

## EL EFECTO TÚNEL RESONANTE DE LA MAGNETIZACIÓN A ESCALA MACROSCÓPICA ABRE LAS PUERTAS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

*E. del Barco, J.M. Hernandez, R.F. Ziolo y J. Tejada*

*Laboratorio de Investigación en Magnetismo UBX (Universidad de Barcelona - Xerox)*

Los ordenadores actuales utilizan la lógica binaria en el tratamiento y almacenaje de información. A este tipo de ordenador lo llamaremos *ordenador clásico*. La lógica binaria se caracteriza por usar únicamente dos estados independientes para formar su base de operaciones. Estos dos estados son comúnmente representados por el 1 y el 0, y soportan la unidad básica de información, denominada *bit*. Este *bit* de información puede ser físicamente sostenido de diversas maneras. En los comienzos de la informática, las rudimentarias máquinas de cálculo utilizaban tiras de papel o tarjetas agujereadas de forma que un lector mecánico podía distinguir entre un agujero o un espacio sin agujerear al leer el correspondiente trozo de la tarjeta. El espacio donde se grababa un agujero correspondía a un *bit* de información. Si había agujero, el *bit* era un 1, si no, un 0. Estos antiguos *bits* ocupaban varios milímetros en el papel. Con el avance de la tecnología, los sistemas de almacenamiento de información han ido evolucionando paralelamente a los sistemas de lectura de información y a las exigencias de los programas informáticos, cada vez más complejos. Ahora la información se almacena en discos ópticos o magnéticos, donde se pueden llegar a almacenar miles de millones de bits en el espacio que ocupaba uno de los antiguos. Lo más sorprendente de todo es que esta progresión ha sido verdaderamente rápida, tan solo se han invertido treinta años de investigación.

### ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN

En los discos ópticos un *bit* es soportado en un espacio ínfimo del sustrato del disco. Sucesiones interminables de agujeritos y espacios opacos pueden ser leídos por el haz láser del lector. En la actualidad un *bit* «óptico» puede ocupar tan solo unos pocos angstroms ya que se pueden manipular las superficies de los materiales a escala microscópica. El problema de hacer trabajar a un ordenador con este tipo de almacenamiento óptico reside en que, si bien la capacidad de almacenamiento es ingente, la información no puede ser transformada. Una vez grabados los datos ya no pueden ser borrados ni cambiados, ya que hemos manipulado la superficie del disco óptico. Las tareas que realiza un ordenador requieren que la información sea manipulable. Que se puedan borrar, grabar y cambiar los datos a conveniencia de los programas que se utilicen

en cada momento. Por ello, el sustrato base de los *bits* de información utilizado por los ordenadores en el almacenamiento de datos es magnético. Los discos y las cintas de grabación magnética constan de partículas magnéticas pequeñas. La magnetización de una partícula magnética puede tomar dos direcciones opuestas a lo largo del denominado *eje de fácil imanación* o *eje de anisotropía magnética*. Dependiendo de si el momento magnético de la partícula está orientado hacia arriba o hacia abajo tendremos el *bit* 1 o 0. Así pues, tenemos un sustrato para el almacenamiento de información fácilmente manipulable desde el exterior.

### PÉRDIDA DE LA INFORMACIÓN POR EFECTO DE LA TEMPERATURA

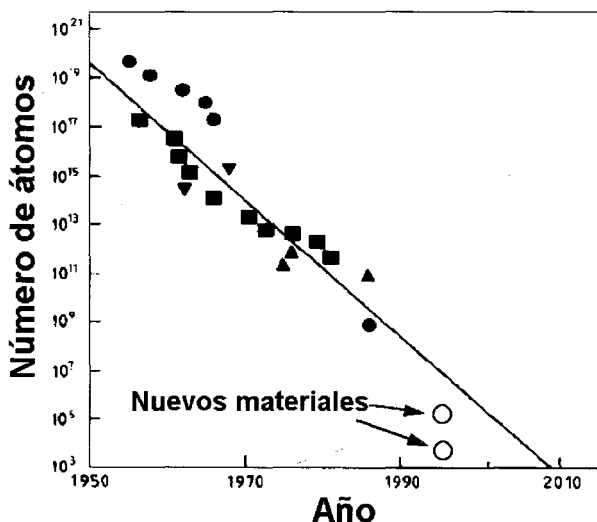
Existe, sin embargo, un problema en la utilización de partículas magnéticas para el almacenamiento de datos; la pérdida de información. El momento magnético de las partículas puede girar por efecto de la temperatura y cambiar de sentido en su eje de anisotropía. De esta manera, si una partícula tenía el momento magnético hacia arriba y representaba un 1, al cambiar el sentido se convertirá en un 0, perdiéndose la información que portaba. Según las leyes clásicas de la física, este giro no puede

*Para que quepa más información en un disco de memoria solo hay que disminuir el tamaño de las partículas magnéticas, pero entonces la información puede perderse más fácilmente con menos temperatura*

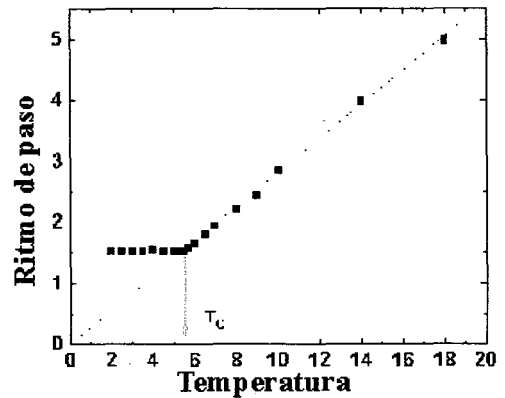
darse sin un aporte energético que haga vencer la barrera de energía que siente el momento magnético para salir de su eje de anisotropía y darse la vuelta. La temperatura aporta la energía necesaria para que el giro se produzca y

la información se pierda. Por este motivo la calidad de la grabación magnética se va deteriorando con el transcurso del tiempo, suceso que no acontece con el almacenamiento óptico de información. De ahí que la calidad de un disco compacto de música (CD) se mantenga por siempre y una casete vaya perdiendo la calidad del sonido con el tiempo.

La energía que hay que proporcionar a una partícula magnética para que varíe su magnetización es menor cuanto menor sea el volumen de la partícula. Este hecho juega un importante papel práctico en los intentos de aumentar la capacidad de almacenamiento en el menor espacio físico posible. Para que quepa más información en un disco de memoria solo hay que disminuir el tamaño de las partículas magnéticas, pero entonces la información puede perderse más fácilmente con menos temperatura. Según una previsión hecha por investigadores de IBM se calculó que la capacidad de almacenamiento aumentaría de forma que en el año 2010 podríamos conseguir partículas tan pequeñas que contuvieran del orden de tan solo  $10^3$  átomos (ver gráfica 1). Para no perder la información almacenada se conjeturó que esas partículas deberían ser enfriadas hasta cerca de 4.2 grados kelvin ( $-270^{\circ}\text{C}$ ), hecho posible, aunque costoso. En 1995, el grupo de investigación del Doctor Tejada de la Universidad de Barcelona, en colaboración con Ronald Ziolo, de la Xerox Corporation de Nueva York, descubrieron partículas de gran anisotropía que adelantaban la conjetura de IBM 15 años creando partículas con sólo unos pocos millares de átomos. Además se mejoraron las expectativas puesto que dichas partículas, debido a su alta anisotropía, conservaban su magnetización a temperatura ambiente y no se necesitaba enfriar la muestra para preservar la información.



**Figura 1:** Las expectativas de la IBM apuntaban al año 2010 como fecha para conseguir partículas con un número aproximado de 1000 átomos magnéticos. Estos materiales han sido desarrollados en realidad 15 años antes de lo previsto y mantienen su magnetización a temperatura ambiente.



**Figura 2:** El ritmo de paso entre una y otra orientación del momento magnético de una partícula se hace independiente de la temperatura por debajo de cierta temperatura crítica. El paso se produce por efecto túnel sin gasto de energía.

## PÉRDIDA «CUÁNTICA» DE LA INFORMACIÓN: EFECTO TÚNEL

Todo hace pensar que podríamos conseguir trabajar con partículas tan pequeñas como queramos, simplemente debemos bajar la temperatura a medida que disminuimos el tamaño de las mismas. Sin embargo las leyes de la física clásica dejan de ser efectivas a esta escala de tamaños tan reducida en favor de las leyes de la física cuántica. Es conocido desde principios de siglo que la energía de un sistema cuántico está cuantizada. Es decir, no todos los estados de energía son posibles. El momento magnético de la partícula puede girar su orientación saltando por encima de la barrera de anisotropía pero en su giro no puede adoptar todas las orientaciones posibles sino sólo aquellas que correspondan a las energías permitidas. Tenemos pues una discretización de los niveles de energía correspondientes a las posibles orientaciones del momento magnético respecto al eje de anisotropía de la partícula. Esto no tendría que suponer ningún impedimento en nuestro objetivo de preservar la magnetización de la partícula bajando la temperatura del sistema, pues aunque el momento magnético sólo tuviera la posibilidad de adoptar ciertas orientaciones en su giro, seguiría necesitando energía térmica para saltar por encima de la barrera de anisotropía. Así que pese a tal cuantización podríamos preservar la información simplemente manteniendo baja la temperatura.

Si estudiamos el comportamiento del ritmo de paso de la barrera en función de la temperatura, esperaríamos encontrar un descenso de este ritmo a medida que disminuimos la temperatura del sistema. Cuando la temperatura fuese nula ( $-273$  Kelvin) el ritmo debería ser nulo, puesto que las partículas no dispondrían de energía alguna para girar su magnetización. Sin embargo se ha observado experimentalmente que esto no ocurre exactamente. Llega un momento en el que por debajo de una cierta temperatura el ritmo de paso se mantiene constante (gráfica 2). Este

fenómeno cuántico se denomina *efecto túnel* y significa que la magnetización de una partícula se perderá irrevocablemente aunque no haya energía térmica que lo produzca. ¿Quiere esto decir que no podremos aumentar la capacidad de almacenamiento de nuestros futuros ordenadores por debajo de cierto límite de tamaño de las partículas magnéticas? ¿Acabaremos por perder la memoria de nuestro ordenador aunque lo mantengamos aislado de toda energía posible?

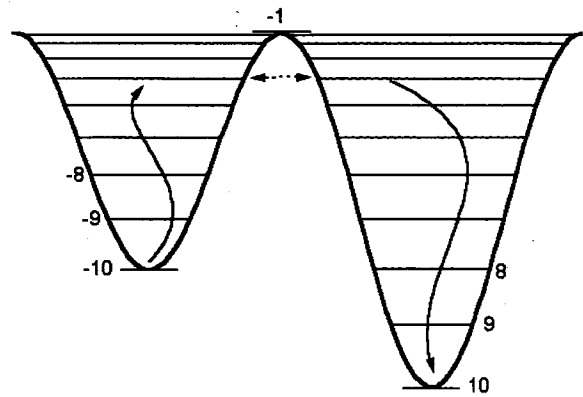
Sí. La respuesta es sí para un ordenador *clásico*. Sin embargo nos hemos dado cuenta de que este fenómeno puede ser utilizado en nuestro provecho. El efecto túnel es debido a la superposición de los niveles de energía correspondientes a las orientaciones opuestas del momento magnético que se hallan separados por la barrera de energía. No tenemos dos niveles diferentes u opuestos sino una superposición de ambos. Cuando hacemos una medida tenemos la misma probabilidad de encontrar el sistema en cada uno de los dos niveles, esto es lo que hace que se atraviese la barrera sin la energía necesaria, de ahí la denominación de efecto túnel.

### EL EFECTO TÚNEL RESONANTE

Estudios más avanzados de este fenómeno nos llevaron a descubrir el efecto túnel resonante que confirmaban la teoría cuántica de que el efecto túnel es debido a la superposición de niveles de orientación opuesta del momento magnético de una partícula. Estos estudios se desarrollaron sobre moléculas orgánicas que tenían un corazón magnético y disponían de la peculiaridad de ser todas idénticas entre sí. Esto hacía que se comportasen todas como una sola, amplificando los fenómenos magnéticos a que daban lugar. Estas moléculas tienen solamente espín 10, lo que les hace tener una corta colección de

*Se sabe que mediante un ordenador que utilice el principio de superposición lineal de la mecánica cuántica, algunos problemas podrían resolverse de una manera mucho más rápida*

orientaciones posibles entre la orientación *arriba* (+10) y *abajo* (-10) pasando por +9, +8, +7, ..., -8, -9. La disposición de todos estos niveles se puede observar en la gráfica 3. Vemos como al aplicar un campo magnético en una de las direcciones del eje de fácil imanación, los niveles correspondientes a esa dirección se ven favorecidos, bajando su energía, en relación a los de orientación opuesta al campo. Cada cierto intervalo de campo magnético aplicado todos los niveles coinciden en energía a uno y otro lado de la



**Figura 3:** Esquema de la discretización de los niveles de energía correspondientes a las posibles direcciones del momento magnético de una molécula de manganeso. Los niveles se desplazan cuando se aplica un campo magnético, cruzándose para ciertos valores de éste.

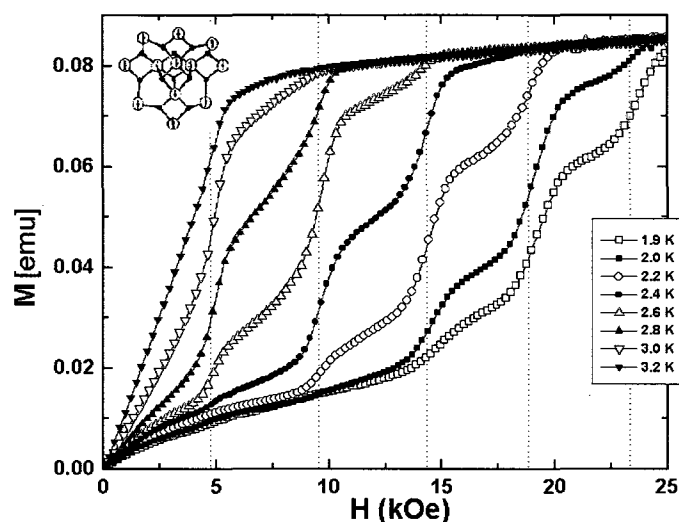
barrera, esto hace que la energía correspondiente a la superposición de estados de magnetización opuesta sea mayor para dichos valores del campo magnético. Esto origina que el paso por efecto túnel se vea favorecido cada vez que los niveles coinciden, ya que la probabilidad de paso por efecto túnel es proporcional a la energía de la superposición de los estados. Este fenómeno se puede observar experimentalmente en la figura 4. Se producen aceleraciones en la rapidez con la que la magnetización camina hacia su estado de equilibrio (magnetización máxima o de saturación) cada vez que se aplica el valor de campo correspondiente a la alineación de los niveles de la orientación del momento magnético. Estos campos están equiespaciados entre sí, tal como prevé la teoría. Esto significa que podemos sintonizar el efecto túnel a nuestra conveniencia.

Este mismo fenómeno lo hemos observado recientemente en partículas mesoscópicas, lo que hace pensar que muy pronto podremos disponer de un substrato magnético cuántico manejable por dispositivos lectores o grabadores de la tecnología actual.

### APLICACIÓN DEL EFECTO TÚNEL AL ORDENADOR CUÁNTICO

Como se ha demostrado experimentalmente, la superposición de los estados también se da en sistemas macroscópicos. Nuestro objetivo es descubrir la coherencia cuántica macroscópica entre los estados superpuestos de la magnetización en este tipo de partículas (figura 5), lo que supondría el punto de partida para el almacenamiento y operatividad del ordenador cuántico. Es decir, necesitamos disponer a las partículas en un estado estacionario en el que se mantenga la superposición.

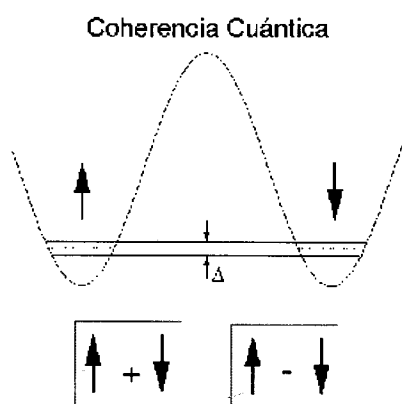
Un ordenador que utilice este tipo de sistemas tendrá que actuar con otro tipo diferente a la lógica binaria



**Figura 4:** Saltos correspondientes a la aceleración por efecto túnel resonante de la magnetización del manganeso en su camino hacia el estado de equilibrio o máxima magnetización.

clásica. Los *bits* ya no son dos (*arriba=1, abajo=0*), ahora tenemos un estado superposición de los anteriores (*arriba±abajo=1±0*). La lógica que se tendrá que utilizar será la *lógica cuántica* y a sus estados se los denomina *qbits*. Desde hace más de diez años se sabe que un ordenador que utilice el principio de superposición lineal de la mecánica cuántica, algunos problemas podrían resolverse de una manera mucho más rápida que con los ordenadores de que disponemos en la actualidad. Además es importante tener en cuenta que estos no tendrían la limitación de tamaño de las partículas magnéticas que limitan a su vez la capacidad de almacenamiento de memoria. Para entender esto de una manera sencilla, uno puede

suponer que un ordenador es un dispositivo que convierte una señal de entrada, *input*, una de salida, *output*, siguiendo determinadas reglas. Si queremos evaluar una función *f* en un ordenador clásico, introducimos un *input*  $x_1$  y obtendremos un *output*  $f(x_1)$  como resultado. Si queremos evaluar otro *input*  $x_2$  nuevamente, tendremos que hacer funcionar otra vez el programa para saber el resultado  $f(x_2)$ , y así sucesivamente. En un ordenador cuántico, sin embargo, podríamos preparar como estado inicial una superposición lineal de los estados  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , ejecutar una sola vez el programa y obtener como resultado una superposición lineal de los estados  $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_N)$ . Esto hace que algunos problemas como la descomposición de un número grande en números primos (codificación de mensajes), la generación de números aleatorios, la simulación de problemas físicos o de ingeniería, la comunicación cuántica entre ordenadores distantes, el envío de información indescifrable, etc, sean resueltos mucho más eficientemente. Se han propuesto varios sistemas físicos que podrían sostener un ordenador de este tipo. Quizás el más viable tecnológicamente tenga que basarse en el almacenamiento magnético en partículas pequeñas que presenten la coherencia de la superposición cuántica de sus estados de magnetización.



**Figura 5:** Esquema de la coherencia cuántica de la superposición de estados de magnetización. Los antiguos estados arriba y abajo se han convertido en los estados arriba+abajo y arriba-abajo. La diferencia de energía  $\Delta$  entre estos últimos está ligada a la probabilidad de que acontezca el efecto túnel.

## REFERENCIAS RECOMENDADAS

### Sobre el Efecto túnel:

- Physical Review **B47**, 14977 (1993).
- Physical Review **B55**, 5858 (1996).
- Physical Review Letters **79**, 1754 (1997).

### Sobre computación cuántica :

- Physical Review Letters, **46**, 1581 (1982).
- Physical Review Letters, **74**, 4091 (1995).