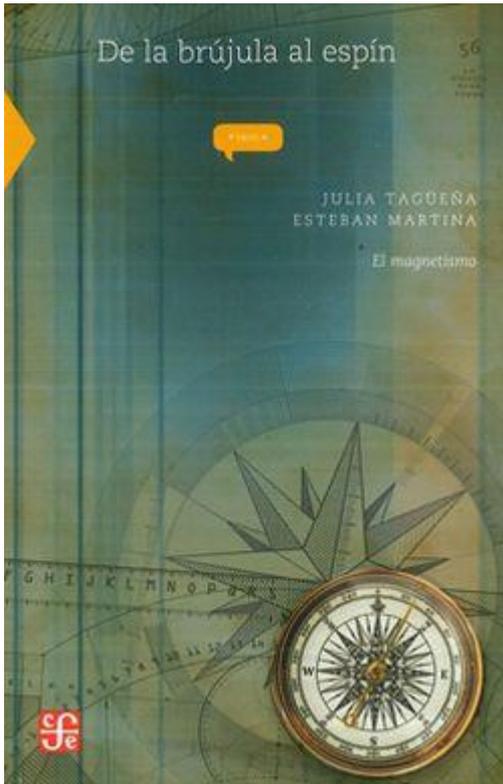


Para iniciar este bonito tema de **MAGNETISMO**, haremos una lectura. Se trata del Capítulo I de la siguiente obra de divulgación:



De la brújula al espín: El magnetismo
Tagüera, Julia y Esteban Martina

ISBN: 9789681669003 | Clave FCE: 046056R

Como **Ejercicio 3 de la Serie 2**, contestará la siguiente pregunta:

Mencione dos hechos sobre magnetismo que le hayan llamado más la atención sobre la lectura que realizó.

La extensión máxima para este texto, escrito a mano, es de media cuartilla.

¡ Espero que disfrute de esta lectura !

P R E F A C I O

El electromagnetismo es uno de los pilares más importantes de la ciencia y la tecnología modernas. No es posible separar el magnetismo de su relación con la electricidad, y el cúmulo de conocimientos en ambas áreas es enorme. Ante la imposibilidad de ofrecer una visión a la vez completa y profunda de tan vasto tema, hemos escogido presentar una visión panorámica.

Expondremos las bases tanto macroscópicas como microscópicas de la teoría, algunas aplicaciones del magnetismo, así como una revisión histórica de su desarrollo. Es difícil concebir el efecto que sobre la tecnología ha tenido el electromagnetismo y cómo los avances logrados han incidido e inciden en nuestra vida cotidiana. Es por eso que consideramos fundamental que el público en general, sobre todo la gente joven, conozca las teorías que explican el funcionamiento de muchos de los aparatos e instrumentos que usa continuamente.

Esperamos que este libro despierte el interés de los que lo lean y los incite a profundizar más en el estudio del magnetismo. Hay que añadir que esta ciencia es una rama de la física no terminada aún, sino que se encuentra en plena expansión, y que aunque se ha recorrido un largo camino desde que el hombre empezó a usar la brújula, todavía quedan muchas interrogantes.

JULIA TAGÜEÑA, ESTEBAN MARTINA

Ciudad Universitaria, mayo de 1986

I. ASPECTOS HISTÓRICOS: ORÍGENES Y DESARROLLO DE LA TEORÍA DEL MAGNETISMO

INTRODUCCIÓN: LA ANTIGUA CIENCIA DEL MAGNETISMO

Electricidad y magnetismo son aspectos diferentes de un mismo fenómeno. Cuando el científico medita sobre las propiedades y el movimiento de las cargas eléctricas, ambos fenómenos aparecen en forma conjunta. Sin embargo, la íntima relación entre electricidad y magnetismo sólo se comenzó a estudiar en forma sistemática a partir del siglo pasado, y aún ahora el lego en la materia piensa que estos fenómenos no tienen nada que ver entre sí, a pesar de que vive rodeado de aparatos que muestran esta interrelación. Esto explica el desarrollo del magnetismo como ciencia, ya que en la Antigüedad y hasta el siglo XVIII se estudiaba el magnetismo de manera independiente, es decir, sin tomar en cuenta a la electricidad.

Fueron probablemente los griegos quienes primero reflexionaron sobre las maravillosas propiedades de la magnetita, un mineral de hierro que incluso en estado natural posee una profunda atracción por el hierro. De hecho, Tales de Mileto alrededor del 600 a.C. ya habla del imán en forma detallada. Esto no excluye que éste ya se conociese en el resto del mundo. Por otra parte, Platón (428-348 a.C.) en su diálogo *Ión* hace decir a Sócrates que la magnetita no sólo atrae anillos de hierro, sino que les imparte un poder similar para atraer a otros anillos. De esta manera se forman cadenas de anillos colgados unos con respecto a otros. Estos son los llamados anillos de Samotracia, isla griega donde los mineros habían descubierto este fenómeno que en la actualidad llamamos magnetización por inducción. Diversas leyendas envuelven los orígenes del descubrimiento del magnetismo. De acuerdo con una de ellas, el pastor Magnes (de allí magnetismo) se quedó pegado a la tierra, ya que los clavos de sus zapatos fueron atraídos por la magnetita. Según otra versión, el nombre magnetismo viene de Magnesia, región de Grecia donde abunda el mineral. Otras leyendas nos hablan de estatuas de hierro suspendidas en el aire debido a su colocación en domos magnéticos.

Siendo los griegos un pueblo que se interesaba por la Naturaleza, no es de extrañar que surgieran teorías para explicar las maravillas del magnetismo. Sin embargo, no debe pensarse que el verbo explicar tenía el mismo sentido para ellos que para nosotros. Para los griegos explicar significaba encuadrar los fenómenos naturales dentro de un esquema filosófico preconcebido y no investigarlos para crear una teoría con poder predictivo.

De esta manera era lógico que surgieran diversas escuelas tales como los animistas, los mecanicistas y otras, entre las que destacaban las que sostenían que el magnetismo se debía a emanaciones o "efluvios". De hecho, uno de los pasajes sobre el magnetismo más extenso que se encuentra en la literatura grecorromana es el de Lucrecio Caro, que en el sexto libro de *De Rerum Natura* (55a.C.) un vasto poema épico, describe las maravillas del imán con base en las teorías de Epicuro y Demócrito.

Puesto que éstos eran los fundadores de la teoría atómica, era de esperarse que el magnetismo se atribuyera a que el imán exhala partículas que penetran a través de los poros del hierro y que, al crearse el vacío, hacen que el hierro se sienta atraído al imán. Lucrecio consigue además dar una explicación ingeniosa de por qué al poner un objeto de bronce entre el hierro y el imán ocurre una repulsión. Por supuesto, las "explicaciones" de Lucrecio no son tales a la luz de la ciencia actual. Sin embargo, demuestran el poder especulativo de un mundo precientífico y están sorprendentemente libres de supersticiones tan en boga entonces (¡y ahora!).

El uso de la "piedra magnética" como brújula se adscribe a los chinos. De acuerdo con ciertas leyendas, Hoang-ti, personaje mítico, construyó una "carroza del sur" (véase figura.1)

Se dice que los chinos utilizaban una especie de brújula en el siglo ^{XII} a.C., pero hasta el final del siglo ^{XII} d. C. no se tiene una clara referencia a un compás marítimo.

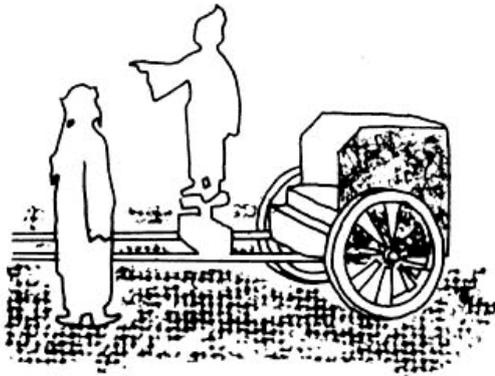
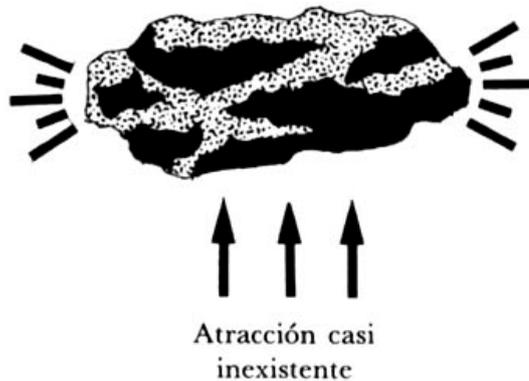


Figura 1. La leyenda dice que Hoang-ti, fundador del Imperio chino, perseguía con sus tropas a un príncipe rebelde y se perdió en la niebla. Para orientarse construyó esta brújula en la cual la figura de una mujer siempre apuntaba al sur. Así atrapó a los rebeldes.



Atracción casi
inexistente

Figura 2. La atracción magnética se concentra en los extremos del imán.

Para ese entonces los europeos habían ya desarrollado una brújula, pues ya en 1200 d.C., Neckam of St. Albans muestra agujas pivotadas que marcan la ruta en su libro *De Utensilibus*. Aproximadamente en la misma época, Guyot de Provins, un trovador de la corte de Barbarroja, se refiere en la llamada *Bible Guyot* al empleo de una piedra que se utiliza para tocar a una aguja (véase figura 2). Ésta se montaba sobre una paja que flotaba y podía girar libremente. El uso de esta brújula de flotación era ya común en el siglo ^{XIII} d. C.

El primer tratado europeo importante sobre el magnetismo se debe a Pedro Peregrino de Maricourt, quien el "8 de agosto del año del Señor 1269" escribió su celebrada *Epístola a Sygerius de Foucaucort, soldado*. Éste es el primer informe científico (en el sentido moderno de la palabra) del que poseemos noticias. La carta es notable, ya que el relato de los experimentos es lúcido y sucinto. Peregrino distingue claramente los polos de un imán permanente; observa que el norte y el sur se atraen y que polos iguales, norte por ejemplo, se repelen (véase figura 3); describe cómo, si se fragmenta un imán, se crean otros polos, y discute sobre la aguja pivotada. Asevera además que es de los polos magnéticos de la Tierra de donde los polos del imán reciben su virtud.

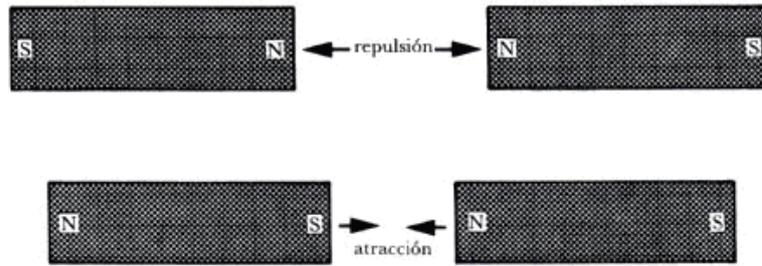


Figura 3. Polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen.

Después de Peregrino, varios estudiosos como Baptista Porta o Thomas Browne realizaron experimentos que, aunque alejados de la física moderna, coadyuvaron a depurar de supercherías los conocimientos que poco a poco se iban acumulando sobre los fenómenos magnéticos. Entre éstos sobresale la variación de la declinación de la brújula con la latitud y la inclinación de la aguja imantada, la cual fue observada por Hartmann von Nürnberg en 1544 y descrita por Robert Norman, un fabricante de agujas para brújula.

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA EN EL MAGNETISMO

Lo que podríamos llamar la etapa precientífica del magnetismo termina y culmina con la aparición de la imponente figura de William Gilbert de Colchester (1544-1603), quien fue el verdadero fundador de la ciencia del magnetismo. Su *Magnete Magnetisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*, usualmente y por fortuna conocido como *De Magnete*, fue publicado en 1600 y puede considerarse como uno de los trabajos claves de la revolución científica que se llevaba a cabo por esas épocas. Gilbert estudió en Cambridge y, después de viajar por el continente, practicó como médico en la corte de la reina Isabel I.

Gilbert fue de los primeros "filósofos naturales" que hizo hincapié en el método experimental y que lo utilizó para ahondar en el conocimiento del magnetismo. En los seis libros de que consta *De Magnete*, Gilbert describe múltiples fenómenos, entre los cuales destaca el cómo la atracción entre el hierro y la magnetita imantada puede ser aumentada "armando" la magnetita, esto es, poniendo casquetes de hierro en las juntas de la piedra, tal y como se muestra en la figura 4. Esto hace que el peso que puede ser levantado aumente en un factor de cinco. Observó además que la atracción se concentra en los extremos de la magnetita. Así, Gilbert detalla cómo se pueden hacer imanes por medio de tres métodos: tocando objetos imantados; por deformación plástica; y fabricando barras de hierro, calentándolas y dejándolas enfriar. De hecho, estos métodos fueron los que se usaron hasta 1820. Observó también que el calor destruye el magnetismo.

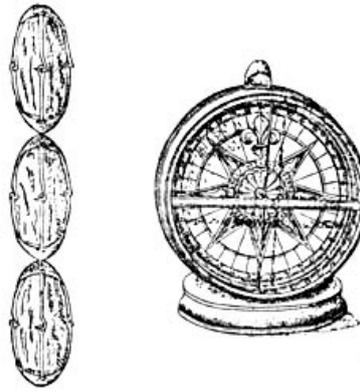


Figura 4. Imanes permanentes y círculo inclinado como se presentan en *De Magnete* de Gilbert.

Como puede colegirse de la anterior exposición, Gilbert era un gran experimentalista poco afecto a la especulación. Sin embargo, en el último libro de *De Magnete* presenta sus teorías y trata de encuadrar el magnetismo en el sistema de Copérnico. Uno de sus éxitos fue el de deducir las propiedades de atracción de polos opuestos y otro el de que la Tierra se comporta como si tuviera un imán enterrado en ella (Figura 5).

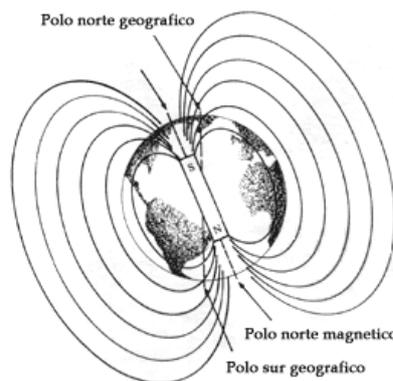


Figura 5. La Tierra se comporta como si tuviera un gran imán enterrado.

En el otro extremo se encuentra el gran filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1659), quien no toma muy en cuenta los experimentos pero introduce de lleno el racionalismo en la ciencia. La primera teoría del magnetismo se presenta en la cuarta parte de sus *Principia* y considera que el ferromagnetismo, esto es, la existencia de imanes permanentes, deriva del magnetismo terrestre. Su teoría de vórtices, que no es más que una nueva versión de los efluvios del mundo clásico, no resiste una comparación con los experimentos de Gilbert, pero ejerció una influencia considerable en su época. Descartes marca aparentemente el fin de la influencia metafísica en la ciencia. Por un periodo su idea de que la física puede ser deducida de primeros principios improbables parecerá completamente muerta. En cierto sentido, su mecanicismo es parecido al de los griegos. Los mecanicistas que lo siguieron tomaron un punto de vista empírico y descriptivo que no deseaba penetrar en la esencia del objeto estudiado. Sin embargo, el paso clave ocurre cuando la nueva ciencia adopta a las matemáticas como su lenguaje. Este conjunto de primeros principios, si así pueden llamarse, reemplaza a la metafísica en la descripción del universo. Galileo ya lo había dicho en 1590: "La filosofía está escrita en un gran libro siempre abierto ante nuestros ojos, pero uno no puede entenderlo sin entender su lenguaje y conocer los caracteres en que está escrito, esto es, el lenguaje matemático."

Este nuevo punto de vista estimula a que los científicos cuantifiquen sus observaciones. En magnetismo, el monje Marsenne, un amigo de Descartes, cuantificó las

observaciones de Gilbert. Hacia 1750 John Michell inventó la balanza de torsión y pudo constatar que "la atracción o repulsión de los imanes decrece cuando los cuadrados de la distancia entre los respectivos polos aumenta". Estas conclusiones, que no concordaban con la teoría de vórtices, dieron origen a nuevas teorías del magnetismo, algunas basadas en el tema de fluidos. La teoría de un fluido propuesta por Gray y Franklin para explicar el flujo de carga eléctrica de un cuerpo a otro fue aplicada al magnetismo por Franz María Aepinus en 1759. Su libro *Tentamen Theoria Electricitates et Magnetismi* publicado en San Petersburgo dio el golpe de gracia a las teorías basadas en el concepto de efluvio. El descubrimiento por Du Fay en 1733 de que había dos tipos de electricidad hizo que también se propusiera una teoría de dos fluidos para el magnetismo en 1778 por el sueco Wilche y el holandés Brugmans.

El máximo representante de la teoría en esta época fue Charles Coulomb (1736-1806), quien realizó experimentos cruciales con la balanza de torsión para probar la ley de interacción entre cargas y modificó la teoría de dos fluidos. Coulomb hizo la clara distinción entre cargas eléctricas y cargas magnéticas, pues estas últimas, como ya se mencionó, nunca aparecían desligadas, sino en pares de polos magnéticos. Simon Denis Poisson (1781-1840), un brillante matemático, introdujo el concepto de potencial y desarrolló la teoría de la magnetostática. Tanto Poisson como Coulomb rechazaron cualquier intento de especulación acerca de la naturaleza de los fluidos eléctrico y magnético. Esta actitud positivista prevaleció en forma determinante en la ciencia francesa y, como veremos posteriormente, fue una de las causas por las que los físicos ingleses, y no los franceses, realizaron una síntesis de los fenómenos electromagnéticos.

En resumen, al final del siglo XVIII las características principales de los fenómenos magnetostáticos habían sido descubiertas y se interpretaban con base en la teoría de dos fluidos, combinados con el concepto de acción a distancia implícito en la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Es claro que tanto la fuerza eléctrica como la magnética y la gravitatoria se distinguen de las llamadas fuerzas de contacto, como lo son la fricción o un simple empujón, en el hecho de que actúan aun cuando los cuerpos no se toquen. De esta manera se empezó hablando de la mencionada acción a distancia, pero el lenguaje moderno se frasea en términos de los llamados "campos", concepto en el que profundizaremos más adelante. Matemáticamente se había avanzado considerablemente con las investigaciones de Poisson, quien, entre otras cosas, discutió la inducción magnética. La construcción de imanes permanentes había alcanzado un alto grado de refinamiento en Inglaterra (Figura 6).

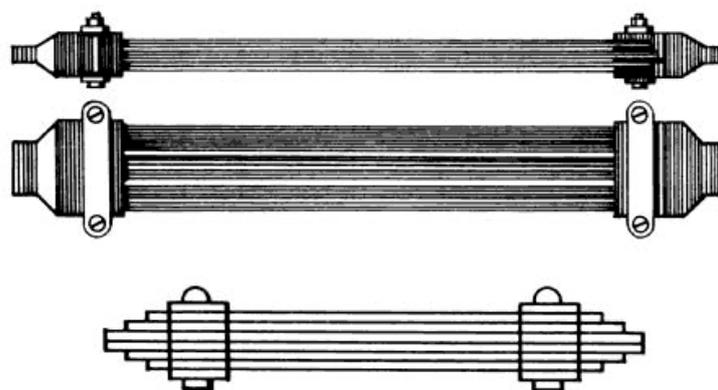


Figura 6. Diferentes tipos de imanes permanentes.

Así pues, el escenario estaba preparado para la irrupción de conocimientos sobre el electromagnetismo que el naciente siglo XIX estaba por traer.

Por una feliz coincidencia, el punto culminante en el desarrollo del magnetismo como una ciencia separada fue alcanzado justamente cuando se hacían los primeros descubrimientos que lo conectaban con la electricidad. Por supuesto, desde hacía tiempo se había notado que la brújula cambiaba de dirección cuando los rayos en una tormenta caían cerca de un barco. Sin embargo, fue solamente a principios del siglo XIX cuando se empezó a investigar la influencia que tenía la electricidad sobre una aguja magnética. Estos experimentos fueron estimulados por la invención de la pila voltaica alrededor de 1800 y, ya desde 1801, el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) estaba buscando la interrelación entre una corriente eléctrica y una aguja magnética. No fue sino hasta 1819, y por accidente, cuando notó que la aguja magnética se movía cuando pasaba corriente por un alambre *paralelo* a la misma. Esto era algo sorprendente, pues nunca se había esperado una fuerza transversal. Oersted publicó una memoria sobre sus experimentos que causó gran sensación. Dichos experimentos fueron reproducidos por Arago ante la academia francesa. Siete días después del reporte de Arago (el 18 de septiembre de 1820), André Marie Ampère (1755-1836) sugirió que el ferromagnetismo era originado por corrientes eléctricas internas y que éstas fluían perpendicularmente al eje del imán.

Los físicos ingleses les iban pisando los talones a sus colegas franceses, pues ya el 16 de noviembre Sir Humphry Davy reportaba resultados similares a los de Arago. De esta manera se inició una especie de competencia entre ambos lados del Canal de la Mancha para establecer la prioridad de los resultados.

En 1813, Michael Faraday (1791-1867), contando entonces con 23 años y siendo aprendiz de encuadernador, fue contratado por Davy como su ayudante en la Royal Institution. Faraday, sin lugar a dudas uno de los grandes genios de la física, tenía un tremendo poder de visualización, el cual, al combinarse con su gran paciencia y habilidad observacional, lo llevó a una vida de descubrimientos casi sin paralelo en la historia de la ciencia. Así, en 1831 descubrió la inducción electromagnética. Indudablemente fue su capacidad de ver las líneas de fuerza que salían del imán lo que le permitió observar este fenómeno en diez días de febril investigación. En sus propias palabras: "... se describieron y definieron ciertas líneas alrededor de una barra imán [aquellas que se visualizan esparciendo limaduras de hierro en la vecindad de éste, como se muestra en la figura 7] y se reconocieron como descripción precisa de la naturaleza, condición, dirección e intensidad de la fuerza en cualquier región dada, dentro y fuera de la barra. Esta vez las líneas se consideraron en abstracto. Sin apartarse en nada de lo dicho, ahora emprendemos la investigación de la posible y probable existencia física de tales líneas..." y concluye diciendo: "la cantidad de electricidad que se vuelve corriente es proporcional al número de líneas de fuerza interceptadas."

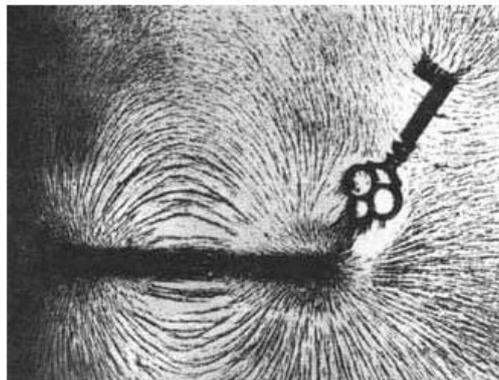


Figura 7. Limadura de hierro espolvoreado sobre un papel, el cual se encuentra sobre un imán

Faraday estableció claramente que las sustancias magnéticas interactúan unas con otras mediante las líneas de fuerza, hoy llamadas líneas de campo, y no mediante una "acción a distancia". Sin embargo, suponía que el espacio libre era un medio que soportaba las fuerzas y deformaciones que permitían la interacción magnética y eléctrica.



Figura 8. M. Faraday y J. C. Maxwell.

El genio culminante de la física del siglo XIX, James Clerk Maxwell (1831-1879), tradujo estas ideas a un lenguaje matemático preciso, y en su monumental tratado aparecido en 1873 publicó las ideas de Faraday, sus propias ecuaciones y todo lo hasta entonces conocido en la materia. Maxwell derivó cuatro ecuaciones que resumen todas las investigaciones hechas por sus predecesores y que han servido como base a todo el desarrollo tecnológico en este campo.

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell mostraron que una onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz. Heinrich Hertz, en 1888, mostró que estas ondas eran precisamente ondas de luz, lo que significó un paso gigantesco al mundo moderno. Esto lo discutiremos en detalle en el próximo capítulo. Ahora sólo queremos mencionar que una de las influencias impredecibles de estas ecuaciones se hizo patente al crear Einstein la teoría de la relatividad como un intento de dar a las fuentes que producían los campos las propiedades de invariancia que Maxwell había encontrado para los campos magnético y eléctrico.

APARICIÓN DE LOS CONCEPTOS MOLECULARES. TIPOS DE MAGNETISMO

En forma complementaria a los grandes descubrimientos y explicaciones fundamentales delineados en los párrafos anteriores, que tratan sobre todo de la interacción entre imanes y corrientes, el estudio de los imanes y materiales magnetizados se desarrollaba rápidamente. En 1733 y 1755 se observó que el cobalto y el níquel, respectivamente, tenían también propiedades magnéticas. Tanto estos metales como el hierro se quedaban magnetizados aun cuando el campo magnético producido por un imán o corriente se retirase, pero no fue sino hasta 1845 cuando, con el uso de imanes electromagnéticos (el primero fue introducido por Sturgeon en 1825), Faraday demostró sin lugar a dudas que el magnetismo no estaba confinado sólo al hierro. Éste utilizó los nuevos imanes para estudiar la relación entre luz y magnetismo, descubriendo el efecto que lleva su nombre. Además, mostró que todas las sustancias son magnéticas en cierto grado, pero que unas, las paramagnéticas, son atraídas por el campo externo y que otras, las diamagnéticas, se colocan paralelas al mismo y son repelidas por un imán. De la misma manera, el hierro y otras sustancias pueden ser consideradas como pertenecientes a otra clase, los ferromagnetos (imanes permanentes). La distinción entre materiales paramagnéticos y diamagnéticos tuvo una extraordinaria importancia teórica. Ampère, con gran clarividencia, sugirió en una carta a Fresnel en 1821 que el origen de las corrientes ferromagnéticas se encontraba en las moléculas que actuaban como pequeños imanes que se orientan cuando se aplica

un campo. W. Weber desarrolló esta teoría y elaboró un modelo de corrientes moleculares magnéticas que producen el magnetismo, explicando así el diamagnetismo, el paramagnetismo y el ferromagnetismo. A finales del siglo XIX, Ewing (1890) diseñó algunos experimentos que explicaron satisfactoriamente algunos fenómenos, pero que condujeron a un callejón sin salida que sólo la moderna mecánica cuántica pudo resolver. En efecto, las características fundamentales de los ferromagnetos no se entendieron hasta que en 1929 Dirac y Heisenberg aplicaron los conceptos de la nueva física a tan fascinante problema.

LA TEORÍA DEL ELECTRÓN

La existencia de los electrones, o sea cargas elementales discretas, fue una predicción teórica. Faraday, Maxwell y muchos otros habían ya notado la posibilidad de que la carga estuviera dada en unidades discretas, pero esto no tuvo una repercusión inmediata en la química. La primera sugerencia concreta fue hecha por G. Johnstone Stoney en 1874, que fue quien le dio el nombre al electrón en 1891. De hecho, Stoney se basó en las leyes de la electrólisis de Faraday, a las que interpretó a la luz de la teoría atómica, para llegar a tal conclusión. Fue, sin embargo, el gran físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) quien creó la primera teoría del electrón en forma plenamente coherente y consistente. La teoría del electrón fue aplicada primero a fenómenos ópticos. Recordemos, con todo, que había una conexión entre magnetismo y luz ya puesta en evidencia por Faraday. Él mismo había intuido que había una modificación de la frecuencia de la luz (esto es, de su color) en presencia de un campo magnético. Sin embargo, con los medios a su disposición no pudo detectar ningún efecto, y no fue sino hasta 1896 que Zeeman pudo observar este fenómeno.

Algunos de sus resultados se podían explicar mediante la teoría de Lorentz, pero nuevamente la solución final esperaba el arribo de una teoría más completa.

A pesar de ello, la teoría sirvió para explicar los resultados de Pierre Curie (1859-1906), esposo de la famosa Madame Curie. En 1895, Curie midió la susceptibilidad magnética de varias sustancias, que no es otra cosa que la razón entre la magnetización y el campo aplicado cuando éste es muy pequeño. Curie notó que en los paramagnetos la susceptibilidad dependía del inverso de la temperatura. En 1905 Langevin tomó las ideas de Ampère y Weber y consideró que las corrientes propuestas por ellos eran debidas a electrones circulando en las moléculas. Con estos conceptos pudo explicar la ley de Curie y relacionar el diamagnetismo con el efecto Zeeman. Un avance fundamental tanto en el magnetismo como en su repercusión en la física fue hecho en 1907 cuando P. Weiss introdujo el concepto de campos moleculares intrínsecos y creó de golpe la primera teoría moderna del magnetismo.

El campo intrínseco de Weiss es proporcional a la magnetización, y la generalización que resulta de la teoría de Langevin permite predecir el comportamiento de muchos paramagnetos que no se ajustaban a la ley de Curie, además de permitir que el ferromagnetismo tuviera una explicación molecular. Sin embargo, la teoría de Weiss dejaba abierta la interrogante acerca de qué era realmente el campo intrínseco, el cual por otra parte era tremendamente grande.

El punto final a lo que podríamos llamar la teoría clásica del magnetismo fue puesto por el gran Niels Bohr (1885-1962) en su tesis doctoral de 1911. Como estos documentos en general permanecen ocultos en los archivos, la física J.H. Van Leeuwen sacó a relucir el punto nuevamente, ocho años después de la tesis de Bohr. El así llamado teorema de Bohr-Van Leeuwen conduce al siguiente resultado basado en la física clásica: "A cualquier temperatura finita y para todo campo electromagnético aplicado que sea finito, la magnetización neta de un conjunto de electrones es cero." Este sorprendente resultado marca el final de un mundo y el comienzo del reino de la mecánica cuántica y los fenómenos cooperativos.

Aunque la teoría del electrón había sido aplicada al magnetismo con cierto éxito, había ciertas inconsistencias en el tratamiento de varios problemas, tal y como mencionamos anteriormente. En 1900, Planck sugirió su revolucionaria idea de que la materia (que él suponía consistía en resonadores) poseía y emitía energía en forma discreta. Más precisamente, esta energía es un múltiplo entero de una unidad, el *cuanto*, el cual es, a su vez, proporcional a la frecuencia de la radiación emitida o absorbida. La constante de proporcionalidad está dada por la famosísima constante de Planck. En 1905, Einstein propuso que la radiación misma estaba cuantizada independientemente de la materia y que, por lo tanto, la luz se propagaba como una partícula. Una nueva etapa de la mecánica cuántica fue iniciada por Niels Bohr en 1913 quien propuso que los electrones en el átomo giran alrededor del núcleo sin emitir radiación y que su movimiento está relacionado con la constante de Planck. La transición de un electrón de un estado a otro se acompaña de la emisión o la absorción de radiación cuantizada. El momento angular es la cantidad física que describe la cantidad de movimiento que realiza una partícula que gira respecto a un punto dado, en este caso respecto al núcleo atómico. Desde el punto de vista del magnetismo, el hecho de que el momento angular esté cuantizado es muy importante, ya que el momento magnético atómico depende del momento angular y, por lo tanto, también está cuantizado.

Esto fue confirmado por O. Stern y W. Gerlach en 1922 al hacer pasar un haz atómico a través de un campo magnético inhomogéneo, el cual se dividió en varios haces. En 1921 Compton propuso que el electrón poseía una rotación intrínseca sobre su eje y un momento magnético propio además del momento angular. En un famoso artículo, en 1925, Uhlenbeck y Goudsmit establecieron definitivamente que el espín del electrón existe y que es igual a la mitad de la constante de Planck.

Los desarrollos antes mencionados están asociados a la llamada mecánica cuántica "antigua", donde no existía una dinámica subyacente que permitiera deducir las características cuánticas de la radiación y la materia. La segunda fase de la mecánica cuántica fue iniciada por De Broglie en 1923, quien sugirió que el fenómeno ondulatorio está asociado con partículas materiales. Así se tiene que la mecánica cuántica atribuye propiedades de onda a las partículas y propiedades de partículas a la radiación (ondas electromagnéticas). En 1926, la nueva mecánica cuántica florece al establecer Heisenberg y Schrödinger sus ecuaciones dinámicas, las que más tarde Dirac generalizó para incluir la relatividad y el espín de las partículas. El efecto de la mecánica cuántica en el magnetismo ha sido impresionante: en primer lugar, ha permitido conectar los fenómenos macroscópicos con las propiedades del átomo y las moléculas, y en segundo, con una influencia aún más directa, ha sido posible explicar las interacciones entre los portadores elementales de momento magnético, tan importantes en ferromagnetismo.

Fue así que en 1927 Heisenberg explicó el ferromagnetismo por medio de lo que se llama "fuerzas de intercambio", fuerzas que son puramente cuánticas y de cuya existencia la física clásica ni siquiera sospechaba. Como una lista de todas las contribuciones de la nueva mecánica para la explicación de diversos fenómenos es imposible en esta introducción, nos conformaremos con mencionar a científicos como Heisenberg, Dirac, VanVleck, Frenkel, Slater, Peierls y otros, quienes ya para 1930 habían desarrollado los fundamentos del magnetismo y habían empezado los cálculos, que continúan hasta la fecha, sobre las propiedades magnéticas de los más diversos materiales. Para esto, el desarrollo del magnetismo como un fenómeno cooperativo ha sido también vital.

EL MAGNETISMO COMO FENÓMENO COOPERATIVO

Al mismo tiempo que los fundamentos del magnetismo basados en la mecánica cuántica se volvían cada vez más firmes, surgían nuevos experimentos que daban resultados misteriosos. Una de las preguntas principales era por qué el hierro no es espontáneamente ferromagnético. Weiss propuso que en un sólido existen dominios en varias direcciones y que por eso no existe un campo molecular en una dirección dada.

En 1930 tuvo lugar la Sexta Conferencia Solvay sobre magnetismo. Dos años después apareció el libro de Van Vleck y en 1934 el de Stoner. Estos pueden considerarse como los dos libros de mayor influencia en ese campo en aquel tiempo. Sin embargo, el magnetismo como fenómeno cooperativo recibía poca atención y parecía que la teoría de Weiss era la última palabra.

Esto era sorprendente, pues ya en 1925 Ising había propuesto su modelo para explicar el ferromagnetismo: los espines están alineados en intervalos regulares en una dimensión y cada espín puede tomar un valor + o - (Figura 9). Si la interacción es de corto alcance, la temperatura de Curie, a la que la magnetización se hace cero, es también cero.

¿Significaba esto que se necesitan fuerzas de largo alcance para explicar el magnetismo? En 1929 Dirac, tomando una idea de Pauli, propuso que la interacción entre espines electrónicos es el ingrediente esencial en la interacción magnética y que por lo tanto las fuerzas amperianas podían ser despreciadas. En 1930, Bloch y Slater hallaron las llamadas ondas de espín y demostraron que el modelo de Ising fallaba por ser unidimensional y no por su origen cuántico "a la antigua". En 1932 Neél propuso el antiferromagnetismo para explicar las propiedades del cromo y del magnesio. Para esto, Neél propuso dos redes que compensan sus interacciones. El estudio de múltiples fenómenos prosigue hoy en día con gran fuerza y, sin lugar a dudas, el estudio microscópico del magnetismo puede considerarse como una de las ramas más activas de la física moderna. Profundizaremos en los aspectos microscópicos de esta teoría en un capítulo posterior.



Figura 9. Modelo de Ising.

El que tratemos de introducir al lector, así sea de manera elemental, a tan fascinante tema tiene como propósito fundamental el que se sienta magnetizado, como lo estamos nosotros, por un área tan activa de la ciencia como lo es ésta.