

# MATERIALES MAGNÉTICOS:

## una revolución tecnológica



El magnetismo es un fenómeno que siempre ha apasionado a la humanidad. Hoy, las diversas teorías que ayudan explicarlo están permitiendo desarrollar nuevas aplicaciones que resultan fundamentales en la actual revolución informática.

Jesús Dorantes Dávila

**E**l magnetismo es una de las áreas de estudio clásicas de la física. Es un tema que ha fascinado a la humanidad desde la antigüedad, y todavía en la actualidad no se ha entendido por completo.

La piedra imán o magnetita, un mineral de óxido de hierro, era conocida en China y en Europa desde hace 3 mil años. En Roma, el historiador Plinio hace referencia al pastor griego Magnes, quien usaba unos zapatos con punta de hierro que al hacer contacto con una piedra (la llamada piedra imán), se adhirieron a ella. Probablemente el nombre de magnetismo proviene de Magnes.

Los antiguos egipcios y los mayas también conocían la magnetita. Los pensadores griegos de aquella época trataron de explicar este fenómeno a través de teorías “animistas”, que preconcebidamente le atribuían a la magnetita poseer un “alma”.

La importancia del estudio del magnetismo es amplia e influyente tanto en la ciencia como en la filosofía. Cabe hacer notar que el primer texto científico escrito se refiere a este tema. En efecto, William Gilbert escribió *De Magnete* en 1600, y llegó a la brillante conclusión de que *Magnus magnes ipse est globus terrestris*, es decir, la “Tierra es ella misma un gran magneto”. La idea clave fue la *Orbis Virtutis*, la esfera de influencia del magneto, que inspiró a Kepler para formular sus leyes del movimiento planetario y fue sin duda un punto de partida del concepto de campo en física. La Tierra como un magneto gigante fue también un tema recurrente en los trabajos del filósofo francés René Descartes, el primero en despojar a la magnetita del “alma”. La teoría de Descartes sobre el magnetismo reconoce la imagen del campo magnético; sin embargo, no proporciona ninguna explicación sobre las fuentes del magnetismo.

### ¿DE DÓNDE PROVIENE EL MAGNETISMO?

La primera sugerencia de que existía una dimensión atómica en el magnetismo se debió a Augustin Fresnel. En su correspon-

dencia con Ampere, Fresnel sugirió que las corrientes amperianas causantes del magnetismo eran de naturaleza microscópica. Sin embargo, fue hasta 1907 cuando Pierre Weiss propuso la teoría del ferromagnetismo, basada en la suposición de la existencia de moléculas magnéticas cuyas interacciones pueden describirse empíricamente mediante un “campo molecular”.

De acuerdo con el experimento, esta teoría, combinada con la de Paul Langevin, permitió una descripción de las transiciones de fase magnética a no magnética para los sólidos. Tal parecía que el entendimiento del fenómeno del magnetismo en sólidos había, finalmente, llegado.

Sin embargo, unos años después la confusión llegó al máximo cuando Niels Bohr, en 1911, y J. H. van Leewen, en 1919, probaron un famoso teorema: “para cualquier temperatura finita, y para todo campo magnético aplicado, la magnetización neta de una colección de electrones en equilibrio térmico es cero”. Es decir, la física clásica predecía, contrariamente a las observaciones experimentales, la no existencia del magnetismo.

Esta aparente paradoja entre teoría y experimento se resolvió con el advenimiento de la mecánica cuántica y la relatividad. Las fuentes principales del magnetismo en átomos, agregados y sólidos, son las corrientes asociadas al movimiento de los electrones (magnetismo orbital) y a su momento angular intrínseco (magnetismo debido al espín). Estas propiedades son de naturaleza puramente cuántica y relativista y no pueden ser descritas, por ejemplo, como la suma de las contribuciones individuales de los electrones. Más bien, son resultado del comportamiento del conjunto de electrones en la escala de energía relevante al sistema (electrones de valencia). Consecuentemente, las propiedades magnéticas son en general muy sensibles a los detalles de las correlaciones electrónicas y a la temperatura. El descubrimiento del comportamiento cuántico y relativista ha hecho del magnetismo en sólidos un tema de investigación bastante explorado y desarrollado.

Más allá de lo anterior, los sistemas magnéticos han sido un campo fértil para probar diferentes teorías fundamentales en la física, por ejemplo la mecánica cuántica, las teorías de muchos cuerpos, y los fenómenos críticos.

## NANOESTRUCTURAS MAGNÉTICAS

En los átomos, la mayoría de los elementos de la tabla periódica presentan un momento magnético. Por el contrario, en un sólido infinito, sólo unos pocos elementos (algunos metales de transición del grupo del hierro) presentarían magnetización. Esto último es debido a la deslocalización de los electrones de valencia. En

otras palabras, el magnetismo de los átomos se debe a los electrones que ocupan orbitales localizados, mientras que los electrones responsables del magnetismo en

sólidos, particularmente en los metales de transición, son itinerantes.

Uno podría pensar entonces que estos dos estados de la materia, átomo y sólido, son casos límite, ya que el comportamiento atómico y el del sólido son intrínsecamente diferentes. La naturaleza de estos dos estados límite ha inspirado a la comunidad de los físicos dedicados al estudio de la materia condensada a llamar a los sistemas que se encuentran entre el átomo y el sólido “sistemas de baja dimensionalidad”.

Estudiar estos sistemas es fundamental, ya que es de esperarse que sus propiedades magnéticas sean muy sensibles al tamaño y al



Los sistemas magnéticos han sido un campo fértil para probar diferentes teorías fundamentales en la física

La palabra *nano*  
proviene de la palabra  
en latín para “enano”

entorno local de los átomos. Por otra parte, desde el punto de vista de la comprensión de las raíces del magnetismo, una de las metas principales es entender cómo las propiedades de los electrones localizados en un átomo cambian cuando empiezan a ser parte de un agregado de átomos y se deslocalizan, y cómo se obtiene el comportamiento del sólido infinito. Éste es, sin duda, uno de los mayores retos en el campo de la materia condensada.

En este contexto, la investigación de las propiedades magnéticas de los sistemas de baja dimensionalidad con un tamaño del orden de nanómetros (millonésimas de milímetro) como agregados atómicos, nanocadenas de átomos, etcétera, es muy importante para entender el magnetismo y, por lo tanto, para sus posibles aplicaciones tecnológicas.

Los sistemas de baja dimensionalidad son conocidos también como *nanoestructuras*. ¿Qué tan pequeñas son las nanoestructuras? La palabra *nano* proviene de la palabra en latín para “enano”. Actualmente se utiliza como prefijo de las unidades de tiempo, volumen, distancia, etcétera, e indica que es mil millones de veces más chica que la unidad que le precede. Por ejemplo, en lo que respecta a tamaño, podemos hacer los siguientes paralelismos: el tamaño de un átomo es de unas décimas de nanómetro; si ponemos juntos, uno enseguida del otro, diez átomos de hidrógeno, formarían una línea del tamaño de un

nanómetro. Las moléculas de ácido desoxirribonucleico (ADN) tienen un ancho de 2.5 nanómetros; una célula tiene un tamaño de miles de nanómetros.

En lo que respecta a la investigación básica, los estudios sobre las nanoestructuras magnéticas han revelado, en general, que sus momentos magnéticos por átomo (los que provienen del espín y del momento orbital) son mayores que los del sólido correspondiente. Esto puede relacionarse con la reducción del número de coordinación (número de átomos vecinos) y, por lo tanto, con una localización mayor del número de electrones de valencia.

Por otro lado, cuando estas nanoestructuras son inmersas en una matriz no magnética, sus momentos magnéticos por átomo son menores que los del sólido. Esto es debido a la hibridación de los orbitales de la nanoestructura con la matriz. En el caso de una nanoestructura depositada en una superficie, los resultados no siguen una tendencia general, ya que aquí existe una competencia entre la reducción del número de coordinación y los efectos de la hibridación. Otro resultado importante obtenido en los últimos años es el descubrimiento de que las propiedades magnéticas de los ferromagnetos dependen de la orientación de la magnetización con respecto a la estructura geométrica del sistema.

Esto se manifiesta a través de la llamada energía de anisotropía magnética, definida como la diferencia de energía entre una dirección dada de magnetización de más baja energía, llamada también eje fácil, y la de otra con energía más alta. En las nanoestructuras, la energía de anisotropía magnética es varios órdenes de magnitud mayor que en los sólidos correspondientes. Más aún, esta anisotropía es una de las características principales de un material magnético ya que determina la orientación de la magnetización a bajas temperaturas y su estabilidad en el caso de un dominio magnético. Esta propiedad es crucial en aplicaciones tecnológicas como la grabación magnética o los dispositivos de memoria, en los cuales la orientación de la magnetización se escoge en alguna dirección precisa.

Desde el punto de vista teórico, quizá el reto principal que enfrentan los investigadores consiste en una descripción de las propiedades magnéticas considerando las correlaciones electrónicas (efectos de muchos cuerpos) y su dependencia de la temperatura. En este sentido, existen muchas preguntas abiertas que es necesario responder para lograr el entendimiento y el control de estas nanoestructuras. Por ejemplo, la formación de momentos localizados y su dependencia de la temperatura

(efecto Kondo), la dependencia de la magnetización de las nanoestructuras con el tamaño y la temperatura de Curie (temperatura donde ocurre la transición de material magnético a no magnético), la dependencia de la anisotropía magnética respecto a la temperatura, y la transición de magnetismo localizado a itinerante. Desde el punto de vista de las aplicaciones tecnológicas, es importante el desarrollo del llamado “transporte polarizado de espín”, es decir, transporte de portadores de carga cuyo espín está polarizado.

## APLICACIONES DE LOS MATERIALES MAGNÉTICOS

¿Cómo sería nuestra vida diaria sin los imanes? Los materiales magnéticos juegan un papel esencial en muchos aspectos cotidianos, por ejemplo en generadores de potencia, motores eléctricos, sensores en automóviles, aparatos domésticos como refrigeradores, etcétera.

En un automóvil podemos encontrar aproximadamente treinta dispositivos magnéticos. Sin embargo, las aplicaciones más visibles y de mayor impacto en la vida moderna se encuentran en la industria electrónica. Esto es debido sin duda a los avances recientes en la ciencia y la tecnología de materiales nanoestructurados. Actualmente es difícil imaginar un mundo sin computadoras o sin aparatos de sonido y video. En estos aparatos juega un papel primordial la grabación magnética, patentada por primera vez por el ingeniero danés Valdemar Poulsen en 1898. Hoy la industria magnética de grabación es, sin lugar a dudas, una de las más importantes desde el punto de vista económico.

De hecho, esta industria es tan importante como la de los dispositivos electrónicos derivados de los semiconductores. En 1956, la compañía IBM desarrolló un dispositivo con capacidad para almacenar información con una densidad de 2 *kilobytes* por pulgada cuadrada. El *byte* magnético es la unidad que se usa para medir la capacidad de almacenar información en los dispositivos de grabación. En la actualidad puede almacenarse información a una densidad de 14 *gigabytes* (millones de *bytes*) por pulgada cuadrada, es decir, siete millones de veces más que la densidad obtenida hace aproximadamente 45 años.

Los materiales magnéticos de interés actual son los de escala nanométrica. Efectivamente, uno espera que las nanoestructuras sean sistemas ideales en los cuales puedan manipularse y estudiarse las interacciones magnéticas. En este sentido, la



Los materiales magnéticos de interés actual son los de escala nanométrica

## Una de las más esperadas aplicaciones es la de la creación de “computadoras cuánticas”

creación de materiales con monodominios magnéticos (una sola zona magnética, continua e ininterrumpida a todo lo largo del material) será posible sin la complicación de los dominios múltiples separados por regiones, donde cada dominio tiene una orientación diferente. La caracterización de tales estructuras ha revelado fenómenos magnéticos nuevos y fascinantes. Estamos, por lo tanto, iniciando ya la revolución de la magnetoelectrónica.

Existen numerosas aplicaciones de los materiales magnéticos, como sensores, memorias electrónicas, etcétera. Sin embargo, desde el punto de vista económico, la aplicación más significativa es la tecnología involucrada en la industria de la grabación de información. Esta industria maneja más de cien mil millones de dólares al año. La mayor parte de esta cantidad proviene de los discos duros magnéticos. El almacenamiento de datos produce 60 por ciento de las ganancias, y el restante 40 por ciento proviene de las cintas de video y audio.

El avance más significativo en los discos magnéticos es el uso de cabezas magnetorresistivas, como sensores para leer los discos. El fenómeno de magnetorresistencia gigante en materiales ferromagnéticos es uno de los descubrimientos que mayor influencia han tenido en la industria magnética. Este fenómeno consiste en el cambio en la resistencia de un ferromagneto cuando se aplica un campo magnético externo suficientemente intenso como para cambiar la dirección de su magnetización

interna. Este cambio está relacionado con la anisotropía en la magnetorresistencia. Los materiales en los que puede manipularse la magnetorresistencia están formados por capas alternas de un material ferromagnético y uno no magnético, depositadas en un substrato aislante. La resistencia que se mide cuando la corriente fluye paralela a las capas es mucho mayor cuando los momentos magnéticos en las capas alternantes están alineados de forma antiferromagnética, y es pequeña cuando estos momentos se alinean en forma paralela.

Por otro lado, se han logrado avances importantes en la grabación de la información de alta densidad con la utilización de la grabación perpendicular, en la que los dominios magnéticos se encuentran magnetizados perpendicularmente a la superficie.

En el futuro, una de las más esperadas aplicaciones es la de la creación de “computadoras cuánticas”, en las cuales los *bytes* y *gates* serán implementados al nivel de espines individuales, de manera que sean posibles cálculos que hagan uso de los efectos cuánticos involucrados en la propia computadora.

En conclusión, el magnetismo en nanoestructuras presenta uno de los retos más importantes de la investigación en física, y seguramente continuará revelando nuevos e interesantes fenómenos, que serán sin duda de fundamental importancia en el entendimiento teórico y en las aplicaciones tecnológicas de los materiales magnéticos.

---

**Jesús Dorantes Dávila** es doctor en física por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinvestav) del IPN en 1984, y tiene como especialidad la física del estado sólido, particularmente el estudio de las propiedades electrónicas de las nanoestructuras magnéticas. Desde 1990 es profesor investigador del Instituto de Física de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Recibió el Premio de Investigación Científica de Ciencias Exactas de la Academia Mexicana de Ciencias.