



*“Nuevas Fronteras
en Magnetismo”*

Palacio de Congresos

Jaca, 2-7 julio 2007

Dirigido por:

Luis Miguel García Vinuesa

Director del Departamento de Física de la Materia Condensada, Universidad de Zaragoza

Jesús Ángel Blanco Rodríguez

Secretario de Club Español de Magnetismo, Universidad de Oviedo

Javier Campo Ruiz

Presidente de la Sociedad Española de Técnicas Neutrónicas,

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC-U. de Zaragoza)

Patrocinadores:



**SOCIEDAD ESPAÑOLA
de
TÉCNICAS NEUTRÓNICAS**



Servicio de Instrumentación Científica
Universidad de Zaragoza



**ASOCIACIÓN
USUARIOS
SINCROTRÓN
ESPAÑA**



INSTITUTO DE CIENCIA
DE MATERIALES DE ARAGÓN



Colaboradores:



Programa

Lunes, 2 de julio

- 9:00 *Entrega de documentación y presentación*
- 9:30-10:30 **Semiconductores magnéticos y magnetismo de nanopartículas. ¿Podremos fabricar imanes monoatómicos?**
[A. Hernando](#), Instituto de Magnetismo Aplicado (RENFE - U. Complutense)
- 10:30-11:30 **Magnetismo de la materia I:** Diamagnetismo y Paramagnetismo
[J. Rodríguez](#), Universidad de Cantabria
- 11:30-12:00 *Café*
- 12:00-13:00 **Magnetismo de la materia II:** Interacciones de canje
[J. A. Blanco](#), Universidad de Oviedo
- 13:00-14:00 **Magnetismo de la materia III:** Anisotropía magnética
[J. I. Arnaudas](#), INA & ICMA, CSIC-U. de Zaragoza
- 14:00-16:30 *Comida*
- 16:30-17:30 **Mag. de la materia IV:** ordenamientos magnéticos y transiciones de fase
[R. Burriel](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U de Zaragoza
- 17:30-18:30 **Unidades en magnetismo (Taller práctico)**
[P. Gorria](#), Universidad de Oviedo

Martes, 3 de julio

- 9:00-10:00 **Técnicas macroscópicas en magnetismo**
[C. Rillo](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U de Zaragoza
- 10:00-11:00 **Técnicas de imagen y magneto-ópticas en magnetismo**
[J. M. Alameda](#), Universidad de Oviedo
- 11:00-11:30 *Café*
- 11:30-12:30 **Espectroscopia Mössbauer en magnetismo**
[M. Barandiarán](#), Universidad del País Vasco
- 12:30-13:30 **Aplicaciones de la radiación sincrotrón en magnetismo**
[L. M. García](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U de Zaragoza
- 13:30-16:00 *Comida*
- 16:00-17:00 **Técnicas de haces de neutrones en magnetismo**
[J. Campo](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U de Zaragoza
- 17:00-18:00 **Determinación de estructuras magnéticas (Taller práctico)**
[J. Campo](#), ICMA/ [J. A. Blanco](#), U. de Oviedo

Miércoles, 4 de Julio

- 9:00-10:00 **Fabricando nanoestructuras magnéticas: en busca de nuevos fenómenos**
[X. Batlle](#), Universidad de Barcelona
- 10:00-11:00 **Nanoestructuras magnéticas artificiales y autoorganizadas**
[A. Cebollada](#), Instituto de Microelectrónica de Madrid, CSIC
- 11:00-11:30 *Café*
- 11:30-12.30 **Magnetismo de pequeñas partículas**
[J. Rivas](#), Universidad de Santiago de Compostela
- 12:30-13.30 **Retos actuales en Magnetismo Molecular**
[E. Coronado](#), Instituto de Ciencia Molecular, Universidad de Valencia
- 13:30-16:00 *Comida*
- 16:00 *Visita guiada a Jaca*

20.00h Ayuntamiento Jaca

Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas
[R. Ibarra](#), Instituto de Nanociencia de Aragón, Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U de Zaragoza

Jueves, 5 de julio

- 9:00-10:00 **Imanes permanentes: fundamentos y aplicaciones**
[J. Bartolomé](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U. Zaragoza
- 10:00-11:00 **Materiales amorfos y nanocristalinos**
[L. F. Barquín](#), Universidad de Cantabria
- 11:00-11:30 *Café*
- 11:30-12:30 **Ferritas blandas: propiedades magnéticas y aplicaciones industriales “reales”**
[Miguel A. París](#), HISPANO FERRITAS
- 13:30-16:00 *Comida*
- 16:00-17:00 **Magnetoelasticidad: materiales y aplicaciones**
[A. del Moral](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-U. Zaragoza
- 17:00-18:00 **Sensores magnéticos**
[M. Vazquez](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC

Viernes, 6 de julio

- 9:00-10:00 **Magnetismo de sistemas fuertemente correlacionados**
[J. Gomez-Sal](#), Universidad de Cantabria
- 10:00-11:00 **Fundamentos de magnetismo de óxidos**
[F. Bartolomé](#), ICMA, CSIC-Universidad de Zaragoza.
- 11:00-11:30 *Café*
- 11:30-12:30 **El magnetismo de la superconductividad**
[X. Obradors](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, CSIC
- 13:30-16:00 *Comida*
- 16:00-17:00 **Espintrónica**
[J. Fontcuberta](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona, CSIC
- 17:00-18:00 **Principios de relajación magnética: aplicación a materiales blandos**
[J.I. Iñiguez de la Torre](#), Universidad de Salamanca
- 21:00 **Cena Oficial**

Sábado, 7 de julio

- 9:00-10:00 **Fenómenos cuánticos en magnetismo**
[J. Tejada](#), Universidad de Barcelona
- 10:00-11:00 **Modelización micromagnética: principios y aplicaciones**
[O. Chubykalo](#), Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC
- 11:00-11:30 *Café*
- 11:30-12:30 **Refrigeración magnética: materiales magnetocalóricos**
[L. Morellón](#), INA & ICMA, CSIC-U. de Zaragoza
- 12:30 *Cierre del curso*

Resumenes de las lecciones

Semiconductores magnéticos y magnetismo de nanopartículas. ¿Podremos fabricar imanes monoatómicos?

A. Hernando

*Instituto de Magnetismo Aplicado and Dpto. Física de Materiales,
UCM-ADIF-CSIC P.O. Box 155, 28230 Las Rozas, Madrid, Spain*
antonio.hernando@adif.es

La “espintrónica” pretende la utilización del spin de los electrones de modo similar a la utilización que se hace de la carga eléctrica del electrón en los dispositivos electrónicos. Desde la perspectiva de la memoria magnética la importancia de la “espintrónica” está asociada a la posibilidad de variar la imanación con corrientes eléctricas y la de producir polarización de spin de la corriente como consecuencia de la imanación. La memoria magnética coexiste en los ordenadores con la memoria rápida de semiconductores. La memoria almacenada en el disco duro es magnética y, por tanto, permanece con el dispositivo desconectado del suministro. Su escritura y lectura constituyen procesos lentos y de bajo coste. Durante el tiempo de trabajo con el ordenador se utiliza la memoria de semiconductores que trabajan como transistores MOFSET que tienen capacidad de presentar dos estados, conductor y aislante, que se asocian a los dos dígitos binarios 0 y 1. La memoria semiconductor es rápida pero volátil ya que se borra al detenerse el suministro de energía, como todos hemos apreciado y sufrido al cortarse inesperadamente la “luz” eléctrica. La transferencia de información entre ambos sistemas y todo el engorro asociado a los requerimientos de coexistencia de dos tecnologías tan distintas podría desaparecer si contáramos con semiconductores magnéticos. Los átomos de cierto volumen de la red semiconductor se encontrarían imanados según una dirección fija y los electrones de conducción de esa región se polarizarían en spin por interacción con el momento magnético de los átomos. Cuando se generara la corriente eléctrica la medida de su polarización de spin nos informaría del estado de imanación de esos átomos. La lectura y la escritura podrían hacerse mediante los electrones de conducción y el papel de los bits actuales lo harían los grupos de átomos de la red. Estos principios generales potenciaron un creciente interés por la búsqueda de semiconductores magnéticos. En 1998 Ohno propuso la inclusión de una pequeña fracción de átomos magnéticos en una matriz semiconductor. Los átomos magnéticos deben estar separados para no modificar la estructura semiconductor de las bandas, pero este requisito conduce inevitablemente a una reducción de la interacción de canje entre estos átomos y consecuentemente a la disminución de la temperatura de Curie supuesto que se alcanzara el orden ferromagnético. Ohno, a pesar de estas dificultades, sugirió que algunos compuestos podrían presentar temperaturas de Curie superiores a la temperatura ambiente y según sus cálculos el óxido de zinc (ZnO) dopado con manganeso debería presentar una temperatura de Curie superior a los 400°C. En 2003, Sharma et al. Mezclando y calentando a 500°C ZnO con un 2% de MnO encuentran ferromagnetismo a temperatura ambiente, en lo que ellos claman ser ZnO dopado con Mn. Análisis posteriores (M.A.García et al) pusieron a la luz que los fenómenos microscópicos son mucho mas complicados y que lo que se forma verdaderamente es una disolución de Zn en el óxido de manganeso. Precisamente es el doble canje originado en la interfase entre ambos óxidos donde coexisten Mn^{3+} y Mn^{4+} , el que parece ser el mecanismo responsable del ferromagnetismo observado. Es realmente difícil que un material semiconductor, con densidad de estados nula al nivel de Fermi, se pueda comportar como un material ferromagnético que requiere una densidad de estados muy alta en la energía de Fermi. Sin embargo, los fenómenos físicos asociados a la nanoescala son tan sorprendentes y poco predecibles que no debe descartarse la posibilidad de éxito final. Como ejemplo de esta inagotable fuente de sorpresas que representa la nanociencia pasamos a describir algunos resultados recientes obtenidos en nanopartículas.

Las nanopartículas del tamaño de un nanómetro presentan dos características relacionadas con las propiedades magnéticas: a) la enorme fracción de átomos de superficie que presentan una simetría local distinta y, por tanto, una anisotropía magnética de distinto valor que el volumen; y b) una estructura del espectro de energía electrónica caracterizada por un mayor espaciado entre niveles. Esta modificación conlleva variaciones de la densidad de estados al nivel de Fermi y consecuentemente de las propiedades magnéticas intrínsecas de los materiales. La estructura electrónica de las nanopartículas es también regulable mediante el enlace con diferentes tipos de moléculas. Este enlace es fundamental en un campo de aplicaciones de enorme interés actual, como es el de la biomedicina. Se pretende que nanopartículas metálicas transporten moléculas como ácidos nucleicos, aminoácidos, azúcares o ADN enlazadas a los átomos de la superficie y que puedan viajar por el organismo hasta depositarse en dianas bien definidas (S.G. Ray et al). En su lugar de anclaje liberarían las moléculas transportadas dando lugar a una quimioterapia selectiva que reduciría al máximo los efectos colaterales. Recientemente se ha encontrado (P.Crespo et al) que partículas de oro de 1.4 nanómetros de tamaño recubiertas con moléculas orgánicas a través de enlaces oro-azufre presentan magnetismo permanente incluso a temperatura ambiente. Lo sorprendente de este hallazgo no es exclusivamente la presencia de magnetismo en un metal diamagnético como es el oro, sino la superación del límite superparamagnético a temperatura ambiente con tamaños tan pequeños de partícula. Un experimento excelente llevado a cabo con átomos aislados de cobalto sugiere que se trata de una física no descrita previamente en el marco de lo macroscópico. Gambardella y colaboradores observaron mediante dicroísmo magnético que a 5K un átomo aislado de cobalto depositado en una superficie de Pt<111> presentaba una curva de imanación con marcada anisotropía, siendo el eje de fácil imanación la dirección perpendicular a la película de Pt. Resulta obvio que el límite inferior del tamaño de una nanopartícula es un átomo. En este experimento el átomo magnético está aislado aunque, en realidad, sólo magnéticamente aislado ya que se encuentra enlazado a los átomos de platino. El hecho de que el momento magnético del átomo de Co no fluctúe térmicamente sugiere que pueden reducirse los tamaños de los bits y que una nueva perspectiva de la física involucrada en el origen de la anisotropía magnética tiene que desarrollarse para esta escala. Los átomos aislados serán imanes en el futuro próximo. Cuando esto suceda el tamaño de los dispositivos magnéticos se encontrará en la escala nanométrica.

Magnetismo de la materia I: Diamagnetismo y Paramagnetismo

Jesús Rodríguez Fernández

CITIMAC, Facultad de Ciencias, Universidad de Cantabria, 39005 Santander, Spain

E-mail: rodrigu@unican.es

Macroscópicamente los materiales diamagnéticos (paramagnéticos) se caracterizan por se repelidos (atraídos) débilmente hacia una fuente de campo magnético. Para entender este comportamiento es necesario conocer el origen microscópico del momento magnético. Las magnitudes macroscópicas que nos permiten cuantificarlo son la imanación y la susceptibilidad.

A diferencia del paramagnetismo, el diamagnetismo aparece en sustancias que no tienen momento magnético permanente. Analizaremos la teoría clásica del diamagnetismo y paramagnetismo, que fue propuesta en por P. Langevin. La virtud de esta teoría es que es capaz de relacionar una magnitud macroscópica, la susceptibilidad, con magnitudes microscópicas, como el radio de las orbitas en el caso del diamagnetismo o el momento magnético atómico en el caso del paramagnetismo (Ley de Curie).

El abordar el estudio desde un punto de vista cuántico, no introduce grandes cambios en el diamagnetismo. Para estudiar el paramagnetismo será necesario definir el estado fundamental de un ion, que se determina utilizando las reglas de Hund. Al estar el momento magnético cuantizado, la función de Langevin se transforma en la de Brillouin y nos aparece el momento paramagnético efectivo.

Se analizarán otros tipos de comportamientos, como el paramagnetismo de Van Vleck, que aparece en materiales que no poseen momento magnético en su estado fundamental, o los debidos a los electrones libres en los metales, como el diamagnetismo de Landau o el paramagnetismo de Pauli.

Finalmente se revisaran algunas aplicaciones del diamagnetismo y del paramagnetismo.

Bibliografía:

- Stephen Blundell. *Magnetism in Condensed Matter*. Oxford University Press, 2001
- K.H.J. Buschow and F.R. de Boer. *Physics of Magnetism and magnetic Materials*. Kluwer Academic, 2003.
- Antonio Hernando y Juan M. Rojo. *Física de los Materiales Magnéticos*. Ed. Síntesis, 2001
- D.H. Martin. *Magnetism in Solids*. Iliffe Books, 1967.
- Nicola Spaldin. *Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 2003

Magnetismo de la materia II: Interacciones de canje

Jesús Angel Blanco

Dpto. de Física, Facultad de Ciencias

C/Calvo Sotelo s/n 33307 Oviedo

jabr@uniovi.es

Además del diamagnetismo y paramagnetismo, tanto de los átomos o iones localizados como de los electrones de conducción, la interpretación de los comportamientos magnéticos y el magnetismo de la materia se ha desarrollado a partir de dos conceptos básicos: el primero es la existencia de momentos magnéticos discretos que pueden ser asociados con los átomos e iones en los materiales (momentos inducidos son producidos por la aplicación de un campo magnético externo, mientras que los momentos magnéticos espontáneos están presentes incluso en ausencia de campo magnético externo alguno). El segundo concepto es que estos momentos magnéticos microscópicos interactúan mutuamente, no solo a través de las fuerzas dipolo-dipolo ordinarias análogas a las que se sienten cuando intentamos acercar dos imanes por sus polos norte o sur, sino a través de fuerzas mecano-cuánticas mucho más intensas. Por ello, en esta lección se van a presentar los fundamentos físicos, basados en la mecánica cuántica de por qué se ordenan magnéticamente los materiales (el alineamiento relativo de los momentos magnéticos de los iones de un sólido está estrechamente conectado con el solapamiento de sus orbitales electrónicos a través del principio de exclusión de Pauli y interacción coulombiana repulsiva entre electrones que dan lugar a una interacción efectiva entre los momentos magnéticos que explica la existencia del orden magnético). Se abordará la estrecha interrelación entre la interacción de canje, la interacción de espín-órbita y la respuesta de la materia ante la aplicación de un campo magnético. Asimismo, se presentarán los aspectos más relevantes de los diferentes tipos de interacción de canje que se pueden presentar: canje directo, canje indirecto en sólidos iónicos (supercanje), canje indirecto en metales debido a la interacción entre los electrones de conducción y los momentos magnéticos localizados de los átomos o iones (Ruderman-Kittel-Kasuya-Yosida), doble canje, canje anisotrópico o interacción de Dzyaloshinsky-Moriya.

Referencias:

- [1] S. Blundell, "Magnetism in Condensed Matter", Oxford master series in Condensed Matter Physics, OUP, 2001
- [2] J. Stöhr, H. C. Siegmann, "Magnetism", Springer-Verlag, 2006
- [3] A. Herpin, "Théorie du Magnétisme", Presses Universitaires de France, 1968
- [4] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin, "Solid State Physics" Holt-Saunders International Editions, 1976
- [5] A. del Moral, "Propiedades Magnéticas de la Materia", Vol I y II, Universidad de Zaragoza, 1991
- [6] Antonio Hernando y Juan M. Rojo. *Física de los Materiales Magnéticos*. Ed. Síntesis, 2001

Magnetismo de la materia III: Anisotropía magnética

J. I. Arnaudas

*Instituto de Nanociencia de Aragón, Universidad de Zaragoza
Instituto de Ciencia de los Materiales, Universidad de Zaragoza-CSIC*

Cuando un material responde de forma diferente según sea la dirección del estímulo que se le aplica, se dice que es anisótropo o que la propiedad que está relacionada con dicha respuesta presenta anisotropía. En particular, es más fácil imanar un material magnético en unas direcciones que en otras, lo que se manifiesta como la tendencia de la imanación a alinearse preferentemente a lo largo ciertas direcciones en lugar de en otras. Otras propiedades de los materiales magnéticos, como son su elasticidad o su resistividad, también muestran anisotropía. El comportamiento macroscópico y, por tanto, muchas de las aplicaciones de los materiales magnéticos, dependen de la anisotropía que presentan sus propiedades, por lo que es esencial saber cómo cuantificar dicha anisotropía y explicar su origen, si se quiere conocer la forma de modificarla y utilizarla a voluntad.

En esta lección describiremos en primer lugar algunas de las manifestaciones experimentales más claras de la anisotropía magnética en cristales de metales 3d y de Tierras Raras. A continuación, tras un primer acercamiento fenomenológico, meramente macroscópico, a las anisotropías magnéticas con simetrías más habituales, como son la uniaxial y la cúbica, se presentará una aproximación microscópica al fenómeno, discutiéndose el origen físico de las anisotropías magnetocristalina, de forma y magnetoelástica. Finalmente se tratará la anisotropía magnética en sistemas de baja dimensionalidad.

Magnetismo de la materia IV: Ordenamientos magnéticos y transiciones de fase

Ramón Burriel

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC – Universidad de Zaragoza).

Plaza San Francisco, 50009 Zaragoza

Los sistemas magnéticos están caracterizados por la existencia de momentos magnéticos. Éstos pueden interactuar con campos externos o con otros momentos del sistema. La energía de interacción compete con la energía térmica produciendo procesos de transiciones de fase en los que se da un cambio de orden magnético a desorden, o una modificación del tipo de ordenamiento. Se analizarán los fundamentos termodinámicos y estadísticos de las transiciones de fase en sistemas magnéticos.

Un modelo fenomenológico para la energía libre dado por la teoría de Landau proporciona las características esenciales de las transiciones de fase y fenómenos de orden.

Los modelos de interacción entre los momentos magnéticos describen los fenómenos cooperativos de ordenamiento más específicamente. El ordenamiento y los parámetros críticos que lo describen dependen de la dimensionalidad de los momentos interaccionantes y de la red cristalina en la que se disponen.

Un tratamiento promediado de la interacción da lugar al modelo de campo molecular que explica aspectos básicos de las transiciones y ordenamientos magnéticos. Dependiendo del signo de la interacción y el tamaño de los momentos dan lugar a los tipos simples de orden ferromagnético, antiferromagnético o ferrimagnético.

El análisis mecanocuántico de las interacciones deriva en aproximaciones que, para sistemas de electrones itinerantes, tiene su expresión más relevante en la formulación RKKY y para sistemas aislantes en el hamiltoniano de Heisenberg-Dirac.

La consideración de las distintas dimensionalidades de spin y espacial da lugar a los modelos de Ising, XY, Heisenberg, en cadenas lineales, planos o tridimensionales. Estos proporcionan variados tipos de orden de corto o largo alcance, con distintos parámetros críticos para cada tipo de transición.

Las transiciones de fase se pueden inducir además de por efecto térmico, por la acción de agentes externos como presión, luz, campo eléctrico o campo magnético. Estos cambios de fase producen modificaciones drásticas en las propiedades de los materiales que se aprovechan para múltiples aplicaciones. La modificación del momento macroscópico tiene variedad de usos en grabación magnética y almacenamiento de información. El cambio energético de la transición tiene aplicaciones termodinámicas de almacenamiento de energía o de cambios térmicos por la aplicación de campos. Otras propiedades como fotocromismo, puertas lógicas, o la simple activación de fuerzas controlada por agentes externos son otras tantas áreas de utilización del fenómeno.

Taller práctico: Unidades en magnetismo

Pedro Gorria

Departamento de Física, Universidad de Oviedo

En todos los campos de la Física, y en especial en el ámbito de la Física Experimental, tanto las unidades como las dimensiones de las magnitudes constituyen un tema de gran relevancia. Esto es debido a que se hace necesario por una parte un criterio que permita comparar los valores medidos de las magnitudes en diferentes condiciones, sistemas o dispositivos experimentales, y por otra que las ecuaciones que den cuenta de los fenómenos observados sean dimensionalmente coherentes. Este problema se minimizó cuando, a partir de mediados del siglo XX, se adoptó un sistema unificado de unidades por parte de la comunidad científica internacional, el llamado “Sistema Internacional” o abreviadamente “SI”. Sin embargo, hay un campo de la Física, como es el Magnetismo, en el que el sistema Gaussiano de unidades (que describe las unidades de las magnitudes magnéticas a partir del sistema cgs de unidades electromagnéticas) es todavía ampliamente utilizado, y hoy en día se encuentran gran cantidad de artículos en los que se usa dicho sistema. Es por esta razón que aunque sea conveniente el uso del sistema SI, se hace necesario para todos aquellos investigadores en magnetismo conocer ambos sistemas y la correspondencia que hay entre las diferentes unidades.

En este taller acometeremos dos tareas, en primer lugar, trataremos de clarificar la relación entre ambos sistemas de unidades para los campos B , H y M , así como para aquellas magnitudes que relacionan dichos campos como son la permeabilidad, μ o la susceptibilidad, χ , a partir de las ecuaciones fundamentales del electromagnetismo. En la segunda parte del taller se propondrán a los alumnos varios ejemplos de medidas magnéticas realizadas utilizando diferentes equipos experimentales y en las que habrá que llevar a cabo la conversión de unidades a ambos sistemas.

Técnicas macroscópicas en magnetismo

Conrado Rillo

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, CSIC-Universidad de Zaragoza

La magnetometría abarca todas las técnicas de medidas magnéticas en general y su origen es muy anterior a la propia comprensión del magnetismo. Con anterioridad al calendario Cristiano, los Chinos ya construían primitivos compases o brújulas, dando forma alargada a un trozo de magnetita. De hecho, éstos inventaron la brújula como instrumento para determinar la dirección del campo magnético ambiental, aparato que fue utilizado fundamentalmente en navegación. En el siglo XVI la brújula se convirtió en un dispositivo de medida científico para estudiar el magnetismo de la tierra, y en el siglo XIX fue el instrumento básico para investigar los campos magnéticos. Entonces, la imanación de un material, se estudiaba midiendo la fuerza que un imán de referencia ejercía sobre aquel. Así se desarrollaron las técnicas magnéticas de fuerza y torque, como por ejemplo la balanza de Faraday. El siglo XIX se puede considerar como la infancia de la magnetometría moderna. Uno de los dos hechos fundamentales para el magnetismo en aquella época fue el descubrimiento de la inducción electromagnética por Faraday en 1831, lo que dio lugar al desarrollo de una gran variedad de magnetómetros, todos ellos basados en la medida de un voltaje inducido. El otro hecho fue el descubrimiento por Edwin Hall en 1879 del efecto que lleva su nombre, en el que se basan los magnetómetros más utilizados para campos magnéticos del orden de 10^{-7} T y superiores.

En el siglo XX se abren *nuevas fronteras en magnetometría*. Con el descubrimiento de la superconductividad por K. Onnes en 1911, del efecto Meissner en 1933, del efecto Josephson en 1962, y combinando hábilmente estas propiedades, distintos grupos experimentales (R.P. Giffard, J. Clarke,...), desarrollaron, en la década de los 70, dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID). Basados en éstos, la década de los 80 “dio a luz” a los primeros magnetómetros cuánticos con los que se han alcanzado resoluciones de hasta 10^{-17} T. Esta tecnología es, hoy día, comercial y constituye una herramienta imprescindible de grupos de investigación en materiales magnéticos y en biomagnetismo. Además, mediante técnicas de resonancia atómica, midiendo la frecuencia de Larmor, se han construido y comercializado magnetómetros cuánticos portátiles, que permiten explorar el campo magnético ambiental con resolución de hasta 10^{-13} T, a la vez que se mide el gradiente del mismo. Estos magnetómetros son utilizados fundamentalmente por grupos de geofísica, arqueología, y ciencias de la tierra en general.

En esta lección se revisa el estado del arte de las técnicas macroscópicas de magnetometría más utilizadas actualmente y sus campos de aplicación, tanto en ciencia básica como aplicada, incluyendo algún ejemplo de su utilidad en aplicaciones industriales.

Técnicas de imagen y magneto-ópticas en magnetismo

J.M.Alameda

Universidad de Oviedo

La primera observación experimental de la *estructura de dominios* en un material magnéticamente ordenado, fue realizada por F.Bitter en 1931 utilizando una dispersión coloidal de partículas magnéticas esparcida sobre una superficie pulida de un material ferromagnético (**técnica Bitter**). Se observó una aglomeración de dichas partículas en las zonas de la superficie del material en donde existiese un *campo de fuga* local asociado generalmente a la existencia de *paredes de dominio*. Aunque es un método sencillo que todavía se usa en el análisis de estructuras estáticas de dominios y su resolución puede ser muy elevada combinando técnicas de *réplica* y de microscopía electrónica, existen en la actualidad otros métodos que permiten tanto una mayor resolución lateral, como la determinación de la dirección local de la imanación y el análisis en tiempo real de los procesos dinámicos de inversión de la imanación en un material sometido a un campo magnético variable. Como sonda se pueden utilizar *fotones*, *electrones* e incluso *neutrones*.

En el primer caso, los métodos más utilizados, en el intervalo del espectro VIS-IR, son los denominados *efectos magneto-ópticos de reflexión* (**MOKE** Longitudinal y Polar) y *de transmisión* (**Faraday**). El límite de resolución de la microscopía óptica convencional puede ser sobrepasado por la *microscopía óptica de campo cercano* (**SNOM**), que combinada con el análisis de polarización de la luz, permite obtener información local de la distribución de la imanación en la superficie de la muestra. Por otro lado, la utilización de fuentes de radiación sincrotrón permite combinar el *dicroísmo magnético circular de Rayos X* (**XMCD**) con la *microscopía electrónica de fotoemisión* (**PEEM**) para obtener imágenes de la estructura de dominios magnéticos. Finalmente, un método indirecto de determinación de estructura de dominios lo constituye la *topografía de Rayos X*, de utilización en materiales magnéticos monocristalinos.

Los electrones son también utilizados como sonda para la determinación de estructuras magnéticas. Históricamente, el primer método desarrollado fue el denominado *de microscopía Lorentz*, técnica adaptada a la microscopía electrónica de transmisión (**TEM**) y por lo tanto sólo aplicable a láminas delgadas. Una variante reciente que también utiliza la geometría TEM es la denominada *de holografía electrónica*. Los *microscopios electrónicos de barrido* (**SEM**) pueden ser también utilizados para la observación de dominios magnéticos, mediante el análisis de la polarización de espín de los electrones secundarios, técnica que se conoce con el nombre de **SEMPA**. De particular interés es la técnica conocida como **SPLEEM**, variante de la *microscopía electrónica de baja energía* (**LEEM**) con análisis de polarización de espín electrónico.

La *topografía de neutrones* puede ser también utilizada para el análisis de estructuras de dominios magnéticos en materiales masivos, si bien su resolución espacial es baja.

Finalmente caben mencionar los basados en la metodología experimental propia de las *microscopías de barrido de punta* (**SPM**), en sus variantes de *microscopía de fuerza magnética* (**MFM**) y *microscopía de efecto túnel con polarización de espín* (**SP-STM**). Este último método permitiría en principio obtener resolución atómica.

En esta charla se realizará un estudio comparativo de todas estas técnicas, así como un análisis más específico de la utilización de los efectos magneto-ópticos, en particular el **MOKE-transversal**, en el análisis de los procesos de imanación de láminas, multicapas y nanoestructuras.

Espectroscopia Mössbauer en magnetismo

José Manuel Barandiarán*

Universidad el País Vasco (UPV/EHU) Bilbao

La espectroscopia Mössbauer se basa en la absorción resonante de radiación gamma por núcleos atómicos, o fluorescencia nuclear. En la radiación nuclear la energía de retroceso es en general mayor que la anchura natural de la línea. Solo si la energía térmica (Doppler térmico) es capaz de compensar la energía de retroceso se podrá observar la absorción resonante. También puede darse la emisión y absorción de la radiación gamma sin retroceso al estar los núcleos ligados a la estructura cristalina por fuerzas cohesivas (efecto Mössbauer). La fracción de eventos sin retroceso, f , crece exponencialmente con la intensidad de las fuerzas de ligadura (representada por la temperatura de Debye) y decrece con la energía de la radiación gamma en juego. Además la temperatura hace descender drásticamente la fracción sin retroceso en las cercanías de la temperatura de Debye. Esto limita el número de núcleos en que es observable el efecto Mössbauer. Afortunadamente entre ellos destaca el ^{57}Fe como el más popular. La extraordinaria finura de la espectroscopia Mössbauer proviene de que la anchura natural de la línea es menos de la diezbillonésima parte de la energía de la transición. Por esta razón es muy sensible a la configuración y entorno del átomo en que se produce la absorción, o la emisión. En particular los parámetros que modulan la absorción son: la densidad de electrones en el núcleo (desplazamiento isomérico), el gradiente de campo eléctrico en la posición que ocupa, que es proporcional a la intensidad y falta de simetría del campo cristalino (desdoblamiento cuadrupolar) y finalmente, el campo magnético hiperfino. Este es únicamente apreciable en las sustancias magnéticamente ordenadas y es la base de las aplicaciones al magnetismo. Como ejemplo de tales aplicaciones comentaremos la determinación del tipo de orden y transiciones magnéticas, orientación de los momentos magnéticos, distinción entre sitios magnéticamente inequivalentes, y entre átomos en el "core" y "shell" de nanogranos, reorientaciones de espín, bloqueo de superparamagnéticos, etc..

• e-mail: manub@we.lc.ehu.es

Aplicaciones de la radiación sincrotrón en magnetismo

Luis Miguel García Vinuesa

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC – Universidad de Zaragoza)
luism@unizar.es

Comenzaremos la lección introduciendo los conceptos básicos de la radiación sincrotrón: su producción, sus rangos energéticos, los constituyentes básicos de un sincrotrón y sobre todo las características que hacen de esta herramienta una técnica tan versátil y potente como son: su espectro en frecuencias, su altísimo brillo, su alta colimación, su estructura temporal y su polarización.

A continuación explicaremos porqué la radiación sincrotrón es especialmente útil en el estudio del magnetismo y los materiales magnéticos y nos centraremos en particular en la técnica de dicroísmo magnético circular en la absorción de rayos x (XMCD de sus iniciales en inglés *X-ray Magnetic Circular Dichroism*). Ilustraremos con ejemplos reales y actuales el altísimo potencial que el XMCD tiene debido fundamentalmente a:

- su selectividad atómica: permite distinguir la contribución magnética de cada tipo de átomo, siendo capaz de detectar contribuciones muy pequeñas, algo especialmente útil en sistemas muy diluidos y en nano-magnetismo: superficies, multicapas, superredes y nanopartículas.
- su selectividad a capa electrónica: ello permite separar el papel jugado por cada una de las capas electrónicas, estudiar hibridaciones,...
- la posibilidad de desacoplar la contribución orbital de la espinorial, lo cual permite profundizar en los orígenes de la anisotropía magnética y por ejemplo su relación con la dimensionalidad del sistema físico estudiado.

La última parte de la lección la dedicaremos a los últimos avances y las nuevas tendencias en la investigación de magnetismo con radiación de sincrotrón como son las técnicas de imagen como la microscopía XPEEM, las técnicas basadas en la coherencia de la radiación sincrotrón y las técnicas que hacen uso de la estructura temporal de la radiación sincrotrón y permiten estudiar efectos temporales como la dinámica de la imanación.

Técnicas de haces de neutrones en magnetismo

Javier Campo

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC – Universidad de Zaragoza)

En un principio nos interesaremos únicamente por la interacción entre los neutrones y los núcleos atómicos y veremos las definiciones y conceptos más importantes; longitud de dispersión, secciones eficaces, coherencia e incoherencia, factores de estructura, etc. Pero existe otra interacción (*dipolar*) entre el neutrón y la materia, aquella que resulta del hecho de que el neutrón porta un momento magnético (debido a su espín). La mayoría de los electrones en los átomos están *apareados* y por lo tanto el momento magnético de un electrón se cancela con el de su *par*. Sin embargo en algunos casos no todos los electrones están apareados lo que produce un momento magnético resultante y con el que el neutrón es susceptible de interactuar. Incluso los neutrones son a veces capaces de interactuar magnéticamente con aquellos núcleos que portan a su vez un momento magnético.

Supongamos un material ferromagnético. Este material se comporta como si en cada posición atómica de la red hubiera un pequeño imán apuntando en una determinada dirección (todos en la misma dirección). Estos pequeños momentos dan lugar a una dispersión elástica coherente (dispersión *Bragg magnética*) de los neutrones en la misma manera que la interacción nuclear. Debido a que ambas interacciones, nuclear y magnética, son del mismo orden de magnitud entonces ambas producen reflexiones de Bragg de intensidad comparable.

Una diferencia importante entre los dos tipos de dispersión, nuclear y magnética, proviene del hecho de que esta última no es isotrópica debido a la naturaleza *dipolar* de la interacción magnética del neutrón con los electrones desapareados. Como consecuencia de lo anterior los neutrones *ven* únicamente la componente perpendicular del momento magnético al vector de dispersión \mathbf{Q} . Por tanto la dispersión de neutrones es sensible a la orientación de la imanación en un material así como a su distribución espacial.

Normalmente, un haz de neutrones contiene neutrones con los momentos magnéticos apuntando en todas las direcciones. Si midiéramos el número de neutrones con momento magnético paralelo (*up*) o antiparalelo (*down*) a una determinada dirección del espacio encontraríamos las mismas poblaciones. No obstante existen técnicas que permiten *polarizar* un haz de neutrones, es decir, permiten que una gran fracción de los momentos de los neutrones estén apuntando en una determinada dirección.

Supongamos que tenemos un espectrómetro con polarizadores situados antes y después de la muestra. Entonces podremos medir todas las leyes de dispersión de neutrones, en configuración *up-up*, *up-down*, etc. Esta técnica es útil ya que existen procesos que invierten el espín del neutrón y otros no. Esta técnica es muy potente a la hora de determinar las direcciones de los momentos magnéticos en los materiales (estructuras magnéticas complicadas) y densidades de imanación en moléculas magnéticas.

Otro aspecto importante de los materiales magnéticos es el hecho de que los momentos magnéticos en cada sitio del material pueden oscilar. Si existe un acoplamiento magnético entre los diferentes sitios entonces una onda de oscilaciones magnéticas (*ondas de espín o magnones*) puede propagarse por el material. Estas excitaciones magnéticas son el análogo magnético de las ondas de desplazamientos o *fonones*. No debe entonces sorprendernos que las frecuencias de los *magnones* puedan ser medidas por medio de experimentos de dispersión inelástica de neutrones al igual que se hace con los *fonones*.

Todos los conceptos que aparecen en la charla serán ilustrados por medio de ejemplos reales de: cristalografía magnética en polvos y en monocristales, determinación de densidades de espín, medida de curvas de dispersión de magnones y determinación de niveles de energía magnéticos.

Taller práctico: Determinación de estructuras magnéticas

Javier Campo¹ y Jesús A. Blanco²

¹Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, (CSIC – Universidad de Zaragoza)

²Dpto. de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de Oviedo

En este taller práctico se van a poner en ejercicio los conocimientos de difracción de neutrones orientados a la resolución de estructuras magnéticas. Para ello, comenzaremos haciendo una revisión de la teoría de representación de grupos finitos que junto con los conocimientos básicos de dispersión magnética de neutrones que se han abordado en una lección anterior permiten simplificar la búsqueda de soluciones de un modo sistemático. A través de diferentes ejemplos de materiales que presentan ordenamientos ferromagnéticos y antiferromagnéticos, nos familiarizaremos con el uso del software existente que permite determinar estructuras magnéticas. El proceso se puede dividir en diferentes etapas que van desde la búsqueda de vectores de propagación, el análisis por teoría de representación de grupos finitos de las relaciones entre las componentes de Fourier de los momentos magnéticos; la determinación de las direcciones de los momentos magnéticos y finalmente la evaluación de los módulos de dichos momentos.

Fabricando nanoestructuras magnéticas: En busca de nuevos fenómenos

Xavier Batlle

*Dept. Física Fonamental y Institut de Nanociència i Nanotecnologia (IN2UB),
Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona*

Los materiales nanoestructurados han atraído un fuerte interés durante los últimos años dado que representan los bloques básicos sobre los que se construye la nanociencia y nanotecnología. Los materiales nanoestructurados presentan una amplia variedad de nuevos fenómenos físicos cuando el tamaño característico deviene del orden de alguna longitud de correlación como, por ejemplo, el tamaño de dominio en el caso de los materiales ferromagnéticos o el recorrido libre medio y la longitud de difusión de espín en el caso del transporte de carga. La aparición de nuevos fenómenos magnéticos es resultado de la interrelación entre los efectos de tamaño finito y de superficie, el confinamiento de los electrones y los efectos de proximidad entre las unidades que forman el material. Esto es relevante en la miniaturización de los dispositivos, por ejemplo en el límite del *Terabit* por pulgada cuadrada en la grabación magnética. Asimismo, durante la mayor parte del siglo XX, la microelectrónica (transporte de carga) y el magnetismo (espín del electrón) han sido tratados como campos de investigación independientes. Con el nuevo milenio, la electrónica de espín ha emergido como una disciplina que explota el espín del electrón a fin de diferenciar los portadores de carga en dos tipos. En esta charla discutiremos algunos de los aspectos más relevantes del magnetismo y transporte de carga en materiales aislantes que contienen nanopartículas magnéticas (*e.g.*, Co-ZrO₂) *desordenadas* espacialmente, en particular el llamado bloqueo de Coulomb (efecto de tamaño finito) y la magnetoresistencia túnel, y los compararemos con las nanoestructuras metálicas (*e.g.*, CoFe-Ag) que presentan magnetoresistencia gigante, para las cuales la distancia entre nanopartículas es comparable o menor que el recorrido libre medio y la longitud de difusión de espín. Por otra parte, la nanofabricación mediante procesos de autoensamblaje es de interés para el desarrollo de métodos que permitan obtener redes de nanoelementos *ordenados* sobre áreas macroscópicas. En la última parte de la charla describiremos como, mediante la oxidación anódica de una capa de Al, es posible obtener una red hexagonal de nanoporos de alúmina de diámetro y periodicidad controladas, sobre áreas de algunos cm². Estas membranas se utilizan como plantillas para el depósito posterior de una red hexagonal de *nanodots* de diversos elementos (Fe, SiO₂, TiO₂, FeNi, Fe/FeF₂,...), con un alto grado de orden. Los *nanodots* magnéticos nos permiten estudiar en la nanoescala las nuevas estructuras de equilibrio que aparecen resultado de la competición entre la interacción de canje y la energía magnetostática (*e.g.*, el estado vórtice), y el fenómeno del acoplamiento de canje (*exchange bias*).

Agradecimientos

Agradecemos la financiación del MEC (PR2003-0149), la CICYT (MAT2006-03999), y la Generalitat de Catalunya (2005BE00028, 2005SGR00969). Este trabajo no hubiera podido realizarse sin la colaboración inestimable de: A. Labarta, B.J. Hattink, M. García del Muro, Z. Konstantinovic, M. Varela, V. Franco (U. Barcelona), I.V. Roschin, C-P Li, S. Roy, S.K. Sinha, I.K. Schuller (U. California San Diego), S. Park, R. Pynn, M.R. Fitzsimmons (Los Alamos National Laboratory), J. Mejía-López (Pontificia U. Católica de Chile), D. Altbir (Universidad de Santiago de Chile), A.H. Romero (CINVESTAV, México), F. Ott, M.Viret (CEA Saclay).

Nanoestructuras magnéticas artificiales y autoorganizadas

Alfonso Cebollada

Instituto de Microelectrónica de Madrid

alfonso@imm.cnm.csic.es ; <http://www.imm.cnm.csic.es>

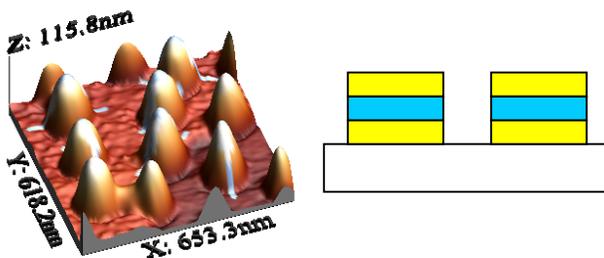
Frecuentemente propiedades físicas relevantes en magnetismo sufren modificaciones respecto a sus valores habituales, tienen relevancia desde el punto de vista de las aplicaciones, o incluso son únicamente observables, cuando se dispone de estructuras magnéticas con tamaños a lo largo de una, dos o las tres direcciones del espacio del orden de los nanómetros.

Así, es de extraordinario interés reducir el tamaño de los bits en medios de almacenamiento magnético de información para aumentar la densidad de los mismos, pero cuando se alcanzan dimensiones del orden de los nanómetros, aparece el fenómeno del superparamagnetismo, en el que las fluctuaciones térmicas hacen que su estado de imanación no sea estable a temperatura ambiente.

Asimismo, fenómenos como la magnetorresistencia túnel en tricapas Ferromagnético/Aislante/Ferromagnético, en las que el transporte eléctrico entre los dos electrodos ferromagnéticos a través de la barrera aislante depende del estado magnético de la estructura, sólo son observables cuando el espesor de la barrera es del orden o inferior a unos pocos nanómetros.

Es por tanto evidente que, además de ser capaz de controlar la naturaleza intrínseca de los materiales que constituyen multitud de estructuras magnéticas (como por ejemplo estructura cristalina o composición) es también fundamental ser capaz de controlar su tamaño o su disposición espacial dentro de una estructura más compleja.

En esta charla intentaremos dar una visión global de las diferentes aproximaciones existentes para la obtención de sistemas magnéticos nanoestructurados, tanto artificialmente, principalmente con diversas técnicas de litografía, como sintonizando adecuadamente los parámetros de fabricación, mediante técnicas de autoensamblaje y autoorganización.



Nanodiscos constituidos por tricapas Au/Co/Au de 100 nm de diámetro y fabricados por Litografía Coloidal. Las dimensiones de los discos hacen posible excitar ópticamente resonancias de plasmón localizadas en los mismos (principalmente debido al Au) que a su vez producen un fuerte aumento de la actividad Magneto-Optica del sistema (principalmente debido al Co). Esta actividad Magneto-Plasmónica hace que estos sistemas tengan potenciales aplicaciones por ejemplo en el campo de los sensores de resonancia de plasmón.

Magnetismo de pequeñas partículas

J. Rivas

*Dpto. Física Aplicada, Facultad de Física,
E-15782 Santiago de Compostela, Spain
E-mail: farivas@usc.es*

Actualmente está teniendo lugar una revolución científica y tecnológica basada en la capacidad, desarrollada recientemente, de medir, manipular y organizar la materia a escala del nanómetro. Esto significa poder trabajar con objetos de un tamaño comprendido entre 1 y 100 diámetros atómicos.

En esta escala, la física, la química, la ciencia de materiales, la simulación con ordenador y la ingeniería convergen hacia los mismos principios teóricos y técnicas experimentales. La lista de aplicaciones de la Nanotecnología es muy grande y su impacto en la sociedad será sin duda decisivo.

En esta charla prestaremos una atención especial a las nanopartículas magnéticas como un paradigma de la Nanociencia que abre nuevas posibilidades en la ciencia y en las tecnologías actuales. Las propiedades de estos sistemas son muy diferentes de los materiales masivos y de los átomos aislados. El superparamagnetismo es un fenómeno característico de las pequeñas partículas magnéticas que exhiben un comportamiento similar al paramagnetismo para temperaturas por debajo de la temperatura de orden, con momentos magnéticos por partícula mucho mayores que los momentos magnéticos individuales típicos a nivel atómico. Los fenómenos dinámicos complejos asociados a “paisajes” de sistemas de partículas con equilibrios multi-estables crean fenómenos, muchas veces exóticos, de difícil interpretación. Las nanopartículas permiten directamente explorar una gran variedad de fenómenos mesoscópicos: estructuras multicapa (core@shell), estructuras híbridas, interacciones entre partículas, etc.

Desde el punto de vista tecnológico las nanopartículas magnéticas se encuentran en muchos dispositivos de gran utilidad práctica como los sistemas de almacenamiento de información, ferrofluidos, en temas relacionados con el medio ambiente y la salud, pigmentos y pinturas en cerámicas, ... por lo que sus implicaciones sociales son muy profundas.

Por estas razones, el área de investigación en partículas magnéticas, ha atraído una gran atención en los últimos cincuenta años, aunque el gran “boom” ha tenido lugar en la última década, fundamentalmente asociado al requerimiento tecnológico de la reducción del tamaño en dispositivos de registro magnético.

Retos en Magnetismo Molecular

Eugenio Coronado Miralles

Instituto de Ciencia Molecular, Universidad de Valencia

En esta charla presentaré con algunos ejemplos los avances recientes más significativos obtenidos en el campo del magnetismo molecular y de los materiales magnéticos moleculares. Me centraré en concreto en los siguientes temas:

- i) Diseño de nuevos sistemas donde la dimensión nanométrica juega un papel esencial en cuanto a sus propiedades (moléculas imán).
- ii) Organización sobre superficies de moléculas magnéticas y de moléculas imán.
- iii) Diseño de materiales magnéticos multifuncionales basados en moléculas en los cuales el magnetismo o bien coexista con otra propiedad física de interés (conductividad, superconductividad, actividad óptica, biestabilidad molecular, ...), o bien pueda ser controlado mediante la aplicación de un estímulo externo (presión, luz, temperatura, ...).

Aplicaciones biomédicas de las nanopartículas magnéticas

M. R. Ibarra

*Instituto de Nanociencia de Aragón, Universidad de Zaragoza
Instituto de Ciencia de los Materiales, Universidad de Zaragoza-CSIC*

Los avances recientes en el control de la materia a nivel nanométrico y la gran pujanza de la investigación interdisciplinar está significando el auge de una nueva disciplina científica: la nanociencia. La nanoestructuración de los materiales puede dar lugar a una modificación de sus propiedades físicas, un caso muy concreto es el del comportamiento magnético. Pero las características de estos materiales no son sólo interesantes por la investigación de nuevos fenómenos, sino también por las distintas aplicaciones como: sistemas de almacenamiento magnético, cabezas lectoras de discos duros, memorias magnéticas etc. Pero el tamaño también puede ser un parámetro importante para otras aplicaciones “in-vitro” o “in-vivo” en biomedicina. En concreto los materiales nanoestructurados por excelencia en este tipo de aplicaciones son las nanopartículas magnéticas. Estas, una vez funcionalizadas pueden utilizarse como portadores de fármacos o cadenas moleculares que realicen una labor de reconocimiento biomolecular. En esta conferencia se presentan algunas aplicaciones concretas en el ámbito de la nanoterapia y el nanodiagnóstico. Las nanopartículas magnéticas constituyen una de los elementos más importantes para la cuantificación de “test” de diagnóstico y como agentes de contraste para mejorar la imagen en los “scanner” de resonancia magnética (MRI).

Avances en Imanes Permanentes.

Juan Bartolomé

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón.

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC – Universidad de Zaragoza)

barto@unizar.es

Desde el descubrimiento de los compuestos de tierra rara y metal de transición de fórmula SmCo_5 y más tarde del $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ como materiales magnéticos con prestaciones excepcionales como imanes permanentes, se han realizado importantes esfuerzos a nivel mundial encaminados a comprender los mecanismos físicos que inducen características tan favorables en estos materiales. Estos trabajos han llevado al descubrimiento de compuestos alternativos a los indicados, y a desarrollar procesos diferentes, que han conducido a la industrialización de imanes permanentes más potentes y compactos.

La idea fundamental subyacente en esta categoría de imanes es conseguir una alta imanación y alto campo de anisotropía combinando un metal de transición, que puede aportar un gran momento magnético, con otro elemento, tal como una tierra rara, que provoca una alta anisotropía magnética en una dirección privilegiada, o eje de fácil imanación. Este efecto paradigmático se consiguió en el $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ en el que tan solo dos átomos de Nd son capaces de polarizar el momento magnético de 14 átomos de Fe en la dirección cristalográfica c .

Las propiedades intrínsecas de estos compuestos no son suficientes para producir imanes permanentes industriales. Es necesario que tengan alta coercitividad y su producción sea fácil a gran escala. La satisfacción de estas condiciones se consigue mediante la producción del material en forma de escamas, su reducción a granos de menor tamaño y posterior sinterización. Se han conseguido imanes sinterizados con un factor producto $(BH)_{\text{max}}$ superior a los 400 kJ/m^3 . Una forma de mejorar estas prestaciones consiste en la introducción de diversos elementos aditivos que como sustituyentes de átomos en la red cristalina (Co, Dy, Al) tienden a mejorar una u otra de las características del material, o bien producen efectos extrínsecos (Cu, Ga) que modifican la microestructura y la composición del material intergranular.

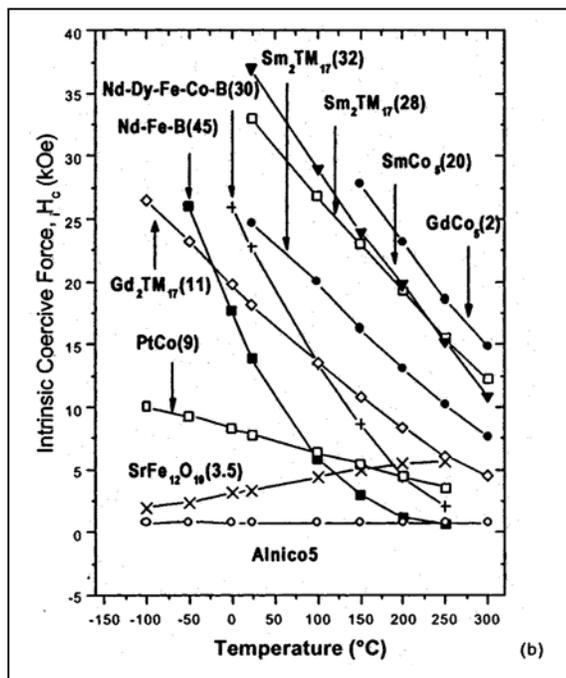


Fig. 1. Coercitividad frente a temperatura de materiales magnéticos comerciales. Los números entre paréntesis indican el producto energético $(BH)_{\text{max}}$.

M.S. Walmer et al. *IEEE Transactions on Magnetics* 36, 3376 (2000)

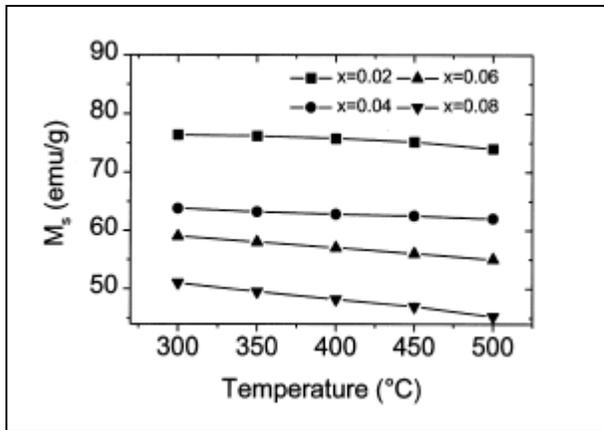


Fig. 2. Dependencia con la temperatura de la aleación $Sm(C_{0.02}Fe_{0.1}Cu_{0.088}Zr_x)_{8.5}$
Tang et al. *J. Magn. Magn. Mat.* 212, 138 (2000)

Por otra parte, la necesidad de incrementar la temperatura máxima en la que se puede utilizar un imán permanente, por ejemplo, en la industria aeroespacial, ha hecho que se hayan desarrollado aleaciones con temperatura de Curie superiores a 500° C, tales como la derivada del $SmCo_5$ de composición tipo $Sm(Co_wFe_vCu_xZr_y)_z$, aunque siempre a costa de una disminución en el producto energético $(BH)_{max}$.

Como alternativa a los materiales tipo 2:14:1 y 1:5 se han buscado otras composiciones, como los compuestos de las series R_2Fe_{17} (2:17), $RFe_{11-x}M'_x$, $R_{m+n}Co_{5m+3n}B_{2n}$, con y sin inclusión de elementos intersticiales ligeros como N y C. Aunque no han suplantado a los 2:14:1, su estudio ha permitido profundizar en los mecanismos físicos involucrados en los intermetálicos de tierra rara y metal de transición.

Una idea innovadora, aunque todavía no se encuentra entre los imanes industriales, es la denominada en inglés “spring-magnets”, o bien, “imanes compuesto”, consistentes en combinar dos fases; la primera es un material magnéticamente blando que presenta una imanación alta, y la segunda una fase dura, tal que polarice magnéticamente a la primera. Si el tamaño de la fase blanda no es mayor que el doble de la anchura de la pared de dominio, la imanación de la fase blanda permanece acoplada magnéticamente a la imanación de la fase dura. Se espera que este tipo de material mejore las prestaciones del $Nd_2Fe_{14}B$.

Una de las conclusiones claras que han resultado de una década de trabajo sobre los imanes compuestos ha sido la necesidad de que las dimensiones de las distintas fases sean nanométricas. De forma natural los imanes permanentes han entrado en el mundo de la nanotecnología en el campo de grabación de alta densidad con los materiales de tipo PtFe o PtCo en que se han encontrado anisotropías magnéticas elevadas y alta densidad magnética.

Materiales amorfos y nanocristalinos

L. Fernández Barquín

Departamento CITIMAC, Universidad de Cantabria, Santander 39005, España

El descubrimiento de los materiales amorfos magnéticos a principios de los años 70 disparó un enorme interés científico y tecnológico. El estudio de las propiedades magnéticas en estos materiales metaestables y desordenados estructuralmente (sin periodicidad a largo alcance) es muy atractivo pero simultáneamente complejo. En general, el desorden induce la existencia de comportamientos promediados en cualquier efecto microscópico de tipo térmico, electrónico y, en particular, magnético. Es pues necesario el uso de teorías y experimentos más complejos normalmente que los que se aplican en los materiales cristalinos. Sin embargo, esas barreras se han vencido debido al enorme interés tecnológico asociado en general a su carácter magnéticamente blando, debido a la falta intrínseca de anisotropía magnetocristalina [1-4].

A comienzos de los años 80, tuvo lugar otro descubrimiento de gran influencia básica y tecnológica, con la obtención de materiales llamados nanocristalinos en aleaciones férricas. Sus propiedades magnéticas son incluso más blandas que las de los amorfos mencionados. Estas propiedades se consiguen en aleaciones que se preparan comúnmente en estructura amorfa en un estado inicial y, posteriormente, por diversos procesos térmicos se produce la cristalización de granos nanométricos de Fe (o Fe-Si) que están incluidos en una matriz amorfa. La existencia de una anisotropía promediada da lugar a la mencionada reducción de la coercitividad. Este segundo tipo de materiales han tenido igualmente un desarrollo espectacular constituyendo además, una aproximación sencilla al tema del nanomagnetismo, tan en boga actualmente [4-6].

En la lección se revisarán los métodos usuales de producción, los tipos de materiales, las características estructurales obtenidos por difracción y absorción de rayos X, y técnicas neutrónicas. Igualmente comentaremos sus propiedades eléctricas y finalmente, las características magnéticas principales como la imanación frente a la temperatura y los ciclos de histéresis. Como colofón se presentarán resultados asociados a la relajación estructural y magnética y el estudio por técnicas microscópicas no convencionales como SANS, espectroscopias de muones y Mössbauer, entre otras.

- [1] F. E. Luborsky, *Ferromagnetic Materials I* (North Holland, 1980).
- [2] F. E. Luborsky, *Amorphous Metallic Alloys* (Butterworths, 1983).
- [3] A. Hernando, *Nuevos Materiales: Los Vidrios Metálicos* (EUDEMA, 1987).
- [4] A. Inoue and K. Hashimoto, *Amorphous and Nanocrystalline Materials* (Springer, 2001).
- [5] G. Herzer, *Ferromagnetic Materials X* (North Holland, 1997).
- [6] K. Hono and M. Ohnuma, in *Magnetic Nanostructures* (ASP, 2002).

Ferritas blandas: propiedades magnéticas y aplicaciones industriales reales

Miguel A. París

*Director de I+D
Hispano Ferritas S. A. (grupo FERROXCUBE)*

Bajo la denominación genérica de ferritas se conoce a un amplio rango de materiales cerámicos magnéticos. En particular, dentro de esta clasificación pueden distinguirse dos grandes familias de materiales:

- A) Ferritas magnéticamente duras, que corresponden a materiales con fórmula química general $MFe_{12}O_{19}$, donde $M = Ba^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}$, estructura cristalina hexagonal y cuyo principal campo de aplicación se encuentra en la fabricación de imanes permanentes.

- B) Ferritas magnéticamente blandas, con estructura cristalina cúbica “espinela” y fórmula química general MFe_2O_4 , donde M es uno ó varios de los siguientes cationes divalentes $Mn^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$.

Este segundo grupo de materiales (y componentes obtenidos a partir de los mismos), que constituyen la base de negocio de FERROXCUBE, es uno de los más ampliamente utilizados desde sus comienzos por el sector de la electrónica como núcleos magnéticos de inductores y transformadores debido a su bajo coste y elevadas prestaciones (especialmente a altas frecuencias) comparado con otros materiales magnéticos. De hecho, este tipo de materiales está presente, sin que seamos conscientes de ello, en la gran mayoría de los dispositivos electrónicos que utilizamos en nuestra vida diaria.

En esta lección se pretende dar una visión general sobre el origen del magnetismo en las ferritas blandas, sus propiedades magnéticas así como su dependencia con los principales agentes modificadores de las mismas: composición química y microestructura.

Por otro lado, se mostrarán ejemplos concretos de uso real de las ferritas blandas en de cada uno de los 3 principales campos de aplicación de las mismas dentro de la electrónica: supresión de interferencias electromagnéticas (EMI suppression), conversión de potencia y aplicaciones de radiofrecuencia.

Magnetostricción y Magnetoelasticidad: una visión actual

A. del Moral

*Laboratorio de Magnetismo, Depto de Física de Materia Condensada & ICMA
Universidad de Zaragoza & CSIC*

Se pretende dar una visión lo más amplia posible del acoplo magnetoelástico (MEL) y la magnetostricción (MS) en su estado actual, clave en la comprensión del magnetismo de los sólidos: al igual que toda la materia sólida se imana, a la par se deforma por MS, de volumen o de forma la celda cristalina, bien espontáneamente al ordenarse magnéticamente o bajo la aplicación de campo magnético. Se comienza por un estudio fenomenológico basado en la simetría macroscópica y la termodinámica, junto con la introducción de las deformaciones de MS lineales y rotacionales. Esto nos permitirá la consideración del acoplo MEL no-lineal, básico en la propagación de ondas elásticas en sólidos magnéticos, así como el importante concepto de la "invariancia rotacional" (RI), no considerada en la magnetoelasticidad "clásica". A continuación se expondrá la denominada "Teoría Standard de la MS" (STM), desarrollando las teorías, basadas en el uso de los grupos puntuales, de la MS de campo cristalino (MS de "un-ión") y de la de canje (MS de "par de iones"), tanto en fase ordenada como paramagnética (parastricción), obteniendo la variación térmica de ambas, punto clave para su distinción experimental. Se expondrán también cálculos de dicha variación térmica basados en la aproximación de ondas de spin (bajas temperaturas), para llegar a la ley de Akulov-Zener-Callen. El estudio de los antiferromagnéticos se hará brevemente en base a la teoría de Landau-Dzialoshinski, más adecuada. Se presentará una idea del difícil y aún no resuelto problema de la MS en sólidos magnéticamente ordenados metálicos (teoría itinerante o de bandas, con el uso del funcional de densidad de spin, SDA y similares) y de la MS de Hubbard para pares de átomos (Néel); para ello se presentará un modelo simple original. En cada tipo de sólido magnético se requiere para ser estudiado en mayor detalle el acoplo MEL, de un modelo apropiado. Para ello se estudiarán: i) intermetálicos de tierras raras, con el modo de cálculo de los "parámetros MEL", por el método de cargas puntuales y con apantallamiento del campo MEL por los electrones de conducción (en espacio recíproco, q); ii) ferromagnéticos itinerantes débiles, utilizando la teoría de fluctuaciones de spin (Moriya); iii) sólidos con electrones fuertemente correlacionados (a base de Ce e Yb); iv) idea de cálculos "ab-initio" para Fe, Ni y aleaciones, y fundamentalmente para films ultrafinos. Se hará una excursión muy breve por los sólidos desordenados estructural- (aleaciones ferromagnéticas amorfas) y magnéticamente (anisotropía magnética aleatoria) y asimismo sobre la MS en superredes de tierras raras, superficies magnéticas e interfases, de uso tecnológico actual. Si se dispone de espacio se expondrán las bases de la dinámica de la magnetoelasticidad (ondas magnetoacústicas (OMA), birrefringencia magnética y rotación Faraday MEL), y las consecuencias de la IR sobre las constantes elásticas (contribución magnética) y sobre la propagación de las OMAs. Se expondrán a lo largo de la lección fundamentalmente resultados de las teorías y modelos y conceptos físicos.

Sensores Magnéticos

Manuel Vázquez

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC. 28049 Madrid

Los sensores magnéticos son aquellos dispositivos en donde de forma genérica se hace uso de las leyes y fenómenos magnéticos para evaluar las variaciones de una magnitud determinada que queremos cuantificar. Un sensor magnético consta de un agente excitador, por ejemplo mecánico como velocidad o posición que se quiere cuantificar, el circuito magnético que contiene al elemento sensor y que modifica su respuesta magnética ante aquella excitación, y la respuesta medible que se traduce finalmente en una señal eléctrica típicamente de baja amplitud. El carácter magnético duro o blando de un material y el grado de sensibilidad ante esas variaciones juega pues un papel fundamental para determinar su capacidad como elemento sensor del dispositivo. En este curso se repasarán los distintos tipos de sensores magnéticos en función de su principio de funcionamiento.

Un gran número de sensores persiguen la evaluación del campo magnético. Una primera familia de sensores de campo se basan en la ley de la inducción electromagnética en donde el voltaje inducido de salida se produce por modificaciones del flujo magnético recogido por un circuito eléctrico bien sea por cambios de la posición del circuito, de la dirección de la imanación, o por modificaciones de la estructura de dominios del elemento próximo al circuito. Una segunda familia emplean fenómenos galvánicos, principalmente efecto Hall y magnetoresistivo, que aparecen como consecuencia de la correlación entre las corrientes eléctricas que fluyen en un material y sus variaciones en presencia de un campo magnético. En este caso se usan materiales bien semiconductores o ferromagnéticos y se utilizan por ejemplo para medida de campo magnético en grabación magnética. Más recientemente se han desarrollado sensores de campo magnético basados en el efecto de magnetoresistencia gigante en donde el spin juega el papel de portador de carga. Una última familia de sensores de campo como los magnetómetros de SQUID se basan en la superconductividad y el efecto Josephson.

Un amplio conjunto de sensores se basan en la magnetostricción y los efectos magnetoelásticos, es decir, en los cambios de la respuesta magnética del elemento sensor ante tensiones mecánicas, o bien en la generación de una tensión mecánica por aplicación de un campo magnético. Están en el fundamento de distintos sensores de tensión, presión, aceleración o temperatura.

En una segunda parte de la clase se considerarán los distintos pasos en el desarrollo de un sensor magnético. En particular, consideraremos el caso de un sensor de campo magnético basado en el efecto de magnetoimpedancia gigante, y el de un sensor de temperatura basado en efectos magnetoelásticos. Se partirá de la descripción de la fabricación del elemento sensor (microhilos magnéticos amorfos), de la caracterización de la propiedad a medir, y de la construcción y características del dispositivo general.

Magnetismo de sistemas fuertemente correlacionados

J.C. Gómez Sal

Universidad de Cantabria.

Los compuestos intermetálicos a base de Tierras Raras o Actinidos han sido desde los primeros tiempos del magnetismo un campo insoslayable para investigar las interacciones básicas que están en el origen de los fenómenos magnéticos y de las propiedades de transporte electrónico. En concreto proporcionan el escenario adecuado para investigar la interrelación entre el magnetismo localizado propio de las Tierras Raras y el itinerante dada la existencia de bandas de conducción que pueden contribuir al magnetismo originando un momento magnético propio o exclusivamente sirviendo de medio transmisor de interacciones magnéticas de largo alcance (Tipo RKKY).

Al mismo tiempo, hay que destacar el éxito de teorías como la de líquido de Fermi propuesta por Landau para explicar las propiedades de transporte de los metales, incluso en el caso en el que la interacción electrón-electrón sea indudablemente importante, y ha sido aplicada con éxito a compuestos con altas masas eficaces, como el UPt_3 , y a otros muchos sistemas llamados Fermiones Pesados. Sin embargo, es en el estudio del “efecto de impurezas de Kondo” o “compuestos de red Kondo” donde se combinan ambas, las propiedades de transporte y el magnetismo, cobrando una gran importancia en la nueva física de **Sistemas de Electrones Fuertemente Correlacionados (SCES)**. La clave para entender este efecto es la hibridación entre los electrones localizados $4f/5f$ con los electrones de la banda de conducción. Esta llamada “interacción Kondo” origina un apantallamiento parcial o total del momento magnético localizado por los electrones de conducción y el consiguiente incremento de la resistividad a bajas temperaturas por debajo de la temperatura característica Kondo (T_k).

La microscopía de efecto túnel o los dispositivos cuánticos puntuales aparecen como nuevas técnicas para adquirir un conocimiento más apropiado del efecto Kondo, no sólo desde el punto de vista de las impurezas magnéticas, sino que permiten además crear nuevos materiales nanoestructurados, con propiedades concretas. Esto implica un resurgimiento científico del efecto Kondo en el campo de la nanotecnología.

Muchos de estos sistemas SCES pueden presentar, mediante la adecuada variación de los parámetros tales como la presión, la composición, el campo magnético, etc, regiones cercanas a puntos críticos donde se han observado fuertes desviaciones del comportamiento del líquido de Fermi. Estos

compuestos intermetálicos son, por tanto, ejemplos destacables de líquidos no Fermi (NFL). Aunque el origen del comportamiento NFL es todavía un tema controvertido, es comúnmente aceptado que la existencia de una Transición de Fase Cuántica (QPT) es una de las claves para entenderlo. Una QPT aparece cuando el punto crítico de la transición de fase de segundo orden puede llevarse a los 0K en función de parámetros externos como la presión, el campo magnético o la composición. En este caso las fluctuaciones que destruyen el orden de largo alcance no pueden ser de naturaleza térmica, sino que son consecuencia del principio de incertidumbre de Heisenberg y por tanto son “fluctuaciones cuánticas”.

En esta lección, trataremos de recorrer de un modo comprensivo toda esta amplia fenomenología, discutiendo los ejemplos más importantes y enunciando el “estado del arte” en cuanto a comprensión de estos fenómenos. Analizaremos con especial atención el efecto del desorden que en muchos de estos casos de sistemas sustitucionales debe jugar un papel importante y discutiremos en particular el sistema $CeNi_{1-x}Cu_x$ que nos permitirá introducir nuevos mecanismos percolativos para la aparición de ferromagnetismo en sistemas mesoscópicos.

Algunas referencias.

- E. Miranda and V. Dobrosavljevic, *Rep. Prog. Phys.* 68, 2337 (2005).
- A.H. Castro Neto, G. Castilla and B.A. Jones, *Phys. Rev.Lett.* 81, 3531 (1998).
- Coleman, P. & Schofield A. J. Quantum criticality. *Nature* **433**, 226-229 (2005).
- N. Marcano, J. I. Espeso, J. C. Gómez Sal, J.R. Fernández, J. Herrero-Albillos and F. Bartolomé, *Phys. Rev. B.* 71 (2005) 134401.
- N. Marcano, J. C. Gómez Sal, J. I. Espeso, J. M. de Teresa, P. A. Algarabel, C. Paulsen and R. Iglesias *Phys. Rev. Lett* 98 (2007) 166406.

Fundamentos del magnetismo de óxidos

Fernando Bartolomé

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC – Universidad de Zaragoza)

Las propiedades físicas de óxidos de metales de transición han sido objeto de interés creciente en las últimas dos décadas, desde el descubrimiento de dos fenómenos físicos debidos a la correlación entre las propiedades magnéticas y electrónicas en óxidos, con gran interés tanto por el interés de la comprensión de su intrincado origen como por sus posibles aplicaciones: la superconductividad de alta temperatura en cupratos en 1986 y la magnetorresistencia colosal en manganitas en 1993.

La clase comenzará con un repaso de las interacciones magnéticas presentes en óxidos (superintercambio, doble intercambio) y que son relevantes en su rica fenomenología, tanto la más “clásica” (antiferro y ferrimagnetismo) como las más recientes (ferromagnetos de valencia mixta, etc.). Haremos énfasis en cómo estas interacciones magnéticas implican inevitablemente una fuerte correlación electrónica de al menos, tres grados de libertad: carga, órbita y espín. La fuerte correlación electrónica da lugar a transiciones y estructuras magnéticas, orbitalarias, metal-aislante y superconductoras complejas.

Cronológicamente, las dos grandes “explosiones” recientes de investigación en el magnetismo de óxidos tienen que ver con la superconductividad y la magnetorresistencia colosal en manganitas, las cuales se tratarán someramente por tratarse de temas que se desarrollarán más en profundidad en clases posteriores.

Se mostrarán algunos fenómenos relacionados con la frustración y el desorden, tanto a nivel microscópico (vidrios y líquidos de espín, desorden inducido en óxidos con varias subredes magnéticas), como en tamaños mesoscópicos (separación de fases, imanación negativa, etc). Se incidirá en la importancia del fenómeno de separación de fases en la comprensión actual de mucha de la fenomenología observada en óxidos magnéticos. Por último, se presentarán unas pinceladas de algunos fenómenos de gran actualidad en óxidos magnéticos: los *multiferroicos*, que presentan orden ferromagnético y ferroeléctrico a la vez, muy prometedores por sus posibles aplicaciones, así como el controvertido magnetismo de *óxidos semiconductores*, dopados (como $Zn_{1-x}M_xO$) o puros (como HfO_2); cuyo magnetismo diluído ó “d0”, de origen aún no aclarado no deja de ser al menos sorprendente.

The magnetism of superconductivity

Xavier Obradors

*Institut de Ciència de Materials de Barcelona, CSIC
Campus de la UAB, 08193 Bellaterra, Catalonia, Spain*

After 20 years of the discovery of High Temperature Superconductivity (HTS) by Bednorz and Muller, a wide progress has been made in basic science, materials preparation and technological developments. However, the basic issue of understanding the microscopic origin of High Temperature Superconductivity remains one of the more striking mysteries in Condensed matter Physics. In any case, however, the strongly correlated electronic state and the intense exchange magnetic interactions of the cuprate oxides seems to play a key role in their exotic behaviour. The exotic quantum state of these materials has actually fostered the interest in many new magnetic phenomena such as colossal magnetoresistance.

On the other hand, HTS High materials are type II superconductors, first described more than 50 years ago by Alexei Abrikosov, where Magnetism is essentially associated to the behaviour of superconducting vortices, i.e. a cylinder of supercurrents enclosing a magnetic flux quantum. However, in HTS vortices behave very different than in the classical low T_c superconductors, mainly due to the enhanced thermal fluctuations and its strong anisotropy, and hence the magnetic phase diagram displays a very rich phenomenology.

Mastering vortices in HTS materials appears to play a key role in developing electronic and power applications based on these materials, hence understanding the so-called “vortex matter” has become an issue of maximum priority in view of developing high critical current materials which allow to generate extremely high magnetic fields.

Developing cost-effective superconducting wires for such large scale applications has been a very challenging objective where extraordinary new ideas and developments have been demonstrated. The current-carrying capability of the new conductors based on HTS is at least a factor 50 above copper, therefore these conductors will allow to generate extremely high magnetic fields.

For all these reasons, HTS has a very powerful “Magnetic attraction” to scientists and technologists. This magical attraction extends to several scientific disciplines and domains where practical applications will be implemented.

In this talk the major past developments and the present existing bottlenecks towards successful understanding and development of HTS materials and applications will be presented.

Espintrónica: nuevos materiales y dispositivos

Josep Fontcuberta

*Institut de Ciència de Materials de Barcelona-CSIC
Campus UAB, Bellaterra 08193*

Las uniones túnel han jugado un papel muy importante en la comprensión de fenómenos fundamentales en materia condensada. En esta sesión revisaremos algunas de estas aportaciones, que abarcan desde la superconductividad a las memorias magnéticas.

Dado que las memorias basadas en uniones túnel magnéticas constituyen el núcleo de las memorias MRAM's la comprensión del funcionamiento y las limitaciones de las mismas son esenciales para su mejora.

Esta revisión permitirá poner de manifiesto algunas de sus características clave y descubrir aspectos que han permanecido prácticamente inexplorados. Uno de ellos es el papel que la simetría de las barrera túnel y su acople a la simetría de los electrodos tienen en su respuesta, y las posibilidades que su control ofrece como una nueva forma de mejorar su funcionalidad. Un análisis detallado nos llevará a considerar distintas simetrías (espacial, temporal, etc) y discutiremos como explotar las mismas para obtener prestaciones mejores o radicalmente nuevas.

Los óxidos de metales de transición, dada la extraordinaria variabilidad de propiedades que presentan, ofrecen enorme posibilidades para el diseño de nuevas barreras túnel y en ellos nos centraremos.

Principios de relajación magnética: aplicación a materiales blandos

J.I. Iñiguez de la Torre

Universidad de Salamanca

El concepto de relajación magnética se refiere a la evolución que experimenta un sistema desde una “configuración” magnética a otra. Podemos variar ese estado mediante la aplicación de un campo magnético (viscosidad magnética), la desimánación del material (desacomodación magnética), la variación brusca de su temperatura... Esta evolución no es instantánea sino gradual. El sistema evoluciona hacia una situación de mínima energía a través de procesos de relajación caracterizados por constantes de tiempo o tiempos de relajación. Esta evolución (este retraso magnético) es completamente independiente de los fenómenos de inducción e histéresis magnética y abarca diferentes aspectos en distintos materiales, ya sean materiales magnéticos ordenados o simplemente relajación-resonancia electrónica o nuclear. El conocimiento del fenómeno es interesante tanto desde un punto de vista formal como desde la vertiente de las aplicaciones en la caracterización de materiales, medicina... o en el diseño de memorias magnéticas, núcleos magnéticos... cuyas características (evolución, envejecimiento, etc) deben ser bien conocidas. En esta charla haremos una breve introducción al fenómeno de relajación magnética, resaltaremos su importancia y nos centraremos en el estudio de algunos materiales magnéticamente blandos, mostrando algunas técnicas de medida y de análisis de resultados.

Fenómenos cuánticos en magnetismo

Javier Tejada, Ferran Macià, Alberto Hernández-Mínguez

Universidad de Barcelona

El efecto túnel de la magnetización en sistemas magnéticos fue observado por primera vez a través del estudio de la relajación de partículas magnéticas a baja temperatura. Sin embargo, el hecho de que dichas nanopartículas presenten una distribución de barreras de energía dificulta la posibilidad de una comparación rigurosa entre experimento y teoría. Esta situación cambió drásticamente gracias a la aparición de los imanes moleculares, ya que una muestra macroscópica de dichos sistemas contiene entidades nanomagnéticas idénticas (mismas propiedades magnéticas y energías características).

Los imanes moleculares son moléculas discretas bien definidas que consisten en varios iones de metales de transición interactuando mediante ligandos orgánicos y/o inorgánicos. Entre los miles de imanes moleculares sintetizados existe una categoría conocida como "single molecule magnets", SMMs. Algunos de estos SMMs poseen valores elevados de espín. Por ejemplo, el comúnmente llamado Mn₁₂-acetato presenta $S = 10$ y una barrera de anisotropía suficientemente grande como para evitar la inversión de magnetización espontánea a bajas temperaturas. El tamaño de estos objetos se encuentra a medio camino entre la micro y la macroescala, por lo que permiten el estudio del límite entre efecto túnel de espín macroscópico y la mecánica cuántica convencional del espín.

El Hamiltoniano de espín más sencillo que se puede proponer para estudiar el comportamiento de estos sistemas incluye un término cuadrático con respecto a S_z , que da cuenta de la presencia de anisotropía uniaxial, y un término Zeeman debido a la presencia de un campo magnético aplicado en la dirección paralela al eje de fácil anisotropía: $H = -DS_z^2 - H_z S_z$. De acuerdo con este Hamiltoniano, el espín presenta pares de niveles de energía degenerados a ambos lados de la barrera para valores de campo tales que $H_z = nD$, con $n = \pm 1, \pm 2$, etc. Cuando todas las moléculas ocupan los niveles de espín con un número cuántico magnético positivo, m , se dice que la muestra está magnetizada en sentido positivo. Aplicando un campo magnético en sentido negativo, las moléculas relajan eventualmente hacia los niveles de espín con valores de m negativos. Este proceso puede ocurrir bien mediante transiciones térmicas por encima de la barrera de energía o bien a través de efecto túnel entre los estados en diferentes lados de la barrera. El efecto túnel se añade a la activación térmica cuando el campo magnético aplicado provoca que los niveles estén en resonancia, $H_z = nD$. Para que haya efecto túnel, el Hamiltoniano de espín debe incluir términos que no conmuten con S_z . Éstos pueden estar asociados a términos cuadráticos o de mayor orden de anisotropía transversal con respecto a S_x y S_y , o pueden ser términos transversales de energía Zeeman tales como $-S_x H_x$. La primera evidencia inequívoca de la presencia de efecto túnel resonante de espín en imanes moleculares se obtuvo a partir de los ciclos de histéresis realizados a diferentes temperaturas en una muestra de Mn₁₂-acetato, la cual presenta una barrera de anisotropía $U = DS_z^2 = 60$ K.

Modelización micromagnética: principios y aplicaciones.

O.Chubykalo-Fesenko

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC, Cantoblanco, 28049, Madrid.

Los cálculos micromagnéticos permiten conocer la distribución del momento magnético a escala nanométrica en relación con las propiedades intrínsecas y extrínsecas del material magnético. Hoy en día, estos cálculos constituyen una herramienta imprescindible para el estudio de la imanación y la optimización de propiedades, sobre todo en medios nanoestructurados. En la presente charla se discutirán los principios básicos de la modelización micromagnética, incluidos el micromagnetismo clásico (minimización de energía magnética), la dinámica de imanación y los efectos de temperatura. Una de las principales aplicaciones del micromagnetismo se encuentra en estudios de sistemas nanolitografiados, tales como dots o antidots. El reciente avance de técnicas experimentales ha permitido la observación de la dinámica de imanación en estas estructuras en el tiempo de picosegundos con la resolución de decenas de nanómetros. Consideraremos algunos ejemplos que demuestran el enorme potencial del micromagnetismo en esta área, como la dinámica de vórtices o paredes.

Como ejemplo de la optimización de propiedades de un material magnético, hablaremos del papel del micromagnetismo en la optimización del medio de grabación magnética. Un ejemplo reciente a este respecto es la propuesta y la optimización de la bicapa blando/duro para la grabación magnética. Finalmente, para concluir hablaremos sobre nuevas tendencias en la modelización de materiales - modelizaciones multiescala.

Refrigeración magnética: materiales magnetocalórico

L. Morellón

*Instituto de Nanociencia de Aragón, Universidad de Zaragoza
Instituto de Ciencia de los Materiales, Universidad de Zaragoza-CSIC*

El efecto magnetocalórico (EMC) es una propiedad intrínseca de todos los materiales magnéticos debida al acoplamiento de la subred magnética del sólido con un campo magnético externo. Esto hace que al someter un material magnético a un campo magnético variable, la contribución magnética a la entropía del sólido se modifique y, normalmente, al aumentar el campo el sólido se caliente (en condiciones adiabáticas).

La investigación de este fenómeno tiene una gran importancia en la actualidad tanto desde una perspectiva básica como desde el punto de vista de sus aplicaciones. Desde el punto de vista fundamental, el EMC supone una íntima relación entre el magnetismo y la termodinámica de sólidos, ideal en el estudio de las propiedades térmicas de los sólidos en función, no sólo de la temperatura, sino también del campo magnético aplicado. La importancia en aplicaciones del EMC se ha venido explotando durante años en laboratorios de investigación para lograr temperaturas ultrabajas. Avances tecnológicos recientes sugieren fuertemente la posibilidad de desarrollar y comercializar en un futuro próximo sistemas de refrigeración eficientes y respetuosos con el medio ambiente basados en este efecto.

En esta presentación se expondrán las ideas anteriores, comenzando con una revisión de conceptos generales de la termodinámica de sistemas magnéticos y se derivarán las expresiones para la variación isoterma de la entropía magnética y la variación adiabática de temperatura, magnitudes que se utilizan para cuantificar el EMC de un sólido. Estudiaremos el EMC en diversos tipos de materiales magnéticos específicos y se mostrará cómo se puede determinar experimentalmente este efecto utilizando tanto métodos directos como indirectos. A continuación, se describirá la aplicación del EMC en la tecnología de la refrigeración cíclica. Discutiremos la viabilidad y competitividad de la tecnología de la refrigeración magnética mostrando los resultados de prototipos de refrigeradores magnéticos y de avances recientes en la búsqueda de nuevos materiales con EMC.

