

Magnetismo

Facultad de Ciencias Médicas
Universidad de San Carlos de Guatemala
Edgar Cifuentes

Las cargas eléctricas producen un campo eléctrico pero además, cuando hay movimiento, también pueden producir un campo magnético. El comportamiento de las cargas en reposo llevó al establecimiento de la electrostática y el comportamiento de los imanes llevó al establecimiento de la magnetostática y no fue sino hasta 1864 cuando James Clerk Maxwell logró sintetizar las ecuaciones que describen la interacción entre las cargas eléctricas, los imanes, los campos eléctricos y los campos magnéticos además como una consecuencia de esa síntesis se estableció que la luz es una onda electromagnética unificándose la Electricidad, el Magnetismo y la Óptica bajo las ecuaciones de Maxwell.

Sin embargo la matemática necesaria para trabajar las Ecuaciones de Maxwell comprende las ecuaciones diferenciales y el análisis vectorial. Por esa razón el enfoque que se dará acá será mas bien cualitativo.

1 Los imanes, la tierra y la brújula

Imán, el diccionario de la Real Academia dice “Mineral de hierro de color negruzco, opaco, casi tan duro como el vidrio, cinco veces mas pesado que el agua y que tiene la propiedad de atraer el hierro, el acero y en grado menor algunos otros cuerpos. Es combinación de dos óxidos de hierro, a veces cristalizada”. Esa definición es una buena descripción pero para nuestro propósito es muy vaga. Nosotros preferimos decir que un imán es un dipolo magnético.

Un dipolo eléctrico está compuesto de una carga positiva y una carga negativa de la misma magnitud ambas unidas rígidamente. Cuando colocamos un dipolo eléctrico en un campo eléctrico (recordar el efecto del campo eléctrico sobre una carga eléctrica) este tiende a alinearse a los largo de las líneas de fuerza quedando la carga negativa del lado de la

cola y la carga positiva de la parte de la punta del vector de campo eléctrico.

Los dipolos magnéticos (los imanes) están formados por dos polos, en lugar de las dos cargas, a los que llamamos polo norte y polo sur y en lugar de alinearse con un campo eléctrico lo hacen con un campo magnético. A diferencia de los dipolos eléctricos que pueden partirse por la mitad para tener una carga eléctrica positiva aislada y otra carga negativa aislada los dipolos magnéticos al partirse por la mitad no producen polos aislados sino obtenemos dos nuevos dipolos. El polo norte ocupa el lugar de la carga positiva y el polo sur ocupa el lugar de la carga negativa. La tierra se comporta como una gran imán que tiene su polo norte, muy cerca del polo norte celeste y su polo sur.

Un dipolo puede también producir un campo magnético así los polos magnéticos de la tierra provocan un campo magnético sobre la superficie de la tierra de aproximadamente $B = 10^{-5}$ T. La brújula está formada por la aguja, que es un dipolo magnético, y un soporte que le permite a ésta girar libremente. De tal forma que como ya se indicó al inicio la aguja se alinea con las líneas de fuerza.

2 El campo magnético y la corriente eléctrica

En la sección anterior mencionamos que un dipolo magnético puede producir un campo magnético pero según las Ecuaciones de Maxwell una corriente eléctrica puede producir también un campo magnético. Por ejemplo el campo magnético en el centro de una solenoide (una bobina) que lleva una corriente i y tiene n vueltas por unidad de longitud es igual a:

$$B = n\mu_0 I$$

dónde $\mu_0 = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2}$ y es llamada la permeabilidad del vacío. De esta ecuación deducimos que las dimensionales correspondientes al campo magnético son:

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

y a esta nueva unidad le llamamos Tesla (T).

El solenoide tiene muchas aplicaciones porque logra producir campos magnéticos constantes en el interior de un solenoide si la corriente es constante; al ser variable la corriente el campo magnético varía en la misma forma que varía la corriente.

Problema 1

Un solenoide tiene una longitud de 15 cm y tiene 500 vueltas. A través de él hacemos circular una corriente de 0.5 A

- a) ¿Cuánto es el valor de n ?
 b) ¿Cuál es el tamaño del campo magnético generado?

a)

$$n = \frac{\text{vueltas}}{\text{longitud}} = \frac{500}{15 \text{ cm}}$$

$$n = \frac{100}{3 \text{ cm}} = \frac{3333.3}{\text{m}}$$

b)

$$B = n\mu_0 I$$

entonces

$$B = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2} \left(\frac{3333.3}{\text{m}} \right) 0.5 \text{ A}$$

$$B = 2.0943 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Problema 2

¿Qué corriente debe pasar por el solenoide del problema anterior para que el campo magnético tenga el mismo valor que el terrestre?

$$10^{-5} \text{ T} = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2} \left(\frac{3333.3}{\text{m}} \right) I$$

despejando I tenemos

$$I = \frac{10^{-5} \text{ T}}{1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2} \left(\frac{3333.3}{\text{m}} \right)}$$

$$I = 2.3874 \times 10^{-3} \text{ A}$$

Problema 3

El gran solenoide que se usa para producir el campo magnético en un aparato de Resonancia Magnética

Nuclear es del orden de 1 T, si deseamos que la corriente no sea superior a los 2 A ¿que valor de n debemos usar?

$$1 \text{ T} = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2} (n) 2 \text{ A}$$

despejando

$$n = \frac{1 \text{ T}}{(1.2566 \times 10^{-6} \text{ N A}^{-2}) 2 \text{ A}}$$

$$n = 3.979 \times 10^5 \frac{1}{\text{m}}$$

3 Cuerpo negro, mecánica cuántica y espín

La potencia irradiada por un cuerpo está dada por la Ley de Stefan Boltzman

$$P = e\sigma AT^4$$

si el valor de $e = 1$ entonces llamamos a ese cuerpo un Cuerpo Negro.

A finales del sigloXIX el “Problema del Cuerpo Negro” no había podido ser resuelto. Este problema consistía en que al aplicar las Leyes de Maxwell para entender como irradiaba energía una caja con paredes calentadas a la misma temperatura (el cuerpo negro) los resultados teóricos no estaban de acuerdo a los resultados experimentales cuando analizabamos la distribución espectral de las energías.

La solución llegó en 1900 cuando Max Planck propuso que la radiación no era producida en forma continua sobre las paredes si por paquetes (cuantos) de un tamaño determinado $E = hf$ y en múltiplos de éste tamaño nhf donde f es la frecuencia de la onda irradiada y h es la llamada Constante de Planck cuyo valor es:

$$h = 6.6260 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

esto hace que los paquetes sean muy pequeños. En 1905 Albert Einstein sugirió que la radiación (luz) no solo se producía en paquetes, sino también se propagaba en paquetes; posteriormente éstos fueron llamados fotones. En 2005 se cumplen 100 años de la publicación del artículo de Einstein donde lanzaba esta idea para poder explicar el Efecto Fotoeléctrico y

de otros 2 artículos mas, en uno de los cuales aparece su famosa Teoría de la Relatividad Especial, y por esa razón se celebró, en 2005, el Año Internacional de la Física en todo el mundo.

La energía de un fotón es muy pequeña como se muestra en el siguiente problema.

Problema 4

La frecuencia de la luz amarilla es de 510×10^{12} Hz de la luz roja 390×10^{12} Hz y de la luz verde 560×10^{12} Hz

- a) ¿qué energía tiene un fotón de luz amarilla?
 b) que energía tienen 100 fotones de luz roja?
 c) ¿qué energía tienen 10 millones de fotones de luz verde?

a)

$$E_{Am} = (510 \times 10^{12} \text{ Hz}) (6.6260 \times 10^{-34} \text{ J s})$$

$$E_{Am} = 3.3793 \times 10^{-19} \text{ J}$$

b)

$$E_{Ro} = (10^2) (3.9 \times 10^{14} \text{ Hz}) (6.6260 \times 10^{-34} \text{ J s})$$

$$E_{Ro} = 2.5841 \times 10^{-17} \text{ J}$$

c)

$$E_{Ve} = (10^7) (560 \times 10^{12} \text{ Hz}) (6.6260 \times 10^{-34} \text{ J s})$$

$$E_{Ve} = 3.7106 \times 10^{-12} \text{ J}$$

El trabajo pionero de Planck y Einstein fue completado por una serie de grandes físicos y culminó con la formulación de la Mecánica Cuántica por Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg a mediados de la década de 1920.

3.1 El espín

Las propiedades fundamentales de la materia hemos visto que son su masa y su carga cuando estamos trabajando con la física clásica, pero al trabajar con la mecánica cuántica es necesario agregar una mas y ésta es el **espín**. La solución al problema del electrón girando alrededor del núcleo del átomo de hidrógeno, obtenida mediante la Ecuación de Schrödinger, dió como resultado la explicación del espectro de emisión del hidrógeno gaseoso caliente. Pero al someter el gas

a un campo magnético se observó una multiplicación de líneas espectrales que pudo ser explicada solo con la introducción de el espín como una nueva propiedad de la materia.

El espín se comporta como el Momento Magnético, pero en lugar de ser generado por un dipolo magnético o una corriente eléctrica es generado por la partícula misma. Las partículas elementales mas conocidas tiene entonces las siguientes propiedades.

	Carga	Masa	Espín
Electrón	$-e$	m_e	$\frac{1}{2}\hbar \text{ J s}$
Protón	$+e$	$1836m_e$	$\frac{1}{2}\hbar \text{ J s}$
Neutrón	0	$1839m_e$	$\frac{1}{2}\hbar \text{ J s}$

Entonces si aplicamos un campo magnético a la materia podemos lograr que el espín de las partículas, de las que ésta se componen, se alinien con el campo.

4 Resonancia Magnética Nuclear

Cuando se somete a los átomos de hidrógeno a un campo magnético intenso, entonces el espín se alinea con el campo (al igual al ejemplo de la brújula mencionado anteriormente), al mismo tiempo se envía una señal de radiofrecuencia que produce que los espines resuenen absorbiendo parte de la energía entregada por la señal. Al cesar el campo magnético los espines vuelven a su situación previa, emitiendo una señal electromagnética, descargando la energía previamente absorbida de la señal, que es lo que se recoge y procesa en la RMN. Cada tejido produce una señal diferente, según la cantidad de Hidrógeno (agua) que posee. Esto hace que haya contrastes entre la señal que procede de las distintas clases de tejidos y esta serie de contrastes se aprovecha para generar imágenes que eventualmente pueden usarse en diagnósticos.

La frecuencia f de la señal electromagnética que se registra en un aparato de resonancia magnética nuclear está dada por:

$$hf = kB$$

dónde h es la constante de Planck, B es el campo magnético que alinea los espines y k es una constante característica del isótopo que se excita en el aparato

de RMN, siendo el mas popular el H^1 para el cual la constante $k = 2.8207 \times 10^{-26} \text{ A m}^2$.

De tal forma que para un campo magnético de 1.2 T la frecuencia es:

$$f = k \frac{B}{h}$$

$$f = \frac{(2.8207 \times 10^{-26} \text{ A m}^2) (1.2 \text{ T})}{6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}}$$

$$f = 5.1084 \times 10^7 \text{ Hz}$$

la energía de cada uno de los fotones captados es:

$$E = hf$$

$$E = (6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s}) (5.1084 \times 10^7 \text{ Hz})$$

$$E = 3.3849 \times 10^{-26} \text{ J}$$

4.1 Imágenes por RMN

Las imágenes generadas por RMN son una alternativa a las generadas por otras técnicas, y se utilizan para observar tejidos blandos, siendo las exploraciones por RMN de mas frecuente uso:

- RMN de tórax
- RMN abdominal
- RMN de corazón
- RMN cerebral
- RMN lumbosacra, para observar discos y hernias discales
- RMN de rodilla

Dado a que el mecanismo físico involucrado en la generación de imágenes por RMN es diferente al de las tomografías, los contrastes que se obtienen entre los diferentes tejidos son distintos para cada aparato, eso permite que se puedan complementar cuando se usan simultaneamente o que se prefiera uno u otro según el caso que se pretenda observar.

La resolución que se obtiene en las imágenes es del orden de los 2 mm

5 La física, la medicina y el Premio Nobel

La resonancia magnética nuclear ofrece un buen ejemplo de como el desarrollo de la física eventualmente lleva a desarrollos en química, posteriormente a desarrollos en biología y finalmente a desarrollos en medicina. La historia de ese desarrollo está resumida en los 4 Premios Nobel que han sido otorgados en relación a la RMN. Por supuesto que los científicos ganadores no son los únicos que han contribuido sino solamente aquellos que han sido reconocidos por quienes otorgan los premios.

- En 1945 Felix Bloch y Edward Mills Purcell encuentran la “resonancia magnética nuclear en materia condensada” y se les concede el Premio Nobel de Física en 1952.
- En los años 60 Richard Ernst desarrolló algunos métodos para mejorar la resolución de la espectroscopía por RMN por lo cual le fue concedido el Premio Nobel de Química en 1991
- Años despues Kurt Wüthrich desarrolló una forma de determinar la estructura tridimensional de las macromoléculas biológicas en una solución, trabajo por el cual se le concedió el Premio Nobel de Química en 2002
- En los años 70 Paul C. Lauterbur y Peter Mansfield trabajaron en el desarrollo de la formación de imágenes por RMN, trabajo que los condujo a producir el primer aparato y luego mejorarlo, logrando ellos tambien ganar el Premio Nobel de Medicina en 2004.

$$\begin{array}{ccccccc} \textit{Física} & \rightarrow & \textit{Química} & \rightarrow & \textit{Química} & \rightarrow & \textit{Medicina} \\ 1952 & & 1991 & & 2002 & & 2004 \end{array}$$

Guatemala agosto de 2006