

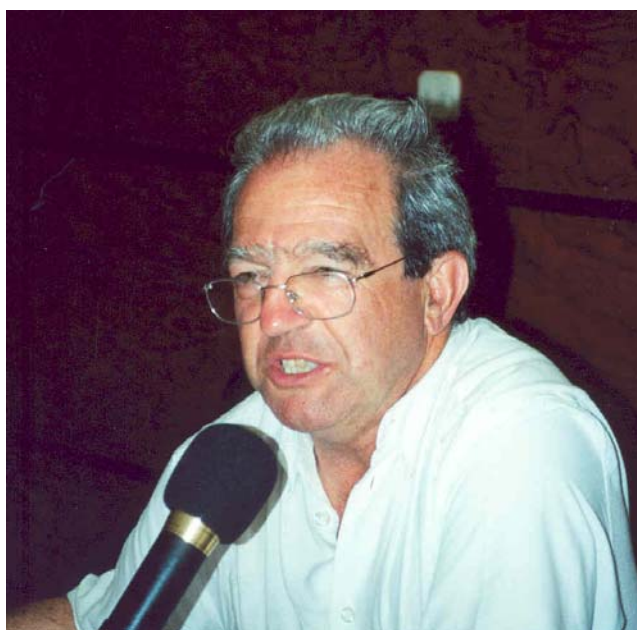
## LA FÍSICA Y LA NANOCIENCIA: AVANCES ACTUALES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

*Arturo M. Baró Vidal*  
*Catedrático de Física de la Materia Condensada*  
*Universidad Autónoma de Madrid*

### **MODELOS *TOP-DOWN*: LA MINIATURIZACIÓN Y LOS CIRCUITOS INTEGRADOS.**

Uno de los avances más importantes de la electrónica ha consistido en la integración de los dispositivos electrónicos. La idea consiste en colocar un mayor número de dispositivos en el mismo espacio, la oblea de Silicio. Esto sólo puede hacerse disminuyendo el tamaño de los dispositivos y de los demás elementos que les acompañan. Por ello aparece la palabra microelectrónica, para indicar que el tamaño está en la escala de la micra.

La evolución de este proceso puede seguirse en una gráfica denominada ley de Moore, que es una línea recta y que indica que cada 18 meses se dobla el número de dispositivos. Actualmente el tamaño está ya por debajo de la micra, más exactamente en el rango de la décima de micra. Otro aspecto importante es que no se han encontrado dificultades serias para que los dispositivos sigan funcionando con arreglo al mismo principio físico. Por supuesto que ha habido que resolver importantes retos tecnológicos, de manera que la tecnología es cada vez más compleja y más cara.



*D. Arturo Baró Vidal*

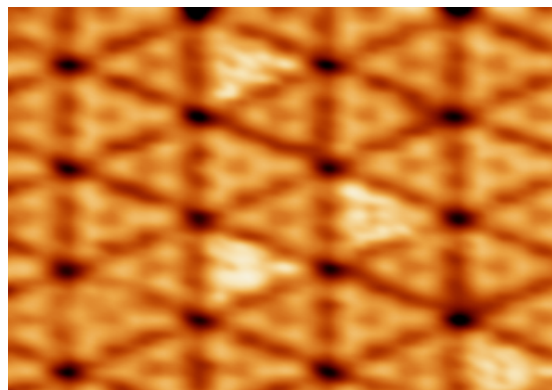
Este proceso se llama miniaturización o también proceso *top-down* y no se sabe hasta dónde puede llegar, o si hay algún límite por debajo del cual, o bien los dispositivos presentan dificultades insalvables, o bien la tecnología no permite fabricar elementos tan extremadamente pequeños.

### **NACIMIENTO DE LA NANOCIENCIA: A) MICROSCOPIOS DE *EFFECTO TÚNEL*. B) MICROSCOPIOS DE *FUERZAS*.**

Con independencia del desarrollo de la microelectrónica, en los años 80 se descubrió un nuevo tipo de microscopio que opera situando una punta sumamente afilada a una distancia de  $\approx 1$  nanómetro de la muestra a examinar. El microscopio es tan estable que puede mantener esta distancia constante

con una precisión de 0.001 nm. Para poder lograr esta precisión el microscopio funciona midiendo la corriente eléctrica, que por efecto túnel, circula a través del vacío que deja la distancia entre punta y muestra. La corriente túnel circula gracias a que para distancias del tamaño de los átomos se aplica la mecánica cuántica, y ésta permite el flujo de corriente por efecto túnel, sin que haya contacto entre punta y muestra. Por ello el microscopio se llama de efecto túnel (STM) (1). Respecto a los microscopios ópticos y electrónicos, el STM se distingue por no tener lentes, lo que elimina uno de los problemas más difíciles. Por el contrario la estabilidad mecánica es mucho más estricta.

Cabe asociar el nacimiento de la Nanociencia a la aparición del STM. Hay que citar también a Feynman y su famosa conferencia “There is plenty of room at the bottom” como precursor. Desde el punto de vista de la microscopía, el STM ha supuesto una gran revolución, ya que ha permitido obtener imágenes de estructuras superficiales en el espacio real, en tres dimensiones y con resolución atómica (Figura 1).



*Figura 1: Imagen típica de estructura superficial obtenida por STM a temperatura ambiente.*

En dicha figura se puede apreciar que el sustrato corresponde a la reconstrucción 7x7 de la cara (111) del Si. La celda unidad está constituida por dos subceldas triangulares que muestran en su interior los átomos de Si característicos de esta reconstrucción. En cuatro de las subceldas triangulares, que se distinguen por aparecer más brillantes, se han adsorbido cuatro átomos de estaño Sn, que se mueven por toda la subcelda. El objeto de este trabajo consiste en medir el movimiento o difusión de los átomos de Sn por la superficie.

La idea de colocar una punta afilada tan cerca de la muestra constituye el nexo común de los llamados microscopios de proximidad. Un ejemplo más de esta idea lo constituye el microscopio de fuerzas atómicas (AFM) (2). En este caso se mide la fuerza entre la punta y la muestra cuando éstas están muy cerca (1-4 nm), para lo que la punta está sujeta a un “cantilever” cuya constante de fuerza es de  $\approx 1$  N/m o sea muy baja, pero al mismo tiempo es suficientemente rígido como para que su frecuencia propia sea de  $\approx 50$  kHz. Con ello se pueden medir fuerzas muy bajas como 100 pN.

El AFM permite medir muestras de carácter aislante, al aire ambiente o incluso en medio líquido (Figura 2).

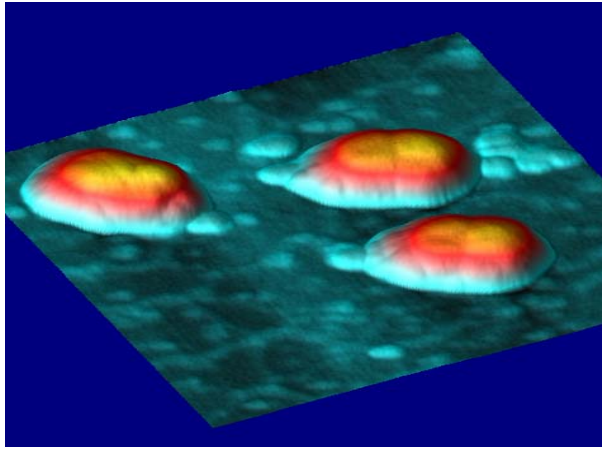


Figura 2

Como microscopio el AFM por sus características es muy competitivo. En efecto, no hay restricciones en cuanto al tipo de muestras, y más aún ya que éstas no requieren una preparación especial. Tampoco se requiere vacío como en los microscopios electrónicos, pudiéndose además trabajar en medio líquido, análogamente a lo que ocurre en el microscopio óptico. Esto convierte al AFM en un instrumento universal y fiable.

### **MODELOS *BOTTOM-UP*: MANIPULACIÓN DE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS**

Lo que permiten los microscopios de proximidad, particularmente el STM, es controlar la materia átomo a átomo (3). Así la punta puede considerarse como una herramienta capaz de tomar un átomo de la superficie y trasladarlo a otro sitio diferente de la misma. Por ejemplo se puede escribir con átomos, como se hizo con el año 2000. Más aún, se puede manipular una molécula y dissociarla. Esto se ha hecho con la molécula de  $O_2$  que por medio de la punta de un STM se ha dissociado en sus dos átomos componentes. También se ha hecho con la molécula de benceno  $C_6H_6$ , rompiendo en este caso uno de los enlaces C-H (4).

También podemos pensar en el proceso inverso, o sea, juntar átomos y combinarlos para formar una molécula. Si dejamos volar nuestra imaginación, cualquier proceso que se nos ocurra quizás también será posible.

Esto es lo que se llama proceso *bottom-up*, es decir que en lugar de miniaturizar lo grande, lo que se trata es de empezar con las unidades básicas, los átomos, y construir hacia arriba hasta alcanzar la escala microscópica.

Durante cientos de millones de años, la naturaleza ha juntado proteínas y otras moléculas biológicas para construir una gran variedad de máquinas moleculares. La célula es el ejemplo último del procesado de la materia empezando desde la escala nanométrica.

De lo dicho hasta ahora se deduce que la nanociencia constituye un campo multidisciplinar. El proceso *top-down* es el que siguen los físicos de estado sólido, mediante el cual estructuras semiconductoras se hacen más y más pequeños. El proceso *bottom-up* es practicado por los químicos y los biólogos moleculares, para formar estructuras mayores a partir de los átomos y las moléculas.

### **LA NANOMECAÁNICA**

Para poder juntar átomos y moléculas es importante conocer y medir las interacciones intermoleculares e intramoleculares. Esto no es fácil, pero una manera de hacerlo es usando el AFM. La medida de las fuerzas a esta escala constituye una rama importante que se llama nanomecánica, ya que una de las magnitudes más importantes en mecánica es la fuerza.

Las proteínas adquieren sus funciones únicas a través de los plegamientos específicos de sus cadenas polipéptidas. Las propiedades mecánicas de las proteínas son desconocidas y lo que hay que hacer es medir la fuerza necesaria para plegarlas. Esta es una de las posibilidades del AFM y se suele denominar espectroscopia de fuerzas de una sola molécula.

Un ejemplo de esta medida se ha realizado con una molécula de titina cuyas propiedades mecánicas son esenciales para su función biológica. La molécula fue extendida midiendo al mismo tiempo la fuerza necesaria para provocar esta extensión. Se observó una curva en forma de diente de sierra, cuyo período estaba entre 25 y 28 nm. La fuerza variaba entre 150 y 300 pN. Las discontinuidades reflejadas por la forma en diente de sierra pueden atribuirse a los plegamientos individuales de la proteína (5).

En otro experimento se ha podido medir la fuerza de ruptura de un enlace covalente aislado. Utilizando diferentes estrategias se encontró que el enlace silicio-carbono se rompía a  $2.0 \pm 0.3$  nanonewtons, mientras que el enlace oro-azufre lo hacía a una fuerza de  $1.4 \pm 0.3$  nanonewtons (6).

## NUEVOS MATERIALES Y DISPOSITIVOS FUNCIONALES

Existen efectivamente materiales cuyo tamaño es del orden de un nanómetro, y además tienen propiedades especiales. Desde el punto de vista de la física básica, aparecen efectos cuánticos siendo dominantes, la termodinámica se altera y la reactividad química se modifica. La superficie gana importancia cuanto más pequeño se hace el material.



*Ponentes y moderadores del Seminario-debate sobre Nanociencia y Nanotecnología celebrado en la UAM en junio de 2002. De izquierda a derecha: Pedro Serena, Jesús Lizcano, Arturo Baró, Tomás Torres, Ana Dopazo, Keith Harshman y Roberto Marco.*

Como ejemplos de estos materiales, están los nanocristales, que son agregados de unos cientos o miles de átomos formando un cristal. Una propiedad de los nanocristales es su perfección, ya que no hay sitio para los defectos en un tamaño tan diminuto.

Otro material con el que se está trabajando intensamente es el nanotubo de carbono (7). Se obtiene enrollando una capa de grafito (Fig. 3), que es un semimetal. Sin embargo y dependiendo de cómo se enrolla, el nanotubo puede ser metálico o semiconductor. Los nanotubos de carbono tienen propiedades especiales: conducen el calor mejor que cualquier otro material conocido, son cien veces más fuertes que el acero y más duros que el diamante. Otro material son los dendrímeros.

Tenemos pues materiales de dimensiones nanométricas (100.000 veces más pequeños que un cabello humano), y queremos ensamblarlos en sistemas capaces de realizar funciones complejas. Para ello se necesita encontrar unos bloques básicos. Si nos fijamos en el mundo macroscópico, sabemos que mediante una combinación correcta de bloques *LEGO* se pueden construir objetos complejos y sofisticados. Pues bien, el diseño, síntesis y caracterización de estos bloques será una de las tareas fundamentales en Nanotecnología. Estos bloques tendrán formas y tamaños variados y contendrán materia inorgánica o dura, materia orgánica blanda y en algunos casos una combinación de ambas.

En conclusión creo que la nanociencia constituye un campo apasionante con múltiples vertientes y con una característica fundamental: su naturaleza multidisciplinar. Para acelerar su progreso, hace falta juntar a científicos de varias disciplinas, para que pongan en común sus conocimientos y resuelvan problemas ciertamente difíciles ya que en algunos casos están rozando la utopía o la ciencia-ficción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber and E. Weibel: "*Tunneling through a controllable vacuum gap*". Appl. Phys. Lett. 40 (1982) 178.
- (2) G. Binnig, C.F. Quate and Ch. Gerber: "*Atomic force microscopy*". Phys. Rev. Lett. 56 (1986) 930.
- (3) D.M. Eigler and E.K. Schweizer: "*Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope*". Nature 344 (1990) 524
- (4) Saw-Wai Hla, Ludwig Bartels, Gerhard Meyer and Karl-Heinz Rieder: "*Inducing all steps of a chemical reaction with the Scanning Tunneling Microscope tip: towards single molecule engineering*". Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 2777
- (5) Matthias Rief, Mathias Gautel, Filipp Oesterheld, Julio M. Fernández and Hermann E. Gaub: "*Reversible unfolding of individual titin immunoglobulin domains by AFM*". Science 276 (1997) 1109
- (6) Michel Grandbois, Martin Beyer, Matthias Rief, Hauke Clausen-Schaumann and Hermann E. Gaub: "*How strong is a covalent bond?*". Science 283 (1999) 1109
- (7) M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P.C. Eklund: "*Science of Fullerenes and Carbon Nanotubes*". Academic, San Diego, 1996.