

REAL ACADEMIA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES

Imanes: su misterioso atractivo y su utilidad

DISCURSO
LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN
POR EL

EXCMO. SR. D. ANTONIO HERNANDO GRANDE

Y
CONTESTACIÓN
DEL

EXCMO. SR. D. CARLOS SÁNCHEZ DEL RÍO Y SIERRA

EL DÍA 26 DE ENERO DEL 2000



MADRID
Domicilio de la Academia
Valverde, 22
2000

Depósito legal: M. 1.115-2000

Imprime: REALIGRAF, S. A.

Pedro Tezano, 26

28039 Madrid

ÍNDICE

Discurso del Excmo. Sr. Dr. D. Antonio Hernando Grande	5
Imanes: su misterioso atractivo y su utilidad	5
Introducción	8
Interacciones responsables del orden magnético	8
Relación del magnetismo con otras ciencias y con la tecnología	14
El experimento seguro y la especulación filosófica	18
Discurso de contestación por el académico numerario Excmo. Sr. D. Carlos Sánchez del Río y Sierra	25

**DISCURSO
DEL
EXCMO. SR. DR. D. ANTONIO HERNANDO GRANDE**

**IMANES: SU MISTERIOSO ATRACTIVO
Y SU UTILIDAD**

**«Entre algunos científicos existe la tendencia a
confundir oscuridad con profundidad»**

Peter Medawar, Premio Nóbel de Medicina, en su libro *Pluto's
republic* (Oxford University Press, 1984) p. 21

Excelentísimo Señor Presidente,

Excelentísimos Señores Académicos,

Señoras y Señores:

Quiero agradecer a los Académicos el que hayan tenido a bien designarme para ocupar la vacante que dejó el Profesor Rodríguez Vidal. Este inmerecido nombramiento produce en mi modesta persona junto a cierto sentimiento de rubor un entusiasta deseo de servicio a esta Casa. Aunque no tuve la fortuna de ser su discípulo si le conocí lo suficiente para apreciar en él la figura de un Profesor preocupado por la corrección y el rigor de la materia que explicaba en clase. Hombre profundamente conocedor de los textos de Electromagnetismo fue un excelente crítico de algunos aspectos poco acabados de la Teoría, como el Teorema de Thomson. Entusiasmado con la axiomática de los campos electromagnéticos, que tan perfectamente dominaba, disfrutaba explicando a los jóvenes estudiantes de primer curso la asignatura de Física General. Me confesó, en una ocasión, que su actividad preferida era la discusión de los resultados de investigación con los miembros de su grupo. Fruto de esta interacción continua con sus estudiantes fue la generación de un magnífico grupo de discípulos que ocupan hoy cátedras y departamentos en muchas universidades españolas. Su calidad científica y humana hacen imborrable su recuerdo para los que le conocimos.

Desearía en este momento recordar también al Profesor Salvador Velayos, maestro de una buena parte de los investigadores españoles en el campo del Magnetismo. Él supo preservar y transmitir la llama que encendida por Blas Cabrera, con riesgo de apagarse por los avatares históricos, ha iluminado a los mas de cien físicos españoles que contribuyen hoy a la mejor investigación en Magnetismo. Su rigor experimental, señalado por Van Vleck, su fecunda labor docente junto a sus ejemplares modestia y honradez merecen mucho mas que este recuerdo lleno de gratitud y respeto.

1) INTRODUCCIÓN

Puesto que en el descubrimiento de cosas secretas y en la investigación de las causas ocultas, las razones más poderosas se obtienen de los experimentos seguros y de los argumentos demostrados mas que de las conjeturas probables y de las opiniones de especuladores filosóficos, hemos decidido comenzar el estudio de ese gran imán, nuestra madre común, la Tierra con el estudio de los materiales magnéticos —la magnetita y piedras que gozan de similares propiedades— y con aquellas partes de la superficie terrestre que pueden manipularse y percibirse con los sentidos, para después planear experimentos magnéticos y así penetrar en las partes íntimas de la Tierra».

Así arranca Sir William Gilbert¹ el prefacio a su obra máxima: «*De Magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; Physiologia nova, plurimis et argumentis et experimentis demonstrata*». La obra de Gilbert aparece en 1600 y es un delicioso compendio de los experimentos y observaciones relacionados con los imanes naturales. «Fellow» de St John College en Cambridge y médico de la reina Isabel de Inglaterra este preclaro investigador recopiló la historia del Magnetismo Antiguo y resumió la fenomenología con criterios científicos.

Tres puntos querría yo ahora distinguir de los indicados por Gilbert y que me gustaría sirvieran de goznes en torno a los cuales giraran los contenidos de este discurso: 1) Debido a la naturaleza electrostática de las interacciones que lo originan, el magnetismo *puede percibirse por los sentidos* sin ayuda de instrumentos especiales 2) es altamente interactivo con la física básica y con la tecnología y 3) hay en las primeras palabras de Gilbert una severa advertencia en defensa del método científico enfatizando que la base del conocimiento está constituida por los «experimentos seguros» en oposición a las «opiniones de especuladores filosóficos». Trataré de esbozar unos apuntes sobre estos tres aspectos y su relación con el panorama actual del Magnetismo.

2) INTERACCIONES RESPONSABLES DEL ORDEN MAGNÉTICO

El magnetismo 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

¹ El libro «De Magnete.» fue escrito en latín en 1600 por Sir William Gilbert. Existe una versión traducida por P. Fleury Mottelay en 1898 y reeditada por Dover Publication Inc. New York desde 1958.

origen de las palabras magnetita o imán, («aimant» en francés y «magnet» en inglés y alemán). Gilbert recoge la versión de Plinio el Joven, basada en una leyenda del poeta griego Nicandro según la cual un pastor llamado Magnes observó asombrado que su cayado de hierro quedó colgado de una roca que desde entonces se denominó piedra de Magnes. Señala también que la versión de Lucrecio, recogida en *De Rerum Natura*, atribuyendo el origen de la palabra magnetita a la abundancia de esta piedra natural en Magnesia, región del Asia Menor, no tiene mas fundamento que la versión de Plinio.

Los comportamientos ferro y ferrimagnéticos son consecuencia de una interacción entre electrones que da lugar a un estado fundamental de ordenamiento 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 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.

Dado que el acceso a temperaturas progresivamente decrecientes es una cuestión de desarrollo tecnológico resulta sencillo comprender que aquellos tipos de ordenamiento que se conocen de más antiguo son los que se desordenan a mas alta temperatura o lo que es equivalente los debidos a interacciones mas intensas. La clave que explica el origen de las interacciones entre espines, interacciones electrostáticas, solo pudo comprenderse en un marco cuántico. En 1926, tras mas de treinta siglos de conocimiento del fenómeno, Heisenberg indicó que la interacción culombiana entre electrones era la causa del orden magnético². Sin embargo, el detalle más importante y que más satisfaría a la aspiración al conocimiento completo, como es el de justificar por qué las interacciones electrostáticas entre electrones hacen ferromagnético al hierro y no al paladio, por ejemplo, permanecen sumidos en el misterio. Podemos pues afirmar que al alcanzarse el año 2000 nos encontramos incapaces de explicar satisfactoriamente, que en física equivale a decir cuantitativamente, por qué el hierro es ferromagnético.

Sobre el conocimiento actual del origen del magnetismo ordenado

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 pa-

² En la historia de la física la comprensión de algunos fenómenos fácilmente observables se ha resistido a veces mas que la explicación de fenómenos ocultos y débiles. El diamagnetismo y el paramagnetismo se descubrieron gracias a la contribución de la tecnología a mitad del siglo XIX, concretamente con la balanza de Faraday, y fueron explicados por Van Vleck en 1932.

rales 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 pueblan 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 es en esencia el criterio de Stoner que resume nuestro estado actual de conocimiento sobre las condiciones para la inducción de ferromagnetismo: una gran densidad de estados y una gran repulsión coulombiana entre electrones. Consecuencia de esta realidad son las reglas de Hund. La densidad de estados en espectros discretos es infinita cuando el nivel de Fermi degenerado está incompleto o nula cuando está lleno y por esta razón todos los orbitales incompletos son ferromagnéticos, mientras que los llenos carecen de momento magnético. Las reglas de Hund sintetizan el Principio de Exclusión con la minimización de la repulsión entre electrones mediante un par de recetas que constituyen la base del Magnetismo.

Hoy sabemos que la densidad de estados es realmente el término decisivo que condiciona las propiedades magnéticas de los metales. Lo que se manifiesta al considerar que la dependencia con la distancia interatómica de los dos factores que intervienen en el criterio de Stoner es opuesta. La interacción entre los electrones que cementan los átomos es tanto mayor cuanto más confinados se encuentran, mientras que la densidad de estados aumenta con la separación de los átomos al disminuir el solapamiento de las funciones de onda electrónicas y por tanto la anchura de banda. Los átomos de todos los metales magnéticos se separan al aumentar su imanación lo que indica la importancia de la

densidad de estados en la determinación del estado fundamental magnético. Al aumentar la temperatura de un metal ferromagnético la imanación decrece produciéndose una contracción magnética que a veces llega a contrarrestar la dilatación térmica como sucede con la aleación, cúbica centrada en las caras, hierro 65% y níquel 35%. En 1897, el físico suizo Guillaume³ encontró que el coeficiente de expansión térmica de esta aleación era nulo en un amplio margen de temperaturas. Este efecto conocido con el nombre de la aleación como efecto Invar, ha servido para múltiples aplicaciones y hoy en día es utilizado en todas las pantallas de televisores y ordenadores en la máscara de sombras que permite enfocar el haz electrónico sobre el punto de fósforo de la pantalla al no variar sus dimensiones con la temperatura. En julio de 1999 la revista *Nature* publicaba un artículo de Van Shilfgaarde, Abrikosov y Johansson⁴ en el que mediante cálculos «*ab initio*» se mostraba como el aumento de temperatura produce una evolución de las configuraciones de espín a estados excitados caracterizados por una inclinación arbitraria progresiva de los espines respecto a su orientación media. Dicha inclinación induce una disminución del volumen de la celda que contrarresta la dilatación térmica. El hallazgo de estados congelados de distribución de espines en desorden progresivo, diferentes a los estados con alta densidad de ondas de espín, es de suma importancia y actualmente incomprendido. Parafraseando a Phil Anderson, en su discurso de recepción del Premio Nóbel, podemos repetir que los cálculos *ab initio* «*permitirían a lo sumo reproducir la naturaleza sin ayudar muchas veces a comprenderla*». El que un efecto tan ligado a la inducción de orden magnético como es la dilatación de la red que sufren los metales al imanarse —magnetostricción de volumen— sea tema relevante en 1999 indica que el magnetismo ordenado de la materia condensada surge de unas condiciones extremadamente críticas. Todo depende del resultado de la lucha entre el enlace atómico que tiende a anular el espín total y la disminución la interacción electrón-electrón que tiende disponer paralelos los espines aumentando las distancias interatómicas.

El problema del hierro: otro William Gilbert.

En la aproximación de electrones fuertemente ligados, la mas adecuada para electrones 3d, la única interacción de canje relevante es la intra-atómica. Por tanto la condición canje fuerte conduce a las reglas de Hund o lo que es equivalente a la aparición de momento magnético atómico. ¿Por qué existe entonces orden de largo alcance? ¿Que interacción origina el paralelismo de los espines localizados en distintos átomos? Ya en 1960 R.Stuart y W.Marshall⁵ calcularon el canje directo

³ C. E. Guillaume, CR Acad. Sci. **125**, 235, (1897).

⁴ M. Van Schilfgaarde, I. A. Abrikosov and B. Johansson, *Nature* **400**, 46 (1999).

⁵ R.Stuart y W.Marshall, *Phys.Rev.* **120**, 353 (1960).

entre átomos vecinos de hierro y encontraron un valor setenta veces menor al experimental. En 1973 Mary Beth Stearns⁶ intentó buscar una vía alternativa capaz de explicar el origen del magnetismo del hierro. Se basó en las características de la topología de la superficie de Fermi de los electrones 3d del hierro. Según algunas direcciones la superficie es suave y el comportamiento de los electrones con vectores de onda según ellas se comportarían como electrones cuasi-libres. En las otras direcciones los electrones se comportarían como electrones localizados en los átomos. Dentro de este modelo la banda 3d se desdobra en dos tipos de electrones: los localizados alrededor de los átomos y que —debido al canje intra-atómico y como consecuencia de estar en una banda incompleta con alta densidad de estados— darían lugar al momento magnético y aquellos itinerantes que son responsables del canje indirecto entre los localizados. Cálculos posteriores mostraron que el vector de onda de Fermi de los electrones cuasi-libres permitía predecir, para una distancia interatómica como la del hierro, una interacción indirecta antiferromagnética entre primeros vecinos, en contra de la evidencia experimental. Hoy sabemos de los experimentos realizados con multicapas que la interacción indirecta llevada cabo por electrones no libres es compleja y difícil de predecir.

En 1881, otro William Gilbert estrenaba una opereta en el teatro Savoy de Londres. La obra tuvo dos conexiones con los imanes. Fue la primera representación que utilizó luz eléctrica generada por inducción electromagnética mediante imanes permanentes. Además trataba de los amores imposibles de un imán con su admirada campanilla de plata, muy próxima a él en la ferretería en que convivían. La obra titulada «*Patience*» recoge la desesperación del imán que no comprende como siendo tan intensamente querido por clavos, tijera y alfileres solo recibe la fría indiferencia de la campanilla. Hoy sabríamos explicar al triste imán las razones del desafecto de la plata, pero seríamos incapaces de explicar satisfactoriamente las causas de su espectacular éxito con los vecinos de hierro y acero.

Un tema de hoy. La interacción de doble canje

Uno de los grandes temas de nuestro tiempo en el campo de la Física del Estado Sólido es el de la magnetorresistencia gigante descubierta en 1989 en Orsay por el grupo de Albert Fert⁷. Este descubrimiento su-

⁶ M. B. Stearns, *Phys.Today*, 34 April (1978). También puede consultarse «The Theory of Magnetism» D. C. Mattis, Springer Series on Solid State Sciences. 2 Ed. 1988. En este libro se trata con detalle el canje en todas sus representaciones.

⁷ M.N. Baibich, J.M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P.E. Etienne, G. Creuzet, A. Friedich, and J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1998).

puso un auténtico acontecimiento por las repercusiones que podría tener en la tecnología asociada a la lectura magnética y por su importancia en la comprensión de nuevos fenómenos básicos.

Un poco después, los científicos que venían de retirada, al menos parcial, del mundo de investigación nacido en torno a la superconductividad de alta temperatura, tuvieron la merecida consolación de ver resurgir el interés por las perovskitas. Responsable del nuevo florecimiento fue el descubrimiento de la magnetorresistencia colosal, publicado en *Science* en 1994⁸.

En efecto, uno de los fenómenos más impresionantes y atractivos presentados por las perovskitas del tipo $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$, es una transición desde un estado paramagnético y aislante a un estado ferromagnético y conductor que puede inducirse bien bajando la temperatura o aplicando un campo magnético a temperatura constante. Cuando la transición se induce por campo se produce una variación de la conductividad de varios órdenes de magnitud que se conoce en la actualidad como efecto de magnetorresistencia colosal.

¿Cuál es la causa de que un óxido aislante se convierta en un metal ferromagnético? Una primera aproximación a la respuesta se obtiene con la observación de que los dos compuestos límites LaMnO_3 y CaMnO_3 , no presentan tal transición lo que sugiere que la coexistencia de cationes en estados de valencia 3+ y 4+ es una condición necesaria para la presencia de esta transición. El átomo de Mn con una configuración $3d^5 4s^2$ actúa con valencia 3 en el compuesto de La, ya que éste tiene valencia 3, y se configura en $3d^4$ con carga 3+. En el compuesto de Ca, de valencia 2, el Mn tiene que actuar con valencia 4+ y se configura en $3d^3$. Los compuestos con base única de lantano o de calcio son antiferromagnéticos a baja temperatura y aislantes, como cabría esperar de óxidos con enlace covalente e interacción de supercanje. Los compuestos intermedios tienen mezcla de iones Mn^{3+} y Mn^{4+} , en particular para $x=0.5$ la mitad de los manganeso están en valencia 3+ y la otra mitad en valencia 4+.

Tal como Zener⁹ había descrito en un magnífico y memorable artículo escrito en 1950, el origen de la transición se encuentra en la posibilidad de ferromagnetismo que está asociada a la presencia de enlaces $\text{Mn}^{3+} - \text{O}^{2-} - \text{Mn}^{4+}$ lo que da lugar a la interacción de doble canje, concepto posteriormente refinado por de Gennes¹⁰.

En el campo cristalino cúbico de la perovskita el nivel 3d se desdobra en dos niveles conocidos en la jerga de la teoría de grupos como e_g , do-

⁸ S. Jin et al. *Science* **264**, 413, (1994).

⁹ C. Zener, *Phys. Rev.* **82**, 403 (1951).

¹⁰ P.G. de Gennes. *Phys. Rev.* **118**, 141 (1960).

blemente degenerado, y t_{2g} , triplemente degenerado. En los dos tipos de iones de Mn el nivel de mas baja energía t_{2g} está lleno y con los tres espines paralelos según las reglas de Hund y en los iones de valencia 3+ también existe un electrón en el nivel e_g con espin también paralelo al de los tres electrones de t_{2g} . La configuración $Mn^{3+}-O^{2-}-Mn^{4+}$ que podemos llamar Ψ_A presenta una obvia degeneración con la correspondiente $Mn^{4+}-O^{2-}-Mn^{3+}$ que llamaremos Ψ_B . Supongamos que la transición entre ambos estados se lleva a cabo por dos saltos simultáneos, uno de un electrón desde el estado e_g del ión Mn^{3+} al ión O^{2-} y otro desde el ion O^{2-} al estado e_g inicialmente vacío del ión Mn^{4+} . Tal transición está permitida si y solo si se respetan las reglas de Hund, es decir si los espines de los dos electrones que saltan son paralelos, lo que implica que los espines de los dos cationes son paralelos. En resumen, cuando los espines de los cationes son antiparalelos la transición está prohibida, mientras que es posible si son paralelos. Es fácil comprobar que la posibilidad de la transición reduce la energía del sistema. Para ello basta recordar que si la amplitud de probabilidad de la transición es A la energía de uno de los dos estados, no sabemos si $\Psi_A+\Psi_B$ o $\Psi_A-\Psi_B$ es menor que la energía del otro en la cantidad $2A$. Este hecho implica que la energía del estado fundamental es ϵ_0-A , donde ϵ_0 es la energía del conjunto para amplitud de transición nula. Por tanto, la energía de la configuración ferromagnética de los cationes, al permitir la transición con amplitud A, es mas baja en la cantidad $2A$ que la energía de la configuración antiferromagnética. Una segunda propiedad del enlace del O con cationes adyacentes de distinta valencia es la aparición de conductividad. En efecto la transición equivale a una oscilación de la posición del Mn^{3+} y del Mn^{4+} lo que equivale a un salto electrónico de izquierda a derecha y de derecha a izquierda a través del oxígeno con frecuencia $2A/\hbar$. Tal frecuencia de salto se corresponde con un coeficiente de difusión de los iones Mn^{4+} dado por $D = a^2A/\hbar$, donde a es la constante de red. La conductividad eléctrica es proporcional al coeficiente de difusión y puede expresarse como $ne^2D/kT = xe^2A/a\hbar kT$, donde x es la fracción de iones Mn con valencia 4+. El doble canje deslocaliza a los electrones.

La temperatura de Curie puede estimarse de la relación general $T_c=A/k$. Para temperaturas superiores la disminución de energía conseguida por la transición se hace inferior a la energía térmica y la configuración ferromagnética desaparece. Con el apagado del orden ferromagnético los electrones se localizan y el material se hace aislante.

3) RELACIÓN DEL MAGNETISMO CON OTRAS CIENCIAS Y CON LA TECNOLOGÍA

Gilbert creía firmemente que un programa de experimentos magnéticos iba a permitir desentrañar los misterios de la Tierra, ya que, según el descubrió, ésta es un gran imán y en ella se presentan los minerales mag-

néticos. Hasta Gilbert el Magnetismo se utilizó como un juego, como fuerza orientadora de la brújula o como una inagotable fuente de símiles literarios. En uno de los primeros diálogos de Platón, escrito cuatrocientos años antes de Cristo, Sócrates explica de este modo la inspiración de los poetas: «*Existe una divinidad animándote a ti, como la contenida en la piedra que Eurípides llama imán y que es comúnmente conocida como la piedra de Heraclea. La piedra no solamente atrae anillos de hierro sino que les comunica el poder de atraer a otros, de este modo la Musa inspira a los poetas que a su vez atraen a otras personas en cadena*».

El Magnetismo, ciencia nacida en Francia con el siglo XX, de la mano de Pierre Curie, Paul Langevin y Pierre Weiss, ha sido un excelente contribuyente al establecimiento de la Mecánica Cuántica. Dio éxitos espectaculares a la Física Estadística que fue utilizada por vez primera en un sistema diferente a las moléculas de sistemas gaseosos por Langevin¹¹ en 1904 para explicar la dependencia térmica de la susceptibilidad paramagnética medida por Pierre Curie¹². La termodinámica de procesos irreversibles, la teoría de fenómenos cooperativos y la teoría de comportamientos críticos se han nutrido de fenómenos magnéticos. En particular, las partículas monodominios constituyen un material ideal para estudios de relajación, clásica y cuántica, hacia el equilibrio. Como ejemplo de su importancia en relación con la física básica, señalemos que las propiedades magnéticas de la materia ocupan en la actualidad un 10% de las publicaciones en Physical Review Letters.

Dentro del capítulo de las relaciones del Magnetismo con otras ciencias conviene resaltar que la primera contribución experimental española a la Física bien establecida fue la medida de los momentos magnéticos de los átomos de tierras raras que permitieron la comprobación de las reglas de Hund y el establecimiento de la teoría cuántica del paramagnetismo por Van Vleck. Como reconoce el propio Van Vleck¹³ los trabajos experimentales de Blas Cabrera, continuados por Salvador Velayos, fueron de gran utilidad por haberse realizado *en el momento oportuno con impecable rigor*¹³. En particular resalta: «*Las medidas que realizó Velayos en óxido de europio, en 1930, me fueron muy útiles en 1965, porque cuando el trabajo experimental es llevado a cabo cuidadosamente y con rigor no pierde su interés con el paso del tiempo*».

La tecnología y el Magnetismo

Pero, sobre todo, el Magnetismo ha contribuido al desarrollo tecnológico con dos grandes funciones: a) la capacidad de transformar,

¹¹ P. Langevin, *Ann. Chim. Phys.*, 5, 70, (1905).

¹² P. Curie, *Ann. Chim. Phys.* 5, 289 (1895).

¹³ Libro editado en el centenario del nacimiento de Blas Cabrera, 1978. Universidad Internacional Pérez Galdós. Gran Canaria.

transportar y reconvertir la energía mediante la multiplicación del flujo en los núcleos de generadores, transformadores y motores y b) la posibilidad de almacenamiento que a su vez puede ser de energía (imanes) o de información (memoria magnética). Para ambas aplicaciones se requiere la máxima imanación posible. Sin embargo esta magnitud al coincidir con el número de átomos por unidad de volumen multiplicado por el momento magnético atómico no es muy susceptible de optimizar y es normalmente del orden de 1T. Para la multiplicación de flujo y la construcción de sensores se requiere un ciclo de histéresis muy estrecho, material magnéticamente blando, y para el almacenaje un ciclo ancho, material magnéticamente duro. La anchura del ciclo crece con la anisotropía magnética que depende de la interacción espín-órbita de los átomos magnéticos y de la microestructura del material. Se puede decir que el objetivo de la ciencia de los materiales magnéticos ha consistido en dilatar el intervalo de campos coercitivos disponibles. En tiempos de Platón, como a comienzos del siglo XX los materiales con ciclo de histéresis mas ancho y mas estrecho eran la magnetita y el hierro respectivamente. Dos órdenes de magnitud separaban los campos coercitivos de ambos materiales. Hoy día, tras cincuenta años de investigación, el material magnético mas blando es de composición $\text{Fe}_{79}\text{Zr}_{7}\text{B}_{14}$, con campo coercitivo de 10^{-8} T, y el mas duro $\text{Fe}_{79}\text{Nd}_{7}\text{B}_{14}$, con campo coercitivo de 4T. Ambas composiciones en estado nanocristalino tienen campos coercitivos que difieren en **¡8 órdenes de magnitud!** con una diferencia de solo un 7% de átomos de Zr sustituidos por un 7% de átomos de Nd. Esta diferencia determina la variación del valor medio de la interacción espín-órbita.

Se puede afirmar, con riesgo muy limitado de exageración, que no existe instrumento de la tecnología de hoy que no utilice una de estas dos grandes funciones de los materiales magnéticos. Como curiosidad es interesante recordar que un coche contiene treinta imanes y un hogar standard otros treinta, principalmente en motores de corriente continua. Ordenadores, auriculares, altavoces, cintas de música, videos, disquetes, tarjetas de crédito, billetes de transportes, etiquetas de seguridad son ejemplos de uso cotidiano de materiales magnéticos. De hecho una amplia parte del Magnetismo básico actualmente bien establecido se ha desarrollado en los laboratorios de empresas tales como Philips, General Electric, General Motors, Bell Telephone o IBM.

Al ser la Tierra un gran imán, los barcos desde la antigüedad, y los satélites artificiales hoy ven a través del campo magnético. Los sensores de campo magnético, sustitutos actualizados de la brújula, permiten la orientación de los satélites mientras su cambio de rumbo se controla por medio de los magnetopares. Aparecen en los últimos años nuevas e innumerables aplicaciones de los efectos y materiales magnéticos. El campo de la diagnosis médica se ha visto muy enriquecido por la uti-

lización espectacular de campos magnéticos. La resonancia magnética nuclear y la magnetoencefalografía¹⁴ son ejemplos ilustrativos de esta irrupción del magnetismo en las técnicas hospitalarias.

Incluso en nuestros días, el halo de misterio que rodeaba al Magnetismo en los tiempos de Gilbert con tendencia a relacionar lo mágico y lo esotérico con el campo magnético permanece vivo y emerge periódicamente a veces de la mano de malandrines y oportunistas. Vivimos hace unos años la fiebre publicitaria del agua imanada como sustituto laico del agua de Lourdes y vivimos hoy un catastrofismo rigurosamente injustificado de los efectos de los campos sobre la materia viva. Lejos del catastrofismo referido, pero dentro de las normas más estrictas del sentido común, parece buena receta controlar y regular la invasión que los campos de baja frecuencia están llevando a cabo en nuestro medio ambiente. Según aumenta el número y la sensibilidad de ordenadores, microscopios electrónicos, sistemas de resonancias magnéticas y dispositivos electrónicos en general el efecto de dichos campos, también crecientes en intensidad y amplitud de espectro, cobrará mayor y urgente relevancia.

Un caso actual de interacción problemática entre el campo magnético y equipos electrónicos

Un ejemplo interesante de problema planteado recientemente como un conflicto de intereses entre dos servicios de enorme importancia social, sanidad y transporte, ha tenido como protagonista al campo magnético producido por el ferrocarril metropolitano de Madrid. El campo magnético producido por el «Metro» no ha creado ninguna dificultad perceptible hasta muy recientemente cuando se ha observado que la imagen de los microscopios electrónicos situados bajo su acción se deformaba y difuminaba hasta hacerla desaparecer. El «Metro» de Madrid funciona con una alimentación de bajo voltaje continuo, 600 voltios, lo que da lugar a picos de corriente de hasta 10000 amperios cuando se requiere potencia de tracción, siendo los normales del orden de 1000 amperios. Con valores de intensidad de 1000 A, los valores de campo a 20 m sobre la vía, originados por la diferencia en altura de cuatro metros entre la corriente de ida —catenaria— y de vuelta —vía— son del orden de 2 μ T. Al ser estos campos aleatorios no se pueden corregir de modo estacionario. El efecto de la fuerza de Lorentz que este campo ejerce sobre un haz de electrones de 1 keV de energía y un metro de recorrido es el de introducir un ángulo de desviación de 10^{-2} radianes

¹⁴ Es de señalar que la Fundación Pérez Modrego en combinación con fondos FEDER acaba de financiar un equipo de magnetoencefalografía para la Universidad Complutense.

En verano de 1998, la Comunidad de Madrid, por diversas razones, había construido el túnel correspondiente a un tramo de la recientemente estrenada línea 7, a lo largo del Hospital Clínico de la Ciudad Universitaria. En el sótano del Hospital se encuentra un número elevado de sistemas de diagnóstico basados en microscopía electrónica y técnicas similares de formación de imágenes. La situación denunciada por la dirección del Hospital era realmente crítica. Perforar otro túnel era algo casi inviable tanto económicamente como técnicamente. Paralizar el Hospital era una posibilidad más catastrófica que la anterior. Apantallar todos los equipos o apantallar el túnel era solución que aparte de parcialmente eficaz no podía compensar económicamente. El objetivo que pretendimos, en colaboración con Fernando Briones y Guillermo Rivero, era localizar los campos reduciendo el área del circuito eléctrico, —subestación, catenaria, motor, vía, subestación— que tiene de extensión la distancia de la subestación al tren y que puede alcanzar varios cientos de metros. Se realizaron cortes eléctricos en las vías en tramos de 15 m por debajo del Hospital. Cada tramo, aislado de los tramos vecinos, estaba conectado mediante un cable de subida a otro cable único muy próximo a la catenaria y que actuaba como conductor de vuelta. El circuito se había reducido en extensión a algunos tramos de 15 m. Como sucede con los dominios ferromagnéticos la disminución del área de las espiras producía un efecto de localización de los campos. El campo a veinte metros de altura, en el sótano del Hospital, se redujo hasta hacerse imperceptible por los equipos electrónicos con un gasto económico despreciable.

EL EXPERIMENTO SEGURO Y LA ESPECULACIÓN FILOSÓFICA

Gilbert en su tiempo apostó por el experimento seguro. Feynman¹⁵ explica, en síntesis excelentemente simplificada las cuatro etapas del método de conocimiento utilizado en Física: 1) observación de un fenómeno, 2) medida de magnitudes relacionadas con el fenómeno e introducción del número, 3) búsqueda de la ley que resume las medidas experimentales y 4) búsqueda del principio a partir del cual la ley experimental pueda deducirse como consecuencia. Los físicos formalistas emplean su tiempo mayoritariamente en el desarrollo de la cuarta etapa, mientras que los fenomenológicos se dedican a las tres primeras. La tradición greco-mediterránea, mucho más entusiasta de la especulación filosófica que Gilbert, influye en priorizar como labor de excelencia y máxima profundidad la dedicación a los aspectos formales, los principios y sus interrela-

¹⁵ Feynman, en su libro *Lectures on Physics* ed. Addison-Wesley, vol. I, 26-2 y 26-3, Fifth printing 1975, utiliza el fenómeno de la difracción de la luz para esbozar esta simplificada síntesis.

ciones.

La intuición y el arte de «bien aproximar»

El Magnetismo como parte de la Física de la Materia Condensada, basada en la interacción electromagnética de electrones con protones y de átomos con átomos, tiene como principios la Mecánica Cuántica y las ecuaciones de Maxwell. Si bien debe admitirse que el hamiltoniano, si fuera completo, contendría todos los fenómenos por descubrir y la esencia misma del comportamiento de la materia condensada (e incluso de la vida misma), parece obvio que dicho aserto está casi vacío de contenido. Y está vacío porque la complejidad tanto cuantitativa, asociada al número de partículas y excitaciones, como cualitativa debida a las interacciones e interrelaciones de tantas partículas y excitaciones, no permite a) escribir el hamiltoniano completo, o b) en caso de que fuera posible escribirlo correctamente, obtener su solución o c) en caso de que se obtuviera tal solución comprender de modo satisfactorio sus implicaciones. La experiencia muestra que la superconductividad, el microscopio de efecto túnel, la magnetorresistencia gigante o los vidrios de espín, por solo citar algunos ilustrativos ejemplos, se han observado y desarrollado antes de ser deducidos desde un hamiltoniano.

La experimentación que progresivamente incrementa su resolución llegando a escalas atómicas y nucleares, junto al arte de bien aproximar, guiado por la conjetura probable, constituyen, desde la experiencia histórica, los elementos básicos responsables del desarrollo del conocimiento de la Física del Estado Sólido.

El impenitente afán de generalidad y la pasión por el rigor matemático, tendencias imprescindibles para la actividad formalista, al trasladarse a las otras etapas del método científico actúan generalmente como lastres de la investigación creadora. En «Solid State Physics» Wigner y Seitz¹⁶ escribieron la siguiente apreciación que no puedo resistirme a traducir «*Si uno tuviera una gran máquina de calcular podría utilizarla para resolver la ecuación de Schrödinger de cada metal y obtener las propiedades físicas de interés, tales como la energía de cohesión o la constante de la red. No es claro, sin embargo, que con ello se adelantara mucho. Presumiblemente los resultados estarían rigurosamente de acuerdo con los datos experimentales pero no se habría aprendido nada nuevo. Sería preferible tener una imagen mas viva del comportamiento de las funciones de onda, una descripción simple de la esencia de los factores que determinan la cohesión y una comprensión de las causas de las variaciones de las propiedades de un metal a otro.*» La obtención de una imagen viva de las funciones de onda y la de-

¹⁶ E.P. Wigner and F. Seitz, Solid State Physics 1, 97 (1955), recogido por C. Kittel en «Introduction to Solid State Physics», ed. John Wiley, fourth edition, p. 125, 1971.

tección de las causas reales que condicionan los fenómenos son actividades creativas que raramente provienen del rigor. Como gusta señalar el Profesor Juan Rojo: *el revestimiento de rigor viene generalmente después del acto creativo*. Muchos creadores de ciencia han sido intuitivos que sabían resolver los problemas porque, según indicaba el Profesor Nicolás Cabrera, «sabían con anterioridad la respuesta». Ya Galileo¹⁷, en directa crítica a la herencia aristotélica, ponía en boca de Salviati una rotunda verdad al respecto » *La certeza de la conclusión ayuda no poco a encontrar la demostración*». En cada descubrimiento subyace una mente que intuyó esa posibilidad. *Abí buscaría yo la verdadera excelencia y profundidad de los físicos*. El saber distinguir y clasificar los diferentes términos posibles de influir en un fenómeno complejo por su orden de magnitud y el saber estimar estos órdenes es el sello de identidad del gran físico. Enseñaba en clase el Profesor Sánchez del Río una sutil definición de buen físico como aquel que sabe estimar el número de barberos que hay en la ciudad. Existe un amplio consenso entre los físicos creativos en considerar a la Física, de acuerdo con la definición de Enrico Fermi, como el arte de «bien aproximar». En este sentido la hipótesis de Weiss¹⁸ del campo molecular ha sido extremadamente fructífera para la comprensión del Magnetismo aunque hoy sabemos que no constituye realmente mas que una excelente aproximación autoconsistente al hamiltoniano de canje. Aproximación, por cierto, realizada veinte años antes al establecimiento del propio hamiltoniano.

La instrumentación que permite nuevas observaciones y experimentos seguros

No es raro que científicos autoconsiderados puros muestren indiferencia hacia el desarrollo tecnológico y olviden que es, aparte de fuente de nuevas posibilidades, fuente de ciencia pura. La tecnología genera instrumentación de resolución creciente. El par de estacas utilizadas por Eratóstenes para medir el radio de la Tierra, el telescopio de Galileo, el interferómetro de Michelson, el microscopio electrónico de alta resolución, son ejemplos contundentes de la capacidad generadora de ciencia que posee la instrumentación adecuada. Tan significativa es para un ser vivo la característica de fabricar útiles dirigidos a un fin que sirve en Arqueología y Antropología para definir el límite existente entre lo animal y lo humano. Utilizando el rigor no podemos asegurar que un perro sea incapaz de especular; sin embargo, estamos seguros de que no fabrica microscopios capaces de ver

¹⁷ «Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano» escrito por Galileo en 1632, Recogido por J. M. Sánchez Ron en «Como al león por sus garras» p. 52 Debate Editorial 1999.

¹⁸ P. Weiss, *J. Phys. Rad.* 4, 469 (1907).

los átomos.

La revolución acaecida en la ciencia de los materiales¹⁹ y en particular de los materiales magnéticos no ha provenido del estudio profundo y riguroso de la mas o menos bien establecidas teorías del Estado Sólido. La aparición de nuevas técnicas de producción y caracterización de materiales artificiales ha sido la fuerza impulsora del conocimiento de esta ciencia y por ende del enriquecimiento de las teorías mencionadas. 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, porcentajes enormes de átomos en superficies e interfases. Estas técnicas han puesto en evidencia que el teorema de Bloch, si bien matemáticamente impecable, no tiene la trascendencia en Física del Estado Sólido que se le supuso. 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.

La nueva Ciencia de los Materiales: ¿materiales magnéticos a medida?

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. La longitud de correlación de canje, del orden de nanómetros, 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.

Un ejemplo precioso de arte de bien aproximar es el método propuesto por Becker, Alben y Chi para resolver el problema de la aniso-

¹⁹ M. A. Alario, «De superconductores y otros materiales» Discurso de recepción. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (1993).

tropía aleatoria en sistemas ferromagnéticos. ¿Cómo se distribuyen los momentos magnéticos locales en un ferromagnético en los que el eje de fácil imanación fluctúa en orientación al movernos en muy pocas distancias atómicas? El canje tiende a poner paralelos los momentos magnéticos adyacentes tendencia que choca con la energía de anisotropía debido al carácter aleatorio de la orientación de los ejes fáciles. La solución de este problema de cálculo variacional en tres dimensiones, cuando se incluye la interacción dipolo-dipolo es generalmente inalcanzable.

Sin embargo los mejores materiales magnéticos conocidos en la actualidad, tanto los mas blandos como los mas duros son nanoestructuras de anisotropía aleatoria o láminas delgadas con una enorme proporción de átomos de superficie con simetría rota. Conviene por tanto aprender lo mas relevante de estos sistemas si queremos controlarlos y diseñarlos «a medida». En lugar de calcular correlaciones a partir de las correspondientes funciones de Green, Alben, Becker y Chi²⁰ esquematizaron con inteligencia e intuición el siguiente modelo. Consideremos que todos los spines están paralelos en una dimensión típica L , que se puede obtener de modo autoconsistente con el siguiente argumento. Si la distancia en que fluctúa el eje fácil es d , en el volumen L^3 habrá $N = (L/d)^3$ ejes fáciles diferentemente orientados, en este caso podemos hacer uso de la teoría elemental del camino aleatorio para deducir que la constante de anisotropía macroscópica se separa de su valor medio correspondiente a infinitos ejes, que es cero, en la cantidad $k/N^{1/2}$ o $k/(L/d)^{3/2}$, donde k es la constante de anisotropía local. Por otra parte, la energía de canje variará con A/L^2 , siendo A la constante de canje. La minimización de ambas energías conduce inmediatamente al $L = A^2/k^2d^3$. Sea d del orden de la distancia interatómica como sucede en los sólidos amorfos. En el caso de los elementos de transición 3d magnéticos, A es del orden de 10^{11} Jm^{-1} y k de 10^4 Jm^{-3} lo que conduce a un valor de L de 10^{-3} m y N resulta 10^{18} por lo que la anisotropía promedio es nula, exactamente $10^{-9}k$. En sistemas de anisotropía aleatoria constituidos por átomos de tierras raras la anisotropía local es tres órdenes de magnitud superior, $k=10^7 \text{ Jm}^{-3}$, debido a su mas elevada interacción spin-órbita. En este caso L es 10^{-9} m lo que indica que no hay orden de largo alcance y el orden magnético se encuentra frustrado. Si ahora sustituimos el valor obtenido de L en la expresión de la anisotropía macroscópica observamos inmediatamente que esta toma el valor k^4d^6/A^3 . El campo coercitivo es proporcional a k y de sus medidas en muestras nanocristalinas con distinto tamaño de grano, tamaño que coincide con la longitud de correlación de los ejes fáciles d , se ha podido observar su perfecto ajuste con la ley de d^6 predicha por el modelo. Ahora, gracias al modelo de Alben, Becker y Chi, que no

²⁰ R. Alben, J. J. Becker y M. C. Chi, J. Appl. Phys., 49, 1653 (1978).

requiere mas conocimientos que la técnica de derivar quebrados y la expresión de la dispersión en teoría del camino aleatorio, sabemos manipular los materiales magnéticos jugando con su tamaño de grano y su composición.

Volviendo al hierro, tan incomprendido magnéticamente, podremos ilustrar mejor la importancia de la nanoestructura en las propiedades macroscópicas. En un trozo de hierro nanocristalino, obtenido por molienda mecánica, en el que los granos tienen un tamaño típico de 8 nanómetros el número de átomos en las fronteras de grano es aproximadamente un 18% del número total de átomos. Esta fracción es suficientemente alta para ser detectable macroscopicamente. Por ejemplo, el espectro Mössbauer contiene una distribución de campos hiperfinos con valores bien separados de 33 Teslas, que es el campo hiperfino correspondiente a los átomos de hierro perfectamente ordenados en su red bcc. La distribución de campos hiperfinos refleja la distribución de simetrías y distancias interatómicas en las fronteras de grano. Los átomos de la frontera tienen propiedades magnéticas distintas debido tanto a las fluctuaciones de la interacción de canje como a las de intensidad y orientación de las anisotropías locales. Hemos podido observar que la frontera de grano de hierro en estado de alta entropía o densidad de defectos se comporta como un vidrio de spin²¹. Al relajar defectos evoluciona a veces a estructuras metastables como por ejemplo a simetrías fcc²². El estudio detallado del magnetismo de los átomos de la frontera puede facilitar algún día la comprensión del Magnetismo del hierro.

¿Qué sucede con el estado fundamental magnético de un sistema en el que el canje varía en longitudes inferiores a su longitud de correlación? ¿Cuál es el comportamiento de un sistema nanoestructurado en una dimensión en el que la temperatura de Curie varía 1000 K en unos nanómetros? El Magnetismo hoy retiene su inmenso atractivo para los amantes de la investigación en Física. Somos conscientes de que lo que queda por conocer es mucho mas que lo conocido y que, parafraseando un artículo reciente de Andrew Murray²³ en *Nature*, efectos, tan poco profundos para algunos, como la magnetostricción de volumen, mantendrán ocupados a los físicos del estado sólido los años venideros.

Acabo reiterando mi gratitud a los excelentísimos señores académicos y asegurándoles que pondré toda mi limitada capacidad al servicio de esta Academia que hoy me acoge.

²¹ E. Bonetti, L. Del Bianco, D. Fiorani, D. Rinaldi, R. Caciuffo and A. Hernando. *Phys. Rev. Lett.* **83**, 2829. (1999).

²² L. Del Bianco, C. Ballesteros, J. M. Rojo and A. Hernando. *Phys. Rev. Lett.* **81**, 4500, (1998).

²³ A. Murray, *Nature* **400**, 19 (1999).

**DISCURSO DE CONTESTACIÓN
POR EL ACADÉMICO NUMERARIO
EXCMO. SR. D. CARLOS SÁNCHEZ DEL RÍO Y SIERRA**

Excmo. Sr. Presidente,

Excmos. Sres. Académicos,

Señoras y Señores:

Sean mis primeras palabras de agradecimiento a nuestro Presidente por otorgarme la representación de la Academia para dar la bienvenida a Antonio Hernando que en este acto ingresa en la Corporación. El motivo de tal designación es probablemente mi antigua relación con el recipiendario a quien conozco desde hace muchos años y cuya brillante carrera científica a lo largo de seis lustros he seguido con interés.

Hace ahora exactamente treinta años que el joven estudiante Antonio Hernando aparecía en el aula de la Universidad Completase donde yo impartía un curso de Física Atómica y Nuclear. Fue un alumno que mereció la máxima calificación lo cual no era fácil porque yo fui siempre benévolo con los estudiantes mediocres pero exigente con los estudiantes brillantes. Lo que ya me llamó entonces la atención es que Hernando entendía los conceptos físicos con los que describimos los procesos naturales al margen de su formulación matemática y ello auguraba que habría de tener éxito como físico de oficio.

Terminada la licenciatura tuvo nuestro nuevo Académico la suerte de caer en las manos de aquel gran profesor, recientemente desaparecido, que fue Don Salvador Velayos bajo cuya dirección se doctoró con Premio Extraordinario en 1974.

Antes de seguir con los méritos del recipiendario séame permitido un inciso en relación con su maestro. Fue Salvador Velayos una persona que atraía a cuantos lo trataban por su carácter amable, su comportamiento siempre recto y su dedicación total a sus estudiantes y a sus colaboradores. Era tímido y reacio a la vida social y sin duda por eso no quiso ser Académico a pesar de que se le ofreció la posibilidad en más de una ocasión. Estas cualidades de Velayos son tan conocidas en esta Casa que no vale la pena insistir sobre ellas. Si traigo aquí el recuerdo de Velayos es por algo que incide directamente en la formación

de Hernando y que no se suele mencionar. Es bien sabido que el cultivo de la Física experimental en España tuvo su comienzo cuando Don Ignacio González Martí convirtió el antiguo gabinete de Física con orientación demostrativa en un laboratorio cuya finalidad era medir propiedades y procesos físicos. El más distinguido de sus estudiantes fue Don Blas Cabrera a quien todos reconocemos como el pionero de los físicos españoles del primer tercio de este siglo. Sucede, sin embargo, que para no empañar los méritos tan relevantes de los físicos de aquellos años se oculta que arrastraron una limitación fundamental: generalmente median con aparatos ya comerciales adquiridos en el extranjero. Y por eso no pudieron seguir en la vanguardia de la Física cuando la destreza instrumental resultó imprescindible. Otros sabios también españoles como Don Santiago Ramón y Cajal o Don Leonardo Torres Quevedo desarrollaron técnicas propias y por eso se mantuvieron siempre en primera línea de sus disciplinas. Pero en la Física española la costumbre de preparar nuestros propios dispositivos de medida es cosa de después de la guerra civil y Salvador Velayos fue uno de los que iniciaron e impulsaron la costumbre de desarrollar técnicas propias para atacar problemas realmente novedosos.

En esta escuela se formó nuestro nuevo compañero y como además tenía excelentes cualidades intelectuales, capacidad de trabajo e iniciativa, los resultados fueron óptimos. Desde 1980 es catedrático de Magnetismo de la Materia en la Universidad Complutense de Madrid. En 1989 impulsó la creación del Instituto de Magnetismo Aplicado de la misma Universidad que desde entonces dirige. En dicho Instituto se combinan la investigación de materiales magnéticos y los contratos de investigación con empresas nacionales y extranjeras. Los temas de investigación incluyen procesos de imanación, magnetostricción, anisotropía magnética, materiales amorfos, materiales nanoestructurados, nanocristales, sólidos granulares, multicapas, láminas delgadas, magnetoelasticidad y magnetorresistencia entre otros.

Es autor de unas trescientas publicaciones científicas en las revistas más prestigiosas y en libros escritos por varios especialistas. Ha sido también editor de tres libros de esta clase. Sus publicaciones han sido objeto de más de mil referencias. Ha dirigido además diecisiete tesis doctorales.

Es autor de dieciséis patentes relacionadas con proyectos de investigación aplicada consecuencia de contratos con empresas tan conocidas como Atlas Copco, Ikea, Volvo, Alcatel, INTA, RENFE y la Fábrica Nacional de Moneda y Timbre.

Considerando tan amplia actividad no es de extrañar el reconocimiento internacional que ha merecido. Ha sido profesor invitado en la Universidad Técnica de Dinamarca en 1984, en la Universidad de

Cambridge en 1993 y en el Max-Planck Institut de Stuttgart en 1997. También ha sido conferenciante invitado en cerca de setenta Congresos Internacionales. Es miembro del Comité Internacional de la Conferencia sobre Materiales Magnéticos Blandos, del Consejo Asesor de la revista «Journal of Physics: Condensed Matter» y Vice-Presidente de la Comisión de Magnetismo de la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada.

Su gran labor no ha sido ignorada en España. En 1993 fue galardonado con el Premio de las Ciencias por la Confederación Española de Organizaciones Empresariales. La Administración Pública ha sabido aprovechar sus amplios conocimientos y juicio equilibrado. Por eso ha sido director de investigación de cinco proyectos de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología y recientemente nombrado experto sobre Protección contra la Radiación no Ionizante del Ministerio de Sanidad y Consumo así como miembro del Comité Científico del Parque Científico de Barcelona.

* * *

Después de haber expuesto sucintamente los méritos tan relevantes que adornan al recipiendario pasaré como es costumbre a comentar brevemente su discurso.

Una de las cosas que se destacan en el mismo es la gran importancia de las aplicaciones de los materiales magnéticos. Ello sorprende si se recuerda que las fuerzas magnéticas son muy débiles y por eso poco relevantes en relación con las propiedades de la materia.

En efecto, sabemos que dos cargas eléctricas se atraen o repelen (según sean de distinto o igual signo) con una fuerza electrostática que disminuye con la distancia entre ellas. También sabemos que si las cargas se mueven en dirección perpendicular a la línea que las une aparece una fuerza de signo contrario que es la fuerza magnética. Se trata de un efecto relativista porque se presenta tanto si se mueven las cargas como si es el observador quien se mueve respecto de aquellas. Es una fuerza muy pequeña, inferior a la electrostática en un factor que es igual a la relación entre la velocidad de las cargas y la de la luz en el vacío, elevada al cuadrado. Este factor es pequeñísimo para los electrones que transportan la corriente eléctrica por un alambre y por eso esta fuerza magnética no se descubrió hasta 1820 siendo así que se disponía de corrientes desde que Volta inventara su pila veinte años antes. Los electrones que circulan en los átomos y en las moléculas van más deprisa pero la fuerza magnética que producen es todavía diez mil veces menor

que la electrostática. Por eso podemos decir que, en una primera aproximación, las fuerzas magnéticas apenas tienen influencia en las propiedades de la materia.

La anterior afirmación es cierta excepto cuando se observa el raro y misterioso comportamiento del hierro. Resulta que interponiendo hierro entre las corrientes eléctricas el efecto magnético aumenta enormemente. Y por esta razón ya en 1820 se prepararon imanes permanentes de acero sin necesidad de piedra imán y electroimanes de hierro dulce. Con estos últimos se construyeron timbres, telégrafos y motores eléctricos que funcionaban con la corriente generada por pilas perfeccionadas.

Experimentando con alambres enrollados alrededor de piezas de hierro e imanes descubrió Faraday en 1831 la inducción electromagnética que permitió la construcción de generadores, transformadores, grandes motores y cuantas instalaciones forman parte de la electrotecnia actual. Si disponemos hoy de energía eléctrica barata ello es debido a las sorprendentes propiedades magnéticas del hierro y demás materiales magnéticos.

Otras aplicaciones recientes del magnetismo son cada vez más aparentes. Sobre superficies magnéticas se puede grabar toda clase de información, texto, sonido e imágenes. Además la información grabada ocupa muy poco espacio por lo que algunos piensan que nuestra civilización basada en el papel tal vez se llegue a convertir en una cultura en soporte magnético.

Frente a tantas maravillas es llamativo que hasta este siglo no se entendiese porqué el hierro, el cobalto y el níquel tienen propiedades ferromagnéticas. Hernando nos explica el origen del ferromagnetismo de una manera clara e intuitiva que es como se comprenden los fenómenos físicos. Para ello y para entender todas las propiedades de la materia basta con saber aplicar unas pocas ideas muy sencillas.

Todos los sistemas cuánticos (átomos, moléculas y sólidos) están formados por núcleos atómicos pesados y electrones ligeros y mucho más móviles. Su estructura y comportamiento vienen regidos por las fuerzas que interactúan entre dichos componentes condicionadas por restricciones cuánticas.

La interacción entre electrones y núcleos es en primera y suficiente aproximación la fuerza electrostática mencionada más arriba.

Los condicionamientos cuánticos, por cuanto nos interesa ahora, son dos. Por una parte, el principio de indeterminación de Heisenberg

indica que cuanto menor sea el espacio donde se mueven los electrones mayor será su energía cinética. Por otra parte, el principio de exclusión de Pauli implica que dos electrones cuyos espines sean opuestos tienden a estar cerca el uno del otro mientras que sucede lo contrario si tienen los espines en la misma dirección, es decir si son paralelos.

Estas ideas bastan para explicar, por ejemplo, algo tan misterioso como el enlace químico entre dos átomos iguales. El espacio de que disponen los electrones externos si los átomos se juntan es mayor por lo que su energía cinética será menor con lo que la energía total (cinética más potencial) podría ser inferior a la que tienen los átomos separados con lo cual la molécula sería más estable y se produciría el enlace. Este argumento, basado en el principio de Heisenberg, prueba la posibilidad del enlace pero no su necesidad. El principio de Pauli nos ayuda a comprender lo que sucede en el caso del hidrógeno. Si los espines de los dos electrones están en direcciones opuestas tienden a estar juntos y a colocarse entre los dos protones disminuyendo la repulsión entre ellos, y por eso el enlace se produce. En cambio los dos electrones se colocan de otra manera si sus espines están en la misma dirección y el enlace no ocurre. En otros átomos con mas electrones puede ocurrir enlace con electrones de espines paralelos y con una distancia internuclear mayor.

Este ejemplo tan sencillo muestra gran analogía con lo que nos dice el nuevo Académico: el magnetismo ordenado de la materia condensada ocurre cuando se suman los momentos magnético de los espines orientados paralelamente y ello depende de la competición entre el enlace atómico que tiende a anular el espín total y la disminución de la interacción entre electrones que tiende a disponer paralelos los espines aumentando las distancias interatómicas.

Esta explicación, fácil de entender, del magnetismo no basta para conocer el detalle de las situaciones concretas en las cuales interviene la geometría y otros factores. Por desgracia los modelos matemáticos más elaborados tampoco permiten predecir fiablemente. Sucede que en fenómenos tan complicados como el magnetismo es imprescindible recurrir a la experiencia. Pero la experiencia puramente empírica no es suficiente. Hacen falta experimentos guiados por una comprensión teórica como la que nos ha mostrado nuestro nuevo compañero en su discurso.

Es evidente que la comprensión teórica necesaria para investigar sistemas complicados, como la materia condensada o las macromoléculas de interés biológico, requiere saber mas cosas que las que yo he utilizado aquí. Pero no muchas más. Para entender los procesos naturales basta conocer unos cuantos hechos y tener unas pocas ideas teó-

ricas claras. Esto es suficiente para intuir de un modo cualitativo lo que puede suceder o lo que realmente ocurre en un experimento y progresar así en nuestro conocimiento de la naturaleza.

Es esta una buena ocasión para señalar que esta descripción cualitativa e intuitiva de los procesos naturales es la única posible cuando se trata de explicar los resultados de las ciencias a quienes carecen de formación especializada que son casi todos los seres humanos. Y esta divulgación es esencial si queremos que la sociedad acepte nuestra convicción de que las ciencias forman parte, y muy importante, de la cultura. Para que la gente normal admita que nuestra ciencia es parte de la cultura es preciso que nos entienda y ello no ocurrirá si les explicamos las cosas en un lenguaje técnico rebosante de matemática.

Siempre he mantenido que todo se puede explicar de manera que se entienda y se admire. Pero esto solamente pueden hacerlo quienes sepan distinguir entre lo esencial y lo accesorio, tengan ideas claras y sean comunicadores convincentes. Me complace poder anunciar que nuestro nuevo Académico posee estas cualidades y podrá desde esta Casa contribuir a la promoción de la cultura científica que es uno de nuestros objetivos.

He insistido mucho hasta aquí en el valor y la importancia de describir la naturaleza sin recurrir a un elaborado aparato matemático y no querría que se interpretase mal mi pensamiento.

Por eso antes de terminar esta disertación debo añadir algunas observaciones para evitar malentendidos.

La Física, y en mayor o menor grado las demás ciencias, se basa en la medida de magnitudes que quedan determinadas por números acompañados de sus correspondientes unidades. Es por tanto un saber cuantitativo. La superioridad de la Física sobre otras disciplinas también basadas en medidas, es consecuencia de un largo proceso histórico que conviene recordar.

Ya en el siglo XIII insistía Roger Bacon en la conveniencia de describir matemáticamente la naturaleza. El intento comenzó a materializarse la centuria siguiente con los «calculadores» de Oxford. Tanto Copérnico en Astronomía como Domingo de Soto en cuanto a la caída de los graves continuaron la tarea que completó el gran Galileo a principios del siglo XVII; es famosa su frase de que las leyes de la naturaleza están escritas en lenguaje matemático. Pero la matemática de su tiempo solo era capaz de sintetizar dichas leyes con tales dificultades que únicamente los mejores «geómetras» eran capaces de superar.

La gran revolución que cambió nuestro modo de describir los procesos naturales ocurrió hace tres siglos con la invención del cálculo diferencial por Newton y por Leibniz independientemente. Un golpe de genio nos proporcionó la herramienta para describir las cosas que cambian que son las que más interesan en el estudio de la naturaleza. Puede afirmarse sin exageración que toda la Física y la Técnica modernas serían impensables sin tan extraordinaria invención.

A lo largo del siglo XVIII se aplicó el nuevo cálculo a la Mecánica y a la Astronomía y hace unos doscientos años se habla extendido su uso a toda la Física. Desde entonces el método de investigación en esta ciencia no ha variado y se compone de medidas seleccionadas e intuición física que se articula matemáticamente, casi siempre, en ecuaciones diferenciales. El éxito del método es insuperable pero tiene el inconveniente de que su aplicación requiere un entrenamiento que solo se consigue tras muchos años de estudio.

Pero este entrenamiento no es necesario para apreciar los resultados de la Física, del mismo modo que no hace falta saber pintar para admirar un cuadro ni tocar un instrumento musical para disfrutar de un concierto. Por eso no hay contradicción entre la necesidad de la matemática para hacer física y la conveniencia de prescindir de ella para mostrar la física a quienes no van a contribuir a su desarrollo. Algo parecido ocurre en Arquitectura; para construir un edificio hacen falta andamios que al final se retiran para mostrar su belleza.

Con esto creo haber disipado el peligro de un malentendido. Y termino cumpliendo con la grata obligación de dar la más cordial bienvenida a Antonio Hernando que llega ahora a esta Casa que desde hoy es la suya.