

IMANES HOY

ANTONIO HERNANDO GRANDE *

* Instituto de Magnetismo Aplicado. Apartado de Correos 155. Las Rozas 28230 Madrid

INTRODUCCIÓN

Los materiales magnéticos han sido utilizados desde la antigüedad como brújulas y como juguetes mágicos. A fines del siglo XIX, tras el descubrimiento de la ley de Faraday, se inicia la aplicación industrial del Magnetismo en los procesos de producción, transporte y reconversión de energía eléctrica. Los núcleos de los transformadores, generadores y motores están constituidos por una aleación de hierro y silicio que al poseer una elevada permeabilidad magnética y baja cifra de pérdidas constituye un material ideal para hacer eficazmente rentable la utilización de la ley de Faraday.

Durante el siglo XX, se comprende que los materiales magnéticos conocidos, desde la antigüedad, como imanes —aquellos con los que se fabricaban las agujas de navegación o que se usaban como misteriosos generadores de fuerzas no menos misteriosas hasta el siglo XIX— son en realidad almacenes de energía. En este concepto físico se basan todas las aplicaciones actuales de los imanes. Los equipos de resonancia magnética nuclear, los rotores y estatores de motores fabricados con imanes permanentes, los imanes utilizados en telefonía, microelectrónica y vídeos, se utilizan como almacenes de energía.

Mas entrado el siglo se reconoce que la energía que es capaz de almacenar un imán puede sencillamente transformarse en información. Un material magnético puede acumular energía imanándose hacia “arriba” o hacia “abajo”. Cada uno de estos dos estados puede

hacerse corresponder con un 0 y un 1, respectivamente, y generar, por tanto, un sistema binario. Las cintas magnetofónicas, los códigos magnéticos de las tarjetas de crédito, los billetes del ferrocarril suburbano y los discos duros de los ordenadores son ejemplos de dispositivos que utilizan la capacidad de los imanes para almacenar información.

El Magnetismo nace como ciencia con el trabajo experimental de Pierre Curie en los albores del siglo XX. Crece simultáneamente con la Mecánica Cuántica y es, sin duda, uno de los ejemplos mas hermosos de fenómeno cuántico a escala macroscópica. El imán elemental del que están constituidos los imanes que utiliza la tecnología **es el espín del electrón**. Al comenzar el siglo XXI, un siglo después de que naciera el Magnetismo y veintiséis siglos después de que se escribieran las primeras fascinantes palabras sobre el poder de los imanes, los investigadores pretenden construir sistemas nanométricos en las que las propiedades de espín y transporte eléctrico se manipulen a través del control de la nanoestructura. Nanomagnetismo y espintrónica son las palabras que caracterizan los campos en los que converge el esfuerzo investigador de hoy.

Campos electromagnéticos naturales y artificiales: La Ley de Faraday y el número de imanes que participan en una proyección de vídeo

El disco duro del ordenador, el vídeo, la cinta magnetofónica, la banda de las tarjetas de crédito, muchos

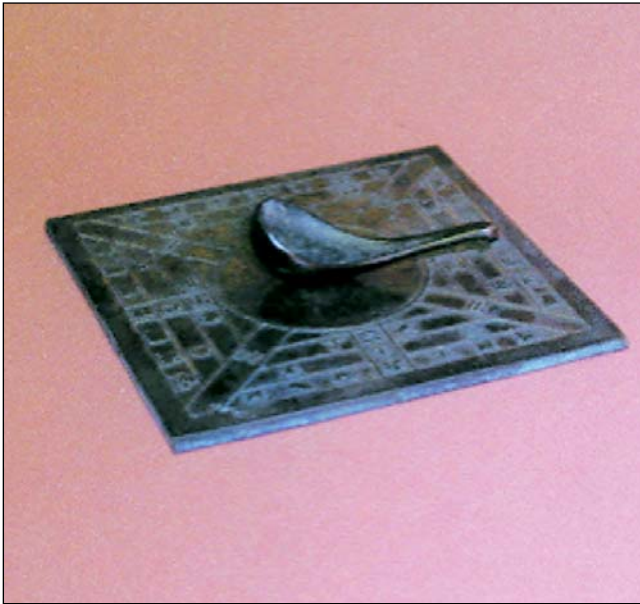


Figura 1. Brújula china.- China fue el primer país cuyos habitantes utilizaron las propiedades de la magnetita para manufacturar instrumentos de orientación geográfica. Se encuentra en la literatura referencias a este tipo de inventos desde el período de Zhan Kuo tres siglos a. C. El modelo mostrado en la figura es conocido como *Si Nan* en el que el indicador tiene forma de cuchara y se orienta de modo que el mango indica el polo sur. El *Si Nan* está fabricado conforme a los trabajos de "Hanfucius" del siglo tercero a. C. y los posteriores de Wang Chung del siglo I d. C. La base del indicador es un cuadrado con veinticuatro divisiones y cuarenta y ocho subdivisiones que forman el compás utilizado, aún en la actualidad, por los barcos pesqueros chinos.

códigos de seguridad, los núcleos de los motores, transformadores y generadores, la televisión, los equipos de telecomunicaciones, todos estos elementos tan familiares al comienzo del siglo XXI están basados en efectos magnéticos.

La vida, en la múltiple diversidad que se presenta hoy día sobre la superficie de nuestro Planeta, es una consecuencia de las interacciones electromagnéticas. Los campos electromagnéticos naturales son abundantes. La luz del Sol, la radiación de fondo de microondas proveniente de la Gran Explosión que tuvo lugar en el origen del Universo o la radiación infrarroja continuamente emitida por la superficie del Planeta son ejemplos de ellos. El campo magnético terrestre, cuyo valor medio es 60 microteslas, los campos magnéticos producidos por los imanes naturales y el campo eléctrico atmosférico que —originado por una acumulación de carga negativa de una milésima de culombio por kilómetro cuadrado en el suelo— alcanza en la

superficie de la Tierra un valor de 150 V/m y crece durante las tormentas hasta 10000 V/m, son ejemplos de campos naturales estáticos.

En el ámbito del mundo biológico la interacción electromagnética gobierna la química de las reacciones celulares y las corrientes eléctricas que se propagan a lo largo de los axones neuronales controlan el funcionamiento del computador más perfecto: el cerebro humano. Las corrientes neuronales producen campos magnéticos muy débiles, del orden de la cien mil millonésima (10^{-11} veces) del campo magnético terrestre. La técnica de diagnóstico conocida como magnetoencefalografía está basada en el uso de sensores de campo de muy alta sensibilidad para dibujar un mapa magnético del cerebro que permita obtener información de las corrientes neuronales.

Al ser la Tierra un gran imán, los barcos desde la antigüedad, y los satélites artificiales hoy, vieron y ven respectivamente a través del campo magnético. Los sensores de campo magnético, sustitutos actualizados de la brújula, permiten la orientación de los satélites.

Un punto singular de la historia del electromagnetismo corresponde al descubrimiento por Faraday de la ley de inducción electromagnética. Este genial físico experimental inglés descubrió en su laboratorio que los campos eléctricos, de los que hasta entonces se sabía que eran creados por cargas eléctricas, también se creaban, sin necesidad de contar con carga eléctrica, con campos magnéticos variables en el tiempo. Mas concretamente, Faraday encontró que si existe un flujo de campo magnético, Φ , variable en el tiempo en el interior de una bobina, aparece en ella una fuerza electromotriz, ϵ , dada por la derivada del flujo respecto al tiempo cambiada de signo, $\epsilon = -d\Phi/dt$. Por tanto, el campo eléctrico inducido, proporcional a ϵ , es tanto mayor cuanto mayor es el ritmo de la variación del flujo de campo magnético. La posibilidad de crear campos magnéticos variables mediante artilugios mecánicos llamados generadores que hacen girar, por ejemplo, imanes, es inmediata. Los generadores producen un campo magnético variable el cual induce una fuerza electromotriz en una bobina en cuyo interior existe un material magnético conocido como chapa magnética de acero al silicio. El campo magnético se multiplica en el interior del acero por un coeficiente llamado permeabilidad, μ , que es del orden de 1000,

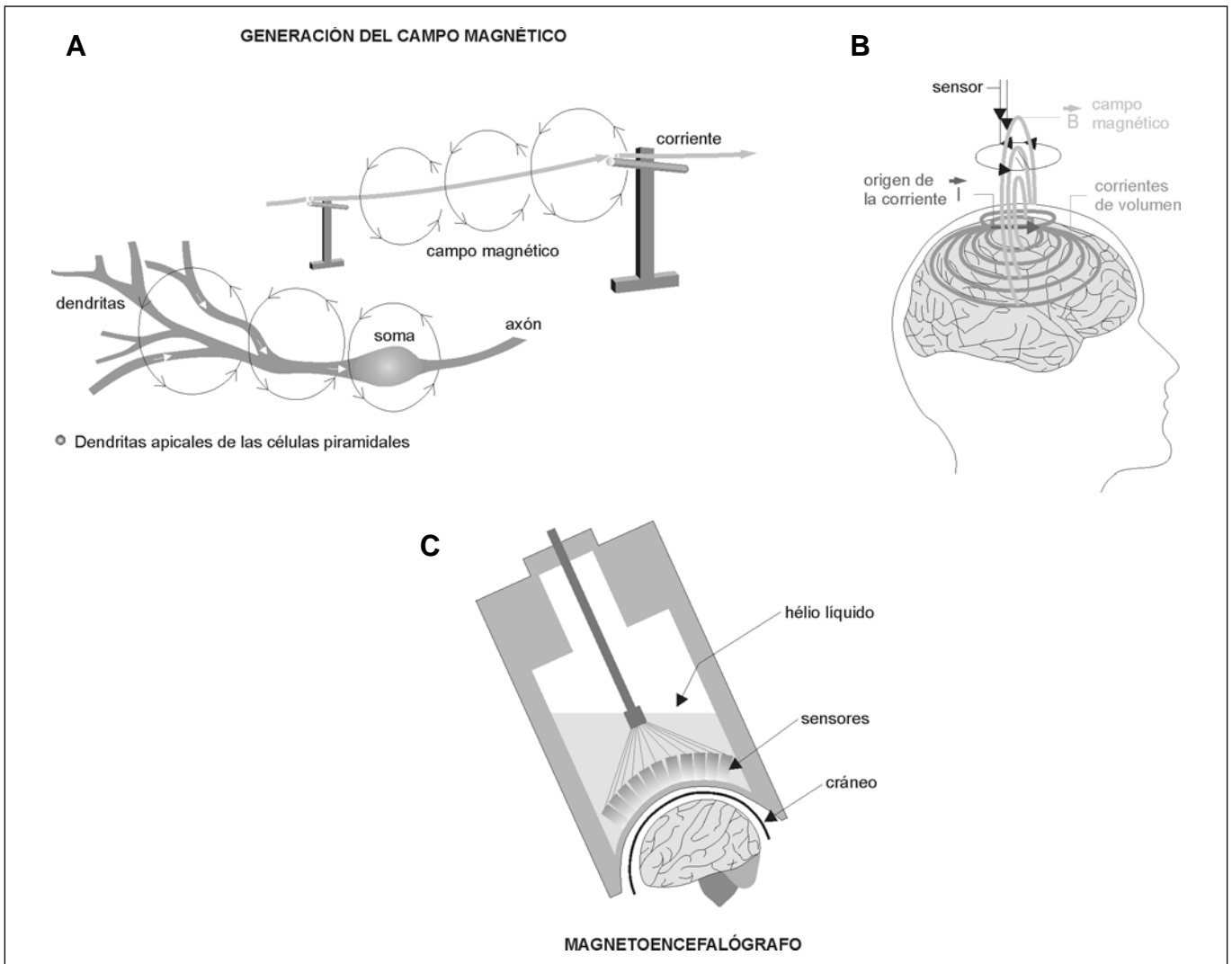


Figura 2. Magnetoencefalógrafo- Toda corriente eléctrica crea un campo magnético. Las corrientes que fluyen a través de los axones neuronales, según indica la figura 2-A, crean campos magnéticos muy débiles, millones de veces inferiores al campo magnético terrestre, con la geometría mostrada en la figura 2-B. Sin embargo, mediante la utilización de magnetómetros muy sensibles como son los SQUID es posible detectarlos. Utilizando un número elevado de magnetómetros SQUID próximos a la cabeza de un individuo, tal como indica la figura 2-C, es posible obtener el mapa de campos magnéticos que refleja el mapa de corrientes eléctricas neuronales. Este método se comienza a utilizar experimentalmente como técnica de diagnóstico. En la Universidad Complutense el Centro "Pérez Modrego" en colaboración con otros institutos lleva a cabo un trabajo de investigación adelantado sobre esta técnica tan nueva y atractiva. Los magnetómetros SQUID se basan en interferencia cuántica macroscópica generada por efecto Josephson. El libro de Hernando y Rojo indicado en las referencias bibliográficas explica con detalle su funcionamiento.

de tal manera que el flujo del campo que sería en la bobina vacía Φ pasa a ser 1000Φ , solo por la presencia del material magnético. De este modo se podrían construir "fábricas" de campo eléctrico y mediante conductores transportar la electricidad a distancias alejadas de ellas. Este transporte era en realidad un transporte de energía que, por su principio de conservación, consistía en la energía que gastaba el generador para hacer girar el campo magnético. La energía se podía almacenar como energía química, o mecánica,

convertir en campo eléctrico, transmitir a distancia — análogamente a como la energía nuclear del Sol se transmite a la Tierra mediante fotones— y entonces volver a reconvertir en energía utilizable en los lugares de consumo, viviendas, oficinas y fábricas. **La posibilidad de utilizar la energía en cualquier parte sin necesidad de aproximación a la fuente constituye el resultado científico que más ha contribuido a alcanzar el nivel de bienestar, cultura, seguridad sanitaria y capacidad industrial de los pueblos mas**



Figura 3. Transporte de la energía- La ley de Faraday permite transformar cualquier energía en energía eléctrica y permite también reconvertir la energía eléctrica en cualquier otra de consumo inmediato. Gracias a estas posibilidades se facilita enormemente el transporte de energía (térmica, nuclear, gravitatoria) utilizando la energía eléctrica. Las centrales térmicas, las centrales nucleares y los embalses, como el indicado en la figura 3, contiene la energía que mediante los generadores se transforma en energía eléctrica y se transporta a otro lugar donde un motor la reconvierte en energía utilizable.

desarrollados. Da vértigo comenzar a vislumbrar como cambiaría el mundo si no hubiera suministro de energía en las viviendas, en los hospitales o en las fábricas. Este ejemplo ilustra perfectamente como el descubrimiento de las leyes que rigen los fenómenos electromagnéticos, inherentes a la materia desde que el Universo es Universo, permite a la sociedad utilizar dichos fenómenos para mejorar su cultura y su estilo de vida.

Para mostrar la exagerada frecuencia con que la tecnología mas habitual —al menos para los ciudadanos de los países industrialmente desarrollados— utiliza los fenómenos magnéticos puede ser instructivo considerar la siguiente secuencia de actos domésticos. Dicha secuencia consiste en: llegar a casa, encender la luz, sacar un refresco de la nevera y conectar el vídeo para ver una película. Estas actividades son posibles

porque existe energía capaz de producir suficiente calor en el filamento de la lámpara como para provocar la emisión de fotones y capaz también de producir un enfriamiento en el volumen interior al refrigerador. Cuando encendemos la bombilla o ponemos en marcha el motor del refrigerador somos generalmente ajenos a que muchas toneladas de acero al silicio están trabajando, en los núcleos de los generadores, en transformadores y motores para permitirnos ambos lujos.

A continuación, encendemos el equipo de vídeo y se ponen en marcha los siguientes mecanismos y funciones. A) El motor que mueve la cinta de vídeo y que está formado por dos imanes: un estator toroidal dentro del cual gira el rotor. En algunos casos uno o los dos imanes son electroimanes. El motor convierte la energía magnética en energía mecánica de arrastre de la cinta. B) Los altavoces que consisten en una bobina

móvil en el seno del campo producido por un imán estacionario. Al variar la corriente que recorre el carrete varía la fuerza ejercida por el imán lo que produce vibraciones del carrete que al estar solidario con un diagrama se convierten en vibraciones del aire y, por tanto, en sonido. C) La pantalla, capaz de generar la imagen por las oscilaciones del haz electrónico que se gobiernan mediante dos electroimanes D) La cinta de vídeo que transmite imagen y sonido porque contiene miles y miles de millones de imanes microscópicos embebidos en el plástico que forma la cinta. La orientación de la imanación en estos imanes almacena información para la imagen y el sonido. E) La cabeza lectora, consistente en una bobina que convierte la información almacenada en energía eléctrica mediante la ley de Faraday. La cinta se mueve mientras la cabeza se encuentra estacionaria. Los imanes microscópicos pasan sucesivamente cerca de la cabeza haciendo que varíe el flujo de campo e induciendo fuerzas electromotrices y pulsos de corriente. Esta breve consideración podría resultar útil a la hora de responder a esa pregunta que se plantea con cierta fre-

cuencia a los investigadores: ¿Para que sirve el Magnetismo?

Sin embargo, los campos electromagnéticos no gozan de buena prensa en la sociedad

El diario madrileño ABC de 18 de Junio de 1995 publicaba en su página 74 un artículo firmado por la doctora Jocelyne Leal titulado “Riesgos muy reales”. Allí se resumían algunos datos epidemiológicos que parecían apuntar a la necesidad de ser cautos ante los posibles efectos nocivos de los campos electromagnéticos medioambientales sobre la salud. En realidad este tipo de publicaciones periodísticas constituían el eco en España de una moda introducida por un sector de la prensa en América a comienzos de los noventa, tal como ha sido descrito con detalle en el libro de Robert Park “Ciencia:Vudú: De la ingenuidad al fraude científico” (Editorial Grijalbo Mondadori 2001). En aquel momento las líneas de alta tensión constituían el

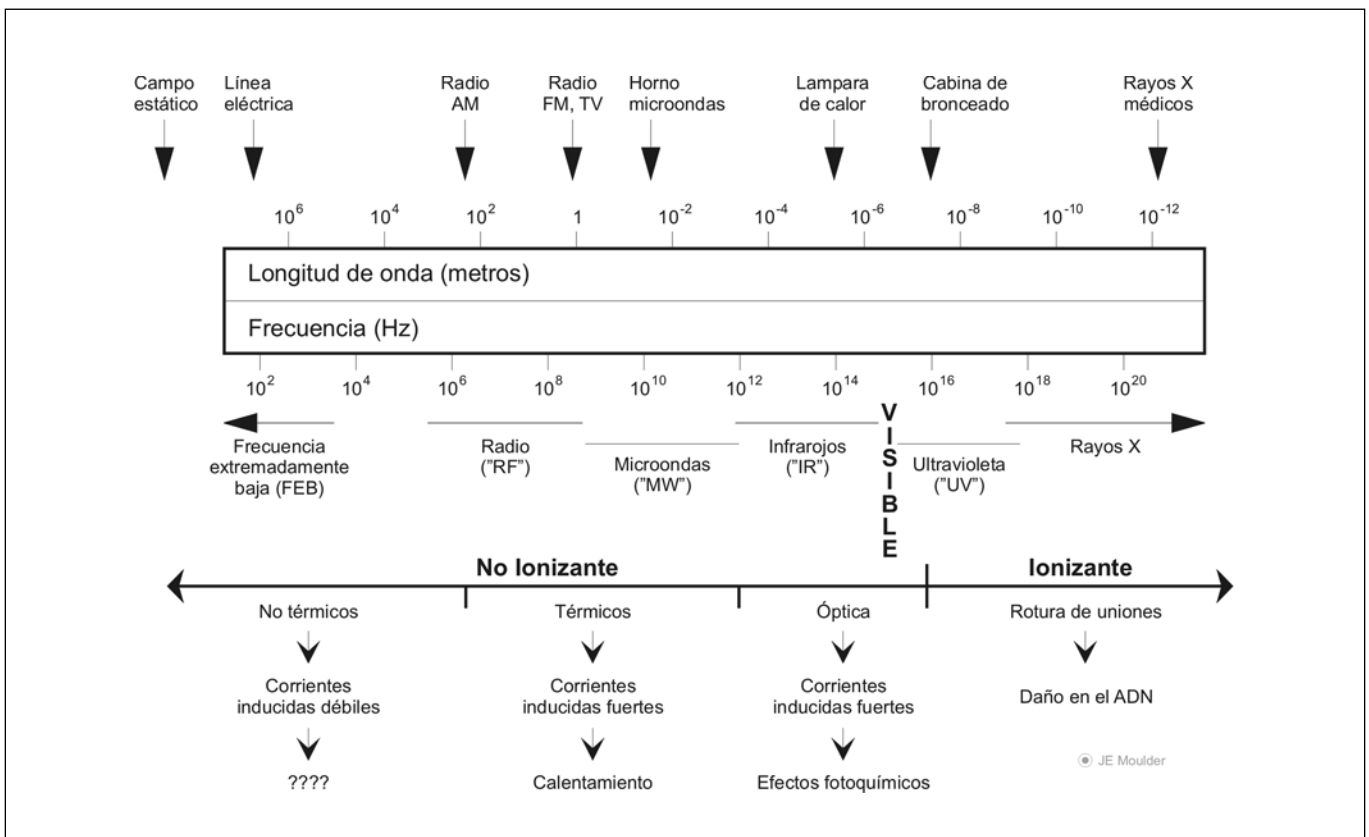


Figura 4. Espectro electromagnético con detalle del visible.- Se indican frecuencias y longitudes de onda y las aplicaciones de las ondas de distinta frecuencia.

enemigo a batir por ese ejército de convencidos de los efectos letales de los campos electromagnéticos de cincuenta Hz (la unidad Hz significa herzio o uno dividido por segundo; el número de herzios es el número de veces que en un segundo se invierte el sentido del campo eléctrico). Hoy en día la sensibilidad social está siendo reconducida hacia una parte del espectro muy distante de los cincuenta herzios, precisamente allí en el rango de las centenas o del millar de millones de herzios, concretamente en la región de la radiofrecuencia y de las microondas, donde se encuentran las ondas responsables de la telefonía móvil.

Es bien sabido que los campos electromagnéticos, si bien constituyen la interacción base de la Naturaleza y la Vida, son peligrosos para la salud por encima de ciertos límites de intensidad que dependen de su frecuencia. Como los periódicos ponen asiduamente de manifiesto, no ha sido suficiente la publicación de las Recomendaciones del Consejo de la Unión Europea fechadas en Julio de 1999 y elaboradas por un grupo interdisciplinar de expertos para calmar la angustia de algunos sectores sociales. En las Recomendaciones se concluye que los campos magnéticos de cincuenta herzios con intensidad inferior a 100 microteslas, μT , no constituyen ningún peligro conocido para la salud. Esta misma certeza es compartida por las instituciones científicas de mayor prestigio. Es recomendable, por ejemplo, la lectura del Informe sobre Campos Electromagnéticos y Salud de la Real Academia de Ciencias de 2001 del que fue ponente el Dr. García Barreno. Sin embargo la imagen social de los campos electromagnéticos es acusadamente negativa. Según una encuesta realizada para UNESA en Junio de 2001 la opinión sobre los campos electromagnéticos en su relación con la energía eléctrica es mayoritariamente, 72%, negativa.

No deja de ser sorprendente que la interacción electromagnética, la más importante a la escala humana, se encuentre tan pésimamente considerada.

La interacción electromagnética como base de la materia y la vida

Según la teoría más aceptada del origen del Universo, desde el comienzo de la Gran Explosión,

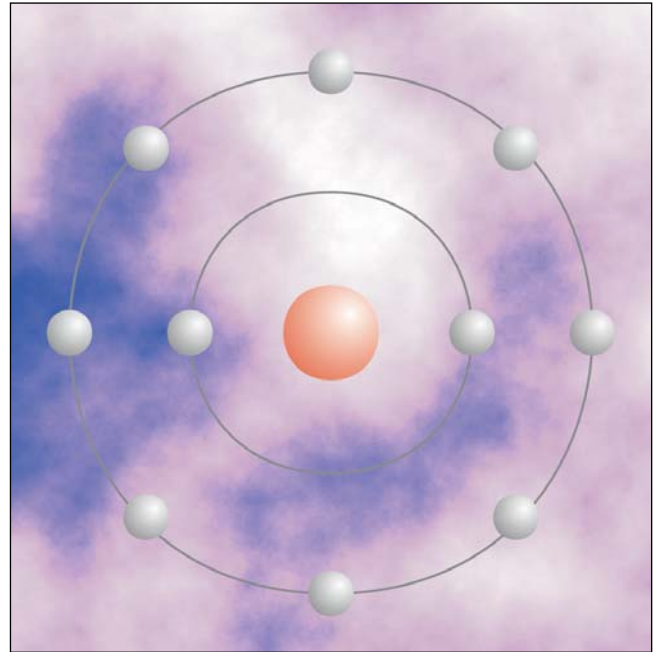


Figura 5. Átomo. Si consideramos correcta la escala de las órbitas electrónicas, el tamaño del núcleo se ha multiplicado por un factor de escala 10 000. En realidad el átomo y, por tanto, la materia son huecos. Si la órbita de los electrones fuera treinta metros, el núcleo, que contiene toda la masa, apenas ocuparía un milímetro.

acaecida hace, aproximadamente, quince mil millones de años, existía un número enorme de fotones, electrones, positrones y neutrinos y una pequeña contaminación de protones y neutrones, aproximadamente uno por cada mil millones de fotones. Los fotones son los cuantos del campo electromagnético. La interacción entre partículas cargadas, electrones, positrones y protones, conocida como *interacción electromagnética* constituye una de las cuatro protagonistas de la historia del Universo. En concreto es la interacción fundamental mejor conocida con diferencia.

Las radiaciones electromagnéticas consisten en fotones de distintas energías. A comienzos del siglo XX, Planck descubrió que la energía de un fotón depende de su frecuencia. La frecuencia del fotón o frecuencia de la onda electromagnética determina, por ejemplo, los colores. La diferencia entre la luz verde y la roja es su frecuencia. La capacidad de impresionar nuestro órgano visual queda restringida a una banda muy reducida de las frecuencias posibles, concretamente al entorno de los 10^{15} Hz al que corresponde un intervalo de longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros o mil millonésima de metro. La energía de un

fotón es proporcional a su frecuencia, ν , con una constante de proporcionalidad que desde Planck se conoce con la letra h ($h= 6.6 \cdot 10^{-34}$ Julio segundo ó $6.6 \cdot 10^{-15}$ eV segundo. Un electrón-voltio, eV, es la energía que adquiere un electrón en un potencial de 1 voltio) Es importante señalar que, según el concepto de energía térmica debido a Boltzman, la energía cinética con que se mueve una molécula de nitrógeno que forma parte del aire de nuestra habitación a 20 grados centígrados de temperatura, al corresponder a $(3/2) K_B T$, es 0.026 eV. donde $K_B= 7 \cdot 10^{-5}$ eV/ grado Kelvin, es la constante de Boltzman y T la temperatura en grados Kelvin. Por tanto, la formula que relaciona energía y frecuencia es sencillamente $E=h\nu$. Teniendo en consideración que la longitud de onda de la radiación λ y la frecuencia están relacionadas mediante la expresión $c=\lambda\nu$, donde c es la velocidad de propagación de la luz en el vacío ($c=3 \cdot 10^8$ m s^{-1}) se deduce que a la temperatura ambiente, para la que la energía térmica es del orden de 0.024 eV, la frecuencia de los fotones en equilibrio termodinámico es del orden de 10^{14} s^{-1} que corresponde a longitudes de onda de algunas micras, ó 10^{-6} m, que es la λ característica de las ondas infrarrojas.

Al comienzo del Universo la radiación y la materia se encontraban en equilibrio termodinámico. Una centésima de segundo después de la Explosión la temperatura del Universo era de cien mil millones de grados, por lo que en estas condiciones electrones, positrones, neutrinos y fotones se creaban y destruían continuamente al mismo ritmo manteniéndose constante tanto su número, el mismo para cada uno de ellos, como su energía media. Según progresaban la expansión y el enfriamiento el ritmo de generación de electrones y positrones disminuía, se comenzaban a formar núcleos de hidrógeno y helio y, finalmente, al cabo de unos pocos cientos de miles de años se formaron los átomos. La atracción electromagnética entre electrones y protones es del orden de decenas o unidades de eV por lo que su formación solo puede suceder a temperaturas inferiores a algunas decenas de miles de grados Kelvin.

Las leyes experimentales que rigen el equilibrio térmico entre la radiación y la materia o la radiación del "cuerpo negro" fueron explicadas por Planck introduciendo el concepto de quanta que equivale a postular la distribución discreta de las energías atómicas. Es conveniente, por útil, recordar que, a una temperatura

T, el cuerpo negro radia, en equilibrio, con un máximo de intensidad en la longitud de onda λ , dada según la ley de Wienn, por $\lambda T=0.3\text{cm}^0\text{K}$.

La atracción electromagnética es la responsable de que electrones y protones se agrupen formando átomos y que posteriormente estos se condensen en moléculas y posteriormente en sólidos o en macromoléculas como las proteínas y los virus. La química y la biología son manifestaciones de la interacción electromagnética. La célula es el resultado del acoplamiento electromagnético de moléculas orgánicas mediante el denominado enlace químico que no es mas que el resultado de la atracción electromagnética entre átomos.

También la radiación electromagnética formada por fotones es componente indispensable de la función clorofílica responsable de la existencia de vida en su forma actual. La síntesis de agua y anhídrido carbónico genera azúcar que constituye un almacén de energía. Según esta reacción seis moléculas de dióxido de carbono se unen a doce moléculas de agua en presencia de la clorofila y la luz para sintetizar una molécula de azúcar, seis moléculas de oxígeno gaseoso y seis moléculas de agua. La clorofila, con fórmula química $C_{35}H_{72}O_5N_4Mg$, permanece invariable durante el proceso pero la luz es absorbida. El exceso de energía potencial que la molécula de azúcar tiene respecto a las moléculas iniciales se obtiene de la energía electromagnética, o luz del Sol, que es la absorbida durante la síntesis sólo si está presente la clorofila que actúa como catalizador. La formación de azúcar es la base de toda la síntesis de alimentos para las diversas formas de vida organizada.

El Sol, como fuente de energía nuclear, y la atmósfera como regulador de la interacción térmica Sol-Tierra son responsables directos de la existencia de vida sobre la Tierra en todas sus formas. **La vida consiste esencialmente en la capacidad de elaborar proteínas, a partir del encadenamiento de dos decenas de aminoácidos, según un código informático escrito en la secuencia de las cuatro bases que forman el ADN. Toda esta escalofriante maquinaria está gobernada exclusivamente por un tipo de interacciones electromagnéticas que en su conjunto obedecen las reglas de una disciplina conocida desde antiguo como química.** La transmisión de la

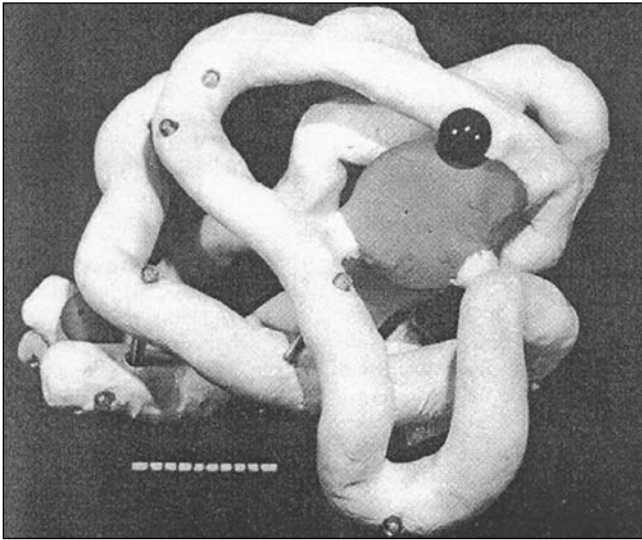


Figura 6. Topología de la proteína. Este es un ejemplo de la forma tridimensional en la que se enlazan los aminoácidos para formar polipéptidos y finalmente proteínas.

energía desde el Sol, donde se produce continuamente por fusión nuclear, hasta la Tierra se realiza mediante fotones o radiación. La potencia que llega a la Tierra en forma de radiación solar es de 340 vatios por metro cuadrado, lo que equivale a una energía total por hora de 10^{20} julios. La atmósfera amortigua la radiación ultravioleta que correspondiendo a la banda más energética del entorno del espectro visible ($\nu=10^{16} \text{ s}^{-1}$) produciría quemaduras si actuara con mayor intensidad.

El electromagnetismo como ciencia

Si bien desde el comienzo del Universo, hace más de diez mil millones de años, el electromagnetismo ya estaba ahí, los seres humanos hemos sabido adecuadamente de su existencia hace relativamente poco. El método experimental permitió que un conjunto de investigadores, entre los que destacaron, Coulomb, Gauss, Poisson, Oersted, Ampère, Faraday y Maxwell descubrieran las leyes que gobiernan el funcionamiento de las interacciones electromagnéticas entre el fin del XVIII y la segunda mitad del XIX. Posteriormente Einstein, en su Teoría de la Relatividad Restringida concluyó que la velocidad de las ondas electromagnéticas (velocidad de la luz) es la misma en todos los sistemas de referencia mostrando así que la consistencia de las ecuaciones de Maxwell era superior a la de las leyes de la dinámica de Newton. El estable-

cimiento posterior de la Electrodinámica Cuántica por Feynman y Schwinger, constituyó el último peldaño que permitía cerrar la teoría electromagnética a nivel atómico y subatómico. Hoy el Electromagnetismo es una ciencia casi acabada y constituye un área utilizada como paradigma del conocimiento científico. Los efectos de los campos magnéticos sobre la materia, interacciones electromagnéticas, son perfectamente conocidos. Las fuerzas que los campos ejercen sobre las cargas eléctricas —tanto en reposo como en movimiento— se pueden calcular con precisión sobrecogedora.

Desde comienzos del siglo XX los campos magnéticos creados artificialmente por la humanidad, gracias a la utilización de la ley de Faraday, se superponen a los campos electromagnéticos que naturalmente existen desde hace millones de años sobre la superficie de la Tierra. Como en el caso de la radiación ultravioleta solar debemos buscar la regulación de la polución artificial electromagnética a partir de la condición crítica de equilibrio con la limitación de intensidades que dependerá de cada rango de frecuencias.

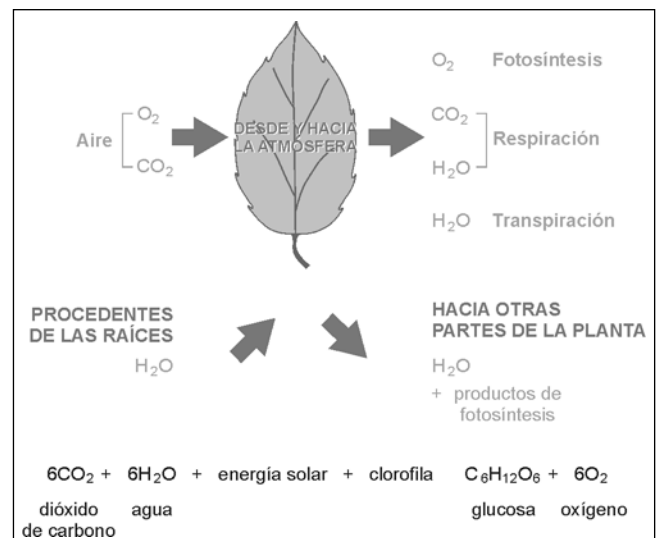


Figura 7. Esquema de la función clorofílica, fotosíntesis, en la síntesis de moléculas de azúcar. La radiación del sol provee la energía necesaria para ser absorbida durante la reacción de síntesis de anhídrido carbónico y agua. El mecanismo de la fotosíntesis comprende más de cincuenta etapas, pero su resultado es tal que de seis moléculas de CO_2 , doce moléculas de H_2O y luz, en presencia de la clorofila, se obtiene una molécula de azúcar, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, seis moléculas de hidrógeno y seis de agua. La energía interna de la molécula de azúcar refleja la energía electromagnética de la luz absorbida y es la base de la vida sobre el Planeta.

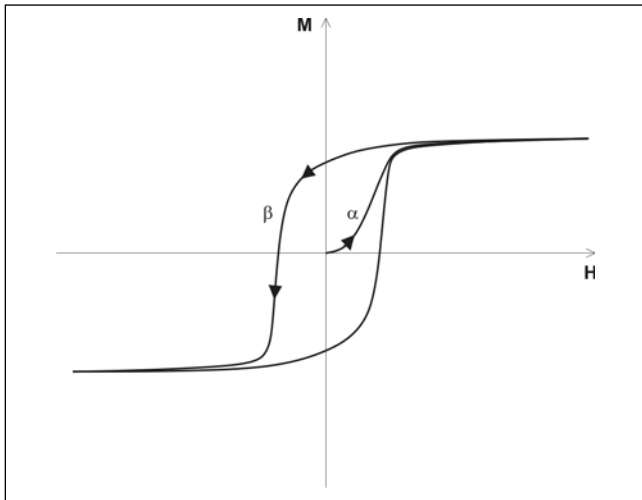


Figura 8. Ciclo de histéresis de los materiales ferro y ferrimagnéticos. Al imanar un material desimanado este recorre la curva virgen, α , en la figura. Si ahora se disminuye el campo hasta anularse el material retiene una imanación conocida como remanencia. Al aplicar campo en sentido opuesto la imanación disminuye y se anula en el denominado campo coercitivo. La forma característica de la curva recorrida por la imanación bajo la acción de un campo cíclico, β en la figura, es conocida como ciclo de histéresis.

El magnetismo de los materiales y la imanación espontánea

El Magnetismo de la materia se manifiesta de modo natural porque a temperatura y presión ambiente la magnetita, el hierro, el cobalto y el níquel presentan imanación espontánea. Este detalle permitió conocer desde la remota antigüedad la atracción que ejercía la magnetita sobre el hierro y explica por su enorme distancia histórica la oscuridad que envuelve al origen de las palabras magnetita o imán, (“aimant” en francés y “magnet” en inglés y alemán).

Los materiales magnéticos interesantes para las aplicaciones son los que presentan imanación espontánea (materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos con temperatura de Curie superior a la temperatura de trabajo de los dispositivos) **y son utilizados según dos funciones fundamentales y distinguibles.** a) **Multiplicadores de flujo (o núcleos magnéticos) que permiten hacer eficiente la ley de Faraday como principio convertidor de energía ó b) como almacén de energía (imanes) o de información (memoria magnética).** Todas estas posibles aplicaciones se contienen en el ejemplo de la proyección del vídeo descrito más arriba. Para cualquier aplicación se

requiere la máxima imanación posible, M_s , que al coincidir con el número de átomos por unidad de volumen (aproximadamente 10^{29} m^{-3}) multiplicado por el momento magnético atómico (algunos magnetones de Bohr, $\mu_B = 10^{-23} \text{ Am}^{-2}$) es normalmente del orden de $M_s = 10^6 \text{ Am}^{-1}$ o $\mu_0 M_s = 1 \text{ T}$.

Los comportamientos ferro y ferrimagnéticos, caracterizados por la presencia de imanación espontánea (por debajo de una temperatura crítica o temperatura de Curie, a partir de la cual su comportamiento evoluciona al típicamente paramagnético), son consecuencia de una interacción entre electrones que da lugar a un estado fundamental de ordenamiento paralelo de los espines electrónicos. A diferencia del orden superconductor —también debido a una interacción entre electrones— la agitación térmica requerida para romper el orden magnético, temperatura de Curie, es muy alta y en algunos materiales como el hierro, el cobalto o el níquel se necesitan temperaturas de muchos cientos de grados Celsius para desbaratar la alineación de espines. **La clave del orden magnético se encuentra en que dos electrones con espines opuestos presentan mayor probabilidad de estar próximos que dos electrones con espines paralelos por lo que al disponerse paralelos reducen su repulsión electrostática.** En la materia condensada, desde el átomo al sólido, los estados electrónicos para electrones independientes se obtienen mediante la aproximación denominada *de un solo electrón* que utiliza un potencial promedio, central o periódico. Una vez obtenido el espectro de energía se ocupan sucesivamente los niveles desde el fundamental hacia energías crecientes, de acuerdo con el Principio de Exclusión, hasta que se han colocado todos los electrones del sistema. Se llega así a una energía máxima o energía de Fermi de modo que todos los estados completamente ocupados con energía menor a la de Fermi tienen espín total nulo.

El proceso puede refinarse mediante la corrección de las diferencias entre el potencial real y el potencial de un solo electrón que provienen de la repulsión coulombiana real entre los electrones. Para disminuir su repulsión mutua los electrones tienden a separarse espacialmente y por tanto a orientarse con espines paralelos. Pero como los estados de energía menor a la energía de Fermi se encontraban completamente ocupados solo pueden ponerse paralelos los espines de

aquellos electrones situados en ella, bombeándose necesariamente a estados de energía superior. Tal bombeo es imposible si el nivel o la banda de energía están completos, es decir si la energía de Fermi coincide con el borde de la banda. Si el nivel o banda está incompleto el proceso es favorecido cuando existen estados vacíos con energía muy próxima y superior a la de Fermi; es decir, si la densidad de estados al nivel de Fermi es alta. **Este criterio que también explica cualitativamente el origen del ferromagnetismo se resiste sorprendentemente a ser utilizado cuantitativamente y hoy podemos asegurar que nadie sabe probar con rigor por qué el hierro es ferromagnético y no lo es, por ejemplo, el paladio.**

En resumen, sabemos que la imanación espontánea es debida al espín de los electrones y que un sólido, para presentar imanación espontánea, debe generalmente contener átomos de capas incompletas profundas (elementos de transición). Sabemos también que el origen de la interacción capaz de alinear los espines, en contra de la tendencia al desorden introducida por la agitación térmica, es la sutil combinación de la repulsión electrostática y el carácter fermiónico de los electrones.

La anisotropía magnética o como controlar las propiedades de un imán

Los materiales ferro y ferrimagnéticos aunque presentan localmente imanación espontánea, se encuentran generalmente desimanados a escala macroscópica en ausencia de campo magnético aplicado externamente. Esto es debido a que la imanación espontánea fluctúa en orientación con una longitud de coherencia conocida como anchura de dominio y que dependiendo del material varía entre micras y milímetros. En monocristales la imanación se orienta según direcciones preferentes conocidas como direcciones de fácil imanación. La zona de transición de la orientación de la imanación de dominio a dominio se conoce como pared de Bloch y es normalmente del orden de nanómetros ó 10^{-9} m. Bajo la acción de un campo magnético la imanación de los dominios mas próximos en orientación al campo crecen a expensas de los mas desfavorables. Finalmente, si aumentamos el campo aplicado la imanación gira hasta alcanzar la dirección de éste. Cuando

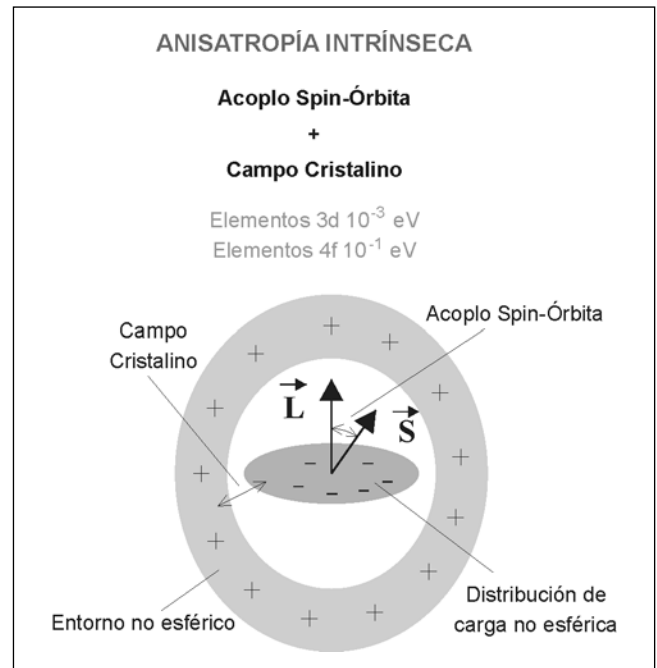


Figura 9. Origen de la anisotropía magnética. Esta figura ilustra los mecanismos que contribuyen a la anisotropía magnética. El espín, S , del átomo magnético, está ligado al momento angular L , a través de la interacción espín-órbita. La orientación de L es la orientación de la carga total electrónica, negativa en la figura y en forma de disco, del átomo magnético. Esta carga está sometida al campo eléctrico producido por las cargas vecinas, positivas en la figura y distribuidas según un elipsoide. El entorno positivo condiciona la orientación preferente del disco negativo según se ha indicado en la figura y que corresponde a L vertical como también se muestra. Si suponemos que la interacción espín-órbita se minimiza cuando L es paralelo a S , el giro de S , señalado en la figura, costará un trabajo a realizar en contra de la interacción espín-órbita y/o de la energía electrostática de la interacción entre las cargas negativas y positivas.

la configuración de la muestra es la de un monodominio con la imanación paralela al campo aplicado decimos que se ha alcanzado la saturación técnica. En realidad, la saturación real solo se puede alcanzar a cero grados Kelvin o a campo aplicado infinito. La imanación espontánea a temperaturas finitas no es la de saturación ya que existen espines desalineados por la agitación térmica. Los detalles de las excitaciones térmicas se describen mediante la teoría de las ondas de spin ó magnones que constituyen las excitaciones elementales del hamiltoniano de canje.

Al aplicar un campo magnético cíclico la imanación varía recorriendo un ciclo de histéresis. Si anulamos el campo se obtiene una imanación residual en la dirección del campo conocida como remanencia,

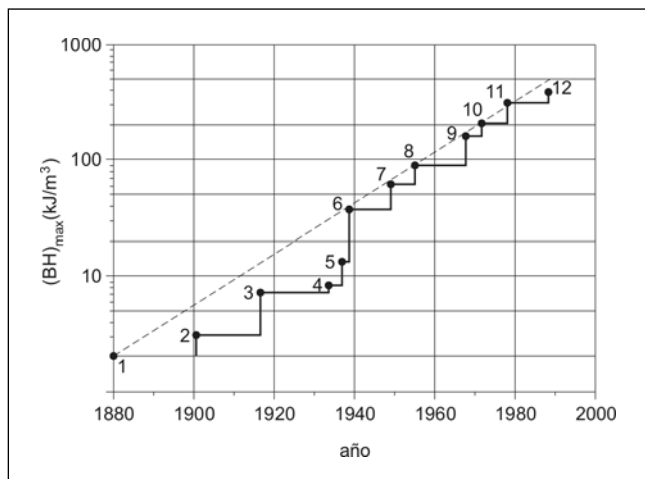


Figura 10. Evolución histórica de la energía, campo coercitivo y tamaño de los imanes permanentes. El desarrollo de los materiales magnéticos ha permitido, durante el siglo XX y más concretamente durante su segunda mitad, el incremento de la energía que es capaz de almacenar un imán tal como se indica en esta figura.

M_r . Al aplicar un campo en sentido opuesto al inicial se consigue anular la imanación para un valor crítico conocido como campo coercitivo $\mu_0 H_c$. La existencia de direcciones preferentes de la imanación indica que la energía del sistema depende de la orientación de la imanación respecto a los ejes cristalinos. Esta dependencia energética, distinta al efecto del canje o repulsión coulombiana entre electrones que es completamente isotrópica, se conoce como anisotropía magnética. Cuanto mayor es la anisotropía mayor es la dificultad de girar la imanación o, dicho con palabras más técnicas, mayor es la energía gastada para imanar a la muestra. Si partiendo desde el estado desimanado se aplica un campo creciente $\mu_0 H$ que imane progresivamente al material hasta alcanzarse la imanación técnica se realiza un trabajo mecánico dado por la integral de $\mu_0 H dM$ extendida entre $M=0$ y la imanación de saturación técnica. Tal energía corresponde, por tanto, al área encerrada entre la curva de imanación y el eje de imanación. El área encerrada por el ciclo de histéresis es la energía perdida irreversiblemente en forma de calor durante la realización de un ciclo. Del mismo modo la energía almacenada por un imán es aproximadamente proporcional al producto de su remanencia y campo coercitivo.

Las diversas teorías del campo coercitivo coinciden en la existencia de una proporcionalidad con la constante de anisotropía, k , ó energía requerida por unidad

de volumen para girar la imanación desde el eje fácil al eje difícil. k es en general del orden de 10^3 Jm^{-3} o 10^4 Jm^{-3} , pudiendo alcanzarse en algunos materiales muy anisótropos valores de 10^7 Jm^{-3} y en otros muy isotrópica valores de 10^2 Jm^{-3} . En general la relación que liga campo coercitivo y anisotropía es de la forma $\mu_0 H_c = \alpha(2k/\mu_0 M_s)$. Lo que difiere de una teoría a otra es el significado de la constante de proporcionalidad α que siempre es inferior a la unidad. Teniendo presente que la imanación técnica es del mismo orden en todos los materiales ferromagnéticos, esta expresión pone de manifiesto que a mayor anisotropía, mayor campo coercitivo o mayor anchura del ciclo y mayor energía gastada en imanar o mayor energía capaz de ser almacenada.

En la operación de multiplicación de flujo el material magnético realiza cincuenta ciclos de histéresis por segundo y disipa una cantidad de potencia de

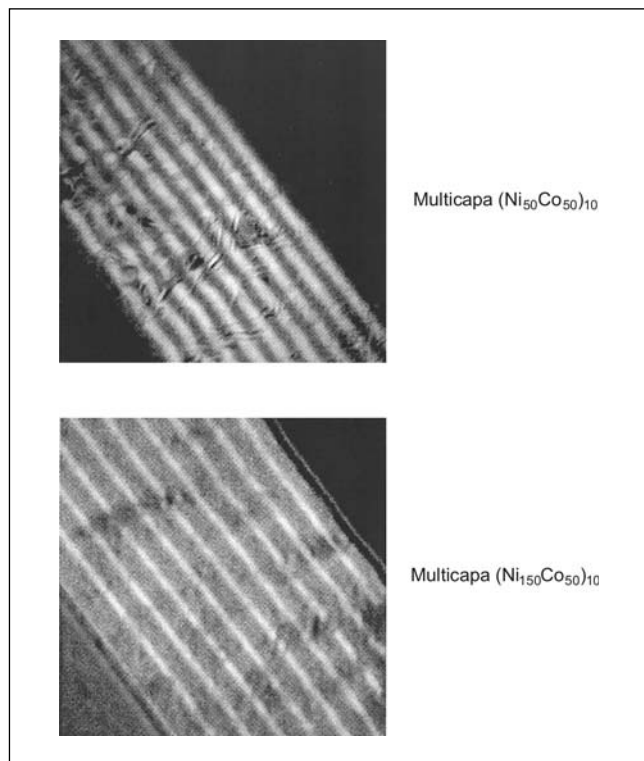


Figura 11. Estructura de multicapas observada con microscopía electrónica de transmisión en sección transversal. Se muestran dos multicapas de cobalto y níquel, obtenidas por pulverización catódica en el Instituto de Magnetismo Aplicado de la UCM por Álvaro Salcedo. En la primera muestra los espesores de Co y Ni son de 50 angstroms y en la segunda el espesor de Ni es de 150 angstroms, mientras se conserva el espesor de Co.

cincuenta veces el área del ciclo de histéresis. Por esta razón constituye un requisito que el ciclo sea lo más estrecho posible. Consecuentemente se puede concluir que para la multiplicación de flujo se requiere un ciclo de histéresis muy estrecho ($\mu_0 H_c$ muy pequeño) material magnéticamente blando, y para el almacenaje un ciclo ancho ($\mu_0 H_c$ muy grande), material magnéticamente duro. La pendiente media del ciclo de histéresis es la permeabilidad, μ , y que es proporcional a la imanación de saturación dividida por el campo coercitivo. Por esta razón la permeabilidad que es, en definitiva, el factor multiplicador de flujo es inversamente proporcional a la anisotropía.

Hemos visto que la anchura del ciclo crece con la anisotropía magnética. La energía gastada o almacenada es proporcional al área encerrada por el ciclo de histéresis y que, siendo muy difícil el control de la altura o remanencia, solamente se puede modular a través de la anchura y por tanto de la anisotropía. En consecuencia, concluimos que el control de las propie-

dades de un material magnético implica el control de su anisotropía. Ahora mostraremos como la anisotropía depende de la interacción espín-órbita de los átomos que forman el material magnético.

La influencia de la interacción espín-órbita en la dependencia de la energía con la orientación de la imanación es fácil de comprender. En un átomo con distribución no esférica de carga el espín total se orienta respecto a la carga para minimizar la interacción espín-órbita, típicamente del orden de centésimas de eV en los elementos de transición del grupo del hierro y de un eV para los átomos de tierras raras. Pero, a su vez, la orientación de la carga eléctrica del átomo se encuentra condicionada por minimizar su energía respecto al campo eléctrico producido por las cargas de los átomos vecinos. Consecuentemente el espín está ligado al entorno eléctrico del átomo o a la simetría local. Se puede entonces generalizar que los materiales de baja anisotropía magnética son aquellos que contienen átomos magnetógenos de baja interacción espín-órbita o de bajo peso atómico, este es el caso de los elementos del grupo del Fe. Para obtener grandes anisotropías se deben utilizar átomos magnetógenos de elevada interacción espín-órbita que crece muy rápidamente con el peso atómico y así es muy alta en los lantánidos, por ejemplo en el caso del Nd, con peso atómico 144, es del orden del eV, mientras que en Fe, con peso atómico 56, no supera la centésima de eV. Sin embargo, las bajas temperaturas de Curie de los elementos de tierras raras y su elevado precio obligan a utilizar combinaciones de elementos de transición del grupo del hierro y de lantánidos.

El incremento de la energía almacenada en los imanes a lo largo del tiempo, según se desarrollan materiales artificiales adecuados, es un índice ilustrativo de los éxitos de la ciencia de los materiales magnéticos. Como indicábamos más arriba la energía que posee un imán es aproximadamente el producto de la remanencia y el campo coercitivo. Sabemos que la remanencia máxima es la imanación de saturación y que esta propiedad no se puede incrementar mucho, por tanto el aumento de la energía que es capaz de almacenar un imán es debido al aumento del campo coercitivo. En 1900 los materiales de mayor campo coercitivo conocido eran los aceros duros ($H_c = 210^3 \text{ Am}^{-1}$) capaces de almacenar una densidad de energía de $2 \cdot 10^3 \text{ Jm}^{-3}$. El descubrimiento de las ferritas duras si

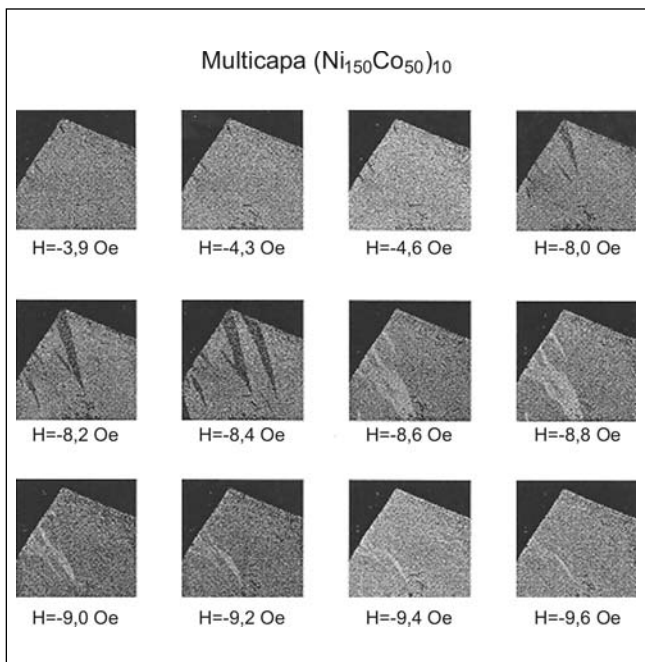


Figura 12. Evolución de la estructura de dominios, observados por efecto Kerr, con el valor del campo aplicado en la multicapa de la figura 11. En esta secuencia se ilustra la inversión de la imanación de una multicapa de Co-Ni. Se observa como el incremento del campo aplicado en la dirección opuesta a la imanación remanente provoca la nucleación y propagación de dominios. Los dominios con direcciones opuestas de la imanación son de distinto tono y el signo menos del campo aplicado indica que su sentido es opuesto a la imanación remanente.



Figura 13. Estos científicos construyeron las bases del Magnetismo de hoy.

bien permitió incrementar los campos coercitivos hasta 10^5 Am^{-1} no supuso un enorme incremento de la energía al ser de imanación relativamente baja, típicamente 0.3 ó 0.4 T. Los valores máximos de la densidad de energía almacenada por un imán de ferrita nunca superaron a $3 \cdot 10^4 \text{ Jm}^{-3}$. El hito en el desarrollo de los imanes fue 1965. Este año se comienzan a utilizar compuestos de elementos de transición 3d y tierras raras. Los primeros compuestos que se obtuvieron con valores de densidad de energía superiores a 10^5 Jm^{-3} fueron de SmCo. Ambos elementos, el samario y el cobalto, son extremadamente caros lo que supuso un auténtico obstáculo para la comercialización de estos imanes. Así llegamos a 1984 año en que se descubre

simultáneamente en Japón y Estados Unidos el compuesto $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ que con bajo precio y energías superiores a 10^5 Jm^{-3} solo tienen como contraindicación una relativamente baja temperatura de Curie. De acuerdo con estimaciones de 1992 la producción anual de imanes permanentes conduce a un mercado europeo de dos mil millones de Euros, siendo un tercio de los imanes de compuestos de tierras raras. El aumento espectacular de la densidad de energía almacenada ha permitido aplicaciones nuevas, principalmente en el desarrollo de motores y generadores. También en Medicina se han desarrollado dispositivos basados en la enorme intensidad de las fuerzas provocadas por estos imanes.

Los materiales magnéticos hoy: nanoestructuras

La aparición de nuevas técnicas de producción y caracterización de materiales artificiales ha sido la fuerza impulsora del conocimiento de la ciencia de materiales magnéticos. La posibilidad de utilizar técnicas como los haces moleculares, la pulverización catódica, el aleado mecánico, la pirólisis o el enfriamiento ultra-rápido ha permitido la obtención de materia condensada en condiciones metastables y críticas con elevada cantidad de defectos, ruptura de simetrías y enormes porcentajes de átomos en superficies e interfases. El análisis experimental llevado a cabo mediante difracción y dispersión inelástica de neutrones, espectroscopía Mössbauer, magnetometría SQUID, microscopía electrónica de alta resolución y microscopía de efecto túnel con resolución atómica ha concluido con el descubrimiento de una complejidad de comportamientos y estructuras magnéticas microscópicas que era totalmente opaca a los métodos de observación tradicionales.

El atractivo irresistible del Magnetismo hoy radica en que contamos con materiales en los que sus propiedades locales fluctúan en longitudes coincidentes con las longitudes típicas magnéticas. Un concepto sumamente importante en Magnetismo es el de longitud de correlación de canje o distancia a la que se propaga una perturbación consistente en desviar un spin local de la dirección de la imanación media local. Esta distancia coincide con el espesor de la pared de Bloch y viene dada por la raíz cuadrada del cociente la constante de canje A (típicamente 10^{-11} Jm^{-1}) y la constante de anisotropía, k . La longitud de correlación de canje es, por tanto, del orden de nanómetros y coincide con la longitud en que fluctúan las orientaciones de los ejes fáciles en los nanocristales. La anisotropía es un concepto local, debido a la combinación de la interacción espín-órbita y la interacción electrostática del electrón magnético con la carga de los átomos vecinos. En cristales la anisotropía local coincide con la anisotropía macroscópica. En nanoestructuras la anisotropía macroscópica se anula cuando la longitud de correlación de canje es mucho mayor que la longitud de correlación de la nanoestructura. En caso opuesto el

orden magnético se frustra. Esto ha permitido que, combinando nanoestructura y composición, se obtuvieran materiales con una diferencia de campos coercitivos de 8 órdenes de magnitud.

Las nanoestructuras unidimensionales conocidas como multicapas o láminas delgadas formadas por una sucesión alternante de dos materiales con espesores nanométricos ha permitido el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante. Las denominadas válvulas de espín son una variante que permite obtener altos valores de magnetorresistencia con campo magnéticos débiles. Este fenómeno se utiliza, mediante válvulas de espín, en la lectura de las memorias magnéticas.

BIBLIOGRAFÍA

1. COLES B.R. and CAPLIN A. D. "*The electronic structure of solids*" Edward Arnold 1976
2. FEYNMAN R., LEIGHTON R, and SANDS M. "*Lectures on Physics*" Addison- Wesley, 1975
3. GIL-LOYZAGA P.E. y UBEDA MAESO A. (editores) *Informes Sanitarios Siglo XXI "Ondas Electromagnéticas y Salud Ondas"* A.F.I.T.Y.S, Madrid 2002.
4. HERNANDO A. y ROJO J. M. "*Física de los materiales magnéticos*" Síntesis 2001.
5. LIVINGSTON J. D. "*Driving force, the natural magic of magnets*" Harvard University Press, 1996.
6. MESSEL H. "*Science for High School Students*" Nuclear Research Foundation, University of Sidney, 1964.
7. MURRAY R., GRANNER D., MAYES P. and RODWELL V. "*Harper's Biochemistry*" McGraw Hill 2000.
8. PANOFSKY W. K. H. "*Classical Electricity and Magnetism*" Addison-Wesley 1955
9. SANCHEZ DEL RIO C. "*Introducción a la Teoría del Atomo*" Alhambra 1977.
10. VELAYOS S. "*Temas de Física III*" Universidad Complutense 1974.
11. WEINBERG S. "*The first three minutes*" Flamingo 1977.
12. YNDURAIN F.J. "*Electrones, Neutrinos y Quarks*" Drakontos 2001.