

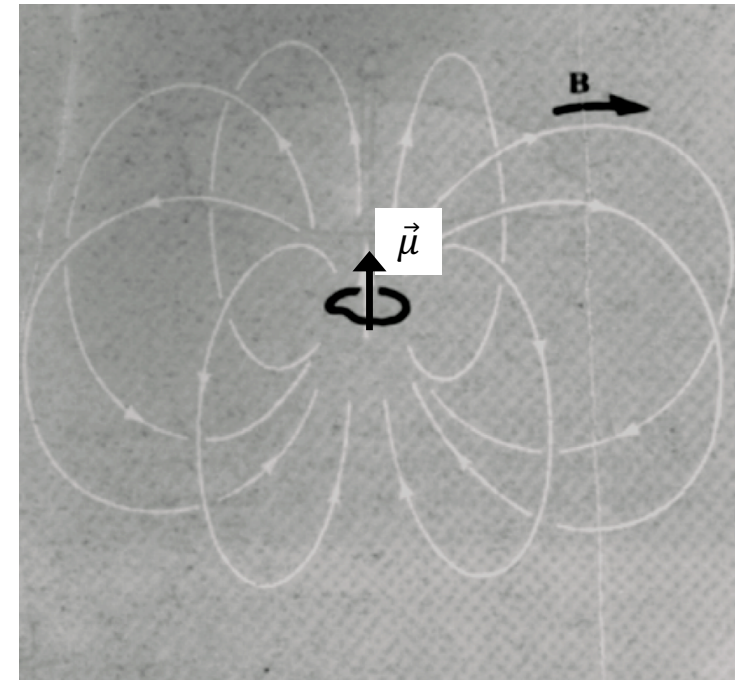
Magnetismo en la materia

El campo lejano de una espira es dipolar

- La ausencia de monopolos magnéticos hace que un campo dipolar sea la forma más básica de un campo magnético.
- Es posible demostrar que el campo magnético **lejos de cualquier espira plana es de tipo dipolar**.
- En coordenadas esféricas y tomando $\vec{\mu} = IA\hat{z}$:

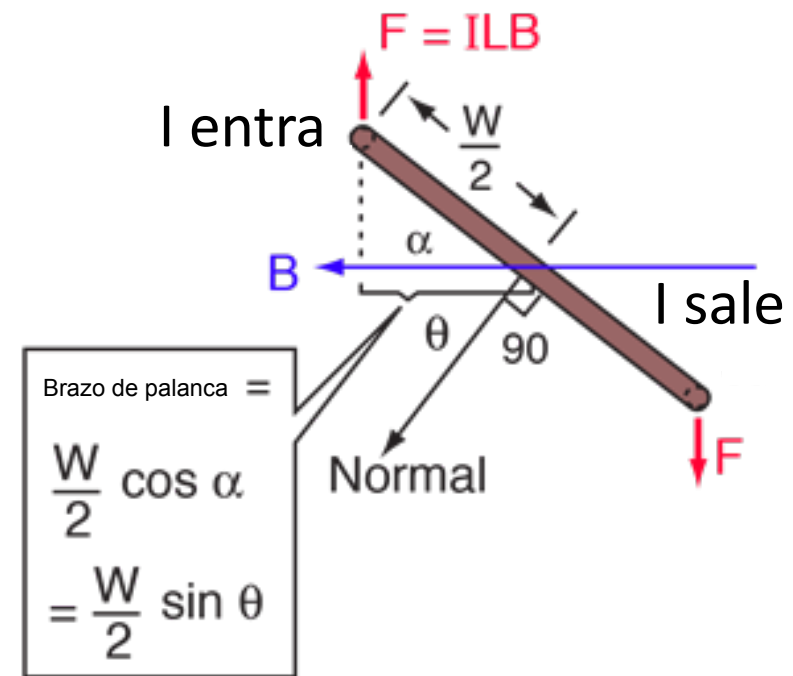
$$B_r = \frac{\mu_0\mu}{2\pi r^3} \cos \theta \quad B_\theta = \frac{\mu_0\mu}{4\pi r^3} \sin \theta \quad y \quad B_\phi = 0$$

- Ver deducción en documento en la página de la materia.



Torque sobre una espira de corriente

- Tomemos una espira rectangular de lados L y W por la que circula una corriente I .
- Coloquemosla en un campo uniforme $\vec{B}$ que forma un ángulo α con el lado de largo W .
- Nos interesa saber qué fuerzas aparecen y cómo se va a mover la espira.



θ es el ángulo entre $\vec{B}$ y la normal a la espira

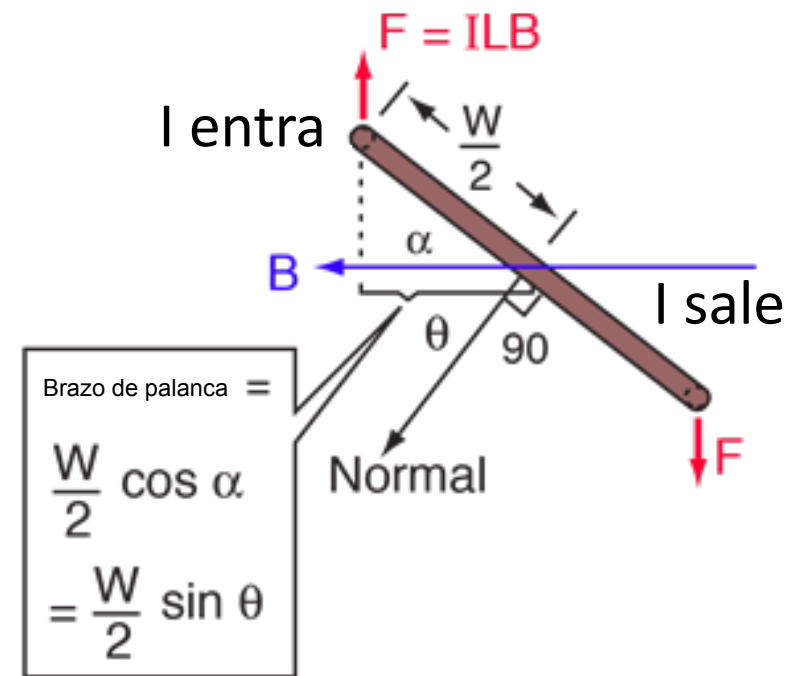
Torque sobre una espira de corriente

- Vimos en el caso de los dos hilos paralelos que la fuerza por unidad de distancia venía dada por

$$f = IB$$

- Entonces los lados de largo L experimentan fuerzas opuestas de intensidad

$$F = ILB$$

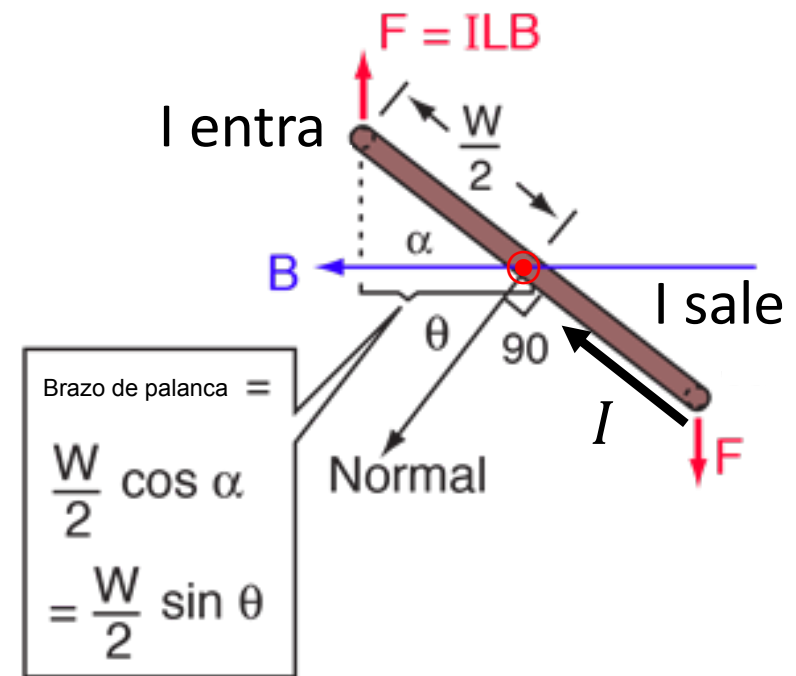


Torque sobre una espira de corriente

- Las fuerzas en los lados de largo W (salen y entran de la pantalla) también son iguales y opuestas, de valor

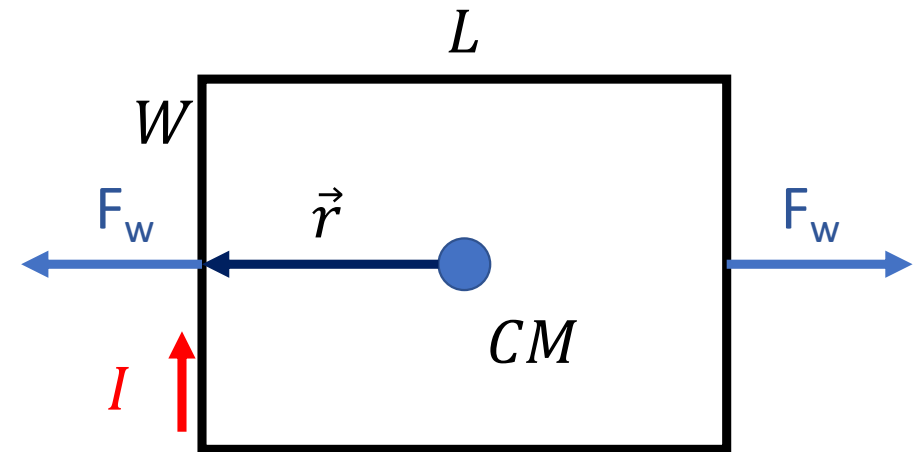
$$F_W = IWB \sin \alpha = IWB \cos \theta$$

- Entonces la suma total de fuerzas es cero y por lo tanto el centro de masa no se acelera.



Torque sobre una espira de corriente

- Respecto al centro de masa, el momento de las fuerzas sobre los lados de largo W son nulos



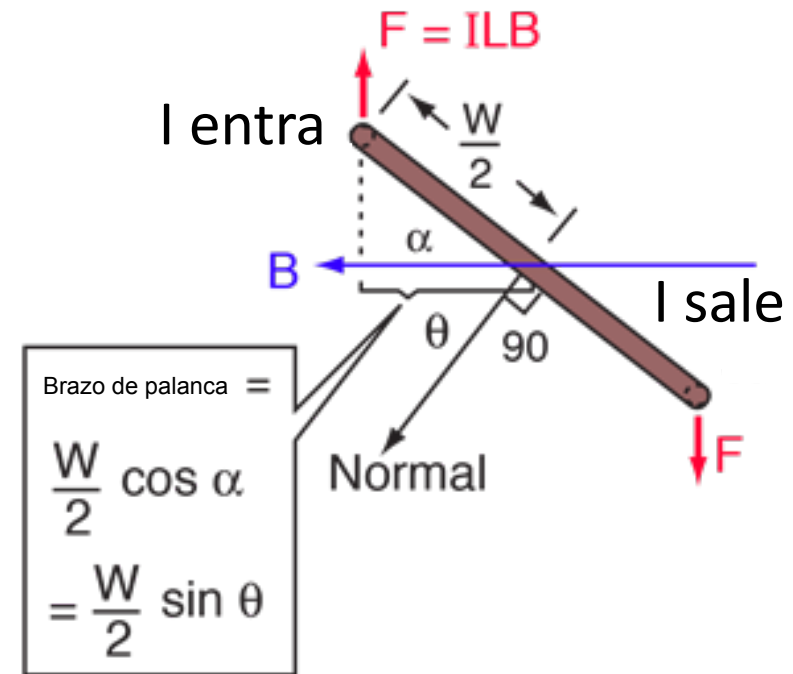
Vista de arriba

Torque sobre una espira de corriente

- Respecto al centro de masa, el momento de las fuerzas sobre los lados de largo W son nulos
- Mientras que los lados de largo L contribuyen con torques respecto al centro de masa

$$\tau = 2F \frac{W}{2} \cos \alpha = ILBW \cos \alpha$$

$$= B I Area \sin \theta$$
- El torque apunta hacia adentro de la pantalla y tiende a alejar la 'espira' de $\vec{B}$ o acercar la normal al campo.



Torque sobre una espira de corriente

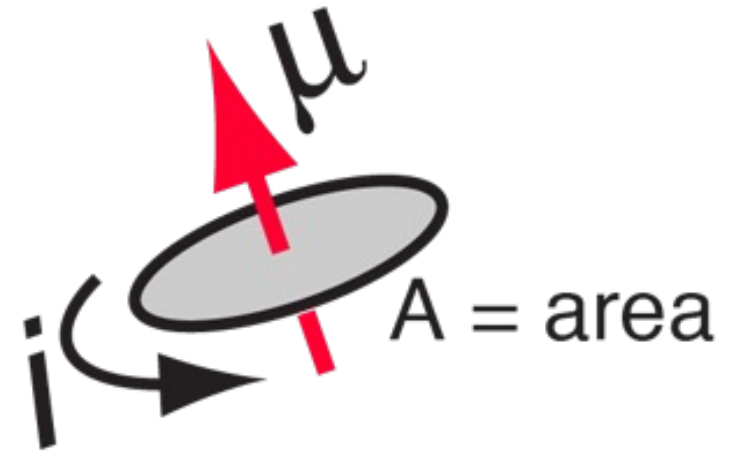
- Entonces el torque $\vec{\tau}$ se define como el producto vectorial del campo magnético y el vector momento magnético dipolar $\vec{\mu}$:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

- Donde:

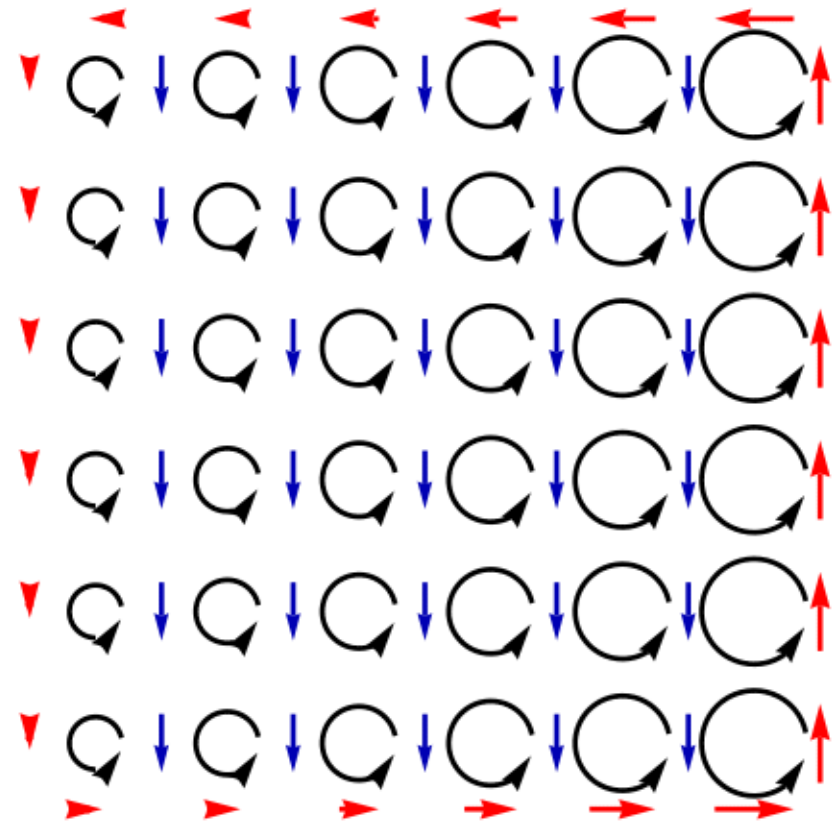
$$\vec{\mu} = IA\hat{n}$$

$\hat{n}$ es la normal a la espira obtenida mediante la regla de la mano derecha.



Magnetismo en la materia

- En particular Ampère formuló la hipótesis más simple sobre el magnetismo en la materia y era que un material puede aproximarse como un conjunto de pequeñas espiras distribuidas dentro del material



Materiales magnéticos

- Los materiales reaccionan de manera diferente a un campo magnético externo.
- Supongamos un campo magnético que llamaremos de vacío generado por un solenoide finito.
- Coloquemos una muestra conectada a un dinamómetro e introduzcamosla en el solenoide.

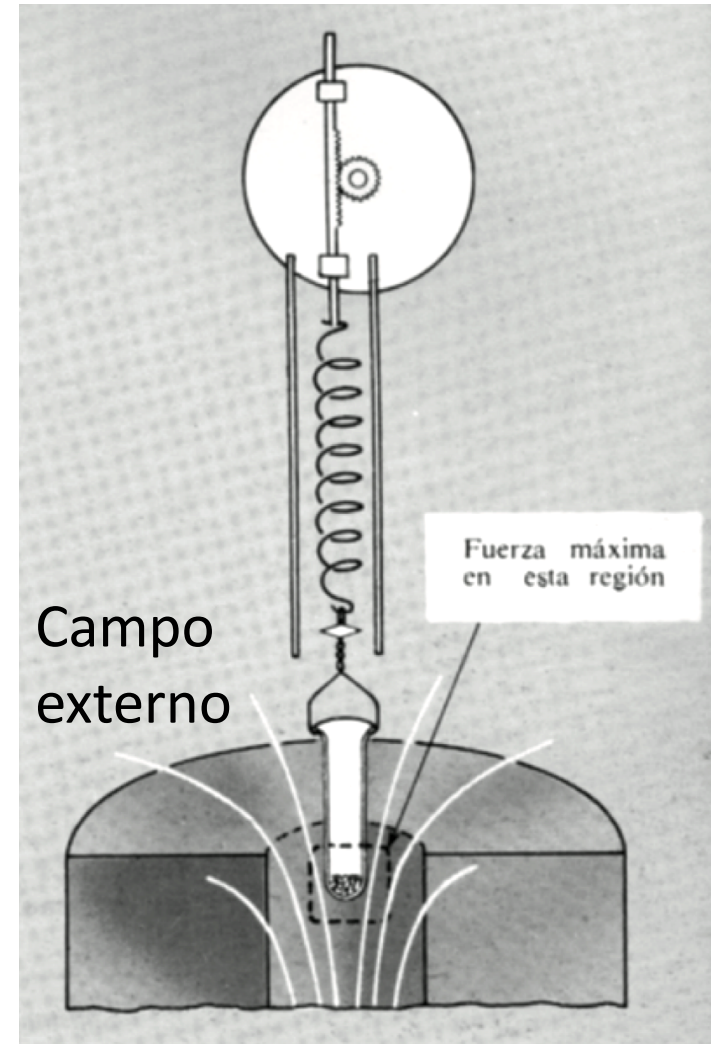
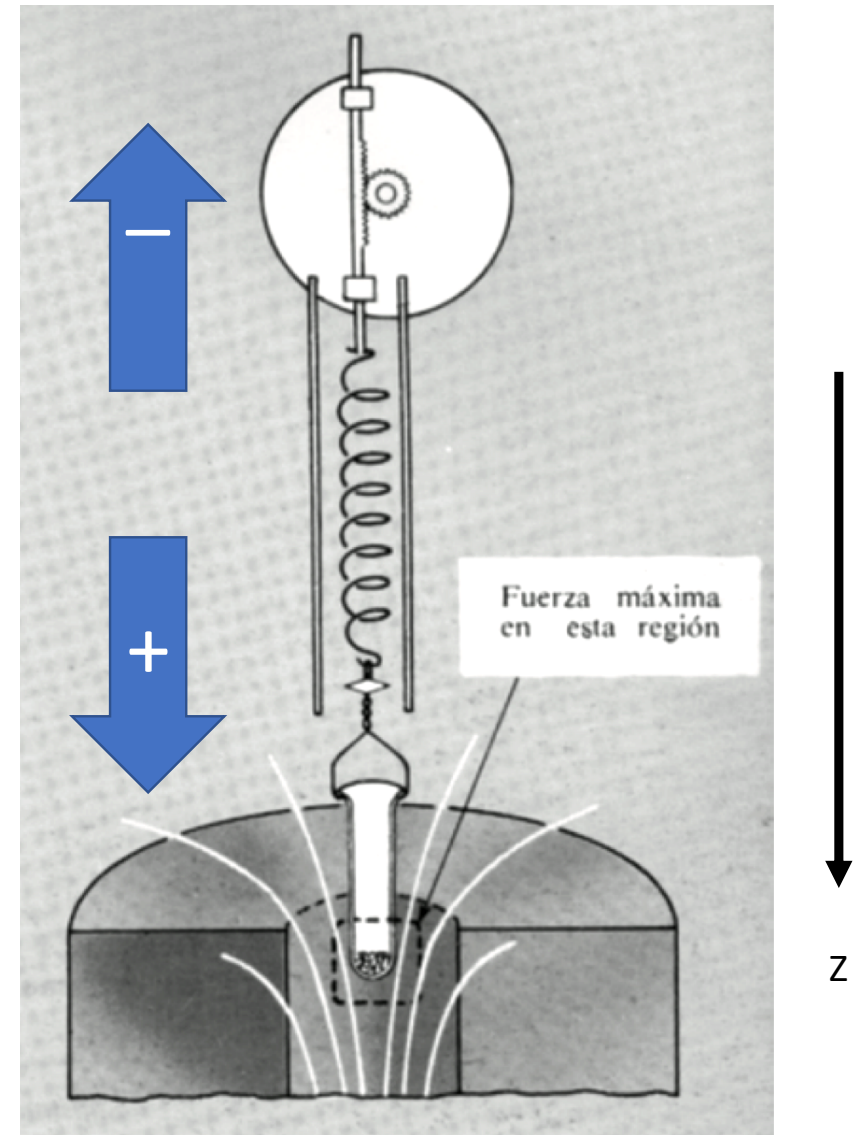


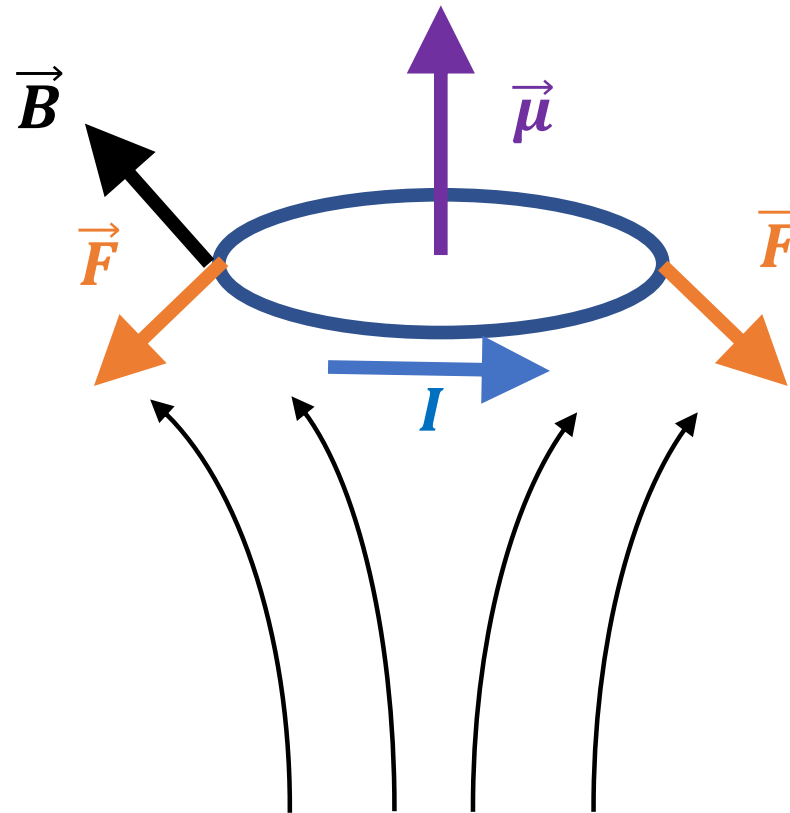
Tabla 11.1 Fuerza sobre un gramo de muestra cerca del extremo superior de una bobina con $B_z = 1,8$ tesla
 $dB_z/dz = 17$ T/m

<i>Substancia</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Fuerza*</i> , <i>Newton · 10⁻⁵</i>
Diamagnéticas		
Agua	H ₂ O	— 22
Cobre	Cu	— 2,6
Plomo	Pb	— 37
Cloruro sódico	NaCl	— 15
Cuarzo	SiO ₂	— 16
Azufre	S	— 16
Diamante	C	— 16
Grafito	C	— 110
Nitrógeno líquido	N ₂	— 10 (78 K)
Paramagnéticas		
Sodio	Na	+ 20
Aluminio	Al	+ 17
Cloruro de cobre	CuCl ₂	+ 280
Sulfato de níquel	NiSO ₄	+ 830
Oxígeno líquido	O ₂	+ 7500 (90 K)
Ferromagnéticas		
Hierro	Fe	+ 400 000
Magnetita	Fe ₃ O ₄	+ 120 000

* Sentido de la fuerza: hacia abajo +, hacia arriba —,
 Todas las medidas se han efectuado a 20 °C excepto cuando se indica.



Fuerza
sobre un
dipolo en
campo no
uniforme

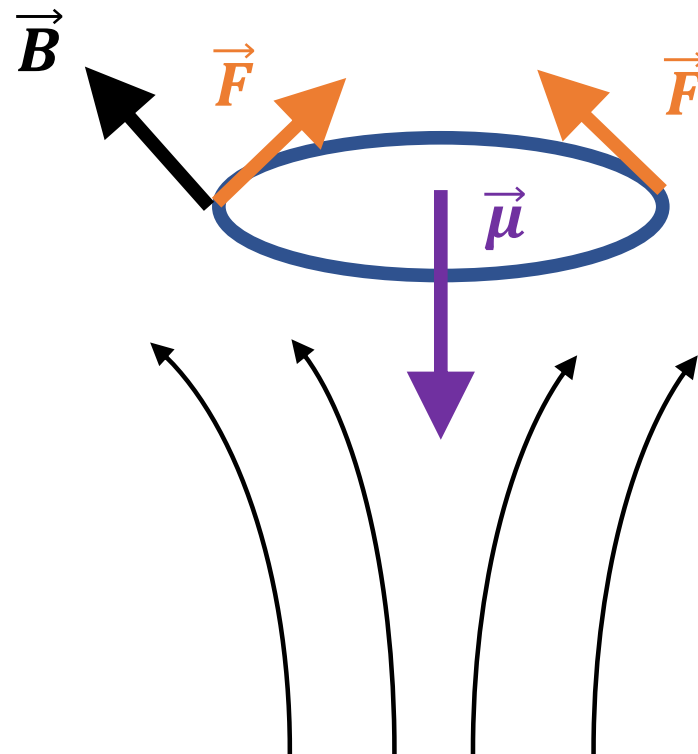


Campo externo
(solenoid)



z

Fuerza
sobre un
dipolo en
campo no
uniforme

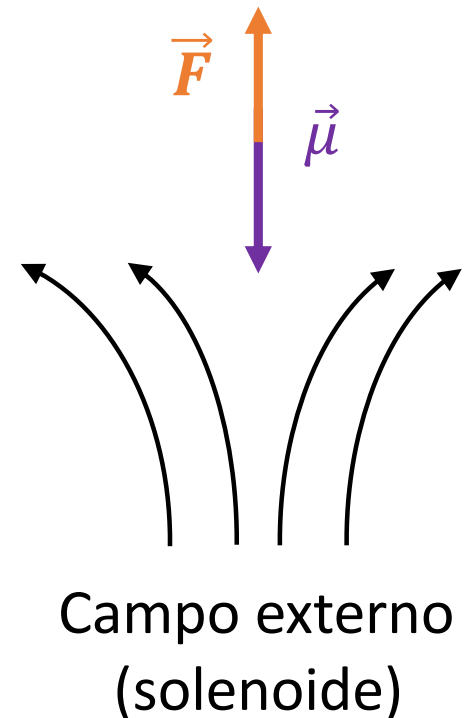


Campo externo
(solenoid)

z

Diamagnetismo

- En los elementos diamagnéticos, el campo exterior induce a nivel atómico y molecular momentos dipolares magnéticos microscópicos en la dirección opuesta.
- Se trata de un efecto descrito por la mecánica cuántica.
- En consecuencia el campo en el interior del material es menor que el campo externo.
- La fuerza resultante sobre el dipolo inducido tiende a alejarlo del solenoide



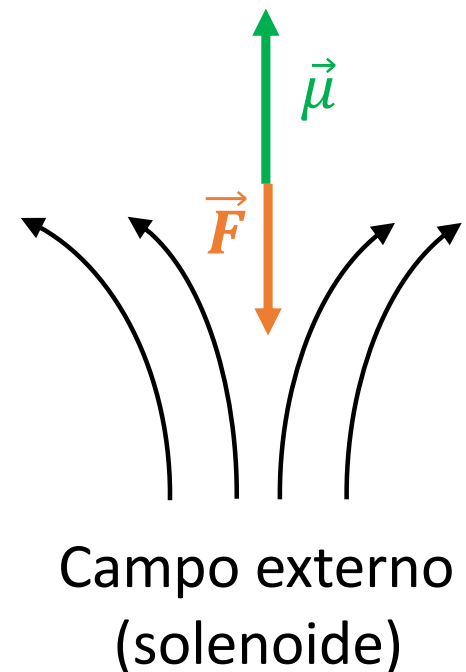
Paramagnetismo

- Estructura formada por átomos que poseen dipolos magnéticos permanentes normalmente distribuidos al azar.



Paramagnetismo

- Estructura formada por átomos tienen que poseen dipolos magnéticos permanentes normalmente distribuidos al azar.
- Dipolos atómicos se alinean con el campo externo.
- Es atraído hacia donde el campo externo aumenta



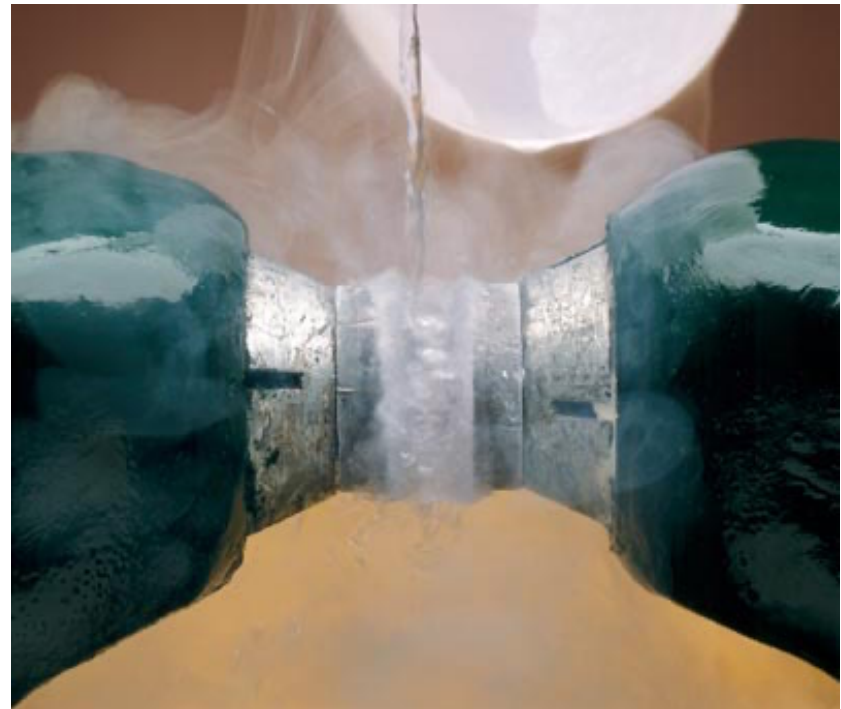
Paramagnetismo

- Estructura formada por átomos tienen que poseen dipolos magneticos permanentes normalmente distribuidos al azar.
- Dipolos atómicos se alinean con el campo externo.
- Es atraído hacia donde el campo externo aumenta
- Al dejar de exponer el material al campo externo, los dipolos se vuelven a desordenar.



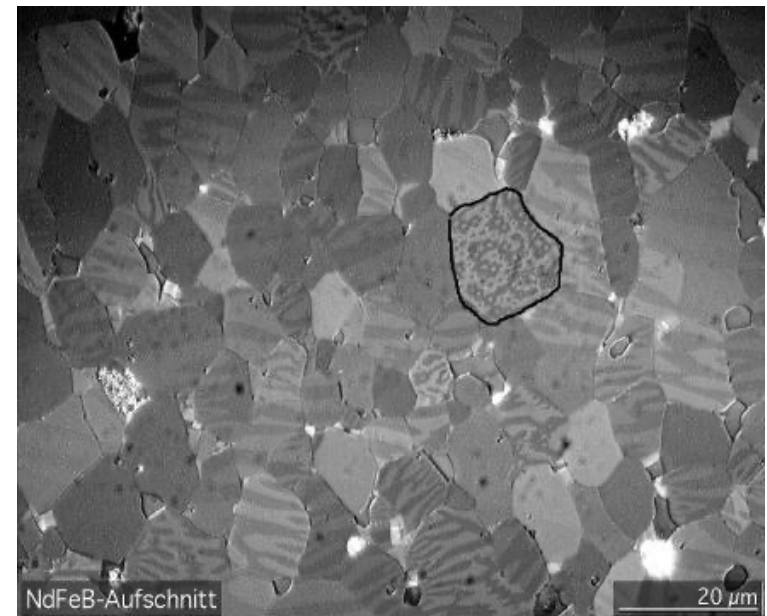
Paramagnetismo

- En general son fuerzas débiles, pero en el caso de algunos líquidos, la fuerza es capaz de compararse al peso
- La figura muestra oxígeno líquido siendo vertido entre los polos de un imán



Ferromagnetismo

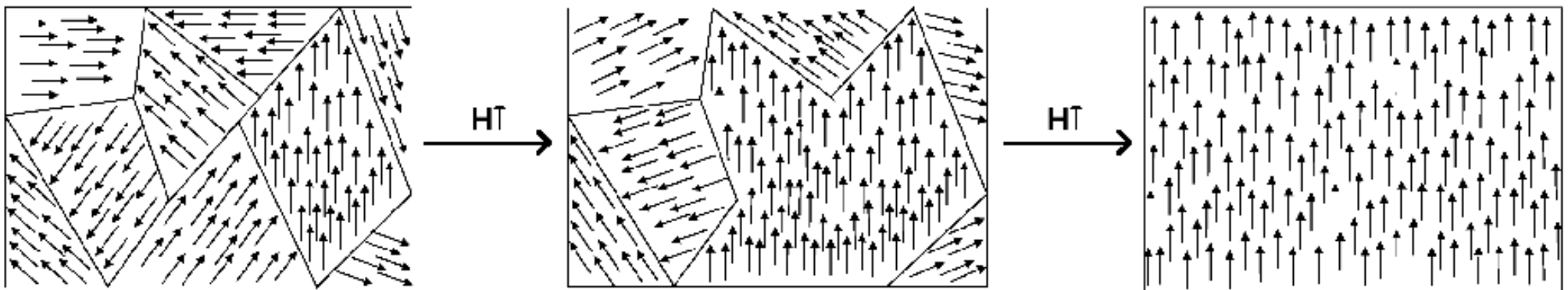
- Átomos tienen dipolos magnéticos permanentes.
- Por razones cuánticas, estos materiales poseen zonas llamadas dominios magnéticos.
- Los dominios tienen un tamaño de algunos $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.
- En estos dominios, los dipolos magnéticos de los átomos/moléculas están 100% alineados.



Vista de dominios magnéticos (rayas oscuras y claras) en una aleación usada para hacer imanes

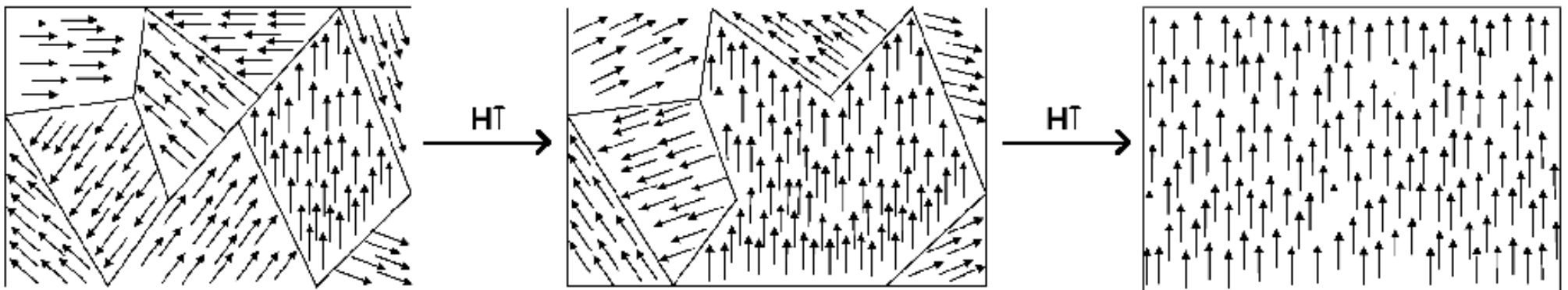
Ferromagnetismo

- Al ser expuestos a un campo externo los dominios se alinean más o menos con él dependiendo de la intensidad de aquel, y la temperatura.
- Son materiales atraídos al campo externo con una fuerza mayor a los paramagnéticos.
- Dentro del material el campo puede ser varios órdenes de magnitud más grande que el campo externo.

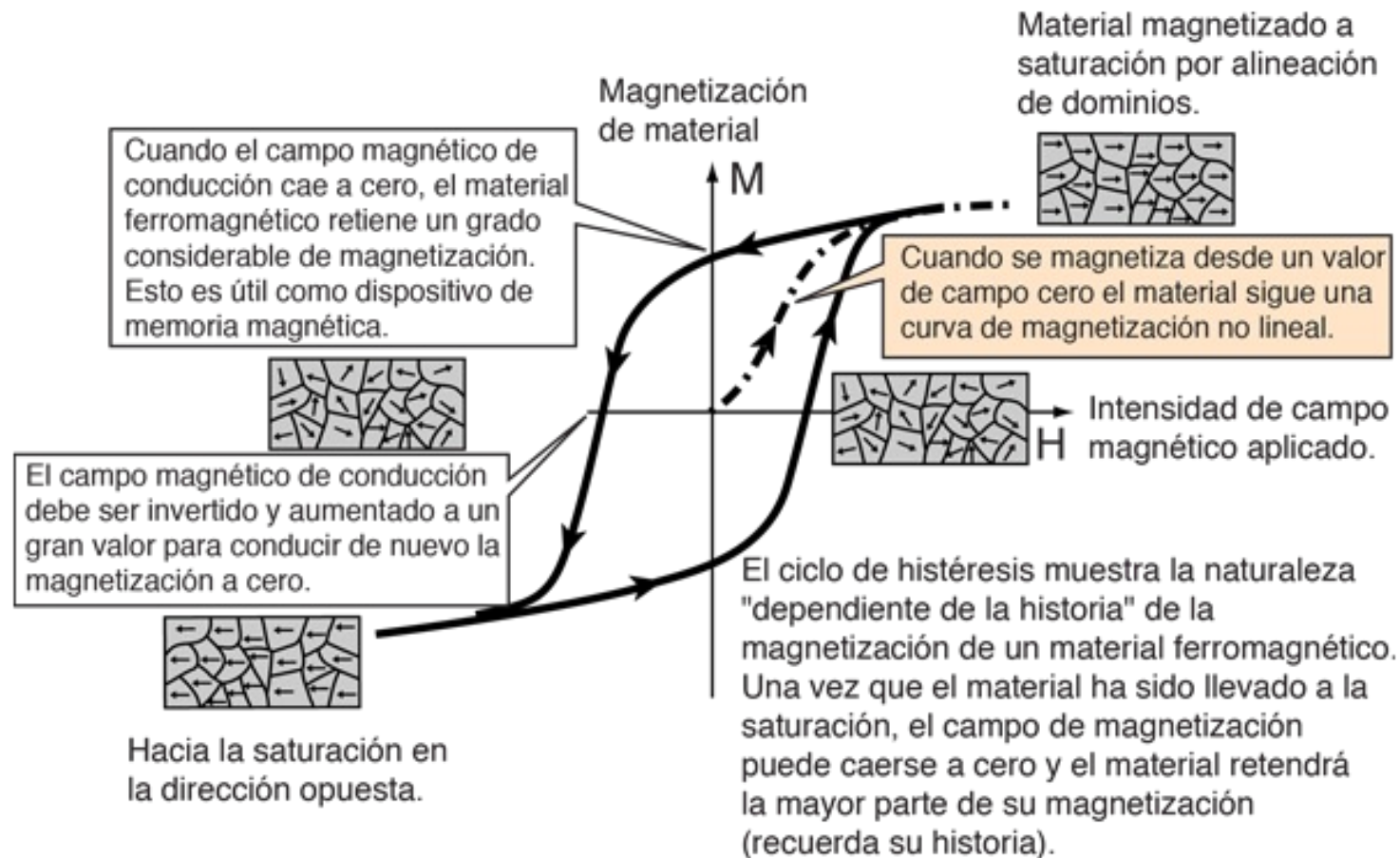


Ferromagnetismo

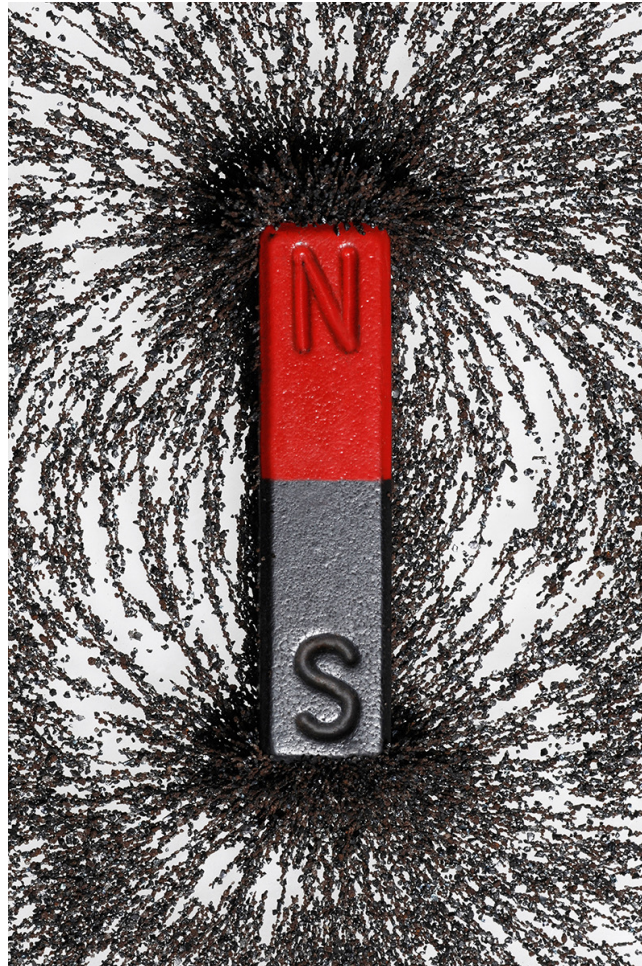
- Al quitar el campo externo algunos dominios pueden desorganizarse, otros no, quedando el material magnetizado permanentemente.
- Para desmagnetizar hay que calentarlo mucho o alterarlo mecánicamente.



Ferromagnetismo: ciclo de Histéresis

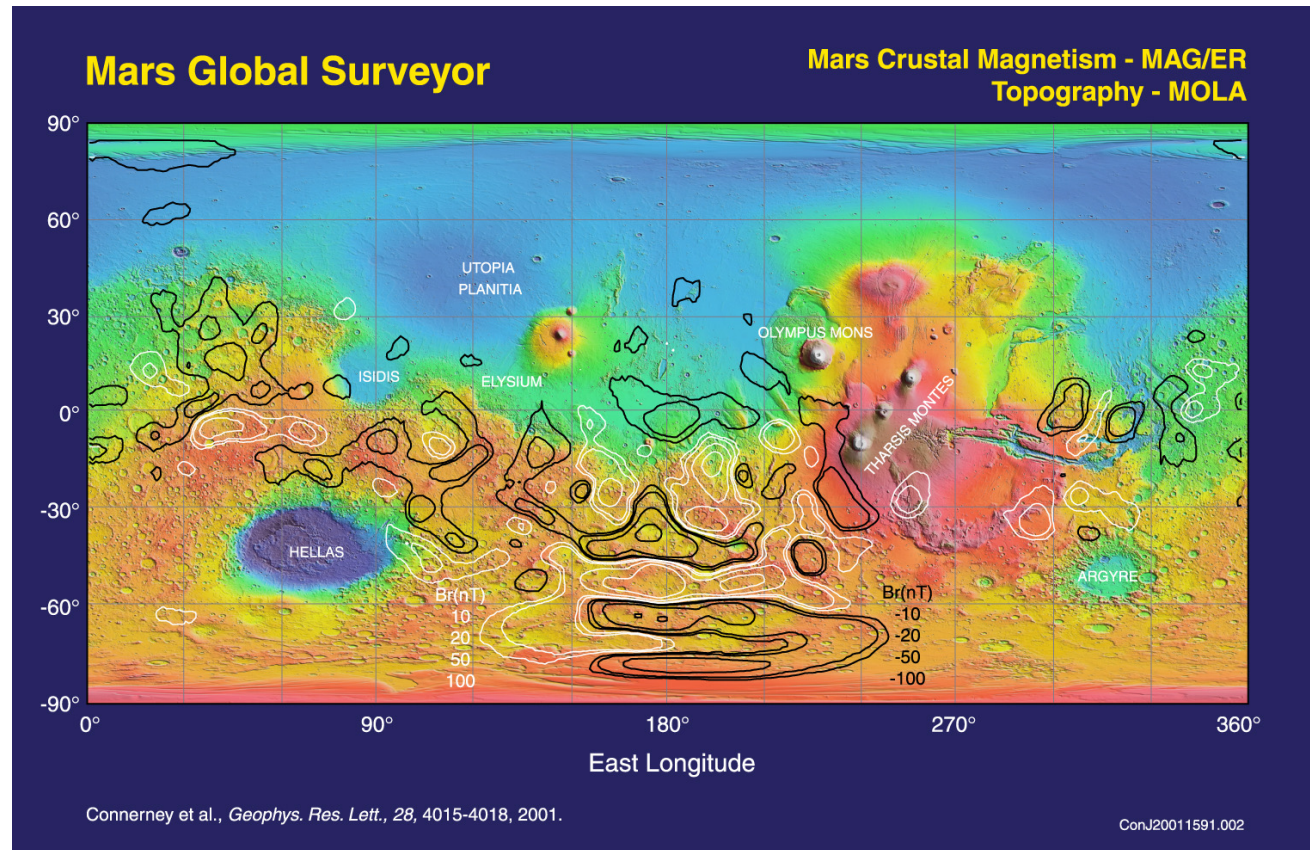


Imanes permanentes



Datación del dínamo marciano

- Marte presenta magnetización cortical principalmente concentrada en el hemisferio sur.
- Las cuencas de impacto Argyre y Hellas de una edad de $4 \cdot 10^9$ años están desmagnetizadas.
- En el momento de formación de ambas ya no había un campo magnético global



Ley de Ampère para materiales magnéticos

- Para algunos materiales el campo generado por el material $\vec{B}_{mat}$ es proporcional al campo externo $\vec{B}_{ext}$

$$\vec{B}_{mat} = \chi_m \vec{B}_{ext}$$

χ_m es la susceptibilidad magnética del material

- Entonces el campo total en el material es la suma del campo generado por el material y el campo externo.

$$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \vec{B}_{mat} = \vec{B}_{ext} + \chi_m \vec{B}_{ext} = (1 + \chi_m) \vec{B}_{ext}$$

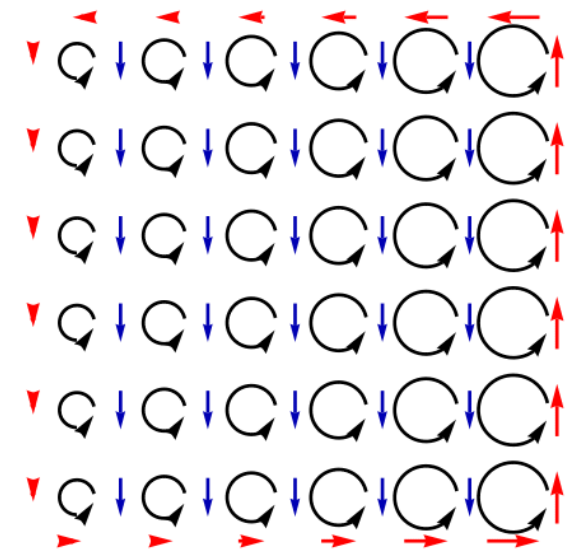
Tipo de material	Material	Susceptibilidad Magnética (χ) [aprox.]	Comportamiento y Aplicaciones Clave
Diamagnéticos	Bismuto (Bi)	-1.6×10^{-4}	Más diamagnético. Repelido fuertemente por imanes; demostraciones de levitación.
	Oro (Au)	-3.4×10^{-5}	Repelido débilmente. Joyería, electrónica donde se evita interferencia magnética.
	Agua (H ₂ O)	-9.0×10^{-6}	Repelida. Base para la levitación diamagnética (ej.: un imán sobre agua).
	Carbono (Grafito)	-1.6×10^{-5}	Repelido y capaz de levitar. Lubricante seco, electrodos.
Paramagnéticos	Aluminio (Al)	$+2.1 \times 10^{-5}$	Atraído débilmente. Embalajes, estructuras, cables eléctricos.
	Titanio (Ti)	$+1.8 \times 10^{-4}$	Atraído débilmente. Aleaciones ligeras y resistentes (aeroespacial, médica).
	Oxígeno Líquido (O ₂)	$+3.7 \times 10^{-3}$	Fuertemente paramagnético. Combustible para cohetes, demostraciones científicas.
	Aire (a 1 atm)	$+3.0 \times 10^{-7}$	Muy débilmente paramagnético (por el O ₂). Medio gaseoso omnipresente.
Ferromagnéticos	Hierro (Fe)	~200 a 5,000	El más común. Núcleos de transformadores, motores, imanes permanentes, núcleos electromagnéticos.
	Níquel (Ni)	~100 a 600	Aleaciones magnéticas, baterías recargables, blindaje magnético.
	Cobalto (Co)	~70 a 250	Imanes de alta resistencia (con Samario y Neodimio), aleaciones para herramientas de corte.
	Acero al Silicio	~500 a 4,000	Núcleos de transformadores y motores (reduce pérdidas por corrientes parásitas).
	Permalloy (80%Ni, 20%Fe)	Hasta ~100,000	Alta permeabilidad magnética. Núcleos de transformadores de audio, cabezales de grabación magnética.

Ley de Ampère para materiales magnéticos

- El segundo término del segundo miembro es el campo debido al material. Se define un vector polarización magnética $\vec{M}$ tal que

$$\vec{M} = \frac{\chi_m}{\mu_0} \vec{B}_{ext} = \frac{\chi_m}{\mu_0(1 + \chi_m)} \vec{B}$$

- El vector $\vec{M}$ es la densidad volumétrica de momento magnético. Es el producto del número de dipolos orientados por unidad de volumen por el momento magnético $\vec{\mu}$ de cada átomo o molécula (debidos a movimiento orbital y spin).

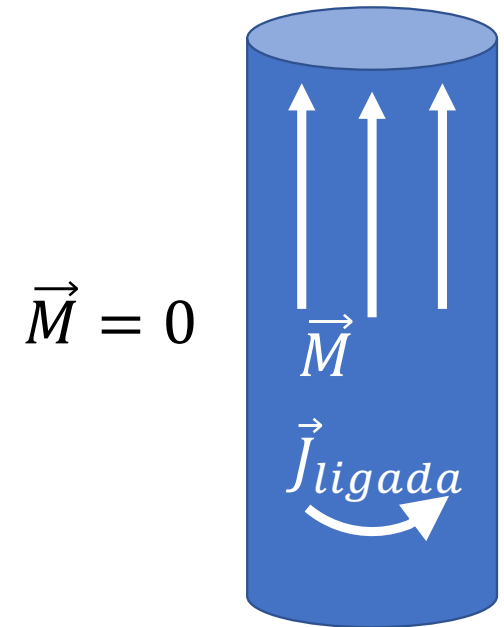


Ley de Ampère para materiales magnéticos

- A partir de un análisis similar al que realizamos con dieléctricos es posible llegar a la relación entre $\vec{M}$ y la densidad de corriente asociada a los momentos magnéticos del material polarizado, es decir, $\vec{J}_{ligada}$

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

- En el caso de un material con $\vec{M}$ uniforme, $\vec{J}_{ligada}$ corre sobre la superficie del material.



Ley de Ampère para materiales magnéticos

- Usando la definición de $\vec{M}$ tenemos que el campo total

$$\vec{B} = \vec{B}_{ext} + \chi_m \vec{B}_{ext} = \vec{B}_{ext} + \mu_0 \vec{M}$$

- Es decir, el campo total en el material es la suma del campo externo más una contribución de los dipolos magnéticos inducidos por el mismo campo externo.
- Ahora definimos el campo $\vec{H}$ tal que considera el campo total menos la contribución del material:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \frac{\chi_m \vec{B}}{\mu_0(1 + \chi_m)} = \frac{\vec{B}}{(1 + \chi_m)\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_m}$$

- Se define así la **permeabilidad magnética del material** μ_m .

Ley de Ampère para materiales magnéticos

- Entonces,

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla} \times (\vec{B}_{ext} + \mu_0 \vec{M}) = \vec{\nabla} \times \vec{B}_{ext} + \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{M}$$

- Como $\vec{\nabla} \times \vec{B}_{ext} = \mu_0 \vec{J}_{libre}$, entonces:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{libre} + \vec{J}_{ligada})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \mu_0 \vec{J}_{ligada} = \mu_0 \vec{J}_{libre}$$

$$\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \vec{J}_{ligada} = \vec{J}_{libre}$$

Ley de Ampère para materiales magnéticos

- Entonces:

$$\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{B} - \vec{\nabla} \times \vec{M} = \vec{\nabla} \times \left[\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right] = \vec{J}_{libre}$$

- Y recordando la definición de $\vec{H}$:

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

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \vec{J}_{libre} \cdot d\vec{a}$$

Ley de Ampère
para medios
magnéticos.