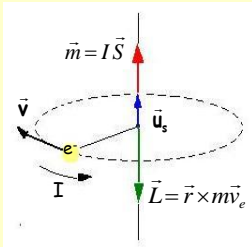




## PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LA MATERIA

## Dipolos magnéticos atómicos. Vector magnetización



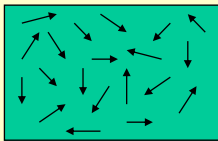
$$I = \frac{e^-}{T} = \frac{e^- v}{2\pi r}$$

Momento dipolar magnético atómico

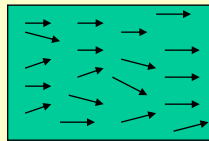
- M del núcleo
- M electrónico de spin
- M electrónico orbital

$$\vec{m} = I \vec{S} = \frac{1}{2} e^- v r \vec{u}_s$$

$$\vec{m}_{atm} = \vec{m}_{orb} + \vec{m}_{spin}$$

 $\vec{B}_0$  Campo externo

Sustancia no magnetizada



Momento magnético neto

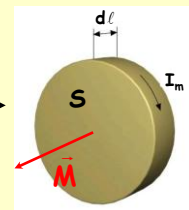
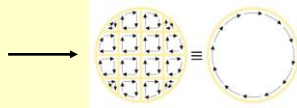
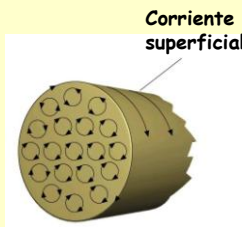
Átomos polieletrónicos

Magnetización

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



Magnetización → Corriente superficial efectiva



$$M = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{I_m S}{S \Delta \ell} = \frac{I_m}{\Delta \ell} \text{ (A/m)}$$

Susceptibilidad y permeabilidad magnética

$$\kappa_m \equiv \mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi_m$$

Campo magnético en un material

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

$$\vec{M} = \chi_m \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 (1 + \chi_m) = \kappa_m \vec{B}_0$$

**Materiales Diamagnéticos**

$$\chi_m < 0$$

$$\mu < \mu_0$$

**M y B<sub>0</sub> tienen sentidos opuestos**

- Materiales con moléculas individuales sin momento dipolar magnético.
- En presencia de un campo externo se induce un pequeño momento dipolar magnético.
- El momento magnético inducido se opone al campo externo.
- La magnetización es, generalmente, proporcional al campo (materiales lineales).
- El efecto diamagnético es muy débil.
- Las propiedades diamagnéticas son esencialmente independientes de la temperatura.
- Bi, Cu, Ag, Au, Pb,...

**Materiales Paramagnéticos**

$$0 < \chi_m \ll 1$$

$$\mu > \mu_0$$

**M y B<sub>0</sub> tienen sentidos iguales**

- Materiales con átomos que presentan momento dipolar magnético permanente.
- Dipolos magnéticos orientados aleatoriamente en ausencia de campo externo.
- Orientación de los dipolos magnéticos con el campo externo.
- La temperatura dificulta la orientación.
- La magnetización es proporcional al campo aplicado e inversamente proporcional a la temperatura.
- Al, Ca, Cr, Li, Mg,...

$$M = C \frac{B}{T}$$

**Materiales Ferromagnéticos**

$$\chi_m = f(\vec{B}_0)$$

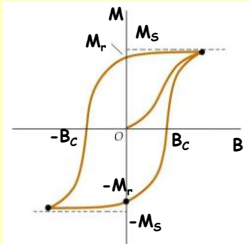
$$\mu \gg \mu_0$$

**Fe, Co, Ni,...****Dominios magnéticos**

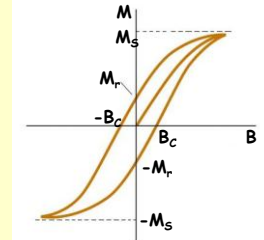
- Alineación fácil de los momentos magnéticos atómicos en presencia de un campo externo.
- La magnetización persiste cuando se retira el campo externo (Imán permanente).
- Fuerte acoplamiento de los momentos magnéticos cercanos (Dominios magnéticos).
- Temperaturas altas contrarrestan el acoplamiento (Temperatura crítica)

La magnetización no es realmente permanente. Los dominios pueden relajarse. Existe un **tiempo de relajación**. En función de éste podemos clasificar los materiales ferromagnéticos en **blandos y duros**.

Tipo de material	Se cumple	Susceptibilidad	Permeabilidad
Diamagnético	$\vec{M} = \chi_m \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$	$\chi_m < 0$	$\mu < \mu_0$
Paramagnético		$0 < \chi_m \ll 1$	$\mu \geq \mu_0$
Ferromagnético	$\vec{M} \neq \chi_m \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$	$\chi_m \gg 0$	$\mu \gg \mu_0$

**Ciclos de histéresis**No existe una relación lineal entre  $M$  y  $B$ 

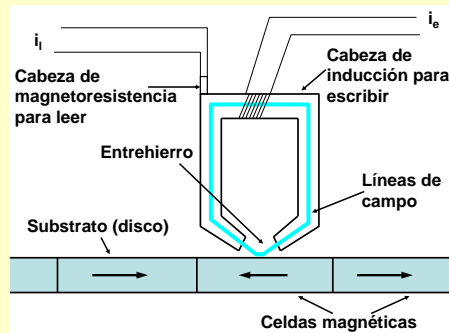
Material ferromagnético duro

 $M_s$  es la magnetización de saturación $M_r$  es la magnetización remanente $B_c$  es el campo coercitivo

Material ferromagnético blando



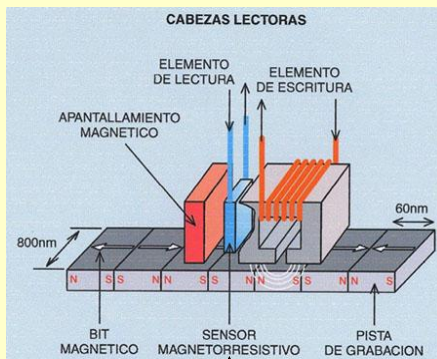
Disco duro de un ordenador

**Almacenamiento magnético de información**1956:  $10^{-2}$  Mb/cm<sup>2</sup>  
2005: 1 Gb/cm<sup>2</sup>

Celda de memoria o bit

Lectura de la magnetización  
de la celda (0 ó 1)

Densidad de bits

Materiales ferromagnéticos  
con ciclos de histéresis  
rectangulares y estrechos:  
**Energía consumida pequeña**  
(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; CrO<sub>2</sub>; CoCr, CoNi)• Celdas pequeñas  
• Señales pequeñasDistancia cabeza disco: 10  
veces el tamaño atómico• Inducción  
• Inductancia más grande  
• Lentitud**Magnetoresistencia**Materiales cuya resistencia  
es sensible a las variaciones  
de campo magnético• Intensidad corriente fija  
• Detección variación del voltaje  
• No inducción. Rapidez  
• Disminución tamaño celdaMR gigante (decenas %)  
MR colosal (miles %)



## Almacenamiento de información

La información se representa con dos dígitos

Sistema Binario (0,1)

Celda de memoria

- Tiempo de acceso
- Tiempo de conmutación
- Dimensiones mínimas
- Voltaje operativo
- Volatilidad

Dispositivo o circuito en el que se almacena una magnitud física medible, en donde dos valores de dicha magnitud se asocian a los valores lógicos 0 y 1

### DRAM

- Condensador (dieléctrico, 20 nm, efecto túnel)
- Interruptor (transistor)
- Estructura simple. Compactas
- Tiempo escritura-lectura (decenas ns)
- Refresco (100ms) Lenta
- Lectura destructiva
- Q fija, voltaje mínimo.
- Volátil
- Memoria principal.

### SRAM

- Circuito biestable (transistores)
- Estructura más compleja. Menos compactas
- Tiempo escritura-lectura (decenas ns)
- No hay refresco. Rapidez
- Requisito energético, voltaje mínimo.
- Volátil
- Memorias caché

### MRAM

### Memorias flash

- **EEPROM** (Puertas lógicas: transistores)
  - Dispositivos electrónicos (circuitos de conmutación)
- Memorias ROM que pueden ser borrados y reprogramados eléctricamente
  - (100.000 - 1.000.000 veces)
- Muy compactos.
- No volátil.
- Tarjetas de memoria.