

## MAGNETISMO EN LA MATERIA

Hans Blanco Alvarado, Laura Sofía León Muñoz, Ana Sofía Manzano Quintero, Jason Daniel Pantoja Acosta

Universidad ICESI, Facultad de Ingeniería, Diseño y Ciencias Aplicadas.

20/05/2024

### 1. Introducción

Una explicación clásica para el modelo atómico es el llamado modelo planetario o modelo Rutherford-Bohr, en el cual los electrones se mueven en órbitas circulares correspondientes a niveles de energía cuantizados alrededor de un núcleo. A pesar de que existen otros modelos, como el modelo probabilístico desarrollado por Erwin Schrödinger, por el que se descartó el modelo planetario, este modelo simple funciona para explicar el magnetismo en la materia, debido a que el electrón en órbita forma una espira de corriente minúscula, ya que se trata de una carga en movimiento, y el momento magnético del electrón se encuentra asociado con este movimiento orbital<sup>1</sup>.

Este modelo supone el movimiento del electrón con una velocidad  $v$  constante en su órbita de radio  $r$ , lo cual se le asocia una corriente  $I$  igual a su carga  $e$  entre el periodo  $T$  **Ecuación 1**. Este fenómeno relacionado con una espira tiene una magnitud de momento magnético  $\mu$ , que es igual a la corriente por el área de la órbita **Ecuación 2**. Además, es posible calcular la magnitud del momentum angular orbital del electrón y relacionarlo con la expresión resultante, obteniendo que el momento magnético del electrón es proporcional a su momento angular orbital **Ecuación 3**.

$$I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r}$$

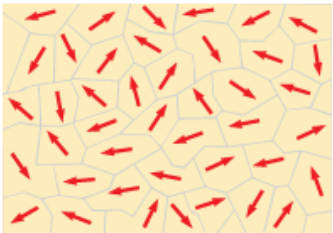
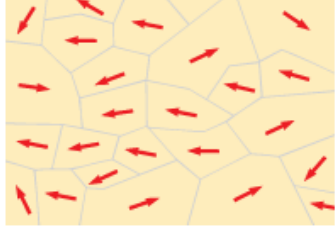

$$\mu = IA = \left(\frac{ev}{2\pi r}\right)\pi r^2 = \frac{1}{2}evr$$

$$\mu = \left(\frac{e}{2m}\right)L$$

Un resultado fundamental de la física cuántica es que el momentum angular orbital está cuantizado y es igual a múltiplos de  $\hbar = h/2\pi = 1.05 \times 10^{-34}$  J.s, donde  $h$  es la constante de Planck. Al final se encontró que, para la mayoría de los materiales, el efecto producido por el movimiento orbital de los electrones es cero o muy pequeño<sup>1</sup>. Por eso en la mayoría de los materiales no hay magnetismo.

Ahora bien, el **ferromagnetismo**, **paramagnetismo** y **diamagnetismo** son tres propiedades magnéticas de la materia que describen cómo diferentes materiales responden a un campo magnético externo. Todos los materiales ferromagnéticos están constituidos por regiones microscópicas llamadas dominios, regiones dentro de las cuales todos los momentos magnéticos están alineados<sup>1</sup>.

Tabla 1. Disposición de los dominios.

		
Sustancia no magnetizada	Aplicación de un campo magnético débil	Aplicación de un campo magnético fuerte

El **ferromagnetismo** es la forma más fuerte de magnetismo. Los materiales ferromagnéticos, como el hierro, el níquel y el cobalto, son atraídos por los imanes y conservan su propio magnetismo incluso cuando se elimina el campo externo. Esto se debe a que los átomos en estos materiales tienen momentos magnéticos permanentes que se alinean entre sí en presencia de un campo externo.

El **paramagnetismo** es una forma más débil de magnetismo. Los materiales paramagnéticos, como el aluminio, el magnesio y el oxígeno, son atraídos por los imanes cuando se colocan en un campo externo, pero no conservan su propio magnetismo cuando se elimina el campo. Esto se debe a que los átomos en estos materiales tienen momentos magnéticos que pueden ser inducidos por el campo externo, pero no tienen momentos magnéticos permanentes.

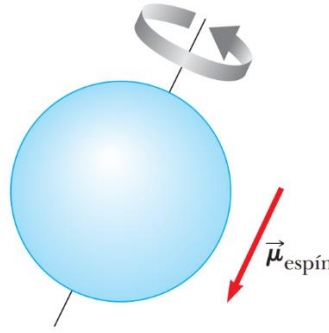
El **diamagnetismo** es la forma más débil de magnetismo. Los materiales diamagnéticos, como el cobre, el oro y el carbono, son repelidos por los imanes. Esto se debe a que los átomos en estos materiales tienen órbitas de electrones que crean un campo magnético que se opone al campo externo.

Tabla 2. Propiedades magnéticas de la materia.

Propiedad	Ferromagnetismo	Paramagnetismo	Diamagnetismo
Momento magnético de los átomos	Permanente	Inducido	Ninguno
Comportamiento en un campo externo	Fuertemente atraído	Débilmente atraído	Repelido
Retención del magnetismo	Retiene el magnetismo	Pierde el magnetismo	Retiene el diamagnetismo
Ejemplos	Hierro, níquel, cobalto	Aluminio, magnesio, oxígeno	Cobre, oro, carbono

## 2. Desarrollo del problema

En adición al momento magnético del orbital, los electrones poseen una propiedad intrínseca llamada **espín**, que contribuyen a su momento magnético. Por lo común, un electrón puede considerarse como si estuviera girando sobre su propio eje, como se muestra en la **Ilustración 1**.



*Ilustración 1. Representación de la rotación de un electrón sobre su propio eje.*

La magnitud del momentum angular asociado al espín ( $S$ ) es del mismo orden de magnitud del momentum angular debido al movimiento orbital ( $L$ ). De acuerdo con la teoría cuántica, la magnitud del momentum angular del espín de un electrón corresponde a la **Ecuación 4**:

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

El momento magnético asociado al espín de un (1) electrón tiene el valor presentado en la **Ecuación 5**:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 * 10^{-24} \text{ J/T}$$

Esta combinación de constantes es conocida como el **magnetón de Bohr**, por lo tanto, el momento magnético atómico puede expresarse como múltiplos del magnetón de Bohr. Es importante notar que

$$1 \frac{\text{J}}{\text{T}} = 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

En átomos que presentan un gran número de electrones, estos se organizan en parejas con espines opuestos entre sí. Por ende, los momentos magnéticos del espín se cancelan. Sin embargo, en átomos que poseen un número impar de electrones, al menos uno debe encontrarse desapareado, por lo que el espín presentará algún momento magnético. Es posible conocer el momento magnético asociado a los protones y neutrones que constituyen el núcleo sustituyendo su masa en la **Ecuación 5**. Ya que la masa de los protones y neutrones es mucho mayor que la masa del electrón, sus momentos magnéticos son diez veces menores, por lo que no se consideran.

Al considerar  $x$  como el número de electrones en un átomo y  $n$  el número de átomos por unidad de volumen, entonces,  $xn\mu_B$  será el momento magnético por unidad de volumen. Por lo tanto, el campo magnético asociado estará dado por la **Ecuación 6**.

$$B = \mu_0 x n \mu_B$$

Donde  $\mu_0$  se trata de la permeabilidad magnética del espacio vacío, que tiene un valor medido de

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

### Ejercicio 43; Sección 30.6:

En la saturación, cuando prácticamente todos los átomos tienen sus momentos magnéticos alineados, el campo magnético en una muestra de hierro puede ser de 2.00 T. Si cada electrón contribuye con un momento magnético de  $9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$  (un magnetón de Bohr), ¿Cuántos electrones por cada átomo contribuyen al campo saturado del hierro? El hierro contiene aproximadamente  $8.50 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3$ .

Datos:

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$$

$$n = 8.50 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

$\mu_0$ : permeabilidad magnética del espacio al vacío

Incógnitas:

$x$  = electrones por átomo que contribuyen al campo saturado del hierro

### Solución

Para resolver este ejercicio, necesitamos hacer uso de la **Ecu 6**:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot x \cdot \mu_B$$

De esta fórmula despejamos nuestra incógnita “ $x$ ”:

$$x = \frac{B}{\mu_0 \cdot n \cdot \mu_B}$$

Y reemplazamos los datos:

$$x = \frac{2.00 \text{ T}}{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}\right) (8.50 \times 10^{28} \text{ átomos/m}^3) (9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2)}$$
$$x = 2.02 \text{ átomos}^{-1}$$

### 3. Conclusiones

En el descubrimiento y estudio de las propiedades del magnetismo se han desarrollado nuevos y mejorado diferentes procesos y dispositivos importantes en la humanidad, desde la cotidianidad, la vida moderna y el estudio y desarrollo de escenarios y tecnologías en diferentes áreas de la investigación.

Entre las múltiples áreas beneficiadas gracias al avance del entendimiento del electromagnetismo se tienen:

La física, astronomía y ciencias afines, con la comprensión de las interacciones de la materia con las fuerzas electromagnéticas y sus fenómenos asociados como, los campos magnéticos, la actividad de

las estrellas, el estudio de agujeros negros, el descubrimiento de nuevas partículas del modelo estándar, entre muchos otros.

La medicina en el diagnóstico y seguimiento de enfermedades gracias al uso del diamagnetismo y el paramagnetismo en el desarrollo de los diversos dispositivos de resonancia magnética que se tienen actualmente, permitiendo obtener imágenes definidas de órganos, músculos, huesos y demás tejidos entre estos y otros sistemas del cuerpo humano.

El ferromagnetismo también tiene aplicaciones en un amplio rango de dispositivos comúnmente usados como: altavoces, motores eléctricos, transformadores, generadores, circuitos, entre muchos otros.

En el área de las ciencias, el magnetismo ha tenido grandes contribuciones en la separación de metales raros, la creación de microfluidos sin el uso de paredes, la espintrónica, el diseño de campos magnéticos, la magnetoelectroquímica y la investigación en confinamiento magnético para la fisión nuclear.

#### **4. Referencias**

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). FÍSICA para ciencias e ingenierías con Física Moderna (Séptima, Issue September 2016). Cengage Learning.

Introduction to Magnetism. (s. f.). GBC Electromechanical Technician. <https://www.emcourse.com/news-blog/introduction-magnetism>

Applied Magnetism. (s. f.). <https://www.applied-magnetism.com/>

Libretexts. (2020, 5 noviembre). 21.6: Applications of Magnetism. Physics LibreTexts. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Physics\\_\(Boundless\)/21%3A\\_Magnetism/21.6%3A\\_Applications\\_of\\_Magnetism](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Physics_(Boundless)/21%3A_Magnetism/21.6%3A_Applications_of_Magnetism)

Stanford Magnets. (s. f.). List of Magnet Applications in Practical Life | Stanford Magnets. <https://www.stanfordmagnets.com/list-of-magnet-applications-in-practical-life.html>

Magnetic Fusion Confinement with Tokamaks and Stellarators. (s. f.). IAEA. <https://www.iaea.org/bulletin/magnetic-fusion-confinement-with-tokamaks-and-stellarators>