

Nanotecnología, ¿el final de un camino o el comienzo de otro?

Por qué la Nanotecnología ha despertado tantas expectativas?

a) *El origen*

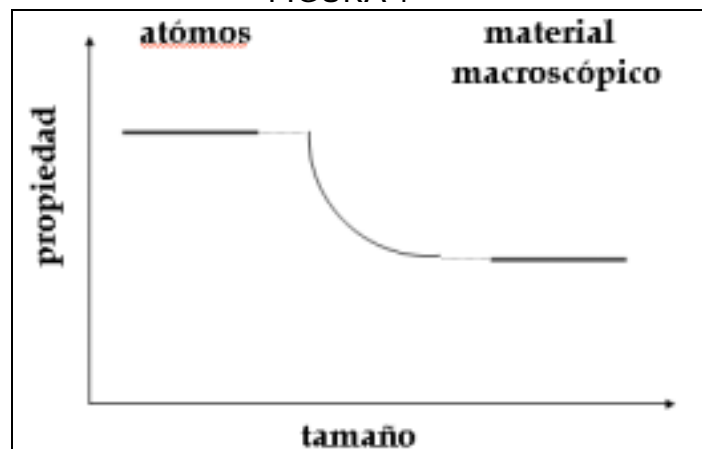
Parece como si de repente, en estos comienzos del nuevo siglo XXI, todo el mundo hablase de nanotecnología, es decir de saber, conocer y aplicar la materia a nivel nanométrico, o lo que es prácticamente lo mismo, a nivel atómico, pues en unos nanómetros (nm) cabrían solamente unas cuantas docenas de átomos o moléculas. Sin embargo, esto no es nuevo. Hace ahora exactamente un siglo que esas mismas preguntas sobre los átomos y moléculas representaron el advenimiento de un nuevo concepto de la ciencia, la tecnología y, por añadidura, de la misma sociedad. Hubieron de pasar, al menos, unos 30 - 40 años para que esas preguntas tuvieran una adecuada respuesta, de forma que podemos decir que, a mediados del siglo pasado, se consideraba que se conocía ya el comportamiento de los átomos y moléculas individuales. Y por lo tanto, se podía predecir o al menos explicar el comportamiento de la materia a nivel atómico. Si eso es así, es decir, si ya sabemos como se comportan los átomos o las moléculas individualmente, mediante la estadística (mecánica estadística, deberíamos más propiamente decir), podremos también predecir el comportamiento de un conjunto de átomos o moléculas. Como existen diferentes tipos de "partículas" (átomos, fotones, electrones, etc.) y éstos pueden ser discernibles, no discernibles, ocupar varios la misma "caja" o solamente uno por caja, etc., es evidente que debemos utilizar distintos tipos de estadística, pero -al final- sabremos también cómo es el comportamiento de un conjunto de esas partículas. Claro está, para ello debemos proceder a la resolución de complicadas ecuaciones (cálculos mecanocuánticos) y eso sólo ha sido posible -en gran medida- gracias al advenimiento de los ordenadores. Lo que ha ocurrido entonces, desde mediados del siglo pasado, es que los cálculos han permitido llevar a cabo la resolución de muchos de los problemas que se plantearon durante la primera mitad por una serie de brillantes y magníficos científicos. Parecería entonces que al comienzo de este siglo se hubiera llegado al *final* de un largo y apasionante *camino*. ¿Qué hay entonces de nuevo en la nanotecnología, para que se haya despertado ese inusitado interés?. La razón podemos verla inmediatamente: la estadística funciona muy bien cuando se trabaja con un conjunto muy grande de unidades (N) y sería muy precisa solamente en el límite $N \rightarrow \infty$. Y eso es lo que ocurre en un trozo de oro (Au), digamos por ejemplo, en un gramo (1g). En ese gramo de oro hay un número elevadísimo de átomos, del orden de lo que se denomina el Número de Avogadro ($N_A = 6,02 \times 10^{23}$). Podemos pues, con buen criterio, suponer que el número de átomos que tenemos en 1g (aprox. N_A) es prácticamente como si fuera infinito. Entonces, conociendo el comportamiento de un átomo de Au y aplicando la estadística, podemos conocer el comportamiento (es decir, las propiedades físicas y químicas) de ese trozo de oro. Pero, ¿qué pasa cuando ese número de unidades

con las que trabajamos es un número muy reducido?. La estadística ya no la podemos utilizar. Los cálculos mecanocuánticos tampoco podemos –de forma fácil y sin aproximaciones- extenderlos a un conjunto de unas cuantas docenas de átomos. Nos encontramos entonces de nuevo en un terreno nanoscópico “desconocido” y, por desconocido, apasionante.

b) La razón

A pesar de lo antes dicho, surge todavía la cuestión ¿es que cabría esperar algo nuevo en esa zona nanoscópica?. Está claro que las propiedades individuales de cada átomo (por ej. átomo de Au) y las colectivas (por ej. un trozo de Au) no tienen por qué coincidir y, de hecho, se ha visto que no coinciden, pero ¿no cabría esperar, tal como se muestra en la figura 1, que las propiedades convergieran de forma suave o monótona de un caso (atómico y mecanocuántico) al otro (macroscópico y normalmente clásico)?.

FIGURA 1

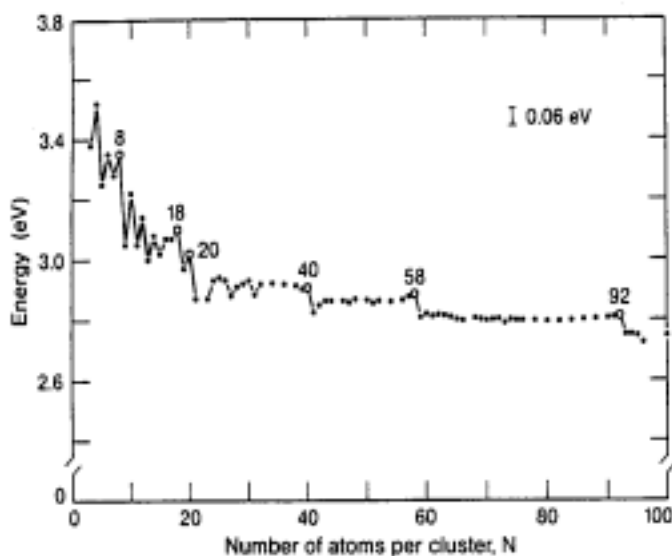


Muchas controversias surgieron entorno a este tema del paso cuántico-clásico o atómico-macroscópico en el siglo pasado. Después de estos debates, la opinión generalizada fue que debía existir una transición monótona entre ambos extremos y la única incógnita, de menor importancia, era en qué tamaños ocurría dicho tránsito. En ese caso, muy poca importancia tendría el estudio de esa zona de transición. Y, por ello, muy pocos fueron los esfuerzos dedicados al estudio de esa zona. Hubo, sin embargo, alguna voz discrepante, como la de Feynman, en su famosa y ya, por tantas veces citada, no menos importante frase, “there’s plenty of room in the bottom”, que pronunció en su alocución del 29 de diciembre de 1959 para la Sociedad Americana de Física. Y añadía, ...”in the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1960 that anybody began seriously to move in this direction...”. La dirección a la que alude Feynman es precisamente la de ir hacia esa zona de tránsito de la que hablamos. Y, parafraseando a Feynman, cabría preguntarse, por qué desde los años 60 no se ha tratado de ir en esa dirección y ha habido que esperar casi 40 años para que nos diéramos cuenta de la importancia de ese mundo nanométrico. La respuesta a ambas preguntas, modestamente creo yo, es que no hubo un mayor interés por esa zona nanométrica, no sólo porque no se dispusiera en aquellos momentos de los medios técnicos necesarios para manipular la materia a esas escalas (hecho, por lo demás bien cierto), sino también, porque nadie (o casi nadie) esperaba que hubiera nada sorprendente en esa zona de transición.

Los hechos

Las últimas décadas del siglo pasado fueron acumulando una serie de hechos experimentales que indicaban que las cosas no eran tan simples como puede reflejar el esquema de la figura 1. A modo de ejemplo, en la figura 2 mostramos como varía el potencial de ionización en función del tamaño (número de átomos del material)

FIGURA 2



Observamos la existencia de una serie de máximos que nos indican que hay algunos tamaños (“números mágicos”) que son mucho más estables que otros. Hoy ya sabemos que esos números (2, 8, 10, 18, 20,...) se corresponden con la existencia de capas completas, algo análogo a la estabilidad de los gases nobles, pero esto nos indica ya que esa zona “de abajo” –como muy bien intuía Feynman- puede ser mucho más rica y atractiva en comportamientos que una simple “zona de tránsito” entre lo micro y macroscópico.

La nanotecnología como inicio de un nuevo camino

La superficie o interfase

Nos encontramos, pues, no al final sino al **inicio** de un nuevo y apasionante **camino** donde nos podemos encontrar todavía con muchas sorpresas. Y hay otros hechos que aún no hemos mencionado que nos hacen pensar así, como la gran superficie o interfase que presentan estos nuevos nanomateriales. Para una partícula esférica de cualquier material, la relación superficie/volumen (S/V) varía inversamente con el radio de la partícula ($S/V \sim r^2/r^3 = 1/r$), lo que implica que una partícula de unos pocos nanómetros de tamaño, tiene una gran superficie. Siguiendo con nuestro ejemplo del oro, una partícula de aproximadamente 1,5 nm tiene –¡nada menos!- que el 75% de sus átomos colocados en su superficie. Es decir, la interacción de esa partícula con el medio en el que se encuentra es de extraordinaria relevancia para sus propiedades. Esto es un hecho al que no estamos acostumbrados. Las propiedades de un trozo de oro (por ejemplo, su resistencia eléctrica, sus propiedades diamagnéticas, su brillo, etc.) no dependen en absoluto de si lo tenemos colocado sobre otra superficie metálica o un plástico o si lo tenemos suspendido en el vacío. Sin embargo, una nanopartícula de oro de 1,4 nm

presenta propiedades muy diferentes dependiendo de qué es lo que tiene en su entorno. Así, muy recientemente se ha dado a conocer que, cuando nanopartículas de oro del tamaño mencionado se ponen en contacto con moléculas de tior, las partículas -que en principio se esperaba fueran diamagnéticas-, se comportan como si fueran ferromagnéticas, convirtiéndose así en pequeños imanes y asemejándose más, ese trocito pequeño de oro de tamaño nanométrico, a un compuesto magnético –como pudiera ser la magnetita- que a su “pariente mayor”, el trozo de oro macroscópico. Este es un ejemplo que nos muestra con claridad cómo las propiedades de un material, en esta zona intermedia, pueden cambiar drásticamente con un mínimo cambio en la superficie del material. Y ya podemos entonces llevar adelante nuestra imaginación y pensar que estos materiales son de por sí unos sensores de extremada sensibilidad. El cambio de unas pocas moléculas en la superficie de una partícula de oro, como la comentada, lleva a un cambio drástico en sus propiedades. La detección de **una sola molécula** está evidentemente ya al alcance de estos nanomateriales, con la repercusión tecnológica que ello conlleva. Y esto no es más que un pequeño y muy particular ejemplo de las posibilidades que estos nuevos nanomateriales pudieran ofrecer. Puede entonces realmente hablarse de una nueva revolución tecnológica que está esperándonos ya a la vuelta de este recién comenzado siglo XXI.

La preparación de los nanomateriales

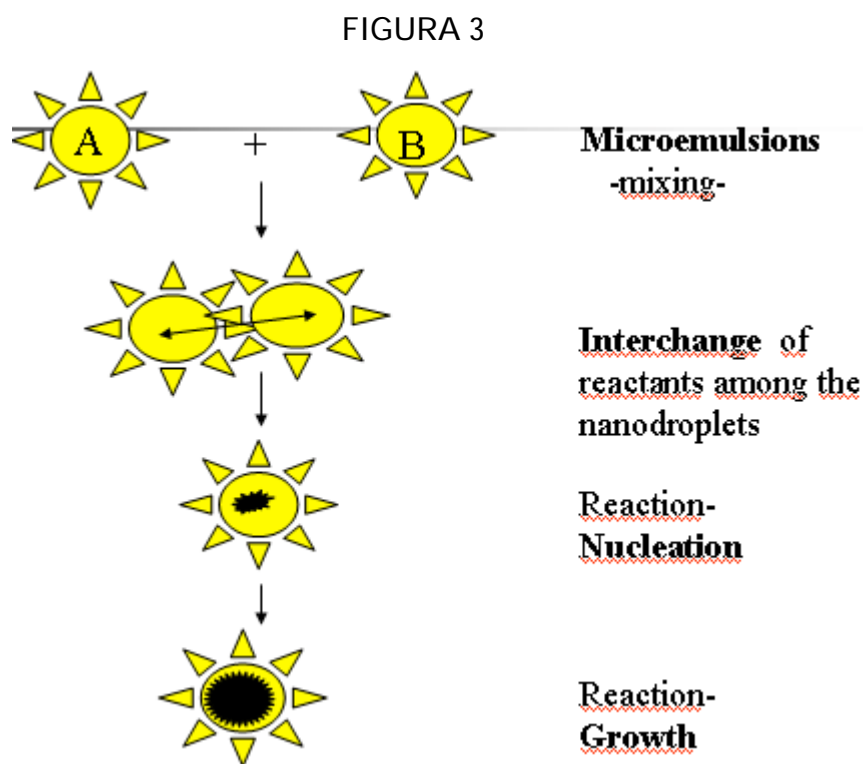
¿Cómo se puede conseguir preparar una partícula de unos pocos nanómetros, como por ejemplo, la comentada anteriormente de Au de 1,5 nm?. Podría parecer muy difícil y costosa la operación, de forma que aunque las propiedades de tales materiales fueran muy atractivas, el coste económico y de esfuerzos empleado para tal fin hiciera estos sistemas poco útiles en la práctica. Quizás eso fue así en los comienzos de este campo, empleándose sofisticados y muy caros métodos físicos, pero en la última década del siglo pasado se pudo comprobar que existen métodos muy sencillos –fundamentalmente químicos- que pueden ser utilizados de forma eficaz y barata para tal fin. Aquí, mencionaremos a modo de ejemplo, el método de las microemulsiones, que es –por otra parte- el que mejor conocemos.

Aceite y agua no se mezclan, pero si lo hacen en presencia de un surfactante o agente tensioactivo, que no es más que una molécula que posee dos partes bien diferenciadas: una hidrófila o polar y otra hidrófoba o apolar. Los detergentes, en particular los jabones, son ejemplos típicos de estas sustancias. Todos conocemos por experiencia que, cuando tenemos una gran cantidad de aceite y echamos sobre él una pequeña cantidad de agua, se forman gotas de agua en ese aceite. Si a esa mezcla se le añade un surfactante adecuado, se puede observar como las gotas “desaparecen” y pareciera que el agua se disuelve en el aceite. Si observamos, sin embargo, con más cuidado la mezcla veríamos que en realidad se forman minúsculas gotas de agua en el aceite. El tamaño de estas gotas es del orden de los nanómetros y, lo que es más interesante, el tamaño de las gotas puede variarse al hacerlo la relación surfactante/agua (R). En la tabla 1 se pueden ver los tamaños de gota que se consiguen con un surfactante típico, como es el denominado Aerosol-OT (AOT), utilizando heptano como fase orgánica, al variar dicha relación R.

TABLA 1

| $r/nm = 1.5 + 0.175 R$ | $R=[W]/[S]$ | | | |
|------------------------|-------------|-----|-----|-------|
| R | 1 | 5 | 10 | 20 |
| $d=2r$ | 3.4 | 4.8 | 6.5 | 10 nm |

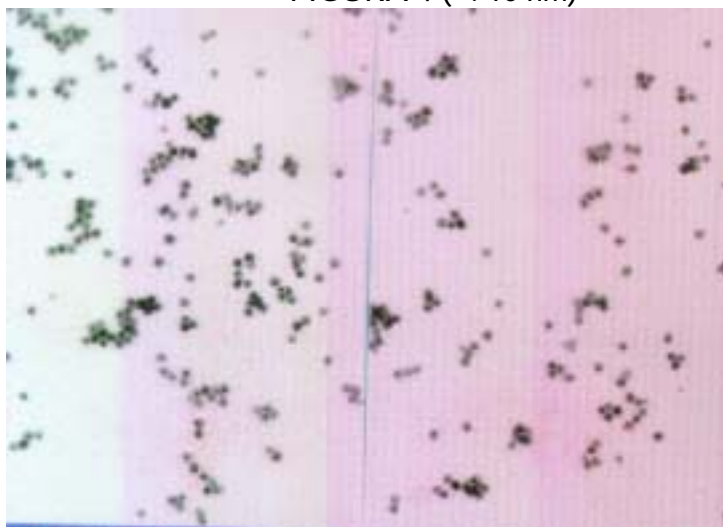
Por ser tan pequeñas las gotas, no se observa ninguna dispersión de luz en el sistema y por eso la disolución es totalmente transparente. Schulmann denominó a esa dispersión de gotas microemulsión, porque consideraba que las gotas eran microscópicas, aunque vemos que, en realidad, hubiera sido preferible denominarla nanoemulsión, pero el término quedó así establecido. Pues bien, en los años 80 se pensó en la posibilidad de utilizar esas pequeñas gotas como "nanoreactores", de forma que con su tamaño se pudiera controlar el tamaño de las partículas que allí se formasen. En la figura 3 podemos ver un esquema de esta idea.



En primer lugar, se disuelven los reactivos adecuados (A y B) para formar el material deseado en sendas microemulsiones. Por ejemplo, para sintetizar nanopartículas (NP) de oro, una sal de oro (A) y un reductor (B) se disuelven por separado en el agua de dos micromulsiones. A continuación se mezclan ambas microemulsiones. La continua colisión que existe entre las gotas de la microemulsión, debida al movimiento browniano que estas experimentan (análogo al movimiento que observó Brown en partículas de polen dispersas en agua, de ahí el nombre), conduce a que en muy poco tiempo –en realidad, casi instantáneamente- los reactivos se encuentren estadísticamente distribuidos dentro de las gotas y, por lo tanto, pueden ya comenzar a reaccionar dentro de esos nanoreactores. Tal como se indica en el esquema, inicialmente se forman unos pequeños núcleos (de 2 a 5 átomos), a partir de los cuales se forman finalmente las partículas que dejan de crecer, bien por límite de espacio, bien porque se agoten los

reactivos dentro de las nanogotas. En principio, pues, controlando el tamaño de las nanogotas, se podrían obtener partículas de cualquier material en esa zona nanométrica. La figura 4 muestra, como ejemplo, una fotografía de Microscopia Electrónica de Transmisión de partículas de Pt obtenidas por el procedimiento descrito. El tamaño de las partículas obtenido (aprox. 9nm) coincide aproximadamente con el del tamaño de las gotas de la microemulsión empleada (aprox. 10 nm).

FIGURA 4 (- : 10 nm)

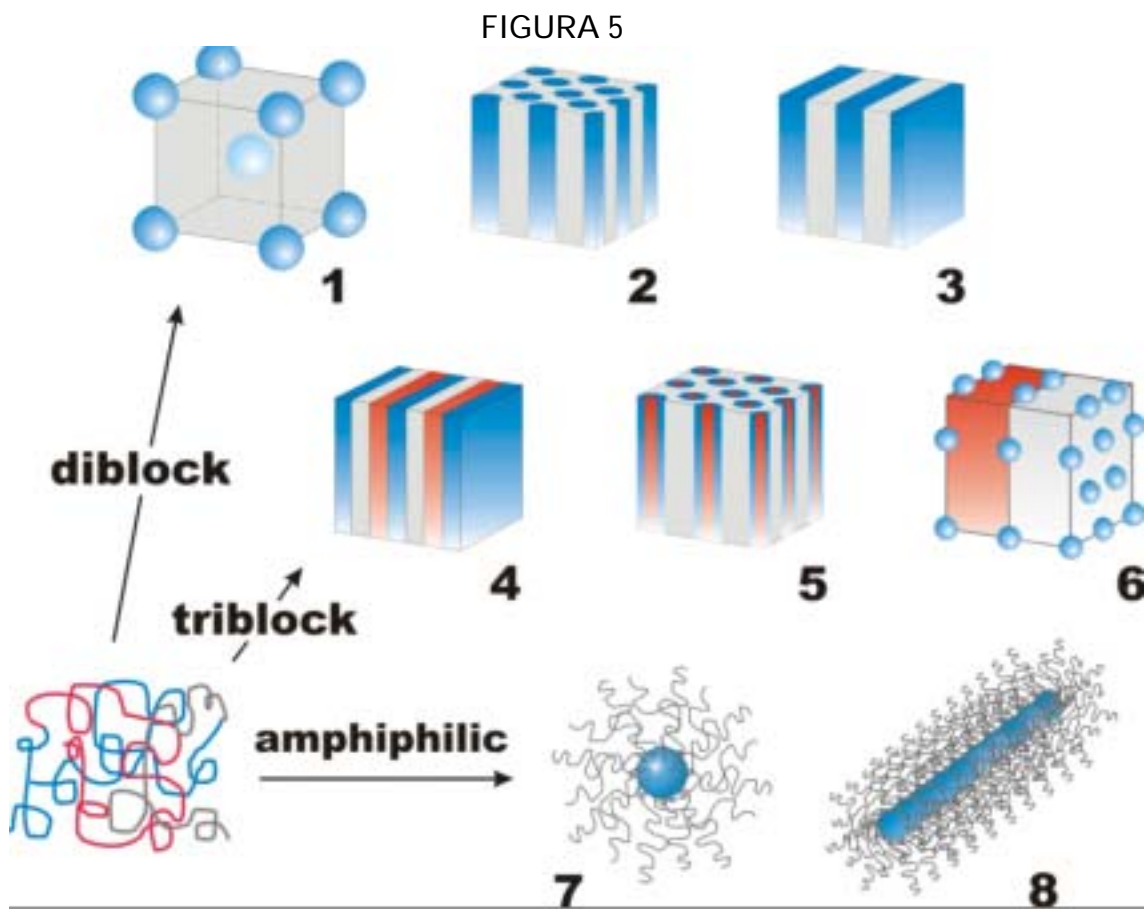


Este método sencillo permite ser aplicado a la preparación de un gran número de reacciones para producir materiales con tamaños controlados en la zona de los nanómetros. Así, por citar solamente algunos ejemplos, se han obtenido por este método nanopartículas de Ag, Au, Fe, Pd, Ni, Cu, Fe₂O₃, SiO₂, ZnO, TiO₂, poliestireno, etc.

La conexión con el mundo macroscópico

Aunque no se ha comentado anteriormente, es evidente que todos estos nanomateriales necesitan ser "conectados" con el mundo macroscópico. Es necesario pues ir más allá de la simple síntesis de los nanomateriales, para poder disponer los mismos en arquitecturas controladas de tamaños micro/macrocópicos, de forma que puedan esos nanomateriales ser implementados en máquinas, sensores, circuitos, etc. para desempeñar las funciones que se desean. En estos comienzos de siglo, una de las áreas hacia las que se dirige un mayor esfuerzo es precisamente, la relacionada con la disposición ordenada de estas nanopartículas, para construir el material final. Se podría decir que ya tenemos los "nanoladrillos" necesarios para la construcción y nos falta ahora desarrollar métodos rápidos y sencillos para unir esos ladrillos y formar el "edificio" final. Decimos sencillos y rápidos porque ir colocando, una a una, cada una de las partículas que vemos en la figura 4 para formar, por ejemplo, un cubo de tamaño micrométrico, aunque se pudiera hacer (y se hace/ha hecho ya mediante la punta de un microscopio de fuerzas atómicas), no sería un método eficaz. Dos métodos destacan ya como los más prometedores en este campo. Uno de ellos es utilizar nano/micromoldes, como pueden ser los que se obtienen por técnicas de litografía o, más atractivos por su simplicidad, estructuras que se pueden formar con copolímeros de bloque (CB). Los CBs son cadenas poliméricas, en cierto modo, parecidas a los surfactantes, teniendo en

común con ellos el hecho de que poseen también dos partes que son incompatibles en determinadas condiciones experimentales. Este hecho hace que, cuando la incompatibilidad es suficientemente grande, las dos partes del CB tienden a separarse, pero como están unidas químicamente entre sí lo hacen formando estructuras organizadas, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 5. Estas estructuras permanecen estables cuando los polímeros se enfrían por debajo de su transición vítrea, constituyendo unos verdaderos nanomoldes cuyas dimensiones y estructuras pueden variarse eligiendo adecuadamente el tamaño y estructura de cada una de las partes poliméricas del CB.



Otro método, de gran sencillez y elegancia –aunque de momento más restringido en cuanto a estructuras posibles que se pueden obtener-, es el denominado de auto-organización. Este método se basa en que, cuando se dispone de una dispersión de partículas muy monodispersa (dispersión de tamaños inferior al 10%) –como la reflejada en la figura 4- las partículas **espontáneamente** se agregan formando estructuras cristalinas perfectamente regulares, denominadas superestructuras o supercristales. De hecho, una inspección más detallada de la figura mencionada permite observar ya la formación incipiente de esas agrupaciones. En las figuras 6 y 7 se muestran bellos ejemplos de esas superestructuras que se pueden formar espontáneamente. Se trata la primera de una fotografía de Microscopía Electrónica de Transmisión de un supercristal de NPs de Co de 9nm obtenido espontáneamente al depositar una dispersión de

partículas sobre un sustrato de C amorfo. En dicha fotografía se puede ver claramente la disposición ordenada de las partículas.

FIGURA 6

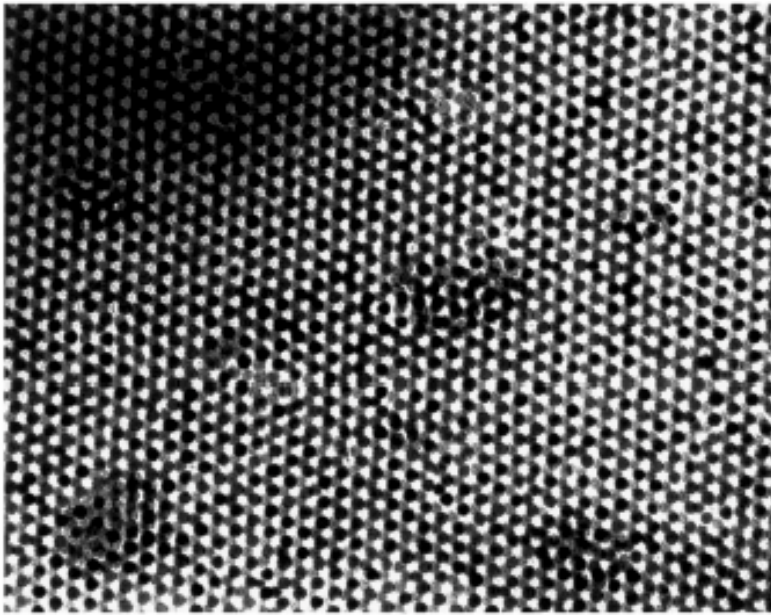
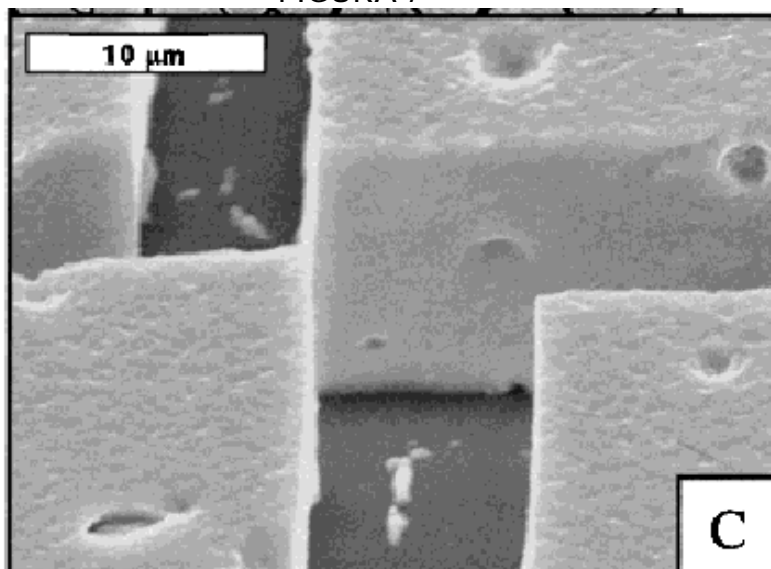


FIGURA 7



En la figura 7 se puede ver una disposición ordenada de NPs de Ag (partículas de 5nm de tamaño) formando agregados de tamaños realmente macrocópicos (> 10 micrómetros).

Conclusiones

Vemos que realmente hemos **comenzado un nuevo camino**. Un camino en donde, a partir de nanounidades, se intenta construir estructuras macroscópicas. Es el denominado camino de "abajo arriba", contrario al que la tecnología utilizó durante el pasado siglo, de "arriba abajo" y que supone la evolución natural de ésta última. Evolución que podríamos comparar con la evolución de la construcción, desde la primitiva que utilizaba los materiales que tenía al alcance (árboles, piedras,..) y los labraba a conveniencia para producir los objetos que deseaba, hasta la construcción moderna que utiliza materiales básicos para, combinados adecuadamente, producir el objeto final. Vemos también que, entre estos primeros pasos que se están dando en la nanotecnología, con la posibilidad de construir de forma fácil nanoherramientas, hasta la construcción final de nanomáquinas o nanodispositivos, como los que ya soñaba Feynman, en el siglo pasado, todavía ha de transcurrir algún tiempo. Sin embargo, al igual que el comienzo del siglo pasado supuso un gran reto científico para tratar de explicar la naturaleza desde sus unidades fundamentales, de nuevo hemos despertado en este comienzo de siglo con una preciosa y fascinante tarea a realizar: aprovechar todos esos conocimientos para entrar realmente a dominar la materia a nivel nanométrico o atómico y llegar, de esa forma, a hacer física/ química/ ingeniería/ arquitectura/ medicina/ ... a ese mismo nivel. Y, de nuevo, la historia se repite: lo que hace años era solamente pura ciencia ficción empieza en estos momentos a hacerse realidad; la realidad del comienzo de una nueva era o revolución NanoTecnológica.