



Los nanomateriales, una revolución tecnológica y un reto para la cristalografía

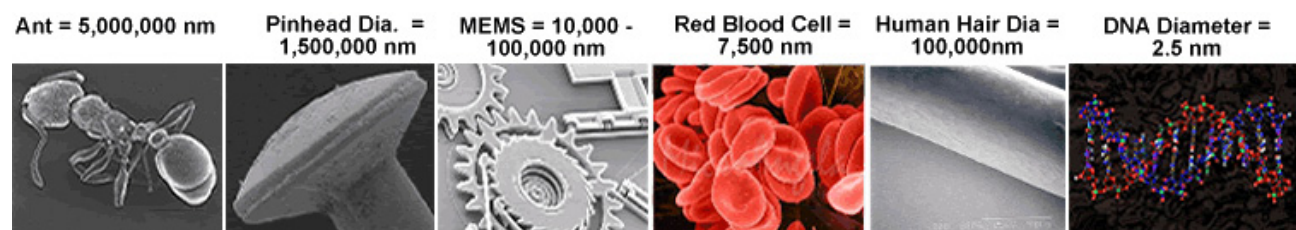
Por **Santiago García-Granda**

Departamentu de Química Física y Analítica
Universidá d'Uviéu
CINN-CSIC

Nes últimes dos décadas, los nanomateriales vienen siendo un campu de munchu interés tanto dende'l puntu de vista científicu como del económicu. Estos materiales, que tienen como característica común el tamañu de los sos componentes, desaxeradamente pequeñu, afiten un grandísimu potencial p'aplicaciones industriales, biomédiques y electróniques. Como resultáu de la meyora nes tecnoloxíes pa observar y manexar estos materiales, nel campu de los nanomateriales vese un importante aumentu nel sofitu de la investigación, el desendolque y l'anovación, tanto per parte de les empreses privaes como nes estratexes gubernamentales, lo que ta permitiendo que los investigadores académicos dientro d'esti campu tean formando abondes asociaciones y grupos de trabayu.

Instalaciones de nanomateriales.

Semeya: Brookhaven National Laboratory [licencia Creative Commons]



Los nanomateriales pueden ser de constitución pervariada, metales, cerámicos, materiales poliméricos o materiales compuestos. La característica definitoria es el tamaño de los sus unidades básicas, en el rango de los 1-100 nanómetros (nm). La unidad de nanómetro, y más en concreto el prefijo nano, 'nanu', viene de la palabra griega del mismo nombre que quiere decir pequeño. Un nanómetro abarca entre 3 y 5 átomos alineados. En comparación, el diámetro de un pelo humano es unos 5 órdenes de magnitud mayor que una partícula a nanoescala (Fig. 1). Los nanomateriales no son simplemente otro paso en la miniaturización, sino un escenario completamente distinto; el nanomundo atópase a mitad del camino entre la escala atómica, que da lugar a los fenómenos cuánticos, y la escala de los materiales macroscópicos comunes, que se componen siguiendo las leyes de la mecánica clásica o Newtoniana. En este nivel de los nanomateriales algunas propiedades de los materiales vienen dadas por las leyes de la física atómica, en cuenta de comportarse como materiales tradicionales.

Magar que el interés por los nanomateriales es reciente, el concepto planteóse hace más de 50 años. El físico Richard Feynman, en 1959 dio una charra titulada «Hay mucho espacio en la parte inferior», en la que comentó que no hay razones físicas fundamentales por las que los materiales no puedan fabricarse a partir de átomos individuales. Los nanomateriales vienen produciéndose y empleándose por

humanos a lo largo de cientos de años. El guapo color colorado rubí de algunos vidrios y la morde de las nanopartículas de oro atrapadas en la matriz del vidrio. El esmalte decorativo, atópase en algunas cerámicas medievales, contiene nanopartículas metálicas esféricas esparcidas de una forma compleja en el esmalte, lo que hace que tengan unas propiedades ópticas especiales. Las técnicas utilizadas para producir estos materiales consideráronse secretos en aquellos tiempos y todavía hoy no se entienden al completo (Fig. 2).

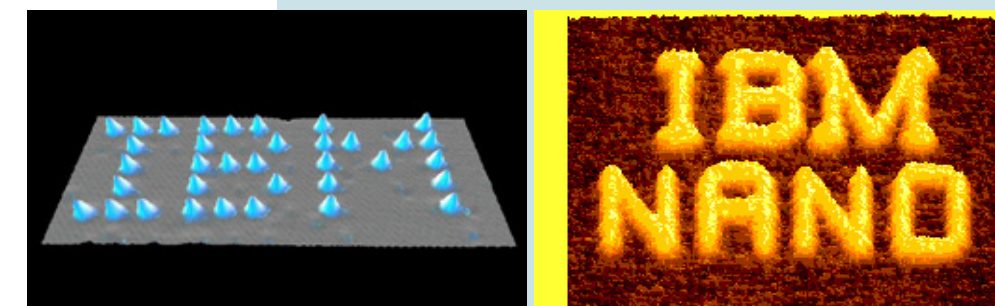
El desarrollo de la nanotecnología se vio impulsado por el refinamiento de los instrumentos para ver el nanomundo, como por ejemplo, por los sistemas más sofisticados de microscopía electrónica y la microscopía de efecto túnel. En 1990, científicos de IBM lograron asentar átomos de xenón individuales en una superficie de níquel para sollear el logotipo de la empresa, por acíu el análisis por microscopía de efecto túnel, amosando con ello la descomanada tecnología que también desarrollando (Fig. 3). A mediados de la década de los ochenta, descubrióse una clase



Las propiedades y aplicaciones parecen desconocidas, desde dispositivos electrónicos pequeños, con baterías en miniatura, para usos biomédicos a películas para embalajes, superabsorbentes, componentes de blindajes y partes de automóviles

nueva de material, las esferas de carbono.

Estas esferas nomáronse *buckyballs* o *fullerenos*, en honor al arquitecto y futurista **Buckminster Fuller**, que diseñó una cúpula geodésica con geometría semejante a la que se encuentra en el nivel molecular de los fullerenos. El *buckyball* C₆₀ (60 átomos de carbono químicamente enlazados en una molécula con forma de bola) fue la fuente de inspiración para la investigación que dio lugar a la fabricación de nanofibras de carbono, con diámetros menores de 100 nm. En 1991, Sumio Iijima del NEC en Japón comunicó la primer obser-



PÁGINA ANTERIOR

Figura 1. Ejemplos que dan una idea de lo que es un nanómetro (nm). Los nanomateriales pueden ser de estructura constituida: metales, cerámica, materiales poliméricos o compuestos.

IZQUIERDA

Figura 2. La copa de Lucargus (British Museum), clásica ejemplo del efecto de las nanopartículas.

ABAXO

Figura 3. Lleteru fechu con nanotécnicas y vistu con microscopiu d'efeutu túnel.

vacación de nanotubos [1] de carbono, que años producen muchas compañías en cantidades comerciales. El mercado mundial de nanocompuestos (uno de los muchos tipos de nanomateriales) creció a millones de euros en 1999 y todavía crece con rapidez.

La variedad de nanomateriales es abundante, y la sola gama de propiedades y aplicaciones parecen desconocidas, desde dispositivos electrónicos pequeños, con baterías en miniatura, para usos biomédicos a películas para embalajes, superabsorbentes, componentes de blindajes y partes de automóviles. **General Motors** dice tener el primer medio para utilizar los nanomateriales para aplicaciones automotrices exteriores, nos estribos de los camiones de tamaño mediano. Los editores de la revista *Science* resaltaron un trabajo sobre circuitos electrónicos de tamaño molecular como el desarrollo científico más importante en 2001 [2]. Es claro que los investigadores estamos todavía en el comienzo de la comprensión y el desarrollo, y que todavía queda por hacer una gran cantidad de trabajo básico.

¿QUÉ FAI QU'ESTOS NANOMATERIALES SEYAN TAN DIFERENTES YA INTRIGANTES?

El solo característico tamaño terriblemente pequeño que es de la misma escala que el tamaño crítico de los fenómenos físicos. Por ejemplo, el radio de la punta de una grieta en un material puede estar en el rango de 1 a 100 nm. La forma que un defecto crece en una escala mayor, material masivo, suele ser diferente del esparcido de un efecto en un nanomaterial donde el efecto y las partículas son de tamaños comparables. Los procesos electrónicos, magnéticos, ópticos, químicos y biológicos fundamentales son también diferentes en este nivel. Un ejemplo de esto, pueden ser las

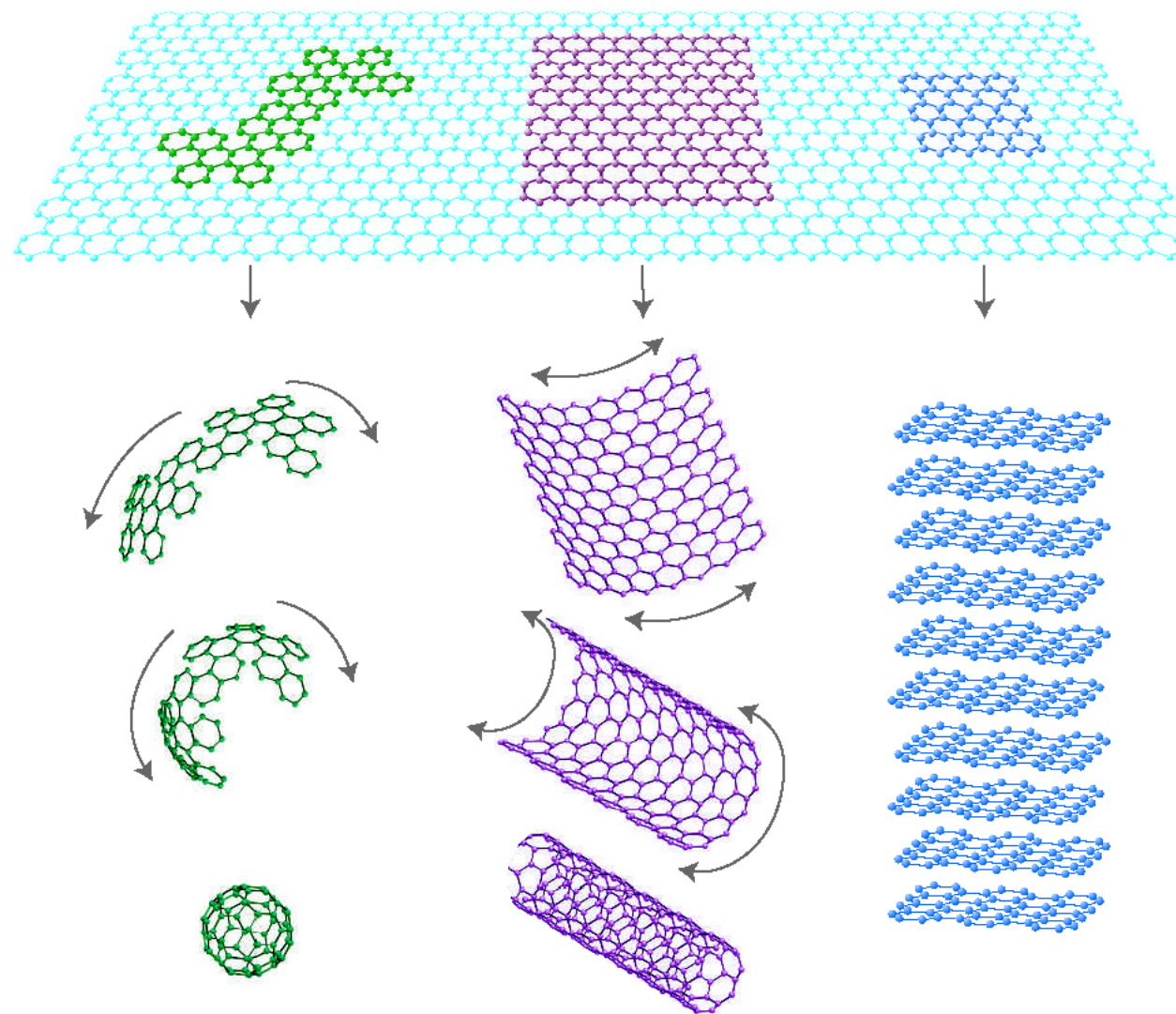


Figura 4

proteínas que tienen un tamaño de 10-1000 nm y unas paredes celulares 1-100 nm de grosor, el solo comportamiento frente a los nanomateriales puede ser fundamentalmente diferente frente a la relación con los materiales de una escala mayor. Los nanocápsulas y los nanodispositivos pueden presentar nuevas posibilidades para empobinar y aplicar en sitios específicos medicamentos, la terapia génica y el diagnóstico médico.

También son importantes para explicar el comportamiento de los nanomateriales en las superficies y las interfaces. En los materiales masivos, solo un porcentaje relativamente bajo de átomos será parte o estará cerca de una superficie o un in-

terfaz (como un límite de grano de cristal). En los nanomateriales, el tamaño pequeño de función asegura que muchos átomos, probablemente la mitad o más de algunas veces, estarán cerca de las interfaces.

Pongamos atención a un pequeño grupo de los nanomateriales, los nanocompuestos basados en materiales poliméricos. Hay muchas variedades de nanocompuestos poliméricos, pero los más avanzados son los que arrojan la dispersión de pequeñas cantidades de nanopartículas en la matriz del polímero. Tiene demostración que en los materiales más humildes, como son los barro, pueden mostrar propiedades sorprendentes. Por ejemplo, amasar cantidades tan pequeñas como un 2%

por volumen de silicatos de nanopartículas a una resina de poliamida aumenta la resistencia un 100%. Hay que tener en cuenta, por supuesto, que el 2% en el volumen de partículas pequeñas y un número muy importante de partículas que se refuerzan. La adición de nanopartículas no solo mejora las propiedades mecánicas, sino que también demuestra que mejora la estabilidad térmica, en algunas veces, el uso de polímeros-matriz nanocompuestos, da una resistencia térmica adicional de 100 grados centígrados por encima de las condiciones normales de servicio. También se tiene estudiado la disminución de la inflamabilidad del material, una propiedad importante sobre ma-

Delles vegades, l'usu de polímers-matríz nanocompuestos, da una resistència tèrmica adicional de 100 graus centígrados perriba de les condicions normals de serviciu

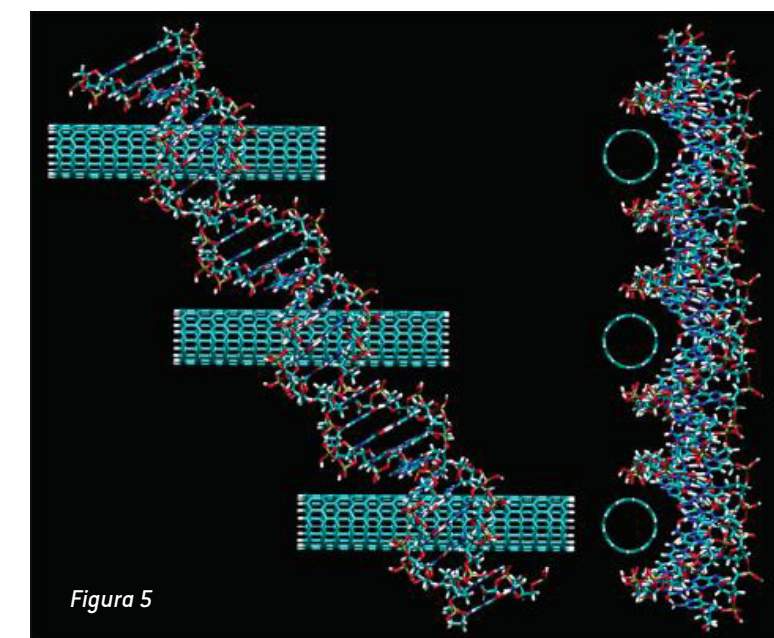


Figura 5

Los nanotubos de carbono tienen propiedades únicas, rigidez y fuerza mayor que la de cualquier otro material, por ejemplo, al igual que propiedades electrónicas extraordinarias

nera p'aplicaciones de transporte onde la escoyeta del material ta influenciada poles moliciones de seguridad. Los nanocompuestos barru/polímeru consideráronse como matriz de materiales pa compuestos basaos en fibras destinaos a componentes aeroespaciales. Los componentes d'aeronaves y naves espaciales precisen materiales llixeros con alta resistencia y rigidez, ente otros cualidaes. Los nanocompuestos, cola so resistencia térmica superior, tamién son apetecibles p'aplicaciones tales como la electrónica. Tamién s'esaminaron les propiedades llétriques de los nanocompuestos, col oxetivu de desendolcar nuevos materiales conductores. Los nanocompuestos basaos en polímeros tamién tan siendo usaos pa revestimientos anticorrosivos en metales y sensores de película delgada. Igualmente tán estudiándose otros propiedades óptiques y la so fotoluminiscencia.

Anque dalgunos nanomateriales precisen enfoques más exóticos de síntesis y procesu, munchos nanocompuestos de polímeru-matriz pueden preparase de manera cenciella. Nanocompuestos de barru/polímeru ficiéronse sometiendo al barru como montmorillonita a intercambiu iónicu o otro tratamientu previu, y darréu, mesturando les partículas col polímeru fundíu. Hai tamién otro número importante de

procesos como los reactivos de polimeración in situ. La fracción de baxu volume de partículas de refuerzu, admite l'usu de métodos de procesu bien establecíos y entendíos, como la extrusión y el moldéu por inyección. La facilidad de procesu y conformáu pue ser una esplicación pa la rápida aplicación d'estos materiales na industria. Les empresas automotores, en particular, tan adoptando rápidamente nanocompuestos n'aplicaciones de gran escala, incluyendo piezas estructurales de los vehículos. La investigación enerxética más habitual refierse a los nanotubos de carbonu. Les nanopartículas de carbonu –variellas, fibras, tubos con paredes únicas o dobles paredes, abiertos o d'estremos zarraos y formes reutes o espirales– vienen sintetizándose dende va 20 años. Hai bones razones pa dedicayos tantu esfuerzu: los nanotubos de carbonu tienen propiedades únicas, rigidez y fuerza mayor que la de cualquier otro material, por exemplu, al igual que propiedades electrónicas extraordinarias. Los nanotubos de carbonu son térmicamente estables nel vacíu fasta los 2.800 graos centígrados, con una capacidá pa trasportar una corriente llétrico mil veces mayor que lo de los cables de cobre, y tienen dos veces la conductividá térmica del diamante (que ye tamién una forma de carbonu). Los nanotubos de

carbonu utilícense como refuerzu de partículas en nanocompuestos, pero tamién tienen munches otras aplicaciones potenciales. Podrían ser la base pa una nueva era de dispositivos electrónicos más pequeños y más poderosos que cualquiera de los imaxinaos nel pasáu. Por exemplu, los nanocomputadores basaos en nanotubos de carbonu. Nun ye entós tan sorprendente que los Gobiernos, les empreses y los investigadores de la Universidá tean xuntando fuerces o compitiendo pa sintetizar, investigar, producir y aplicar estos nanomateriales increíbles.

NANOMATERIALES BASAOS NEL CARBONU: NANOTUBOS Y GRAFENOS

Magar que ye claro que los diamantes permanecerán, nun hai dulda que los sos primos, más nuevos y diminutos, de la mesma familia de los compuestos de carbonu, los nanotubos de carbonu y los grafenos, van roba-yos gran parte del so rellumu. Los nanoteunólogos enloquecen con estos pequeños materiales pola mor de les sos extraordinaries propiedades llétriques, óptiques y mecániques, que los faen únicos y qu'allumen la imaxinación científica.

Un nanotubu de carbonu ye un tubu fechu completamente de carbonu con un diámetru cercanu a un nanometru (1/1.000.000.000 parte d'un metru). Ye perdifícil imaxinar daqué tan pequeño, pero podemos facer una comparación pa tener una idea, si viéramos ún d'esos nanotubos al tamañu d'un pelu, la nuesa cabeza tendría'l tamañu d'una montaña. El nanotubu de carbonu ye un arrollamientu tubular d'átomos de carbonu enllazaos formando una rede que recuerda una rede alambrada o la cera d'un caxellu d'abeyes (Fig. 4).

Estos nanotubos son enforma pequeños pa observarlos nun microscopiu ópticu, pero puen vese al traviés d'otros dispositivos con mayor resolución. Un d'ellos ye'l microscopiu d'efeutu túnel (STM), onde puen observase los átomos individualmente. Col microscopiu de fuerza atómico (AFM) podemos ver el tamañu y la disposición espacial de los nanotubos.

La técnica AFM p'atopar los nanotubos ye igual qu'usar el tactu en cuenta de la vista pa reconocer un oxetu. Una aguya perfina inxertada nel dispositivu navegador en forma de voladizu (asemeyáu a l'aguya d'un discu de vinilu) desplázase pela superficie de la muestra. Siempre que l'aguya atopa una elevación, la plataforma desplázase dafechu. Esti movimientu mídese con un láser. Con esta ferramienta pue observase fácilmente cuántos nanotubos coneuten un par d'electrodos y los sos diámetros (Fig. 5-6).

El grafenu ta fechu tamién con átomos de carbonu enllazaos formando una rede de tipu

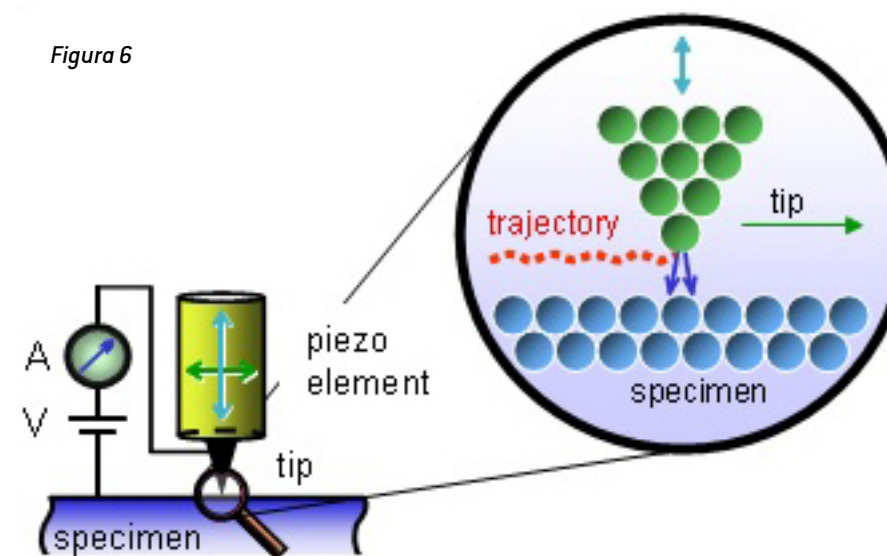


Figura 6

alambráu o caxellu, igual que nos nanotubos de carbonu. Ensin embargo, el grafenu tien forma de llámina plana col espesor del tamañu d'un solu átomu (3.4 angstrom o 1/3.000.000.000 metros). El grafenu preséntase na naturaleza como constituyente del grafitu (que por exemplu usamos nos llapiceros) que ta formáu por un inmensu númberu de llámines superpuestas. De recién los científicos foron a estremar, per primer vegada, una d'estes llámines de grafenu d'un bloque de grafitu.

A diferencia de los nanotubos de carbonu, les llámines de grafenu pueen observase nel microscopiu ópticu, gracias a la so mayor superficie. Escoyendo con procuru la superficie sobre la que llantamos les llámines de grafenu y

munchu calor, una fonte de carbón (metanu, por exemplu) y partícules de catalizador (xeneralmente fierro o níquel) qu'actúen como semiente de la que medren los nanotubos. Ún de los métodos más utilizaos ye la deposición química na fase vapor (CVD). A partir d'un molde de siliciu, llántense partícules catalítiques de fierro nos sitios onde queremos que crezan los nanotubos. De secute, faise circular un fluxu de gas con un conteníu de carbonu altu, como'l metanu, dientro d'un fornu a una temperatura peralto. Los átomos de carbonu enllácese a les partícules del catalizador surdiendo un nanotubu. Faciendo conexones llétriques ente los nanotubos podemos determinar les propiedaes conductores de los nanotubos, siendo a estre-

Asitiar les llámines de grafenu enriba d'una superficie ye tan fácil como escribir con un llapiceru. La fabricación de nanotubos de carbonu nun ye tan cenciella como arrollar llámines de grafenu

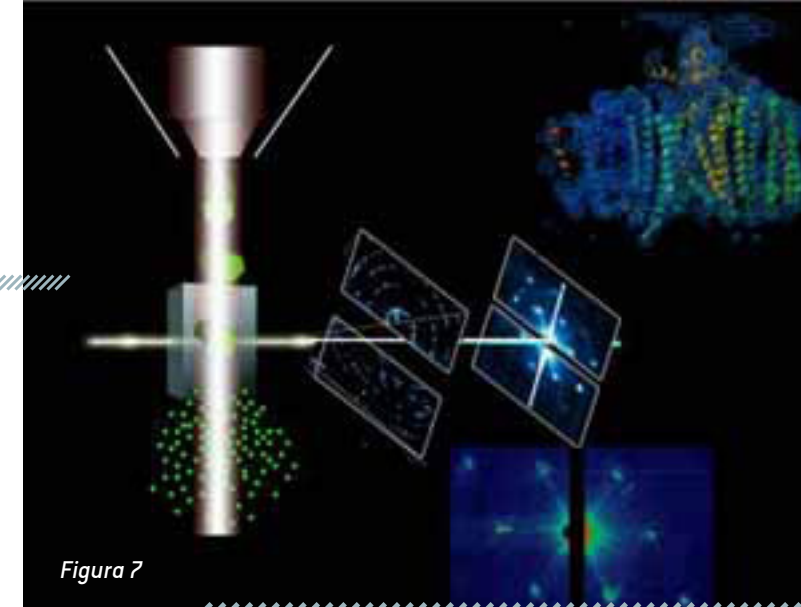
usando un bon microscopiu, podemos ver realmente les llámines individuales.

Asitiar les llámines de grafenu sobre una superficie ye un procesu tan fácil como escribir con un llapiceru. Partimos d'un cachu de grafitu ultrapuro qu'apiegamos nel estremu d'un paliyu. Frotando lixeramente'l paliyu sobre cualquier superficie na que queremos poner les llámines de grafenu, les llámines individuales de grafenu xébreñense del trozu de grafitu y apiéguese de forma aleatoria a la superficie.

La fabricación de nanotubos de carbonu nun ye tan cenciella como arrollar llámines de grafenu. Nun tenemos ferramientes tan pequeñes que nos permitan facer esta operación. Alternativamente, tenemos que facelos medrar como si fora una planta. Pa formalos necesitamos,

mar los metálicos de los semiconductores.

Tanto los nanotubos de carbonu como los grafenos tienen abondes aplicaciones. Los físicos aprovechen les sos propiedaes como materiales monodimensionales y bidimensionales res-
peutivamente, pa observar les propiedaes de los electrones confinaos nuna y dos dimensiones. Na bioloxía son interesantes como sondes coles qu'explorar los sistemas biolóxicos. Entrambos dos pueden comportase como metales o semiconductores y les sos propiedaes llétriques son iguales o superiores a los meyores metales o semiconductores conocíos. Por esa razón son perinteresantes na inxeniería pa fabricar transistores de tamañu mui reducíu. Na ciencia de materiales amestúrense con materiales tradicionales, creando materiales híbridos, con propiedaes



reforzaes de durez o conductores, calteniendo al empar les sos propiedaes de maleabilidad.

Inclusive n'astrofísica, los nanotubos podríen ser afayadizos pa construir un ascensor espacial, pa coneutar la tierra con estaciones espaciales orbitales.

Les llinies actuales de trabayu en nanotubos, incluyen les investigaciones de les propiedaes llétriques y del so comportamientu so la influencia de campos manéticos (*Nature* 428, 536(2004)) o cómo s'esparden los electrones nel interior d'estos sistemas (*Nature Physics* 2, 687(2006)). Investíguense tamién usando sondes nanométriques les propiedaes de les dobles capes de les membranes lipídiques (*Nature Nanotechnology*, 2, 185(2007)). Les propiedaes mecániques de los nanotubos y grafenos son extraordinaries, alcontrándose ente los materiales más resistentes de los conocíos. Ye posible tensionar extraordinariamente un d'estos materiales ensin que llegue a francir, por exemplu, podríen facese cuerdes de violín estremadamente fines ya invisibles con nanotubos (*Nature*, 431, 284 (2004)). Una superficie de grafenu dexaría construir un tambor, que se tocaría con un láser (*Science* 315, 490(2007)). Membranes de grafenu, col gordu d'un átomu, podríen usase como separadores de diferentes ambientes.

El problema de la manipulación d'estos materiales ye asemeyáu al problema d'escoyer y garrar un granu d'arena nuna sablera usando

unos paliyos. Esti nun ye un gran problema pa los esperimentos científicos porque podemos escoyer y aisllar el sistema que vamos a estudiar. Sicasí, ye un gran problema pa la industria darréu que ye precisu controlar la disposición de millones de nanotubos idénticos, alliniaos d'una forma determinada o disponer d'una fueya de grafenu uniforme d'un área amplia. Anguaño pue asitiase nanotubos nes posiciones deseaes con precisión (*J. Hone, Nanoletters*, 2005, 5(7)) o ordenar nanotubos pol so diámetru y tipu electrónicu (*M.C. Hersam, Nature Nanotech.*, 1 (2006)). Con grafenu ye posible metrar llámines uniformes sobre la superficie d'un chip de siliciu, que pue ser dempués recortáu de cualquier forma (*C. Berger et al. Science* 312, 1191 (2006)).

DIFRACCIÓN NA ESCALA NANOESCALA Y NANOCRISTALOGRAFÍA

B. D. Fahlman describió un nanocristal como cualquier nanomaterial con, pelo menos, una dimensión inferior o igual a 100nm y monocristalino^[3]. Más concretamente, cualquier material con una dimensión de menos d'un micrometru, ello ye, 1000 nanómetros, tien que se denominar como nanopartícula, non como nanocristal. Por exemplu, cualquier partícula qu'amuesa rexones de cristalinidad tien que se nomar nanopartícula o nanoclúster dependiendo de la so dimensionalidad. Estos materiales son d'un importante interés tecnolóxicu, yá que munches de les sos

propiedades eléctricas y termodinámicas muestran una gran dependencia del tamaño y, por tanto, pueden controlarse a través de los procesos de fabricación. Los nanocristales también son de interés, porque abundan y proporcionan sistemas cristalinos de dominio único que pueden estudiarse para lograr información que ayude a explicar el comportamiento de materiales similares, incluso la presencia de entrelazamientos de granos y otros defectos. Los nanocristales semiconductores en el rango de tamaño sub-10nm presentan frecuentemente puntos cuánticos. Los nanocristales de zeolitas sirven como un filtro para convertir el crudo en combustibles diésel en una refinería de petróleo, siendo este un método mucho más barato que la forma

convencional de refinar. Una capa de nanocristales se emplea en un nuevo tipo de panel solar llamado SolrPly. Es más barato que otros paneles

solares, más flexible y asegura el 12% de eficiencia (Los paneles solares orgánicos convencionales más baratos convierten el 9% de la energía solar en electricidad). Los tetrápodos cristalinos de 40 nanómetros convierten fotones en electricidad, pero solo tienen el 3% de eficiencia. El término nanocristal es una marca registrada de Elan Pharma Internacional Limited (Irlanda) utilizada en el contexto del proceso de molienda de propiedades de Elan y sus formulaciones nanoparticuladas de medicamentos.

La revista científica *Nature*, en el número del 2011, describe un nuevo método desarrollado para determinar estructuras de biomoléculas basadas en la difracción de nanocristales de proteínas que son tan pequeños que aún son visibles

en el microscopio [4,5]. Una boquilla pequeña de nebulización genera una corriente constante de nanocristales, ambos suministrados por un equipo de investigación interdisciplinar de la Universidad Estatal de Arizona (Fig. 7). Esto permitió a un equipo internacional de cerca de 90 investigadores recoger más de 3 millones de patrones de difracción «instantáneos» que se revelaron antes de que los cristales explotaran en un pulso ultracorto, de femtosegundos y de intensidad muy fuerte de rayos X, que son tan intensos que pueden vaporizar cualquier material sólido presente en el área iluminada. Los experimentos aprovecharon el gran potencial del láser de electrones libres de rayos X, XFEL – la fuente de luz coherente de Linac (Acelerador Lineal) situado en el laboratorio

del Departamento de Energía del acelerador nacional SLAC (Stanford Synchrotron Radiation Lightsource) – para nuevos descubrimientos en biología y medicina.

Y en fin, se descubrió que la resolución de los patrones grabados por los biólogos es limitada por los daños de la radiación utilizada, incluso en el caso de un pulso de radiación que acaba primero con el daño, ¿cómo se recolectan los patrones si se utiliza un pulso de radiación que acaba primero con el daño, ¿cómo se recolectan los patrones si se utiliza un pulso de radiación que acaba primero con el daño?

Muchos en la comunidad científica son escépticos sobre la viabilidad de este método. Sin embargo, la teoría y los experimentos recientes usando rayos X blandos indican que este método podría proporcionar una ruta útil para recolectar patrones de difracción sin sufrir daños. Desarrolló el láser de rayos X duros XFEL (una fuente luminosa coherente de Linac).

Para los experimentos de nanocristalografía,

que se desarrollaron en agosto de 2009 en el SLAC en California, se utilizaron nanocristales de fotosistema I, una proteína de membrana tan compleja que consta de más de 100.000 átomos y que actúa como un convertidor de energía de biosolar en el proceso de fotosíntesis del oxígeno. Los cristales de proteína, como ya se sabe, son extremadamente débiles, como un trozo de mantequilla al sol, y, por lo tanto, se destruyen. Después de 13 años de trabajo de un grupo de investigación para desarrollar métodos de crecimiento de cristales grandes y de alta calidad del fotosistema I para determinar la estructura molecular en el año 2001.

A través del experimento de nanocristalografía en la fuente de luz coherente de Linac, el equipo de investigación usó miles de nanocristales del fotosistema I en el mismo lugar. La importancia del experimento es que tiene el potencial para revolucionar el campo de la cristalografía de proteínas y es lo que describe en la publicación de *Nature* «Femtosecond X-ray protein nanocrystallography». Estos experimentos tienen el potencial para ser uno de los avances científicos más asombrosos del año.

El inyector de electrones de proteína es una pieza pequeña del equipo que genera una corriente de electrones de proteína contra el flujo de electrones de rayos X duros en el SLAC. La ejecución experimental en el LCLS (*Linac Coherent Light Source*) superó todas las expectativas porque el nebulizador funciona sin problemas. Dispone de un sistema de suministro de reserva dual que puede cambiar los patrones sin apagar el flujo, por lo que la boquilla puede trabajar de forma continua más de 50 horas. La concentración de muestra de nanocristalitos del fotosistema I proporciona un patrón de difracción de rayos X con casi cada pulso de rayos X – 30 patrones de difracción por segundo –. Nunca antes había alcanzado un 100% de efectividad antes, y mucho menos se mantenía a lo largo de días, más de tres millones de patrones de difracción pueden almacenarse sin dificultad. La calidad de los patrones de difracción es excelente y brillante.

El inyector de electrones de proteína es una pieza pequeña del equipo que genera una corriente de electrones de proteína contra el flujo de electrones de rayos X duros en el SLAC. La ejecución experimental en el LCLS (*Linac Coherent Light Source*) superó todas las expectativas porque el nebulizador funciona sin problemas. Dispone de un sistema de suministro de reserva dual que puede cambiar los patrones sin apagar el flujo, por lo que la boquilla puede trabajar de forma continua más de 50 horas. La concentración de muestra de nanocristalitos del fotosistema I proporciona un patrón de difracción de rayos X con casi cada pulso de rayos X – 30 patrones de difracción por segundo –. Nunca antes había alcanzado un 100% de efectividad antes, y mucho menos se mantenía a lo largo de días, más de tres millones de patrones de difracción pueden almacenarse sin dificultad. La calidad de los patrones de difracción es excelente y brillante.

Agradecimientos

Gracias al MICINN (MAT2006-01997, MAT2010-15094 y Factoría de Cristalización Consolidada Ingeniería 2010) y a los FEDER.

Referencias

- [1] S. Iijima, *Nature* 354 (1991), 56.
- [2] *Science*, vol. 294, 5551 (2001): 2442-2443.
- [3] FAHLMAN, B. D. (2007): *Materials Chemistry*. Springer, Mount Pleasant, MI, 2007; Vol. 1: 282-283.
- [4] CHAPMAN, H. et al. (2011): «Femtosecond X-ray protein nanocrystallography» en *Nature*, 470 (7332): 73-77.
- [5] SEIBERT, M. et al. (2011): «Single minivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser» en *Nature*, 470 (7332): 78-81.