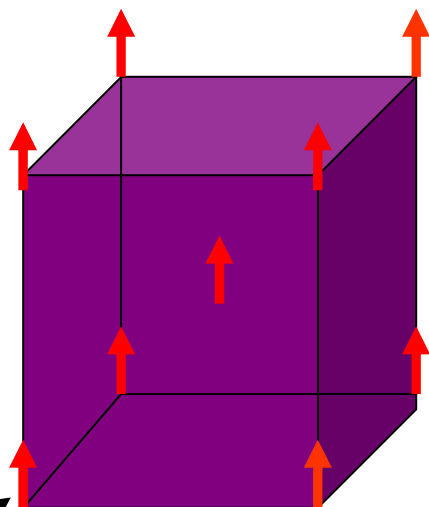
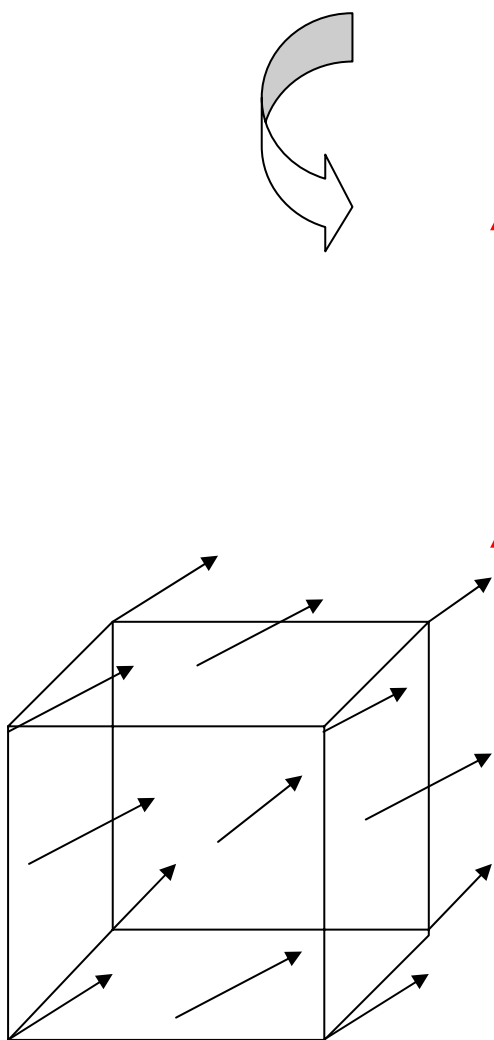


La formación de dominios múltiples reduce la $E_{\text{magnetos.}}/V$ del material

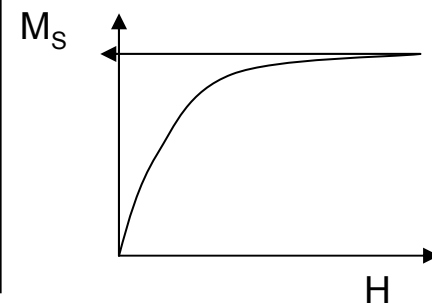
3. ENERGÍA DE ANISOTROPÍA MAGNETOCRISTALINA

Gran anisotropía: Que haya una dirección preferente de imanación

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



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



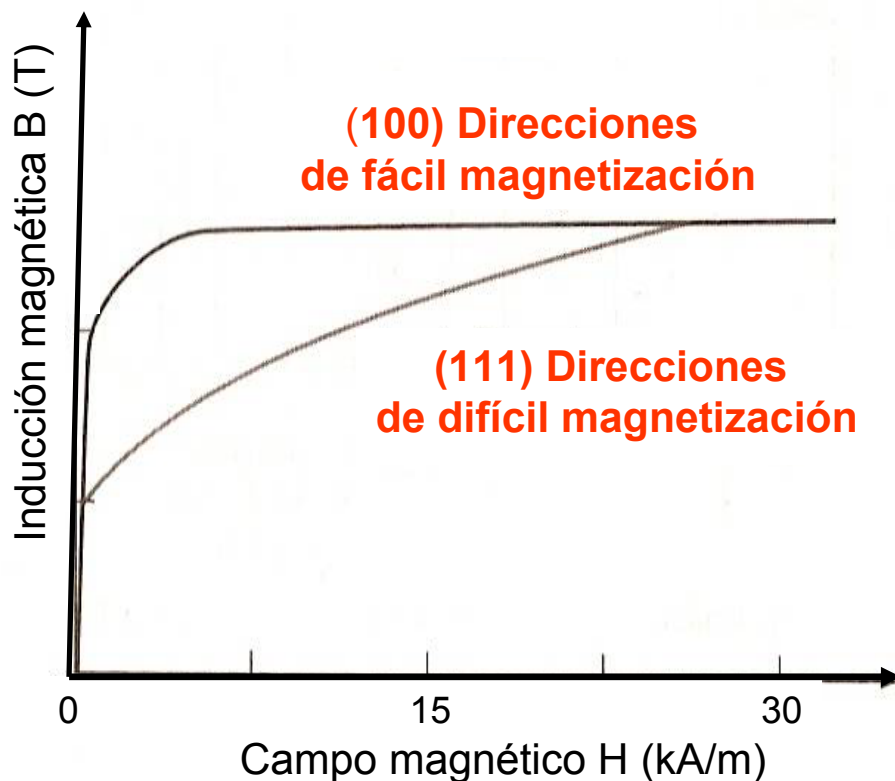
Ni (FCC)

La dirección de magnetización
no es una dirección simple

3. ENERGÍA DE ANISOTROPÍA MAGNETOCRISTALINA

Referida al trabajo realizado para girar todos los dominios

Monocristales de Fe

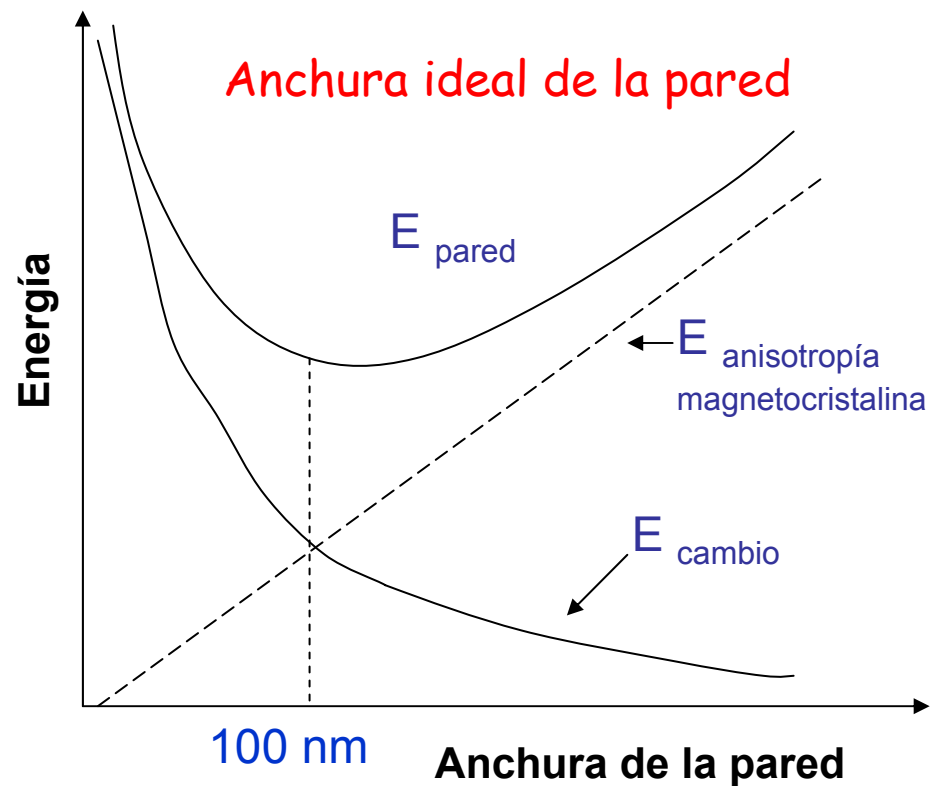
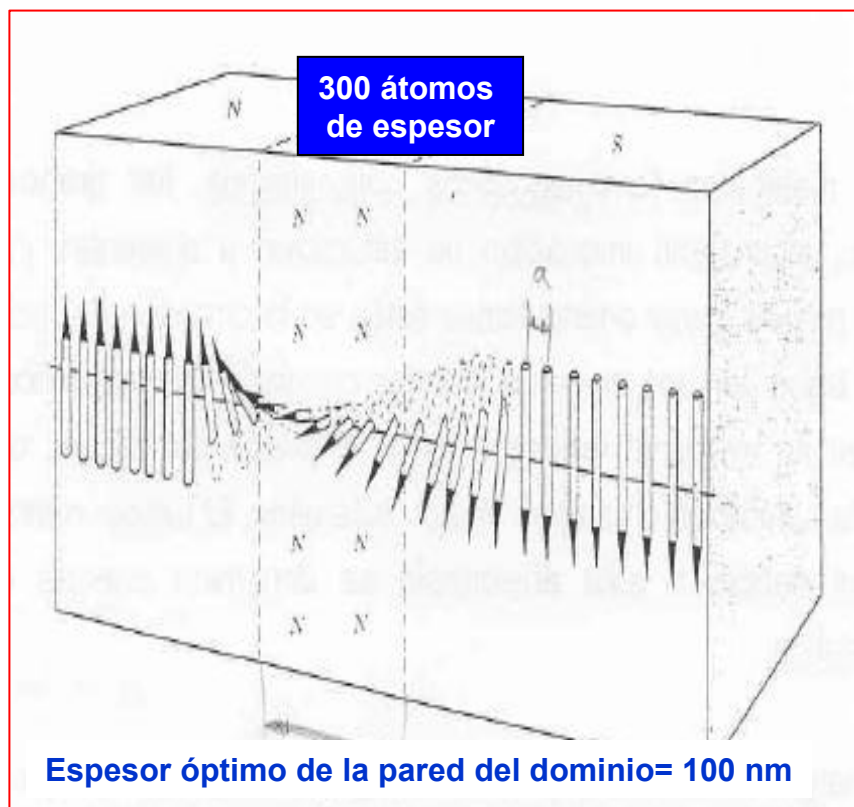


Granos que saturan a $\ll H$

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

4. ENERGÍA DE LA PARED DEL DOMINIO

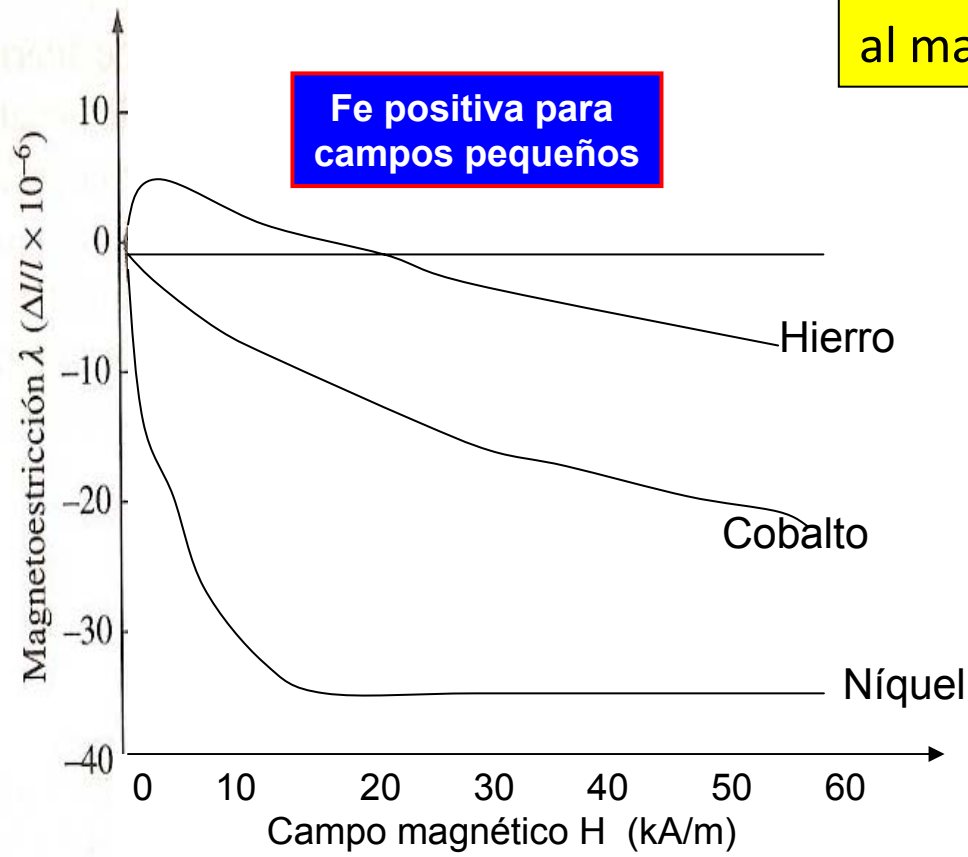
Referida al cambio de 180° que experimenta el dominio en la dirección del H



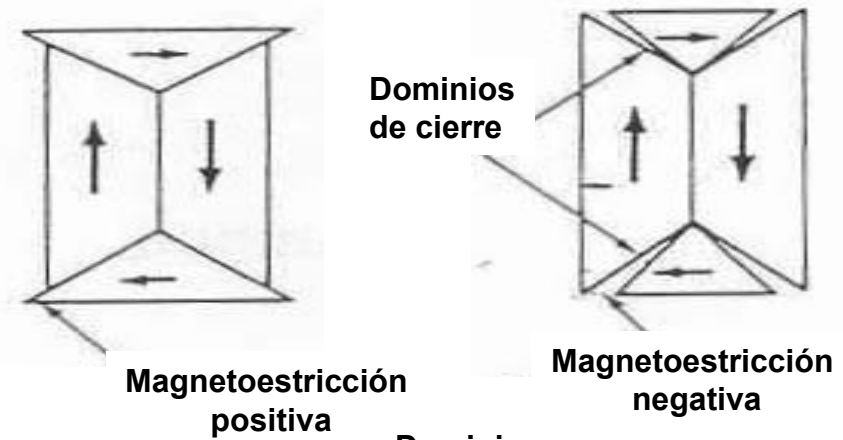
5. ENERGÍA MAGNETOESTRICTIVA

Debida a tensiones mecánicas generadas al magnetizar un material ferromagnético

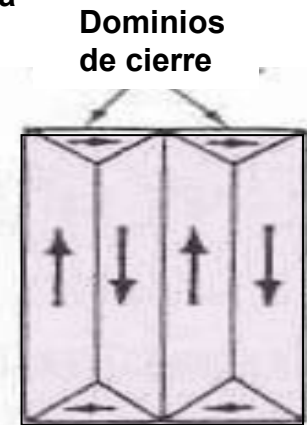
Fe positiva para campos pequeños



Contracción o expansión en la dirección de magnetización



Disminución de la magnetoestricción por creación de dominios reducidos





**EJEMPLOS DE MATERIALES
MAGNÉTICOS BLANDOS
Y SUS APLICACIONES**

Materiales magnéticos blandos. Propiedades deseables para su aplicación

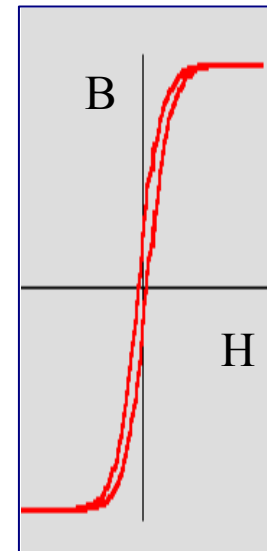
1. Ciclo de histéresis lo más fino posible
El material se magnetiza con H poco intenso
y muestra **alta** $\mu = B/H$

2. Bajo campo coercitivo, H_c , para desimantar

3. Alta inducción de saturación, B_s

4. Libre de defectos (monocristal)

5. Constituido por partículas pequeñas y alargadas de forma que cada una forme un monodominio



Cuando un material ferromagnético blando es imanado y desimanado repetidas veces se producen pérdidas de energía

- 1. Pérdidas por histéresis magnética** por disipación de E requerida para mover las paredes de los dominios durante la magnetización y la desmagnetización

Influyen:

- **Presencia de impurezas**
- **Precipitados**
- **Imperfecciones cristalinas**

El área encerrada por la curva de histéresis es una medida de la energía perdida

- 2. Pérdidas por corrientes parásitas** o corrientes inducidas por variaciones en el flujo magnético

Se pueden reducir >> la $\varphi_{\text{eléctrica}}$ del material:

- **Añadiendo impurezas sustitucionales**
- **Utilizando una estructura laminar o de hojas con intercalación de capas aislantes**

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS Y APLICACIONES

FERRITAS BLANDAS

Materiales cerámicos ferrimagnéticos

ALEACIONES DE Fe CON 3-4% DE Si

Materiales magnéticos blandos más utilizados

ALEACIONES DE Fe Y Ni

VIDRIOS METÁLICOS

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



⇒ Muestran $\varphi_{\text{eléctrica}} \gg \sim$ 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

Ferritas blandas de composición $\text{MO} \times \text{Fe}_2\text{O}_3$



Cabezas grabadoras

Bobinas de convergencia para televisión.



Tubo de rayos catódicos



Núcleos de memoria

Ferritas blandas de composición Fe_3O_4 o $\gamma-Fe_2O_3$ con tamaño de partícula nanométrico

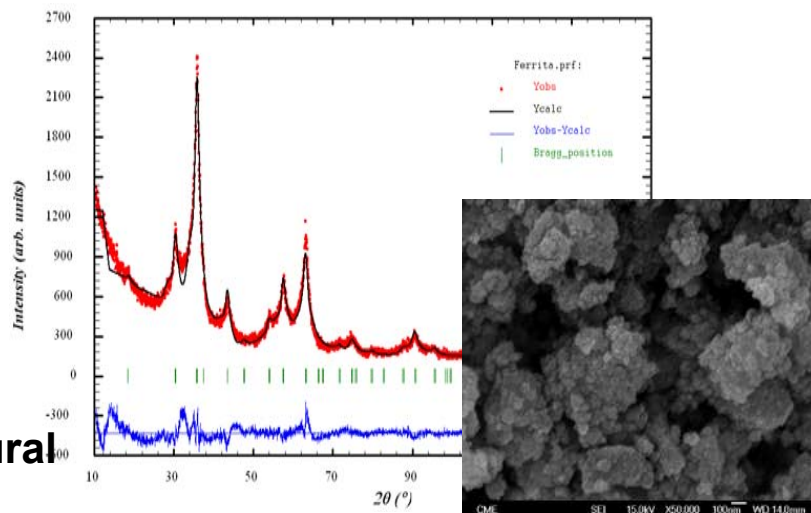
Sonicación + Filtración

Secado en estufa

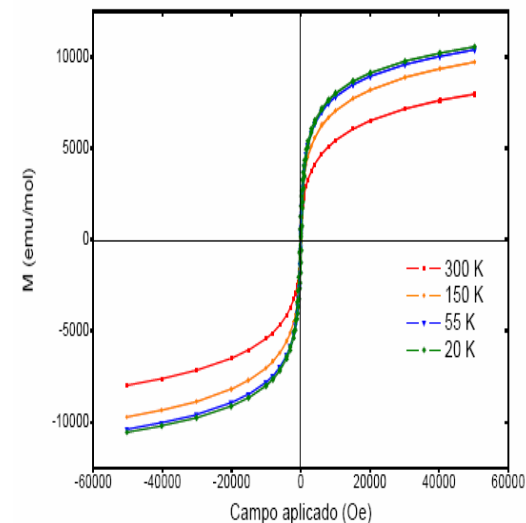


Disolución de $FeCl_2 + NaOH$

pH = 12

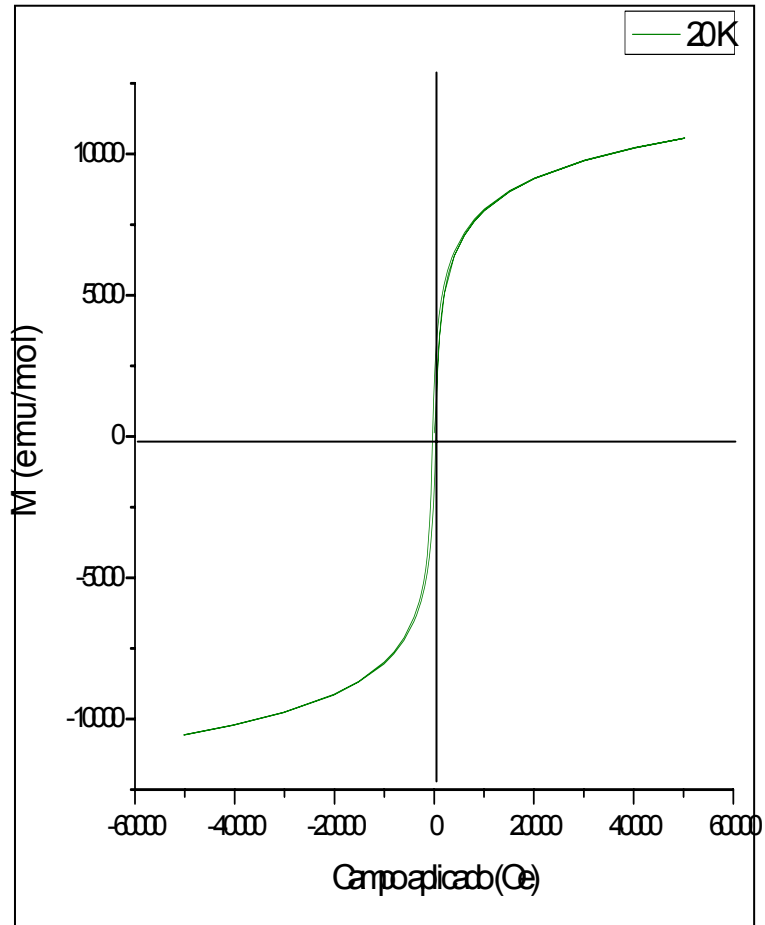


Comportamiento magnético



Caracterización estructural y microestructural

Superparamagnetismo



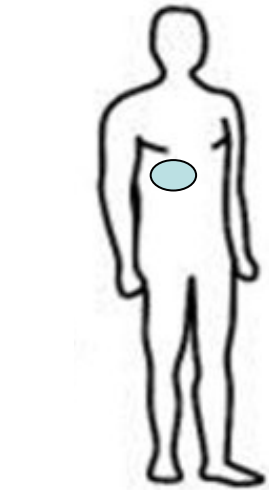
Materiales constituidos por nanopartículas de magnetita, Fe_3O_4 . Tamaño < 20 nm

FORMAN MONODOMINIOS

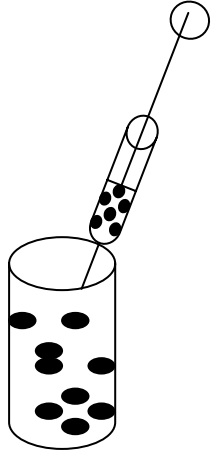
NO HAY HISTÉRESIS

- Posibilidad de generar procesos reversibles o
- De ser guiadas con un campo magnético externo

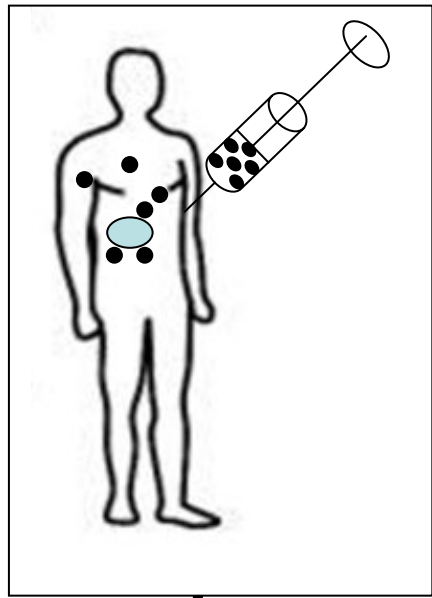
Biomedicina y nanomagnetismo



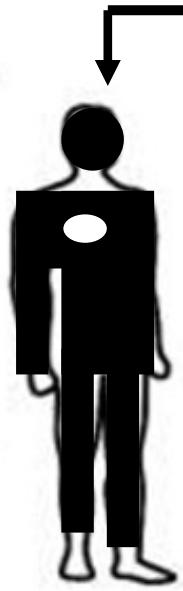
Cáncer localizado



Disolución de nanopartículas magnéticas



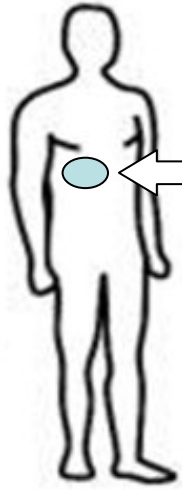
H externo



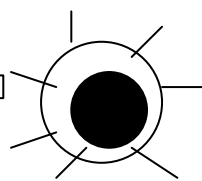
RMI



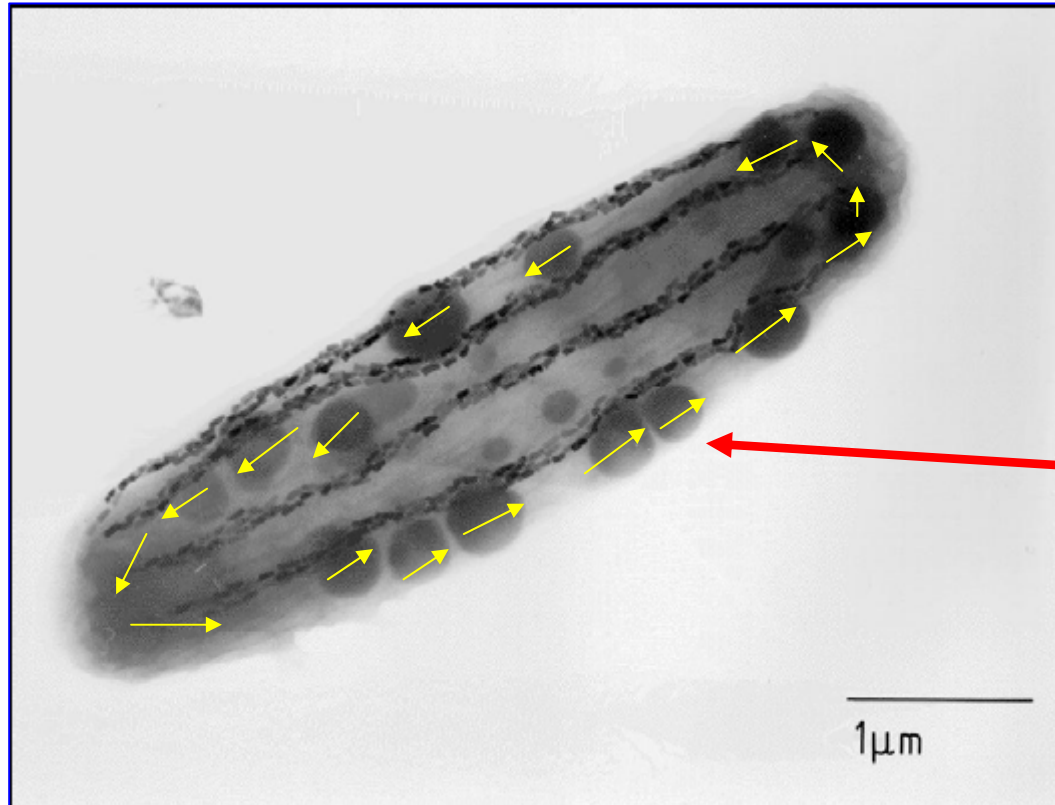
Hyperthermia



Sistema de dosificación de fármacos



Biología y nanomagnetismo

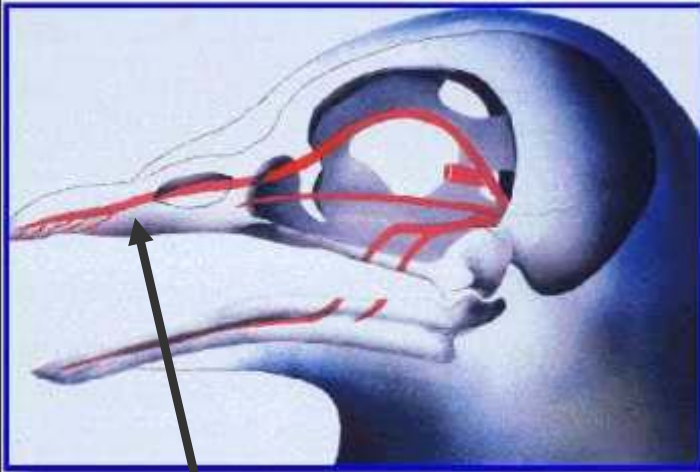


Fe_3O_4
Magnetita

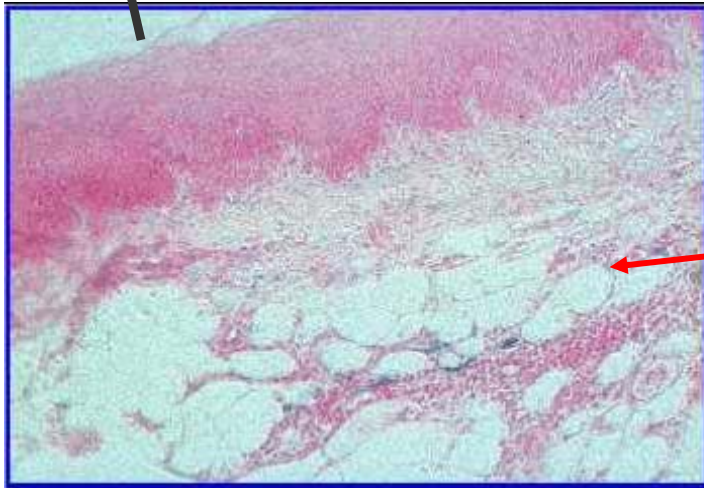
Tamaño medio
100 nm

Bacterias contienen dipolos magnéticos
para su orientación

Biología y nanomagnetismo



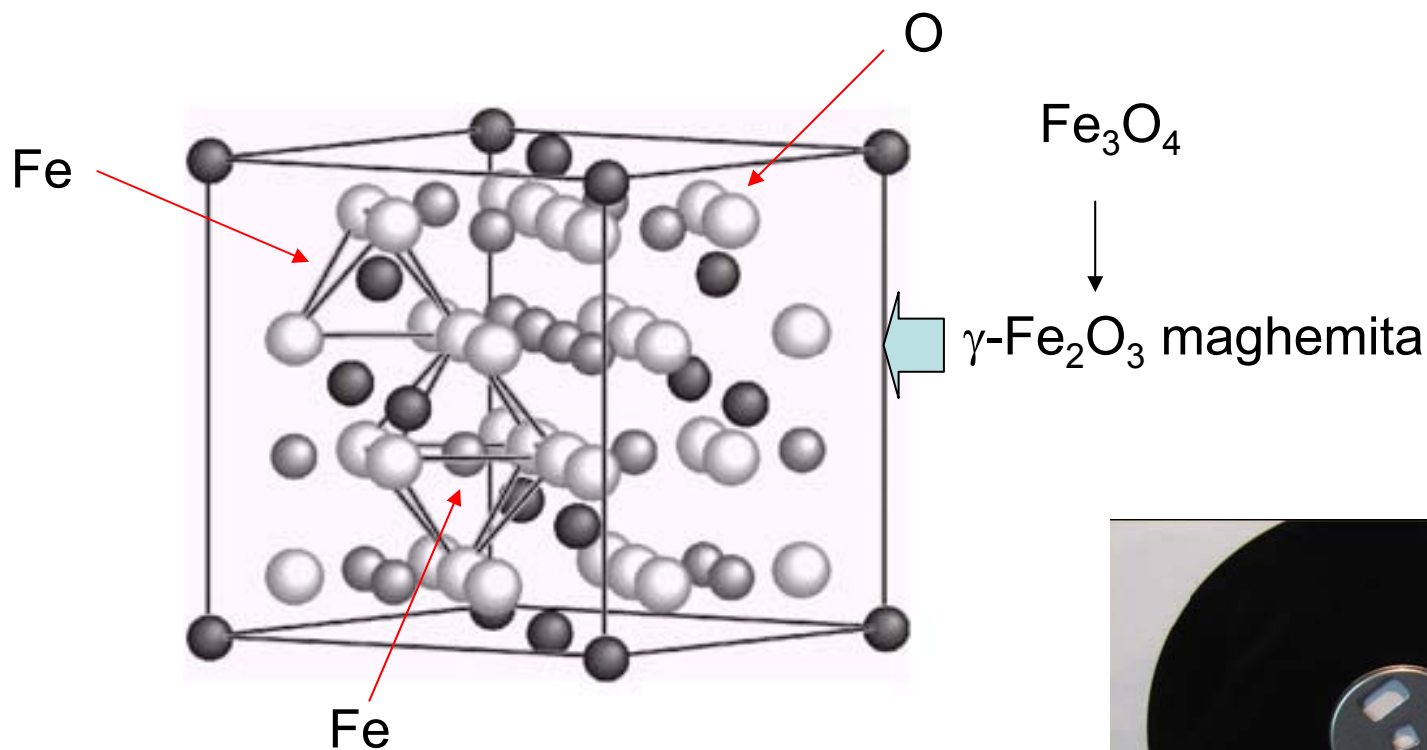
Paloma mensajera se guía con ayuda de las líneas de campo magnético terrestre



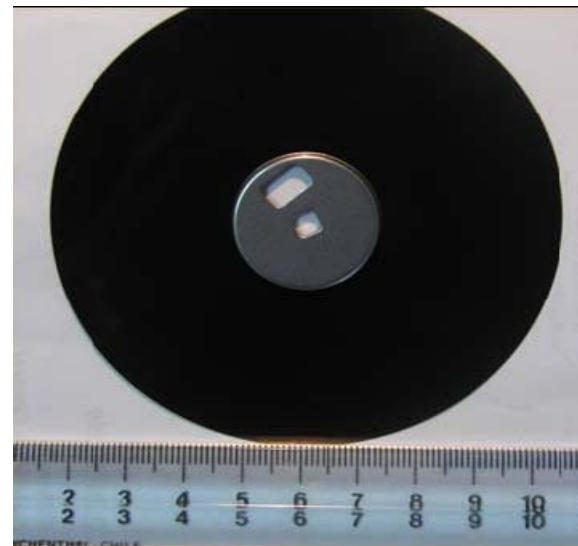
Fe_3O_4
Magnetita

Corte histológico de nervio

Tecnología y nanomagnetismo

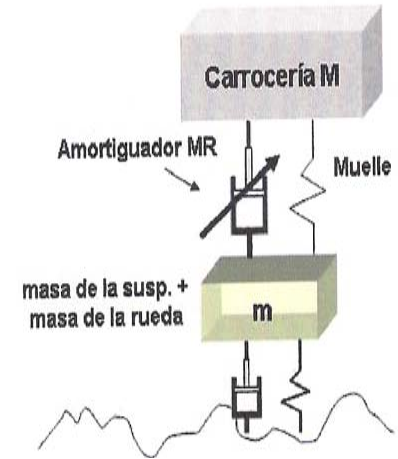
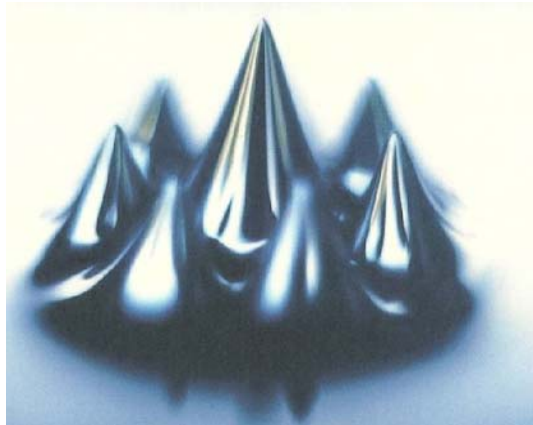
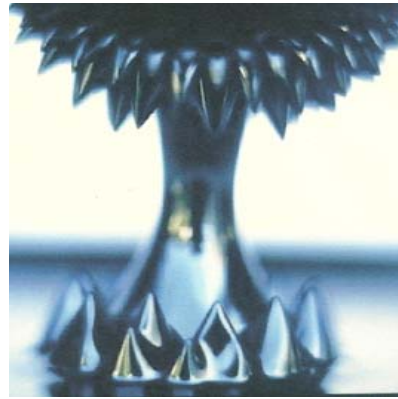
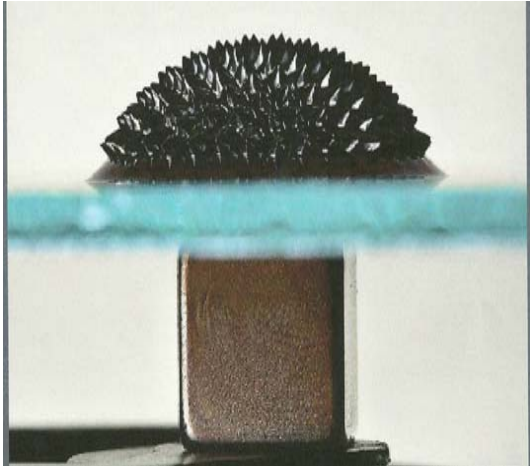


Disquete: Granos de $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3$ de 8.5 nm dispersas en una matriz plástica



Tecnología y nanomagnetismo

FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS



**Amortiguador de
suspensión semi-activa**

Tecnología y nanomagnetismo

FLUIDOS MAGNETOREOLÓGICOS

Estabilidad y maniobrabilidad de un amortiguador no MR y otro MR



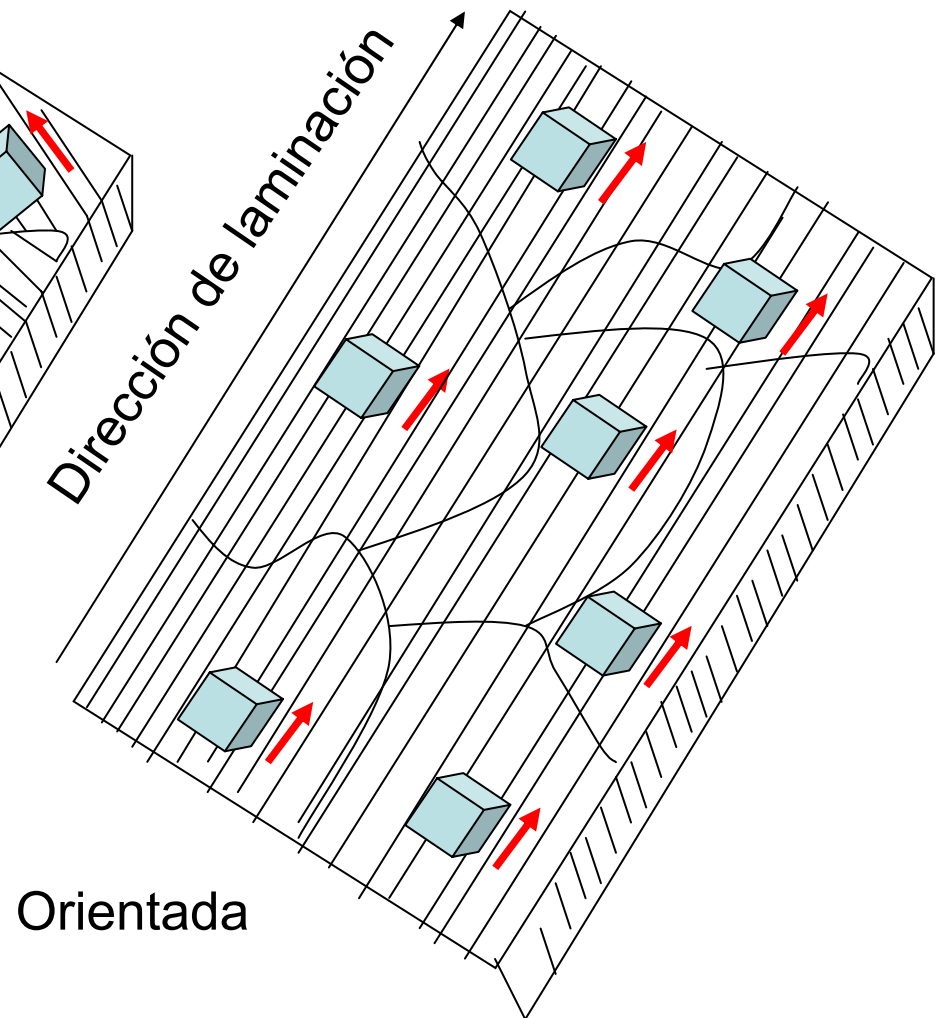
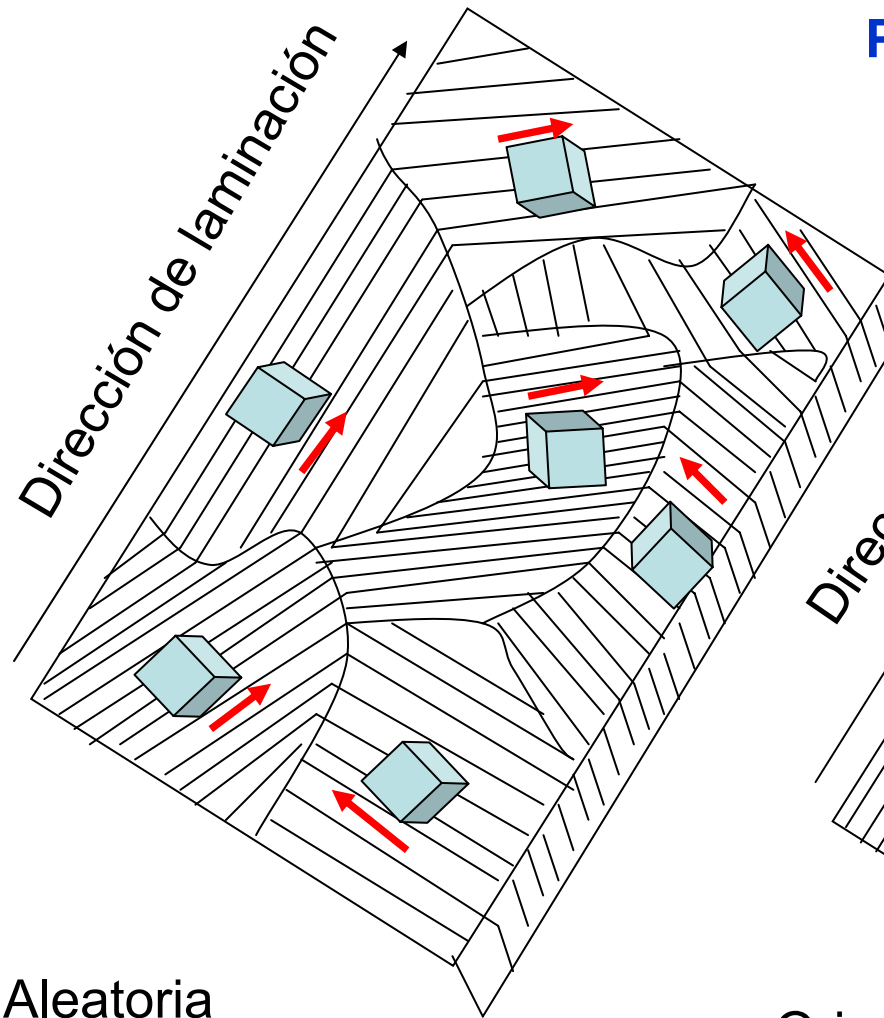
Ferritas blandas de composición $3M_2O_3 \times Fe_2O_3$
(M = metal tierra rara)

Se utilizan como guía de ondas para comunicaciones



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

Procesado por laminado en frío



Aleaciones de Fe con 3-4% de Si

Efecto positivo de la adición de Si

- $\Phi_{\text{eléctrica}} \gg$



Pérdidas por corrientes parásitas \ll

- **Pérdidas de histéresis son \ll**
 haciéndose magnéticamente más blando

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

\ll la $E_{\text{anisotropía magnetocristalina}}$
 y $E_{\text{magnetoestrictiva}}$

$\gg \mu$

Efecto negativo



- $\ll M_s$ y la T_c de la aleación

- \ll La ductilidad del Fe y para $[\text{Si}] \gg 4\%$ no se puede laminar el material

Aleaciones de Fe con 3-4% de Si

Material y composición	Inducción de saturación, B_S , T	Campo coercivo, H_c , A/cm	Permeabilidad relativa inicial μ_r
Hierro magnético, chapa de 0,2 cm	2,15	0,800	250
M36 Si-Fe laminado en frío (aleatorio)	2,04	0,360	500
M6 (110) [001], 3,2% Si-Fe (orientado)	2,03	0,060	1.500

Se utilizan en motores, transformadores ó generadores



Aleaciones de Fe y Ni

Materiales más conocidos: Permalloy (Fe + 45%Ni) y el Supermalloy (79% Ni)

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

En relación a
Aleaciones de Fe-Si

A bajos H

$\gg > \mu$

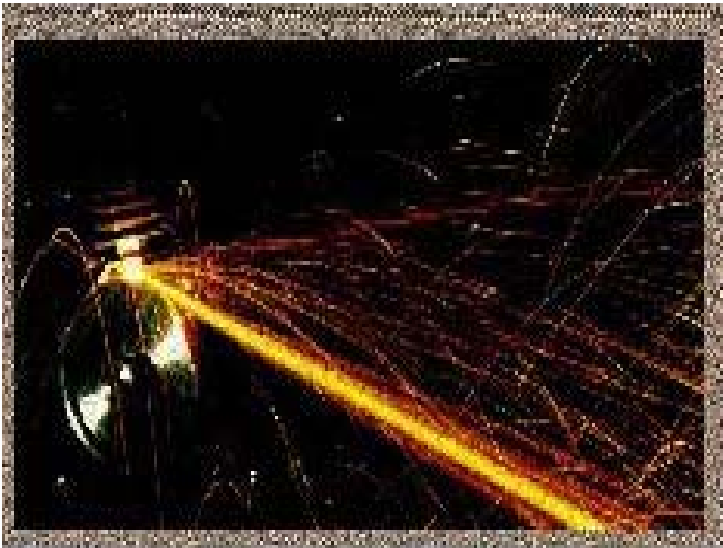
Material y composición	Inducción de saturación, B_s, T	Campo coercivo, $H_c, A/cm$	Permeabilidad relativa inicial μ_r
45 Ni-55 Fe (45 Permalloy)	1,60	0,024	2.700
75 Ni-5 Cu-2 Cr-18 Fe (Mumetal)	0,80	0,012	30.000
+79 Ni-5 Mo-15 Fe-0,5 Mn (Supermalloy)	0,78	0,004	100.000

Aplicación más importante es la comunicación de alta sensibilidad, en la que el equipo ha de recibir o transmitir pequeñas señales.

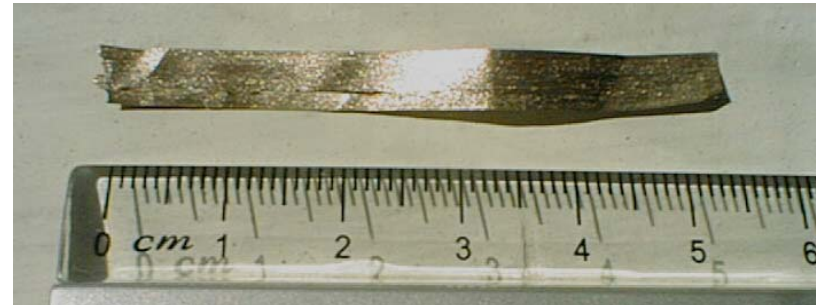
Vidrios metálicos

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

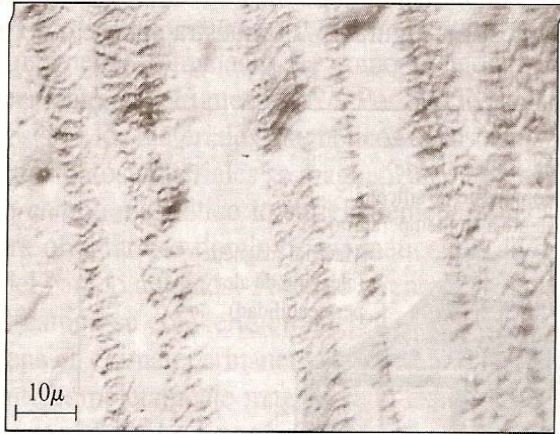
Estructura amorfa que se forma por enfriamiento rápido del fundido



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



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 $\ll \ll$ } $\gg \gg \mu$

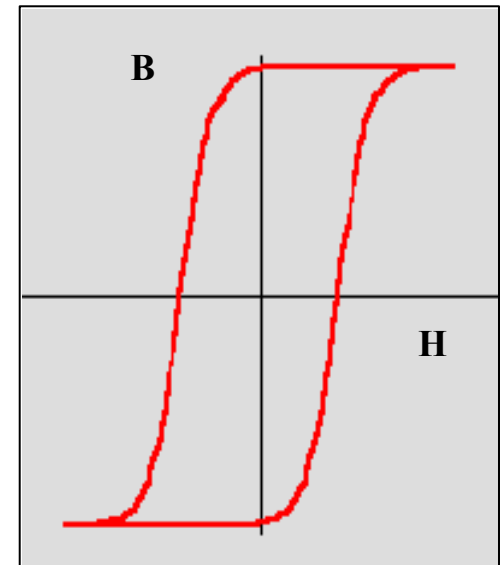
Aleación (% atómico)	B_s (T)	μ_{max}	Aplicaciones
$Fe_{78}B_{13}Si_9$	1.56	600.000	Transformadores de potencia con bajas pérdidas en el núcleo.
$Fe_{81}B_{13.5}Si_{3.5}C_2$	1.61	300.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.
$Fe_{67}Co_{18}B_{14}Si_1$	1.80	4000.000	Transformadores de pulso, interruptores magnéticos.
$Fe_{77}Cr_2B_{16}Si_5$	1.41	35.000	Transformadores de corriente, núcleos sensores.
$Fe_{74}Ni_4Mo_3B_{17}Si_2$	1.28	100.000	Bajas pérdidas en el núcleo a altas frecuencias.
$Co_{66}Fe_4Ni_1Mo_2B_{12}Si_{12}$	0.70	1.000.000	Sensores magnéticos, cabezales de grabación.

EJEMPLOS DE MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS Y SUS APLICACIONES

Con el objeto de maximizar el producto $E = [B \times H]_{\max}$

Materiales magnéticos duros. Propiedades deseables para su aplicación

1. Baja permeabilidad magnética inicial, μ_i
2. Alto campo coercitivo, H_c , para desimantar
3. Alta inducción de saturación, B_s
4. Alta remanencia, B_r



MATERIALES MAGNÉTICOS DUROS Y APLICACIONES

FERRITAS DURAS

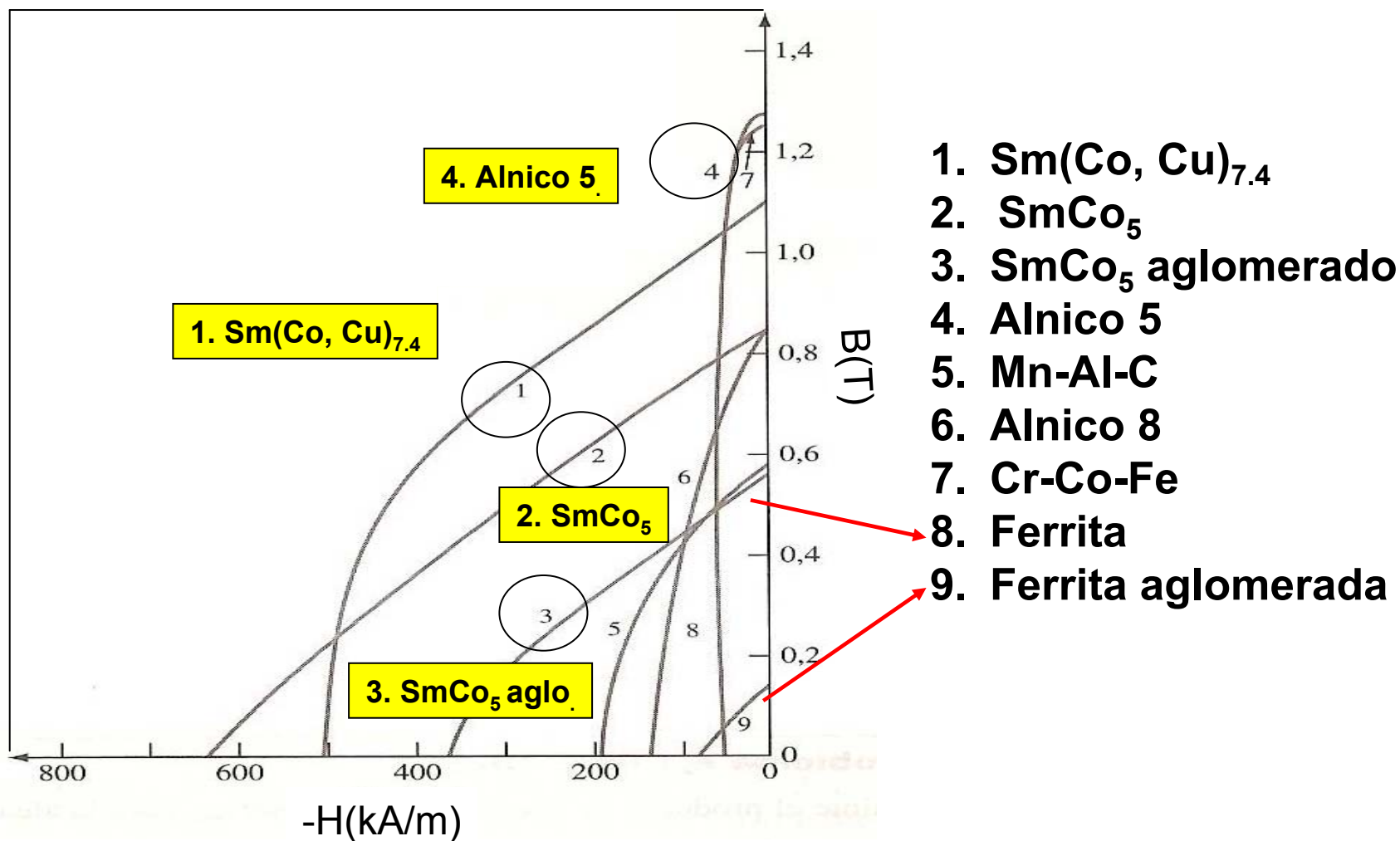
ALEACIONES DE Alnico

ALEACIONES DE TIERRAS RARAS

ALEACIONES MAGNÉTICAS DE Nd-Fe-B

ALEACIONES DE Co-Pt-Cr

Curvas de desmagnetización de varios materiales magnéticos duros



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

Ferritas hexagonales de composición $MO \times 6Fe_2O_3$ ($M = Ba^{2+}, Sr^{2+}$)

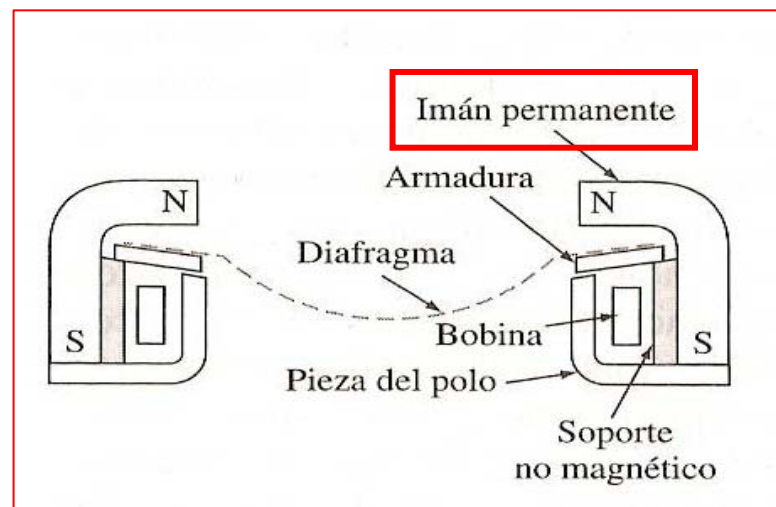
Material y composición	Inducción remanente, B_r, T	Campo coercitivo $H_c, kA/m$
$MO-6Fe_2O_3$ ($M = Ba, Sr$)	0,38	235-240

→ Bajo coste y baja densidad

→ Tienen alto H_c y $\gg E_{\text{anisotropía magnetocristalina}}$

→ Se aplican en imanes para altavoces, timbres y receptores de telefono

Hexaferrita de Ba
pegado y cierre (nevera)



Alnico (aleaciones de Al, Ni y Co)

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

Mejores imanes permanente desde 1940-1967

Muchas variantes en función de la proporción de sus elementos

Materiales magnéticos duros mas importantes

a nivel comercial

Buena resistencia a la T

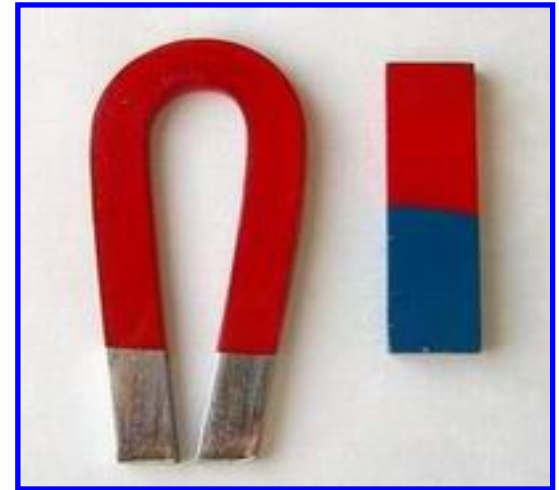
- ➡ Alta inducción remanente, B_r
- ➡ Moderada coercitividad, H_c
- ➡ Alto producto de E, $(B \times H)_{\max}$

Material y composición	Inducción remanente.	Campo coercitivo
	B_r , T	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

Alnico (aleaciones de Al, Ni y Co)

Aleaciones frágiles fabricadas en forma de polvo mediante fundición o procesos de metalurgia de polvos.

Producción de grandes cantidades de pequeños artículos con formas complejas.



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 poseen grandes constantes de anisotropía magnetocristalina

Valores altos de H_c

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

Inconveniente: debido al carácter interno de los orbitales 4f permanecen paramagnéticos a T ambiente

Excepción del Gd con $T_C = 293$ K

Limitación para su uso como imanes permanentes

Aleaciones de las Tierras Raras

Para solventarlos se fabrican imanes de tierras raras y metales de transición que poseen elevada T_c y H_c muy altos

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

Material y composición	Inducción remanente. B_r, T	Campo coercitivo $H_c, \text{kA/m}$
Tierra rara-Co, 35 Sm, 65 Co	0,90	675-1200
Tierra rara-Co, 25,5 Sm, 8 Cu, 15 Fe, 1.5Zr. 50 Co	1,10	510-520

Se producen a gran escala

$T_c \gg \gamma$ ($B_r \times H_c$) tres veces superior al AlNiCo

Aleaciones de las Tierras Raras

- Se fabrican como partículas nanométricas mediante técnicas de metalurgia de polvos
- Al aplicarles P durante la compactación, las partículas son alineadas con H.
- La sinterización previene el crecimiento de las partículas prensadas.

Se utilizan en dispositivos médicos: motores ligeros en bombas implantables y en válvulas.

Aleaciones magnéticas de Nd-Fe-B

Descubiertas en 1984, encarecimiento del precio del Co

Búsqueda de nuevos imanes

Poseen H_c aunque T_c no sea elevada



$$(B_r \times H_c) \gg \gg$$



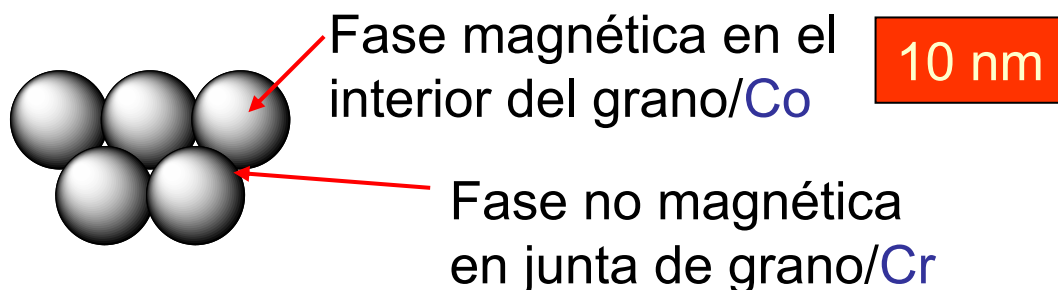
B, necesario para conseguir la anisotropía estructural, define un eje alargado

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

Debido a la reducción en peso y la posibilidad de fabricación compacta, se utilizan en motores eléctricos de arranque de automoción

Aleaciones magnéticas de Co-Pt-Cr

Aleaciones depositadas por sputtering sobre películas delgadas



La adición de Pt reduce el tamaño de grano y ayuda a la formación de la fase no magnética que separa los granos magnéticos.

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

Aleaciones magnéticas de Co-Pt-Cr

Interacción débil entre granos permitiendo transiciones magnéticas bien definidas (bit de almacenamiento).

+ Pequeño tamaño de grano

Aumento de la densidad de integración de información

Soporte magnético para almacenamiento de alta densidad de datos, discos duro de ordenadores



Antiguo disco duro de IBM (modelo 62PC, «Piccolo»), de 64,5 MB, fabricado en 1979



Almacenamiento magnético de alta densidad

Sistemas magnéticos granulares

1990: 20Gb/ 500 Gb

2003: 100Gb/

2010: teras-

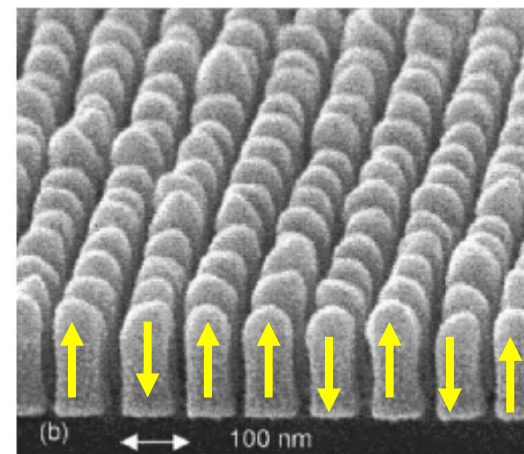
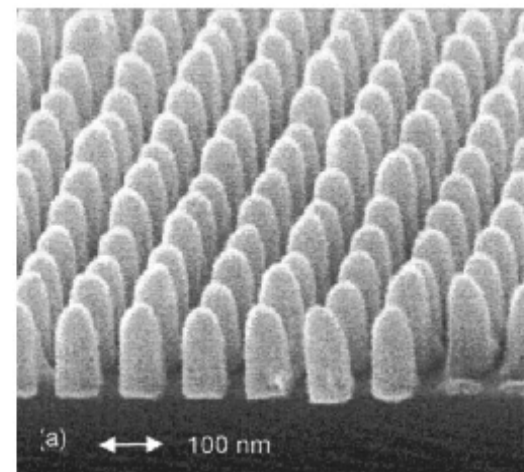


Discos de aluminio + sistemas granulares de aleaciones ferromagnéticas separados por cabezales de lecto-escritura



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

0 o 1 en función de la dirección de orientación



Grabación magnética

10110101

Esto podría continuar.....



***Existen dispositivos múltiples
que incorporan diferentes materiales magnéticos***