

# Física II

## Segunda parte: Magnetismo

Dr. Mario Enrique Álvarez Ramos(Responsable)

Dr. Roberto Pedro Duarte Zamorano

Dr. Ezequiel Rodríguez Jáuregui

Dr. Santos Jesús Castillo

Webpage: <http://paginas.fisica.uson.mx/qb>

©2017 Departamento de Física

Universidad de Sonora

# Tema 7: Propiedades magnéticas de la materia.

- i. Dipolo magnético.
- ii. Magnetismo atómico y nuclear.
- iii. Magnetización.
- iv. Materiales magnéticos: Paramagnetismo, diamagnetismo, ferromagnetismo, curva de histéresis.
- v. Efectos de la temperatura sobre el ferromagnetismo.
- vi. Magnetismo de los planetas.

# Propiedades magnéticas de la materia

Hasta ahora hemos considerado campos magnéticos en el **vacío**, es decir  $\mathbf{B}$  generado por corrientes eléctricas:

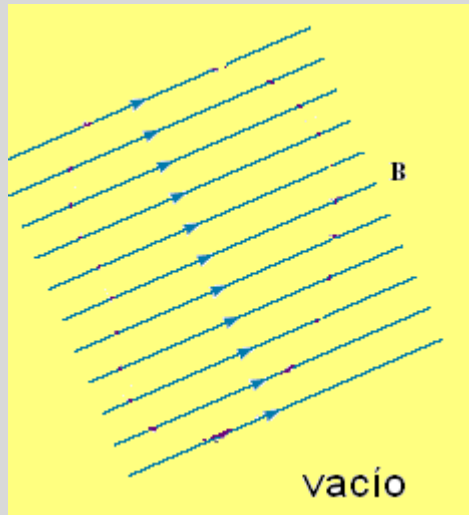
- Ley de Ampere

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I$$

- Ley de Biot-Savat

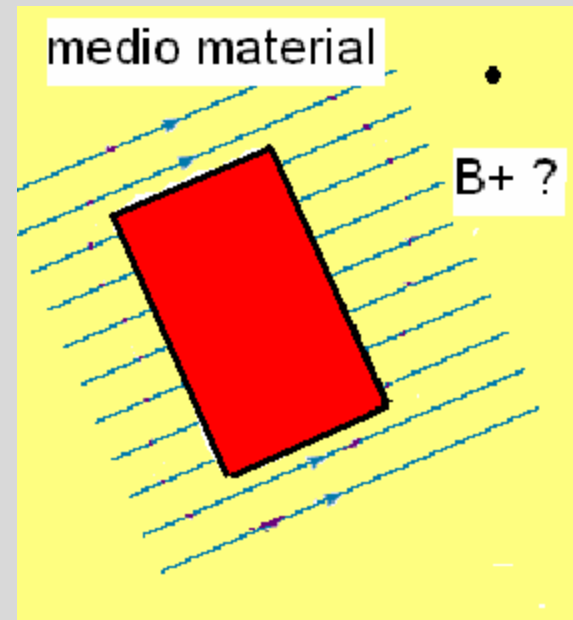
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

- Campo B debido a corrientes eléctricas



$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

- Campo total : B + campo debido al medio material

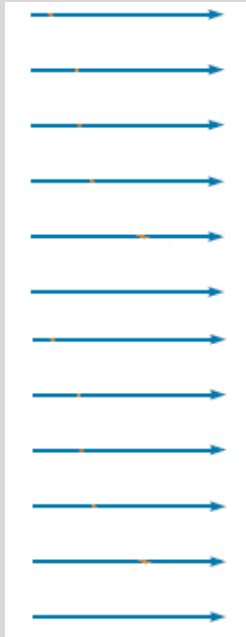


$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

campo adicional

Sea  $\mathbf{B}_o$  al campo debido a corrientes eléctricas

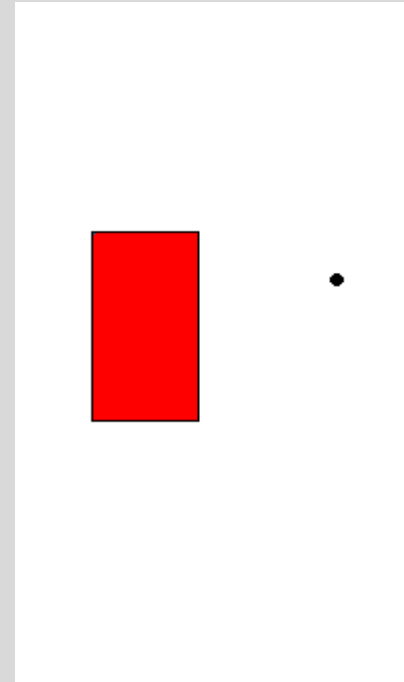
$$\mathbf{B}_o \neq 0$$



Campo magnético total

$$\mathbf{B}_t \neq 0$$

medio material en ausencia de campo magnético externo



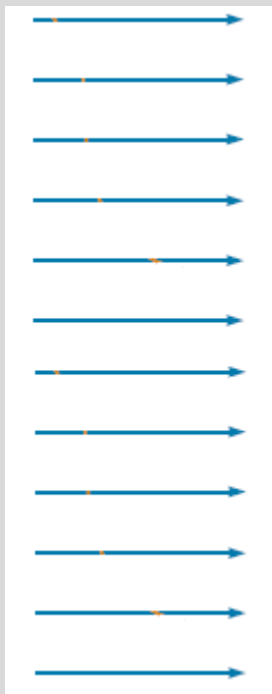
$$\mathbf{B}_o = 0$$

Campo magnético total

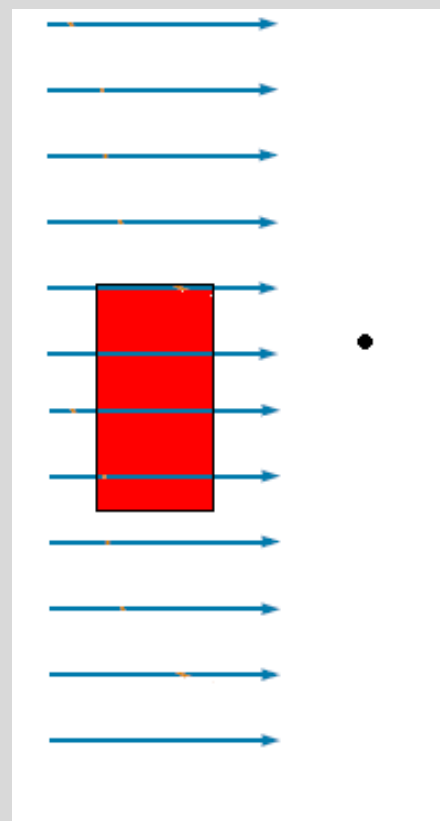
$$\mathbf{B}_t = 0$$

$$\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_m$$

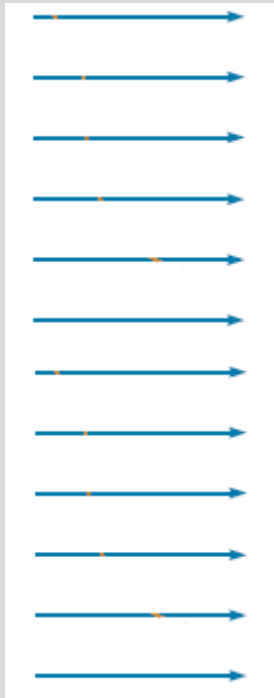
- $\mathbf{B}_o$



- $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_m \neq \mathbf{B}_o$



De tal forma que:  $\mathbf{B}_t - \mathbf{B}_o = \mathbf{B}_m$

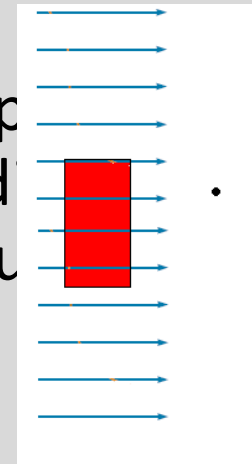


Donde  $\mathbf{B}_m$  es el campo magnético debido al medio material “sumergido” en un campo inicial  $\mathbf{B}_o$ .

$$\gamma \mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$$

donde

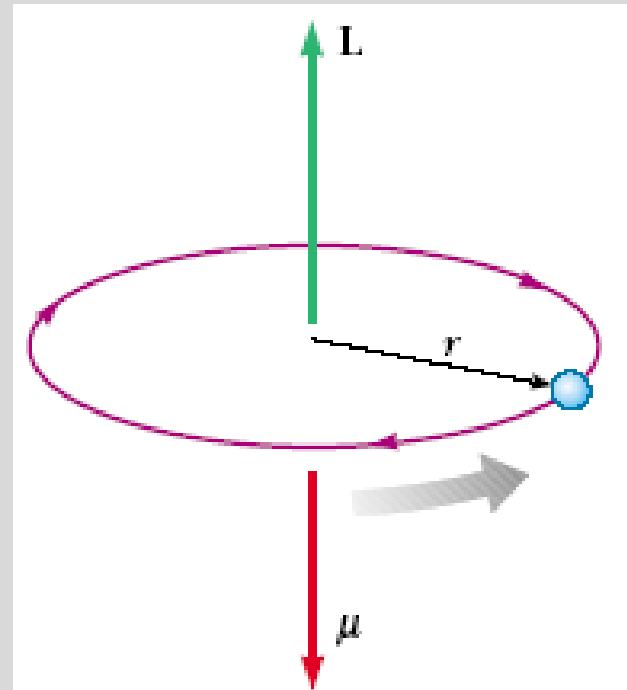
$\mathbf{M}$  es la magnetización



# Magnetización

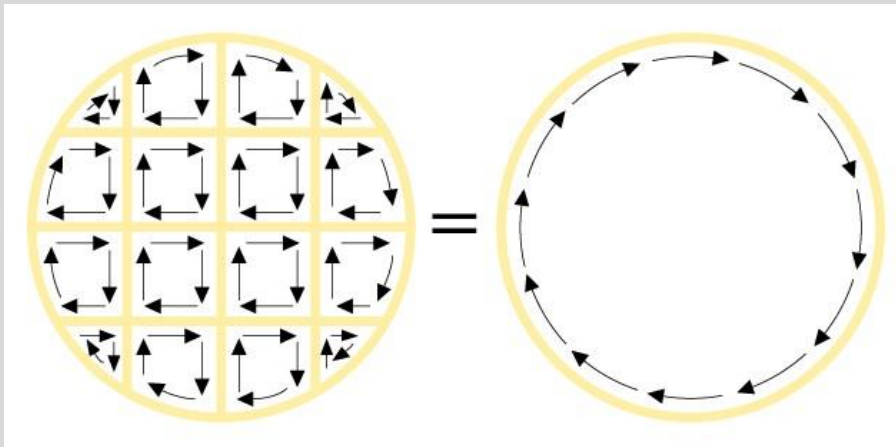
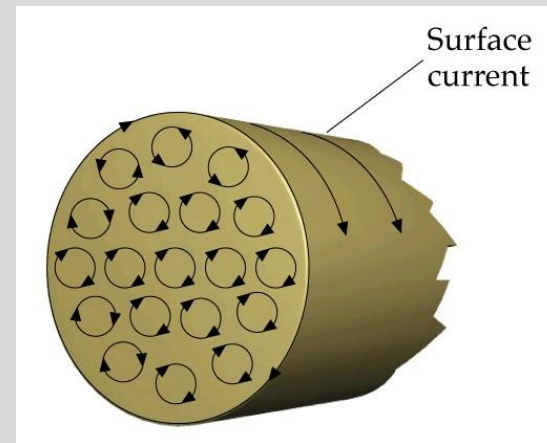
imaginemos que cada átomo del medio material es un “circuito” de corriente

$$\mu = IA$$





- En un material con momento magnético aparecen corrientes microscópicas.
- Se crea una corriente superficial de carga



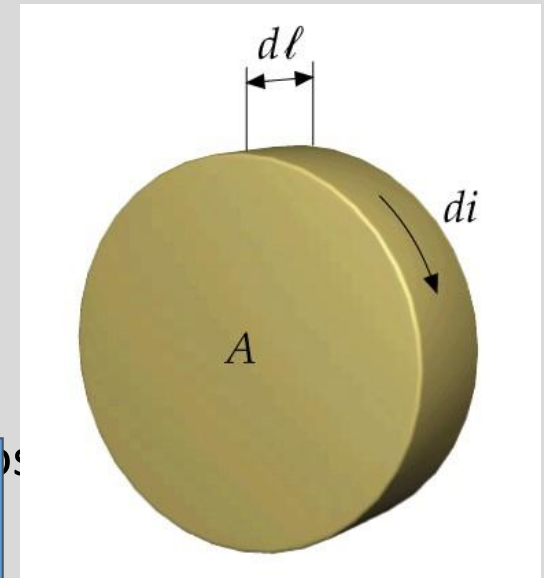
En el interior la corriente es nula

- Magnetización: Momento dipolar magnético por unidad de volumen

- Corriente  $M = \frac{dm^{\rho}}{dVol}$  por unidad de longitud

$$dm^{\rho} = di A$$

$$dVol = A dl$$

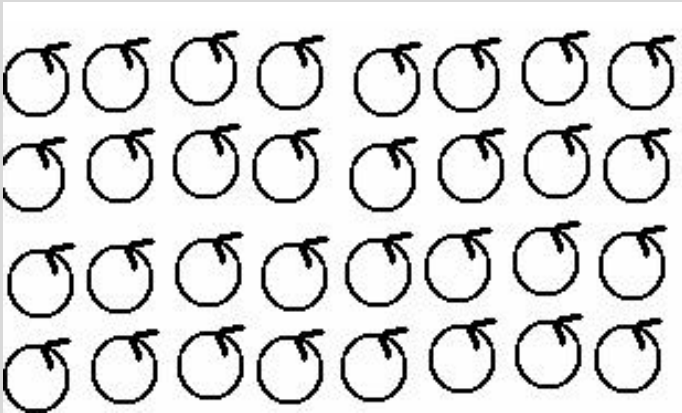


- Magnetización de saturación  $\rightarrow$  Todos los dipolos están alineados
  - $n = n^{\circ}$  moléculas por unidad de volumen

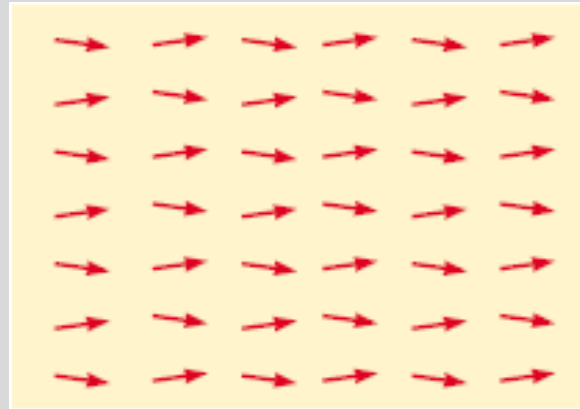
$$M = \frac{di}{dl}$$

$$M_s^{\rho} = n m^{\rho}$$

- Circuitos “atomicos”



- Momentos atómicos



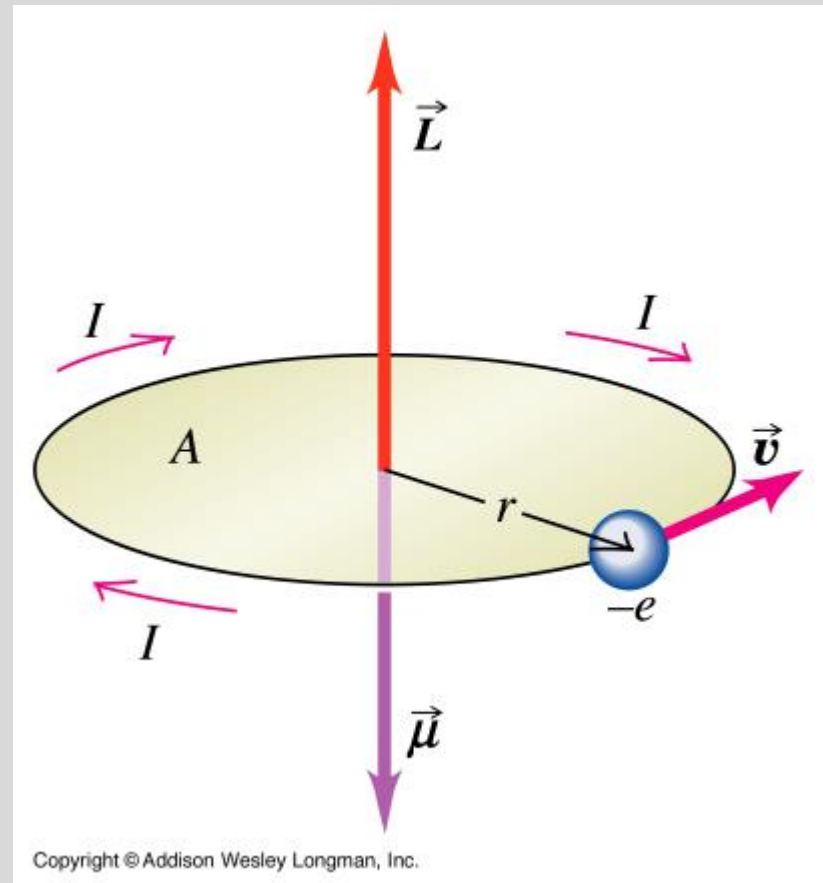
- Electrón girando en torno a un núcleo

## Momento magnético

$$m = IA = -e v (\pi r^2) = \frac{-e \eta L}{2m \eta}$$

$$\frac{\rho}{m} = -\mu_B \frac{L}{\eta} \quad \text{Magnetón de Bohr}$$

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ Am}^2$$



- El electrón tiene además momento interno (espín)
- Momento magnético total

$$\vec{m} = -\mu_B \left( \frac{\vec{L}}{\hbar} + \gamma \frac{\vec{S}}{\hbar} \right)$$

Factor giromagnético  $\gamma$   
para electrones  $-2.0024$

- Los átomos
  - Crean campos magnéticos.
  - Pueden tener momentos dipolares inducidos.
  - Se orientan según el campo magnético.

- La magnetización  $\mathbf{M}$  de material depende del campo  $\mathbf{B}_o$  y por lo tanto  $\mathbf{B}_t$ .
- ya que  $\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_m$
- Por otra parte como  $\mathbf{B}_m = \mu_0 \mathbf{M}$  es posible expresar

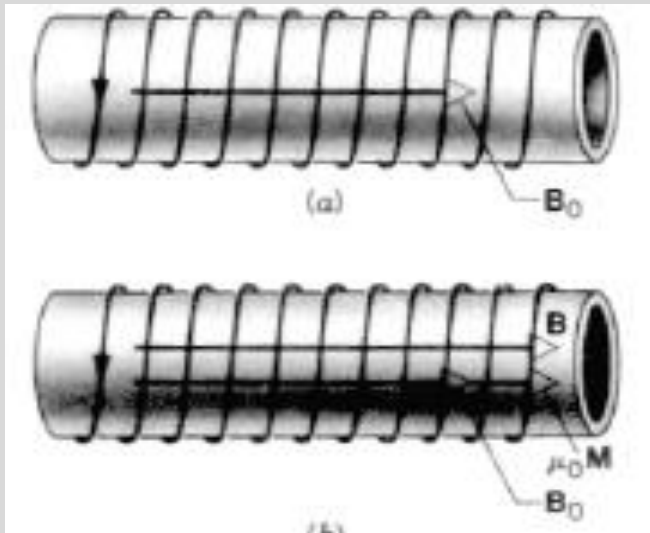
$$\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_o + \mu_0 \mathbf{M}$$

# Campo Intensidad magnética $H$

- De forma que al campo total  $B_t$  se puede expresar como :

$$B_t = \mu_0(H + M)$$

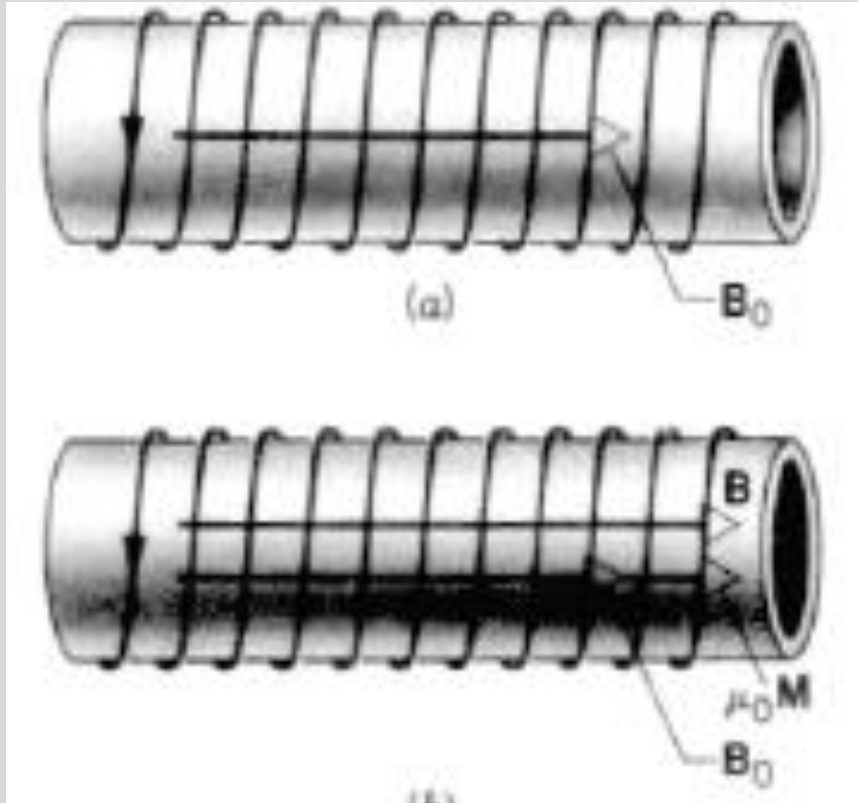
- Las unidades de  $H$  y  $M$  son Ampere-metro



- Es decir  $H$  es la contribución al campo total debida **solo** a las corrientes eléctricas, exista o no medio material, en ambos casos la magnitud del campo  $H = ni$

- Las unidades de  $H$  y  $M$  son Ampere-metro

Es decir



- $B_t = \mu_0 H$

ya que  $M = 0$

y La magnitud de  $H = nI$

- $B_t = \mu_0(H + M)$

y la magnitud de  $H = nI$

- Las unidades de  $H$  y  $M$  son Ampere-metro



# Clasificación de los materiales

- La magnetización depende del campo externo (corrientes eléctricas)
- Donde  $\chi$  es la susceptibilidad magnética

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) = \mu_0(1 + \chi) \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_m \mathbf{H}$$

- Donde

$$\mu_m = \mu_0(1 + \chi)$$

es la permeabilidad magnética

- Los materiales se clasifican dependiendo del valor de

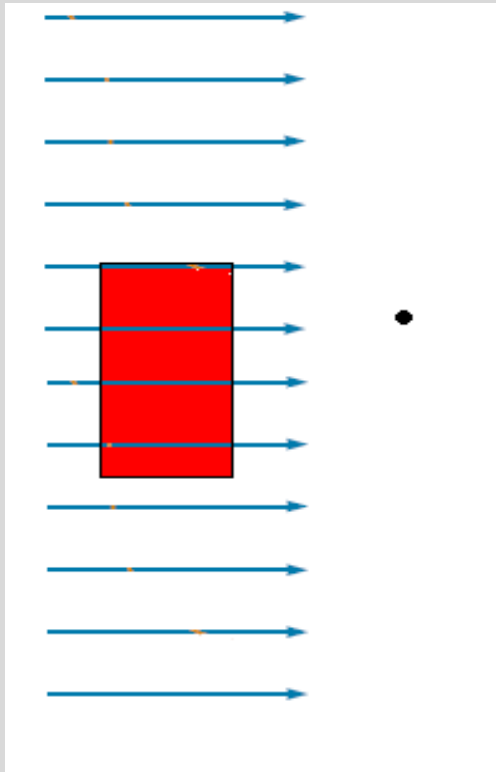
$\mu_m$  :

Paramagnetic       $\mu_m > \mu_0$

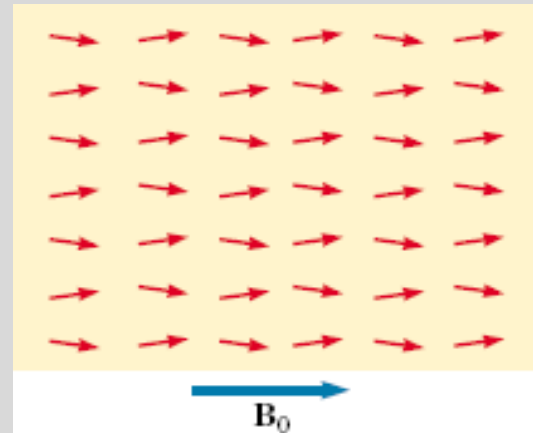
Diamagnetic       $\mu_m < \mu_0$

# Paramagnéticos

$$\chi > 0$$
$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$



La magnetización es en la dirección del campo  $\mathbf{H} = \mathbf{B}_0/\mu_0$



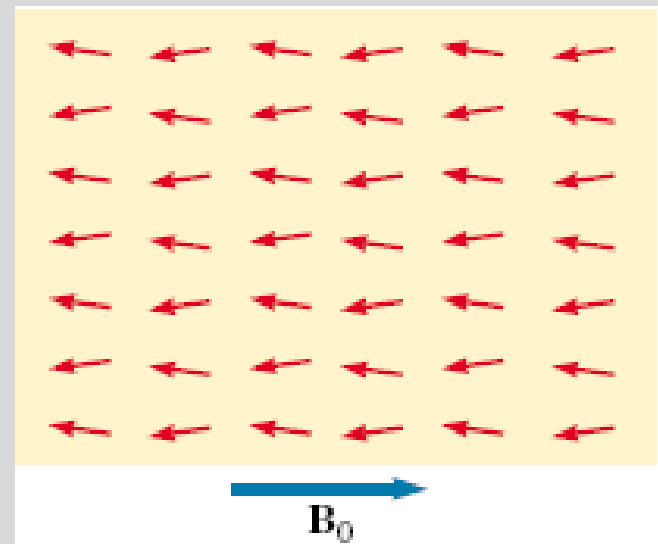
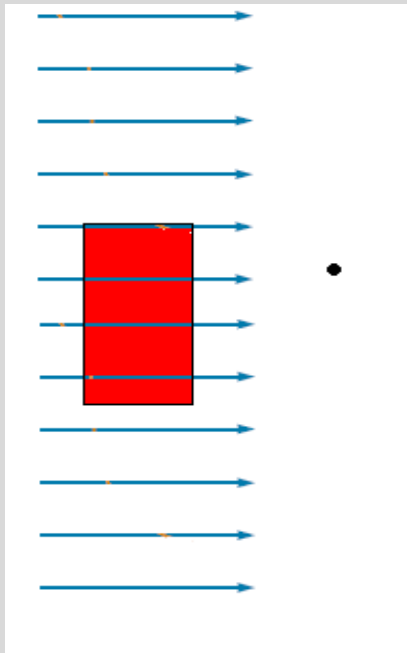
# Diamagnéticos

$$\chi < 0$$

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

La magnetización es en dirección contraria al campo

$$\mathbf{H} = \mathbf{B}_0 / \mu_0$$

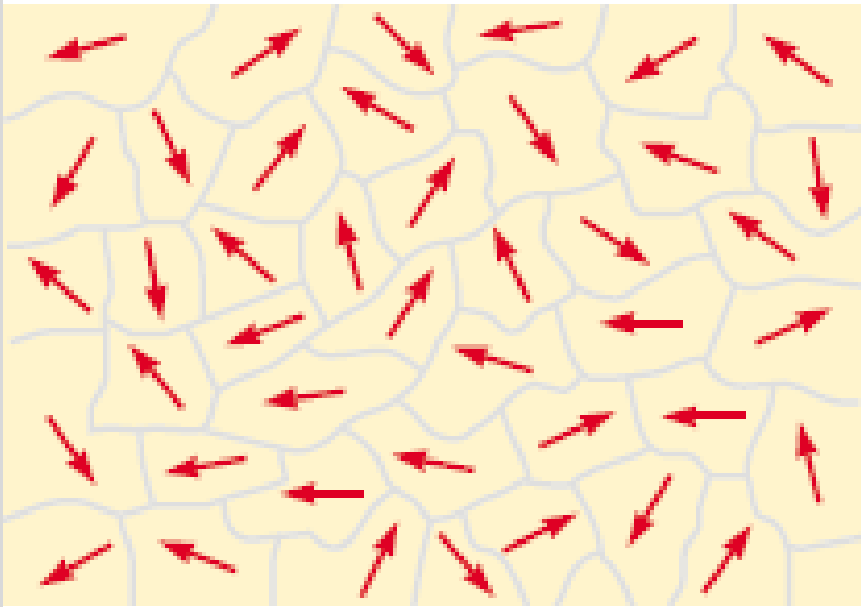


## Magnetic Susceptibilities of Some Paramagnetic and Diamagnetic Substances at 300 K

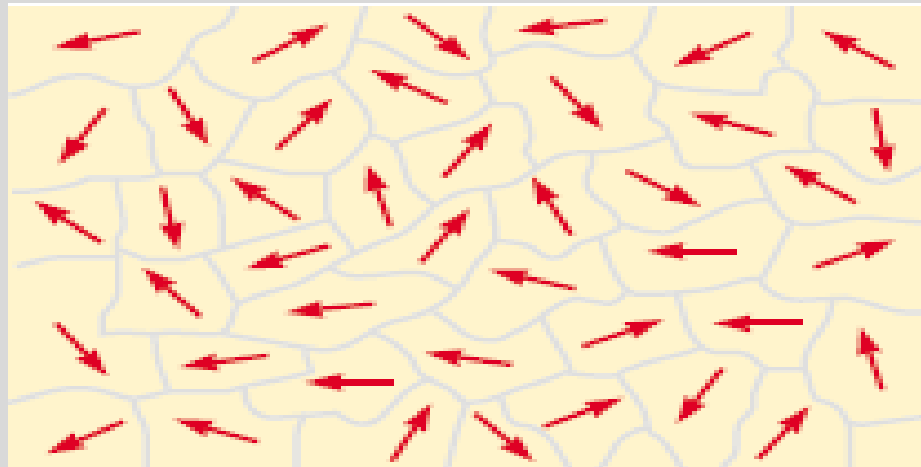
Paramagnetic Substance	$\chi$	Diamagnetic Substance	$\chi$
Aluminum	$2.3 \times 10^{-5}$	Bismuth	$-1.66 \times 10^{-5}$
Calcium	$1.9 \times 10^{-5}$	Copper	$-9.8 \times 10^{-6}$
Chromium	$2.7 \times 10^{-4}$	Diamond	$-2.2 \times 10^{-5}$
Lithium	$2.1 \times 10^{-5}$	Gold	$-3.6 \times 10^{-5}$
Magnesium	$1.2 \times 10^{-5}$	Lead	$-1.7 \times 10^{-5}$
Niobium	$2.6 \times 10^{-4}$	Mercury	$-2.9 \times 10^{-5}$
Oxygen	$2.1 \times 10^{-6}$	Nitrogen	$-5.0 \times 10^{-9}$
Platinum	$2.9 \times 10^{-4}$	Silver	$-2.6 \times 10^{-5}$
Tungsten	$6.8 \times 10^{-5}$	Silicon	$-4.2 \times 10^{-6}$

# Ferromagnéticos

Son materiales no-lineales  $M = \chi(\mathbf{H}) \mathbf{H}$ ,  
 $\chi$  no es una constante, es función de  $\mathbf{H}$

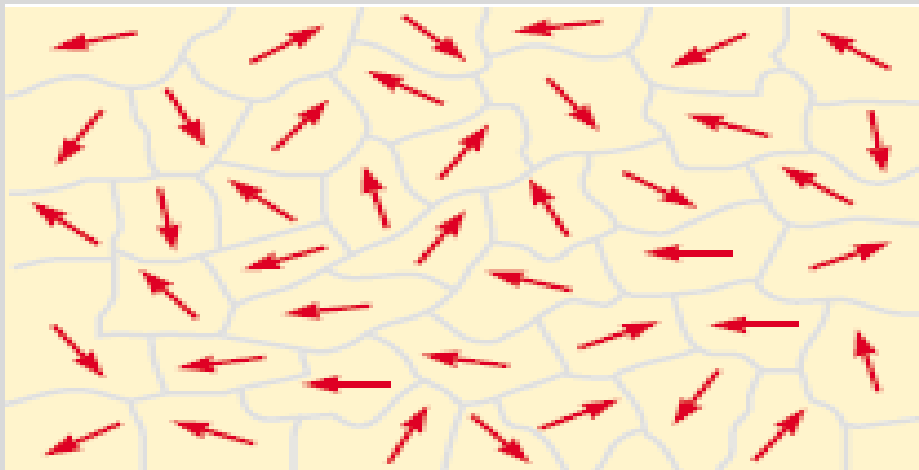


- Poseen magnetización permanente, entre ellos el Hierro, Níquel, Disproseo, etc.
- Pueden agruparse un conglomerado del orden de  $10^{17}$  a  $10^{21}$  átomos, formando dominios ferromagnéticos cuyas dimensiones oscilan entre  $10^{-12}$  a  $10^{-8}$  m<sup>3</sup>



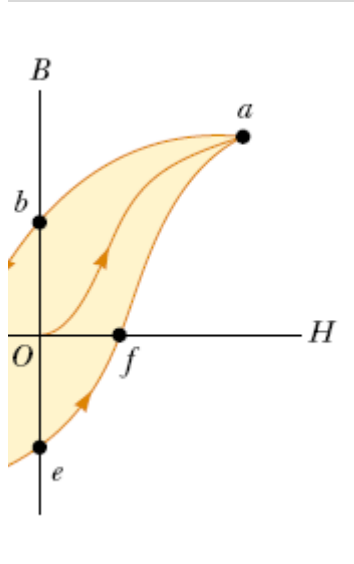
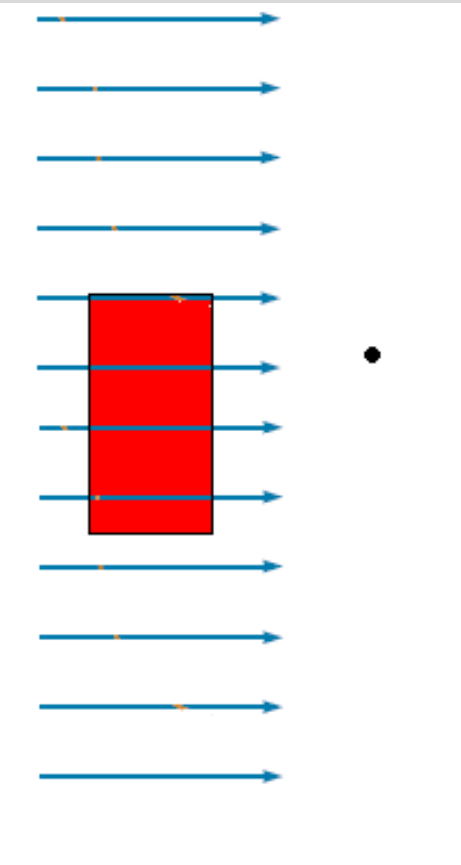
# Como se comporta un ferromagnético

- Supongamos que inicialmente el trozo de material ferromagnético inicialmente no muestra ninguna propiedad magnética y lo sometemos a un campo **H**



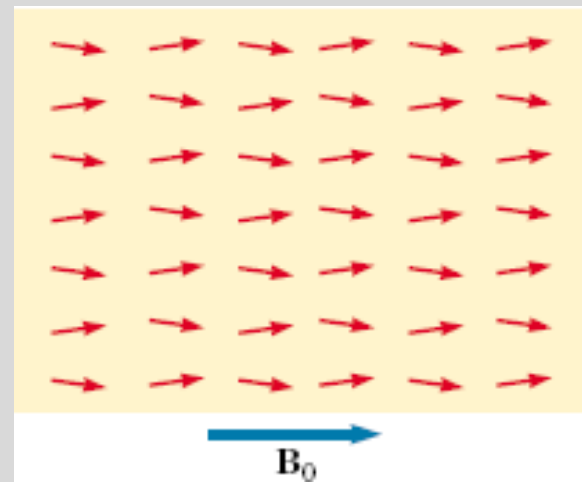
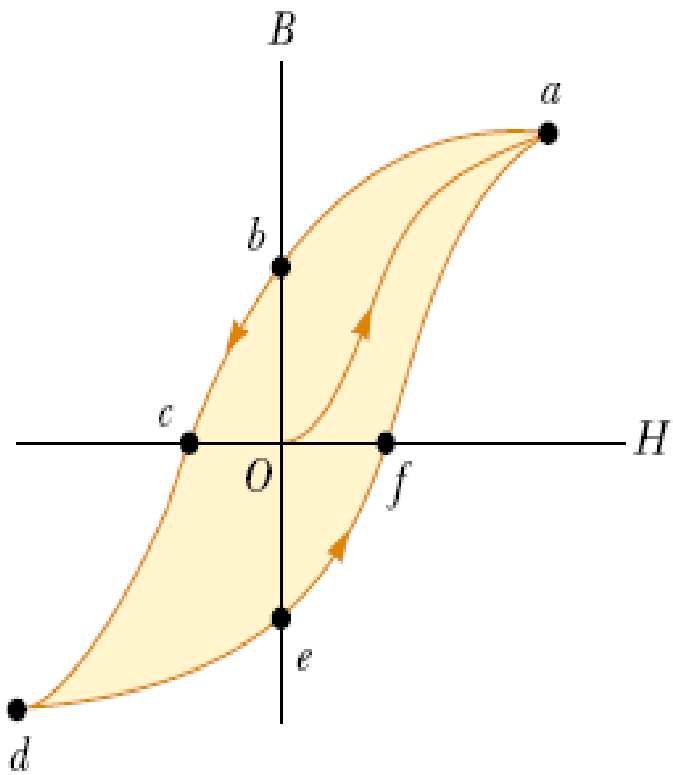


- Dado que  $\mathbf{M} = (\mathbf{B}_t - \mathbf{H})/\mu_0$
- Es posible “minitorear” la magnetización via la grafica de  $\mathbf{B}_t$  vs  $\mathbf{H}$ , a medida que  $\mathbf{H}$  se incrementa desde cero a una valor dado.
- Esta grafica se conoce como curva de Histéresis

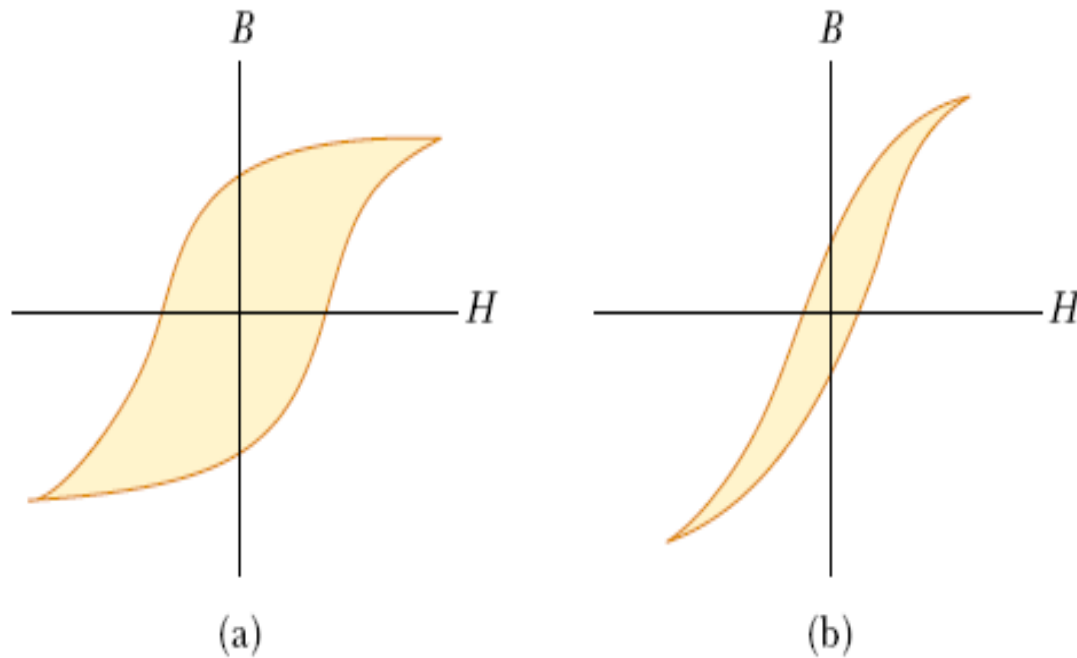


# Comportamiento de M

- De 0  $\rightarrow$   $a$

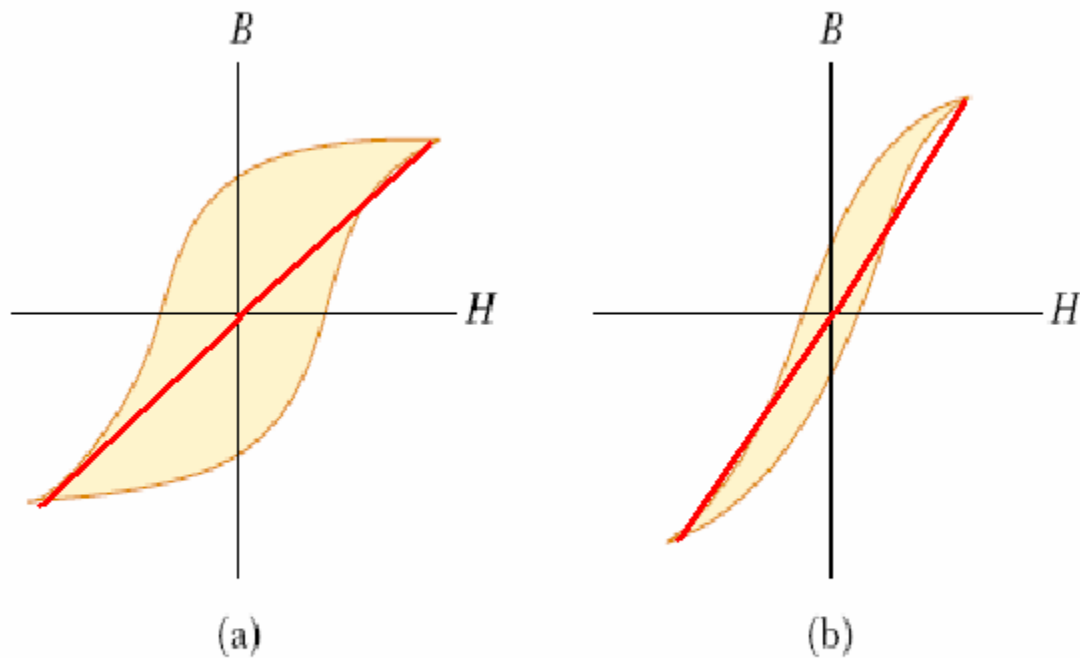


# Curvas de Histéresis



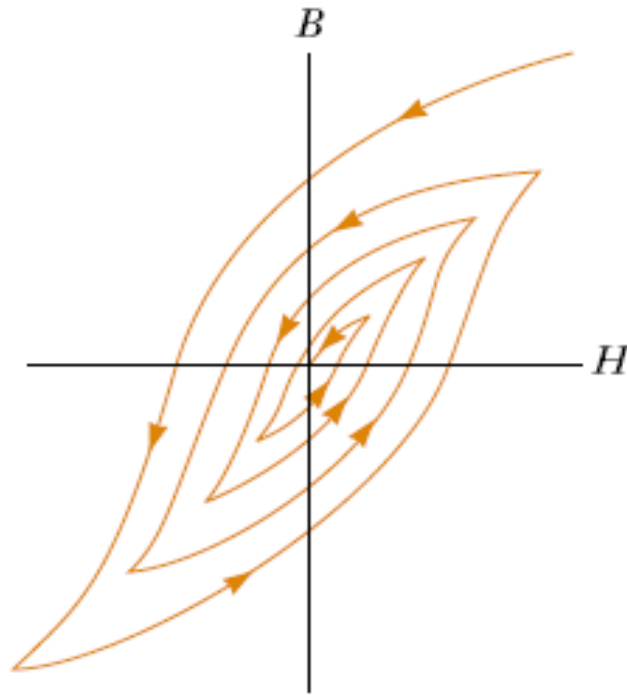
**Figure 30.31** Hysteresis loops for (a) a hard ferromagnetic material and (b) a soft ferromagnetic material.

# Curvas de Histéresis comprada con la linealidad



**Figure 30.31** Hysteresis loops for (a) a hard ferromagnetic material and (b) a soft ferromagnetic material.

# Curva de Histéresis para desmagnetizar un ferromagnético



**Figure 30.32** Demagnetizing a ferromagnetic material by carrying it through successive hysteresis loops.