

# Magnetismo en la materia (Materiales magnéticos)

- Introducción.
- Modelo atómico de un material magnético: Imanación  $M$
- Campo vectorial intensidad del campo magnético  $H$
- Tipos de materiales magnéticos

## BIBLIOGRAFÍA:

- Tipler. "Física". Cap. 27. Reverté.
- Serway. "Física". Cap. 30. McGraw-Hill.



# Introducción

El conocimiento de los materiales magnéticos se remonta a la antigüedad. Se cree que el descubrimiento de imanes naturales, magnetita, aconteció hacia el primer milenio antes de nuestra era. Cerca de la ciudad de magnesia se encuentra de forma natural.

El primero en desarrollar una teoría de los fenómenos magnéticos fue Empédocles hacia 450 a.c.



No será hasta el año 1600 que William Gilbert compile en “About the Magnet, Magnetic Bodies, and About the Great Magnet: The Earth” todos los conocimientos de magnetismo conocidos hasta la fecha.



•Siméon-Denis de Poisson (1781-1840) desarrolló las primeras teorías que contenían la diferencia entre campo magnético  $B$  e intensidad del campo magnético  $H$  para poder estudiar el comportamiento de los materiales magnéticos.



Para más información: [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_field](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field)

# Introducción

- Son materiales magnéticos los que se comportan como un “*imán*” bajo la acción de campos magnéticos. Por esto es muy importante comprender la interacción del campo magnético con los materiales.
- Los materiales magnéticos puedan crear campos magnéticos propios. Este fenómeno se debe al momento dipolar magnético de sus átomos.
- La naturaleza del momento dipolar magnético se encuentra, y solo se explica, por el comportamiento y naturaleza cuántica de los fenómenos presentes a escala atómica. La Física clásica no puede explicar los fenómenos magnéticos de forma fundamental.
- Las aplicaciones de los materiales magnéticos son innumerables: transformadores, electroimanes, motores eléctricos, generadores, micrófonos, altavoces, equipos electrónicos de comunicaciones, equipos médicos, memorias de ordenadores, sistemas de almacenamiento de datos, circuitos lógicos, sensores, detectores, ....

# Imanación M

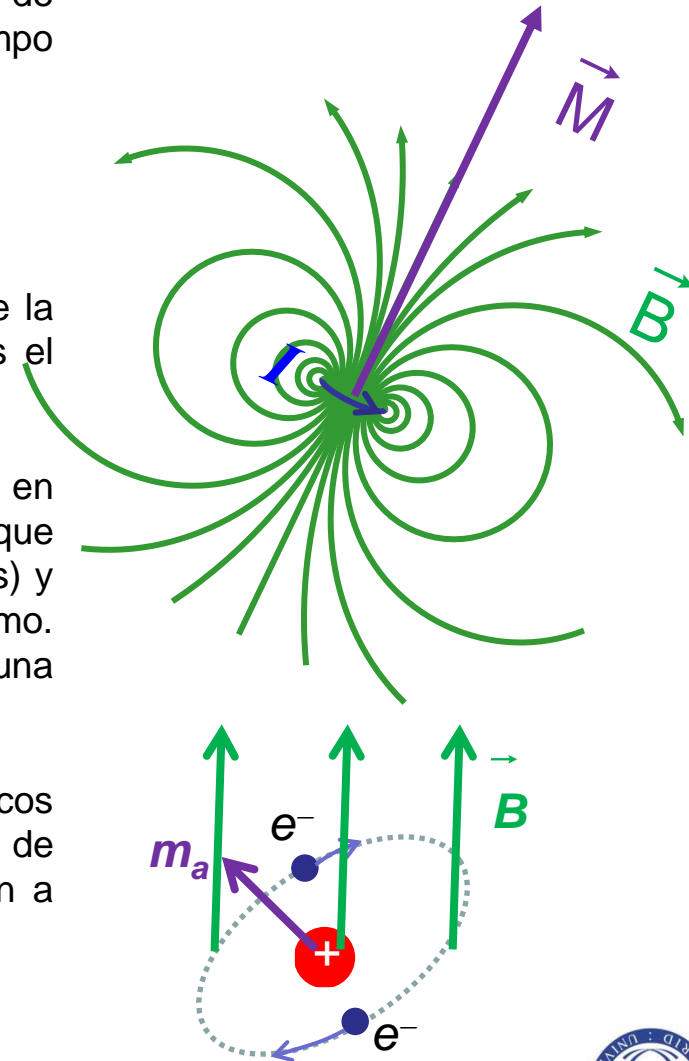
Recordemos el concepto de momento magnético: Una espira de superficie  $S$  por la que circula una corriente  $I$  que genera un campo magnético  $\mathbf{B}$ , tiene un momento magnético:

$$\vec{M} = I\vec{S}$$

Siendo  $\mathbf{S}$  un vector cuyo módulo es el valor de la superficie de la espira, su dirección perpendicular a la espira, y su sentido es el dado por la regla de la mano derecha aplicada a la corriente  $I$ .

En algunos materiales, los electrones al *move* en su orbitales en torno a los átomos, se comportan como una corriente eléctrica que da lugar a un campo magnético atómico (solo en algunos casos) y confiere un momento dipolar magnético atómico  $\mathbf{m}_a$  a cada átomo. Este momento está relacionado con el *spin* de los electrones (una propiedad de la mecánica cuántica).

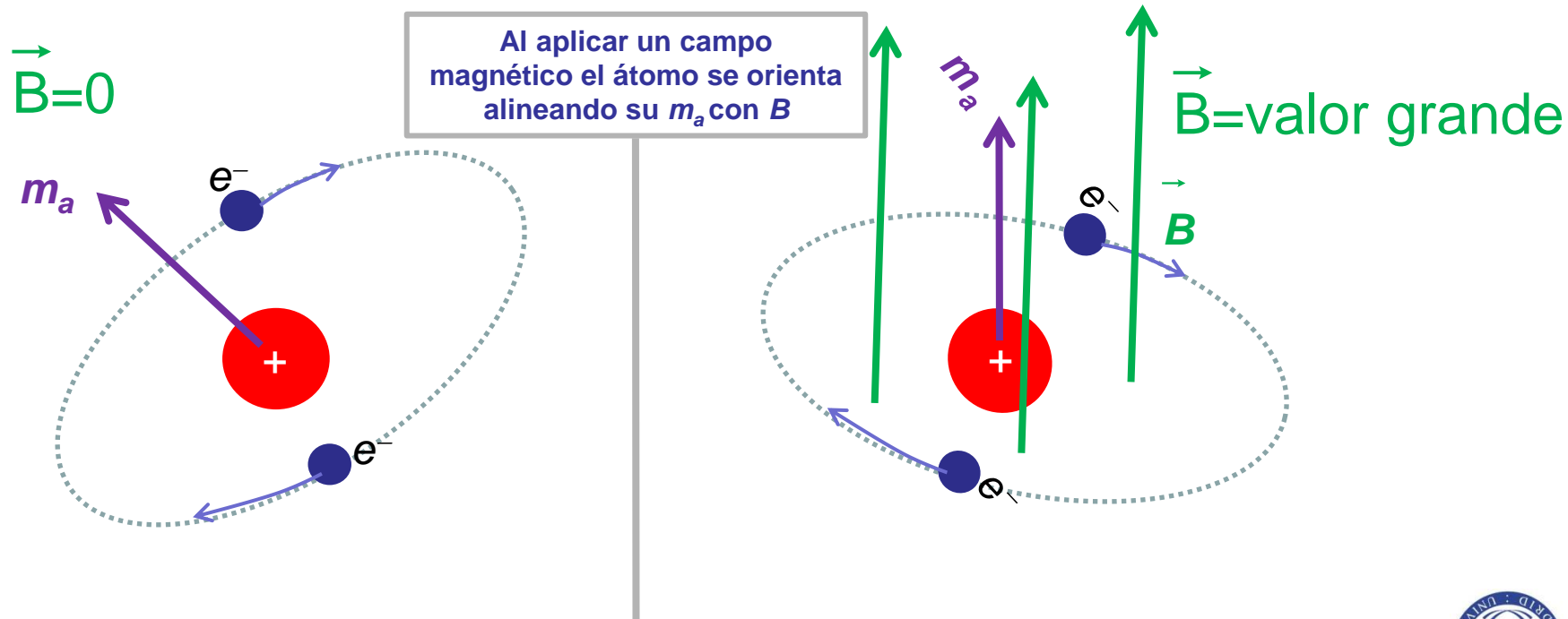
Este momento magnético interactuará con campos magnéticos externos de igual manera a la ya vista en espiras y con el de átomos vecinos. Esta interacción hace que los átomos tiendan a ordenarse en la dirección de  $\mathbf{B}$ .



# Imanación M

## Resumiendo:

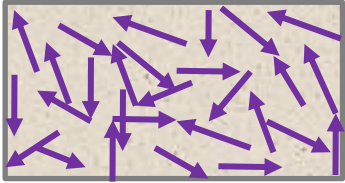
- Algunos átomos tienen momento magnético  $m_a$ .
- En condiciones normales, los átomos están orientados al azar (no en todos los materiales).
- Al aplicar un campo magnético los átomos tienden a alinear su  $m_a$  la dirección del campo  $B$  aplicado.



# Imanación M

**Imanación M:** Interacción del momento magnético atómico con campos magnéticos externos:

$B=0$

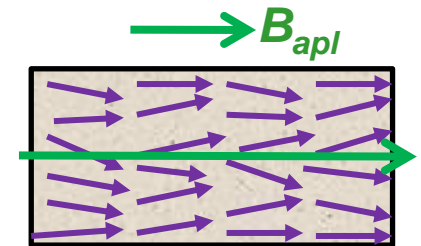


**Campo aplicado:  $B=0$**

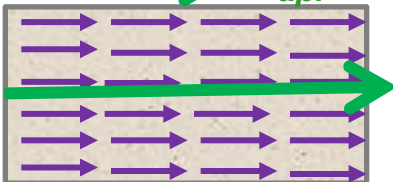
El material no tiene un momento magnético neto ya que cada átomo tiene su  $m_a$  apuntando al azar. Como el Momento magnético total es cero  $M=0$  se dice que el material está **desimantado**.

**Campo aplicado  $B$ :**

Los  $m_a$  se tienden a orientarse en la dirección de  $B$  girando los átomos. El Momento magnético neto del material es  $M \neq 0$ . Se dice que el material está **imanado**.



$B_{apl}$  grande



**Campo aplicado  $B$  grande:**

Los  $m_a$  se orientan en la dirección de  $B$  aplicado. El material tiene su máximo Momento magnético. Se dice que el material se ha **imanado a saturación**.

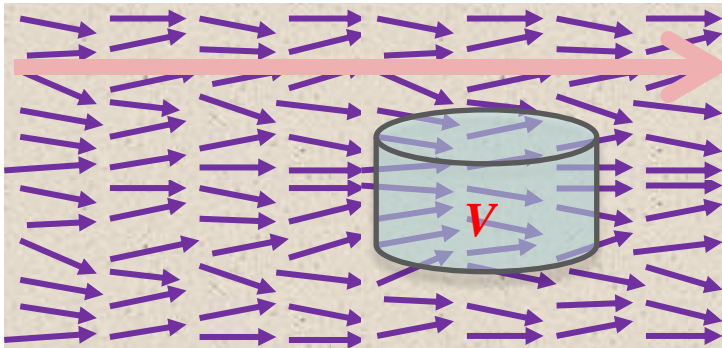
Los átomos tienden a alinear su  $m_a$  con el campo magnético  $B$  aplicado, y la facilidad con que se imana un material depende de su naturaleza: tipo de átomos, estructura cristalina, composición...

# Imanación $M$

Si un material esta imanado, en un volumen  $V$  habrá una cantidad de momento magnético que será la suma vectorial de los momentos magnéticos de todos los átomos dentro de ese volumen  $V$ .

 $\vec{M}$ 

$$d\vec{m} = \sum \vec{m}_a$$



Se define la imanación  $M$  del material como

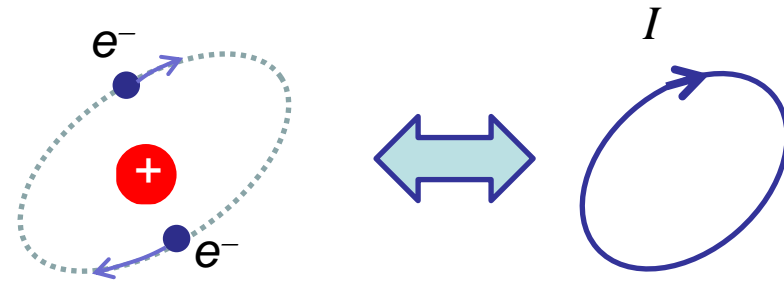
$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV}$$

Las unidades son en el SI  $[M]=A/m$

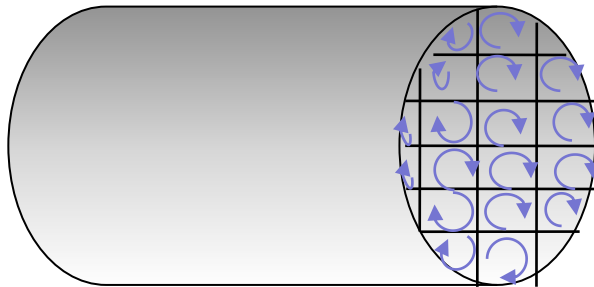
Pero: ¿Qué significa la imanación?

# Imanación M

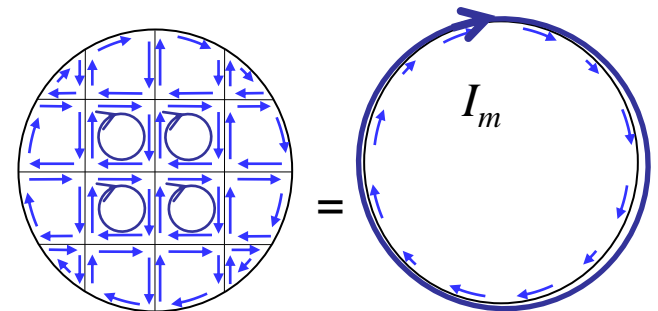
Nos podemos imaginar que el movimiento de los electrones en los átomos es equivalente a una corriente eléctrica  $I$  elemental



En el material cada átomo se puede sustituir para su estudio por su corriente elemental  $I$ .



La suma de todas esas corrientes elementales en pequeñas regiones del material de volumen  $dv$  se cancelan unas con otras, quedando solo una corriente resultante en la superficie del material denominada corriente de imanación  $I_m$ . Su relación con la imanación es:

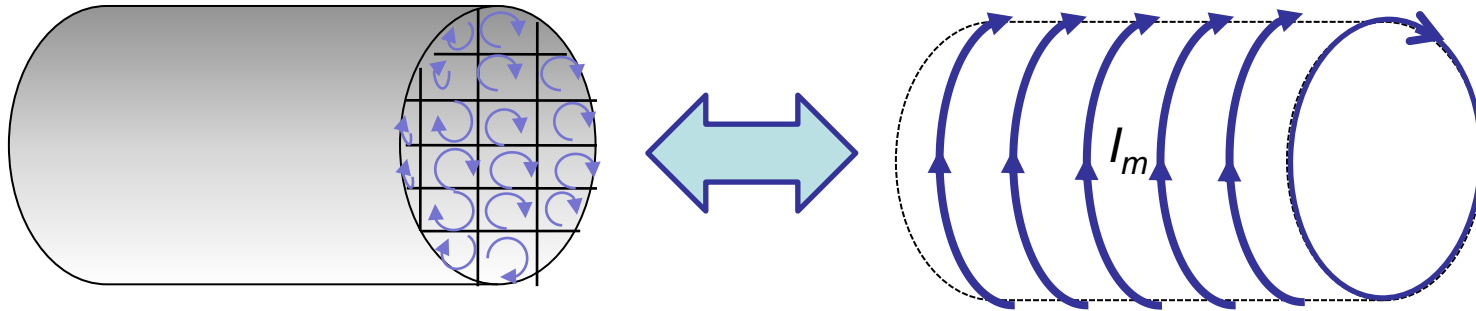


$$|\vec{M}| = \frac{|d\vec{m}|}{dv} = \frac{dI_m S}{S dl} \Rightarrow |\vec{M}| = \frac{dI_m}{dl}$$



# Imanación M

Luego, desde el punto de vista magnético, un material con sus átomos con un momento dipolar magnético es equivalente a un conjunto de corrientes de imanación  $I_m$



Esto es igual que un solenoide por el por cada espira circulara una corriente  $I_a$ . Por tanto el valor del campo magnético creado por el propio material imanado sería

$$B_m = \mu_0 n I_a = \mu_0 \frac{dN I_a}{dl} = \mu_0 \frac{dI_m}{dl} \Rightarrow B_m dl = \mu_0 dI_m$$

Aplicando la ley de Ampere obtendríamos que:

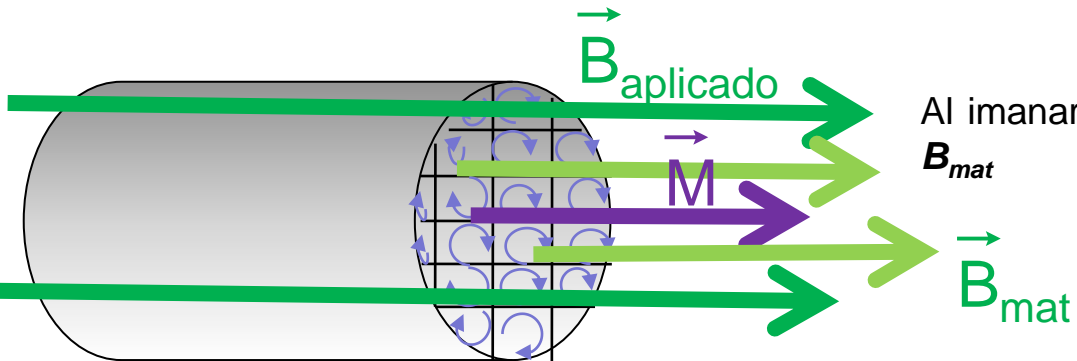
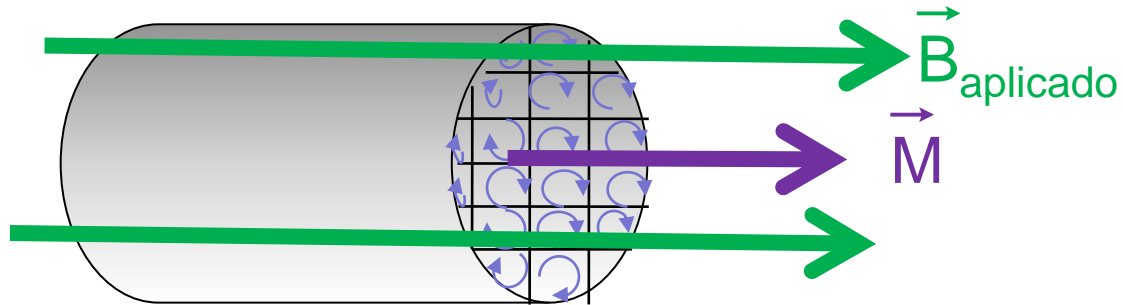
$$\oint \vec{B}_{mat} d\vec{l} = \mu_0 I_m$$

$$\oint \vec{M} d\vec{l} = I_m$$

El material crea un campo magnético propio  $B_{mat}$

# Imanación M

Cuando a un material magnético se le aplica un campo magnético externo  $\vec{B}_{aplicado}$  el material se imana:



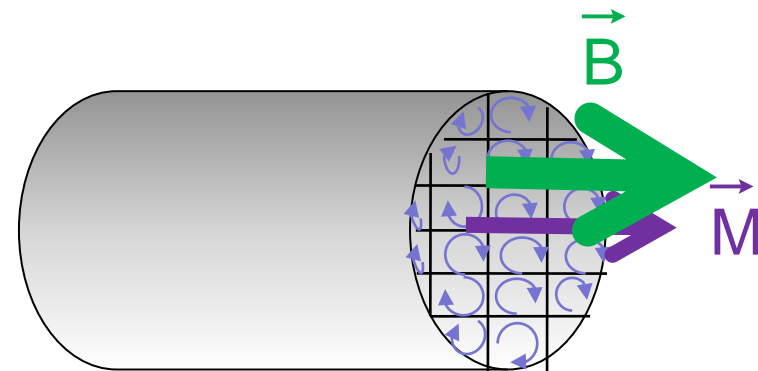
Al imanarse el material crea su propio campo magnético

$B_{mat}$

$\vec{B}_{mat}$

El campo total que se tiene, es la suma de los dos campos:

$$\vec{B} = \vec{B}_{mat} + \vec{B}_{aplicado}$$



# Imanación $M$

El comportamiento de los materiales en presencia de un campo magnético  $B$  puede ser muy complicado. En el caso de materiales homogéneos e isotropos que se comportan de forma lineal (“sencilla”) en presencia de un campo magnético se cumple que la relación entre el campo magnético aplicado  $B_{aplicado}$  y la imanación  $M$  es:

$$\vec{M} = \chi_m \frac{\vec{B}_{aplicado}}{\mu_0}$$

Siendo  $\chi_m$  una constante propia de cada material y que se denomina **susceptibilidad magnética del material**. Se define la **Permitividad magnética relativa** de un material como.

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

Se puede obtener experimentalmente como:

$$\mu_r = \frac{B_{material}}{B_{aplicado}}$$

La **Permitividad magnética** del material es

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

En general, (materiales no lineales o no isotropos) ni  $\chi_m$  ni  $\mu$  son constantes.

# Vector intensidad del campo magnético $H$

Dada la gran complejidad del comportamiento de los campos magnéticos  $\mathbf{B}$  en presencia de materiales, para simplificar su estudio se define el campo  $\mathbf{H}$  llamado intensidad del campo magnético. Al campo  $\mathbf{B}$  se le llama inducción magnética, para diferenciarlo claramente de  $\mathbf{H}$ .

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

Siendo  $\mathbf{B}$  el campo magnético total y  $\mathbf{M}$  la imanación. De esta forma la ley de Ampere en presencia de materiales magnéticos se reduce a:

$$\oint_C \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{conducción}}$$

Siendo  $I_{\text{conducción}}$  solo las corrientes de conducción y no tenemos en cuenta las complicadas corrientes de imanación. La inducción magnética  $\mathbf{B}$  es por tanto:

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

*Esto último solo si el material es lineal, isótropo y homogéneo*

¿En qué unidades se mide  $\mathbf{H}$  y  $\mathbf{M}$ ?

$$[H]; [M] \triangleleft \frac{A}{m}$$

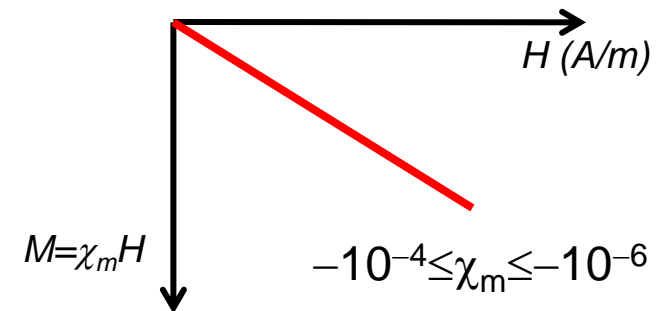
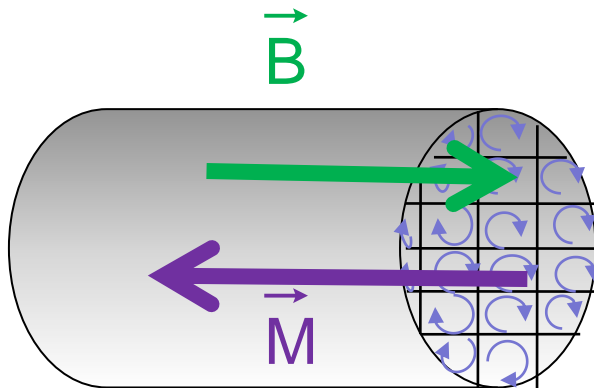
# Tipos de materiales magnéticos diamagnéticos

El comportamiento de los materiales en presencia de campos magnéticos es muy variado. Los materiales diamagnéticos son aquellos que en presencia de un campo magnético experimentan una fuerza de repulsión. Estos materiales suelen interaccionar con poca intensidad con el campo magnético, por lo que la fuerza de repulsión no suele ser grande. Para un campo aplicado de unos 3 T la fuerza de repulsión típica es  $10^{-5} - 10^{-2}$  N/gr

Los materiales diamagnéticos cumplen que

$$\chi_m < 0$$

El material se imana en el sentido contrario al campo aplicado.



Algunos valores de  $\chi_m$

Au:  $-3,6 \times 10^{-5}$       H<sub>2</sub>O

Cu:  $-9,8 \times 10^{-5}$

Ag:  $-2,6 \times 10^{-5}$

Pb:

Hg:

Si:

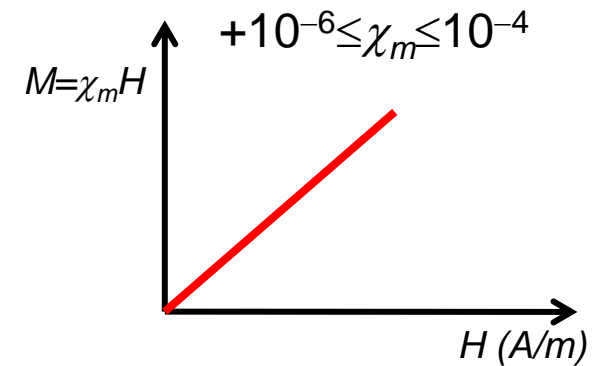
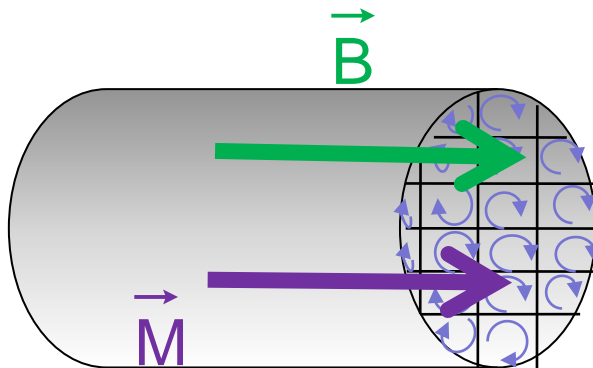
# Tipos de materiales magnéticos paramagnéticos

Los materiales paramagnéticos son aquellos que en presencia de un campo magnético experimentan una fuerza de atracción. Para un campo aplicado de unos 3 T la fuerza de atracción típica es  $10^{-6} - 10^{-1}$  N/gr. En estos materiales el campo magnético total es siempre mayor que el campo aplicado.

Los materiales diamagnéticos cumplen que

$$\chi_m > 0$$

El material se imana en el sentido del campo aplicado.



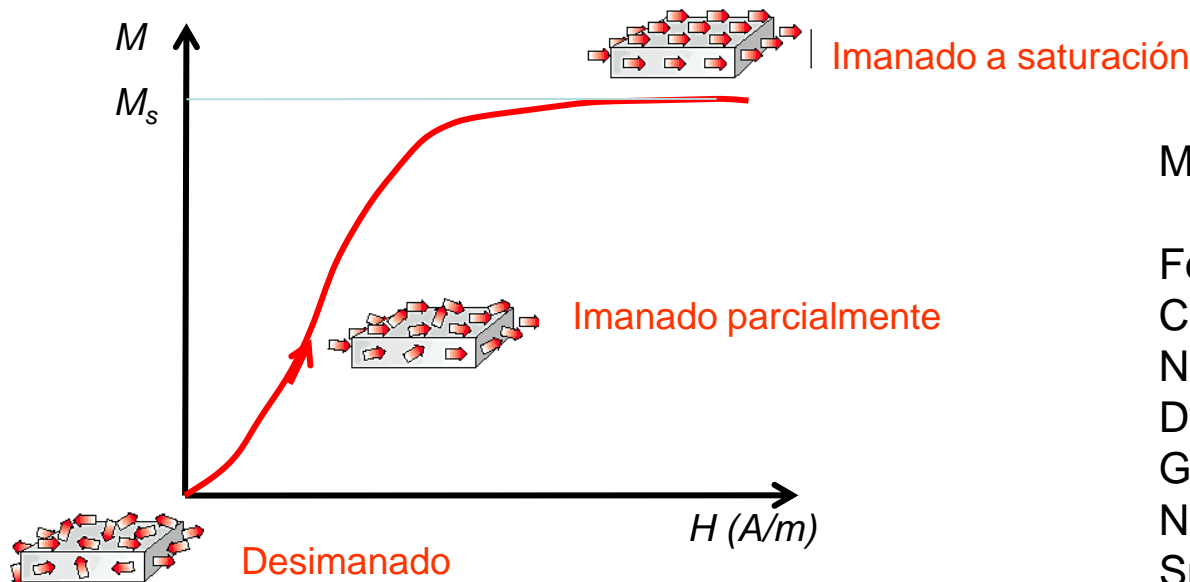
Algunos valores de  $\chi_m$

	$\chi_m$
Al:	$2,3 \times 10^{-5}$
Mg:	$1,2 \times 10^{-5}$
Nb:	$2,6 \times 10^{-4}$
W:	$6,8 \times 10^{-5}$
Ca, Li, O <sub>2</sub>	

# Tipos de materiales magnéticos ferromagnéticos

Los materiales ferromagnéticos interactúan fuertemente con el campo magnético, entre ellos se encuentran los imanes naturales. Para un campo aplicado las fuerzas de interacción pueden ser atractivas o repulsivas (antiferromagnéticos) y tener valores muy grandes.

Su  $\chi_m$  es muy grande, puede ser  $\sim 10^5$  y no presenta un valor constante, siendo su comportamiento complicado y dependiente del campo aplicado.



## Materiales ferromagnéticos

	$T_c$ (°C)	$\chi_m a^{(0,002 T)}$
Fe	770	5500
Co	1120	
Ni	358	
Dy	188	
Gd	16	
Nd		
Sm	-258	

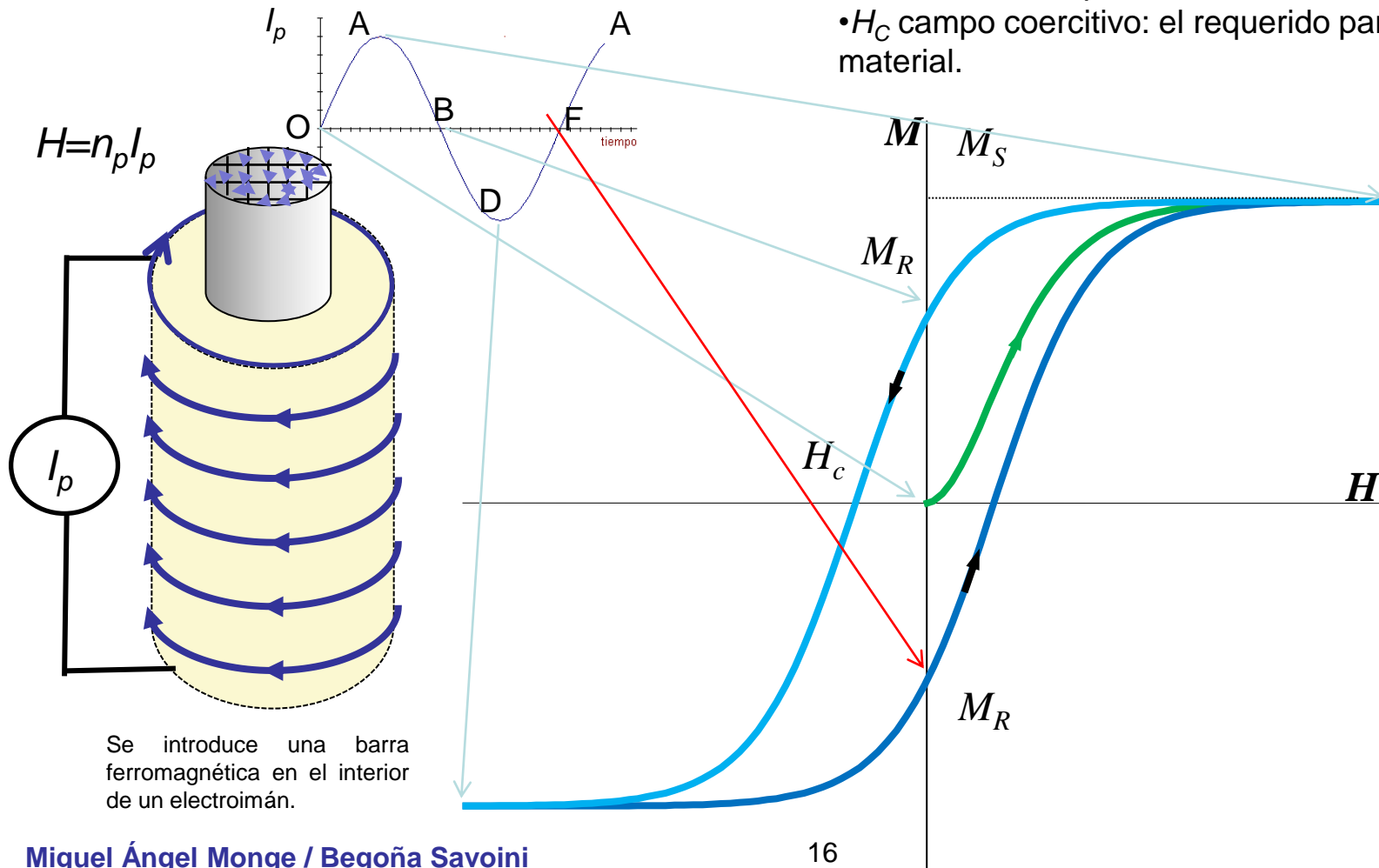
Como se ve en la figura la relación entre  $M$  y  $\chi_m H$  no es lineal.

Los materiales ferromagnéticos presentan una temperatura, conocida como temperatura de Curie, por encima de la cual dejan de ser ferromagnéticos.

# Tipos de materiales magnéticos ferromagnéticos

Ciclo de histéresis de un material ferromagnético:

- $M_S$  imanación de saturación: máxima imanación.
- $M_R$  imanación remanente: imanación del material en ausencia de campo externo.
- $H_C$  campo coercitivo: el requerido para desimanar el material.



Se introduce una barra ferromagnética en el interior de un electroimán.