

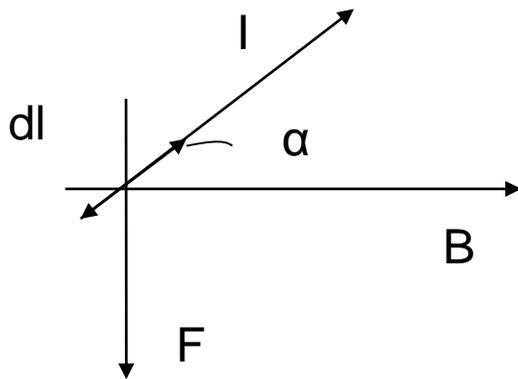
**Materiales  
Eléctricos**

**Materiales  
Magnéticos**

---

## Propiedades Magnéticas de los Materiales

El magnetismo se manifiesta por la fuerza que se ejerce sobre un conductor con corriente eléctrica o sobre un material ferroso. Los motores eléctricos y los electroimanes son los ejemplos mas evidentes.



$$\vec{dF} = \vec{I} \times \vec{B} \cdot d\vec{l}$$

$$dF = I \cdot B \cdot dl \cdot \text{sen}\alpha$$

$$[\text{Newton}] = [\text{Amp}] \cdot [?] \cdot [\text{m}]$$

$$B = (\text{densidad de Flujo magnetico})$$

$$B = [\text{Newton}] / [\text{Amp}] \cdot [\text{m}]$$

$$B = [\text{Webber}] / [\text{m}^2] = [\text{Tesla}] = [10^4 \text{ Gauss}]$$

También podemos analizar el magnetismo desde el punto de vista de la fuerza que se ejerce sobre una carga en movimiento.

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

**¿Cómo se genera un campo magnético?**

Se genera por una corriente eléctrica ósea cargas en movimiento

Según la ley de Ampere:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \qquad \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Donde “H” es la intensidad de campo magnético  $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

$\mu_0$ : permeabilidad del vacío ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  [T.m/A])

$\mu_r$ : permeabilidad relativa

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

## Aplicando la ley de ampere...

- para un conductor donde circula una corriente eléctrica “I”

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

donde r es el radio de la línea de campo B, circular alrededor del conductor.

- Para un solenoide, en el centro de la bobina el campo vale:

$$B = \mu \cdot I \cdot N$$

donde N es el numero de espiras del solenoide

si el solenoide tiene núcleo de aire entonces:

$$B = \mu_0 \cdot I \cdot N$$

si el solenoide posee núcleo de algún material

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot I \cdot N$$

Si colocamos un núcleo de algún material entonces:

$$B = \mu_0 \cdot (H + M)$$

Donde M es la magnetización del material, la cual puede aumentar la intensidad “H” o disminuirla

La magnetización “M” es proporcional al campo aplicado H

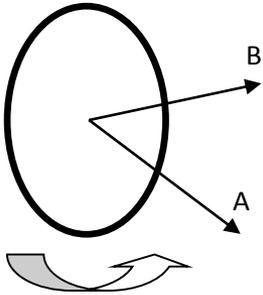
$$M = \chi \cdot H \quad \text{donde } \chi \text{ es la susceptibilidad magnética y es adimensional}$$

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) = \mu_0(1 + \chi)H$$

$$(1 + \chi) = \mu_r$$

Para materiales magnéticos  $\rightarrow \mu_r > 1$  con lo cual aumenta la densidad flujo magnético

## Momento dipolar magnético de una espira de corriente



$$\mu_m = I \cdot \vec{B} \cdot \vec{A}$$

## Ley de Lenz

Un flujo magnético variable que atraviesa una espira induce un campo eléctrico en la misma. La dirección del campo eléctrico es tal que se opone a la variación de flujo magnético que lo produjo .

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\Phi/dt$$

## PUNTO DE VISTA MACROSCOPICO

Los tipo de materiales que conocemos son:

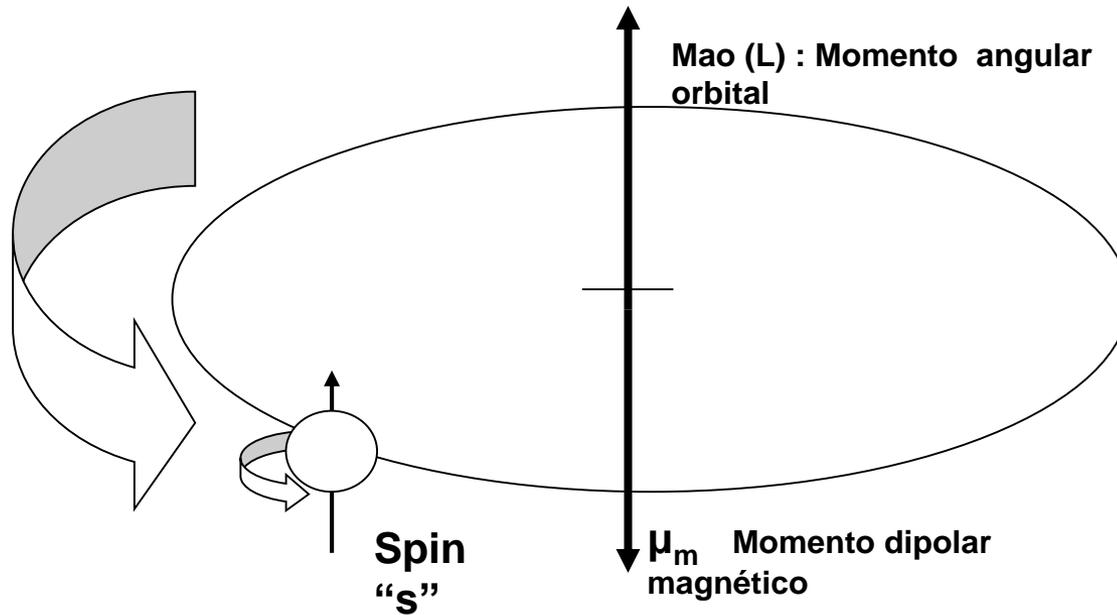
- **Diamagnéticos:** son repelidos por un imán, no presentan fuerzas de atracción sobre un material ferroso.
- **Paramagnéticos:** Son atraídos por un imán, no tienen magnetismo propio.
- **Ferromagneticos:** son los imanes

## PUNTO DE VISTA MICROSCOPICO

Los campos creados por los materiales magnéticos surgen de dos fuentes atómicas:

- **Los momentos angulares orbitales**
- **El spin de los electrones**
- **Momento dipolar magnético nuclear**

Al estar los electrones en constante movimiento en el material, experimentan fueras ante un campo magnético aplicado.



**Mao (momento angular orbital) =  $L = m \cdot v \cdot r = m \cdot \omega \cdot r^2 = n \cdot (h/2\pi)$**

**Donde:**

- **m** es la masa en reposo del electrón.
- **v** es la velocidad tangencial.
- **w** es la velocidad angular.
- **r** es el radio de la supuesta órbita circular que describe.
- **n** es el número cuántico principal.
- **h** es la constante de Planck.

El modulo del vector  $\mathbf{M}_{ao}$  puede tomar los siguientes valores:

$$M_{ao} = \frac{h}{2\pi} \cdot (l \cdot (l + 1))^{1/2}$$

$l$ : numero cuantico del momento angular esta comprendido entre 0 y  $(n-1)$

si consideramos al electrón girando en el orbital como una espira de corriente

$$I = \frac{q}{T} = q \cdot f = \frac{q \cdot \omega}{2\pi}$$

$q$ : carga del electrón

$T$ : periodo en completar una vuelta

$f$ : frecuencia inversa al periodo

$\omega$ : velocidad angular

Esta espira define un momento dipolar magnético de valor:

$$\mu_m = I \cdot A = \frac{q \cdot \omega}{2\pi} \pi \cdot r^2 = \frac{q\omega r^2}{2} = \frac{q}{2 \cdot m \cdot L}$$

$\mu_m$ : vector normal al plano de la espira de corriente.

$$\mu_m = -\frac{q}{2 \cdot m} \cdot M_{ao}$$

obsérvese que  $\mu_m$  tiene dirección opuesta a  $M_{ao}$

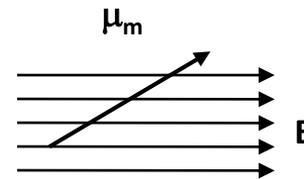
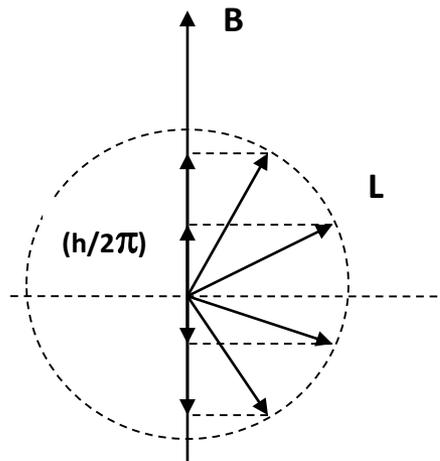
Mao esta cuantizado

$$Mao = n \cdot \left(\frac{h}{2\pi}\right)$$

$$\mu_m = -\frac{q}{2 \cdot m} \cdot n \cdot \frac{h}{2\pi} = 9,27 \cdot 10^{-24} [Amp] \cdot [m^2] = 1 \text{ Magneton de bohr}$$

El magnetón de bohr es la unidad fundamental del momento dipolar magnético a nivel atómico.

¿Como actúa el material en presencia de un campo magnético “B” externo?



Si el material tiene momento dipolar permanente, este trata de orientarse según el campo magnético “B” de acuerdo a lo que determina el numero cuántico “ml”

## Conclusión

- Las posibles posiciones de los dipolos magnéticos están cuantizadas
- En cada posición posible el valor de  $\mathbf{M}_{ao}$  proyectado en la dirección del campo magnético externo será  $m_l \cdot (\hbar/2\pi)$ ,  $m_l$  puede adoptar los valores -1,0 y 1
- Aparece sobre el imán elemental un par proporcional al producto vectorial entre el momento dipolar magnético ( $\mathbf{M}_{ao}$ ) y la densidad de flujo magnético externo  $\mathbf{B}$ .
- Aparece una energía potencial magnética que tiende a orientar todos los momentos dipolares magnéticos en el mismo sentido.
- Este proceso se encuentra influenciado por la temperatura contrariamente

## Clasificación de materiales según si su estructura atómica presenta o no momentos dipolares magnéticos

### DIAMAGNETISMO:

- Los materiales con átomos sin momentos dipolares permanentes son llamados DIAMAGNÉTICOS. Este es un efecto universal, se basa en la interacción entre el campo magnético aplicado y los electrones móviles del material.
- Los materiales diamagnéticos se magnetizan débilmente en sentido opuesto al campo magnético aplicado.
- La susceptibilidad magnética es negativa es pequeña y la permeabilidad relativa es ligeramente menor que 1.
- El efecto diamagnético esta presente **en todos los materiales**
- Algunos ejemplos de sustancias diamagnéticas: Bismuto, cobre, diamante, agua, plomo, hidrogeno, etc.

## ¿Cómo sucede el diamagnetismo desde el punto de vista atómico?

En todos los materiales tengan o no momentos dipolares magnéticos permanentes, el campo magnético aplicado modifica el movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo. Esto es consecuencia de la ley de Lenz

$$fem = -\frac{d\theta}{dt}$$

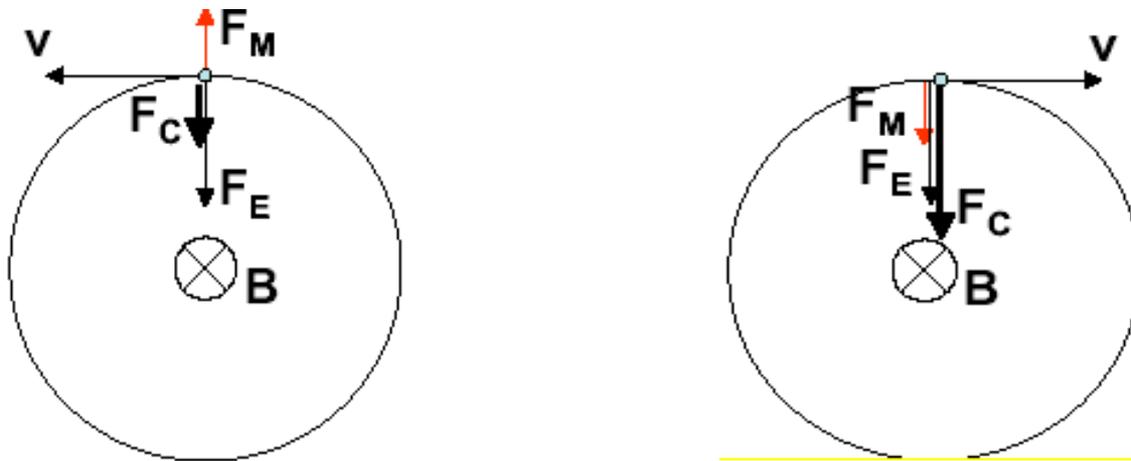
Siempre aparece un cambio en la espira de corriente que forma el electrón en su orbital, de manera que se opone al campo magnético aplicado. Debido al postulado de bohr el electron no puede cambiar su radio de giro “r”, cambia entonces la velocidad angular aumentando o disminuyendo según el sentido del campo aplicado

$$\omega = \omega_0 + \left(\frac{q}{2m}\right) \cdot B = \omega + \omega_l$$

Donde  $\omega_l$  es llamada frecuencia de Lamdor

## Gráficamente...

El momento angular inducido tiene dirección opuesta al campo magnético aplicado



Donde “FM” es la fuerza Magnética, “FC” Fuerza centrífuga y “FE” Fuerza Eléctrica

- Este es el Efecto Diamagnético y **esta presente en todos los materiales**
- El diamagnetismo es independiente de la temperatura, es muy débil y difícil de medir

## Analizando con teoría de los circuitos...

Considerando al electrón alrededor del núcleo como una espira de corriente tenemos:

$$L \frac{di}{dt} + R_i = fem = -\frac{d\varphi}{dt}$$

Como  $R_i$  es cero (pues el electrón gira en una espira sin resistencia)

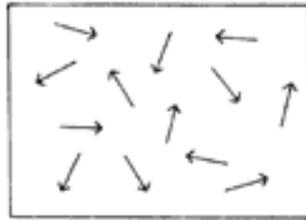
$$L \frac{di}{dt} = fem = -\frac{d\varphi}{dt} \rightarrow i = \frac{\varphi}{L}$$

La corriente inducida no solo esta presente cuando el flujo varia, sino también cuando el flujo  $\varphi$  es constante, con lo cual la fuerza de repulsión sigue presente.

## Materiales con Momento dipolar permanente

### PARAMAGNETISMO:

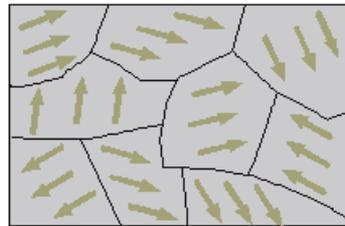
Sus átomos poseen momento dipolar magnético neto, pero están completamente desordenados por efecto de la temperatura, dando un momento resultante cero



- Los materiales paramagnéticos se magnetizan débilmente en el sentido del campo magnético aplicado
- La susceptibilidad magnética es positiva y pequeña, y la permeabilidad magnética relativa es ligeramente mayor que 1
- La intensidad de la respuesta es muy débil y los efectos son prácticamente imposibles de detectar, salvo a temperaturas muy bajas y campos aplicados muy intensos

## FERROMAGNETICOS:

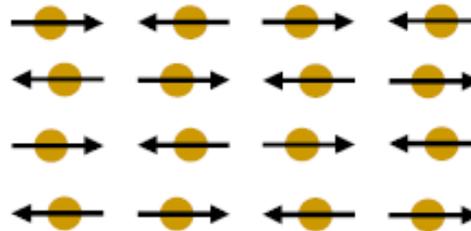
Sus átomos tienen momento dipolar magnético neto. A su vez los momentos dipolares individuales de grandes grupos de átomos o moléculas, se mantienen alineados entre sí debido a un fuerte acoplamiento aun en ausencia de un campo exterior. Estos grupos actúan como pequeños imanes permanentes. En ausencia del campo magnético los grupos o dominios tienen su momento dipolar magnético neto distribuidos al azar. Cuando se aplica un campo externo los momentos de los dominios se orientan en el sentido del campo. En algunos casos este alineamiento puede permanecer incluso después de retirar el campo externo



- los materiales ferromagnéticos se magnetizan fuertemente en el sentido del campo externo aplicado.
- La susceptibilidad magnética es positiva y grande y la permeabilidad relativa es mucho mayor que 1

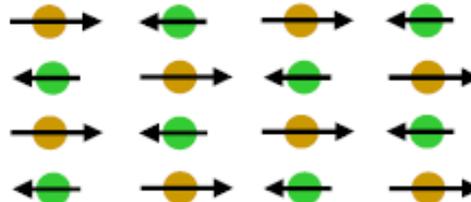
## ANTIFERROMAGNETISMO:

Tienen un estado natural en el cual los spines atómicos de los átomos adyacentes son opuestos de manera que el momento dipolar magnético neto es cero



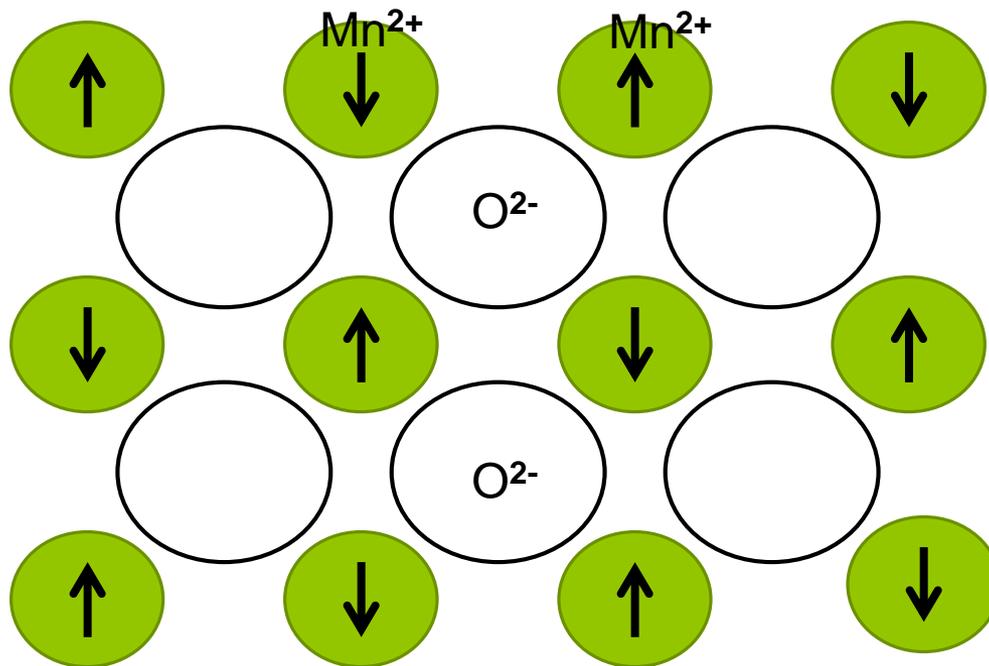
## FERRIMAGNETISMO:

Son similares a los anteriores salvo que las especies de átomos alternados son diferentes y tienen momentos dipolares magnéticos diferentes. Existe entonces una magnetización neta, y siendo en algunos casos muy intensa



## Tabla del numero de electrones en el estado 3d ( $n=3, l=2$ ) y alineamiento de spines individuales para átomos libres del grupo hierro

Elemento	Simbolo	Configuracion electrónica	Nº Atómico	Nº de Electrones en Estado 3d	Espines resultantes en Magnetons de Bohr
Calcio	Ca	[Ar]4s <sup>2</sup>	20	0	0
Escandio	Sc	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>1</sup>	21	1	1 ↑
Titanio	Ti	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>2</sup>	22	2	2 ↑↑
Vanadio	V	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>3</sup>	23	3	3 ↑↑↑
Cromo	Cr	[Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>5</sup>	24	4	4 ↑↑↑↑
Manganeso	Mn	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>5</sup>	25	5	5 ↑↑↑↑↑
Hierro	Fe	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>6</sup>	26	6	4 ↑↑↑↑↓
Cobalto	Co	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>7</sup>	27	7	3 ↑↑↑↑↓↓
Niquel	Ni	[Ar]4s <sup>2</sup> 3d <sup>8</sup>	28	8	2 ↑↑↑↑↓↓↓
Cobre	Cu	[Ar]4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup>	29	10	0 ↑↑↑↑↑↓↓↓↓↓



OXIDO DE  
MANGANESO