

Programa

Lección 10 El campo magnético y la materia

- 10.1 Introducción
- 10.2 El átomo como un dipolo magnético
- 10.3 Imanación M y corrientes de imanación
- 10.4 La intensidad del campo magnético H .
- 10.5 Susceptibilidad y permeabilidad magnética.
- 10.6 Condiciones de frontera para los campos B y H .
- 10.7 Campo molecular dentro de la materia
- 10.8 Diamagnetismo , paramagnetismo y ferromagnetismo
- 10.9 Ecuaciones de Maxwell en presencia de medios materiales. Recopilación.
- 10.10 Los campos microscopicos
- 10.11 Sistemas de Unidades.

Programa

Lección 10 El campo magnético y la materia

BIBLIOGRAFÍA

Griffiths	Lección 4 y 6
Marshall	Lección 6
Wangness	Lecciones 9, 10, 20 y 25
Reizt-Mildford-Christy	Lecciones 9 y 10

El átomo como un dipolo magnético

- En un medio dieléctrico, cuando hay un E aplicado, aparece una densidad de dipolos eléctricos por unidad de volumen, P (vector polarización)
- En un medio magnético, cuando hay un B aplicado, aparece una densidad de dipolos magnéticos por unidad de volumen, M (vector magnetización o imanación).
- El fenómeno asociado con M es más complicado, M puede apuntar en la dirección de B (paramagnetismo) o en la opuesta (diamagnetismo). En materiales ferromagnéticos, M es paralelo a B y muy grande.
- Los electrones son el origen de las propiedades magnéticas de la materia.
- Todo electrón es un pequeño imán debido a su momento angular. La suma de momentos angulares de spin es una de las contribuciones a M . Otra contribución a M proviene del momento angular orbital.
- Los núcleos no contribuyen significativamente al momento magnético del átomo

El átomo como un dipolo magnético

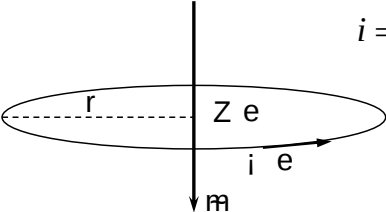
• Un modelo semiclásico nos puede hacer entender la física. Un electrón moviéndose alrededor de un núcleo en una órbita circular de radio r lo podemos visualizar como una corriente y le podemos asociar un momento magnético orbital

$$L = mvr$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = -\frac{ev}{2\pi r}$$

$$\vec{m} = -\frac{e}{2m_e} \sum_i^Z \vec{L}_i$$

órbita clásica del electrón





El átomo como un dipolo magnético

Momento magnético μ de algunas partículas elementales

Partícula elemental	Símbolo	$\mu / (\text{JT}^{-1})$
Electrón	μ_e	$-9,284.764.12(80) \times 10^{-24}$
Protón	μ_p	$1,410.606.71(12) \times 10^{-26}$
Neutrón	μ_N	$-0,966.236.45(24) \times 10^{-26}$

El átomo como un dipolo magnético

Momento magnético de diversos complejos metálicos, comparados con el momento magnético de espín.

Metal de transición	$\mu_{eff} / (M.B.)$	$\mu_{es} / (M.B.)$
<u>Vanadio</u> (IV)	1.7-1.8	1.73
<u>Cromo</u> (III)	3.8	3.87
<u>Hierro</u> (III) (espín alto)	5.9	5.92
<u>Manganeso</u> (II) (espín alto)	5.9	5.92
Hierro(II) (espín alto)	5.1-5.5	4.90
Hierro(II) (espín bajo)	0	0
<u>Cobalto</u> (II) (espín alto)	4.1-5.2	3.87
<u>Níquel</u> (II)	2.8-3.6	2.83
<u>Cobre</u> (II)	1.8-2.1	1.73

Imanación $\vec{M}$ y corrientes de imanación

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta v} \sum_i \vec{m}_i$$



Fig. 9.1 Esquema simplificado de un material magnetizado homogéneamente por corrientes atómicas circulan en el mismo sentido.

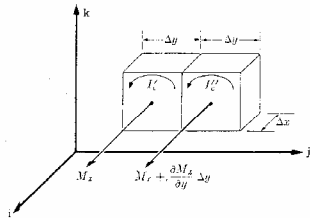
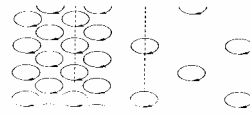


Fig. 9.3 Sustitución de elementos de volumen de material magnetizado por corrientes circulan de intensidades I'_c e I''_c .

$$\vec{M}(x, y, z) + \frac{\partial \vec{M}}{\partial y} \Delta y + \text{términos de orden superior}$$

$$M_x \Delta x \Delta y \Delta z = I'_c \Delta y \Delta z$$

$$\left(M_x + \frac{\partial M_x}{\partial y} \Delta y \right) \Delta x \Delta y \Delta z = I''_c \Delta y \Delta z$$

$$I'_c - I''_c = -\frac{\partial M_x}{\partial y} \Delta x \Delta y$$

$$(I_c)_{\text{arriba}} = \frac{\partial M_y}{\partial x} \Delta x \Delta y$$

$$(J_M)_z = \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y}$$

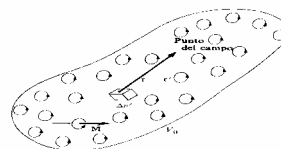


$$\vec{J} = \nabla \times \vec{M}$$

Imanación M y corrientes de imanación

Campo magnético producido por un medio imanado

$$\Delta \vec{m} = \vec{M}(x', y', z') \Delta v'$$



$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{\vec{M}(x', y', z') \times \vec{R}}{R^3} dv' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \vec{M}(x', y', z') \times \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) dv'$$

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{\nabla' \vec{M}(x', y', z')}{R} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{s_0} \frac{\vec{M}(x', y', z') \times \vec{n}}{R} dS'$$

$$\vec{K}_m = \vec{M} \times \vec{n}$$

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \frac{\vec{J}_M}{R} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{s_0} \frac{\vec{K}_M}{R} dS'$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \nabla \times \left[\vec{M} \frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv'$$

Imanación $\vec{M}$ y corrientes de imanación

Campo magnético producido por un medio imanado

$$\nabla \times (\vec{F} \times \vec{G}) = (\nabla \cdot \vec{G}) \vec{F} - (\nabla \cdot \vec{F}) \vec{G} + (\vec{G} \cdot \nabla) \vec{F} - (\vec{F} \cdot \nabla) \vec{G}$$

$$\vec{F} = \vec{M} \quad y \quad \vec{G} = \frac{\vec{R}}{R^3}$$

$$\nabla \times \left[\vec{M} \times \frac{\vec{R}}{R^3} \right] = \vec{M} \nabla \cdot \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] - (\vec{M} \cdot \nabla) \frac{\vec{R}}{R^3}$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \vec{B}_l(\vec{r}) + \vec{B}_n(\vec{r})$$

$$\vec{B}_l(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \vec{M} \nabla \cdot \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv'$$

$$\vec{B}_n(\vec{r}) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} (\vec{M} \cdot \nabla) \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv'$$

Imanación $\vec{M}$ y corrientes de imanación

Campo magnético producido por un medio imanado

$$\vec{B}_l(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \vec{M} \nabla \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dV'$$

$$\vec{B}_l(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \vec{M} 4\pi \delta(\vec{R}) dV' = \mu_0 \vec{M}(\vec{r})$$

$$\vec{B}_H(\vec{r}) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \left(\vec{M} \nabla \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] \right) dV'$$

$$\nabla \left[\vec{M} \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] \right] = \left(\vec{M} \nabla \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] \right) + \vec{M} \times \nabla \times \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right]$$

$$\nabla \times \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] = -\nabla \times \nabla \left[\frac{1}{R} \right]$$

$$\vec{B}_H(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \left[\frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \vec{M} \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dV' \right] = -\mu_0 \nabla \phi(\vec{r})$$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \vec{M} \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dV'$$

$$\boxed{\vec{B}(\vec{r}) = -\mu_0 \nabla \phi(\vec{r}) + \mu_0 \vec{M}(\vec{r})}$$

Imanación $\vec{M}$ y corrientes de imanación

Potencial escalar magnético

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} \vec{M} \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv'$$

$$\vec{M} \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] = \vec{M} \nabla' \left[\frac{1}{R} \right] = \nabla' \left[\frac{\vec{M}}{R} \right] - \left[\frac{1}{R} \right] \nabla' \vec{M}$$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left[\frac{\vec{M} \vec{n}}{R} \right] dS' - \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} \left[\frac{\nabla' \vec{M}}{R} \right] dv'$$

Densidad de “monopolo magnético”

$$\rho_M(\vec{r}) = -\nabla' \vec{M}(\vec{r}')$$

$$\sigma_M(\vec{r}) = \vec{M}(\vec{r}') \vec{n}$$

$$\int_{v_0} -\nabla' \vec{M}(\vec{r}') dv' + \int_{S_0} \vec{M}(\vec{r}') \vec{n} dS' = 0$$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} \left[\frac{\rho_M}{R} \right] dv' + \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left[\frac{\sigma_M}{R} \right] dS'$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v_0} \rho_M \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_0} \sigma_M \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dS' + \mu_0 \vec{M}$$

Intensidad del campo magnético H

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} \left[\frac{\vec{J} \times \vec{R}}{R^3} \right] dV' - \mu_0 \nabla \phi_M(\vec{r}) + \mu_0 \vec{M}(\vec{r})$$

$$\phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \left[\frac{\rho_M}{R} \right] dV' + \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \left[\frac{\sigma_M}{R} \right] dS'$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M}$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_0} \left[\frac{\vec{J} \times \vec{R}}{R^3} \right] dV' - \nabla \phi_M(\vec{r})$$

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

Ecuaciones del campo magnético

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{M} = \vec{J}_M$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{J}_M)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$\int_S \nabla \times \vec{H} d\vec{S} = \oint \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{J} \vec{n} dS$$

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{J} \vec{n} dS = I$$

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

Susceptibilidad y permeabilidad

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

$$|\chi_m| \ll 1 \text{ materiales para y diamagneticos}$$

Materiales diamagneticos: decrecen ligeramente el campo magnético en su vecindad: Vidrio, cobre. No tienen momento magnetico permanente

Materiales paramagneticos aumentan ligeramente el campo magnético en su vecindad: Oxígeno, titanio. Tienen momento magnetico permanente

Materiales ferromagneticos aumentan mucho el campo magnetico en su vecindad: Hierro, cobalto, níquel. Tienen momento magnetico permanente

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

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

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m$$

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

$$\mu_{in} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

Tabla 9.1 Susceptibilidad magnética de algunos materiales paramagnéticos y diamagnéticos a temperatura ambiente*

Material	χ_m	$\chi_{m, masa}$ m ³ /kg
Aluminio	2.1×10^{-5}	0.77×10^{-8}
Bióxido de carbono (1 atm)	-1.19×10^{-8}	-0.60×10^{-8}
Bismuto	-1.64×10^{-5}	-1.68×10^{-8}
Cloruro de gadolinio (GdCl ₃)	603.0×10^{-5}	133.3×10^{-8}
Cobre	-0.98×10^{-5}	-0.11×10^{-8}
Diamante	-2.2×10^{-5}	-0.62×10^{-8}
Hidrógeno (1 atm)	-0.22×10^{-8}	-2.48×10^{-8}
Magnesio	1.2×10^{-5}	0.68×10^{-8}
Mercurio	-2.8×10^{-5}	-0.21×10^{-8}
Nitrógeno (1 atm)	-0.67×10^{-8}	-0.54×10^{-8}
Oro	-3.5×10^{-5}	-0.18×10^{-8}
Oxígeno (1 atm)	193.5×10^{-8}	135.4×10^{-8}
Plata	-2.4×10^{-5}	-0.23×10^{-8}
Sodio	0.84×10^{-5}	0.87×10^{-8}
Titanio	18.0×10^{-5}	4.01×10^{-8}
Tungsteno	7.6×10^{-5}	0.40×10^{-8}

* Datos obtenidos del *Handbook of Chemistry and Physics*, 58.ª ed., CRC Press, Inc., Cleveland, Ohio. Prácticamente todas las fuentes de datos dan susceptibilidades magnéticas en unidades gaussianas (cgs); si el superíndice (1) se usa para indicar la constante en el sistema gaussiano, entonces $\chi_m = 4\pi\chi_m^{(1)}$ y $\chi_{m, masa} = 4\pi \times 10^{-3} \chi_{m, masa}^{(1)}$.

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

Tabla 9.2 Propiedades de algunos materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente*

M_s = magnetización de saturación, H_s = intensidad magnética necesaria para la saturación, H_c = coercitividad, B_r = remanencia

Material	Composición, %	$\mu_0 M_s$, T	H_s , A/m	K_m , máxima
Hierro (templado)		2.15	1.6×10^5	5,500
Cobalto		1.79	7.0×10^5	
Níquel		0.61	5.5×10^5	
ALEACIONES			H_c , A/m	
Hierro-silicio	96 Fe, 3 Si	2.02	56	8,000
Permalloy	55 Fe, 45 Ni	1.60	5.6	50,000
Mumetal	5 Cu, 2 Cr, 77 Ni, 16 Fe	0.75	1.2	150,000
Permendur	50 Co, 50 Fe	2.40	159	6,000
Mn ferrita	$MnFe_2O_4$	0.49		2,500
Ni ferrita	$NiFe_2O_4$	0.32		2,500
		B_r , T		
Acero al cobalto	52 Fe, 36 Co, 4 W, 6 Cr, 0.8 C	0.97	19×10^3	
Alnico V	51 Fe, 8 Al, 14 Ni, 24 Co, 3 Cu	1.25	49×10^3	

* Datos del *American Institute of Physics Handbook*, 3.^a ed., McGraw-Hill, Nueva York, 1972.

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

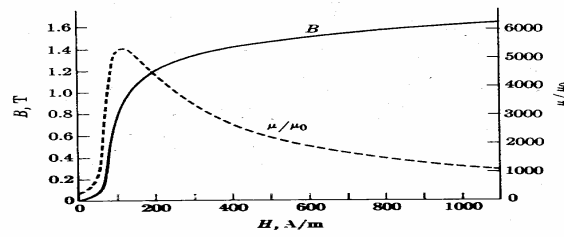


Fig. 9.5 Curva de magnetización y permeabilidad relativa del hierro comercial (templado).

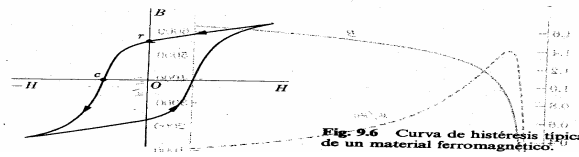


Fig. 9.6 Curva de histéresis típica de un material ferromagnético.

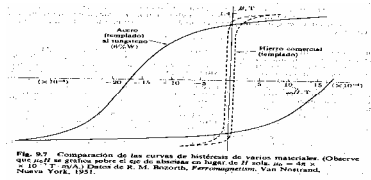


Fig. 9.7 Comparación de las curvas de histéresis de varios materiales (Observe que, para un mismo valor de H , el valor de B varía con el tipo de H solo, $\mu_r = B/H = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$). Datos de R. M. Hazen, *Ferromagnetism*, Van Nostrand, Nueva York, 1921.

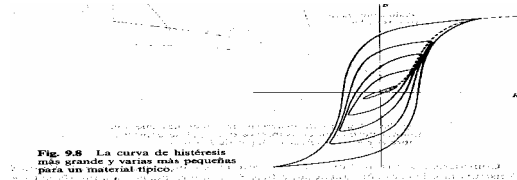


Fig. 9.8 La curva de histéresis más grande y varias más pequeñas para un material típico.

Condiciones en la frontera de separación entre dos medios magnéticos

$$\vec{B}_2 \vec{n}_2 \Delta S + \vec{B}_1 \vec{n}_1 \Delta S = 0$$

$$(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) \vec{n}_2 = 0$$

$$B_{2n} - B_{1n} = 0$$

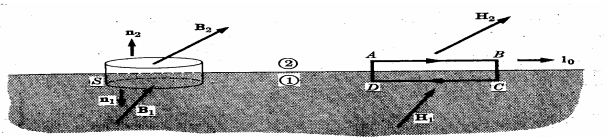
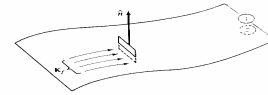


Fig. 9.10 Las condiciones en la frontera sobre los vectores de campo en una zona interfacial entre dos medios se pueden obtener aplicando la ley de Gauss en S , e integrando $\vec{H} \cdot d\vec{l}$ alrededor de la trayectoria $ABCD$.



$$(\vec{H}_2 - \vec{H}_1) \vec{l}_0 = \vec{j} (\vec{n}_2 \times \vec{l}_0) = \vec{j} \times \vec{n}_2 \vec{l}_0$$

$$(H_2 - H_1)_n = \vec{j} \times \vec{n}_2$$

$$\vec{n}_2 (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{j}$$

$$\int_V \nabla \cdot \vec{B} dv = 0 = \int_{S_2} \vec{B} d\vec{S} - \int_{S_1} \vec{B} d\vec{S} = \Phi(S_2) - \Phi(S_1)$$

$$\int_V \nabla \cdot \vec{H} dv = \int_{S_2} \vec{H} d\vec{S} - \int_{S_1} \vec{H} d\vec{S} = \int_V \rho_M dv$$

Campo molecular dentro de la materia imanada

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} \left[\frac{\vec{J} \times \vec{R}}{R^3} \right] dv' + \frac{1}{4\pi} \int_{v_0} \rho_M \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S_0} \sigma_M \left[\frac{\vec{R}}{R^3} \right] dS' + \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{H}_m = \vec{H} + \vec{H}_s + \vec{H}'$$

H_m Campo molecular o local

H campo macroscopico

H_s Contribucion de la densidad superficial sobre la superficie de la cavidad

H' Contribucion de los dipolos en el interior de la cavidad

Supongamos el caso de imanación constante

$$\vec{H}_s = \frac{1}{3} \vec{M}$$

$$\vec{H}' = \frac{1}{4\pi} \sum_i \left(\frac{3(\vec{m}_i \cdot \vec{r}_i) \vec{r}_i}{r_i^5} - \frac{\vec{m}_i}{r_i^3} \right)$$

$$\vec{H}_m = \vec{H} + \frac{1}{3} \vec{M}$$

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

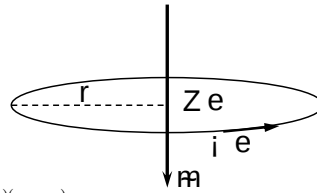
Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

El diamagnetismo

$$F_q = m_e \omega_0^2 R$$

$$\vec{F} = -q \vec{v} \times \vec{B}_m$$

$$F_q \pm q \omega R B_m = m_e \omega^2 R$$



$$\pm q \omega B_m = m_e (\omega - \omega_0)(\omega + \omega_0)$$

$$\Delta \omega = \pm \frac{q}{2m_e} B_m$$

$$\frac{q}{2m_e} B_m \text{ frecuencia de Larmor}$$

$$\varepsilon = \pi R^2 \frac{dB_m}{dt} \Delta n = \pi R^2 \frac{dn}{dt} \Delta B_m$$

$$\frac{1}{2} m_e R^2 (\omega^2 - \omega_0^2) = q \pi R^2 \frac{dn}{dt} \Delta B_m$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{(\omega + \omega_0)}{4\pi}$$

$$\Delta \omega = \pm \frac{q}{2m_e} B_m$$

$$\Delta \vec{m} = -\frac{q}{2\pi} \pi R^2 \frac{q}{2m_e} B_m = -\frac{q^2}{4m_e} R^2 \mu_0 H_m$$

$$\vec{M} = \frac{Nq^2 \mu_0}{4m_e} H_m \sum_i R_i^2$$

$$\chi_m = -\frac{Nq^2 \mu_0}{4m_e} \sum_i R_i^2$$

$$\chi_m = -\frac{Nq^2 \mu_0}{4m_e} \sum_i R_i^2 \cos^2 \theta_i$$

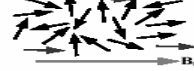
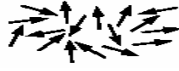
Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Todos los átomos contienen electrones que se mueven libremente y cuando se aplica un campo magnético exterior se induce una corriente superpuesta cuyo efecto magnético es opuesto al campo aplicado.

Otra forma de explicar el diamagnetismo es a partir de la configuración electrónica de los átomos o de los sistemas moleculares. De esta forma, el comportamiento diamagnético lo presentan sistemas moleculares que contengan todos sus electrones apareados y los sistemas atómicos o iónicos que contengan orbitales completamente llenos. Es decir los espines de los electrones del último nivel se encontrarán apareados. El diamagnetismo se presenta en todos los sistemas aromáticos (por ejemplo, el benceno y sus derivados) en los que aparece un anillo de $4n + 2$ electrones π conjugados.

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

El paramagnetismo



$$z = \frac{m_0 \mu_0 H_m}{kT}$$

$$|\vec{M}| = Nm_0 \left[\cot g h z - \frac{1}{z} \right]$$

$$\vec{M} = \frac{Nm_0^2}{3kT} \mu_0 \vec{H}_m$$

$$\chi_m = \frac{Nm_0^2 \mu_0}{3kT}$$

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

El ferromagnetismo, dominios ferromagneticos y ferritas

$$\vec{H}_m = \gamma \vec{M}$$

$$M > 0.7 Nm_0$$

$$z = \frac{m_0 \mu_0 H_m}{kT} > 3$$

$$0.7 \frac{\gamma N m_0^2 \mu_0}{kT} > 3$$

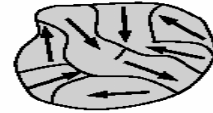
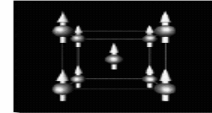
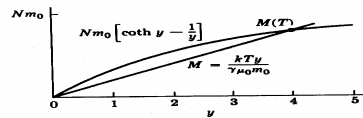


FIGURA 10-2
Determinación de la magnetización espontánea $M(T)$ con ayuda de la función de Langevin.



$$|\vec{M}| = Nm_0 \left[\cot ghz - \frac{1}{z} \right]$$

$$M = \frac{kTz}{\gamma \mu_0 m_0}$$

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

El ferromagnetismo, dominios ferromagneticos y ferritas



Fig. 10.3 Estructuras de dominios ferromagnéticos: (a) monocristal, (b) muestra policristalina. Las flechas representan la dirección de magnetización.

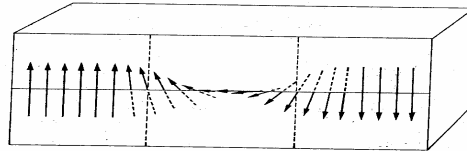


Fig. 10.4 Estructura de la región de transición, o «pared de Bloch», entre los dominios de un material ferromagnético.

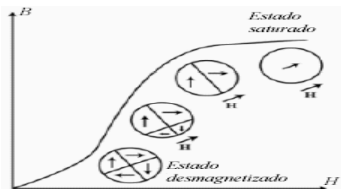
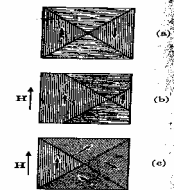
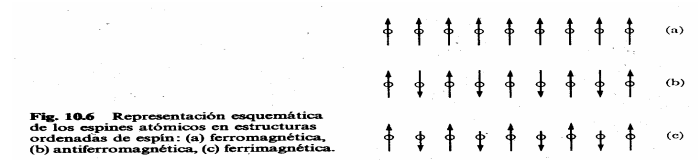


Fig. 10.5 Magnetización de un material ferromagnético: (a) desmagnetizado, (b) magnetización por el movimiento de la pared del dominio, (c) magnetización por la rotación del dominio.



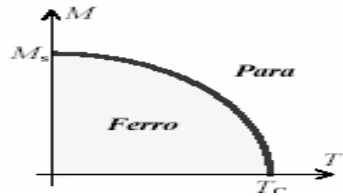
Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

El ferromagnetismo, dominios ferromagneticos y ferritas



Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Materiales ferromagneticos. Temperatura de Curie

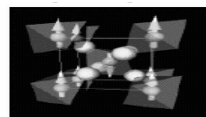


Material	T_c (K)	Material	T_c (K)
Fe	1043	Cu ₂ MnIn	500
Co	1388	EuO	77
Ni	627	EuS	16.5
Gd	293	MnAs	318
Dy	85	MnBi	670
CrBr ₃	37	GdCl ₃	2.2
Au ₂ MnAl	200	Fe ₂ B	1015
Cu ₂ MnAl	630	MnB	578

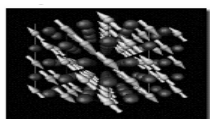
Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Antiferromagnetismo

Antiferromagnetismo:



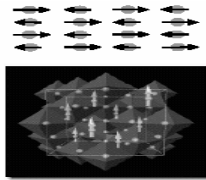
Temperatura de Neel



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 ₅	170
MnF ₂	72-75		

Diamagnetismo, paramagnetismo y ferromagnetismo

Ferrimagnetismo



Ecuaciones de Maxwell en presencia de medios materiales: Recopilación

$$\nabla \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho - \nabla \vec{P})$$

$$\nabla \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \left(\vec{J}(\vec{r}, t) + \nabla \times \vec{M}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

$$\nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \vec{J}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\nabla \vec{D} = \rho$$

$$\int_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{J}$$

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = i(C)$$

Los campos microscópicos

$$\nabla \vec{e} = \frac{\rho_{mic}}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \vec{b} = 0$$

$$\nabla \times \vec{e} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \vec{b} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} = \mu_0 \vec{J}_{mic}$$

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \langle \vec{e}(\vec{r}, t) \rangle$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \langle \vec{b}(\vec{r}, t) \rangle$$

$$\langle \nabla \vec{b}(\vec{r}, t) \rangle = \nabla \vec{B} = 0$$

$$\left\langle \nabla \times \vec{e} + \frac{\partial \vec{b}}{\partial t} \right\rangle = \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\langle \rho_{mic} \rangle}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \times \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \langle \vec{J}_{mic} \rangle$$

Los campos microscópicos

Contribución de las cargas y corrientes a los campos macroscópicos

$$\langle \rho_{mic} \rangle = \rho(\vec{r}, t) - \nabla \cdot \vec{P}(\vec{r}, t) + \nabla \cdot [\nabla Q(\vec{r}, t)] + \dots$$

$$\langle \rho_{mic} \rangle = \rho(\vec{r}, t) - \nabla \cdot \vec{P}(\vec{r}, t)$$

$$\vec{P}(\vec{r}, t) = \left\langle \sum_n \vec{p}_n \delta(\vec{r} - \vec{r}_n) - \nabla Q \delta(\vec{r} - \vec{r}_n) + \dots \right\rangle$$

$$\langle \vec{J}_{mic} \rangle = \vec{J}(\vec{r}, t) + \nabla \times \vec{M}(\vec{r}, t) + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$$

Sistemas de Unidades

$$\vec{F} = K_e \frac{q q'}{R^2}$$

$$\frac{d\vec{F}}{dl} = 2K_m \frac{I I'}{R}$$

$$\Delta \Psi - \frac{K_m}{K_e} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \Psi - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{K_m}{K_e} = \varepsilon_0 \mu_0$$

$$\boxed{\frac{K_e}{K_m} = c^2}$$

Sistemas de Unidades

CANTIDAD	MKSA	GAUSSIANO
Capacitancia	C	$4\pi\epsilon_0 C$
Carga	q	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} q$
Densidad de carga	$\rho, (\sigma, \lambda)$	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} \rho, (\sigma, \lambda)$
Conductividad	σ	$4\pi\epsilon_0 \sigma$
Corriente	I	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} I$
Densidad de corriente	$J, (K)$	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} J, (K)$
Constante dieléctrica	κ_e	ϵ
Momento dipolar (eléctrico)	p	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} p$
Momento dipolar (magnético)	m	$(4\pi/\mu_0)^{1/2} m$
Desplazamiento	D	$(\epsilon_0/4\pi)^{1/2} D$
Campo eléctrico	E	$(4\pi\epsilon_0)^{-1/2} E$
Inductancia	L	$(4\pi\epsilon_0)^{-1} L$
Campo magnético	H	$(4\pi\mu_0)^{-1/2} H$
Flujo magnético	Φ	$(\mu_0/4\pi)^{1/2} \Phi$
Inducción magnética	B	$(\mu_0/4\pi)^{1/2} B$
Magnetización	M	$(4\pi/\mu_0)^{1/2} M$
Permeabilidad	μ	(1) $\kappa_m \mu_0$, entonces (2) $\kappa_m \rightarrow \mu$
Permeabilidad (relativa)	κ_m	μ
Capacidad inductiva específica	ϵ	(1) $\kappa_e \epsilon_0$, entonces (2) $\kappa_e \rightarrow \epsilon$
Polarización	P	$(4\pi\epsilon_0)^{1/2} P$
Resistencia	R	$(4\pi\epsilon_0)^{-1} R$
Resistividad	ρ	$(4\pi\epsilon_0)^{-1} \rho$
Potencial escalar	ϕ	$(4\pi\epsilon_0)^{-1/2} \phi$
Velocidad de la luz	$(\mu_0\epsilon_0)^{-1/2}$	c
Susceptibilidad	$\chi_e, (\chi_m)$	$4\pi\chi_e, (\chi_m)$
Potencial vectorial	A	$(\mu_0/4\pi)^{1/2} A$

Sistemas de Unidades

Tabla 23-2 Tabla de conversión para valores numéricos

CANTIDAD	MKSÁ.	GAUSSIANO
Longitud	1 metro (m)	10^2 centímetros (cm)
Masa	1 kilogramo	10^3 gramos
Tiempo	1 segundo	1 segundo
Fuerza	1 newton	10^5 dinas
Trabajo, energía	1 joule	10^7 ergs
Potencia	1 watt	10^7 ergs/segundo
Capacitancia (C)	1 farad	9×10^{11} estatfarads
Carga (q)	1 coulomb	3×10^9 estatcoulombs
Densidad de carga (ρ)	1 coulomb/m ³	3×10^3 estatcoulombs/cm ³
Conductividad (σ)	1 (ohm-m) ⁻¹	9×10^9 (estatohm-cm) ⁻¹
Corriente (I)	1 ampere	3×10^9 estatamperes = 10^{-1} abamperes
Densidad de corriente (J)	1 ampere/m ²	3×10^5 estatamperes/cm ²
Desplazamiento (D)	1 coulomb/m ²	$12\pi \times 10^5$ estatvolts/cm
Campo eléctrico (E)	1 volt/m	$\frac{1}{3} \times 10^{-4}$ statvolt/cm
Inductancia (L)	1 henry	$\frac{1}{9} \times 10^{-11}$ estathenrys
Campo magnético (H)	1 ampere/m	$4\pi \times 10^{-3}$ oersted
Flujo magnético (Φ)	1 weber	10^8 maxwells
Inducción magnética (B)	1 weber/m ² = 1 tesla	10^4 gauss
Magnetización (M)	1 ampere/m	10^{-3} oersted
Polarización (P)	1 coulomb/m ²	3×10^5 statvolt/cm
Potencial (ϕ)	1 volt	$\frac{1}{300}$ estatvolts
Resistencia (R)	1 ohm	$\frac{1}{9} \times 10^{-11}$ estatohms