

¿Cómo fabrico un material "nano"?

Manuel J. Pérez Mendoza

Departamento de Química Inorgánica
Universidad de Granada - E18071 Granada (Spain)

Resumen

¿Cuándo nos dimos cuenta de la verdadera importancia de la nanotecnología? ¿Qué potencial tienen realmente los nanomateriales? ¿De qué herramientas disponemos para poder fabricarlos y cómo podemos hacerlo? En las respuestas a estas preguntas están las razones que han hecho del desarrollo de la Nanotecnología (y, por ende, también de los Nanomateriales) una de las apuestas más ambiciosas de la Ciencia y la Tecnología en las últimas décadas. Este artículo, como primero de una serie que mostrará las posibilidades de los nanomateriales en diferentes aplicaciones, intenta reflexionar de una manera sencilla, al alcance de cualquier lector, acerca de estas y otras preguntas, de manera que se pueda dibujar una idea de cómo empezó la nanotecnología, donde nos encontramos en la actualidad y hasta dónde puede llevarnos, algo que en la actualidad es difícil de vislumbrar.

Abstract

When did we realize about the importance of Nanotechnology? What is the true potential of Nanomaterials? What are the tools that we have for their fabrication and how can we achieve that? The answers to these questions contain the reasons that have nowadays converted Nanotechnology and Nanomaterials into one of the biggest and most ambitious bets of Science and Technology. This article, as the first of a series that will address the different applications of nanomaterials, is an attempt to reflect on those questions in a way every reader can understand. The aim is to offer a picture about how the nanotechnology kicked off, what is the actual situation and what can we expect for the next future, something which is really difficult to envisage.

¿Qué es la Nanotecnología y qué son los Nanomateriales?

La primera pregunta que surge es qué entendemos realmente por Nanotecnología y, por ende, qué son, por tanto, los nanomateriales. Cualquier persona relacionada de alguna forma con este campo tiene muy claro lo que implica el término Nanotecnología, aunque definirlo de una manera inequívoca puede ser más complicado de lo que parece.

Según el Centro Común de investigación de la Comisión Europea (*Joint Research Centre. European Commission*), por «nanomaterial» se entiende: “un material natural, secundario o fabricado que contenga partículas, sueltas o formando un agregado o aglomerado y en el que el 50 % o más de las partículas en la granulometría numérica presente una o más dimensiones externas en el intervalo de tamaños comprendido entre 1 nm y 100 nm”. Por tanto, se pone el énfasis en el tamaño, más que en las propiedades u otras características, primando el que algunas de las dimensiones del material esté comprendida entre 1 y 100 nm. Una idea de la escala en la que nos movemos puede obtenerse de la Figura 1.

Por tanto, y siguiendo el sentido que tiene la palabra tecnología (del griego τέχνη [téchne], ‘arte’, ‘oficio’ y -λογία [-logía], ‘tratado’, ‘ estudio’), y que hace referencia al conjunto de recursos técnicos e instrumentos aplicados a un determinado sector, Wikipedia define la nanotecnología como “la manipulación de la materia con, al menos, una dimensión del tamaño de entre 1 a 100 nm”. De forma similar también la define la RAE: “Tecnología de los materiales y de las estructuras en la que el orden de magnitud se mide en nanómetros, con aplicación a la física, la química y la biología”.

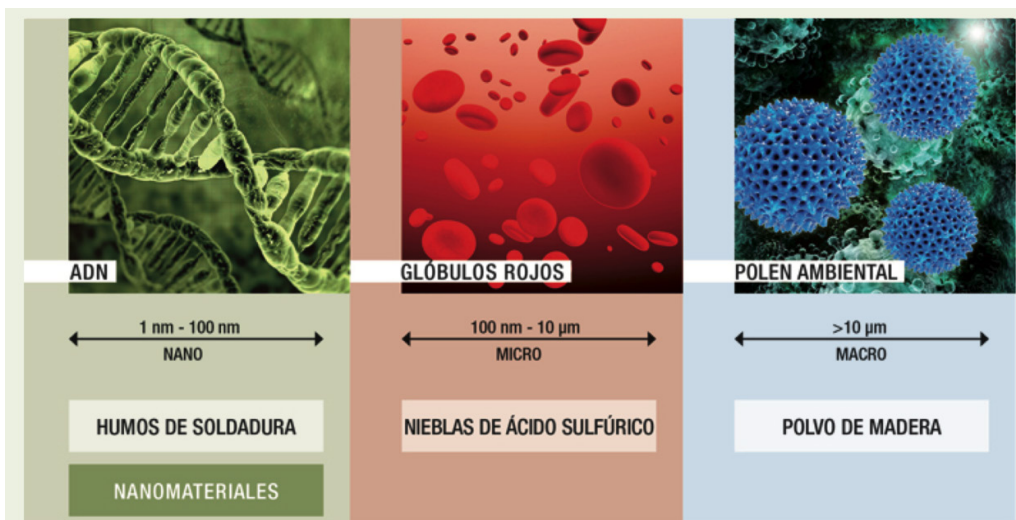


Figura 1. Esquema comparativo de las diferentes escalas de tamaño (Fuente: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Empleo y Seguridad Social).

En realidad, la Nanotecnología es mucho más que una mera cuestión de medidas. Es una manera diferente de entender y relacionarnos con las sustancias y los materiales, y con lo que podemos hacer con ellos. Una forma diferente de mirar hacia la materia. Pero, ¿qué es lo que hace tan “especial” y tan sustancial a la Nanotecnología en la actualidad dentro del campo científico, y desde cuándo tomamos conciencia de esa importancia?

En este sentido, quizás el primer investigador científico que fue capaz de ver el enorme potencial que se esconde en ese “nanomundo”, cuando bajamos a una escala cercana a la de las moléculas, fue el famoso físico Richard P. Feynman. Feynman, reconocido como una de las mentes más brillantes que haya dado el siglo XX y Premio Nobel de Física en 1965, avanzó de una manera visionaria las posibilidades de adentrarse en un nuevo campo de la Física, que él invitaba a explorar en una ya clásica conferencia impartida el 29 de diciembre de 1959, en la reunión anual de la *American Physical Society*, que tuvo lugar en el *California Institute of Technology (Caltech)* [1]. La conferencia, titulada “There is plenty of room at the bottom. An invitation to enter a new field of Physics” (algo así como “Hay mucho espacio ahí abajo. Una invitación a entrar en un nuevo campo de la Física”) se publicó en el número de febrero de 1960 de la revista *Caltech's Engineering and Science Magazine*, en lo que se ha considerado como la primera verdadera referencia al campo de la Nanotecnología. Aunque, ciertamente, la influencia de dicha conferencia en el desarrollo posterior pueda ser discutible, y Feynman deba compartir la “paternidad” de la Nanotecnología con el trabajo pionero de otros autores, como K. Eric Drexler, quien realizó la primera Tesis Doctoral del campo en 1991 (*Molecular Machinery and Manufacturing with Applications to Computation. MIT*), es indudable que la conferencia del Premio Nobel de Física contenía ideas revolucionarias que se adelantaron 30 años al comienzo del desarrollo de este campo.

En su disertación, Richard Feynman abordaba el problema que plantea el título de este artículo: las posibilidades de manipular y controlar cosas a una escala tremendamente pequeña, cercana a la de los átomos y las moléculas. Quizás, desde el punto de vista de la Química y la Ciencia de los Materiales, el punto más importante que ponía sobre la mesa era que no había (ni hay) ninguna ley de la Física que impida manipular átomos o moléculas de una manera controlada. Es decir, ponía el énfasis en la necesidad de intentar construir objetos a partir de los átomos, molécula a molécula, de una manera secuencial, lo que nos podría dar un control total sobre la estructura de la materia. Esto nos permitiría, hipotéticamente, poder construir cualquier sustancia permitida por las leyes de la naturaleza. Esa idea de poder manipular los átomos como “si pudiéramos cogerlos con pinzas” y disponerlos de la manera que queramos (respetando siempre las leyes de la Química) sigue siendo uno de los mayores anhelos de la Nanotecnología para poder abrir un sin número

de puertas que den paso a todo un nuevo campo de soluciones tecnológicas, y cada vez estamos más cerca de poder lograrlo (véase, por ejemplo, el vídeo “A Boy and His Atom” donde, en 2013, científicos de *IBM Research* fueron capaces de crear una película manipulando moléculas de monóxido de carbono sobre un substrato de cobre a 5 K de temperatura mediante un microscopio de efecto túnel) [2].

Otro de los planteamientos visionarios de Feynman se basaba en usar la Biología como modelo para optimizar el almacenamiento de información. En concreto, usar grupos de átomos para guardar “bits” de información de manera similar a como el ADN puede guardar toda la información relativa a un ser vivo en cada una de sus células: “*Toda esta información – si tenemos ojos marrones, si pensamos, o si en el embrión la mandíbula debe desarrollarse primero con un pequeño agujero en un lado para que más tarde un nervio pueda crecer a través de él – toda esa información está contenida en una pequeña fracción de la célula en la forma de cadenas de ADN en las que aproximadamente 50 átomos son suficientes para un “bit” de información acerca de la célula*”. Esto sigue siendo otro de los grandes objetivos perseguidos por la Nanotecnología en la actualidad: la posibilidad de usar sistemas cuánticos para gestionar, de una manera infinitamente más eficiente y más rápida, muchísima más información.

No obstante, los comienzos de este campo, a pesar de lo prometedor y del empeño de Feynman, se demoraron más de treinta años, hasta la aparición de la mencionada Tesis Doctoral de K. Eric Drexler en el MIT en 1991, que, por cierto, tuvo que presentar por la Escuela de Arquitectura y Planeamiento, ya que el Departamento de Energía Eléctrica y Ciencia de la Computación no aprobó el plan de estudios que presentó Drexler. Esa Tesis Doctoral se publicó al año siguiente de forma prácticamente íntegra y se constituyó en un libro clásico de referencia [3], donde se recogían las bases del nuevo campo “*Molecular Nanotechnology (MNT)*”. Eso sí, a partir de esos primeros años de la década de los 90, y con el descubrimiento de nuevos materiales como los fullerenos (por Richard Smalley, Harry Kroto y Robert Curl en 1985, Premio Nobel de Química en 1996) y los nanotubos de carbono (por Sumio Iijima en 1991), o ya más tarde con el grafeno (descubierto por Andre Geim y Konstantin Novoselov en 2004, Premio Nobel de Física en 2010) el campo de la Nanotecnología y los nanomateriales han ocupado un papel central en el desarrollo de la Ciencia en el siglo XXI.

Pero ¿por qué es tan importante el poder controlar la estructura de los materiales a nivel molecular y aprender a manejarnos a esa escala tan pequeña? Pues la respuesta ya la daba Feynman en su famosa conferencia, hace más de 60 años: porque las leyes que imperan a esa escala son totalmente distintas a las que tenemos en nuestro mundo macroscópico, y al ser las propiedades de las sustancias totalmente diferentes, nos encontramos ante un mundo de nuevas posibilidades para encontrar nuevas soluciones. En palabras del propio Feynman,

“Cuando llegamos al mundo muy, muy pequeño, tenemos un montón de cosas que ocurrirían y que representan nuevas oportunidades para el diseño. Los átomos, a pequeña escala, no se comportan de forma parecida a lo que nos encontramos a gran escala, porque tienen que satisfacer las leyes de la mecánica cuántica. Así que, conforme bajamos allí abajo y jugueteamos con los átomos, estamos trabajando con leyes diferentes, y podemos esperar conseguir cosas diferentes”. Es ahí donde reside el verdadero poder y la importancia de la Nanotecnología, en poder usar la mecánica cuántica y las propiedades atómicas a escala nanométrica para encontrar nuevas soluciones tecnológicas a los problemas que nos plantea una sociedad que cada vez demanda más eficiencia con menor consumo de recursos.

Cómo fabricar Nanomateriales

A nadie se le escapa que las brillantes propuestas de Richard Feynman en aquella conferencia presentan importantes dificultades a la hora de llevarse a la práctica, a pesar de que hemos avanzado un enorme camino desde entonces. La idea de prácticamente poder manipular los átomos y las moléculas a nuestro antojo, para poder construir materiales a una escala “nano” tan pequeña que, para esos materiales, rijan leyes cuánticas distintas a las que imperan en nuestro mundo macroscópico, no puede ser aplicada directamente. Sacar partido a dispositivos fabricados a esa escala, y que nos ayuden a resolver los desafíos tecnológicos a los que nos enfrentamos, tampoco es una cuestión sencilla.

Básicamente tenemos dos aproximaciones para acercarnos al problema de la síntesis de nanomateriales y la fabricación de nanodispositivos con ellos. Por un lado, Feynman hablaba ya en su disertación sobre la posibilidad de fabricar dispositivos cada vez más pequeños partiendo de otros a mayor escala siguiendo un proceso de miniaturización sucesiva: construir sistemas que pudieran construir otros sistemas más pequeños, y así sucesivamente. Ese “ejercicio mental” que hizo Feynman para poder vislumbrar nuevas estrategias de fabricación de dispositivos a menor escala es, en su principio básico, análogo a lo que ahora denominamos el modelo de fabricación **Top-Down**, usado actualmente en gran parte de la industria electrónica y que incluye técnicas como la fotolitografía, el “nano-imprinting”, litografía con haz de electrones o con rayos X, etc.

Por otro lado, podríamos pensar en la estrategia contraria. Si conseguimos “controlar” los procesos químicos con ese nivel de precisión, podríamos ir construyendo los nanomateriales y los nanodispositivos átomo a átomo y molécula a molécula, como quien va construyendo un objeto de Lego: ahora enlace un átomo aquí, ahora pongo unas moléculas allá, ahora evaporo otras, etc. Esto nos llevaría a producir un nanodispositivo totalmente a escala nanométrica, y que cumpliera con el diseño que nos hubiéramos impuesto previamente. Si la

anterior estrategia la hemos llamado Top-Down, evidentemente esta podría llamarse perfectamente **Bottom-Up**. También Feynman anticipaba ideas en este sentido durante su charla, hablando de evaporaciones y deposiciones sucesivas con conductores y aislantes, para ir obteniendo así los dispositivos deseados. De hecho, puede considerarse que dicha charla es el origen del término Bottom-Up. Efectivamente, algunas de las técnicas que se pueden usar para esta forma de diseño de nanomateriales y nanodispositivos bottom-up son la deposición química en fase vapor (CVD), el uso de plasmas, el uso de técnicas sol-gel o incluso el autoensamblaje molecular.

Las técnicas top-down han progresado enormemente y ofrecen un control sin precedentes para llevar a cabo diferentes geometrías en el diseño de nanodispositivos, pero están limitadas en muchas ocasiones a sistemas planares y estructuras periódicas, además de contar con el hándicap de los costosísimos equipos y sistemas necesarios, así como los complejos ambientes que requieren, como salas limpias, etc. Por otro lado, las técnicas bottom-up ofrecen una mayor versatilidad (sobre todo desde el punto de vista químico), pero sufren todavía de falta de control en determinados procesos, y es necesario avanzar en la comprensión de cómo se generan las estructuras supramoleculares, y en su control.

Como puede verse, ambas aproximaciones al problema tienen sus ventajas e inconvenientes, pero están lejos de ser excluyentes. De hecho, uno de los nanomateriales más importantes, el grafeno, puede sintetizarse tanto por métodos top-down (por exfoliación mecánica o química), como por métodos bottom-up (mediante CVD). Más bien al contrario, quizá el futuro más interesante de la fabricación de nanodispositivos pasa por una inevitable combinación de los dos tipos de técnicas de una manera efectiva y elegante [4,5]

Métodos Top-Down

Las técnicas de top-down aplicadas a la nanotecnología llevan ya años usándose por parte de la industria electrónica, por ejemplo, para la fabricación de circuitos integrados y chips de manera industrial usando obleas de silicio y diferentes técnicas para “imprimir” los patrones adecuados en el metal semiconductor. Las técnicas utilizadas van desde la micro-impresión (“printing”), recubrimientos (“precise coating”) o diferentes formas de litografía, como la fotolitografía, usando diferentes materiales plásticos y polímeros como materiales fotosensibles y máscaras. Básicamente, estas técnicas persiguen obtener un material sensible a la luz (o que pueda ser degradado de otra forma sencilla) depositado sobre un substrato semiconductor, sobre el que colocamos una máscara que impide a la luz incidir en determinadas zonas. De esta forma, se consigue que sólo queden expuestas las zonas del substrato metálico que nos interesen. En esta forma de trabajar



Figura 2: Representación de ambas aproximaciones de fabricación de nanomateriales y dispositivos. Figuras de Isla de Pascua reales talladas a partir de grandes bloques de piedra (top-down) y las mismas figuras construidas con bloques de Lego (bottom-up).

se basan la mayor parte de sistemas de circuitos integrados que pueblan los chips de los millones de aparatos electrónicos que nos rodean.

Otro ejemplo de la aproximación top-down es la fabricación de elementos como “quantum dots”. Un tipo de estos *quantum dots* son los nanomateriales de carbono que forman los “carbon dots (CDs)”. Estos CDs están formados por un interior de átomos de carbono rodeados de una capa que los pasiva y que suele estar funcionalizada con grupos hidroxilo, carboxilo o amino. Esta funcionalización externa es la que les da las características químicas adecuadas para interactuar con el medio, tales como sus características hidrofílicas. Este tipo de sistemas tienen unas características muy interesantes como fluorescencia, buenas propiedades electrónicas, inercia química o buena biocompatibilidad. Todas estas características hacen que puedan ser buenos candidatos para aplicaciones como la fabricación de biosensores. En la fabricación top-down, estos sistemas se pueden generar a partir de estructuras carbonosas microscópicas (grafito o nanotubos de carbono), mediante técnicas de eliminación de material tanto físicas como químicas, hasta llegar a la escala nanométrica deseada. Entre estas técnicas tenemos arco eléctrico, ablación láser o simple oxidación química [6].

Métodos Bottom-Up

En general, puede decirse que la mayoría de los procesos que usan la Ciencia y la Electrónica para fabricar a una escala cada vez más pequeña dependen de “grandes” instrumentos y complejos entornos de trabajo, como las cámaras de vacío y las “salas limpias”. Este tipo de equipamiento y de recursos es complejo y costoso, impidiendo a pequeñas compañías y laboratorios el desarrollo y la investigación en este campo. No deja de ser irónico de alguna forma que, para poder fabricar materiales y dispositivos cada vez más pequeños, sea necesario depender de sistemas tan “grandes”.

Otro inconveniente que tienen los sistemas de la aproximación top-down que ya se han comentado es la poca flexibilidad, así como la dificultad que tienen para adaptarse a cambios o necesidades cambiantes. Sin embargo, otro tipo de procesos que usan la aproximación inversa (bottom-up), como

métodos de síntesis usando “templates” (o moldes), procesos de electrodeposición o deposición química de fase vapor (CVD, Chemical Vapor Deposition), así como técnicas de auto-ensamblaje molecular, pueden ofrecer enormes oportunidades para explorar nuevas formas de fabricación a nano escala. Por la importante influencia que tiene el control de los procesos químicos involucrados en estos procesos, la técnica de bottom-up ofrece grandes alternativas y resulta enormemente atractiva para los químicos trabajando en el área de los nanomateriales.

En el caso de los conocidos como “templates”, las funciones de estos moldes son dos. En primer lugar, facilitan que se pueda reproducir de manera eficiente la estructura que se quiere conseguir y hacen el papel de “esqueletos” a la hora de organizar las diferentes funciones de un dispositivo. En segundo lugar, sirven para conectar el dispositivo con el mundo macroscópico, es decir, sirven como contacto. Se podrían identificar, de una manera básica y simplificada, 3 pasos en los procesos de síntesis usando templates: (1) la generación de las unidades de construcción, o “building blocks”, (2) el ensamblaje de dichas unidades de construcción en una arquitectura funcional que le dé sentido al dispositivo, y (3) la fabricación y el control del contacto que nos permita su uso a nivel macroscópico [7].

Otra técnica que sigue la misma idea de obtener materiales “de abajo a arriba”, molécula a molécula, o incluso átomo a átomo, para generar estructuras supramoleculares, y que está llamada a convertirse en una parte fundamental de la fabricación de nanomateriales, es lo que se denomina como auto-ensamblaje molecular (“molecular self-assembly”). En realidad, no es más que intentar imitar y controlar lo que sucede por todas partes en el mundo natural, donde los lípidos se auto-organizan para formar gotas de aceite en el agua, o los polipéptidos de hemoglobina se unen para formar una proteína de hemoglobina funcional, o la organización micelar de innumerables sistemas, por poner solamente algunos ejemplos. Este auto-ensamblaje molecular está controlado por fuerzas débiles, no covalentes, como los enlaces de hidrógeno, interacciones electrostáticas o fuerzas de van der Waals. Estas interacciones, de forma aislada, son prácticamente insignificantes, pero, de forma combinada, gobiernan la estructura conformacional de todas

las macromoléculas biológicas y condicionan la interacción de éstas con otras moléculas. Es en esa estructura conformacional donde reside gran parte de la funcionalidad de estos sistemas a nivel biológico. Es factible usar la naturaleza como modelo para imitar los principios de esas estructuras moleculares y explotar el auto-ensamblaje molecular para la síntesis de materiales sintéticos totalmente nuevos. Un ejemplo podría ser el usar proteínas, péptidos y lípidos para obtener biomateriales estructurados, usar polipéptidos para unir diferentes compuestos inorgánicos generando nanoestructuras funcionales, o la combinación de ligandos orgánicos y átomos o iones metálicos para generar nuevos tipos de sólidos porosos [8–10]. Biomaterials are generated by stripping down a complex entity into its component parts (for example, comparing a virus particle down to its capsid to form a viral cage).

Otra manera de usar este auto-ensamblaje bottom-up para generar nanoestructuras funcionales es la fabricación de los ya comentados “carbon dots” a partir de moléculas precursoras sencillas (en contraposición a lo expuesto más arriba para las técnicas top-down). Dichos precursores se ionizan usando diferentes fuentes energéticas como tratamientos con plasma, microondas, o mediante ultrasonidos (o incluso simplemente por vía termal o hidrotermal) para generar iones, radicales y electrones que se re-organizan generando clusters que dan lugar a los carbon dots [6].

El ejemplo de los nanomateriales de carbono

La evolución que han sufrido los materiales de carbono en las últimas décadas es un ejemplo claro de cómo ha cambiado nuestra forma de mirar y de entender los materiales, e incluso de relacionarnos con ellos.

Antes de 1985, se entendía que la estructura de los materiales carbonosos estaba relacionada con las formas alotrópicas del grafito y el diamante, totalmente diferentes en cuanto a apariencia y propiedades debido a su diferente forma de enlazarse los átomos de carbono entre sí. El 4 de septiembre de 1985, los investigadores Richard Smalley, Harry Kroto (que pertenecía a la Universidad de Sussex) y Robert Curl, trabajando en la Universidad de Rice en la formación de clusters de átomos evaporados por láser, descubrieron, a partir de un pico extraño en el espectro de masas, una extraordinaria estructura de 60 átomos de carbono hasta entonces jamás observada. No está muy claro quien de los tres fue capaz de resolver el puzzle y dar con dicha estructura. Según Robert Curl: “Richard estaba seguro de que se le había ocurrido a él, Harry estaba seguro de que se le había ocurrido a él, y yo estaba seguro de que no se me había ocurrido a mí”. En cualquier caso, resolviera el problema Smalley o Kroto, la estructura, la más simétrica jamás encontrada hasta entonces para una molécula, coincidía exactamente con la de un balón de fútbol formado por 20 hexágonos y 12 pentágonos. Decidieron llamarle Buckminsterfullerene en honor

del arquitecto Buckminster Fuller, quien había ideado unas cúpulas geodésicas de estructura similar. El nombre sí parece que fue idea de Harry Kroto. El descubrimiento les valió el Premio Nobel de Química de 1996.

El nacimiento de los fullerenos fue el pistoletazo de salida para mirar a las estructuras carbonosas de una manera diferente y, a partir de entonces, el descubrimiento de las diferentes formas en que pueden organizarse átomos de carbono para originar nuevos nanomateriales ha generado uno de los campos de desarrollo más notables de la Nanotecnología.

El segundo hito fue el descubrimiento en 1991, generalmente atribuido a Sumio Iijima, de los nanotubos de carbono. Unos tubos tremendamente largos (en lo que respecta a la relación de su longitud frente a su diámetro, que es de unos pocos nanómetros) formados por átomos de carbono unidos de forma análoga a como se unen en el grafito (siguiendo un patrón hexagonal), y, generalmente, con medio fullereno a modo de tapón en los extremos. La enorme resistencia de estos materiales proporcionalmente a su tamaño, así como unas propiedades electrónicas totalmente fuera de lo común, los han convertido en una gran promesa para encontrar soluciones tecnológicas avanzadas en muchos ámbitos de la nanotecnología. Estas van desde su uso como sensores químicos, hasta la fabricación de nanotransistores, pasando por su uso para el transporte de fármacos en sistemas biológicos.

El tercer hito llegó en 2004, cuando Andre Geim (Universidad de Manchester) y su estudiante de doctorado, Konstantin Novoselov, descubrieron la existencia del grafeno. Se trataba de un material compuesto por una sola lámina de átomos de carbono, que se creía que no podía tener existencia física, y que presenta una serie de propiedades optoelectrónicas que, aunque predichas por algunas teorías, no se habían observado en ningún otro material. Lo curioso es que la estructura de la lámina de grafeno, es decir, la ordenación de los átomos en esas dos dimensiones, es la misma que en las láminas que forman el grafito (como ya hemos dicho, una de las formas clásicas del carbono, que conocemos desde antiguo). De nuevo, el hecho de analizar el material a una escala nanoscópica (en este caso equivale a separar una lámina de las que forman el grafito de la influencia de las otras láminas para que tenga entidad propia) permite vislumbrar una serie de propiedades que pueden abrir innumerables puertas a soluciones tecnológicas que hasta ahora solo existen en la ciencia ficción. La llegada del grafeno ha revolucionado el campo de los materiales 2D, poniéndolos en el foco del desarrollo de los nuevos nanomateriales más prometedores. Nuevos campos de aplicación, como la spintrónica (donde se usa el spin de los electrones como portador de información en sistemas de computación de alta velocidad y bajo consumo), pueden revolucionar el mundo de la electrónica tal y como lo conocemos hoy día, y en

ellos es muy probable que materiales derivados del grafeno tengan un papel central [11]. Andre Geim y Kostya Novoselov recibieron el reconocimiento a tan importante descubrimiento con el Premio Nobel de Física de 2010.

Conclusión

60 años después de aquella conferencia de Richard Feynman, el campo de la Nanotecnología y los Nanomateriales se encuentran justo donde él predijo. El poder controlar, a una escala cercana a la de los átomos y las moléculas, los procesos de fabricación de nuevos materiales y dispositivos, es quizá la única alternativa posible para poder seguir dando respuestas a las demandas de una sociedad que consume tecnología a un ritmo desbocado. El ser capaces de utilizar las diferentes propiedades que tienen los materiales en el “mundo nano”, es decir, donde gobiernan las leyes de la mecánica cuántica que no operan en nuestro mundo macroscópico, puede ser la única oportunidad para abrir la puerta a tecnologías más eficientes, más limpias y que nos rescaten de la insostenibilidad del modelo actual. Pero todavía queda mucho camino, todavía “sigue habiendo mucho sitio ahí abajo”.

Bibliografía

[1] Feynman R.P. There's plenty of room at the bottom, *Resonance* 2011; 16: 890-905. doi:10.1007/s12045-011-0109-x.

[2] A Boy And His Atom: The World's Smallest Movie, YouTube, 2013.

[3] *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation*. K.E. Drexler. John Wiley & Sons Inc, New York, 1992.

[4] Liu L., Wang Y., Sun F., Dai Y., Wang S., Bai Y., Li L., Li T., Zhang T., Qin S. Top-down and bottom-up strategies for wafer-scaled miniaturized gas sensors design and fabrication, *MICROSYSTEMS Nanoeng* 2020; 6:31. doi:10.1038/s41378-020-0144-4.

[5] Dietrich K., Zilk M., Steglich M., Siefke T., Huebner U., Pertsch T., Rockstuhl C., Tuennermann A., Kley E.-B. Merging Top-Down and Bottom-Up Approaches to Fabricate Artificial Photonic Nanomaterials with a Deterministic Electric and Magnetic Response, *Adv. Funct. Mater.* 2020; 30: 1905722. doi:10.1002/adfm.201905722.

[6] Iravani S., Varma R.S. Green synthesis, biomedical and biotechnological applications of carbon and graphene quantum dots. A review, *Environ. Chem. Lett.* 2020; 18: 703–727. doi:10.1007/s10311-020-00984-0.

[7] Wade T.L., Wegrowe J.E. Template synthesis of nanomaterials, *Eur. Phys. JOURNAL-APPLIED Phys.* 2005; 29: 3–22. doi:10.1051/epjap:2005001.

[8] Zhang S.G. Fabrication of novel biomaterials through molecular self-assembly, *Nat. Biotechnol.* 2003; 21: 1171–1178. doi:10.1038/nbt874.

[9] Sarikaya M., Tamerler C., Jen A.K.Y., Schulten K., Baneyx F. Molecular biomimetics: Nanotechnology through biology, *Nat. Mater.* 2003; 2: 577–585. doi:10.1038/nmat964.

[10] Ratner M., Ratner D. *Nanotechnology: A Gentle*

Introduction to the Next Big Idea, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.

[11] Avsar A., Ochoa H., Guinea F., Özyilmaz B., van Wees B.J., Vera-Marun I.J. Colloquium: Spintronics in graphene and other two-dimensional materials, *Rev. Mod. Phys.* 2020; 92: 21003. doi:10.1103/RevModPhys.92.021003.