

# Materiales magnéticos.

## EL MAGNETISMO DE LOS ÁTOMOS.

El campo magnético producido por una corriente en una espira o en una bobina nos ayuda a entender cual es la causa de que la materia tenga ciertas propiedades magnéticas. La materia está constituida por átomos, y en una descripción sencilla se consideran formados por un núcleo compacto cargado positivamente y electrones orbitando alrededor del núcleo. Un electrón moviéndose alrededor del núcleo es semejante a una espira con corriente. La intensidad efectiva del electrón orbitando, es igual a la carga del electrón  $e$ , entre el período  $T$  que tarda en una revolución completa (la carga que por unidad de tiempo atraviesa una sección).

Supongamos en esta descripción sencilla del movimiento del electrón que la órbita es circular de radio  $r$  y se recorre con velocidad  $v$

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e}{(2\pi r / v)} = \frac{ev}{2\pi r}, \quad (7,26)$$

El momento magnético asociado con el movimiento del  $e$  alrededor del núcleo, como si fuera una espira de corriente, es el **momento magnético orbital**  $\mu_L = I \cdot A$ , donde  $A = \pi r^2$ , es el área de la órbita circular. Es decir

$$\mu_L = I \cdot A = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right) \cdot \pi r^2 = \frac{1}{2} e \cdot v r,$$

Además, el momento angular del electrón es  $L = mvr$  y podemos expresar el momento magnético orbital  $\mu_L$  del electrón, en función de su momento angular  $L$ , sin más que multiplicar y dividir por su masa  $m$ .

$$\mu_L = \frac{1}{2m} e \cdot mvr = \frac{e}{2m} L, \quad (7,27)$$

**El momento magnético orbital  $\mu_L$  de un electrón moviéndose en un átomo, es proporcional a su momento angular  $L$ .**

Aunque hasta ahora solo hemos visto sus módulos, se trata de magnitudes vectoriales, y los vectores  $\vec{\mu}_L$  y  $\vec{L}$  son perpendiculares al plano de la órbita aunque tienen sentidos opuestos, por ser la carga del electrón negativa, ver fig.7.43.

Un resultado de la Física cuántica es que el momento angular orbital  $L$  de un electrón, sólo puede tomar un conjunto discreto de valores, **múltiplos enteros** de la constante universal  $\hbar$ , llamada constante de Plank,  $\hbar \approx 1.06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , es decir:  $L = 0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar, \dots, n\hbar$

Y el menor valor distinto de cero para el momento magnético orbital  $\mu_L$  es cuando  $L$  toma el valor  $\hbar$ .

$$\mu_L = \frac{e}{2m} L = \frac{e}{2m} \hbar \quad (7,28)$$

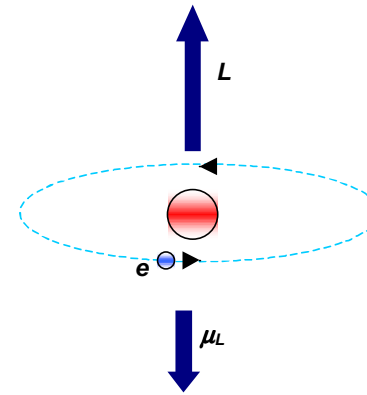


Fig.7.43 Los vectores momento magnético orbital  $\vec{\mu}_L$  y el momento angular  $\vec{L}$  del electrón; tienen la misma dirección pero sentidos opuestos, por ser el electrón una carga negativa.

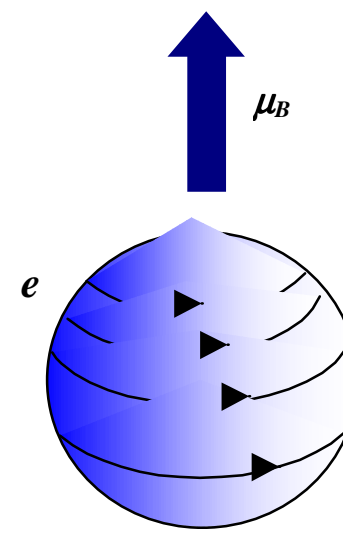


Fig.7.44 Momento magnético intrínseco asociado con el spin del electrón, imaginándolo como una esfera cargada que gira alrededor de un diámetro. Se conoce como magnetón de Bohr  $\mu_B$

El hecho de que muchas sustancias no sean magnéticas, a pesar de que todas poseen electrones con momento magnético orbital, es debido a que se cancelan mutuamente los momentos magnéticos de los electrones en los diferentes átomos de la sustancia.

Los electrones tienen una propiedad intrínseca llamada **espín** (giro) fig.7.44, la cual contribuye también al momento magnético. En una descripción clásica, que no hay que tomarla literalmente, nos podemos imaginar al electrón como una esfera cargada negativamente que gira alrededor de uno de sus diámetros. En consecuencia es equivalente a una espira de corriente y por lo tanto tendrá un momento magnético. **El momento magnético intrínseco asociado con el espín del electrón, es conocido como magnetón de Bohr y vale:**

$$\mu_B = \frac{e}{2m} \hbar \approx 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (7,29)$$

En los átomos, los electrones están por *pares con sus espines opuestos* (Principio de exclusión de Pauli) de manera que hay una cancelación de los momentos magnéticos de espín  $\mu_B$ ; pues tienen sentidos contrarios. Sin embargo, en los átomos con un número impar de electrones habrá uno sin pareja y en consecuencia tendremos un momento magnético de espín. **El momento magnético total de un átomo es la suma vectorial de los momentos magnéticos orbital  $\mu_L$  y de espín  $\mu_B$ .** En la tabla adjunta se dan los momentos magnéticos de varios átomos.

Átomo	Momento
H	$9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
He	0
Li	$9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
O	$13.9 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
Ne	0

**Momentos magnéticos de algunos átomos.**

### MAGNETIZACIÓN DE LA MATERIA.

Los átomos y moléculas que constituyen la materia pueden o no tener un momento magnético neto que dependerá de su simetría y de la orientación relativa de sus órbitas electrónicas. Cada molécula o átomo que posea un momento magnético se comporta de manera análoga a una espira de corriente que como sabemos crea un campo magnético. Todas las sustancias, con excepción de las llamadas ferromagnéticas, no dan lugar a efectos magnéticos netos apreciables debido a la orientación al azar de sus moléculas y átomos. Sin embargo, cuando hay un campo magnético externo, éste puede inducir un momento magnético neto en el material y se dice que se ha magnetizado.

Se llama **vector magnetización  $\vec{M}$** , al momento magnético por unidad de volumen que hay en la materia, es decir

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{m}_i}{V}, \quad (7,30)$$

siendo  $\vec{m}_i$  el momento magnético de la molécula o átomo  $i$ .

Cuando un material se magnetiza también se dice que se inducen **corrientes de magnetización**. La corriente de magnetización fig.7.45 no está formada por corrientes que fluyen libremente en el material, se trata de un efecto debido a las corrientes elementales asociadas con el movimiento electrónico en los átomos (diminutas espiras atómicas).

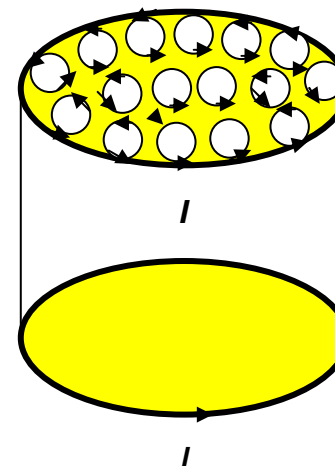


Fig.7.45 Suponiendo unas corrientes interiores cerradas dentro del material, éstas se cancelan mutuamente en el interior del mismo por tener sentidos contrarios. Sin embargo, en la superficie del material no se anulan y equivalen a una corriente  $I$  que va circulando por la superficie del material, en la figura la línea superficial más gruesa.

Un cilindro magnetizado uniformemente en la dirección de su eje fig.7.46, equivale a una corriente superficial de magnetización, como si fuera un solenoide.

Efectivamente, por analogía, si tuviéramos un solenoide de longitud  $L$  y sección  $A$ , que está recorrido por una intensidad  $I$  y que tiene  $n$  espiras por unidad de longitud, resultará que el número total de espiras es  $N = n \cdot L$ . El momento dipolar magnético total del solenoide, se obtendrá sumando el de cada una de las  $N$  espiras (que viene dado por la ecuación (7,24)).

$$\sum m_i = N \cdot (I \cdot A) = n \cdot L \cdot I \cdot A$$

El momento magnético por unidad de volumen es de (7,30).

$$M = \frac{\sum m_i}{V} = \frac{n \cdot L \cdot I \cdot A}{L \cdot A} = I \cdot n \quad (7.31)$$

Físicamente, el producto  $I \cdot n$  representa una intensidad de corriente por unidad de longitud, cuyas unidades resultan A/m.

Identificando la expresión anterior con la magnetización uniforme  $M$  del cilindro de material, vemos que.

$$M \Leftrightarrow \text{Intensidad de corriente de magnetización, por unidad de longitud.}$$

Los materiales reaccionan de diferentes maneras frente a un campo magnético, al contrario de lo que ocurría en el campo eléctrico. Recuerda que todos los materiales, conductores y dieléctricos, reaccionaban apantallando al campo eléctrico.

### CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Desde el punto de vista del comportamiento magnético podemos clasificar los materiales en **diamagnéticos**, **paramagnéticos** y **ferromagnéticos**. Todos los materiales excepto los ferromagnéticos muestran efectos magnéticos muy pequeños.

- **Diamagnéticos.**

Aunque todos los materiales presentan diamagnetismo, su efecto es tan débil que en general se ve enmascarado por otros comportamientos magnéticos. En el diamagnetismo, fig.7.47 un campo magnético externo induce pequeñísimas corrientes microscópicas que tienden a debilitar (apantallar) el campo magnético externo. Esto se consigue porque a escala atómica se inducen momentos magnéticos con sentido opuesto al campo magnético externo. Es decir, el vector magnetización  $\vec{M}$  y  $\vec{B}$  tienen sentidos opuestos. En consecuencia, para describir el campo magnético total hay que utilizar una permeabilidad magnética,  $\mu$ , ligeramente diferente de la del vacío,  $\mu < \mu_0$ . Un material que tiene un comportamiento diamagnético es repelido por el campo magnético creado por corrientes.

- **Paramagnéticos.**

En estos materiales, fig.7.48, los átomos o moléculas tienen un momento dipolar magnético permanente, de forma que un campo magnético externo produce un par sobre ellos que tiende a alinearlos en la dirección del

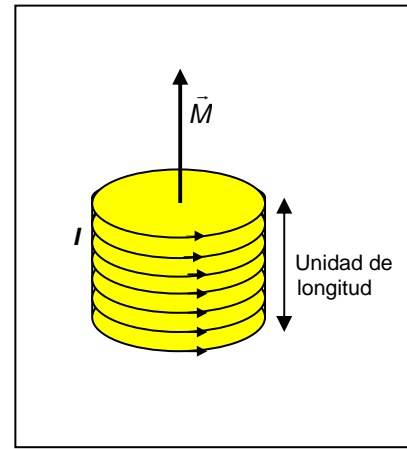


Fig.7.46. Cilindro magnetizado uniformemente en la dirección de su eje..

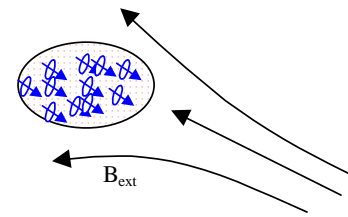


Fig.7.47 Ilustración del diamagnetismo.

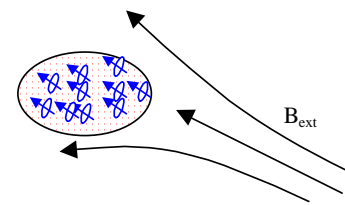


Fig7.48. Ilustración del paramagnetismo.

campo oponiéndose al desorden debido al movimiento térmico. El material en este caso adquiere una magnetización  $\vec{M}$  en la misma dirección y sentido que el campo magnético  $\vec{B}$ . Los momentos magnéticos permanentes son del orden de  $10^3$  veces mayor que los momentos magnéticos inducidos por el diamagnetismo, de modo que en la mayoría de las sustancias paramagnéticas, los efectos diamagnéticos son superados por los paramagnéticos. Un material paramagnético es atraído por el campo magnético de unas corrientes. Para describir el campo magnético total hay que utilizar una permeabilidad magnética,  $\mu$ , ligeramente mayor que la del vacío,  $\mu > \mu_0$ , es decir los materiales paramagnéticos refuerzan ligeramente el campo magnético creado por corrientes externas. No obstante también en los materiales paramagnéticos el cociente  $\mu / \mu_0$  está muy próximo a la unidad.

Para clasificar los materiales se suele usar la llamada *susceptibilidad magnética*,  $\chi$ , la cual se define como

$$\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1, \quad (7.32)$$

y es un número sin dimensiones y pequeño frente a la unidad, positivo en las sustancias paramagnéticas y negativo en las diamagnéticas. En la tabla adjunta se dan las susceptibilidades magnéticas de algunas sustancias. La magnetización que adquiere un material no ferromagnético está relacionada con el campo magnético  $\vec{B}$  de la forma

$$\vec{M} = \frac{\chi}{\mu} \vec{B}, \quad (7.33)$$

- **Ferromagnéticos**

El hierro, cobalto, níquel, etc. y algunos óxidos de estos, son sustancias ferromagnéticas. La principal característica es que pueden mostrar una magnetización permanente y sus efectos son mucho más intensos que en el resto de los materiales. La explicación física de cómo se produce es muy complicada y hay que recurrir a la física cuántica. Por su importancia dedicamos la INFOCIENCIA a su conocimiento más profundo y al de sus aplicaciones.

---

**EJERCICIO RESUELTO**

---

Calcula el campo magnético y la magnetización, debido a una corriente de intensidad  $I$  de un hilo infinito, que está inmerso en un material paramagnético de permeabilidad  $\mu$ .

El campo tendrá la misma simetría que en el caso del vacío y usando la misma fórmula pero con  $\mu$  en lugar de  $\mu_0$ , tenemos

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}, \quad M = \frac{\chi}{\mu} B = \chi \frac{I}{2\pi R}$$

Material	$\chi$
Aluminio	$2.3 \times 10^{-5}$
Bismuto	$-1.7 \times 10^{-5}$
Cobre	$-0.98 \times 10^{-5}$
Diamante	$-2.2 \times 10^{-5}$
Oro	$-3.6 \times 10^{-5}$
Magnesio	$1.3 \times 10^{-5}$
Mercurio	$-3.2 \times 10^{-5}$
Plata	$-2.6 \times 10^{-5}$
Sodio	$-0.24 \times 10^{-5}$
Titanio	$7.06 \times 10^{-5}$

Susceptibilidades magnéticas de algunas sustancias.

