

## NANOTECNOLOGIA, CIENCIA DE LO DIMINUTO

**Mario I. Molina**

Uno de los avances mas espectaculares llevados a cabo en Física e Ingeniería en años recientes es el experimentado por la *nanotecnología*: la habilidad de diseñar, controlar y modificar materiales a nivel cuasi-microscópico ó “mesoscópico”. La nanotecnología nos promete la posibilidad—largamente soñada—de influir en las propiedades de los materiales con el fin de producir materiales “inteligentes” para todo tipo de aplicaciones. Es ahora frecuente ver en las más prestigiosas revistas científicas reportes sobre avances en diseño de microcircuitos, microestructuras artificiales y máquinas microscópicas. Ahora es posible el crecimiento sistemático y controlado de pequeñas estructuras artificiales compuestas de varia capas delgadas de materiales diferentes, algunas de unos pocos átomos de ancho mediante técnicas, tales como los “haces moleculares epitaxiales”. A escala comercial, quizás la aplicación mas espectacular a la fecha es el uso de la magnetoresistencia gigante, descubierta en 1998, en las cabezas lectoras de la mayoría de los discos duros de los computadores actuales. Estos y otros avances relacionados, han provocado un explosivo interés en el tema y el término **nanotecnología** se ha convertido en palabra clave de muchas propuestas de investigación en ciencia de materiales e ingeniería. Previendo su importancia actual y futura, el gobierno de EE.UU creó en Noviembre de 2000, la Iniciativa Nanotecnológica Nacional, un programa de multiagencias gubernamentales para promover la investigación en

nanociencia e ingeniería. El presupuesto pedido sólo para el 2002 asciende a unos 520 millones de dólares. La nanomanía florece por todas partes y ya hay mas de 30 centros de investigación y grupos interdisciplinarios, solamente en los EE.UU. Allí, el empuje dado a esta nueva disciplina es solo sobrepasado en la actualidad por la investigación biomédica (cáncer) y de defensa (escudo anti-misiles).

### UN DISCURSO VISIONARIO

El finado Richard Feynman, uno de mis Físicos predilectos de todos los tiempos, anticipó hace cuarenta años atrás la llegada de la nanotecnología en su discurso “Hay espacio de sobra aquí adentro”, entregado el 29 de Diciembre de 1959, con motivo de la reunión anual de la Sociedad Americana de Física. Feynman, a la sazón prominente físico de partículas elementales y quien, en unos pocos años más ganaría el Nobel por sus contribuciones fundamentales a la electrodinámica cuántica, sorprendió a la audiencia al referirse a algo tan lejano a la física “fundamental”. En su discurso, Feynman hace ver que no existe nada en las leyes físicas que impidan al hombre diseñar, manipular y controlar cosas a escala microscópica. Después de todo la naturaleza nos provee de vivos ejemplos:

“ ..... *Este hecho—que enormes cantidades de información puedan ser contenidas en un espacio tan increíblemente reducido—es, por supuesto bien conocido por los biólogos, y resuelve el misterio que existía antes que entendieramos todo esto claramente, de como podía ser que, en la célula mas pequeña, toda la información para la existencia de una criatura compleja tales como nosotros mismos pudiera ser*

*almacenada.....Toda esta información esta contenida en una fracción muy diminuta de la célula en la forma de una larga cadena de moléculas de ADN en la cual aproximadamente 50 átomos son usados para representar un bit de información acerca de la célula. “*

Luego, procede a discutir algunos de los problemas prácticos y fenómenos que uno encontraría al tratar de miniaturizar máquinas y objetos, computadores en particular. Feynman también se pregunta acerca de los límites máximos que pueden alcanzarse en un proceso de miniaturización, sin violar las leyes físicas existente:

“.....Pero no me atemoriza considerar la gran pregunta de si, en definitiva---en un futuro distante--- podamos arreglar los átomos de la manera que queramos; los mismos átomos, la unidad fundamental! ¿Que pasaría si pudieramos arreglar los átomos uno por uno, a voluntad.....No puedo entrever exactamente que pasaría, pero no me cabe duda de que cuando tengamos algún control de los arreglos de cosas a pequeña escala obtendremos un rango enormemente mayor de posibles propiedades que las sustancias puedan tener....”

Estas son las palabras visionarias que le vienen a uno a la mente al contemplar la figura 1. Esta muestra a un grupo de átomos individuales que han sido depositados sobre una superficie “uno a uno”, formando lo que se conoce como un “corral cuántico”. La máquina que hizo esto posible es el “microscopio de efecto túnel”, inventado en 1980 por dos ingenieros de la IBM, G. Binnig y H. Rohrer, el cual es capaz de mirar a los átomos individuales sobre una superficie metálica. Constituye un ejemplo del tipo

de super-microscopio con el que soñó Feynman. La máquina puede también mover átomos individuales, como lo atestigua la figura 1.

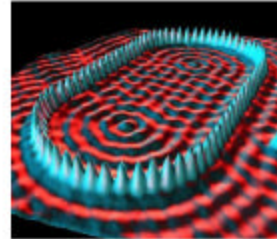


FIG.1

Imagen de un “corral cuántico” en forma de estadio, obtenida con el microscopio de efecto túnel, al posicionar átomos de hierro sobre una superficie de cobre. (Foto, cortesía de Don Eigler, IBM)

## LA VISION DREXLERIANA

En 1986, el futurólogo K. Erik Drexler, publicó el libro “Máquinas de la Creación” donde bosqueja un mundo cambiado para siempre, gracias a la nanotecnología. En particular, anticipa la existencia de mini-robots diminutos, de una diezmilésima de milímetro aproximadamente, los “ensambladores”, los cuales tendrán la capacidad de tomar moléculas individuales y ponerlas en sitios específicos, con el objeto de formar cualquier estructura deseada. Algo parecido a armar un `lego`. Estos nano-robots podrán en principio reproducirse a ellos mismos y de esa manera, será posible construir cualquier cosa partiendo de elementos básicos y baratos. También será posible efectuar reparaciones a nivel molecular en medicina, donde los nanorobots viajarán al lugar indicado para destruir virus, células cancerosas, o en general, reparar el cuerpo humano y de esa manera alcanzar una virtual inmortalidad. Es interesante notar de paso, como algunos

visionarios científicos de hoy en día han cambiado el foco de su atención desde el espacio exterior al interior, a medida que los sueños de colonizar otros planetas y explorar la galaxia se han atenuado en alguna medida (habiendo crecido en el ambiente tecnológicamente optimista de los 60's, personalmente creía que para el año 2000, íbamos a estar viviendo al estilo de 'los supersónicos'). Las ideas de Drexler han sido en su mayor parte rechazadas por la comunidad científica, aunque algunos han expresado cierta preocupación de que estos ensambladores, si alguna vez son creados, podrían replicarse fuera de control (creando la llamada "substancia gris") y quizás destruir el planeta al consumir todos los recursos naturales en crear copias inútiles de sí mismos. Esto ha alarmado a varios, entre ellos Bill Joy, co-fundador de Sun-Microsystems, quien ha advertido que la investigación en nanotecnología debiera ser detenida antes de que, por accidente se cree la "substancia gris". Todos estos temores son minimizados por el mundo académico, por cuanto se considera que aún estamos muy lejos de crear algo remotamente parecido a un "ensamblador". Uno de los críticos mas eminentes en este respecto es Richard E. Smalley, quien obtuvo el nobel en 1985 por descubrir una nueva forma del carbono, el "fulereno", y quien dirige un centro de nanotecnología en la U. de Rice, en Texas. Smalley hace notar que hay dos problemas fundamentales con la noción de ensamblador. El primero es un problema de tamaño (problema de los 'dedos gruesos'): los dedos del ensamblador están compuestos de átomos lo cual implica que su tamaño es irreducible. Estos dedos serían demasiado grandes para controlar la química local. El segundo problema es el

de los 'dedos pegajosos': los átomos de los dedos manipuladores del nanorobot se 'pegarían' a los átomos que están siendo manipulados. Así, una manipulación directa, 'átomo por átomo', no parece práctica, por lo cual habría que recurrir a ingeniosos esquemas indirectos.

### ENCOGIENDO LAS DIMENSIONES LINEALES

Alguien dijo una vez que, si el universo se encogiera un millón de veces, y nosotros con él, nadie notaría nada. En realidad esto no es así. Por ejemplo, consideremos un alambre (o una columna). Su resistencia mecánica ante un esfuerzo es proporcional a su sección transversal. Por otro lado, el peso que cuelga de un alambre (o el peso de una columna) es proporcional a su volumen. Por lo tanto, la capacidad mecánica de un alambre (o columna) para soportar esfuerzo es proporcional a la razón área/volumen. Imaginemos ahora que encogemos todas las dimensiones lineales de los objetos diez veces (dejando el campo gravitatorio constante, por simplicidad). Esto haría que el área disminuyera cien veces mientras que el volumen disminuyera mil veces. La razón área/volumen de los objetos aumentará entonces diez veces. Esto significa que ahora una columna o alambre podría sostener 10 veces mas "carga". Lo opuesto ocurre si en vez de encoger aumentamos. Mientras mayor es la magnificación lineal, menor será la resistencia mecánica del objeto. Por supuesto, estas consideraciones también se aplican a seres vivos y explican por que un tigre no se parece simplemente a un gato aumentado una docena de veces. Los huesos del tigre son proporcionalmente mucho mas gruesos. Si existieron gigantes en la antigüedad,

necesariamente tendrían que haber poseído una estructura ósea considerablemente mas gruesa que la del humano, además probablemente de un lento desplazamiento. Por otro lado, un encogimiento substancial de un ser humano, al estilo de la tripulación diminuta en “viaje fantástico” de Asimov, conllevaría serias consecuencias: La energía almacenable en los mamíferos de sangre caliente es proporcional al peso, esto es, al volumen. La energía perdida por calor es proporcional a la superficie. El requerimiento energético será entonces proporcional a la razón área/volumen, ó en otras palabras, al inverso del tamaño del individuo. Entonces, al encoger a una persona digamos unas diez mil veces (como los tripulantes de “viaje fantástico”), su requerimiento energético aumenta justamente en 10 mil veces. El pobre individuo caería en una hipotermia feroz, además de un apetito insaciable y, con toda seguridad, moriría rápidamente. Volviendo al dominio de lo inorgánico, la resistencia eléctrica de un alambre metálico es proporcional a la razón longitud alambre/sección transversal. Al encoger todo 10 veces, la resistencia eléctrica aumenta 10 veces también! Esto no es conveniente ya que conlleva al calentamiento de los circuitos. Esta es la razón principal por que se calientan tanto las CPUs de los computadores actuales y la necesidad de contar con buenos sistemas de evacuación de calor. Estos argumentos son válidos, por supuesto, en cuanto los objetos aludidos sean aun razonablemente “continuos”. Al continuar disminuyendo la escala más y más sin embargo, se hacen prominentes otras características de los materiales: la rugosidad de las superficies, por ejemplo. A escala atómica, la superficie

del metal más “pulido” se ve al microscopio electrónico como un paisaje terrestre, poblado de accidentes, con terrazas, cañones y quebradas. En este ambiente, el posicionar moléculas “a mano” formando un determinado patrón, se convierte en una labor agotadora, dada la presencia de la fuerza intermolecular que a esta escala es imposible de ignorar o esquivar. Esta fuerza, es de origen cuántico y por ende, sumamente difícil de manejar, excepto en situaciones extremadamente sencillas. También, no hay que olvidar que a temperatura ambiente los átomos se agitan constantemente y demuestran un grado de reactividad y movilidad sorprendentes. Sencillamente, es muy difícil decirle a un átomo: “quédate ahí y no te muevas”. El sorprendente arreglo de átomos de la figura 1 se logró tras mucho esfuerzo, para demostrar que se podía hacer en principio; no que fuera fácil hacerlo rutinariamente. De ahí que la vision Drexleriana de minirobots moleculares, que agarran átomos y moléculas al paso y los arman en distintas configuraciones parece lejos de ser plausible.

## NANOTECNOLOGIA EN TERRENO

Las investigaciones actuales en nanotecnología se centran en objetivos mucho mas básicos, como la construcción y caracterización de microestructuras artificiales, sus propiedades mecánicas, eléctricas, su estabilidad química y su respuesta frente a diversos estímulos. El universo de la nanotecnología es la escala mesoscópica, o cuasi-microscópica, donde la Física clásica comienza a perder su primacía y comienzan a hacerse patentes los efectos cuánticos. A esta escala de distancias, los objetos nanométricos parecen compartir características propias de los

objetos “grandes” (o sea clásicos) y de los objetos “moleculares” (cuánticos), además de nuevas características muy únicas. Es en este mundo híbrido, donde los investigadores tratan de desarrollar una nueva intuición, al lidiar con un conjunto de fenómenos de importancia comparable: desorden, ruido térmico, efectos de superficie, fluctuaciones cuánticas, no linealidad. A escala “normal” muchos de estos efectos son “pequeños” y pueden ser tratados formalmente como perturbaciones. A escala mesoscópica, las perturbaciones pueden ser tan importantes como el fenómeno principal. Sin embargo se cuenta con más y mejores herramientas para explorar este submundo: el advenimiento de computadores más rápidos y relativamente baratos, ha estimulado el campo de las simulaciones computacionales a escala molecular, donde uno “crea” átomos y moléculas, las dota de propiedades básicas y de una interacción mutua y estudia el comportamiento del sistema, bajo diversas condiciones. Una suerte de laboratorio virtual, donde los resultados pueden orientar la marcha y sugerir nuevos productos o procesos para llevar a cabo en la vida real. También, el auge de mejores y más potentes fuentes de luz láser, permite el uso de la luz para atrapar y manipular átomos, una técnica que, en combinación con otras, permitió observar la ‘condensación de Bose-Einstein’ por primera vez en el laboratorio el año 2000. El interés actual está enfocado en el diseño y construcción de computadores más pequeños y rápidos a los ya existentes, el diseño de mejoras drogas o simplemente, ser capaces de hacer mediciones con mayor precisión. Compañías de computadores con grandes laboratorios de investigación,

como IBM o la Hewlett-Packard, poseen substanciales programas de nanotecnología. Aquí el interés yace en obtener chips electrónicos con circuitos cada vez más pequeños. Cuando la tecnología de silicón actual llegue a su límite, probablemente en los próximos 10 a 25 años, será reemplazada por un nuevo concepto, quizás utilizando los “nanotubos” de carbono de Smalley, que presentan interesantes propiedades mecánicas y eléctricas. O quizás, el camino de la computación tome otro rumbo: Por ejemplo, se están explorando activamente computadores completamente ópticos, donde el almacenamiento y el tráfico de información se lleva a cabo con luz láser viajando a través de medios ópticos no lineales, sin utilizar componentes electrónicos en ninguna parte del proceso. La ventaja es que los procesos involucrados ocurren a la velocidad de la luz, la cual es mucho más rápida que la velocidad de respuesta de un componente meramente electrónico. Si bien se está aún lejos de dispositivos comercializables, se ha demostrado en el laboratorio que tales dispositivos son en principio, posibles.

Ya sea que el futuro nos traiga o no los temidos ‘nanorobots’ de Drexler, lo cierto es que como consecuencia de estos estudios, lo más probable es que la Física, la Ciencia de Materiales, la Química, la Ingeniería y la Medicina avancen significativamente, en la medida que aumenta nuestro entendimiento de esa región rica y compleja: ese ‘universo’ localizado dentro del proverbial ‘grano de arena’.

**Mario I. Molina**, es Profesor Asociado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile  
*mmolina@abello.dic.uchile.cl*