

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:

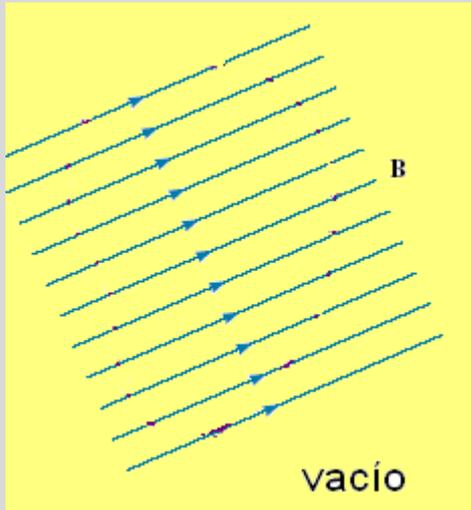
- Ley de Ampere

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

- Ley de Biot-Savat

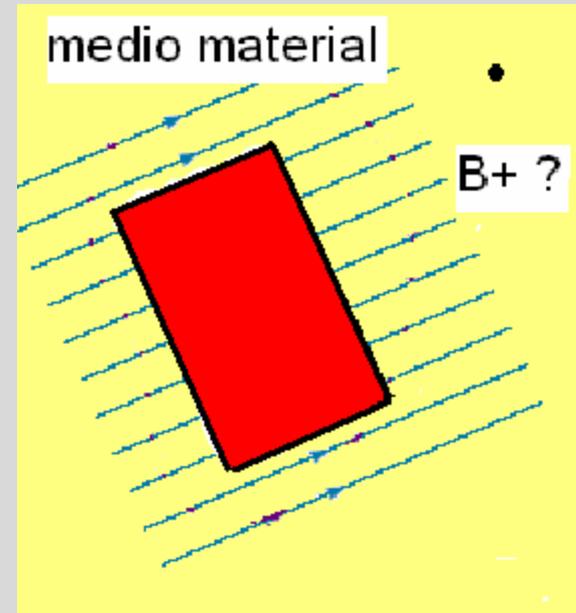
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

- 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

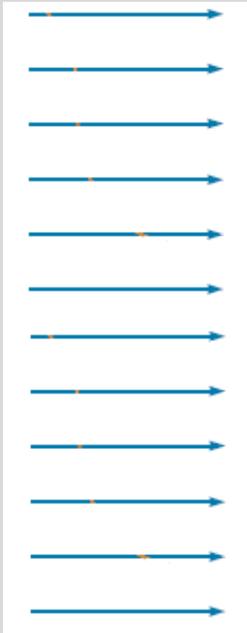


$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{s} \times \hat{\mathbf{r}}}{r^2}$$

campo adicional

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

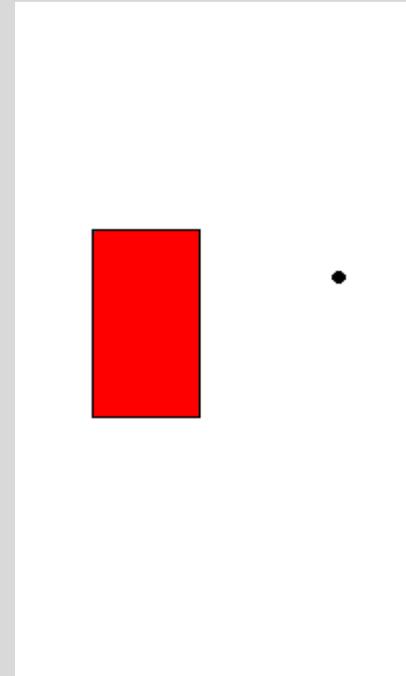
$$\mathbf{B}_o \neq 0$$



Campo magnético total

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

medio material en ausencia de campo magnético externo



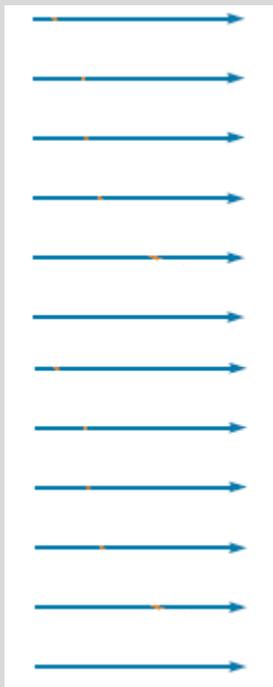
$$\mathbf{B}_o = 0$$

Campo magnético total

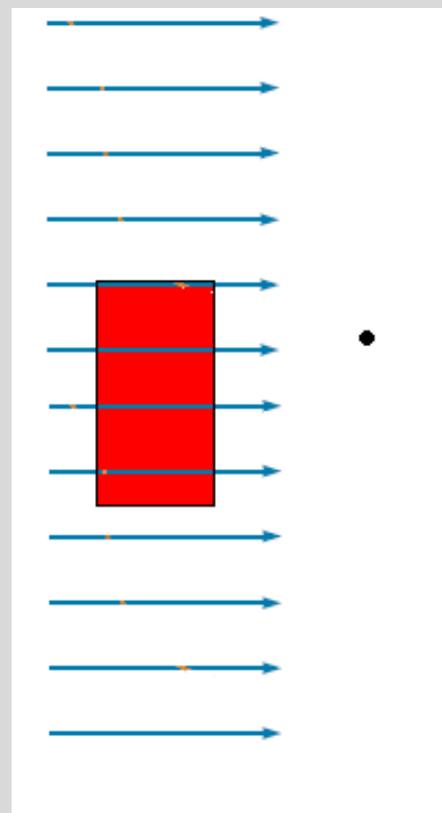
$$\mathbf{B}_t = 0$$

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

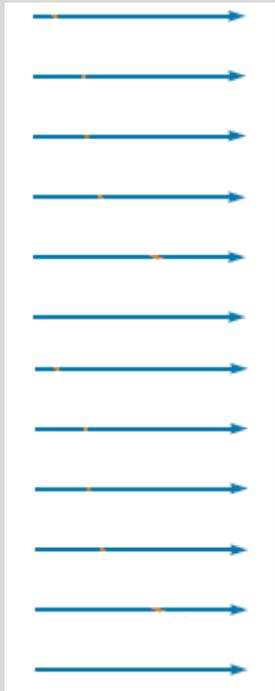
- \mathbf{B}_o



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



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

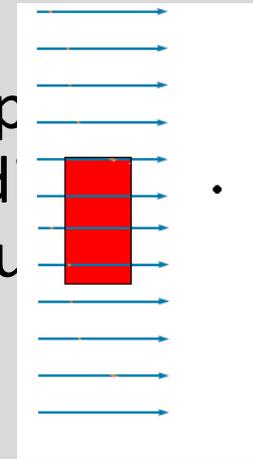


Donde \mathbf{B}_m es el campo magnético debido al medio material “sumergido” en un campo inicial \mathbf{B}_o .

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

donde

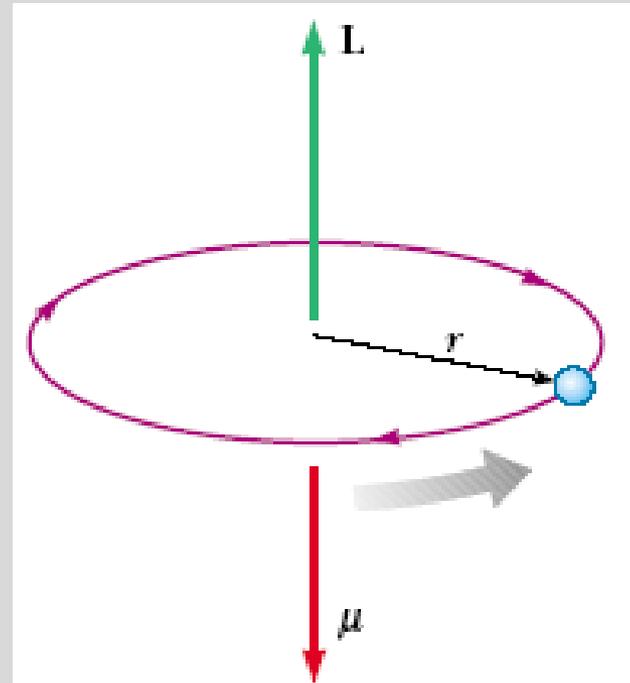
\mathbf{M} es la magnetización



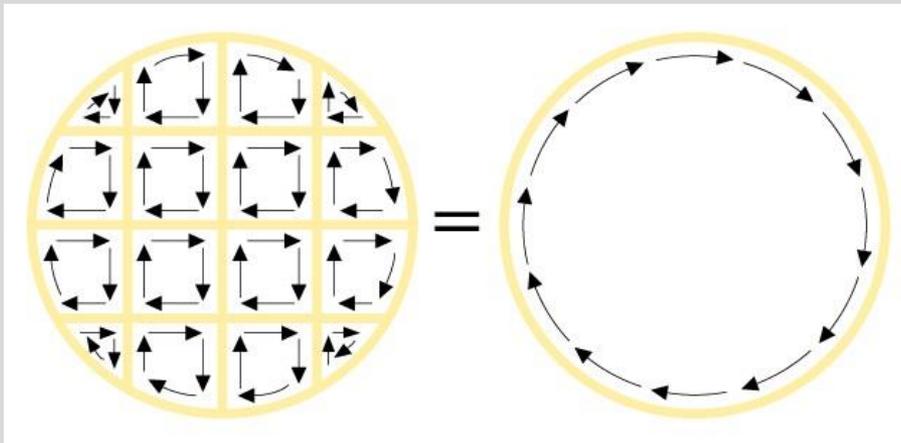
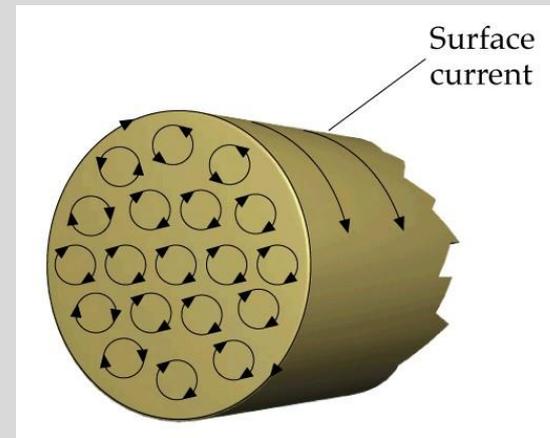
Magnetización

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



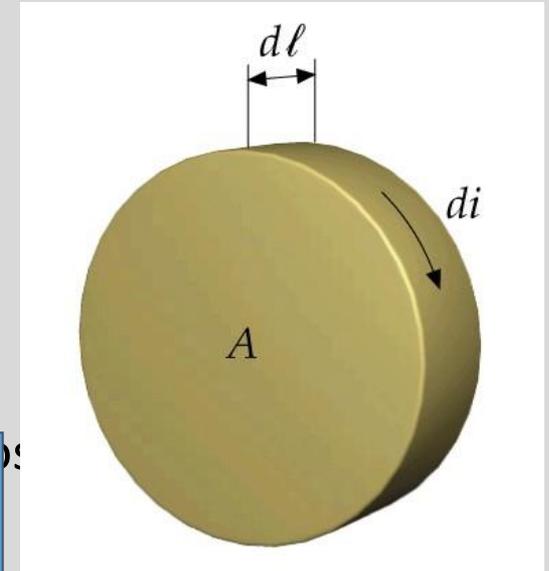
En el interior la corriente es nula

- Magnetización: Momento dipolar magnético por unidad de volumen

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

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

$$dVol = A dl$$

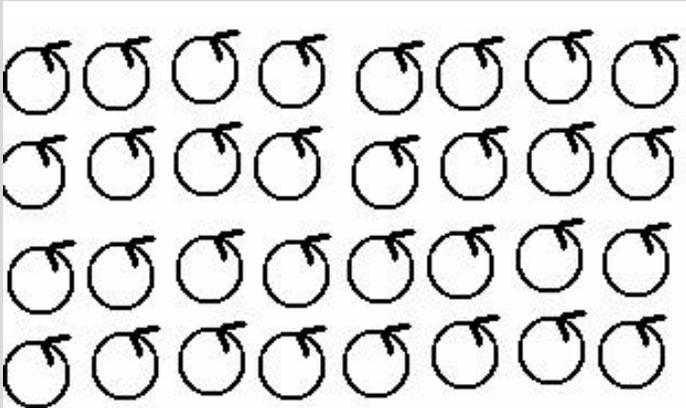


- Magnetización de saturación \rightarrow Todos los dipolos están alineados
 - $n = n^{\circ}$ moléculas por unidad de volumen

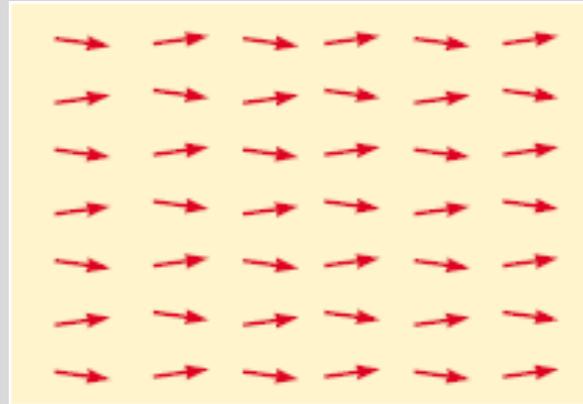
$$M = \frac{di}{dl}$$

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

- Circuitos “atomicos”



- Momentos atómicos



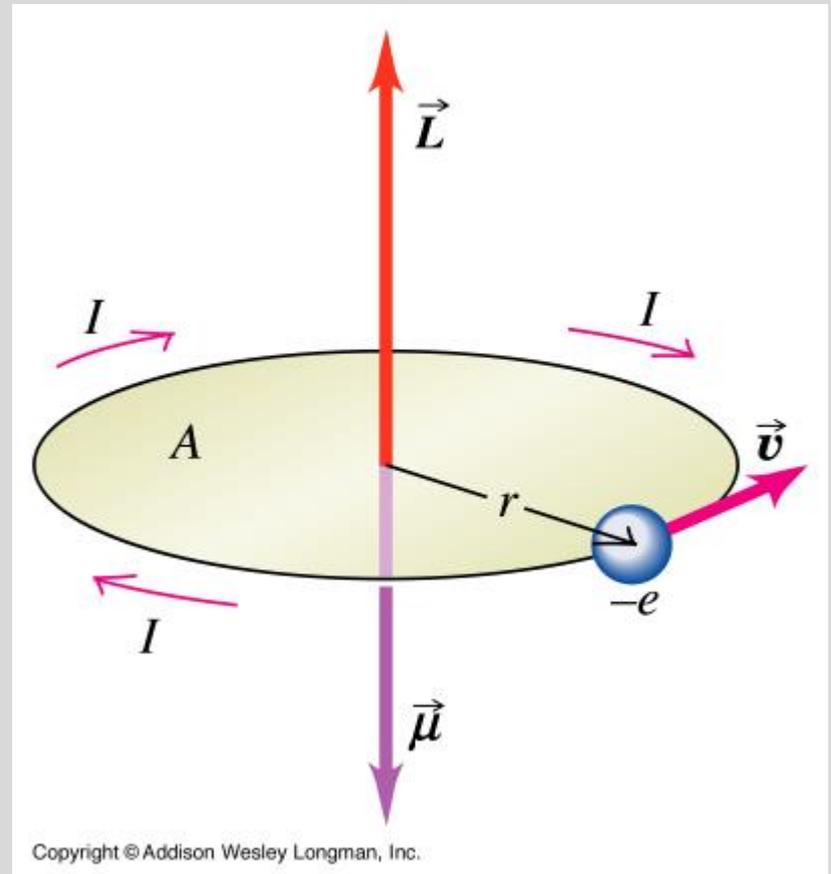
- Electrón girando en torno a un núcleo

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 γ
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

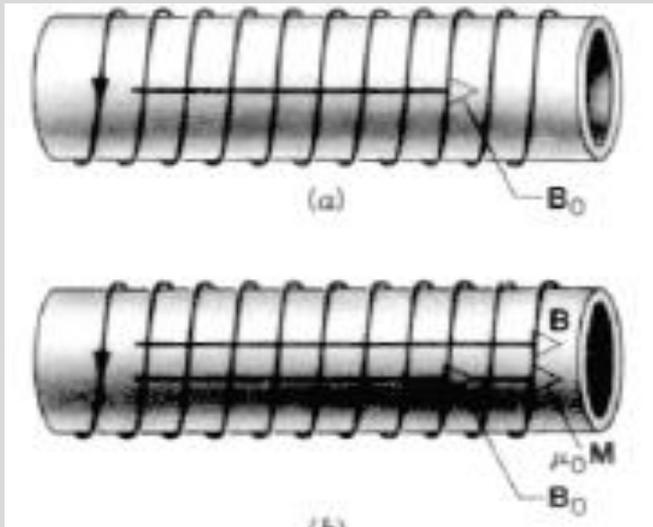
$$\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_o + \mu_0 \mathbf{M}$$

Campo Intensidad magnética H

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

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

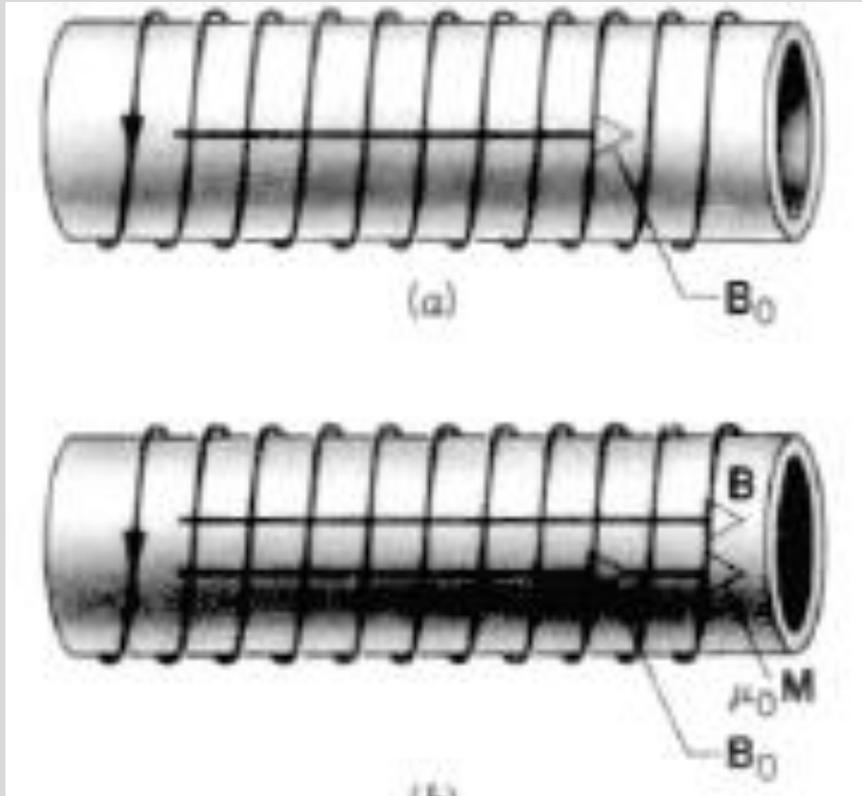
- Las unidades de H y M son Ampere-metro



- 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 χ 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

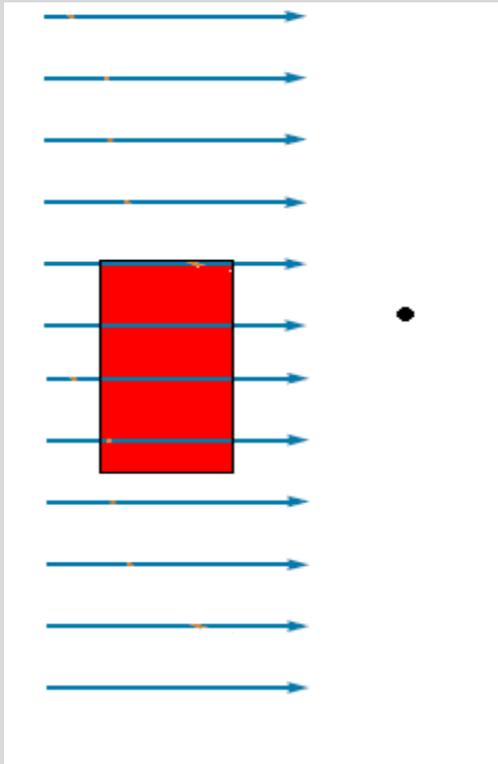
μ_m :

Paramagnetic $\mu_m > \mu_0$

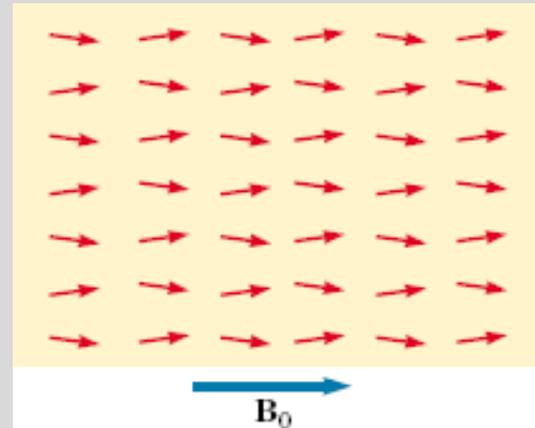
Diamagnetic $\mu_m < \mu_0$

Paramagnéticos

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



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



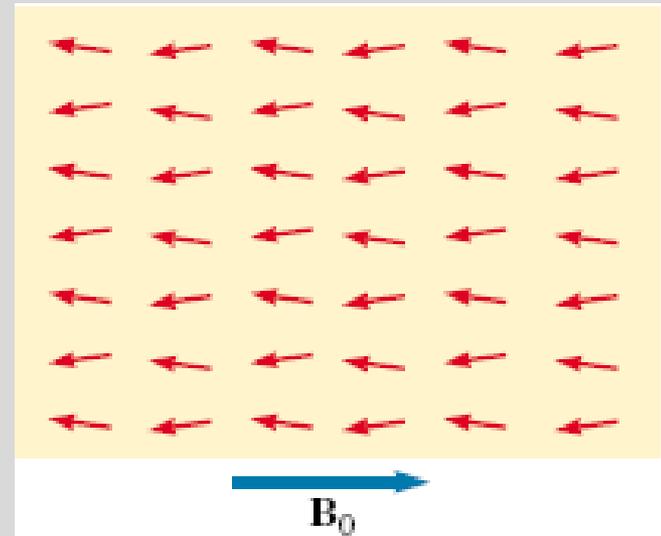
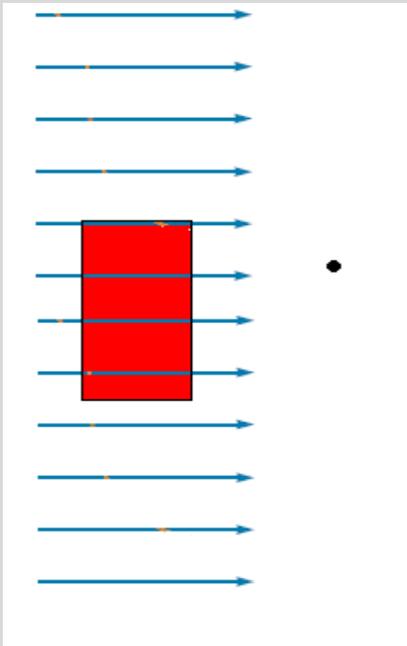
Diamagnéticos

$$\chi < 0$$

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

La magnetización es en dirección contraria al campo

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

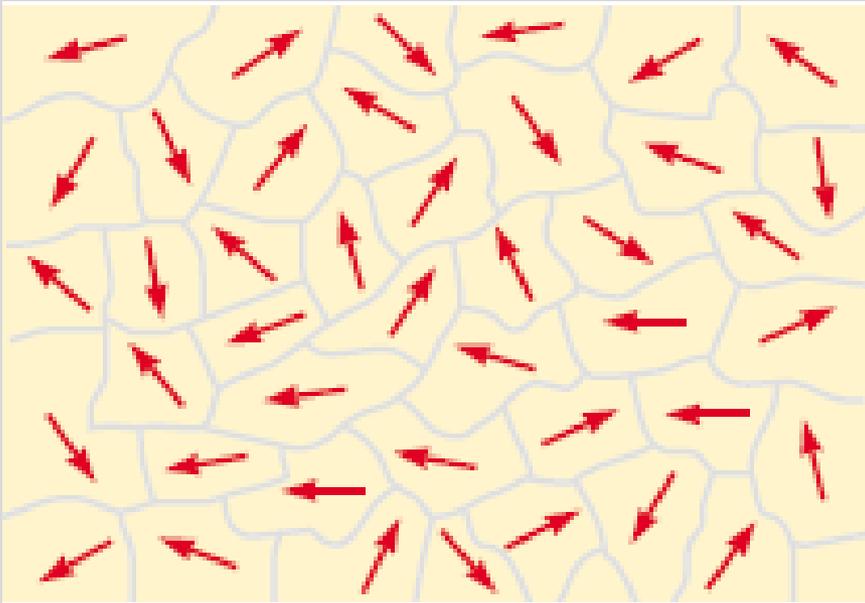


Magnetic Susceptibilities of Some Paramagnetic and Diamagnetic Substances at 300 K

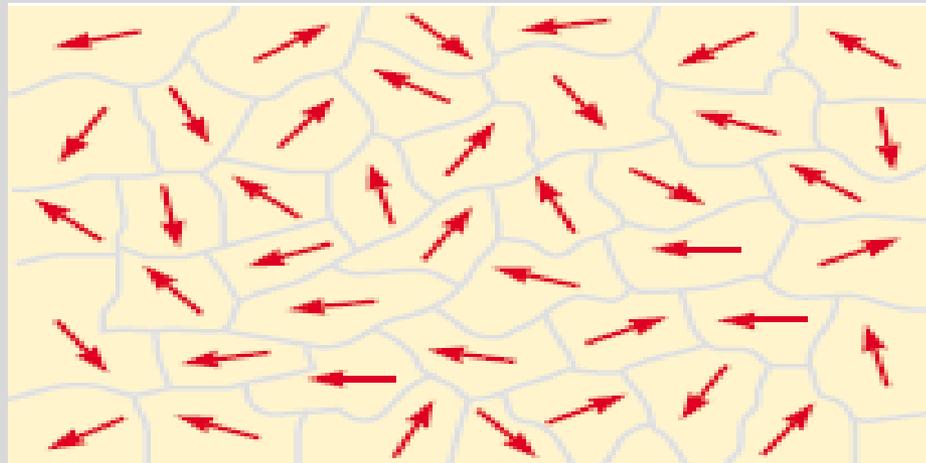
Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}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

Ferromagnéticos

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

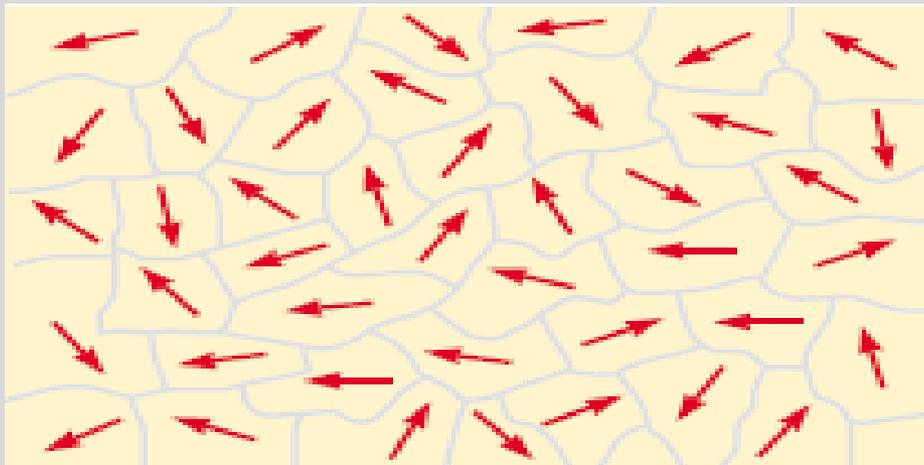


- Poseen magnetización permanente, entre ellos el Hierro, Níquel, Disproseo, etc.
- Pueden agruparse un conglomerado del orden de 10^{17} a 10^{21} átomos, formando dominios ferromagnéticos cuyas dimensiones oscilan entre 10^{-12} a 10^{-8} m³

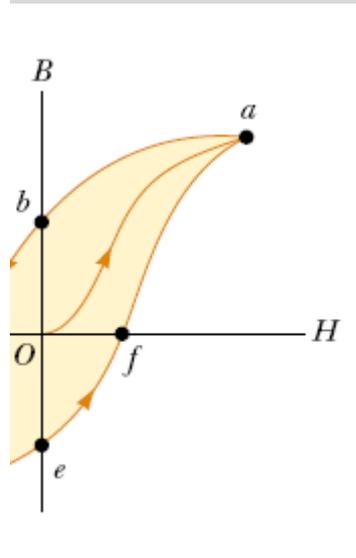
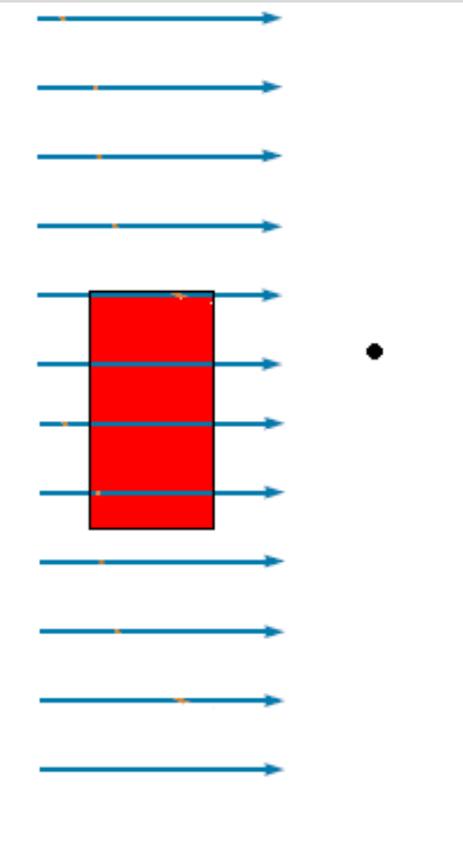


Como se comporta un ferromagnético

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

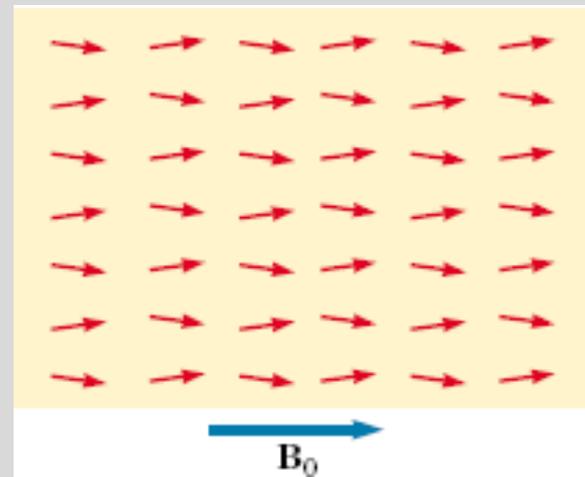
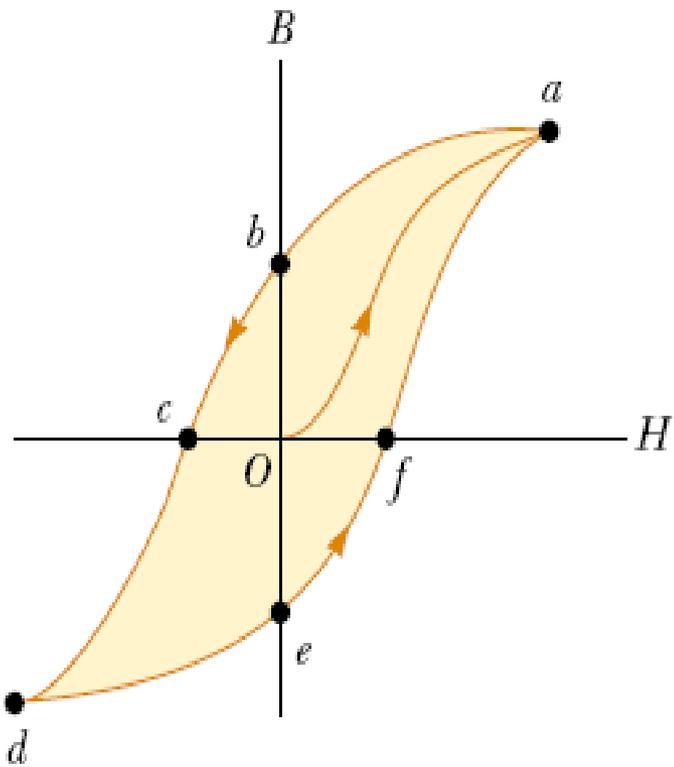


- Dado que $\mathbf{M} = (\mathbf{B}_t - \mathbf{H})/\mu_0$
- Es posible “minitorear” la magnetización via la grafica de \mathbf{B}_t vs \mathbf{H} , a medida que \mathbf{H} se incrementa desde cero a una valor dado.
- Esta grafica se conoce como curva de Histéresis



Comportamiento de M

- De 0 \rightarrow a



Curvas de Histéresis

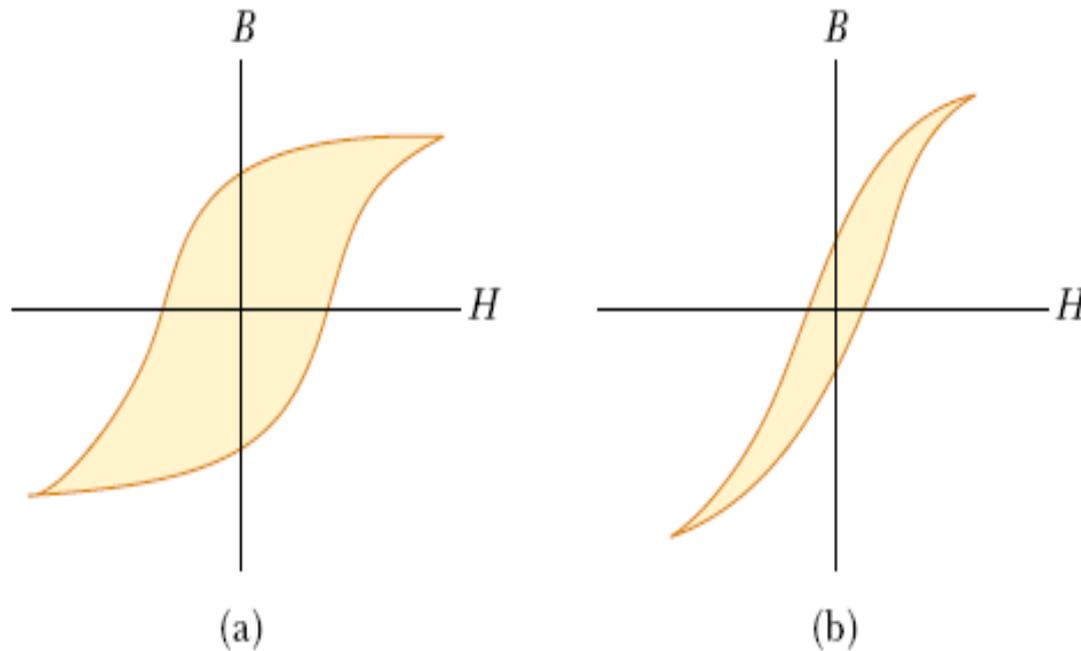


Figure 30.31 Hysteresis loops for (a) a hard ferromagnetic material and (b) a soft ferromagnetic material.

Curvas de Histéresis comprada con la linealidad

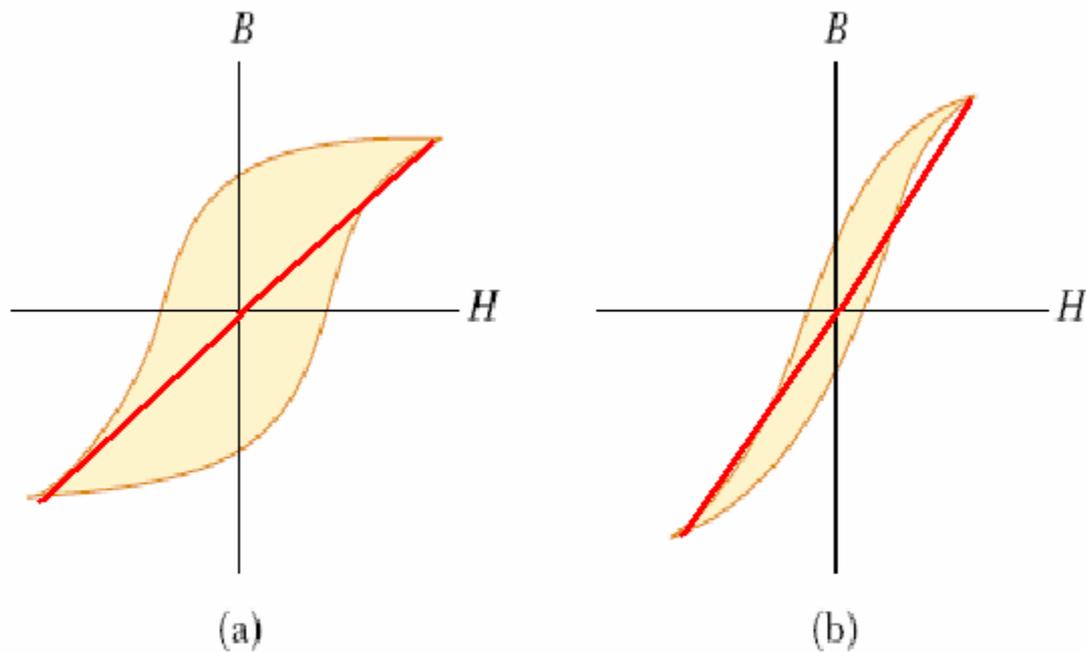


Figure 30.31 Hysteresis loops for (a) a hard ferromagnetic material and (b) a soft ferromagnetic material.

Curva de Histéresis para desmagnetizar un ferromagnético

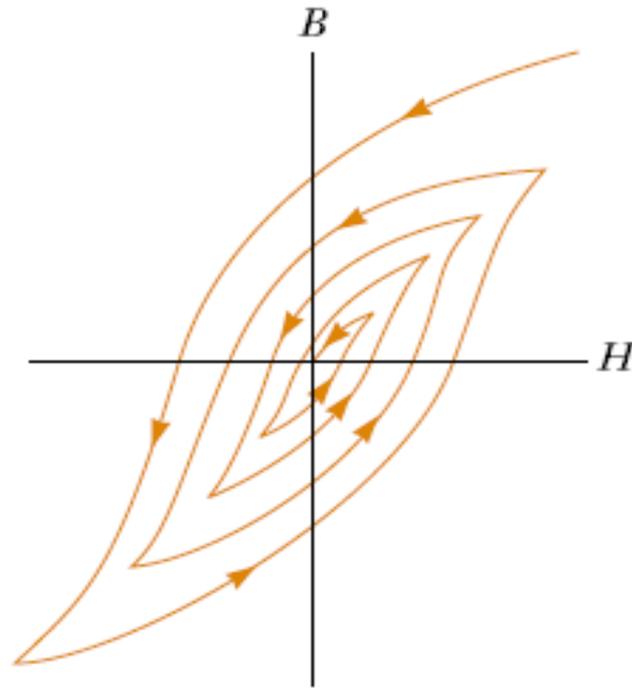


Figure 30.32 Demagnetizing a ferromagnetic material by carrying it through successive hysteresis loops.