

- El campo magnético terrestre como sistema de referencia fijo
- Las rocas como brújulas con capacidad de memorizar el sistema de referencia
- Reconstruyendo las posiciones de los continentes en el pasado con paleomagnetismo

Momento magnético

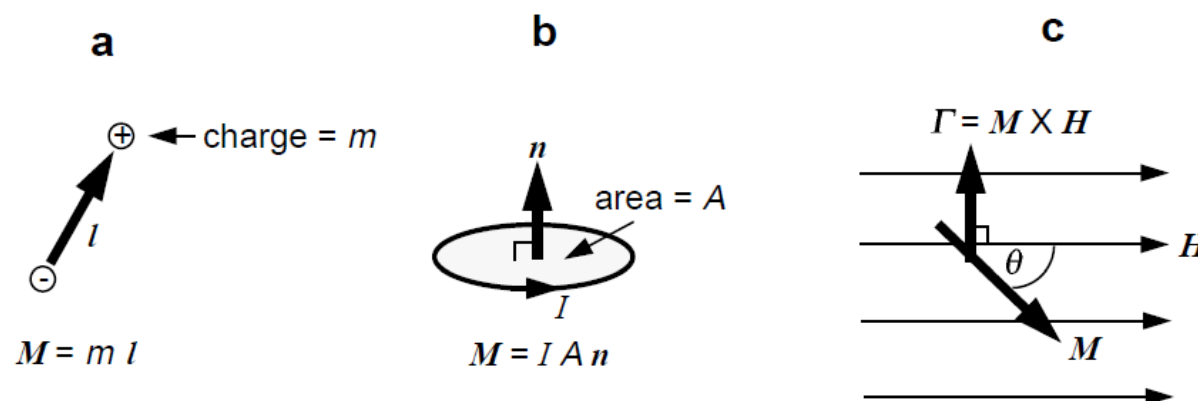
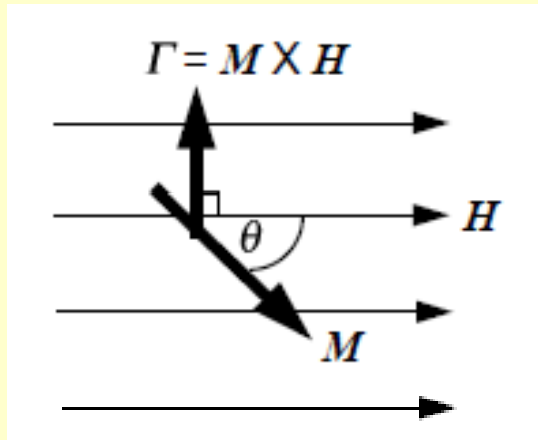


Figure 1.1 (a) A magnetic dipole constructed from a pair of magnetic charges. The magnetic charge of the plus charge is m ; the magnetic charge of the minus charge is $-m$; the distance vector from the minus charge to the plus charge is \mathbf{l} . (b) A magnetic dipole constructed from a circular loop of electrical current. The electrical current in the circular loop is I ; the area of the loop is A ; the unit normal vector \mathbf{n} is perpendicular to the plane of the loop. (c) Diagram illustrating the torque $\mathbf{\Gamma}$ on magnetic moment \mathbf{M} , which is placed within magnetic field \mathbf{H} . The angle between \mathbf{M} and \mathbf{H} is θ ; $\mathbf{\Gamma}$ is perpendicular to the plane containing \mathbf{M} and \mathbf{H} .

Butler, 1998

Butler, 1998

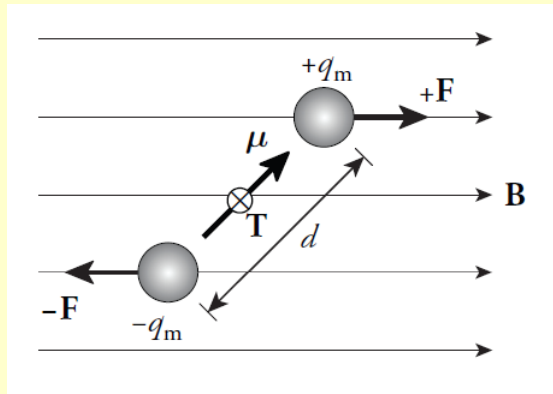
Torque de alineamiento



Campo de fuerza magnética (o campo magnético) H , en un punto dado, es la fuerza experimentada por una carga magnética positiva en ese punto.

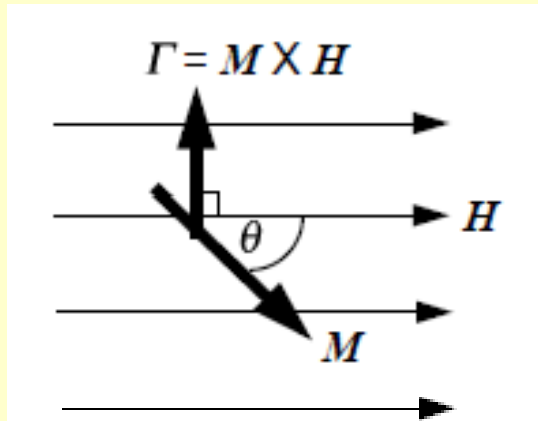
$$\Gamma = M \times H = MH \sin \theta \hat{\Gamma}$$

Se percibe a partir del momento o torque de alineamiento que provoca en un dipolo magnético (ej. la aguja de una brújula)



Egli, 2011

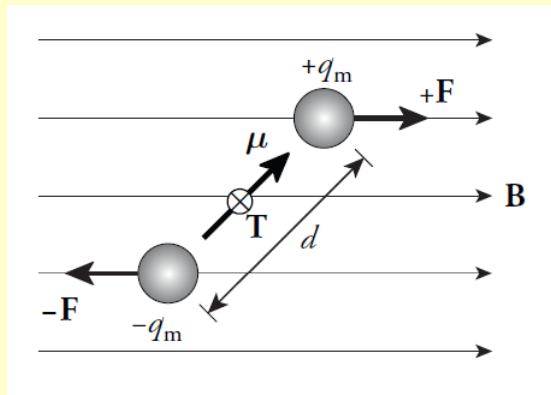
Energía de alineamiento



$$E = -\mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = -MH \cos \theta$$

La energía involucrada en el alineamiento se cuantifica a través del producto escalar de los dos vectores

Por el signo negativo, cuando M y H son paralelos se alcanza la configuración de mínima energía



Egli, 2011

Magnetización (o intensidad de magnetización)

Es el momento magnético total de un material, por unidad de volumen

$$J = \frac{\sum M_i}{\text{volume}}$$

Inducción magnética o densidad de flujo magnético

$$B = H + 4\pi J$$

se vuelve H cuando el material no tiene magnetización

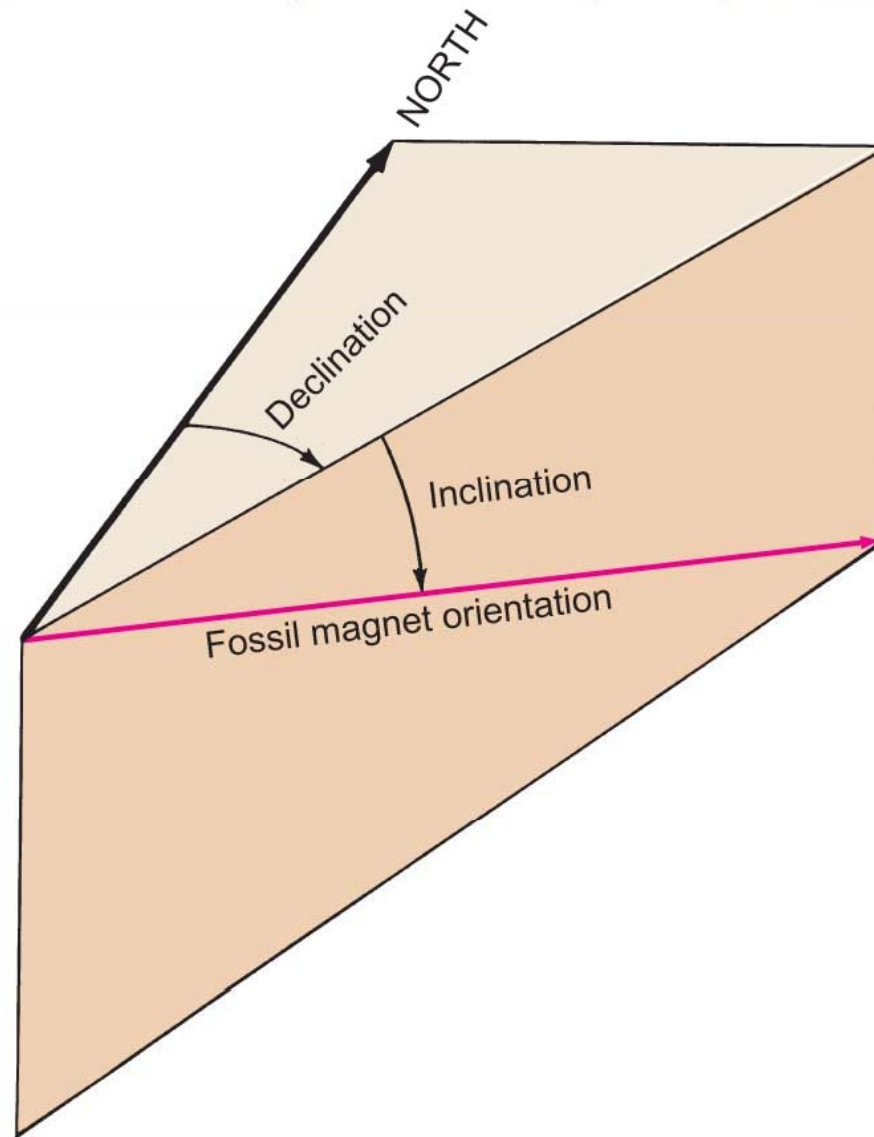
Unidades para J: Oersted (cgs) o A/m (SI)

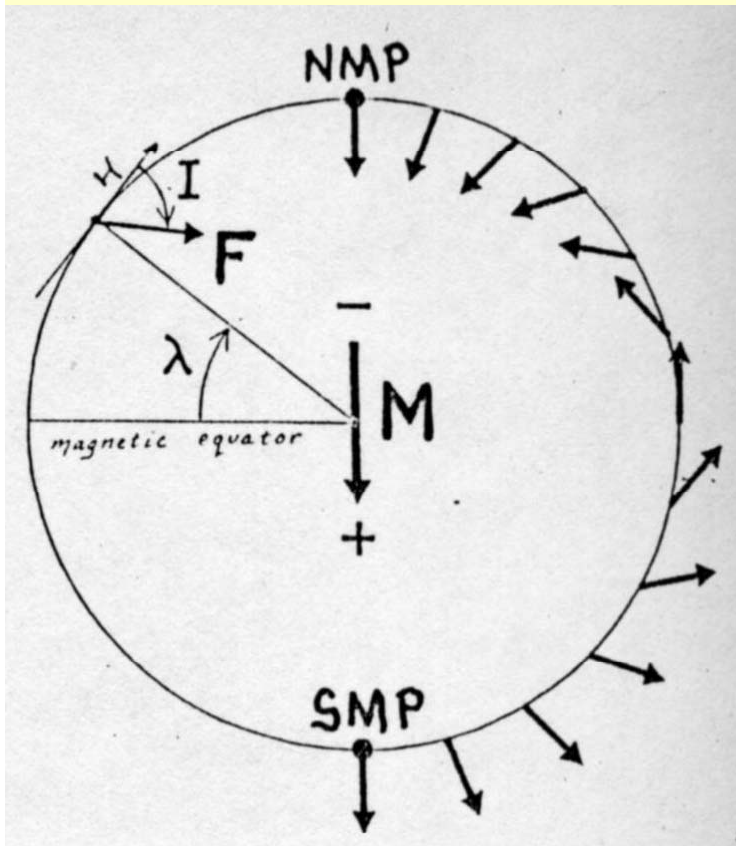
Unidades para B: Gauss (cgs) o Tesla (SI)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Lo que se mide en las rocas es el vector de magnetización

El ángulo de declinación da información sobre la paleolongitud. El ángulo de inclinación da información sobre la paleolatitud. Conociendo las coordenadas de paleolatitud y longitud y la edad de la roca, se puede conocer la posición en la Tierra.

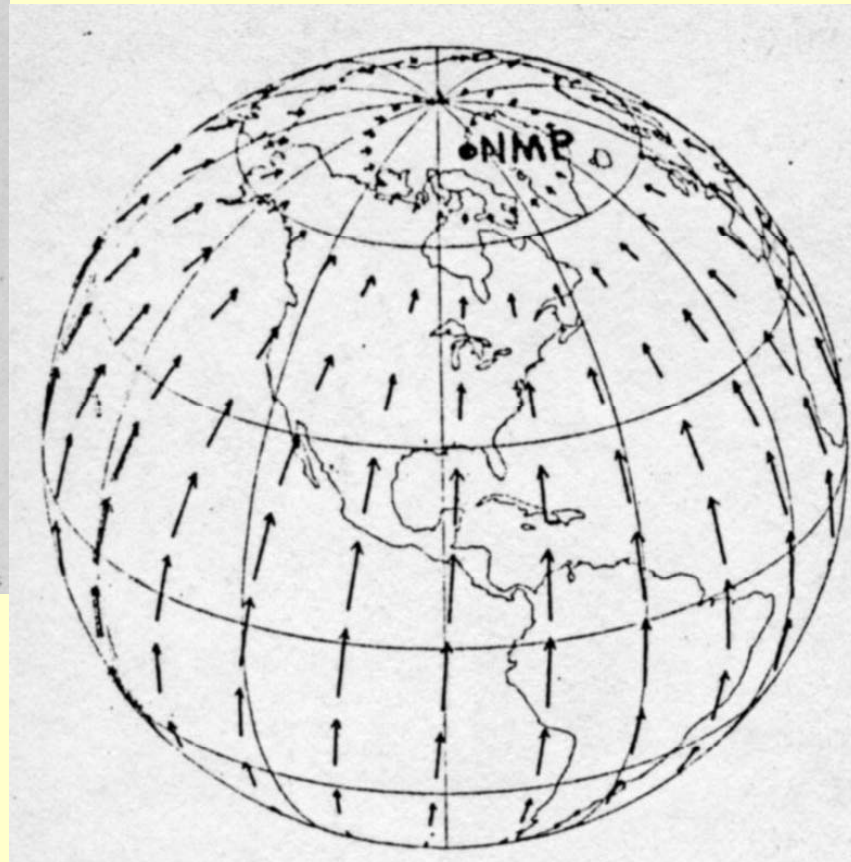




Ángulo de inclinación y su relación con la latitud

Cox y Hart, 1986

Componente horizontal del CMT y su convergencia hacia el polo magnético



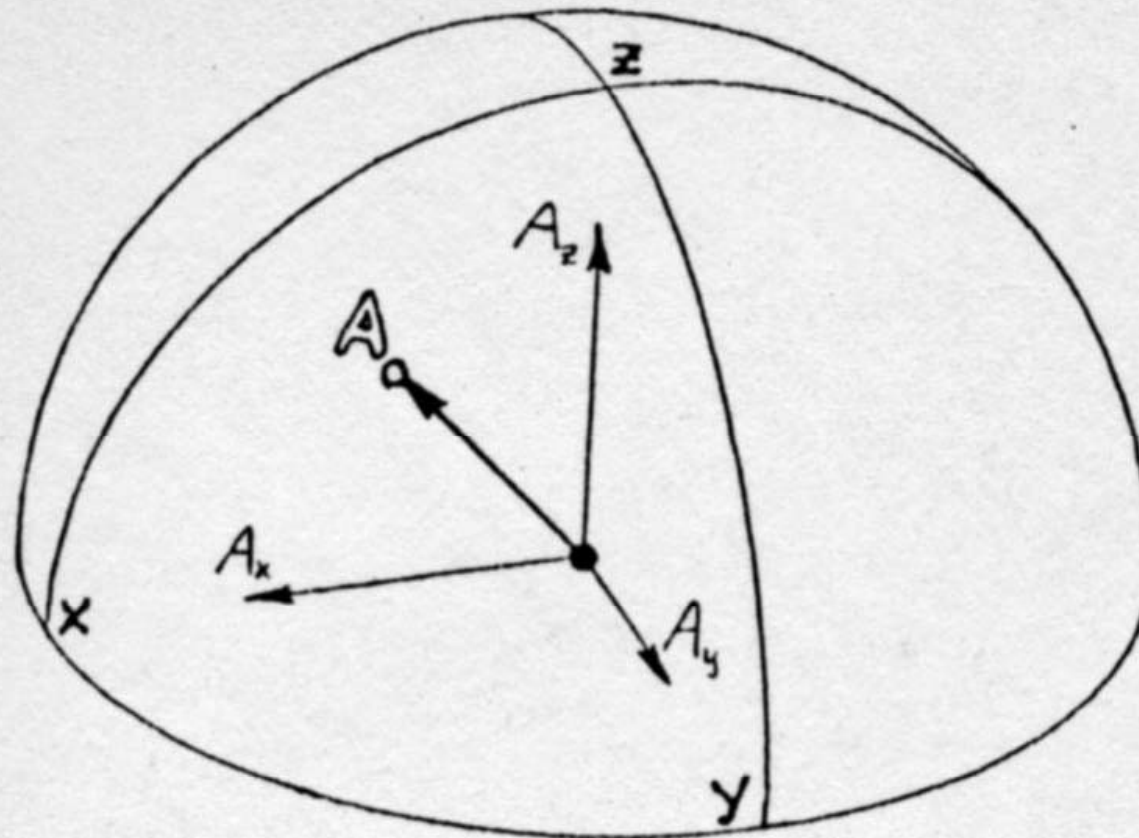
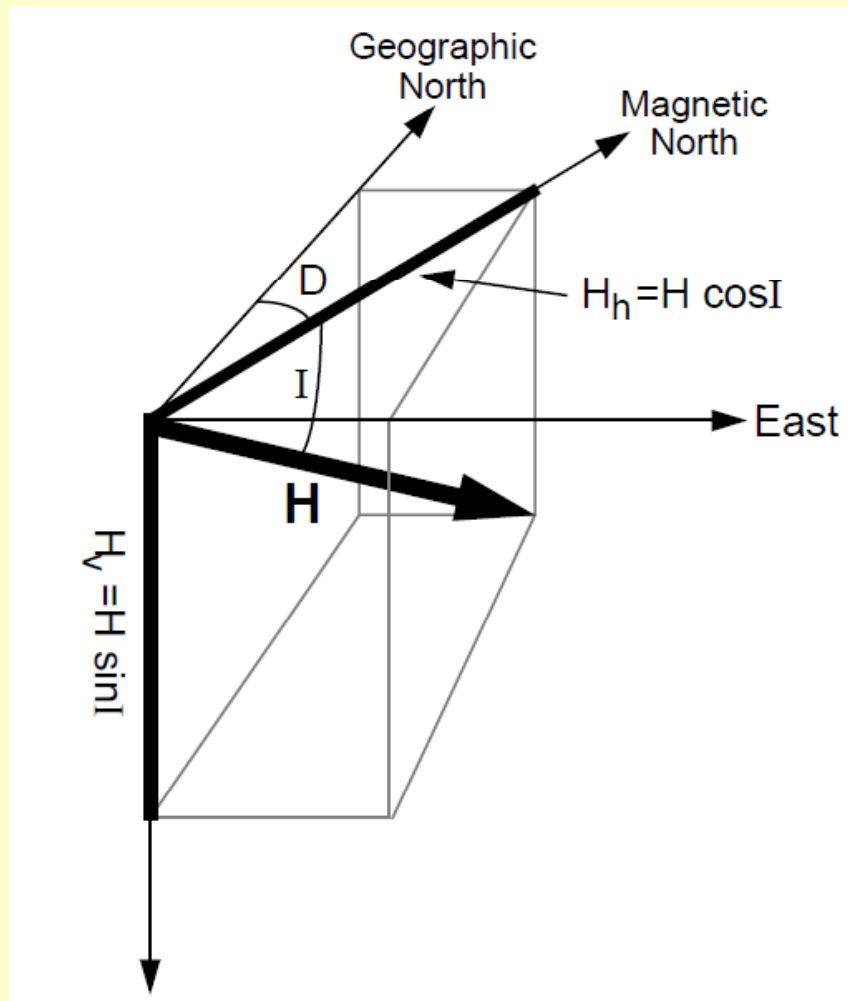


Figure 3-12.
Cartesian components of vector \mathbf{A} .



Componente vertical

$$H_v = H \sin I$$

Componente norte

$$H_n = H \cos I \cos D$$

Componente este

$$H_e = H \cos I \sin D$$

Element	Name	Range at	Earth' s	Surface	Positive Sense
		Min	Max	Unit	
X	North component	-17000	42000	nT	North
Y	East component	-18000	17000	nT	East
Z	Vertical component	-67000	61000	nT	Down
H	Horizontal intensity	0	42000	nT	
F	Total Intensity	22000	67000	nT	
I	Inclination	-90	+90	Degree	Down
D	Declination	-180	+180	Degree	East/CW

La medición de los elementos del campo magnético en cierto observatorio dio los siguientes resultados:

componente N (X): 36235,00 nT

componente E (Y): 1150,75 nT

componente V (Z): 1845,67nT

a. ¿el observatorio está en el hemisferio norte o sur?

b. ¿cuál es la intensidad del campo total?

c. ¿cuáles son los valores locales de declinación e inclinación?

Magnetización (o intensidad de magnetización)

Es el momento magnético total de un material, por unidad de volumen

$$J = \frac{\sum M_i}{\text{volume}}$$

Inducción magnética o densidad de flujo magnético

$$B = H + 4\pi J$$

se vuelve H cuando el material no tiene magnetización

Unidades para J: Oersted (cgs) o A/m (SI)

Unidades para B: Gauss (cgs) o Tesla (SI)

¿Cuánto se magnetiza un material en presencia de un campo?

$$\kappa = J/H$$

Susceptibilidad magnética

(donde J es producida por el campo magnético H)

J y κ son cantidades volumétricas

$$\mu = B/H = 1 + 4\pi\kappa$$

Permeabilidad magnética

Susceptibilidad magnética negativa: material diamagnético (orden de 10^{-6})

Susceptibilidad magnética positiva con magnitud de orden 10^{-6} : material paramagnético

Susceptibilidad magnética fuerte y positiva: material ferromagnético

Principales parámetros usados en paleomagnetismo y sistema de unidades

Butler, 1998

TABLE 1.1. Units and Conversions for Common Quantities of Magnetism

	cgs (emu) System		Système Internationale (SI)		Conversion
	Fundamental Units	Unit	Fundamental Units	Unit	
Energy		erg		joule (J)	1 erg = 10^{-7} joule
Force (F)	gm cm s ⁻²	dyne	kg m s ⁻²	newton (N)	1 dyne = 10^{-5} newton
Current (I)	10 C s ⁻¹	abampere	C s ⁻¹	ampere (A)	1 abampere = 10 ampere
Magnetic Induction (B)	0.1 gm s ⁻¹ C ⁻¹	gauss (G)	kg s ⁻¹ C ⁻¹	tesla (T)	1 gauss = 10^{-4} tesla
Magnetic Field (H)	0.1 gm s ⁻¹ C ⁻¹	oersted (Oe)	C s ⁻¹ m ⁻¹	ampere m ⁻¹ (A/m)	1 Oe = $(1/4\pi) \times 10^3$ A/m
Magnetization (J)	0.1 gm s ⁻¹ C ⁻¹	gauss (G) (= emu cm ⁻³)	kg s ⁻¹ C ⁻¹	tesla (T)	1 gauss = $4\pi \times 10^{-4}$ tesla
Magnetic Dipole Moment/Unit Volume	0.1 gm s ⁻¹ C ⁻¹	gauss (G) (= emu cm ⁻³)	C s ⁻¹ m ⁻¹	A/m	1 gauss = 10^3 A/m
Magnetic Moment (M)	0.1 gm s ⁻¹ C ⁻¹ cm ³	gauss cm ³ (G cm ³ = emu)	C s ⁻¹ m ²	A m ²	1 gauss cm ³ = 10^{-3} A m ²
Magnetic Susceptibility (χ)	Dimensionless		Dimensionless		χ (cgs) = $4\pi \chi$ (SI)

Conversions commonly employed in paleomagnetism: Magnetization, $J = 10^{-3}$ G converts to "magnetization" = 1 A/m. Magnetic field, $H = 1$ Oe converts to magnetic "field" = 10^{-4} T = 0.1 mT.

Some Examples: Surface geomagnetic field strength: 0.24–0.66 Oe = 0.024–0.066 mT. Magnetic field generated by laboratory electromagnet: 2000 Oe = 0.2 T = 200 mT. Magnetic dipole moment of the earth: 8×10^{25} G cm³ = 8×10^{22} A m².

Natural remanent magnetization of rocks: basalt: 10^{-3} G = 1 A/m; granite: 10^{-4} G = 0.1 A/m; nonmarine siltstone: 10^{-5} G = 10^{-2} A/m; marine limestone: 10^{-7} G = 10^{-4} A/m.

EN CGS

$$B = \mu_0 H + 4\pi J$$

$$J = \chi H$$

χ = magnetic susceptibility

μ_0 = magnetic permeability of free space = 1.0

EN SI

$$B = \mu_0 H + J$$

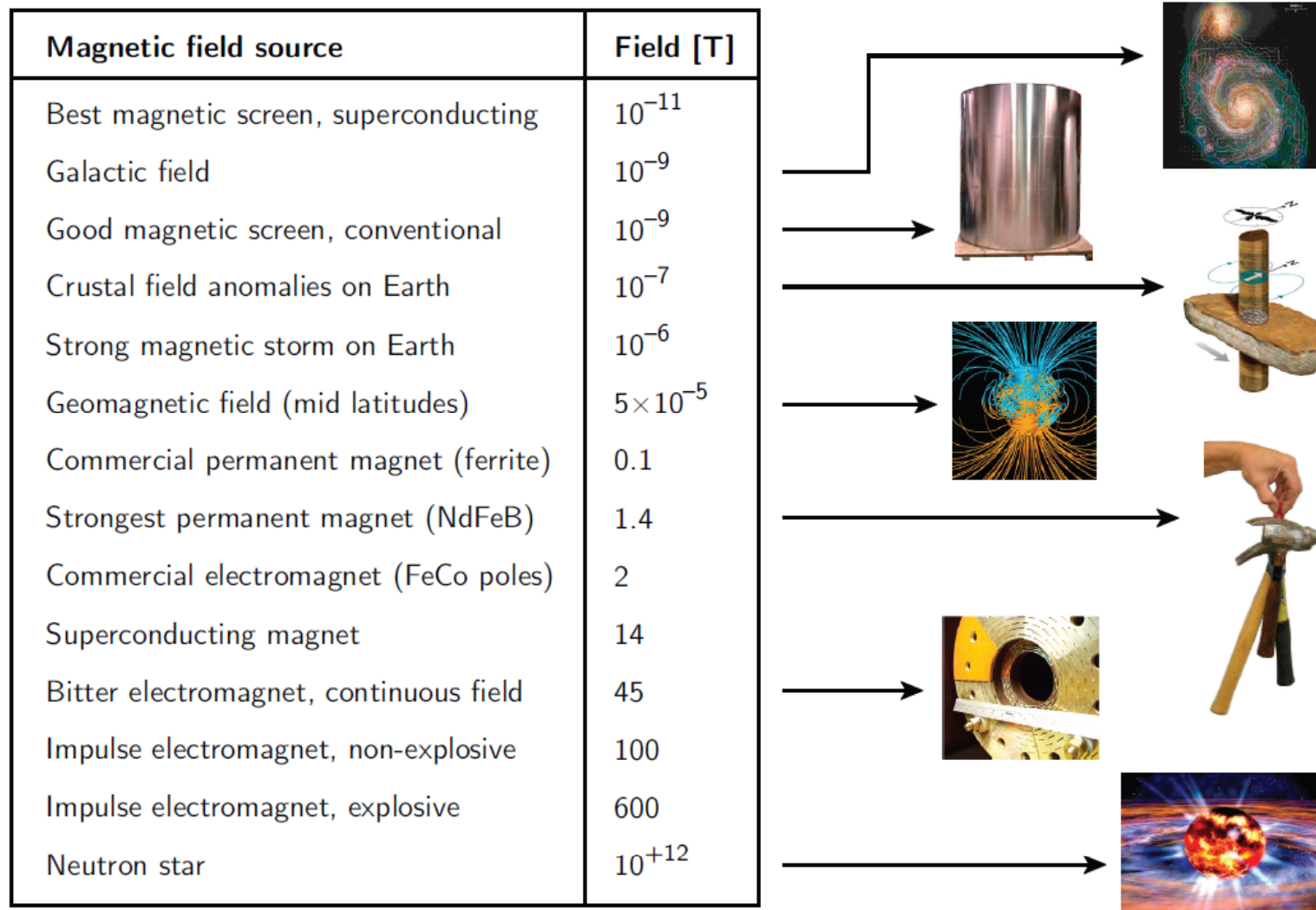
where $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ henries/m = permeability of free space and

$$J = \frac{\chi H}{\mu_0}$$

Tab. 0.1: Conversion between S.I. and c.g.s. units commonly used in rock magnetism. Magnetization and magnetic susceptibility are defined both as volume-normalized units (first row), or mass-normalized units (second row). “--” indicates a unitless quantity: in this case, ‘SI’ or ‘c.g.s.’ is added to indicate which unit system is used.

Quantity	S.I.	c.g.s.	conversion
Magnetic field H	A/m	Oe (Oersted)	$1 \text{ Oe} = 10^3 / (4\pi) \text{ A/m}$
Magnetic induction B	T (Tesla)	G (Gauss)	$1 \text{ G} = 10^5 \gamma = 10^{-4} \text{ T}$
Magnetic moment μ	A m^2	emu	$1 \text{ emu} = 10^{-3} \text{ A m}^2$
Magnetization M	A/m	emu/cm ³	$1 \text{ emu/cm}^3 = 10^3 \text{ A/m}$
	$\text{A m}^2/\text{kg}$	emu/g	$1 \text{ emu/g} = 1 \text{ A m}^2/\text{kg}$
Magn. susceptibility χ	--	--	$1 \text{ cgs} = 4\pi \text{ SI}$
	m^3/kg	emu/(g Oe)	$1 \text{ emu/(g Oe)} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

Egli, 2011



Egli, 2011

¿Cuánto se magnetiza un material en presencia de un campo?

$$\kappa = J/H$$

Susceptibilidad magnética

(donde J es producida por el campo magnético H)

J y κ son cantidades volumétricas

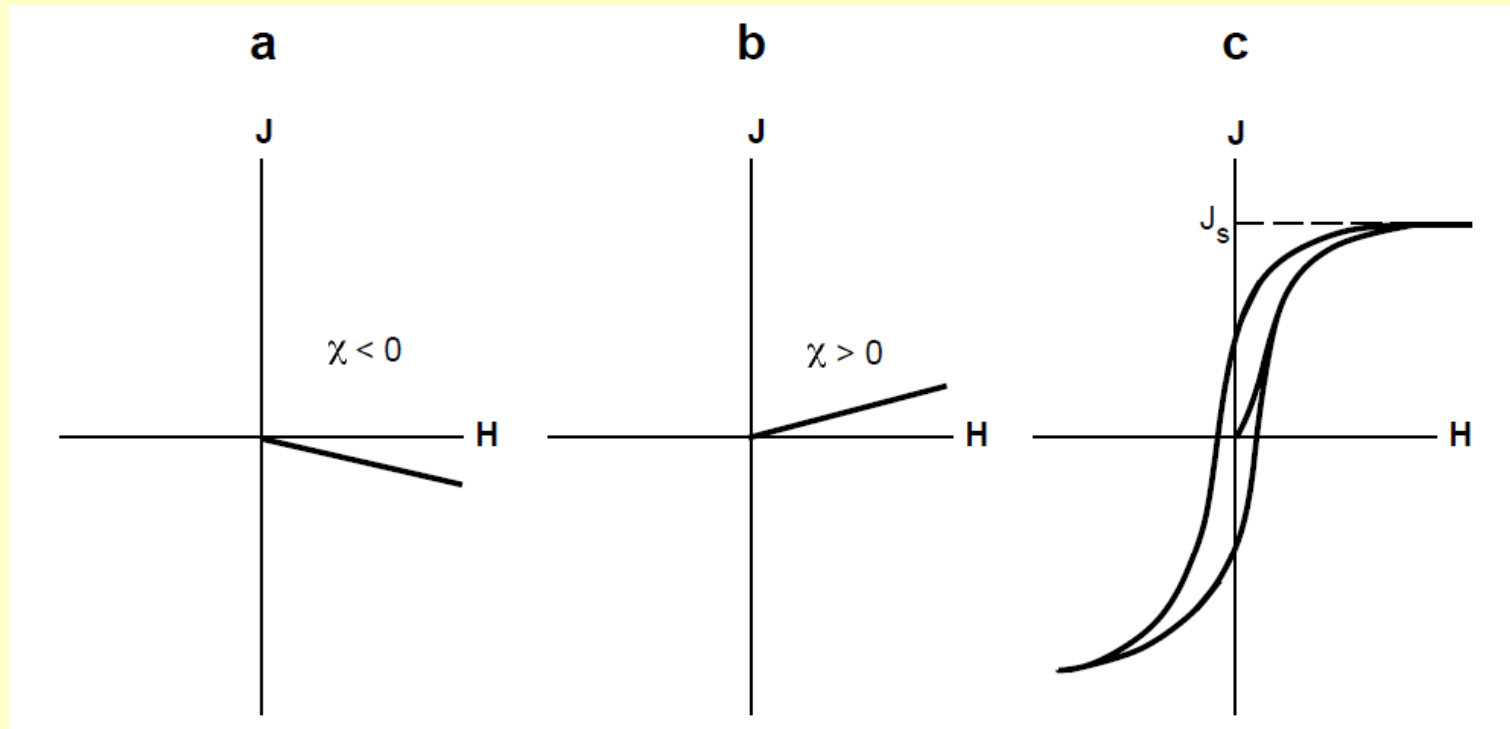
$$\mu = B/H = 1 + 4\pi\kappa$$

Permeabilidad magnética

Susceptibilidad magnética negativa: material **diamagnético** (orden de 10^{-6})

Susceptibilidad magnética positiva con magnitud de orden 10^{-6} :
material **paramagnético**

Susceptibilidad magnética fuerte y positiva: material **ferromagnético**



Diamagnetismo

Paramagnetismo

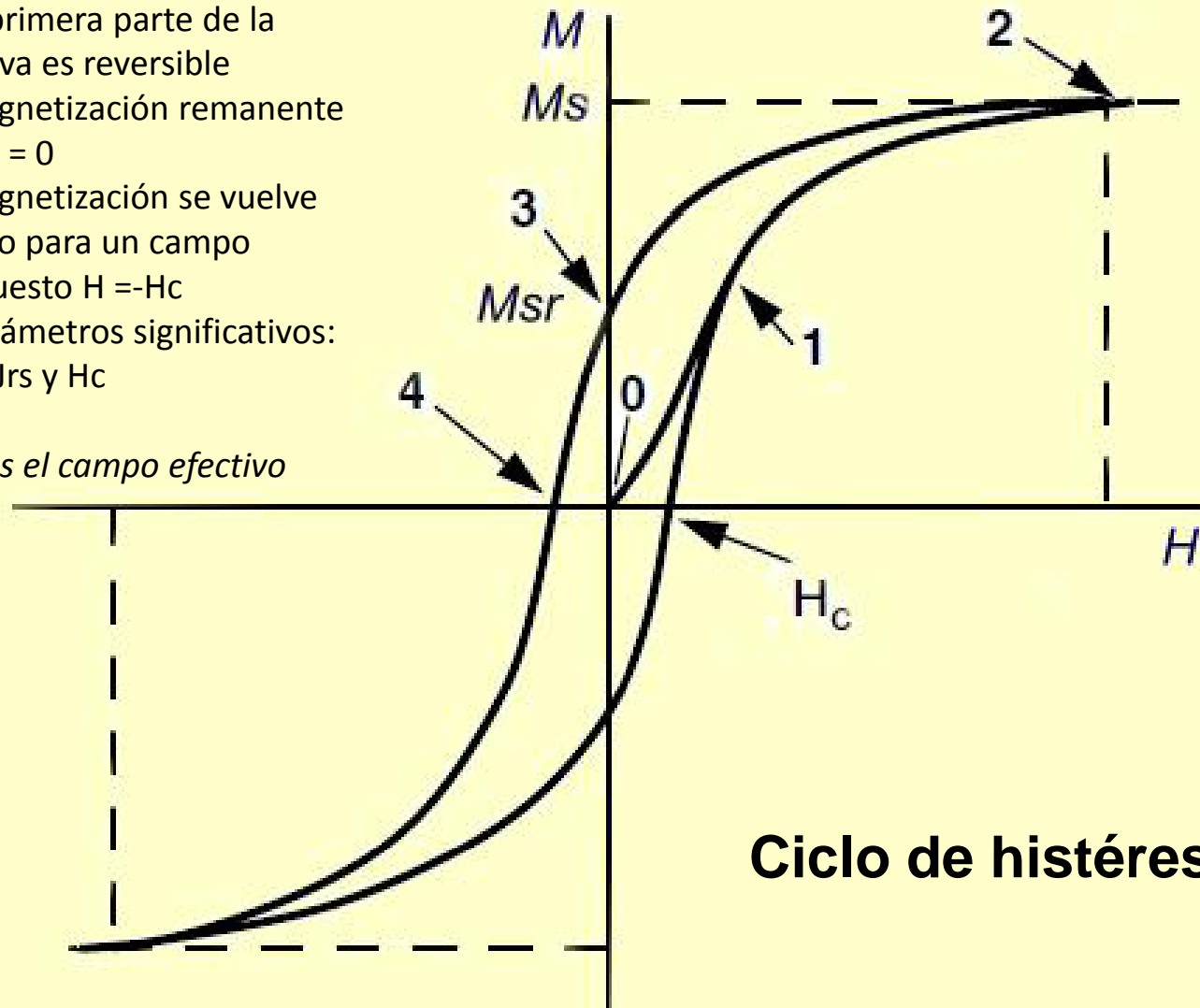
Ferromagnetismo

$$\kappa = J/H$$

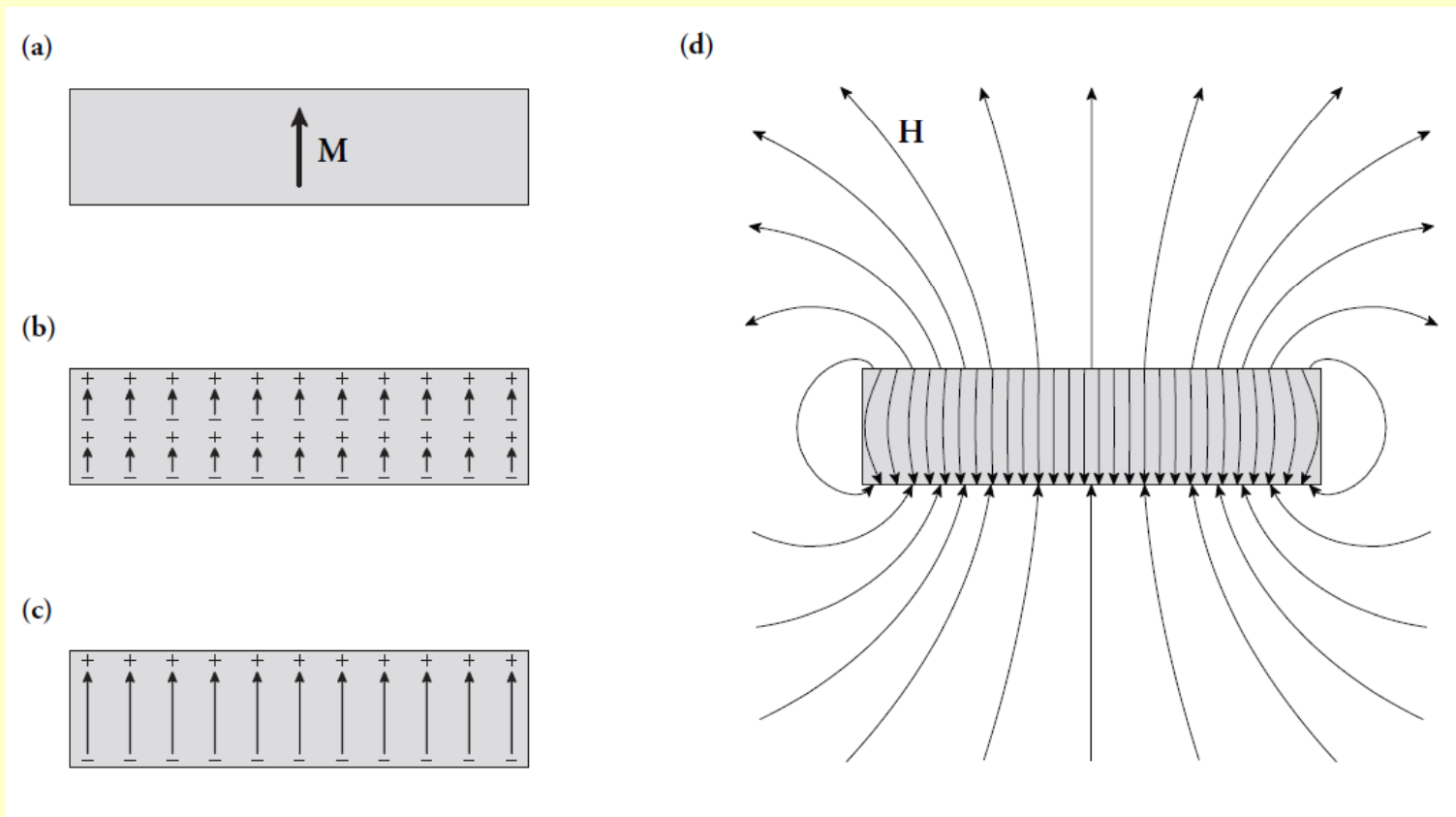
$$J = \kappa H$$

Histéresis

- la magnetización alcanza saturación
- la primera parte de la curva es reversible
- magnetización remanente a $H = 0$
- magnetización se vuelve cero para un campo opuesto $H = -H_c$
- parámetros significativos: J_s , J_{rs} y H_c
- H es el campo efectivo



Ciclo de histéresis



El campo efectivo es el campo externo menos el campo desmagnetizante.
 El campo desmagnetizante es proporcional a J y de dirección opuesta.

$$H_{\text{ef}} = H_{\text{ex}} - H_d$$

$$H_d = NJ$$

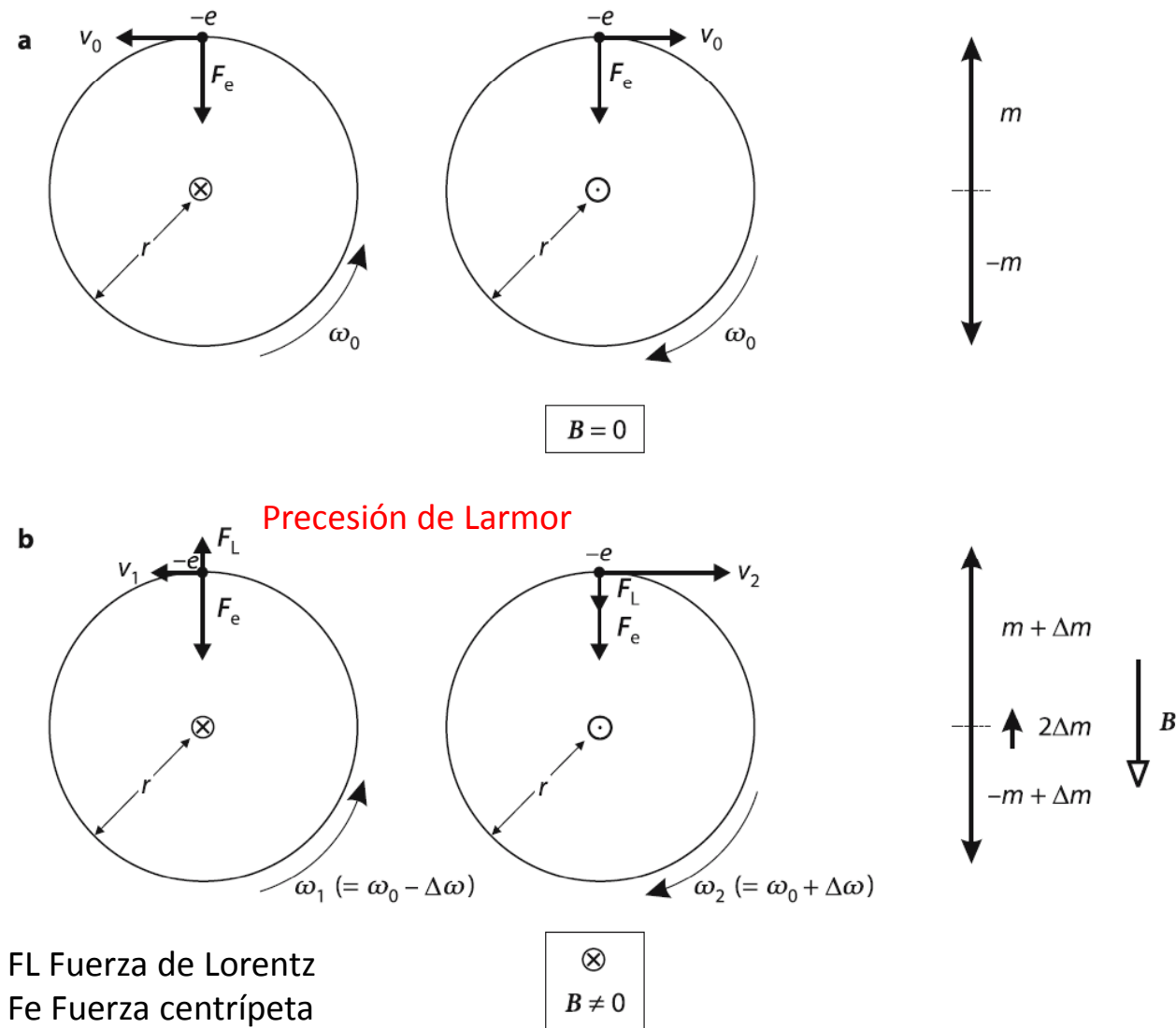
N es el «factor desmagnetizante» y depende de la forma del material

Los átomos tienen momentos magnéticos atómicos debido al movimiento orbital y al movimiento de espín de sus electrones.

Los momentos están cuantizados. La unidad menor de momento magnético es el *magnetón de Bohr*.

$$M_B = 9,27 \times 10^{-21} \text{ G cm}^3 \quad \text{o} \quad 9,27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$

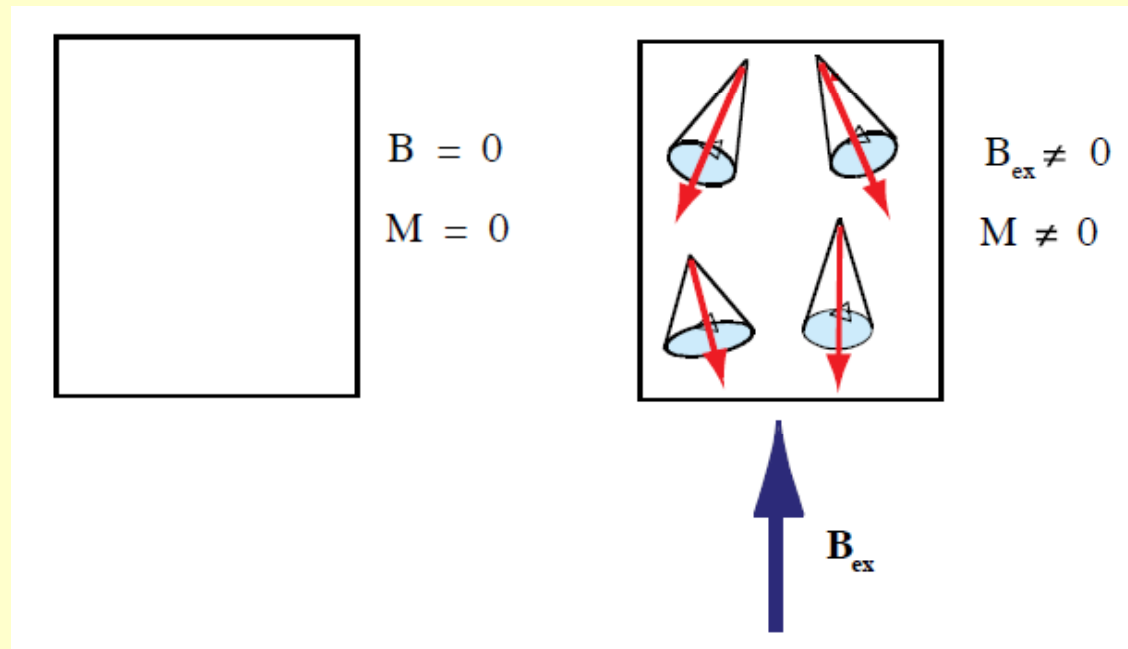
Diamagnetismo



Diamagnetismo

Se debe al momento orbital de los electrones. Todas las sustancias experimentan diamagnetismo en presencia de un campo magnético.

Las sustancias que no tienen momentos magnéticos atómicos, muestran sólo diamagnetismo.



$$\kappa = -(NZ\mu_0 e^2 \langle r^2 \rangle) / 6m_e$$

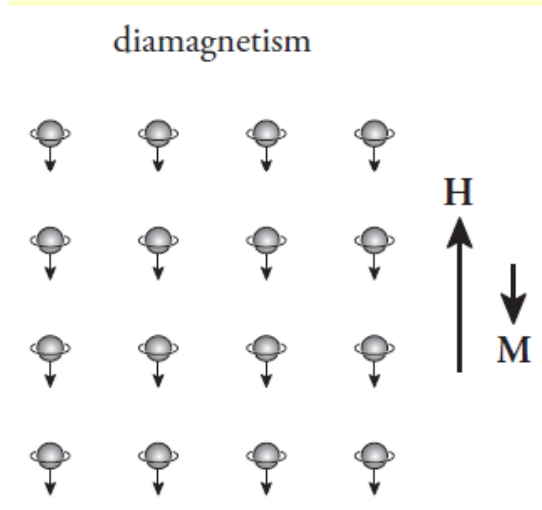
N: número de átomos por unidad de volumen; Z: número de electrones del átomo; $\langle r^2 \rangle$ radio medio de la órbita electrónica

La contribución diamagnética a la susceptibilidad de una roca depende principalmente de la proporción de minerales diamagnéticos en la roca, siendo aproximadamente constante por unidad de volumen para todos los minerales.

-14 x 10⁻⁶ SI

El porcentaje en volumen de minerales diamagnéticos en la roca permitirá aproximar la contribución diamagnética en la κ de una roca. Sin embargo, esta contribución es fácilmente enmascarada en presencia de otros efectos más fuertes.

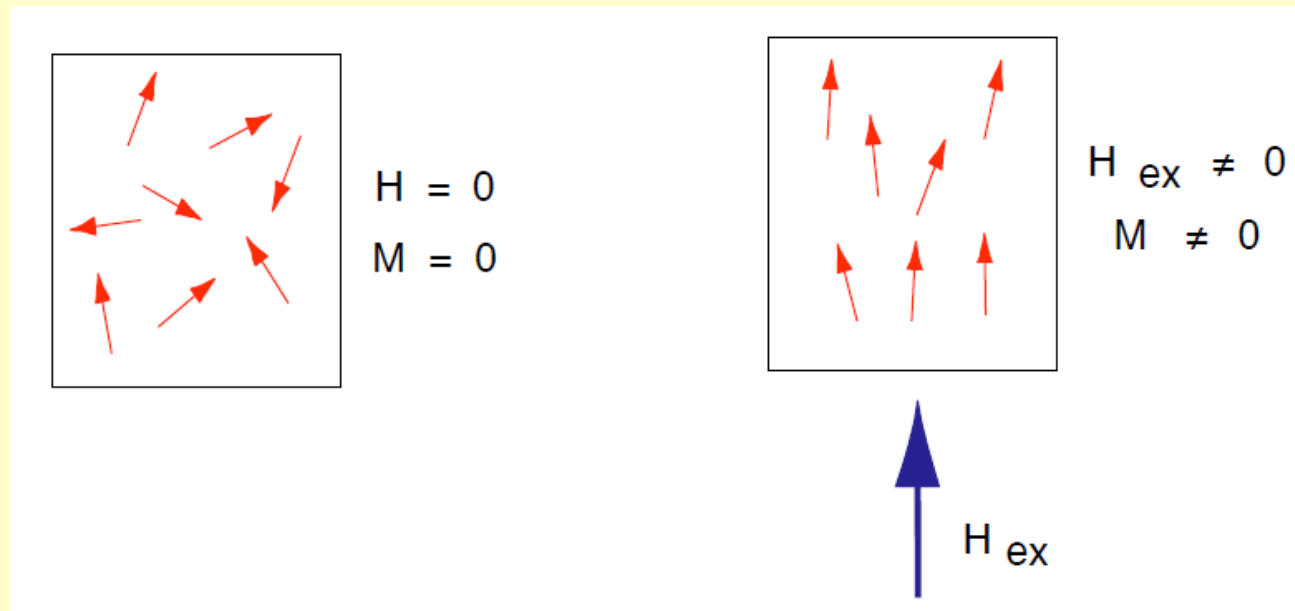
Diamagnetismo



- Producido por la precesión electrónica en sus orbitas ante la presencia de un campo inductor
- K negativa y muy pequeña: $K < 10^{-5}$ SI
- K constante
- K invariante con T
- Minerales diamagnéticos:
Cuarzo, Feldespatos, olivinas magnesianas, calcita, halita, etc.

Paramagnetismo

Es propio de materiales que contienen átomos que tienen un momento magnético, aunque con escasa interacción.



	n=0	n=1	n=2				n=3
Element			3s	3p	3d		4s
Na			↑	m =			
Mg			↑ ↓	1	0	-1	
Al			↑	↑			
Si			↑	↑	↑		
P			↑	↑ ↓	↑		
S			↑	↑ ↓	↑		
Cl			↑	↑ ↓	↑		
Ar			↑	↑ ↓	↑		
K	1s ²	2s ² 2p ⁶	3s ²	m =			↑
Ca				2	1	0	↑ ↓
Sc				↑			↑ ↓
Ti				↑	↑		↑ ↓
V				↑	↑	↑	↑ ↓
Cr				↑	↑	↑	↑ ↓
Mn				↑	↑	↑	↑ ↓
Fe				↑ ↓	↑	↑	↑ ↓
Co				↑ ↓	↑	↑	↑ ↓
Ni				↑ ↓	↑	↑	↑ ↓
Cu				↑ ↓	↑	↑	↑ ↓
Zn				↑ ↓	↑	↑	↑ ↓

Energía térmica

Provoca agitación térmica en la estructura cristalina.

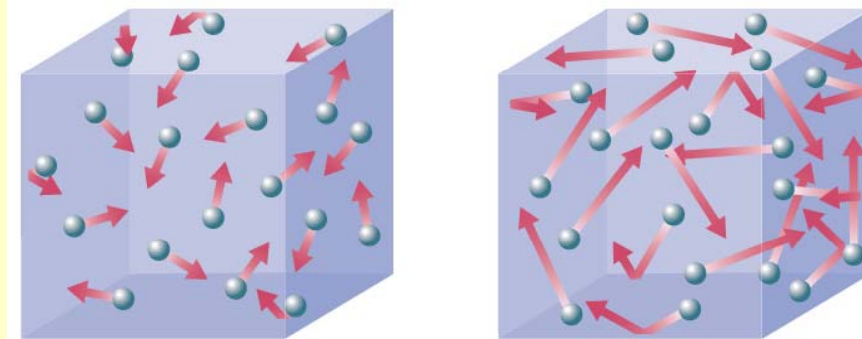
Agitación térmica: Movimiento aleatorio de átomos y moléculas en cualquier objeto que está a temperaturas por encima de cero absoluto

Debido a la energía térmica, las direcciones de los momentos magnéticos oscilan rápida y aleatoriamente

$$E = k T$$

Donde T = temperatura en grados Kelvin

k = constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)

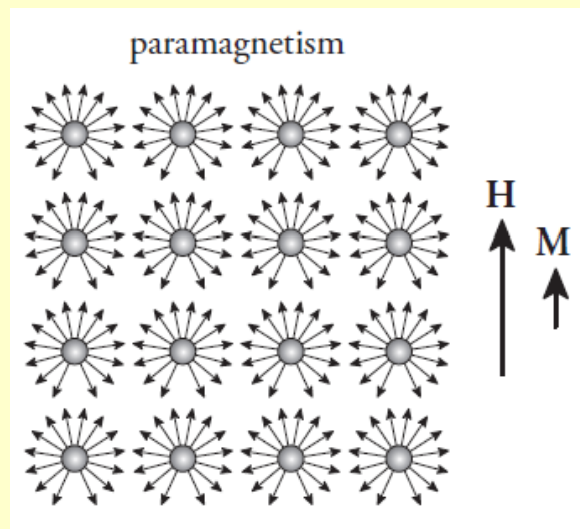


Longer arrows mean higher average speed.

Copyright © Addison Wesley

Algunos principios del Paramagnetismo

- La capacidad de alineación de los momentos magnéticos es en general muy baja: competencia con energía térmica:
- $E = -M H \cos \theta$
- **M**, momento magnético, **H**, campo magnético, θ , ángulo entre **H** y **M**
- $E_t = k T$ **k** : cte. Boltzmann, **T** : temp. Absoluta



Teoría de Langevin:

$$P(\theta) = \exp\left(\frac{MH \cos \theta}{kT}\right)$$

$P(\theta)$: probabilidad de alineación de un momento magnético con el campo externo

El grado de alineamiento depende exponencialmente de la relación entre la energía de alineamiento y la energía térmica

Integrando para N momentos atómicos con θ entre 0° y 360°

$$J = NML(\alpha)$$

$$L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{MH}{kT}$$

Obsérvese que $J = 0$ si $H = 0$; para H infinito $L(\infty) = 1$ entonces $J = N M$ (orientación perfecta)

- Para H moderados, $L(\alpha) = \alpha/3$ entonces : $J = NM \alpha/3 = N M^2 H / 3 K T$

$$J = NML(\alpha)$$

$$L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{MH}{kT}$$

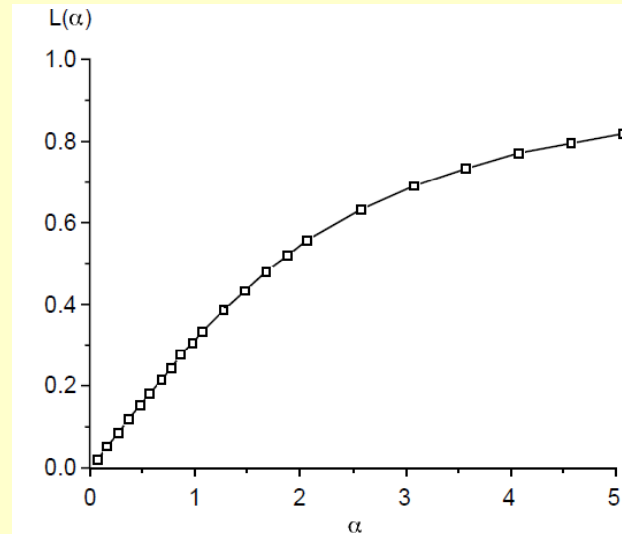


Figure 2.2 The Langevin function, $L(\alpha)$.
Notice that for $\alpha < 1$, $L(\alpha) \approx \alpha/3$.

In any geologically reasonable situation, $\alpha = MH/kT$ is $< 10^{-6}$. The Langevin function is linear for $\alpha \ll 1$ with $L(\alpha) \approx \alpha/3$, and Equation (2.2) simplifies to

$$J = NML(\alpha) = \frac{NM\alpha}{3} = \frac{NM^2H}{3kT} \quad (2.3)$$

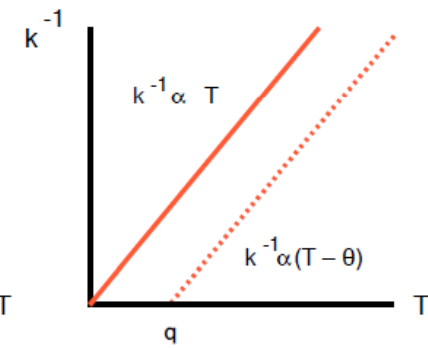
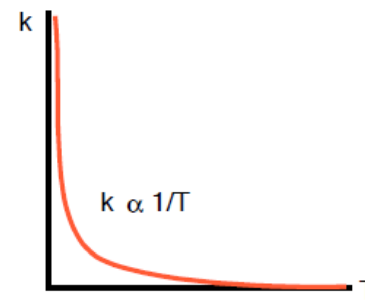
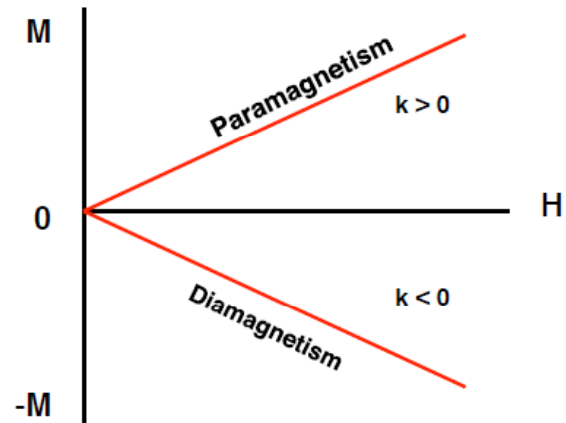
$$\chi = \frac{J}{H} = \frac{NM^2}{3kT} \quad (2.4)$$

Suscept. Paramagnética

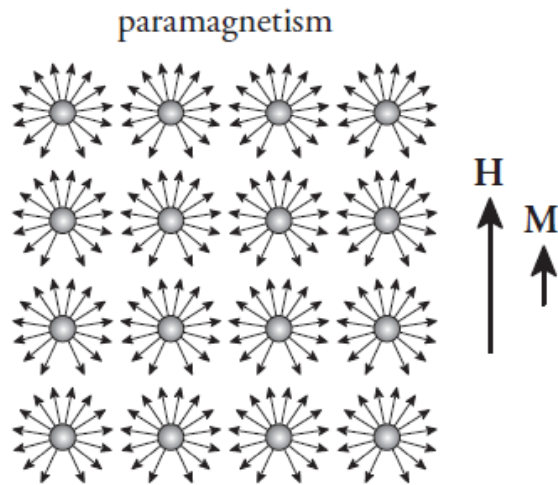
$$k = J / H$$

$$k = N M^2 / 3 K T$$

Ley de Curie: la inversa de la susceptibilidad paramagnética es proporcional a la temperatura absoluta.



Paramagnetismo



- Producido en materiales con elementos con orbitales electrónicos incompletos

Momento magnético resultante de spines no apareados

En presencia de un campo inductor: momento magnético tiende a alinearse con el campo: $K > 0$

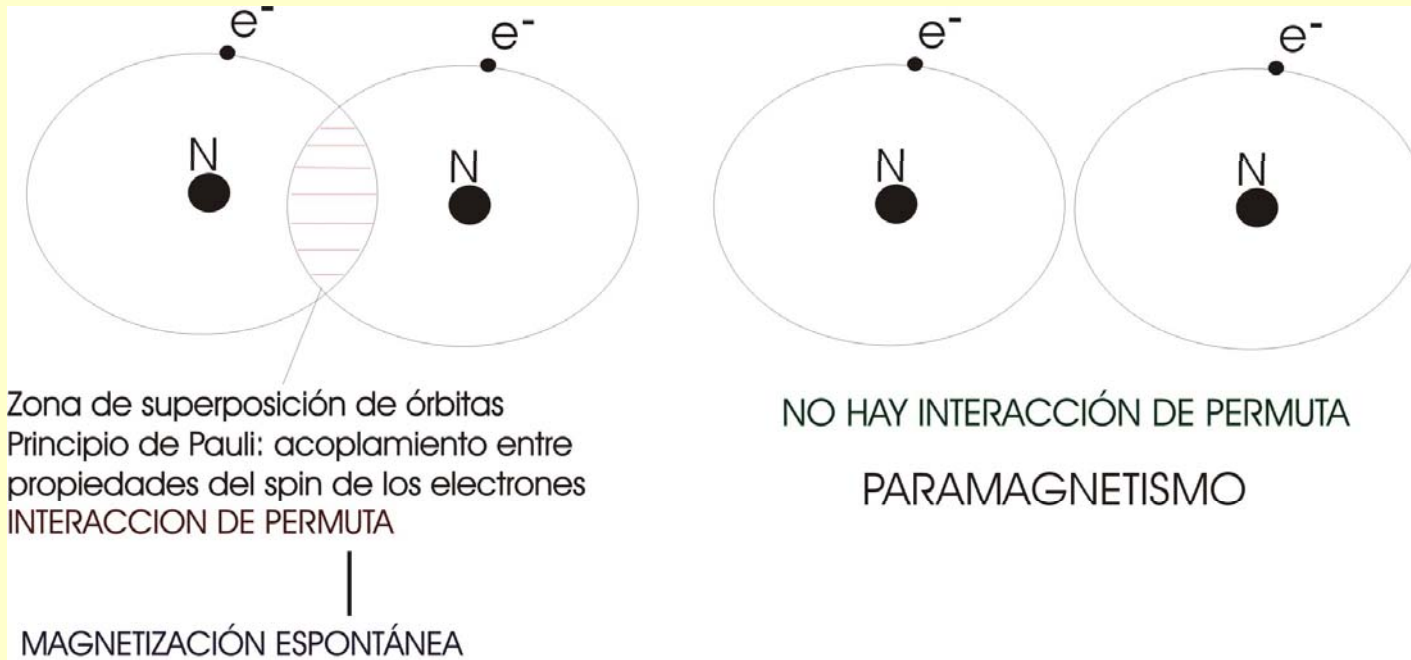
K variable en diferentes materiales

K constante pero dependiente de la Temperatura

- **Minerales Paramagnéticos:**
Olivinas con Fe (Fayalita), piroxenos, anfíboles, biotita, ilmenita, varios sulfuros, etc.

Ferromagnetismo

propiedad de cristales y no de átomos

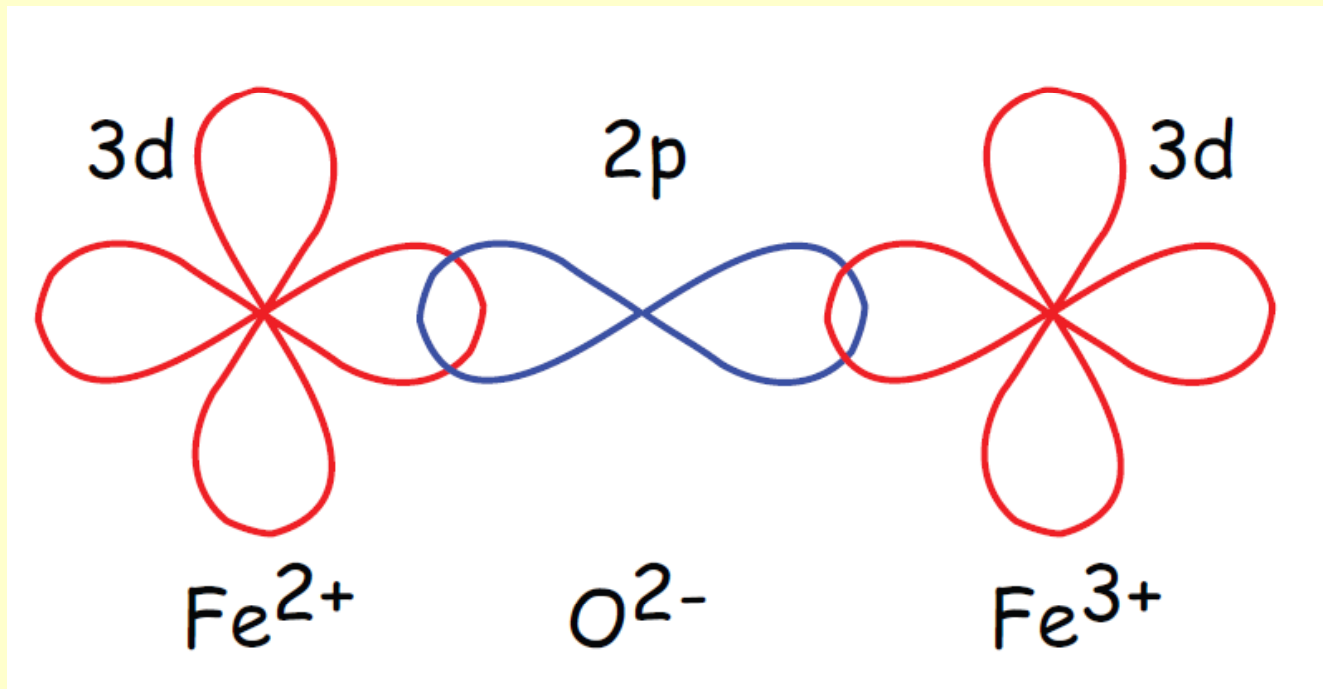


El aumento de la distancia interatómica puede producirse por energía térmica:

Temperatura de Curie: sustancia pasa de ferromagnética a paramagnética

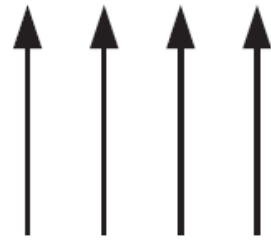
	n=0	n=1	n=2	n=3
Element			3s 3p 3d	4s
Na			↑	
Mg			↑ ↓	
Al			↑	
Si			↑	
P			↑	
S			↑ ↓	
Cl			↑ ↓	
Ar			↑ ↓	
K	1s ²	2s ² 2p ⁶		↑
Ca				↑ ↓
Sc				↑ ↓
Ti				↑ ↓
V				↑ ↓
Cr				↑ ↓
Mn				↑ ↓
Fe				↑ ↓
Co				↑ ↓
Ni				↑ ↓
Cu				↑ ↓
Zn				↑ ↓

Superintercambio

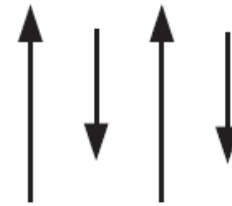


Por el principio de exclusión de Pauli, los electrones compartidos no pueden tener el mismo espín. Se produce un acoplamiento antiparalelo.

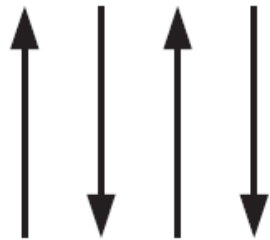
Tipos de alineamiento de espines



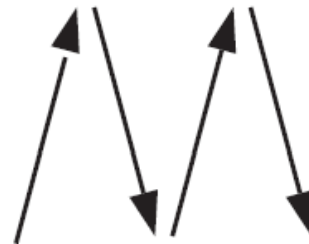
Ferromagnético



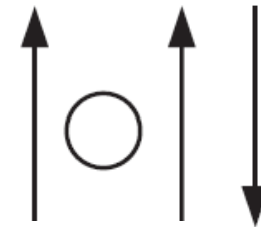
Ferrimagnético



Antiferromagnético



Antiferromagnético
canteado



Por defectos

Estructuras cristalinas
que causan
ferromagnetismo
(i.e. acoplamiento de
los momentos
magnéticos atómicos)

c) magnetita,
intensidad de
magnetización fuerte

d) hematita, intensidad
de magnetización débil

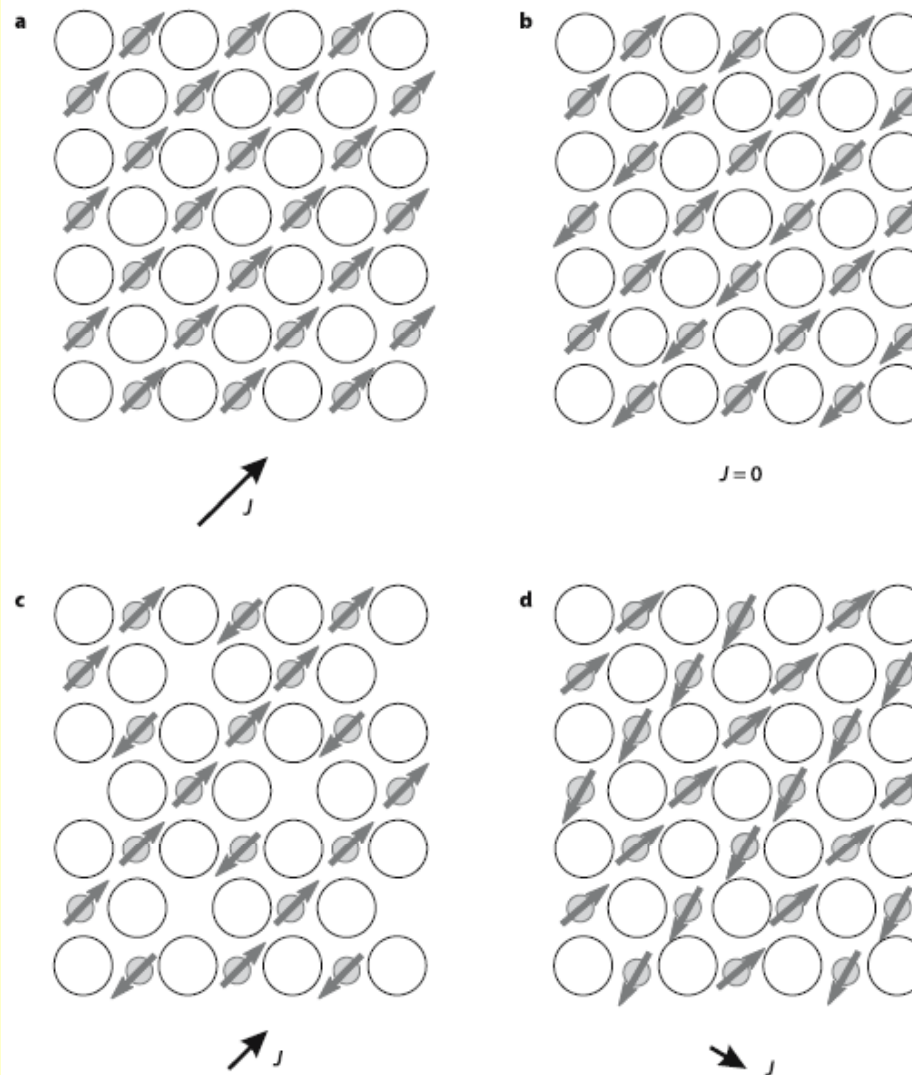


Fig. 2.6. Schematic picture of spin moment alignment in substances; a ferromagnetic s.s.; b antiferromagnetic; c ferrimagnetic; d canted antiferromagnetic (modified after O'Reilly 1984)

- Para H moderados, $L(\alpha) = \alpha/3$ entonces : $J = NM \alpha/3 = N M^2 H / 3 K T$

$$J = NML(\alpha)$$

$$L(\alpha) = \coth(\alpha) - \frac{1}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{MH}{kT}$$

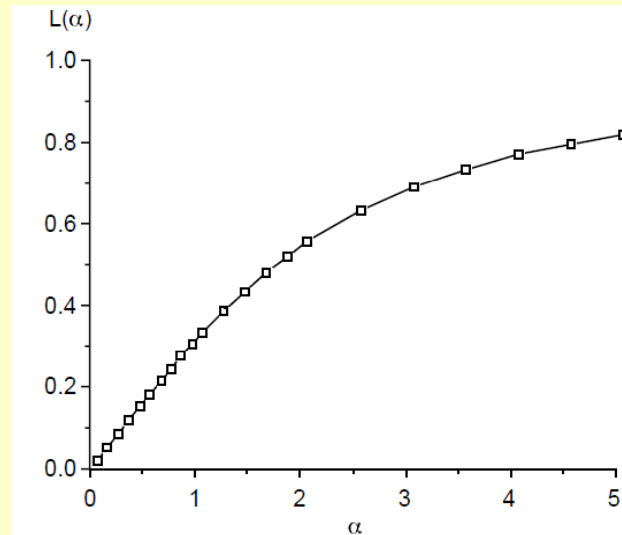


Figure 2.2 The Langevin function, $L(\alpha)$.
Notice that for $\alpha < 1$, $L(\alpha) \approx \alpha/3$.

In any geologically reasonable situation, $\alpha = MH/kT$ is $< 10^{-6}$. The Langevin function is linear for $\alpha \ll 1$ with $L(\alpha) \approx \alpha/3$, and Equation (2.2) simplifies to

$$J = NML(\alpha) = \frac{NM\alpha}{3} = \frac{NM^2H}{3kT} \quad (2.3)$$

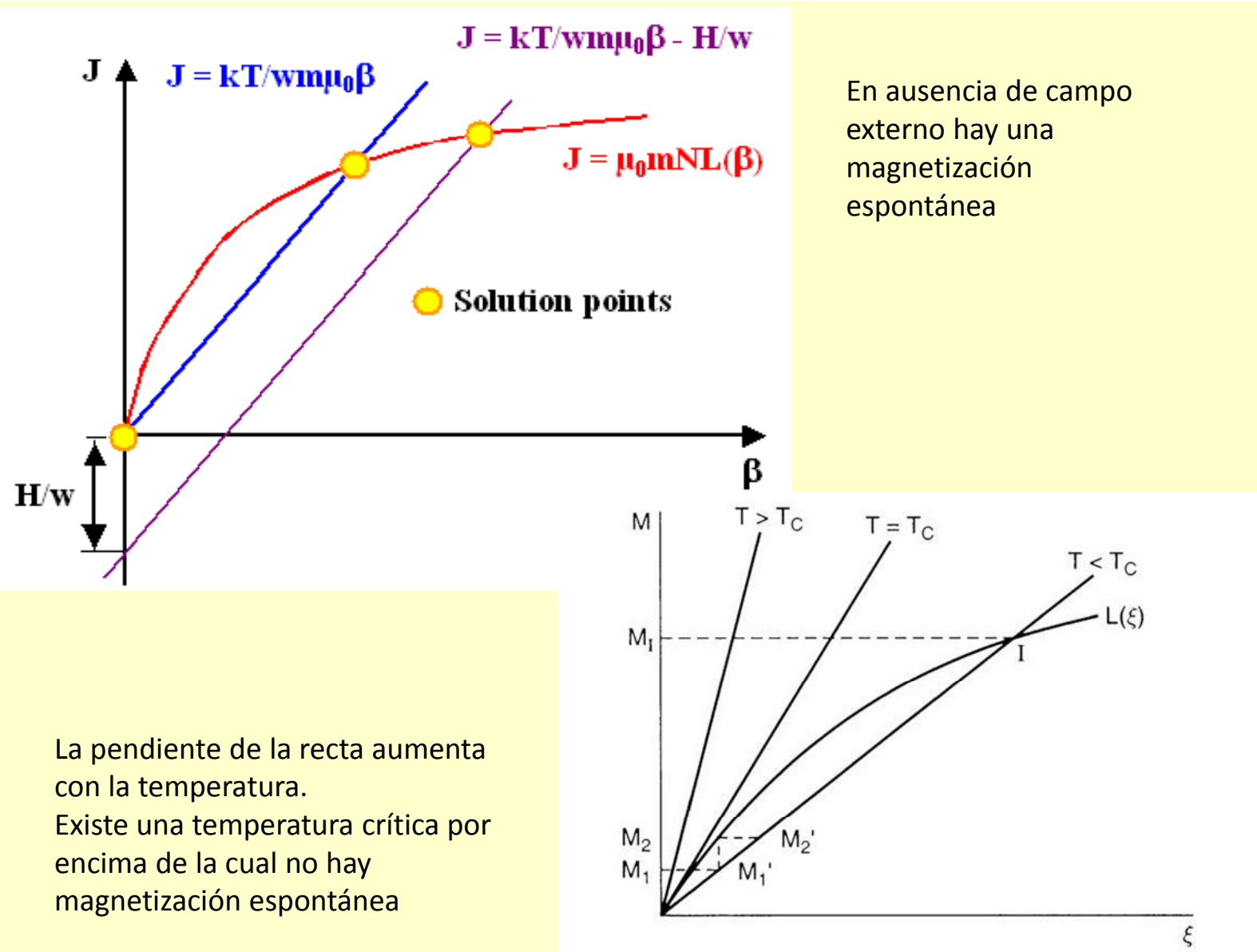
$$\chi = \frac{J}{H} = \frac{NM^2}{3kT} \quad (2.4)$$

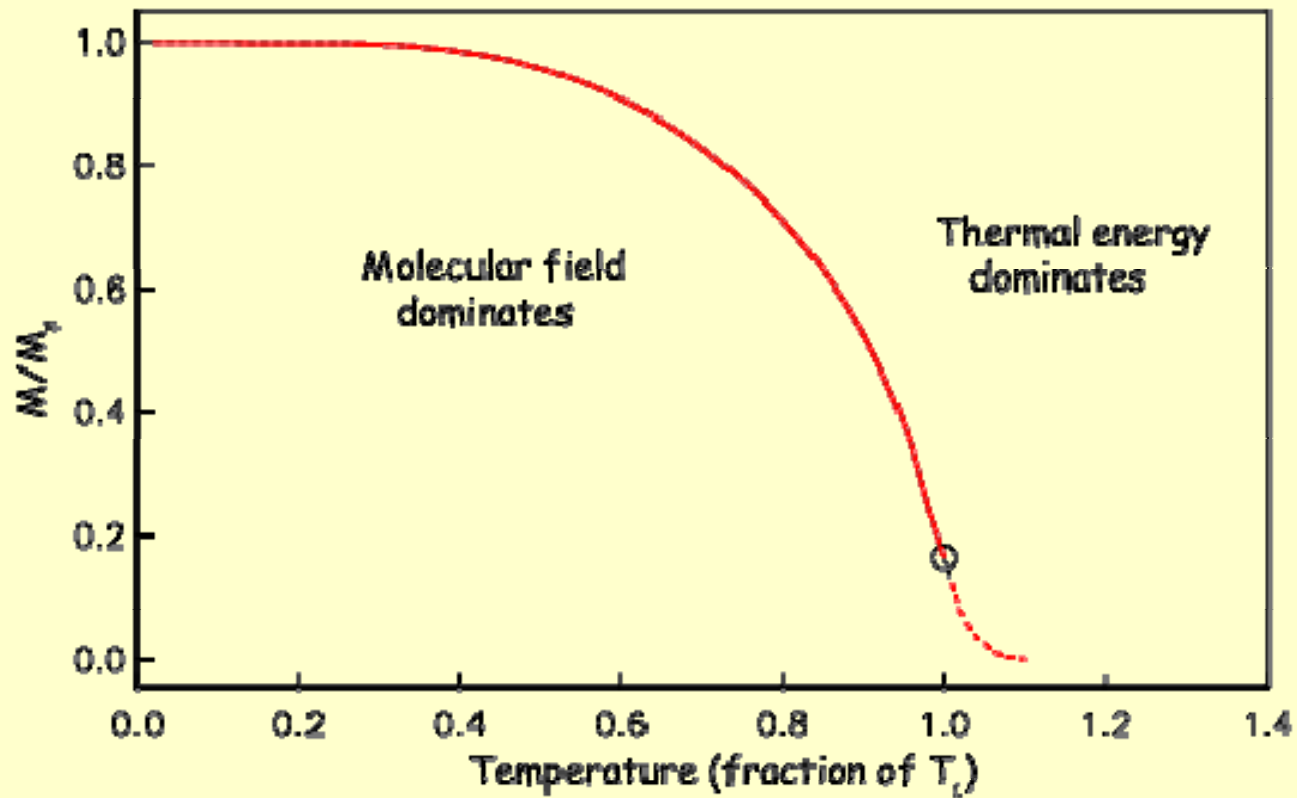
Suscept. Paramagnética

$$k = J / H$$

$$k = N M^2 / 3 K T$$

Ley de Curie: la inversa de la susceptibilidad paramagnética es proporcional a la temperatura absoluta.





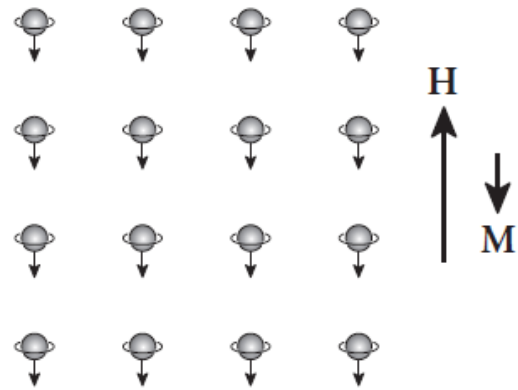
El aumento de la temperatura disminuye la posibilidad de interacción entre átomos vecinos y por lo tanto disminuye la magnetización espontánea.

El punto crítico en que la sustancia deja de ser ferromagnética se denomina temperatura de Curie

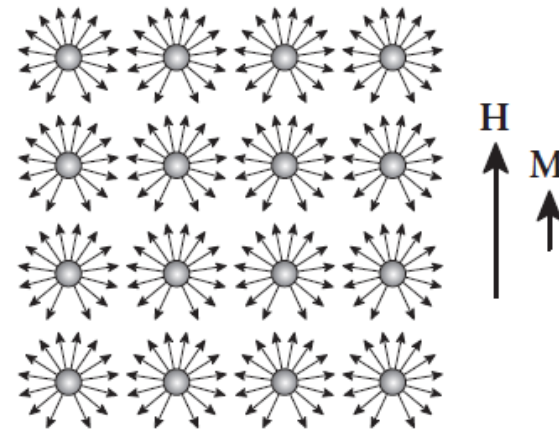
Ferromagnetismo

- Variante particular del Paramagnetismo.
- Se produce en elementos de la serie del Fe (1a serie de transición)
- Momento magnético producido por el spin de los electrones no apareados en el orbital 3d
- Determinado por distancia interatómica entre cationes (ej. Fe)
- Magnetización acoplada entre electrones de átomos vecinos debido a Principio de Exclusión de Pauli (4 números cuánticos que definen al electrón no pueden repetirse)
- Electrones comparten órbitas de átomos vecinos: se condicionan mutuamente ==→ acoplamiento magnético
- **Magnetización Espontánea**

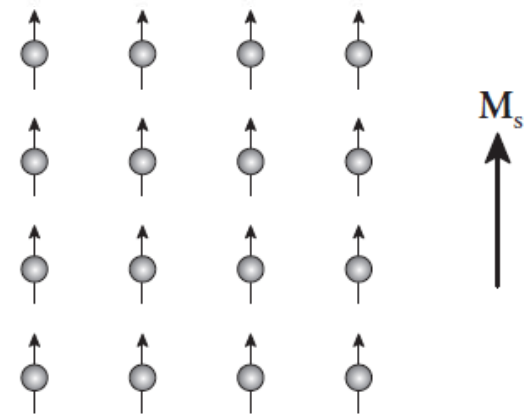
(a) diamagnetism



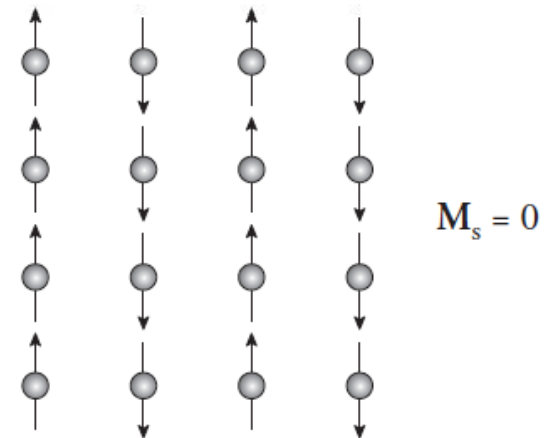
(b) paramagnetism



(c) ferromagnetism



(d) antiferromagnetism



Egli, 2011

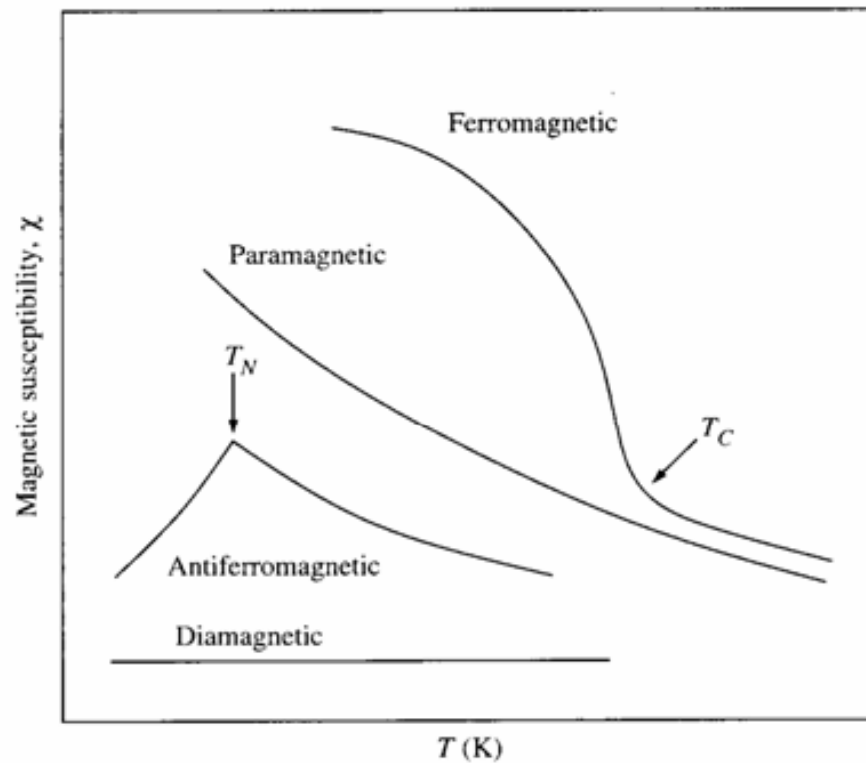


Fig. 11.59 Variation of magnetic susceptibility with temperature for diamagnetic, paramagnetic, ferromagnetic, and antiferromagnetic substances. Transitions to paramagnetic behavior for ferromagnetic and antiferromagnetic substances occur at the Curie (T_C) and Neel (T_N) temperatures, respectively.

Roca compuesta por un conjunto de partículas dia, para y ferromagnéticas. Sus propiedades magnéticas serán el producto de la influencia combinada de todas ellas.

Calcular la concentración de impurezas de magnetita suficientes para hacer que la susceptibilidad de una caliza sea positiva. Asumir que la susceptibilidad de la magnetita es 6, y la de la calcita, $-1,4 \times 10^{-5}$