

PROPIEDADES MAGNETICAS EN NANOESTRUCTURAS

MAGNETIC PROPERTIES IN NANOSTRUCTURES

J. MEJÍA-LÓPEZ^{a†} Y A. MEJÍA-LÓPEZ^b

a) Centro de Investigación en Nanotecnología y Materiales Avanzados CIEN-UC, Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile. CEDENNA. Santiago, Chile. jmejia@puc.cl[†]

b) Facultad de Ingeniería, Carrera de Agroindustrial, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador. amejialopez@yahoo.es

[†] autor para la correspondencia

Received 1/11/2016; Accepted 1/12/2016

El magnetismo tiene un rol importante en nuestra vida cotidiana, por ejemplo los discos duros de computadores, Mp3, tarjetas de crédito, motores eléctricos, máquinas de diagnóstico usadas en hospitales, parlantes, etc., son dispositivos que utilizan el magnetismo para su funcionamiento. El uso extendido de los materiales magnéticos en la tecnología es debido a los diferentes comportamientos que aparecen en las diferentes composiciones químicas, diferentes geometrías y diferentes tamaños. En realidad, las propiedades magnéticas de los materiales a escalas nanométricas pueden ser completamente diferentes a los de los materiales macroscópicos debido principalmente a los efectos de confinamiento. El estudio de este comportamiento se conoce como nanomagnetismo y tiene un gran potencial para mejorar la tecnología existente como por ejemplo en los medios de grabación magnética, en dispositivos de lectura y escritura magnética, en sensores magnéticos, en aplicaciones en biomedicina, entre otras. En este reporte se presenta una breve introducción al nanomagnetismo, enfatizando las diferentes propiedades magnéticas que se encuentran en nanoestructuras y su relevancia en la tecnología.

Magnetism plays an important role in our daily lives, for example computer hard disks, Mp3, credit cards, electric motors, diagnostic machines used in hospitals, speakers, etc., are devices which use magnetism for their performance. The widespread use of magnetic materials in technology is due to their different behaviors that appear in different chemical compositions, different geometries and different sizes. In fact, the magnetic properties of materials in nanometric sizes may be completely different from those of macroscopic materials, especially due to the confining effects. The study of this behavior is known as nanomagnetism and has a great potential to improve existing technology such as magnetic recording media, magnetic reading and writing devices, magnetic sensors, and applications in biomedicine, among others. This report presents a brief introduction to nanomagnetism, emphasizing the different magnetic properties found in nanostructures and their relevance in the technology.

PACS: 75.75.-c Magnetic properties of nanostructures; 73.21.Ac Multilayers; 75.60.Jk Magnetization reversal mechanisms.

I INTRODUCCIÓN

En general, cuando se habla de tecnología pensamos en los dispositivos, herramientas o máquinas que se han desarrollado para satisfacer las necesidades de los seres humanos. Sin embargo la definición de tecnología es más amplia, ya que se puede describir la tecnología como conocimientos, procesos, productos, destrezas o técnicas que se utilizan para conseguir una solución que permita al ser humano resolver un problema determinado o lograr satisfacer una necesidad en un ámbito concreto.

En particular, en el marco de este artículo, la tecnología se puede pensar como la aplicación de los conocimientos científicos a las actividades humanas. El avance de la tecnología viene asociado a la comprensión o entendimiento de las propiedades estructurales, mecánicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de la materia. Como un ejemplo, la comprensión de las propiedades cuánticas de los semiconductores dio la posibilidad de la invención de los diodos y transistores que fue la base de la tecnología del siglo XX.

En la actualidad se usa muy frecuentemente la palabra nanotecnología, pero ¿qué es la nanotecnología? La

nanotecnología se deriva de la nanociencia y se entiende como la capacidad de manipular materiales en los cuales por lo menos una de sus dimensiones sea menor que 100 nanómetros. Lo interesante de estudiar estructuras bajo los 100 nanómetros es que aparecen nuevos y diferentes comportamientos de la materia con respecto a los conocidos a escalas micrométricas. En efecto, si tomamos un elemento de material macroscópico (de unos milímetros, observable a simple vista) y reducimos su tamaño progresivamente, llega un momento en que sus propiedades físicas, ya sean eléctricas, ópticas, magnéticas, mecánicas, etc., empiezan a cambiar en forma drástica.

Como un ejemplo de estos cambios en las propiedades ópticas, consideremos que sucede con el color de los materiales, digamos oro, cuando reducimos su tamaño a escalas nanométricas. Es bien conocido que un objeto hecho de oro tiene un color amarillo; si reducimos este material a partículas del orden de los micrómetros siguen siendo amarillas, pero si se sigue reduciendo a escalas menores que 500 nm se empiezan a tornar azules, púrpura, rojo y anaranjado. Los colores azul y púrpura son efectos geométricos que se pueden explicar con la solución de Mie de las ecuaciones de Maxwell que describe la dispersión de la luz debido a una esfera de diámetro dado [1]. Los otros colores

son efectos cuánticos debido al tamaño del material [2]. En realidad, el color rojo rubí del oro en estado coloidal ha sido conocido por siglos; este se observa por ejemplo en la luz transmitida en la famosa copa de licurgo del siglo IV, que se encuentra en el museo británico, y es debida a nanopartículas de oro de tamaño menores a 20 nm que fueron introducidas inconscientemente como dopantes en el material.

Otro ejemplo del cambio de las propiedades de los materiales es el cambio que sufren las nanopartículas de cobre, plata, etc., desde un material conductor a un material aislante [3]. O el gran potencial de aplicaciones tecnológicas que tienen los nanotubos de carbón, tubos con diámetro de tamaño nanométrico, debido a sus nuevas propiedades mecánicas y eléctricas que posee a estas escalas [4].

El desarrollo acelerado de la nanotecnología empieza en el año 1981 con la invención del microscopio de efecto túnel (STM por sus siglas en inglés Scanning Tunneling Microscopy) por Binnig y Rohrer [5], el cual permite observar y manipular la materia esencialmente a nivel atómico. Este instrumento se basa en el efecto túnel de la Mecánica Cuántica el cual nos dice que las partículas, en este caso los electrones, tienen la probabilidad de atravesar barreras de energía y por tanto se puede medir la corriente eléctrica que escapa desde la superficie de un material hacia una punta de prueba. De esta manera se puede revelar la presencia de la estructura atómica de la muestra. La intensidad de esta corriente eléctrica por tunelamiento depende exponencialmente de la distancia entre la superficie y la punta y por tanto se puede realizar medidas de muy alta precisión.

¿Por qué cambian las propiedades de los materiales? Se puede mencionar principalmente tres puntos: (1) Efectos de confinamiento cuántico. Cuando se reduce el tamaño de las estructuras se empiezan a manifestar efectos cuánticos. Por ejemplo una partícula libre en el espacio puede adquirir cualquier valor de energía pero si lo limitamos a una región del espacio puede adquirir solamente ciertos valores, fenómeno conocido como cuantización de la energía. Otro ejemplo es el cambio drástico que aparece en la densidad de estados (número de estados cuánticos disponibles para los electrones) cuando pasamos desde estructuras tridimensionales, a bidimensionales, a unidimensionales y a dimensión cero (puntos cuánticos). (2) Hay una mayor reactividad química debido a su mayor área superficial. Si las nanopartículas ocupan el mismo volumen se tiene mayor área. Por ejemplo un cubo de 27 cm de lado tiene una superficie igual a 0.44 m^2 , si este cubo se llena (de manera que mantenga el mismo volumen) con cubos más pequeños de lado 1 mm, el área total sería de 118 m^2 , y si se llena con cubitos de 1 nm de lado, la superficie total sería de aproximadamente 118 km^2 . Debido a este gran aumento en la superficie, una mayor cantidad del material llega a estar en contacto con su medio ambiente, y esto conlleva a que sean mejores catalizadores. (3) Escalas de longitudes críticas. Las dimensiones son comparables o más pequeñas que las longitudes características del sistema. Casi todas las propiedades de los materiales están controladas por alguna distancia característica, por ejemplo la conducción

eléctrica está determinada por la distancia media que los electrones pueden recorrer antes de chocar con los átomos que componen la red cristalina del material y desviar su trayectoria (esta distancia promedio se conoce como camino libre medio). La resistividad eléctrica de un material es proporcional al camino libre medio de sus electrones y es claro que si las dimensiones se reducen a tamaños menores que ésta, la distancia promedio será dada por la distancia de sus superficies en la dirección de la corriente cambiando su resistividad con el tamaño. Entonces, cuando al menos una de las dimensiones del objeto es menor o comparable a la distancia característica, la respuesta del sistema dependerá no solo de las propiedades del material sino también de su tamaño.

En este reporte se realiza una breve revisión de algunas propiedades magnéticas de las nanoestructuras, poniendo como ejemplo la aplicación que tienen principalmente en la tecnología de la grabación.

II MAGNETISMO BÁSICO

El magnetismo es una de las disciplinas científicas más viejas conocidas por el hombre pero también es una de las que van a la vanguardia de la era nanotecnológica. Su origen está ligado al nombre de una ciudad de las regiones de la antigua Turquía, rica en minerales de hierro, conocida como Magnesia. Magnesia actualmente es una prefectura de Grecia en el que se encuentra el famoso puerto Volos. Los primeros relatos de experiencias con una fuerza misteriosa o imán natural, son atribuidos a los griegos y datan del 8600 a.c (por Thales de Mileto). La primera utilización práctica del magnetismo fue la brújula, inventada por los chinos 2500 años antes de cristo. Basados en la propiedades de una aguja magnetizada que se orienta con el campo magnético terrestre, la brújula fue un instrumento importante para la navegación en los inicios de la era moderna. Actualmente, el magnetismo desempeña un papel muy importante en las aplicaciones tecnológicas. Las aplicaciones tradicionales, como los motores, los generadores, los transformadores, la grabación magnética, etc., son basadas principalmente en la relación que existe entre el magnetismo y la electricidad, descubierto por Oersted en 1819 y en el campo magnético creado por imanes permanentes.

Existen dos posibles orígenes atómicos del magnetismo que llevan a las propiedades magnéticas de las sustancias [5]: el movimiento orbital y el espín de los electrones (ver Figura 1). El movimiento orbital se refiere al movimiento de los electrones alrededor del núcleo. Una carga moviéndose en un circuito es equivalente a una corriente eléctrica, y por lo tanto posee un momento magnético (igual a la corriente multiplicada por el área del circuito) el cual se orienta en sentido contrario a un campo magnético externo. Este fenómeno se conoce como diamagnetismo y es un magnetismo muy débil. En este sentido, todos los materiales son diamagnéticos.

El espín es una propiedad intrínseca de los electrones y su origen es mecánico-cuántico. Desde un punto de vista

clásico, puede ser interpretado como el movimiento de rotación del electrón en torno a un eje. Como el electrón tiene carga, el movimiento de rotación del electrón (el espín) se puede considerar como una carga en un circuito y nuevamente está asociado a un momento magnético (un imán diminuto) y por lo tanto puede interactuar con un campo magnético externo. Esta interacción se manifiesta como una rotación del momento magnético hasta quedar alineado con la misma dirección y sentido del campo externo. Esto se conoce como paramagnetismo.

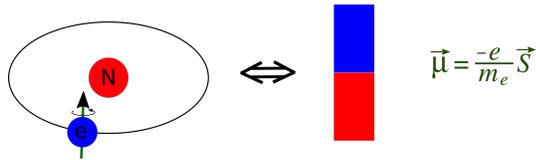


Figura 1. Representación esquemática del espín y su relación con el magnetismo.

En general los átomos no son paramagnéticos ya que cada nivel de energía disponible contiene un par de electrones con espín opuesto (principio de exclusión de Pauli) resultando en un momento magnético cero, como se representa en la Figura 2a. Sin embargo en los llamados metales de transición (como el Fe, Ni, Co, etc.), los orbitales 3d están incompletos y contienen electrones con espines no apareados (Figura 2) y este es el responsable del magnetismo en estos átomos.

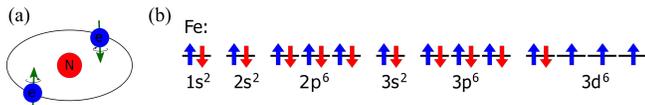


Figura 2. (a) Representación esquemática de los niveles energéticos en los átomos los cuales, por el principio de exclusión de Pauli, pueden estar ocupados como máximo por dos electrones de espín opuesto. (b) Distribución de los electrones en el átomo de hierro clasificado según sus orbitales químicos.

Aunque los átomos del Fe tienen un momento magnético, el material macroscópico llamado hierro no evidencia magnetismo en su estado natural. Esto es debido a que los materiales magnéticos están compuesto de diferentes dominios magnéticos, los cuales son regiones cuyos momentos magnéticos atómicos están en la misma dirección y sentido (ver Figura 3). En el hierro, en su estado natural, cada dominio tiene una dirección de alineamiento diferente. Entonces la magnetización total del material, que está definida como el momento magnético total por unidad de volumen, es cero.

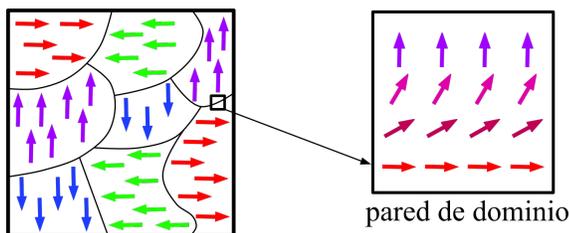


Figura 3. Representación esquemática de los dominios magnéticos y de su región de transición (pared de dominio) en un material ferromagnético.

La transición desde un dominio magnético a otro no es abrupta, sino que está formada por las llamadas paredes de dominio, que son zonas en las que la magnetización va girando progresivamente (Figura 3).

Si se aplica un campo magnético externo lo suficientemente grande, todos los momentos magnéticos se alinean con la dirección del campo, saturando magnéticamente el material (ver Figura 4). Si se disminuye la magnitud del campo hasta cero, el material conserva una magnetización remanente no nula y para llevarle nuevamente a magnetización cero se necesita invertir el campo hasta un valor conocido como campo coercitivo o simplemente coercitividad. Aumentando aún más el valor del campo magnético el material llegará nuevamente a la saturación magnética en la dirección del campo. La curva que se obtiene al realizar ciclos de campo magnético se conoce como ciclo de histéresis. La inversión de la magnetización desde una dirección a la dirección opuesta en un ciclo de histéresis procede por varios mecanismos tratando siempre de gastar la menor energía posible. Uno de los mecanismos que requiere menos energía para invertir la magnetización es el movimiento de las paredes de dominio, de manera que los dominios en la dirección del campo crece mientras que los dominios en la dirección opuesta al campo disminuyen, como se ve en la Figura 4.

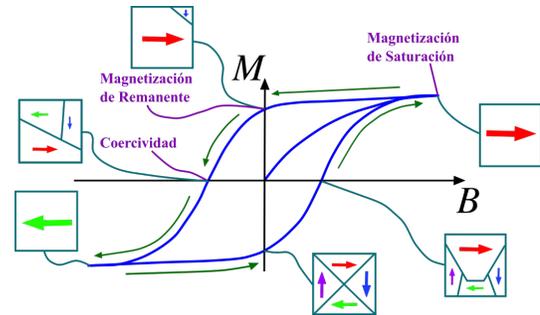


Figura 4. Representación esquemática del ciclo de histéresis y la inversión magnética por medio del movimiento de paredes de dominio.

Este comportamiento de los materiales magnéticos se debe a la competencia que existe entre diferentes interacciones de los momentos magnéticos atómicos, como se muestra en la Figura 5:

- (1) La interacción de intercambio originada por la superposición de las funciones de onda que tiende a alinear dos espines cercanos en el mismo sentido en materiales ferromagnéticos (FM) o en sentidos opuestos en materiales antiferromagnéticos (AF).
- (2) La energía magnetocristalina originada por el acoplamiento entre el espín del electrón y el momento angular orbital del mismo y por tanto siente la distribución atómica de su vecindad. Para minimizar esta energía los espines tienden a alinearse en ciertas direcciones privilegiadas.
- (3) La energía de Zeeman debido a la interacción del momento magnético con un campo magnético externo.
- (4) La energía dipolar (magnetostática) debido a que los momentos magnéticos asociados al espín generan campos

magnéticos que interactúan con los momentos magnéticos de los otros átomos. En este caso la alineación de la magnetización depende de la posición de los átomos.

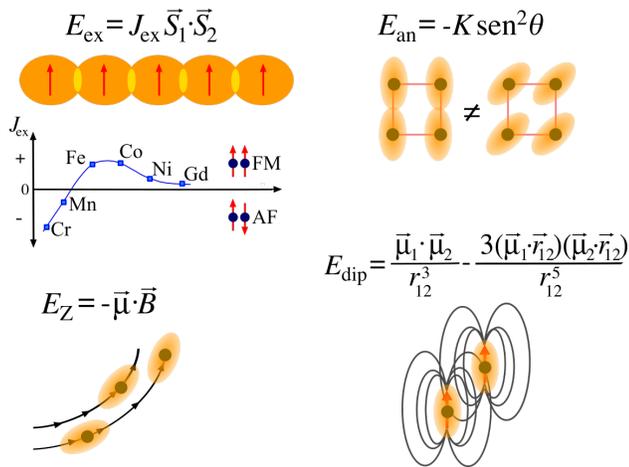


Figura 5. Representación esquemática de las principales interacciones que llevan al magnetismo de un material.

En realidad, los dominios magnéticos presentes en los materiales son originados debido a que el sistema trata de minimizar la energía total, principalmente por la competencia entre la energía de intercambio que trata de alinear a los espines y la energía magnetostática que trata de evitar la aparición de polos magnéticos en la superficie.

III NANOESTRUCTURAS MAGNÉTICAS

Una de las aplicaciones de la existencia de los dominios magnéticos es la grabación magnética. El medio en que queremos grabar la información, ya sea disco, cinta o tarjeta, está constituido por un material soporte (un sustrato de plástico, vidrio o aluminio) sobre el que se fija el material magnético (por ejemplo en forma de polvo como el CrFe_2O_3 , o en películas amorfas como el CoCrPtB). Sobre este material se mueve un cabezal de lectura y escritura como se muestra en la Figura 6a. Este cabezal genera un campo magnético suficientemente intenso como para magnetizar una región de dicho medio en una dirección. La información queda grabada secuencialmente en forma binaria, con los bits uno y cero guardados como porciones del material magnetizado en una dirección y en la contraria, respectivamente [6].

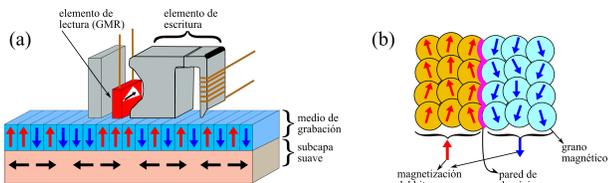


Figura 6. Representación esquemática de (a) la grabación magnética, y (b) la distribución de los momentos magnéticos en un bit de información.

Debido a la interacción de acoplamiento entre los diferentes granos (regiones que poseen un solo dominio magnético) no es nula, si se invierte la magnetización para escribir un bit, los

granos vecinos seguirán también esta inversión (ver Figura 6b) y por tanto existe una región de transición que separa dos bits distintos. Es decir, actualmente un bit corresponde a un número grande de granos magnéticos. En la grabación convencional el bit es almacenado en aproximadamente 5 granos magnéticos, cada uno de un tamaño promedio de 7 nm, o sea actualmente un bit de información almacenada en el medio magnético corresponde a un tamaño del orden de 35 nm que lleva a una densidad de almacenamiento de 500 Gb/pie².

III.1 Superparamagnetismo

Para aumentar la densidad de grabación, se debería disminuir el tamaño de los granos magnéticos. Esto está limitado, en parte, por la pérdida de estabilidad magnética debido a las fluctuaciones térmicas, un efecto conocido con el nombre de superparamagnetismo [7]. La estabilidad de los granos magnéticos se debe a que para invertir la magnetización es necesario superar una barrera de energía cuyo valor es $\Delta E = KV$, siendo K la constante de anisotropía magnética del material y V el volumen de la partícula (Figura 7). Lógicamente, cuanto menor sea el volumen de la partícula, menor será esta barrera de energía, y resultará más fácil que la magnetización se invierta de manera espontánea debido a las fluctuaciones térmicas, que son del orden de $E_T = k_B T$ (k_B es la constante de Boltzmann, y T la temperatura del material) y por tanto independientes del volumen. Esto implica que para cada material magnético hay un tamaño límite por debajo del cual, a temperatura ambiente, no es posible utilizarlo como memoria.

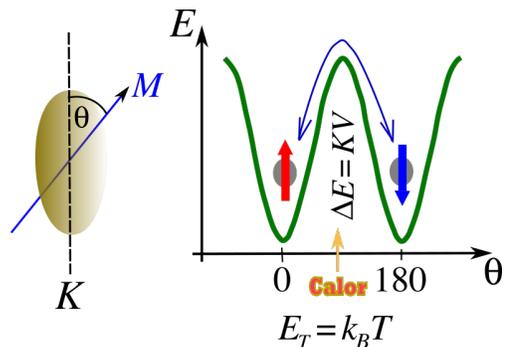


Figura 7. Energía como función del ángulo que hace la magnetización de la nanopartícula con el eje de anisotropía.

El tiempo de relajación para invertir espontáneamente su magnetización por efecto de estas fluctuaciones térmicas sigue la ley de Arrhenius, $\tau = \tau_0 \exp(\Delta E/E_T)$, es decir depende en forma exponencial del volumen de la partícula. Así, si tenemos por ejemplo una nanosfera de hierro de radio 14 nm, el tiempo en que la magnetización se invierta sería de 41 horas, mientras que si reducimos su radio a 12 nm, el tiempo medio de inversión sería del orden de un segundo. Para seguir aumentando la densidad de grabación, se necesita encontrar maneras de empaquetar tantos bits como sea posible mientras se asegure la estabilidad de los datos guardados. Actualmente se exploran diferentes posibles

soluciones, como por ejemplo los soportes magnéticos discretos (patterned media en inglés), multicapas, grabación en diferentes tipos de moléculas o de agregados atómicos (magnetismo molecular), entre otros.

III.2 Soportes magnéticos discretos

Los soportes magnéticos discretos, o medios pre-diseñados, son un arreglo regular de nanopartículas magnéticas que incluyen diferentes geometrías como cuadrados, rectángulos, discos circulares, conos, anillos, entre otras (Figura 8). La idea, desde un punto de vista de la grabación magnética, es la de utilizar una única partícula para cada bit. Esto permitiría no solamente aumentar la densidad de grabación disminuyendo el tamaño del bit sino también reducir el ruido estadístico que se produce en los medios granulares.

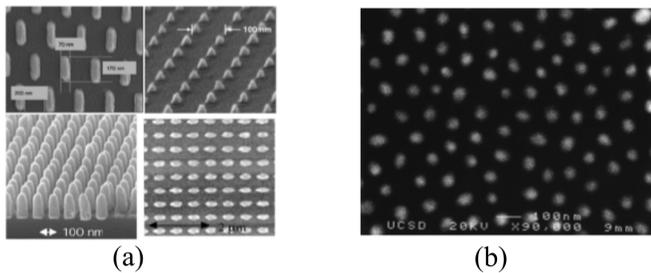


Figura 8. Ejemplos de arreglos de nanopartículas magnéticas con diferente geometría. (a) Rectangulares, pirámides, pilares, elipses (basado en la referencia [8]). (b) Discos circulares de espesor 20 nm y diámetro medio de 65 nm (basado en la referencia [9]).

Estas estructuras, al ser su tamaño comparable a la de la pared de dominio, no se dividen en dominios magnéticos sino que permanecen como monodominios. Sus estados magnéticos son variados dependiendo de la forma y del tamaño, debido principalmente a la interacción dipolar. Por ejemplo, los discos circulares de espesor 20 nm y diámetro mayor que 60 nm, forman estados de vórtices (ver Figura 9a) donde los momentos magnéticos forman un círculo que radica en el plano con la presencia de una singularidad en el centro (núcleo magnético) en el cual los momentos magnéticos salen del plano.

El tamaño del núcleo magnético es del orden de 14 nm cuando el diámetro del nanocilindro es de 65 nm. La inversión magnética de estos nanocilindros se efectúa mediante la nucleación y aniquilación del vórtice, el cual se desplaza a través de la nanoestructura mientras se realiza el ciclo de histéresis (Figura 9b). La energía que se necesita para desplazar el vórtice desde el centro de la estructura es grande y por esta razón el ciclo de histéresis es más angosta en su parte central (Figura 9c), una característica que no poseen los sistemas macroscópicos. La singularidad en el centro del vórtice desestabiliza el estado de vórtice de discos circulares más pequeños que 60 nm, los cuales invierten su magnetización en forma coherente (todos los momentos magnéticos alineados entre sí).

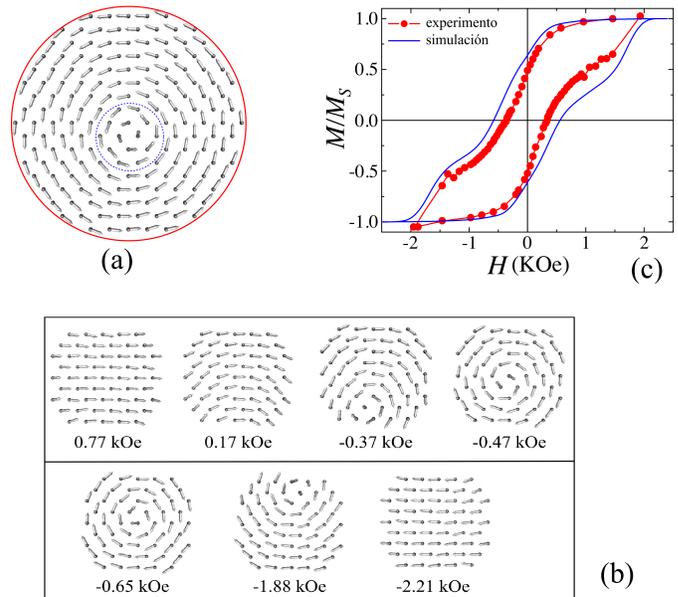


Figura 9. (a) Estado magnético en nanocilindros: vórtice más núcleo. (b) Mecanismo de inversión magnética. (c) Ciclo de histéresis (referencia [10]).

El obstáculo fundamental de las singularidades en los nanocilindros se puede remover en nanoestructuras magnéticas en forma de anillos (Figura 10a). En estas estructuras el estado es verdaderamente un vórtice sin la presencia del núcleo magnético (Figura 10b), pero además pueden aparecer otros estados magnéticos únicos como la presencia de dos vórtices de la misma o diferente quiralidad [11], como se puede apreciar en la Figura 10c. Cada nanoanillo tiene entonces un gran potencial de ser usado como medio de grabación con uno o más bits magnéticos.

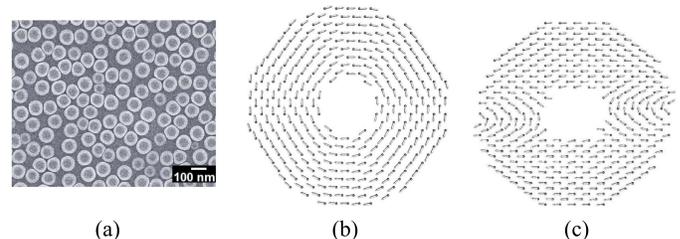


Figura 10. (a) nanoanillos de cobalto [12]. (b) Estado de vórtice en un nanoanillo [13]. (c) Dominios en un nanoanillo [13].

III.3 Multicapas Magnéticas

Otra manera de disminuir los efectos del superparamagnetismo es utilizando el acoplamiento de intercambio entre una estructura ferromagnética y un sustrato antiferromagnético [14], como se esquematiza en la Figura 11a. En esta estructura aparece el fenómeno conocido como exchange bias (EB). El EB fue descubierto por Meiklejohn y Bean en 1956 [15] y su mecanismo físico todavía no está muy bien entendido. El principal rasgo del EB es el desplazamiento del centro del ciclo de

histéresis a campos magnéticos negativos (EB negativo) o a campos positivos (EB positivo), como se muestra en la Figura 11b [16]. Una explicación simplificada del fenómeno de EB es que la presencia del AF induce una anisotropía unidireccional (en un solo sentido) que retarda la inversión en la dirección opuesta del sentido de la anisotropía. Debido a este acoplamiento la barrera de energía entre las dos direcciones estables de una nanopartícula es aumentada y por consiguiente la inversión espontánea de la magnetización aumenta con respecto a la misma nanopartícula si estuviera aislada [17]. En la Figura 11c se muestra este aumento del tiempo de relajación para una partícula de hierro acoplado a un sustrato FeF_2 , para diferentes tamaños de la partícula y diferentes temperaturas. En realidad, recientemente se ha introducido en los medios de grabación una capa de CoCrPtB de 3 nm junto a una delgadísima capa de Ru de 0.8 nm que se acopla antiferromagnéticamente con el medio de grabación (Figura 11d).

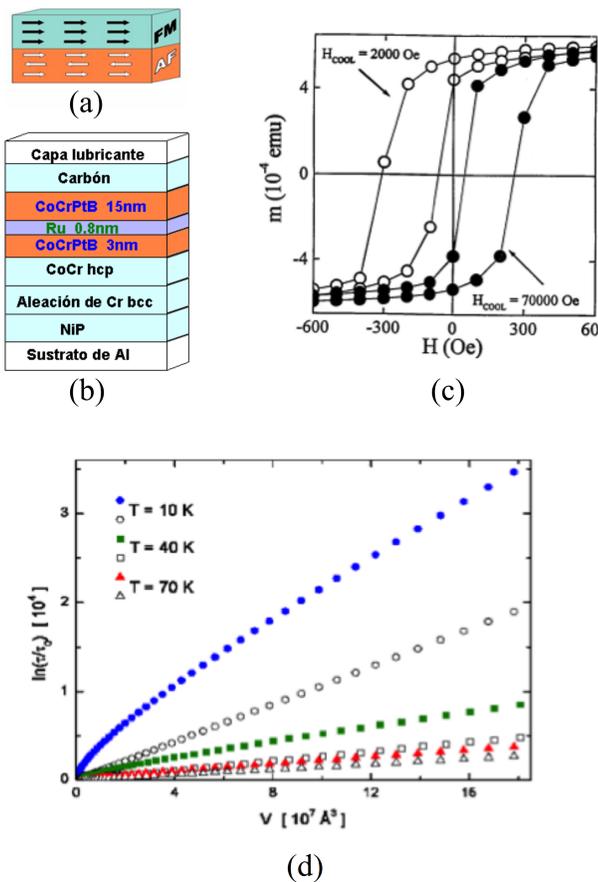


Figura 11. (a) Representación esquemática de una bicapa FM/AF. (b) Esquematización de una multicapa utilizada como medio de grabación. (c) Dependencia del tiempo de relajación como función del volumen de las nanopartículas en un sistema con exchange bias. Los puntos cerrados corresponden al sistema con EB y los puntos abiertos a sus correspondientes sistemas sin acoplamiento de EB [14]. (d) Ciclos de histéresis para diferentes campos de enfriamiento [16].

Otro rasgo de sistemas con exchange bias es la asimetría que existe en los modos de inversión durante el ciclo de histéresis. A diferencia de los sistemas ferromagnéticos, en donde el modo de inversión magnética es el mismo en las dos ramas que componen el ciclo de histéresis, en sistemas con

anisotropía de intercambio son diferentes. Por ejemplo en nanocilindros magnéticos, la inversión en una de las ramas es por medio de la nucleación de un vórtice, mientras que en la otra rama es por medio de una rotación coherente de los espines [17], como se muestra en la Figura 12.

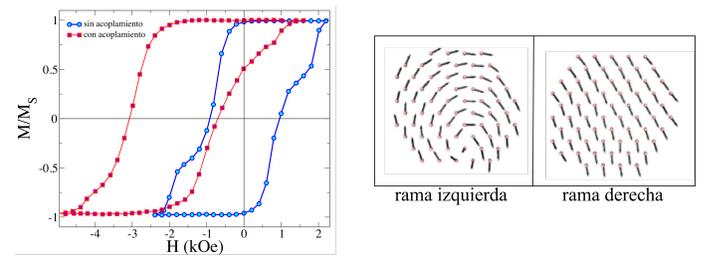


Figura 12. Ciclo de histéresis de un nanocilindro magnético con y sin acoplamiento de intercambio y sus modos de inversión [17].

El fenómeno de EB se utiliza también en los cabezales de lectura mostrada esquemáticamente en la Figura 13a, donde se muestra las capas AF y FM que están acopladas. Estos cabezales pueden diferenciar las transiciones magnéticas usando el principio de la magnetorresistencia gigante (GMR por sus siglas en inglés Giant Magneto Resistance) descubierto en 1988 por Grünberg y Fert [18, 19], quienes fueron galardonados con el premio Nobel de Física en el 2007 por sus trabajos en GMR.

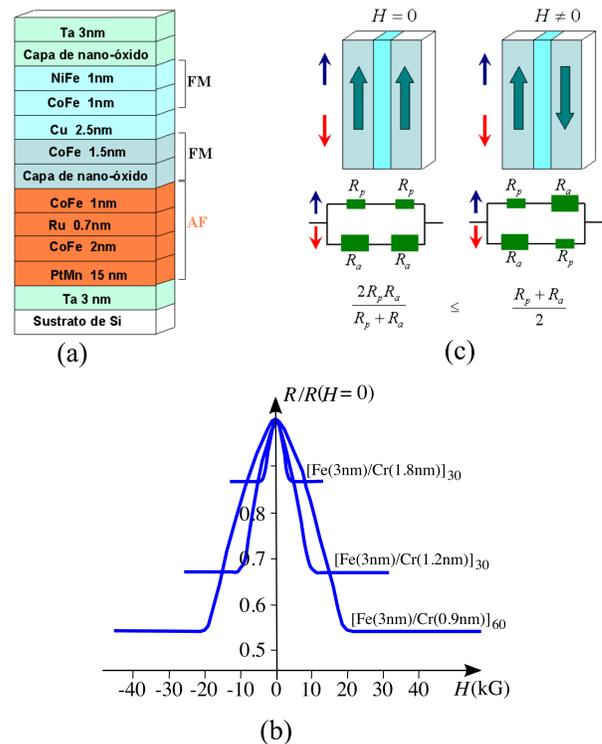


Figura 13. (a) Esquematización de una válvula de espín. (b) GMR como función del campo aplicado [18]. (c) Explicación del efecto GMR en la válvula de espín.

En este tipo de sensores, denominados válvulas de espín, se observa que cuando las capas magnéticamente activas se alinean en forma antiparalela la resistencia es alta y que disminuye rápidamente cuando el alineamiento es paralelo (ver Figura 13b). La explicación más aceptada

para comprender este fenómeno se conoce como colisión dependiente de espín y se basa en el hecho de si el espín coincide con la dirección de la magnetización del material, el electrón sufrirá menos dispersión (interacciones con el material que le desvían de su trayectoria), y tendrá una menor resistencia al atravesarlo, mientras que si la alineación es contraria, ocurrirá lo opuesto: mayor cantidad de interacciones, y mayor resistencia a que el electrón atraviese la lámina ferromagnética (Figura 13c). Es decir la resistencia del material depende de la diferencia entre las resistencias paralela y antiparalela de los espines.

III.4 Magnetismo en agregados atómicos

El magnetismo en agregados atómicos describe fenómenos magnéticos encontrados en sistemas al nivel nanoscópico que son heterogéneos en las tres dimensiones espaciales. El carácter magnético de estos agregados depende de las propiedades individuales como también de las interacciones entre ellos que determinan el tipo de ordenamiento del sistema que puede ser de corto o largo alcance o aleatorio. Una complejidad adicional viene desde la naturaleza del espacio entre los átomos que componen el agregado. El interespacio puede estar constituido de ligandos orgánicos (como polímeros), de una matriz conductora o aislante, o del vacío. Todos estos factores determinan las respuestas magnéticas y las propiedades de transporte del sistema.

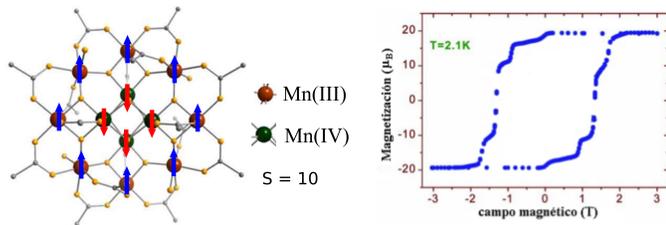


Figura 14. Cluster magnético y ciclo de histéresis en el acetato de Mn_{12} [20].

El estudio y la aplicación de agregados magnéticos son de gran valor desde un punto de vista de la ciencia básica y de las aplicaciones tecnológicas. Para la física básica proporcionan medios para la comprensión de los efectos de nano-estructuración, del acoplamiento magnético y de las correlaciones estáticas y dinámicas. Tecnológicamente, los agregados magnéticos pueden ser utilizados en medios de grabación, imanes ultra fuertes para motores altamente eficientes, sensores multifuncionales, farmacología, protocolos de tratamientos médicos, entre otras. Un ejemplo de los nuevos fenómenos magnético que puede aparecer en los agregados lo constituyen los imanes moleculares como el acetato de Mn_{12} , cuya fórmula química es $Mn_{12}O_{12}(CH_3CO_2)_{16}(H_2O)_4$ (Figura 14). Los iones del centro magnético poseen un espín total grande igual a $10 \mu_B$ y son magnéticamente biestables a bajas temperaturas [20] y exhiben propiedades que se encuentran en el borde entre el magnetismo clásico y cuántico. Específicamente, la relajación magnética procede por inversión de espín a través de excitaciones térmicas sobre la barrera de energía

anisotrópica y/o por tunelamiento cuántico a través de la barrera de potencial. Bajo la temperatura de bloqueo, $T_B = 3$ K, una serie de pasos aparece en la magnetización (Figura 14) que indica una relajación aumentada de la magnetización por tunelamiento cuando coinciden el valor de los niveles energéticos en los lados opuestos de la barrera.

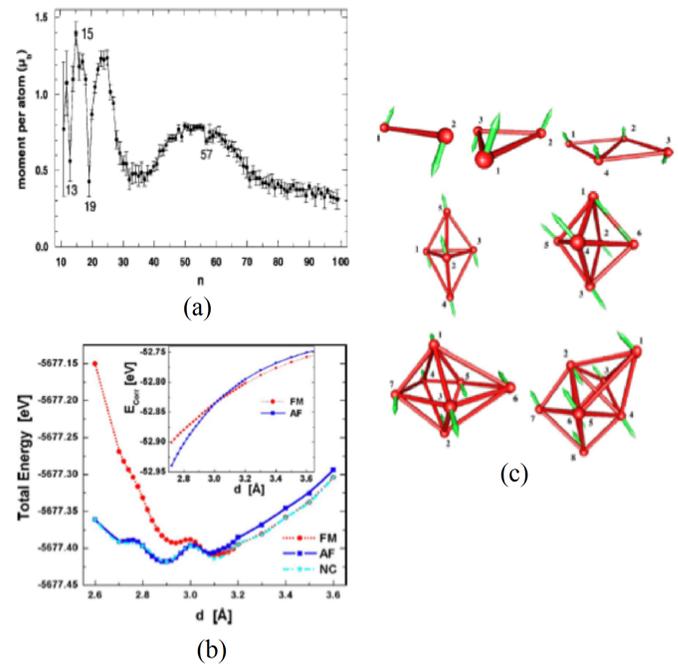


Figura 15. (a) Dependencia con el tamaño de cúmulos de Mn [21]. (b) Energía de los estados FM y AF como función de la distancia de separación de los átomos del dímero Mn_2 [22]. (c) Clusters de Mn hasta $n = 8$ obtenidos por cálculos ab-initio [22].

Las propiedades magnéticas en agregados atómicos pueden cambiar con el número de átomos que lo constituyen. Por ejemplo, la dependencia del momento magnético en clusters de Mn con el tamaño del sistema es una función no monótona como se muestra en la Figura 15a [21]. Este comportamiento se debe a que sus propiedades magnéticas son dominadas por frustración de los espines debido a la presencia de diferentes constantes de acoplamiento espín-espín (Figura 15b), el cual lleva a un magnetismo no colineal y a la formación de nanodominios [22], como se muestra en la Figura 15c. Además para $n > 40$, existe una relación entre estructura y magnetismo debido a que su estructura geométrica empieza a tener señales de la estructura α -Mn del bulto y que todavía existe un acoplamiento ferromagnético. En consecuencia existe una competencia entre la energía de cohesión y la energía magnética.

IV CONCLUSIONES

En este reporte se ha tratado de mostrar que el campo del nanomagnetismo es muy diverso e importante no solamente desde el punto de vista de la ciencia básica sino también desde un punto de vista de las aplicaciones tecnológicas. El avance en este campo tiene muchos desafíos por delante en la comprensión de los efectos que aparecen en la creación y exploración de las nanoestructuras magnéticas. Para

lograr este entendimiento se requiere de la participación no solamente de la comunidad experimental sino también de la comunidad teórica para poder simular el comportamiento complejo que aparece a escalas nanométricas. Entre estos desafíos están: el entendimiento de la dinámica y de los estados de equilibrio del espín en los límites espaciales y temporales de interés, el entendimiento de los fenómenos de transporte del espín, el entendimiento de las relaciones existentes entre estructura y magnetismo y las reglas que gobiernan la autoorganización, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

JML agradece el soporte del proyecto Fondecyt 1130672 y el Financiamiento basal para centros científicos y tecnológicos de excelencia FB 0807. Nuestros profundos agradecimientos a Mg. Karina Alvarez por las discusiones en la preparación de este manuscrito.

REFERENCES

[1] M. Kerker, *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*, (Academic Press, New York, 1969).

[2] J. A. A. Perenboom, P. Wyder, y F. Meier, *Phys. Rep.* 78, 173 (1981).

[3] K. Chatterjee, S. Banerjee, y D. Chakravorty, *Europhys. Lett.* 66, 592 (2004).

[4] M. Paradise, y T. Goswami, *Materials and Design* 28, 1477 (2007).

[5] S. Chiczumi, *Physics of Ferromagnetism*, (Oxford University Press, New Cork, 1997).

[6] F. Luis, J. Bartolomé, J. Tejada, y E. Martinez, *J. Mag. Mag. Mater.* 157/158, 266 (1996).

[7] L. Neel, *Rev. Mod. Phys.* 25, 293 (1953).

[8] C.A. Ross, *Annu. Rev. Mater. Res.* 31, 203 (2001).

[9] C. P. Li, I. V. Roshchin, X. Batlle, M. Viret, F. Ott, y I. K. Schuller, *J. Appl. Phys.* 100, 074318 (2006).

[10] J. Mejía-López, D. Altbir, A. H. Romero, X. Batlle, I. V. Roshchin, CP. Li, y I. K. Schuller, *J. Appl. Phys.* 100, 104319 (2006).

[11] F. Q. Zhu, G. W. Chern, O. Tchernyshyov, X. C. Zhu, J. G. Zhu, y C.-L. Chien, *Phys. Rev. Lett.* 96, 027205 (2006).

[12] F. Q. Zhu, D. Fan, X. Zhu, J.-G. Zhu, R. C. Cammarata, y C.-L. Chien, *Adv. Mater.* 16, 2155 (2004).

[13] J.F. Aguiló, "Estudio de propiedades magnéticas de nanoanillos por medio de simulaciones de Monte Carlo", tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2006.

[14] J. Mejía-López, D. Altbir, y I. K. Schuller, *Appl. Phys. Lett.* 83, 332 (2003).

[15] W. P. Meiklejohn, y C. P. Bean, *Phys. Rev.* 105, 904 (1957).

[16] J. Nogues, D. Lederman, T. J. Moran, y I. K. Schuller, *Phys. Rev. Lett.* 76, 4624 (1996).

[17] J. Mejía-López, P. Soto, y D. Altbir, *Phys. Rev. B* 71, 104422 (2005).

[18] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen van Dau, F. Petroff, P. Eitenne, G. Creuzet, A. Friederich, y J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* 61, 2472 (1988).

[19] G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, y W. Zinn, *Phys. Rev. B* 39, 4828 (1989).

[20] R. Sessoli, D. Gatteschi, A. Caneschi, y M. A. Novak, *Nature* 365, 141 (1993).

[21] M. B. Knickelbein, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5255 (2001).

[22] J. Mejía-López, A. H. Romero, M. E. Garcia, J. L. Morán-López, *Phys. Rev. B* 74, 140405 (2006).