

Nanotecnología en evolución

Fernando Briones
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Capítulo segundo

Introducción

La teoría cuántica de los sólidos describe con precisión la mayoría de las propiedades de la materia macroscópica que nos rodea, en especial las de los sólidos cristalinos cuya estructura periódica facilita mucho el tratamiento matemático y la interpretación de sus propiedades. Estas son en muchos casos inconcebibles dentro de la física clásica, y sólo se han podido explicar sobre la base de conceptos y formalismos cuánticos sofisticados que se han ido desarrollando a lo largo del siglo xx.

Pero la teoría cuántica del sólido se enfrenta a nuevas dificultades cuando se pretende aplicar a objetos de dimensiones del orden de unos nanómetros, la escala mesoscópica, intermedia entre la escala atómica y la macroscópica. En esta escala, las propiedades fisicoquímicas de los agregados atómicos o de estructuras moleculares complejas, resultan muy diferentes de las de los medios continuos o de los cristales periódicos macroscópicos formados por esos mismos átomos o moléculas. Más aún, en algunos casos aparecen propiedades emergentes características de una coherencia cuántica extendida a todo el objeto. Casos paradigmáticos son, por ejemplo, el origen de los números mágicos en clústeres moleculares, las propiedades magnéticas de nanopartículas, los efectos de proximidad en interfaces metal normal/superconductor, los efectos de confinamiento cuántico en sistemas de baja dimensionalidad, como

son los pozos, hilos y puntos cuánticos en matrices semiconductoras, el túnel o inyección de spin y, recientemente, las propiedades electrónicas y estructurales del grafeno, entre las muchas que se descubren año tras año, y no dejan de sorprender a los físicos. No solo a los físicos; la investigación en nanoestructuras genera continuamente sorpresas en una comunidad mucho más amplia que la física: la de la química en la escala nano, por ejemplo en la catálisis, o incluso en la biología en temas como la fotosíntesis o la orientación de las aves migratorias.

Las nanociencias tratan precisamente de entender y modelar las propiedades de los nanoobjetos en los que las propiedades globales dependen acusadamente de su tamaño, de sus límites o superficies y/o de su forma en términos de la distribución topológica de sus componentes en relación con las funciones de onda características.

Se trata de investigaciones multidisciplinarias que requieren aportaciones de la física, la química, la biología, las matemáticas, la informática y, por supuesto, de especialistas particularmente dispuestos a interactuar y conocer los métodos y los lenguajes de las demás disciplinas.

Por otra parte, la nanotecnología, basada en las nanociencias, es un nuevo tipo de ingeniería aplicable en la escala nano. Se trata del desarrollo de técnicas experimentales que permitan la observación, la medida, la manipulación y la fabricación de estructuras, objetos, dispositivos y sistemas nanométricos.

La idea de que sería posible hacer ingeniería en la nanoescala fue desarrollada y expresada públicamente por primera vez, ya en 1959, por Richard Feynman, profesor de física teórica en Caltech, cuyo genio excepcional se ha extendido en muchos campos de la física y la tecnología.

Inicialmente, sin embargo, sus ideas sobre la nanoescala no tuvieron mucho impacto en la comunidad científica hasta que, mucho más tarde, K. Erik Drexler, un ingeniero extraordinariamente creativo y visionario del MIT que trabajaba con la NASA en proyectos futurísticos de colonización del espacio, leyó las conferencias de Feynman y en 1986 publicó el libro *«Engines of creation: The coming era of Nanotechnology»*, especulando sobre la posibilidad de diseñar y fabricar máquinas moleculares. La llamativa propuesta de Drexler sirvió para popularizar el tema en todo el mundo. Los químicos conocían ya desde hacía mucho tiempo la variedad más elemental de ensamblado de moléculas a medida, la síntesis química, por lo que la idea de sintetizar macromoléculas en la escala nanométrica gustó mucho inicialmente y se comenzó a considerar dichas moléculas como verdaderas nanomáquinas o nanorobots capaces de fabricar nuevas moléculas, auto-replicarse incluso y de auto-organizarse en sistemas o estructuras macroscópicas complejas.

De ahí procede gran parte del entusiasmo inicial por la nanotecnología: su dominio podría implicar la realización del ideal del industrial post-mo-

dero, fabricar sin maquinaria y, mejor aún, sin obreros. Para algunos, significó una esperanzadora oportunidad de salvar vidas mediante el desarrollo de estupendas aplicaciones biomédicas, para otros en cambio, la de desarrollar nuevas armas letales.

Sin embargo, aunque estas posibilidades han dado lugar a numerosas historias de ciencia ficción, el objetivo de diseñar y fabricar nanomáquinas moleculares funcionales, ya entrados en el siglo XXI, no ha prosperado significativamente, tiene serios detractores y ha generado no pocas frustraciones. Entre otras cosas, porque a medida que vamos investigando y sabiendo más, la consecución de este objetivo aparece cada vez más alejada. Veremos más adelante por qué.

Uno de los argumentos más fuertes en contra de la posibilidad de intervenir en el mundo nano desde nuestra dimensión macro procede de la termodinámica, una ciencia clásica con principios de validez general e indiscutible. El ruido, las fluctuaciones aleatorias debidas a la agitación térmica en objetos de dimensiones nanométricas, recuérdese la amplitud del movimiento Browniano para objetos de tamaños micrométricos como son los granos de polen, haría imposible el intento de diseñar y construir herramientas, ni siquiera microscopios, para manipular u observar nanoobjetos. En consecuencia, nadie le dedicaba el interés necesario ni era fácil conseguir recursos para intentarlo.

Sin embargo, un pequeño grupo formado por dos físicos, Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, con la valentía y la libertad que les permitía una gran empresa de alta tecnología, IBM, en sus laboratorios de investigación en Zurich, se empeñaron en desarrollar un microscopio basado en medir la corriente túnel entre los átomos terminales de una punta metálica extremadamente afilada y los átomos de una superficie conductora para utilizar esta corriente como parámetro de realimentación y mantener constante la distancia punta/superficie durante un barrido lineal sobre la misma. En 1982 publicaron las primeras imágenes tomadas con un scanning tunneling microscope (STM) con resolución suficiente para detectar detalles topográficos de tamaño atómico en ultra alto vacío y en 1986 compartieron el Nobel de física con Ernst Ruska, el inventor del microscopio electrónico. Binnig inventó también, poco después del STM, otro instrumento revolucionario, el microscopio de fuerzas atómicas (AFM) complementario del anterior y capaz de funcionar al aire, sobre superficies aislantes, a temperatura ambiente e incluso en medios líquidos a partir de la medida de la fuerza ejercida por los átomos de una nanopunta móvil sobre la superficie o nano objeto a representar.

¿Qué ha pasado con las objeciones termodinámicas? Los principios básicos de la termodinámica en sistemas aislados siguen siendo válidos, por supuesto, pero los microscopios pueden alcanzar resolución atómica porque integran una realimentación electrónica externa, en tiempo real,

controlada por la corriente túnel en el STM o por la medida con láser de las fuerzas atómicas en el AFM. La teoría correspondiente, incluyendo el efecto de una realimentación «inteligente» en sistemas nanométricos abiertos, se desarrolló posteriormente y tranquilizó a los termodinámicos.

Debemos señalar que el primer STM que salió del laboratorio de IBM de Zurich en 1984 fue cedido a la Universidad Autónoma de Madrid, UAM, gracias a una colaboración de Binnig con el grupo del Prof. Arturo Baró que había estado trabajando en IBM como postdoc. Desde entonces, Baró, en el Departamento de Física que había fundado el Prof. Nicolás Cabrera en la UAM, se dedicó a desarrollar nuevos microscopios STM y AFM, pioneros en España y, con sus estudiantes de tesis y colaboradores, llegó a crear una empresa, Nanotec Electrónica, que fabrica y comercializa en todo el mundo microscopios de este tipo. Un ejemplo perfecto de lo que se puede lograr a partir de una línea de investigación básica y el dominio de tecnologías avanzadas. Desde ese momento, 1982, una vez demostrado que es posible construir instrumentos capaces de acceder a la escala nano llegando a observar y manipular la materia átomo a átomo, la expansión de la nanotecnología ha sido imparable.

De la microelectrónica a la nanoelectrónica

Los dispositivos nanoelectrónicos no son solamente dispositivos muy pequeños; son dispositivos cuánticos. La nanoelectrónica se distingue precisamente de la microelectrónica por hacer uso de esos efectos mesoscópicos de coherencia cuántica en estructuras de tamaño sub-micrométrico.

El primer dispositivo nanoelectrónico fue el diodo túnel, descubierto por Leo Esaki en 1959. Esaki era entonces el único físico teórico contratado por la, entonces pequeña, empresa Sony. A pesar de que el negocio de la empresa estaba asegurado fabricando aparatos de radio de transistor, se le permitió desarrollar en sus laboratorios un trabajo de investigación básica sobre las corrientes de fuga en aisladores y diodos. Ahora bien, cuando intentó presentar sus resultados y su interpretación teórica como tesis doctoral en la Universidad de Tokio, tuvo serias dificultades. Lo que era difícilmente aceptable por los profesores de Ingeniería Electrónica de entonces, era el que la corriente de electrones pudiera pasar a través de una barrera perfectamente aislante, como el Comendador del Don Juan Tenorio a través de las paredes, por un efecto de deslocalización puramente cuántico, el efecto túnel de Esaki. Pero, finalmente, fue capaz de convencerles, defender y publicar una tesis que resultó ser tan relevante para la electrónica que mereció el premio Nobel de física en 1973.

A comienzos de los años 70, el mismo Esaki, trabajando ya en IBM-Yorktown, USA, predijo teóricamente las propiedades de estructuras periódicas artificiales, las llamadas superredes, y en general de los nanosiste-

mas de dimensionalidad reducida, pozos, hilos y puntos cuánticos, cuyas dimensiones fueran comparables con la extensión efectiva del electrón en un semiconductor, del orden de 10 nm. Una de las propiedades más interesantes de estos sistemas ideales de baja dimensionalidad era la de emitir luz con una eficiencia extraordinaria debido a la presencia simultánea de electrones y huecos en la misma región del espacio (superposición por confinamiento cuántico). Como veremos, este efecto ha sido fundamental para el desarrollo de múltiples dispositivos optoelectrónicos entre los que se encuentran los diodos laser de comunicaciones por fibras ópticas. Por cierto, Esaki es Doctor Honoris Causa por la Universidad Politécnica de Madrid (1976) con cuyos profesores de la Escuela de Telecomunicaciones (ETSIT) ha colaborado desde IBM en numerosas ocasiones y contribuido a la formación de excelentes investigadores.

Años más tarde, (1998), Horst Störmer, recibió también el reconocimiento del Nobel por otro efecto puramente cuántico, el efecto Hall fraccionario en el gas bidimensional de electrones confinado en el estrecho pozo de potencial asociado a una heterounión semiconductor. Las extraordinarias propiedades de alta movilidad de este gas bidimensional de electrones, cuya cuantización del efecto Hall había sido descubierta anteriormente por otro Nobel alemán, Klaus von Klitzing (1985), han dado lugar al desarrollo de los transistores de alta movilidad de electrones (HEMT), actualmente muy extendidos en el campo de las micro-ondas y comunicaciones móviles.

En 1968 Al Cho, en los laboratorios Bell de New Jersey, había inventado una técnica, la epitaxia de haces moleculares (MBE), con la que se hizo posible fabricar en el laboratorio y, más tarde industrialmente, estas estructuras semiconductoras artificiales con un control o precisión dimensional mejor que el nanómetro. Se pudieron así comprobar muchas de las propiedades predichas teóricamente y descubrir experimentalmente, como suele suceder, algunas nuevas e insospechadas. La técnica MBE se basa en dirigir chorros de diferentes átomos o moléculas hacia la superficie caliente de un sustrato cristalino sobre el que reaccionan químicamente consiguiendo su disposición ordenada en capas sucesivas de espesor atómico. Aunque en sus comienzos sus creadores no la clasificaron como nanotecnología porque no se había inventado siquiera este término, se trata de un ejemplo paradigmático de tecnología de nano-fabricación que ahora se califica de tipo «*bottom-up*», es decir de abajo a arriba, construyendo la materia átomo a átomo, y resultando fundamental para el desarrollo de muchos dispositivos semiconductores. Esta técnica ha sido perfeccionada por diversos grupos, uno de ellos el nuestro del IMM-CSIC, pionero también en España, a lo largo de los últimos 30 años y los reactores de MBE han salido de los laboratorios de investigación para convertirse en una de las más rentables tecnologías industriales a la hora fabricar en gran escala nano-dispositivos. Los diodos láser, inventados por el ruso Zhores Alferov, del Instituto Ioffe en S. Petersburgo (Nobel

en 2000) y los transistores y circuitos HEMT basados en los electrones 2D descubiertos por von Klitzing, son un magnífico ejemplo de ello.

El impacto socio-económico de estos dispositivos es ya enorme. Así, los cabezales de lectura presentes en cualquier equipo reproductor/grabador de CD y DVD, son sistemas ópticos integrados y miniaturizados que incorporan un láser de pozo cuántico fabricado por MBE. Para dar una idea de la capacidad de esta técnica: con un solo reactor de MBE, se fabrican del orden de 100 millones de dispositivos láser al año. Más aún, el desarrollo más revolucionario y de mayor impacto en este siglo, Internet, es fundamentalmente posible gracias a la extraordinaria eficiencia del diodo-láser de confinamiento cuántico para emitir luz y modularla a un ritmo de más de 40 Gb por segundo. En estos momentos, casi todo el enorme flujo de información que circula en Internet entre continentes a través de fibras ópticas, a 2/3 de la velocidad de la luz y en una red global de más de 2.800 millones de usuarios (datos de final de 2013), ha sido transmitido por estos diodos, nanodispositivos por excelencia.

En cuanto a grabación y lectura de información digital, todos los populares equipos lectores y grabadores de CD y DVD, incluidos los más modernos Blue Ray, funcionan con diodos láser de este tipo.

Por otro lado, en las comunicaciones por micro-ondas, los ya imprescindibles teléfonos móviles, i-Pads, etc., emplean circuitos que integran HEMT de electrones 2D de alta movilidad.

Así que, al menos a través de estas aplicaciones pioneras, puede decirse que la nanotecnología ha entrado ya, masivamente, en nuestra sociedad, la sociedad de la información. Y casi nadie se ha dado cuenta.

Ciencia y tecnología en la escala nano

Una característica específica de las nanociencias es la inmediatez entre los descubrimientos científicos básicos y el desarrollo de las tecnologías que de estos se derivan. En general, las nanotecnologías se desarrollan actualmente en laboratorios universitarios o centros públicos y son aplicadas rápidamente por empresas fuertemente competitivas ligadas al entorno académico. Se puede hablar ya incluso de una ingeniería de nuevo cuño en la que el ingeniero, el inventor, además de utilizar la mecánica, la resistencia de materiales, la dinámica de fluidos, la termodinámica, utiliza las ecuaciones de Schrödinger o los últimos avances de la biología molecular para calcular y diseñar sus inventos.

La física clásica es una física que cree en el determinismo. Desde Galileo, la física cree en la causalidad, en la verdad de la realidad experimental, en la lógica y en las matemáticas, e incorpora cierto fundamentalismo en la confianza de que el hombre pueda entender el mundo y descri-

birlo mediante leyes expresadas rigurosamente por hermosas fórmulas matemáticas.

La física cuántica, por el contrario, implica un «agnosticismo» de base, inherente a un modelo indeterminista de la realidad que, por ello, resulta incomprensible e inaceptable para muchos. Nos cuesta, y nos costará mucho todavía, asumir una realidad cuántica, tan alejada de nuestra experiencia cotidiana y tan ajena a nuestro bagaje cultural.

Así, aun siendo a menudo motor de cambios sociales gigantescos, las tecnologías más importantes del siglo xx, con la excepción de la tecnología nuclear y del láser, se han basado en la física del siglo xix, mecánica, termodinámica, fluidos, electromagnetismo, física clásica en suma. Incluso la tecnología microelectrónica, la tecnología más avanzada, poderosa y perturbadora de los últimos años del siglo, se basa en una concepción totalmente clásica de la física.

Análogamente, la tecnología del siglo xxi es probable tenga su máximo fundamento en la física que fue necesario crear en el siglo xx para entender y modelar la escala atómica, la física cuántica.

La ley empírica de Moore (1965, Gordon Moore, cofundador de INTEL) que establece que la densidad de integración de los circuitos integrados se duplica cada 18 meses, evolución que se ha ido cumpliendo rigurosamente hasta nuestros días, empieza a moderarse ya este año al entrar las dimensiones de cada nodo del circuito en el rango de los 14 nm longitud de puerta, del orden de sólo 30 átomos de la red del silicio. A partir de esta longitud de puerta mínima, la corriente túnel empieza a aumentar exponencialmente y constituye un problema fundamental. Por otra parte, debido a la necesidad de utilizar técnicas litográficas mucho más avanzadas, el coste de una factoría de producción, que supera ya los 5.000 millones de dólares, se dispara también exponencialmente. Se ve claro ya que pronto será necesario cambiar de mentalidad y utilizar nuevos conceptos de la física cuántica para diseñar los procesadores nanoelectrónicos de este siglo. Así, por ejemplo, dentro del programa europeo NANOCAD de ingeniería de diseño asistido por ordenador para modelar dispositivos electrónicos de dimensiones nanométricas, se ha desarrollado un simulador 3D-SIMNAD para el cálculo de probabilidades de túnel cuántico y densidades de carga electrónica con el fin de modelar las características de transistores SET (Transistores de un Solo Electrón).

Más aun, un sector de la industria electrónica ha reconocido el hecho, hasta ahora sin explotar, de que el electrón tiene spin además de carga eléctrica, y se ha lanzado a desarrollar la spintrónica, uno de cuyos primeros éxitos comerciales ha sido la masiva introducción en el mercado de las cabezas lectoras de discos duros basadas en el efecto de magnetorresistencia gigante y el de válvula de spin, descubiertos respectivamente por el alemán Peter Grünberg y el francés Albert Fert (Premios

Nobel en 2007). Con este último habíamos colaborado poco antes (1). En breve estos desarrollos serán seguidos por el lanzamiento de memorias MRAM, resistentes a las radiaciones nucleares, de gran interés obviamente para la defensa y no solo para la defensa. En principio no se piensa en sustituir las memorias actuales de silicio por las magnéticas de spin. Estas se reservan de momento para algunas aplicaciones militares críticas.

El impacto sobre la sociedad en general de las nuevas tecnologías informáticas, posibilitadas por el desarrollo rapidísimo de las capacidades de cálculo de los circuitos integrados es ya enorme.

Este año por ejemplo, el número uno entre los 500 mayores supercomputadores del mundo, el Tihane-2 (Vía lactea-2) desarrollado por la Universidad Nacional China de Tecnología de Defensa, puede hacer cálculos al ritmo de 33,8 PFLOPS, esto es $33,8 \times 10^{15}$ operaciones en coma flotante por segundo. Estos supercomputadores se utilizan ya, no solo para cálculos científicos y tecnológicos, sino para predecir fenómenos naturales como el clima, las corrientes marinas o los terremotos y, cada vez más, los comportamientos sociales, económicos y las acciones militares.

Por otro lado, la red global que permite intercambiar información de todo tipo y comunicarse en tiempo real, con unos 2.850 millones de ordenadores interconectados a la red (datos de 2013) y un enorme número más de móviles en 2014, no solo está cambiando a las jóvenes generaciones sino a toda la sociedad. Se trata de una verdadera revolución para las transacciones comerciales, bancarias, administrativas, para la educación, la salud, etc. pero, sobre todo, para el desarrollo de la investigación científica, de la tecnología y de la seguridad y la defensa.

Piénsese solamente en que la población mundial es del orden de 7×10^9 individuos y que basta un archivo de 1 MB, es decir 10^6 Bytes, para almacenar prácticamente toda la información relevante de cada persona. Bastaría pues una memoria de 7 PB (equivalente a 7.000 memorias comerciales de 1 TB) para tener fichada a toda la población del planeta. Además, se puede acceder en tiempo real a la información requerida en menos de una décima de segundo, que es lo que tarda en promedio el algoritmo de búsqueda de Google en encontrar lo que le pidamos.

No se trata ya de ciencia ficción; es suficiente con tener una tarjeta de crédito o entrar en cualquier red social para estar ya presente en varios bancos de datos de este tipo. Más aún, la evolución rapidísima y coordinada de, por una parte, la nanoelectrónica y por otra, las tecnologías informáticas de la computación y comunicaciones en red a escala global promete ya, sin duda alguna, la pronta aparición de las primeras formas de inteligencia artificial. De momento la red y sus buscadores, memorias y herramientas de todo tipo, es una especie de soporte o ampliación de la inteligencia de sus usuarios, pero vista en su conjunto cada vez se

parece más a una inteligencia colectiva que, como la del hormiguero es muy superior a la de las hormigas individuales que, evidentemente, tienen muy limitadas luces. Las implicaciones sociales y políticas de este hecho revolucionario son impresionantes y sus implicaciones en defensa merecerían por sí mismas un capítulo aparte.

Pero la revolución informática no se para aquí. Sólo acaba de empezar. La física actual, en paralelo, está explorando una nueva opción de desarrollo de la informática: la Informática Cuántica, basada en una forma revolucionaria de codificar, procesar y transmitir información. Se barrunta además que esta nueva física va a ser capaz de modelar la enorme complejidad de la escala mesoscópica de las macromoléculas y de la vida. Y esta nueva física probablemente se agregue pronto a la fantástica dimensión global que está alcanzando ya la investigación en biología, la bioquímica, la biofísica y la bioinformática con la ayuda de las nanociencias, de las nanotecnologías y de potentísimas técnicas instrumentales como son los actuales sincrotrones, los láser de rayos X y las espectroscopias de femtosegundo (fs), por citar algunos ejemplos.

Como veremos más adelante en este capítulo, las inmensas capacidades informáticas y de supercomputación aportadas por la microelectrónica en los últimos años y la aparición de nuevos dispositivos y arquitecturas nanofóticas, nanomecánicas, etc., se presentan como fundamentales para posibilitar la emergencia de esa informática cuántica, implementada sobre plataformas configuradas por dispositivos y procesadores de estado sólido que previsiblemente abrirá la vía para una implementación realista y en gran escala de los procesadores cuánticos. Pero, previsiblemente también, tendremos que esperar todavía bastantes años para llegar a ello y superar a la informática digital que conocemos.

Por otra parte, el rapidísimo ritmo con que evolucionan los conocimientos básicos y se transfieren a la tecnología, a la industria y a la sociedad es cada vez más acelerado. Ya en 2011, Mike Rocco, impulsor de la *National Nanotechnology Initiative* del presidente Clinton en 2001, (2) repasaba la evolución del área nano a que había dado lugar ese programa y calculaba que en este momento ya habría más de 2 millones de personas trabajando en diversos aspectos de la nanotecnología en todo el mundo. Parecería una cifra exagerada pero, haciendo la suma con cuidado, resulta perfectamente correcta. Más de la mitad de esa cifra corresponde a investigadores e ingenieros que trabajan, y mucho, al otro lado del océano Pacífico. Y, como hemos dejado entrever por la rapidez y creatividad de los desarrollos actuales en nanotecnología, la liebre (un descubrimiento revolucionario) puede saltar en cualquier momento y en cualquier sitio. En (3) incluimos también una referencia a un importante documento del mismo autor, en el que se consideran seriamente las previsibles implicaciones sociales y de todo tipo de la convergencia de los rápidos desarrollos de las tecnologías nano, bio, informáticas y del conocimiento a lo largo de este siglo.

Habrá que tener muy en cuenta este aviso, especialmente para la Prospectiva de Defensa, donde la capacidad de anticipación es cada vez más necesaria.

Naturalmente, no basta con que los expertos puedan prever la evolución de ciertos parámetros tecnológicos, climáticos, medio-ambientales, económicos, etc., o, incluso, de los acontecimientos sociales por medio de las avanzad simas herramientas y apoyos de inteligencia artificial que tienen ya a su alcance; es necesario disponer de mecanismos cada vez más rápido y eficaces para que los gobiernos puedan acceder a esos conocimientos y previsiones y puedan reaccionar adecuadamente antes de que sea demasiado tarde y las medidas puestas en práctica finalmente no resulten contraproducentes.

Un ejemplo cercano: en el campo de la computación cuántica mediante plataformas tecnológicas basadas en la interacción de fotones con iones o átomos, aislados en trampas ópticas en vacío con el fin de garantizar largos tiempos de coherencia cuántica, hay ya resultados muy interesantes.

Y resulta que el investigador responsable de ello es un joven y ya internacionalmente famoso investigador español, Ignacio Cirac.

Cirac dirige actualmente la división de Teoría del Instituto Max-Planck de  ptica Cuántica en Garching, Alemania, al frente de un grupo de 250 investigadores trabajando en esta opción, de momento la más accesible en el laboratorio, en paralelo con los desarrollos de la teoría.

Cuando, hace pocos años, sin previsible futuro en España, acept  una oferta para marcharse a Austria y poco después a Alemania, como director del IQO-Max-Planck y exento de incompatibilidades, como catedrático en la Universidad de Múnich, era simplemente profesor titular de Física en la Facultad de Química de la Universidad de Castilla la Mancha en Ciudad Real y trabajaba solo. Ninguna institución española fue entonces capaz de reconocer plenamente su valía ni de hacer una contraoferta razonable.

Actualmente se investiga intensamente en diversas instituciones del mundo con el fin de desarrollar computadores cuánticos basados en otros tipos muy diferentes de plataformas tecnológicas. Las más recurrentes son plataformas de estado sólido e incorporan elementos de nanofotónica. Estas tienen más posibilidades realistas de ser escalables e integrables y crear así los primeros prototipos de computadores cuánticos. Es difícil prever cuando aparecerán las primeras máquinas de este tipo, porque hay que salvar todavía muchas dificultades, pero hay que estar muy atentos porque en menos de 10 años seguramente se producirán avances espectaculares y sus consecuencias, particularmente en el campo de la defensa, pueden ser impresionantes.

De momento, la aplicación de la información cuántica que, por parecer más cercana en el tiempo, está causando más interés, no es todavía la computación sino la transmisión cuántica de información cifrada o criptografía cuántica. De momento también, los métodos de transmisión más desarrollados se basan en las propiedades de los fotones o cuantos de luz que, como propuso Einstein en su teoría del efecto fotoeléctrico, tienen simultáneamente propiedades de ondas electromagnéticas y de partículas (por cierto, sin masa).

Ello que no implica que no se pueda transmitir información mediante electrones, protones o cualquier otro tipo de partícula/onda, sino que el fotón es más manejable y compatible con las redes actuales de transmisión de información digital por fibra óptica que se piensa seguir utilizando todavía mucho tiempo.

Los fotones transmiten información a la velocidad de la luz y a grandes distancias. Un fotón procedente de una galaxia en los confines del universo puede haber viajado durante miles de millones de años por el espacio sin perder la información que transporta. Tanto es así que, si lo hacemos pasar por una red de difracción (la interferencia es una operación cuántica por excelencia) y medimos su longitud de onda, obtenemos información suficiente para identificar el elemento atómico del que procede por su línea característica de emisión y, por su desplazamiento al rojo, para saber a qué distancia está la galaxia que lo ha emitido hace, pongamos, mil millones de años. El fotón es un cuanto de energía electromagnética pero puede ser considerado también como un cuanto de información, un bit cuántico (Qubit). En la práctica, la propiedad del fotón que se utiliza para transmitir un Qubit, es su estado de polarización, paralela o perpendicular al detector.

Para ello se necesita disponer de una fuente emisora de fotones en estados de polarización «entrelazados» (*entangled*) cuánticamente. Ello se logra con fotones procedentes de electrones con polarizaciones de spin correlacionadas, es decir, en un estado singlete (de spin cero ocupado por dos partículas de spin opuesto, por ejemplo $1/2$ y $-1/2$). Se dice que los estados cuánticos de un sistema de dos o más partículas están entrelazados cuando se describen mediante un estado único que involucra a todas las partículas del sistema aunque estén separadas espacialmente. Un sistema atómico con dos electrones en estado singlete emite pares de fotones entrelazados. Mediante un dispositivo adecuado es posible enviarlos a través de dos fibras ópticas hacia dos detectores separados. Si medimos la polarización de uno de ellos, la polarización del otro queda determinada automáticamente aunque hayan recorrido distintos caminos, los dos receptores estén muy alejados uno de otro, y por tanto se detecten o midan en instantes de tiempo diferentes.

No es el momento, ni disponemos del espacio, para explicar aquí el fundamento de las tecnologías fotónicas que se desarrollan actualmente

para transmitir información cuántica cifrada con el fin de hacer imposible su interceptación o recepción no autorizada. Basta con decir que existe un enorme interés por parte de usuarios militares, financieros, etc., para los que la seguridad es fundamental, y que ya existen implementaciones comerciales, aunque no muy extendidas.

Un tema actual de investigación en nanofotónica es, precisamente, el desarrollo de dispositivos emisores de un solo fotón, de fotones entrelazados y de detectores de fotones individuales en las dos bandas de longitudes de onda utilizadas en comunicaciones por fibra óptica (1,3 y 1,55 micras). No se trata solamente de contar fotones uno a uno, cosa que ya es habitual en el espectro visible-UV, sino de discriminar con precisión el instante de su llegada y sus correlaciones en función de su polarización.

Los dispositivos más prometedores para la implementación práctica de esta tecnología son los emisores de fotones basados en las propiedades de los puntos cuánticos integrados en semiconductores III-V. Se llama punto cuántico (Quantum Dot, QD) a un nanocrystal típicamente de InAs, un semiconductor de zanja prohibida de pequeña anchura (band gap), incrustado en una matriz de otro semiconductor también cristalino de zanja más an-

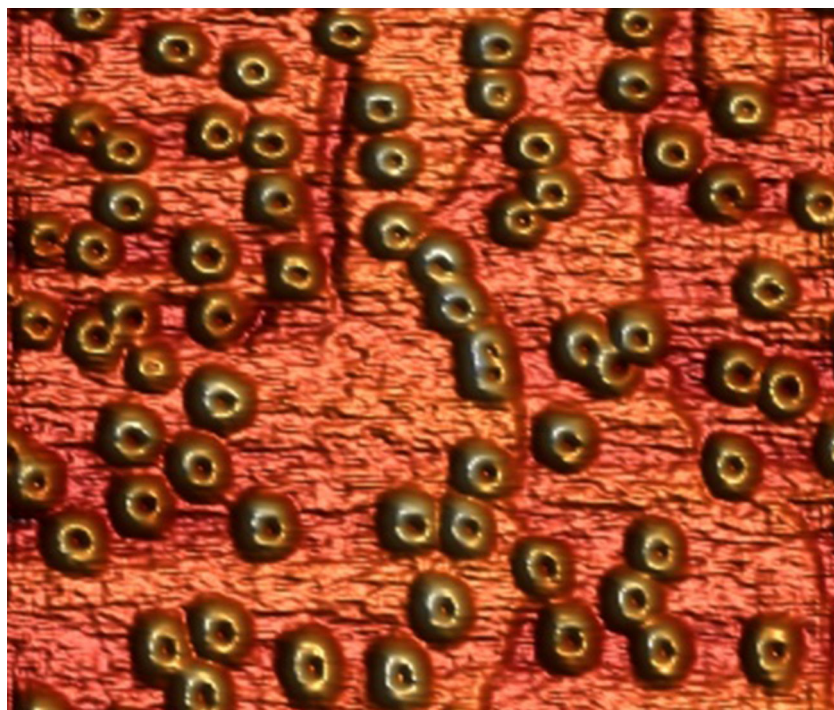


Figura 2-1. Micrografía de Fuerzas Atómicas (AFM) de anillos cuánticos (QRings) de InGaAs auto-ensamblados por MBE sobre la superficie de un sustrato de GaAs. Su densidad es del orden de 10^{11} cm^{-2} y la altura los escalones atómicos de las terrazas que se observan es de 0,34 nm (Fuente: Jorge García IMM-CSIC)

cha (típicamente GaAs o InP). Se produce así un efecto de confinamiento cuántico cero dimensional de las funciones de onda de electrones y huecos en la misma región del espacio. Los puntos cuánticos, con un diámetro del orden de los 15 nm, se comportan como si fueran átomos artificiales y emiten fotones en las mencionadas bandas del espectro infrarrojo con una eficiencia cuántica cercana al 100% por recombinación de estados excitónicos. Los puntos cuánticos se fabrican de forma auto-ensamblada y se integran industrialmente en la zona activa de la guía de fotones que constituye la cavidad resonante del pequeño chip (500×50×100 micras) de un láser actual de comunicaciones por fibra óptica.

El IMM-CSIC, sin ir más lejos, tras una larga trayectoria de investigación pionera en España en procesos de fabricación de estos dispositivos mediante técnicas originales de epitaxia de haces moleculares (MBE), ha participado activamente durante los últimos 8 años en una gran red de excelencia europea, SANDIE, financiada con 18,6 millones de euros, en colaboración con otros 25 laboratorios y empresas. Estas cifras dan una idea de la relevancia de este aspecto de la nanotecnología y de su dificultad técnica en Europa.

Como hemos adelantado, algunas nanoestructuras, difíciles de fabricar por métodos litográficos, son susceptibles en cambio de auto-ensamblarse espontáneamente e incluso de auto-organizarse por si mismas para formar estructuras modulares más complejas. La tecnología actual de fabricación «de abajo a arriba», es decir, construidas átomo a átomo, molécula a molécula, es ya una realidad práctica. En la figura 2-1 puede apreciarse la formación de anillos cuánticos de InGaAs de dimensiones nanométricas autoensamblados sobre sustratos de GaAs. Nuestra participación en el programa Self-Assembled semiconductor Nanostructures for new Devices in photonics and Electronics (SANDIE) se ha centrado precisamente en las técnicas de auto-ensamblado de nanoestructuras del tipo descrito más arriba, puntos cuánticos (Quantum Dots), hilos cuánticos (QWires), anillos (QRings), postes (Qposts), que, por su tamaño y sensibilidad a cualquier defecto o contaminante en su entorno, no soportan las técnicas de litografía habituales en microelectrónica. Empresas como Toshiba, en sus laboratorios europeos en Cambridge, UK, se han beneficiado especialmente de estos resultados aprovechando el gran potencial humano y excelencia investigadora de nuestros jóvenes doctores en estas tecnologías avanzadas. Actualmente, y en esta misma línea, un paso más adelante, nuestro laboratorio del Instituto de Microelectrónica de Madrid del CSIC (IMM-CSIC) trabaja en el desarrollo de emisores de fotones individuales en colaboración con la ya bastante desarrollada comunidad de centros e investigadores españoles activos en este tema particular (unos 50 doctores), sobre todo con el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) de la Universidad Técnica de Cataluña, el Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología (ISOM) de la

Universidad Politécnica de Madrid y el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

Los emisores de fotones tienen que ser capaces de emitir fotones entrelazados o individuales, en secuencias preestablecidas según un código y a un ritmo de millones de fotones por segundo con una eficiencia de emisión muy alta, por lo que requieren una integración de los puntos cuánticos en posiciones muy precisas en cavidades ópticas resonantes de alta calidad o factor Q, microfabricadas por litografía electrónica con estructura de cristales fotónicos 2D. Las técnicas de posicionamiento con precisión nanométrica son en sí mismas muy sofisticadas y solo son accesibles a muy pocos laboratorios en el mundo. El grupo del IMM-CSIC, dirigido actualmente por la Dra. Luisa González, es un equipo reconocido internacionalmente por sus múltiples desarrollos originales de la epitaxia de haces moleculares (MBE) en semiconductores III-V, tiene acceso

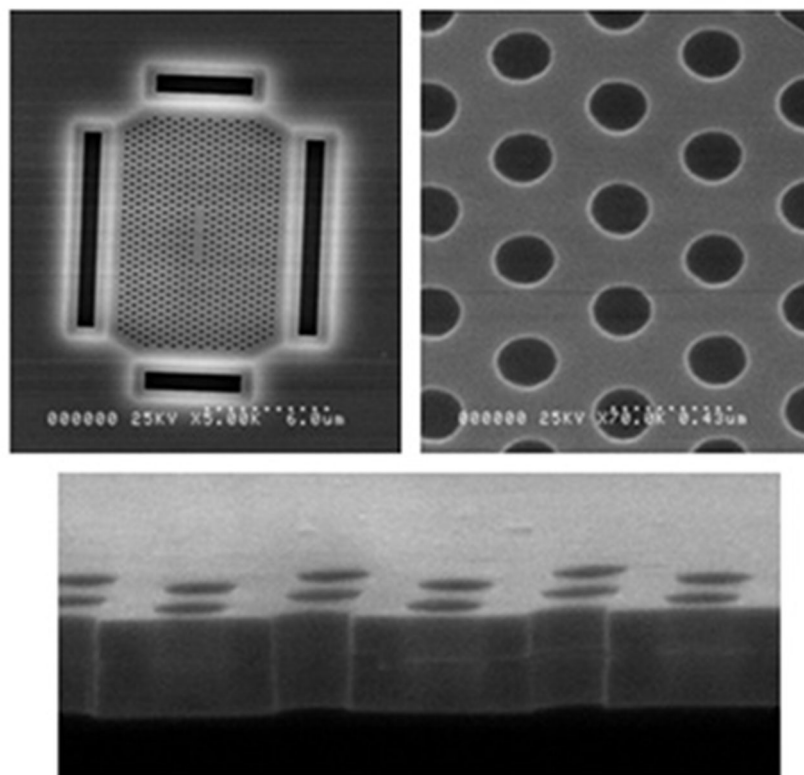


Figura 2-2. Microcavidades ópticas de tipo cristal fotónico 2D sobre membranas epitaxiales de GaAs, fabricadas en el IMM por litografía de electrones y ataque iónico. Incluyen nanoestructuras auto-ensambladas y centradas en el plano central de la membrana (aparecen como una línea horizontal blanca en la sección del dispositivo de la micrografía electrónica SEM en la parte baja de la figura) (Fuente: Iván Prieto y P. Aitor Postigo (IMM-CSIC))

directo a otras técnicas de nanofabricación como son la litografía de electrones y el ataque iónico para la fabricación de los diodos láser, detectores de IR y resonadores o micro-cavidades ópticas tipo cristal fotónico 2D en GaAs y InP (Dr. Aitor Postigo).

Al mismo tiempo, el laboratorio de este Instituto, dirigido por el Dr. Benito Alén, dedicado a la espectroscopia óptica de alta resolución espacial y espectral puede analizar la emisión de un solo QD aislado, a bajas temperaturas y en una bobina superconductora con campos magnéticos de hasta 9 Teslas, es único en nuestro país y permite determinar los estados cuánticos de las nanoestructuras producidas, puntos cuánticos, moléculas artificiales, hilos cuánticos, condensados de excitones, etc. La posición del Grupo del MBE del IMM es muy relevante en este tema, una carrera extraordinariamente competitiva en la que, precisamente en este año, han aparecido unos resultados muy alentadores (4)(5).

Por otra parte, este grupo ha trabajado en paralelo en la aplicación de estas mismas nanoestructuras a un campo de la tecnología totalmente diferente. Se trata del desarrollo de células solares de banda intermedia mediante la incorporación en su diseño de QD y de nanoestructuras fotónicas. Este desarrollo es el fruto de una magnífica colaboración con el Instituto de Energía Solar de la UPM del Prof. Antonio Luque, creador de la primera empresa española, ISOFOTON, capaz de competir en el difícil campo industrial de la energía fotovoltaica con tecnología propia. Queremos hacer hincapié en que la investigación en estas nanotecnologías implica emplear un enorme esfuerzo también en el desarrollo de nuevas técnicas experimentales macroscópicas para acercarse a la interfaz del mundo nano con el mundo macro. Estas nuevas herramientas no existían previamente y han tenido que irse desarrollando a medida que se hacían necesarias. Una de ellas, mencionada anteriormente, es la epitaxia de haces moleculares para nanoestructuras de materiales semiconductores cuya pureza tiene que ser extraordinaria. Como está basada en el auto-ensamblado de esas nanoestructuras (lo llamamos crecimiento, en la jerga de los nanotecnólogos), a partir de haces de átomos o moléculas eyectadas por cañones moleculares (células de Knudsen) en las que se evaporan los correspondientes elementos a muy altas temperaturas y en ultra alto vacío (UHV), es decir en un vacío mejor aún que el del espacio interplanetario.

La construcción de los correspondientes reactores, extraordinariamente complejos y utilizando materiales muy sofisticados (tantalio, nitruro de boro, cuarzo, etc.) tiene un coste enorme, no sólo económico sino de tiempo y dedicación. Es parte ya de la filosofía de trabajo de la investigación en esta área el desarrollar las propias máquinas que, aunque se puedan adquirir en empresas especializadas y a un coste del orden de 1 millón de euros, requieren siempre, además de un gran esfuerzo ulterior de puesta a punto, adaptación a cada material y proyecto, unos equipos

de monitorización y control in-situ con resolución nanométrica y una dedicación constante. Es ésta la principal razón por la que son muy pocos los grupos que trabajan con esta técnicas tan costosas y de que solo se puedan mantener operativas en laboratorios con infraestructuras y personal de apoyo técnico muy importantes. En la figura 2-3 se puede apreciar la complejidad y dificultad de un laboratorio de este tipo necesario para producir, sin embargo, objetos tan pequeños. En la industria, para producir en gran escala los diodos láser, los circuitos de micro-ondas y amplificadores HEMT o más recientemente las células solares multiunión de alta eficiencia, no queda otra opción que emplear máquinas de este tipo, solo que todavía más grandes y más costosas al estar automatizadas para una producción en serie. Ello implica una transferencia muy directa entre el laboratorio y la industria en este campo.

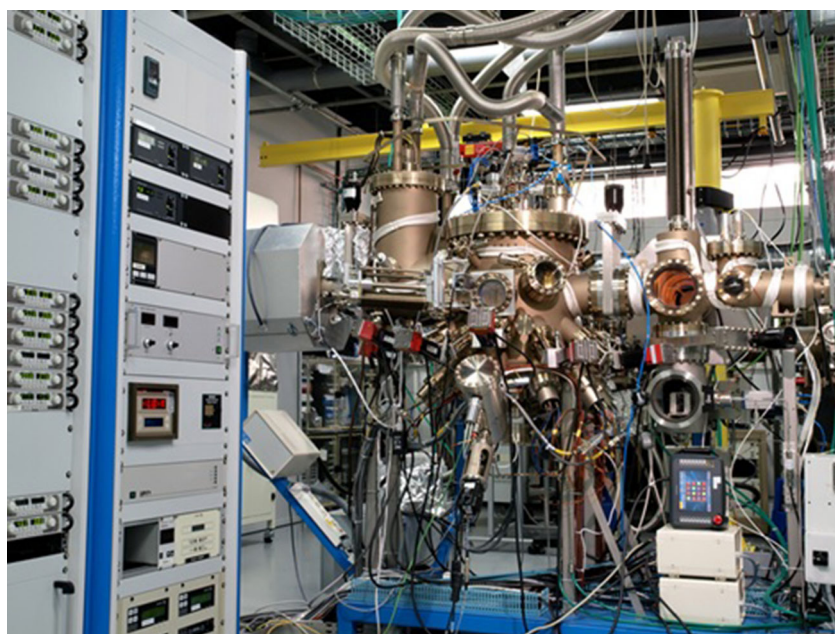


Figura 2-3. Vista de uno de los tres reactores de MBE del laboratorio de fabricación de nanoestructuras del IMM-CSIC. Requiere un soporte técnico externo muy complejo de nitrógeno líquido para refrigeración, a través de los tubos corrugados aislados en vacío que se pueden observar, gases y control de temperaturas y programación del proceso por ordenador (Fuente: Fernando Briones)

Hay que reconocer, por otra parte, la gran dificultad que implica para el investigador el superar todas las barreras y dar todos los pasos necesarios para, además de hacer buena investigación en tecnologías tan avanzadas como es el caso de las nano, poder llegar al punto en que sus resultados, científica y tecnológicamente válidos y competitivos, puedan transferirse a la industria o a la sociedad en general. En nuestro caso, han dado lugar a 4 patentes internacionales en explotación por empresas

de alta tecnología europeas y norteamericanas (6). Está claro que el esfuerzo solo de los investigadores no puede ser suficiente. Es fundamental la cooperación de unos mecanismos de transferencia eficaces en manos de profesionales familiarizados con las tecnologías y con sus aplicaciones y, más aún, con el sector industrial al que pueden ir destinados los resultados. Estos mecanismos fallan estrepitosamente en nuestro país en el área de las nanotecnologías por falta de personal con formación adecuada. En general, se recurre a la creación de empresas spin-off y a los contactos directos, a través de estas spin-off, con empresas grandes ya consolidadas en el sector que, en muchos casos, son extranjeras a falta de emprendedores o de inversores nacionales con confianza en este sector del mercado.

Sin embargo, en algunos casos excepcionales y en circunstancias particulares, la transferencia a la sociedad ha sido posible, y con éxito. Concretamente, el origen de nuestra línea de investigación (nuestro primer desarrollo de un reactor MBE data del año 1983), se debió a un proyecto extraordinariamente relevante para el país relacionado con la defensa. El Cuartel General de la Armada, en 1978, había acudido al CSIC solicitando ayuda para poder desarrollar espoletas de proximidad para proyectiles antimisil capaces de detectar la emisión IR de las toberas y gases calientes de misiles. Particularmente preocupante era la necesidad de defensa de los buques de la Armada frente a misiles de tipo EXOCET que como se demostró más tarde en las Malvinas, iban a ser muy eficaces hundiendo o dañando gravemente barcos ingleses. En aquella época, solo se fabricaban los sensores de IR en la banda de 4,3 micras de longitud de onda para las espoletas, en dos laboratorios del mundo, Santa Barbara Research Center (SBRC), más tarde Raytheon Vision Systems (RVS), en California con tecnología propia, y en un laboratorio indeterminado en Rusia con tecnología probablemente originada en la DDR. Ambas tecnologías eran, por supuesto, absolutamente secretas y los detectores no eran accesibles ni siquiera para países aliados. El SBRC había publicado un par de patentes, probablemente de despiste, basadas en procesos químicos de deposición que, a pesar de intentos muy valiosos del laboratorio dirigido por la Dra. Teresa Montojo en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Armada (CIDA), resultaban imposibles de reproducir.

Lo único que estaba claro era que los detectores contenían PbSe, un semiconductor de pequeño *band-gap* y muy fácilmente oxidable e inestable al aire. En nuestro pequeño grupo de investigación en el entonces Instituto de Física Aplicada del CSIC, con sólo dos investigadores, el que suscribe y la Dra. Dolores Golmayo cuya contribución al proyecto fue extraordinaria, decidimos intentarlo con mucho entusiasmo y nuestras propias ideas basadas en lo que sabíamos de tecnología de vacío. Construimos y pusimos a punto rápidamente un sistema de evaporación en vacío con la ayuda del excelente taller mecánico procedente del antiguo Instituto Torres Quevedo y en menos de un año de trabajo intenso y muy creativo,

llegamos a definir un proceso totalmente original de fabricación que dio lugar a unos detectores con prestaciones iguales, si no superiores, a las publicadas por SBRC y probablemente también a las no publicadas por los Rusos. Cuando hicimos una demostración en el laboratorio detectando pequeños objetos calientes (un soldador) a distancias de 40 metros, con nuestro detector a temperatura ambiente (sin refrigerar) como exigían las especificaciones militares, el Almirante que asistió a la misma no se lo podía creer, pero una vez reproducidos nuestros resultados por el CIDA, de acuerdo con el documento reservado que entregamos describiendo nuestro método, los detalles de la fabricación, nuestras medidas de la respuesta espectral, la estabilidad y el nivel de ruido de fondo de los detectores, se hicieron pruebas reales muy satisfactorias en campo de tiro. ¡Nanotecnología desarrollada en España en 1979, y aplicada ya para fines de defensa!

Han transcurrido 35 años desde entonces, con vicisitudes varias que no vienen ahora a cuento, pero finalmente existe una empresa española, NIT Europe (7), creada por personal procedente del CIDA, que fabrica y comercializa cámaras de IR cuyos píxeles son detectores de PbSe, según nuestro antiguo procedimiento, naturalmente optimizado posteriormente por la empresa para su integración (8). Sus prestaciones en aplicaciones militares y civiles, son todavía hoy muy competitivas, no habiendo sido superadas por las de otros materiales o tecnologías. Nosotros mismos desarrollamos en 1998 (9) un detector de metano de bolsillo microfabri-

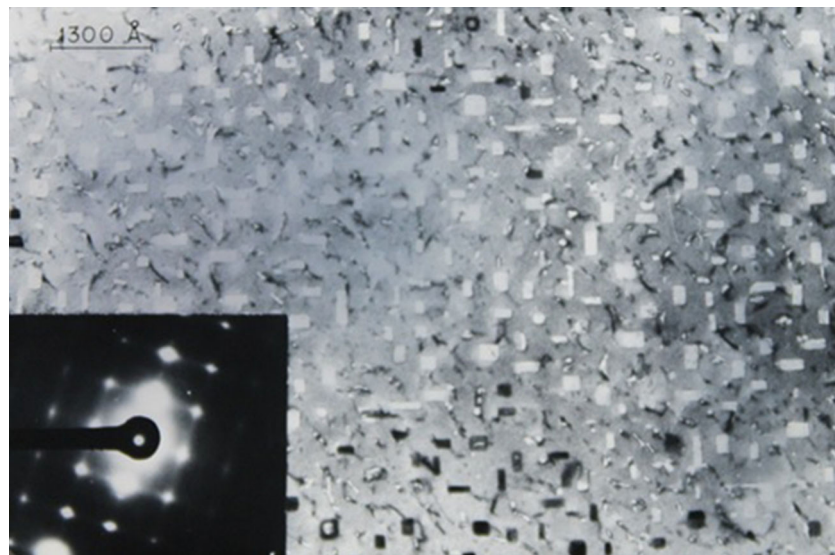


Figura 2-4. Micrografía de electrones en transmisión y contraste de difracción en una película de PbSe epitaxial sobre un sustrato cristalino de NaCl con inclusiones nanométricas autoensambladas durante el proceso de crecimiento en vacío con presión parcial de oxígeno (10). (Fuente: Fernando Briones).

cado para una empresa europea (Schlumberger) que integraba un sistema óptico IR microfabricado en silicio en nuestro laboratorio y detectores de PbSe no refrigerados.

Un trabajo de investigación básica, que publicamos parcialmente en 1981, más sistemático y basado en películas monocristalinas producidas por epitaxia (no eran fotoconductoras), demostraba que las propiedades de fotoconducción en el IR de nuestros detectores policristalinos se debían a su nanoestructura (entonces no se llamaba así, por supuesto) (1). En la micrografía electrónica de transmisión (TEM) de la figura 2-4 se observan, por ejemplo, una serie de precipitados nanométricos auto-ensamblados, con bordes alineados paralelamente a los ejes cristalográficos de la red cúbica del PbSe que junto a las fronteras de grano, y examinados a la luz de lo que sabemos ahora, podrían dar lugar a la excepcional fotoconductividad observada.

Por aportar otro ejemplo, mucho más cercano en el tiempo y también al IMM, citaremos un proyecto de desarrollo de tecnología de fabricación de cámaras, esta vez de rayos X, que se pretenden instalar en un gran telescopio espacial, Athena, que previsiblemente se pondrá en órbita por la Agencia Europea del Espacio (ESA) en 2021.

Cada píxel está constituido por un microcalorímetro superconductor de tipo TES (Transition Edge Sensor) integrado en una matriz de membranas de nitruro de silicio sobre sustratos microestructurados capaz de medir la energía depositada por cada fotón individual de rayos X absorbido. De esta forma se logra resolución espectral a la vez que espacial. El IMM ha desarrollado en los últimos años una tecnología propia de fabricación de estos microcalorímetros, similares a los desarrollados por la NASA para los instrumentos Norteamericanos, depositando bicapas Mo/Au (metal superconductor/metal normal) con una temperatura crítica ajustada a los 100 mK por un efecto cuántico de proximidad en el que los pares de Cooper del superconductor pierden coherencia por procesos de dispersión en el metal normal. Las bicapas se fabrican mediante la técnica de *sputtering* (pulverización catódica) en sistemas de UHV con un control muy preciso de los espesores en el rango nanométrico y de la calidad a escala atómica de la interfaz entre las capas de la estructura. Es esta una tecnología crítica a desarrollar en el consorcio europeo/español de laboratorios de investigación y empresas del sector aeroespacial y es esta precisamente nuestra aportación, bajo la dirección actualmente del Dr. Jose Luis Costa-Kramer. Esperemos que esta vez, los excelentes resultados que ya se han obtenido en una primera etapa del proyecto, científica y tecnológicamente muy válidos, puedan llegar a buen puerto, o mejor al espacio, a lo largo del desarrollo de la actividad futura del consorcio.

Otros desarrollos en el IMM de posible relación con defensa se derivan de una línea de investigación en magneto-plasmónica, dirigida por el Dr. Gaspar Armelles, sobre la interacción de la luz con nanoestructuras y

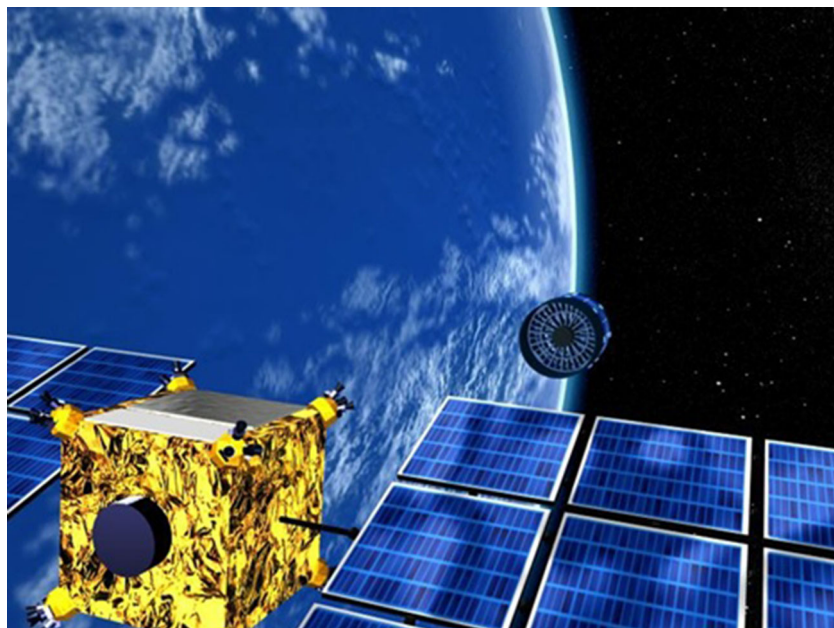


Figura 2-5. Recreación artística de una de las opciones de la ESA de telescopio en órbita de alta resolución angular y espectral para astronomía de rayos X. Este diseño, XEUS, finalmente sustituido por el actual, ATHENA, o más conservador, implica el vuelo en formación del módulo de espejo (al fondo en la imagen) y del módulo conteniendo la cámara superconductora refrigerada a temperaturas criogénicas (100 mK) en primer término (Fuente: Agencia Europea del Espacio-ESA)

nanopartículas híbridas para generar efectos magneto-ópticos y plasmónicos muy interesantes y la línea de materiales nanoestructurados por técnicas electroquímicas y sus aplicaciones en dispositivos termoelectrónicos, con la financiación de varios proyectos europeos bajo la dirección de la Dra. Marisol Martín (11). La Comisión Europea apoya este proyecto con la concesión de un prestigioso contrato del European Research Council (ERC) dentro del programa IDEAS.

En cuanto a la conexión de la nanotecnología con la biología y, particularmente en aquellos aspectos que, dentro del ámbito también de nuestro entorno, afectan más directamente a la defensa en los aspectos de amenazas biológicas, podemos citar un área de investigación actualmente muy avanzada en la que trabaja el Grupo de Bionanomecánica, también en nuestro instituto. Este grupo, muy joven y dinámico se establece en el año 2005 especializándose en estructuras micro y nanomecánicas para interrogación biológica. Sus investigadores principales, los doctores Javier Tamayo y Montserrat Calleja, físicos también, poseen una gran experiencia en el desarrollo de instrumentación avanzada para la lectura óptica de sistemas nanomecánicos, con varias patentes licenciadas. Su objetivo es desarrollar dispositivos biosensores capaces de detectar y

cuantificar interacciones moleculares, en aplicaciones por ejemplo de detección de patógenos a través de sus interacciones con micropalanca y resonadores nanomecánicos. La Comisión Europea apoya este proyecto con la concesión de un prestigioso contrato del European Research Council (ERC) dentro del programa ERC-IDEAS. Por otra parte, en paralelo, han abordado con éxito el desarrollo de nanochips de ADN para genómica funcional, aspecto en el que han conseguido el interés de la industria del sector y creado ellos mismos una empresa spin-off, Mecwins (12), inicio de una actividad industrial con mucho futuro. Es evidente el interés que tiene la formación de investigadores y la creación de grupos de trabajo en este área de frontera entre la física y la biología, en la que, hasta hace muy poco existía un gran déficit de cátedras y centros de investigación en nuestro país a pesar del gran desarrollo de la biotecnología impulsado fundamentalmente desde el lado de la biología.

Nano-bio-ciencias

Todo el mundo está de acuerdo en que los más relevantes descubrimientos y desarrollos revolucionarios de la investigación en este siglo XXI procederán del área de la biología, la ciencia y la tecnología de la vida. Pero, en el llamado siglo de la biología, la contribución de las nanociencias a las ciencias de la vida va a ser decisiva. No en vano empezamos a barruntar que la vida es una maravillosa demostración del poder de una nanotecnología natural desarrollada por la evolución a lo largo de la historia del planeta Tierra.

El conocido biólogo, Ginés Morata, afirmaba hace poco, con su fino humor, que lo que menos se entiende de la biología es la física y es cierto que no existe hasta el momento una explicación física de los mecanismos últimos de la evolución de la materia hasta convertirse en materia viva. Más aún, uno de los aspectos más sorprendentes del genio de Darwin es el de que fuera capaz de expresar sus ideas, probablemente las ideas científicas más importantes que nadie haya tenido, sin recurrir a una sola fórmula. Imagínense el campo que hubiese dejado abierto Darwin a los físicos teóricos si en el fondo todo fuese física, si fuese posible interpretar el origen y sentido de la evolución mediante mecanismos y formalismos físico-matemáticos.

Diremos, entre paréntesis, que el gran despegue de la física a partir del siglo XVIII se debió en gran parte a la introducción de un lenguaje o formalismos matemáticos desarrollados por genios como Descartes y Newton, que hicieron posible construir con precisión unos modelos de la realidad física sobre la base de datos experimentales cuantitativos. Mecánica, termodinámica y electromagnetismo son ejemplos del éxito de este nuevo lenguaje.

Más aun, en el siglo XX, la teoría cuántica ha llegado a lo que parecía imposible, describir con extraordinaria precisión el exótico comporta-

miento del mundo atómico y de las partículas elementales. Por el contrario, en el desarrollo paralelo de la biología, igualmente enorme, el uso de formalismos físico-matemáticos se ha ido introduciendo con bastante dificultad y, sólo muy recientemente, conceptos procedentes de la mecánica cuántica.

Santiago Ramón y Cajal, Nobel de Fisiología y Medicina en 1906, fue el primero en describir el sistema nervioso de los animales y del hombre como un conjunto de circuitos en los que se propagan «impulsos nerviosos» de neurona en neurona, con una visión absolutamente genial para aquellos tiempos. Tanto es así que en recientes desarrollos de redes neuronales artificiales basadas en sinapsis nanoelectrónicas se le reconoce como pionero (13)(14).

Desde el otro lado, el primer intento de interpretar la vida en términos físicos se remonta a uno de los padres de la mecánica cuántica, Erwin Schrödinger, Nobel de Física en 1933. En 1944 publicó un pequeño libro, *¿Qué es la vida?* en el que compatibiliza la evolución biológica con la termodinámica, gracias al concepto de negentropía y sienta las bases de una interpretación física del código genético que, por cierto, inspiró mucho más tarde a James Watson, Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1962, en sus investigaciones sobre los genes y el descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN.

A estas alturas, empezamos a pensar que, en realidad, ambos desarrollos, el de la física en la escala mesoscópica y el de la biología, son totalmente convergentes y estamos convencidos de que el edificio teórico que los unifique se irá construyendo en este siglo sobre la base de las nanociencias. Tanto es así que, en la actualidad, comienzan ya a gestarse ideas y formalismos que seguramente evolucionarán por el buen camino en los próximos años y permitirán describir cuantitativamente y con toda generalidad lo que intuyó el genio de Darwin.

En los apartados siguientes, nos permitiremos profundizar e insistir en algunas de esas ideas fundamentales, no con el fin de sentar cátedra ni de explicar nada, que en este tema el conocimiento es todavía escaso y todo está abierto, sino con el de ir ganando perspectiva sobre el desarrollo previsible de las bionanotecnologías en el ya próximo futuro.

Se trata por tanto de un tema difícil de presentar sistemáticamente. Por ello daremos sólo unas pinceladas para hacernos una idea de la complejidad de los problemas que estamos abordando y de sus dificultades. Los descubrimientos en este campo son difíciles de asumir y, más aún, de interiorizar en nuestra cultura y formas de pensar. De ser amos de la naturaleza, de creernos unos seres superiores, estamos pasando a tener que aceptar el ser una más de las formas evolutivas creadas por una clase de inteligencia distinta de la nuestra, lenta en nuestra escala de tiempos pero extraordinariamente poderosa y creativa.

De entrada, y a este respecto, es necesario recordar la importancia del mayor descubrimiento que hemos ido haciendo colectivamente los nanotecnólogos en los pocos años que han transcurrido desde que la investigación y las aplicaciones prácticas de las nanociencias han despegado con enorme fuerza.

Ante todo, hemos descubierto, nada más y nada menos, que la naturaleza nos lleva un adelanto en nanotecnología de unos 3.000 millones de años, no sólo en el diseño de nuevos dispositivos en la escala nano, sino también en su implementación práctica y sobre todo, en la realización de ensayos de viabilidad y seguridad de sus aplicaciones en gran escala.

Acabamos de empezar en esta disciplina, tenemos mucho que aprender de «nuestros mayores» y asumir un enorme respeto por el maravilloso edificio construido sobre la base de la nanotecnología natural que ha originado y mantiene vivo a nuestro entorno y a nosotros mismos.

Algunas de esas ideas ya se habían adelantado en el discurso de entrada en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RAC) por parte del autor del presente capítulo («Nanociencias, entre la Física y la Biología», RAC, 2005). Reconociendo su carácter bastante especulativo en aquellos momentos, hay que decir también que desarrollos experimentales y teóricos, publicados en estos últimos diez años van aportando argumentos a favor de ideas que intentan explicar la evolución biológica en función de las leyes de la física en la escala mesoscópica.

Una excelente revisión del tema, publicada en 2011 por el físico, académico y presidente de la RAC, profesor Alberto Galindo, en su discurso de toma de posesión en la Academia de Medicina, con el título «Quanta y Vida» (15), confirma el interés de una línea de investigación en plena ebullición actualmente. La Naturaleza parece que hace uso de la física cuántica para su desarrollo en aspectos tan fundamentales como pueden ser la fotosíntesis o el procesamiento de información en los organismos vivos.

La información cuántica y las proteínas

La bioquímica y la fisiología han tenido siempre muy claro que el mecanismo básico de transducción de señales o de información en las células y, en general, en los organismos vivos, esta soportado por mensajeros químicos. Se conocen ya con increíble detalle miles de diferentes sistemas moleculares que actúan como generadores, transmisores y receptores de información entre el exterior y el interior de las células a través de la membrana celular, entre distintos órganos a través del sistema vascular, entre neuronas a través de las sinapsis, o en general los componentes bioquímicos procesadores de información o señales en el sistema o sociedad celular de los seres vivos: hormonas, factores de crecimiento y de angiogénesis, neurotransmisores, feromonas, interferonas, moléculas

las coestimuladoras, mensajeros, reguladores e inhibidores, etc. Otras muchas funciones específicas de las proteínas son recogidas también en un estupendo artículo del académico Ángel Martín Municio (16).

Proteo, era un ser mitológico, muy inteligente y miembro del cortejo de Poseidón dios de los océanos, capaz de cambiar de forma y así escabullirse de los que pretendían atraparlo porque con su inteligencia tenía la habilidad de prever o predecir el futuro. Es curioso que aunque la denominación «proteína» empleada por primera vez en 1838 por su descubridor, el químico alemán Gerardus Johannes Mulder, procede del griego *proteios* (sustancia primera), el uso del adjetivo «proteico» (de forma cambiante como Proteo) parecería mucho más adecuado para describir la estructura y habilidades de las proteínas a la vista de los modernos conocimientos sobre las mismas.

Por otro lado, los sistemas de memoria, lectura y replicación de la información genética, en particular de la doble hélice de ADN, son ejemplos de sistemas moleculares enormemente dinámicos en sus funciones de replicación, transcripción, reparación, recombinación y todos los intrincados factores de regulación asociados como son los activadores, represores, coactivadores, correpresores, adaptadores, etc.

Ahora bien, estos eferentes, mensajeros, receptores y memorias moleculares no son sistemas químicos estáticos. Todos ellos se adaptan continuamente y modifican su configuración química y morfológica de acuerdo con el entorno químico, es decir, con los mensajes recibidos de moléculas vecinas. Insistimos, para que quede claro, se comportan no solo como memorias o simples portadores de información, sino como verdaderos procesadores, como procesadores químicos de información química. Pero decir químicos es totalmente equivalente a decir que son procesadores cuánticos de información porque la química, la ciencia de los mecanismos que intervienen en el auto-ensamblado y reacciones entre moléculas, es pura cuántica. ¿No será tal vez información cuántica?

De momento, quedémonos solo con la hipótesis de que la vida primigenia, la capacidad que tienen los organismos más primitivos de auto-configurarse, de adaptarse e interaccionar en tiempo real con un entorno cambiante definido por múltiples parámetros, la capacidad de auto replicarse según un esquema codificado y de evolucionar hacia formas cada vez más complejas, pueda ser consecuencia de la aparición de sistemas moleculares capaces de adaptar su propia forma en función del entorno, es decir, de procesar información y de reaccionar con una elemental «inteligencia».

La construcción de organismos superiores (células procariotas y eucariotas, organismos multicelulares, etc.) parece ser modular, utilizando componentes básicos relativamente sencillos siempre en la escala nano y por tanto con una propiedad intrínseca de coherencia o de funciona-

miento coordinado. Estos sistemas moleculares complejos, considerados como computadores, parecen contener memorias moleculares entre las cuales probablemente sea el código genético la versión más avanzada y la que ha sido empleada con más éxito a lo largo de la evolución. Se trata de una memoria, como ahora diríamos de tipo ROM, que puede ser copiada con mínimos errores y leída por nanosistemas moleculares capaces de transcribir, traducir y procesar las diversas informaciones contenidas en el código, con el resultado de ensamblar nuevas proteínas y construir células y organismos.

Es importante recalcar que estos nanosistemas desarrollan funciones complejas y flexibles según el momento y el entorno. Son ciertamente nanoprocesadores muy elementales y muy especializados, pero procesadores al fin.

De acuerdo con John von Neumann (17) «un computador es una organización de componentes funcionales elementales en la cual, con gran aproximación, sólo las funciones desarrolladas por los componentes son relevantes para el comportamiento del sistema». No importa para nada el tipo de «hardware» que constituya los componentes, sean estos relés, transistores, neuronas o aminoácidos.

¿Por qué pensamos que las proteínas puedan ser procesadores cuánticos? En primer lugar porque en la escala en que están construidas (algunos nanómetros), en la escala molecular, la física cuántica se aplica estrictamente a la hora de determinar los estados del sistema y su dinámica. La arquitectura, la forma de introducir las variables o datos de entrada y la manera de expresar los resultados, son obviamente muy diferentes de las de un microprocesador digital ordinario. Y tampoco parece coincidir su arquitectura con la que actualmente imaginan los ingenieros electrónicos para los futuros computadores cuánticos.

Sin embargo las biomoléculas, particularmente las proteínas de alto peso molecular, tienen algunos puntos en común con las propiedades ideales de estos últimos, a saber: primero, la posibilidad de acumular en sistemas físicos pequeños, mediante un número relativamente pequeño de qubits, una enorme cantidad de información definida por un gran número de variables o parámetros de entrada; segundo, la posibilidad, como consecuencia del principio de superposición lineal, de procesar toda esa información de una sola vez (paralelismo masivo) y, por tanto, casi en tiempo real; y tercero, la posibilidad de que ese sistema cuántico adopte un estado o configuración resultante que sea medible de un modo eficiente.

Richard Feynmann, en los años 80, fue una vez más el que, en relación con una idea suya, un hipotético «simulador cuántico universal», avanzó otra idea revolucionaria: las macromoléculas biológicas podrían ser los únicos simuladores cuánticos capaces de simularse o computarse a sí mismas.

Solo recientemente se están empezando a retomar estas ideas y la consideración de que los organismos vivos sean supercomputadores cuánticos comienza a introducirse en la comunidad científica. A este respecto, han aparecido incluso trabajos teóricos de calado en los que se desarrollan las posibles bases evolutivas y estabilidad dinámica de los sistemas vivos en general, considerados como computadores cuánticos. (18).

Merece la pena, por tanto, profundizar algo más en este concepto de nanoprocesador bioquímico como computador cuántico puesto que, de entrada, es un concepto que choca con la idea que todos tenemos de computador.

El prejuicio establecido en las últimas décadas del pasado siglo de identificar un computador con un circuito electrónico es realmente muy fuerte. Tanto es así que la mayoría de los laboratorios y programas de investigación en el campo de la llamada Electrónica Molecular, campo que actualmente origina multitud de publicaciones, revistas, patentes y congresos, mantienen como objetivo el lograr manipular y disponer moléculas conductoras y semiconductoras para formar con ellas circuitos electrónicos. Se intenta arduamente todavía construir redes con transistores, nodos y conductores moleculares en dos dimensiones, a imagen y semejanza de los circuitos microelectrónicos actuales. Téngase en cuenta que la computación electrónica clásica se basa en la carga del electrón como soporte físico de los bits de información y en el transporte de carga basado en la movilidad de los electrones en estados extendidos.

Por el contrario, el intercambio de electrones entre moléculas se basa en reacciones tipo redox. La única posibilidad real, al menos conceptualmente, para intercambiar electrones entre macromoléculas, sería la utilización del efecto túnel, porque la corriente túnel es, en sí misma, una medida estadística o promedio sobre los estados cuánticos a un lado y al otro de la unión. Sin embargo, en la práctica, es extraordinariamente difícil disponer múltiples uniones túnel sobre diferentes terminaciones de una molécula determinada, aun cuando se trate de una macromolécula muy grande.

No obstante, la evolución parece que, hace ya mucho tiempo, ha logrado resolver todos los problemas arriba apuntados y diseñar y fabricar multitud de computadores cuánticos. La solución natural estriba precisamente en no utilizar los electrones ni los fotones como portadores de la información codificada cuánticamente. Los nanoprocesadores moleculares elementales interaccionan entre sí o con el medio exterior a través de la reactividad química de determinadas terminaciones funcionales distribuidas sobre su topología. Esta reactividad química es una medida estadística de los estados cuánticos correspondientes a toda la molécula considerada como un sistema fuera del equilibrio. La preparación de los correspondientes estados de partida se realiza también a través de interacciones químicas o procesos de reconocimiento molecular en

terminaciones específicas de la molécula. A partir de esa preparación, la molécula evoluciona cuánticamente hacia una nueva configuración (*fol-ding*), que la dispone para reaccionar con otras moléculas específicas del entorno. A continuación se pone en marcha una cadena de procesos de apertura o establecimiento de enlaces, control de la cinética de reacciones, intercambio de iones, apertura o cierre de canales iónicos, transporte de masa, intercambio de protones, etc., que afectan a todo el sistema en interacción.

Nanomáquinas

A medida que se desarrolla el concepto de biomolécula como nanomáquina y se van conociendo mejor las innumerables y eficacísimas funciones que estas moléculas desarrollan en los organismos vivos, se hace necesario también reconsiderar la física que interviene en muchos de estos procesos bioquímicos.

En particular, el clásico movimiento browniano, descubierto por Robert Brown en 1827 en granos de polen e interpretado por Einstein en 1905 como resultado de las fluctuaciones estadísticas del momento cinético de moléculas de agua en un medio en equilibrio térmico, resulta ahora de una importancia fundamental para la comprensión de la forma en que actúan las nanomáquinas y nanoprocesadores moleculares.

Una imagen muy gráfica de lo que suponen, para las macromoléculas biológicas de tamaño nanométrico, estas fluctuaciones brownianas del líquido en que están sumergidas, es la de un terremoto de grado 9 de la escala Richter en el que todos los objetos del entorno y las moléculas mismas se agitan y se golpean continuamente con una violencia extraordinaria.

Sin embargo ahora se sabe que precisamente ese movimiento caótico y continuo es la «fuerza vital» que el mismo Brown creía percibir bajo su microscopio. En efecto, la mayoría de las reacciones químicas de las que depende la vida son posibles gracias a este ambiente tumultuoso que rodea a las biomoléculas. Por ejemplo, los motores moleculares usan la energía acumulada en determinados enlaces químicos para desarrollar multitud de funciones biológicas. Todos ellos, a pesar de su gran variedad, funcionan de acuerdo con el mismo principio: el de aprovecharse del movimiento del entorno causado por las fluctuaciones térmicas y, por tanto, del movimiento caótico origen de la difusión de moléculas en un medio líquido. Imagine el lector un pasajero que intenta llegar andando a su camarote por un pasillo de un crucero en medio de una gran marejada. No le quedará otra sino afianzarse fuertemente a cualquier punto de agarre y soltarse cuando la escora de la nave le sea favorable para volver a afianzarse al próximo agarre a la vista, hasta poder dar el siguiente paso. De la misma manera, la adaptabilidad de la molécula

la, por ejemplo de una kinesina, le permite ir enganchándose a las moléculas de los microtúbulos y soltándose oportunamente para avanzar rápidamente en la dirección elegida y transportar una carga utilizando la agitación térmica del ambiente y, por supuesto, mediante el aporte de la energía química adenosin trifosfato (ATP) necesaria para formar o romper los enlaces oportunos. Resulta que el movimiento caótico térmico no sólo es compatible con la bioquímica de la vida, sino que le es de gran ayuda. Termodinámicamente esto es solo posible si se le atribuye a la molécula una capacidad, aunque sea elemental, de procesar información, de seleccionar a gran velocidad entre diversas opciones de acuerdo con un determinado algoritmo, como si de un microprocesador se tratase. En otro contexto, por ejemplo, el de la actividad enzimática, téngase en cuenta que una enzima tiene que explorar millones de configuraciones por segundo antes de localizar la única correcta y específica de la reacción química que promueve. Solo un procesador cuántico puede ser tan rápido.

Cada vez aparecen más publicaciones en las que, aún con reticencias, se aportan interpretaciones de tipo Quantum Ratchets o Brownian Ratchets (que traduciríamos por rectificadores cuánticos o brownianos) para funciones biológicas básicas como, por ejemplo, el transporte uni y bidireccional de cargas químicas a lo largo de la red de microtúbulos en el citoesqueleto de las células eucariotas mediante la kinesina y dyneina. Estas moléculas, esenciales para el transporte de mitocondrias, endosomas, partículas de ARN¹ mensajero (mARN o mRNA en inglés), virus y vesículas de diferentes tipos, constituyen una especie más de las muchas nanomáquinas o robots macromoleculares que actúan en el interior de las células vivas, capaces de ejecutar funciones complejas y construir formas definidas a partir de un medio caótico, y a los cuales es necesario atribuir (como al famoso diablillo de Maxwell) un cierto grado de «inteligencia», una capacidad de procesamiento rápido de información inherente a la naturaleza cuántica de los sistemas mesoscópicos.

En un sentido más amplio, la posibilidad de generar orden, evolución, mediante un proceso de selección entre variaciones aleatorias es el fundamento de la teoría de Darwin de la selección natural. Y en la base de esta selección, en la escala mesoscópica de las macromoléculas, están de nuevo los rectificadores moleculares, los motores de Darwin, los nanoprocesadores cuánticos. Sobre esta base, toda una serie de líneas de investigación «bio-inspiradas» aspira actualmente a diseñar nanomáquinas moleculares, o al menos micromáquinas artificiales, que funcionen de una forma equivalente a las anteriores. Todavía queda mucho, sin embargo, para poder medirse en este tema con las asombrosas creaciones de la evolución.

¹ Ácido ribonucleico

La célula es un sistema complejísimo, una verdadera factoría especializada cuyos múltiples procesos internos se coordinan y organizan siguiendo las instrucciones o mensajes de un código específico propio. Sin embargo, es sabido que todas las células de un determinado organismo contienen el mismo código genético. Sin embargo este mensaje o programa interno se expresa en formas y funciones diferentes de acuerdo con el entorno, tanto en el proceso de diferenciación celular como en su función como parte de un organismo. Esta es una de las características que diferencian un mensaje en código cuántico de los mensajes expresados en código binario digital clásico: la superposición de estados o palabras del código y la posibilidad de obtener diferentes configuraciones finales o funciones según sea el entorno de la medida.

Como es sabido, los qubits en los que se codifica la información cuántica son extremadamente frágiles. La obtención de información sobre un sistema cuántico generalmente perturba o destruye el mensaje. No es posible clonar directamente estados cuánticos no ortogonales por lo que un mensaje cuántico no es copiable. De ahí el interés actual por la criptografía cuántica. El inconveniente de no poder realizar copias se compensa con el hecho de que la capacidad de memoria o de información codificable en un sistema cuántico es casi infinita. La razón es que si bien en un sistema clásico, la capacidad de memoria es proporcional a su tamaño (número de bits N en su registro binario), la de un sistema u ordenador cuántico (registro de qubits) crece exponencialmente con N . Por otro lado, la información cuántica puede ser escondida o difuminada mediante el entrelazamiento de estados de forma que ninguna medición local pueda desvelarla. Sin embargo, el entrelazamiento produce correlaciones no locales sin análogo clásico que puede servir para preservar la información relevante, obtenida por interferencia, aunque se destruya parte del código.

Con estas ideas podemos comprender cuál es la estrategia de la evolución para obtener tantas copias como sean necesarias del código: como es imposible copiar o clonar el contenido del mensaje cuántico, lo que ha hecho la evolución es clonar el ordenador, clonar el soporte material del código, la molécula de ADN y su secuencia de aminoácidos. Al ser idénticas las estructuras y secuencias o configuración química de las copias a las de las moléculas originales, el mensaje cuántico contenido en ellas resulta ser estadísticamente el mismo. Pero la copia nunca es exactamente igual al original, solo es casi igual. De ahí la ventaja evolutiva de clonar múltiples ejemplares, logrando así una transmisión estadísticamente precisa del mensaje genético y al mismo tiempo permitir una evolución adaptada a los cambios del entorno.

Queremos insistir, la información necesaria para construir otro patrón está codificada en la forma misma del patrón original, en la estructura misma de la molécula. Cuando se ensambla una nueva molécula sobre el

patrón de la anterior, lo que se produce es una copia del código, una copia de la información.

La información contenida en el código está cifrada cuánticamente sobre la estructura de la propia cadena de ADN que le sirve de soporte físico o material. Esta estructura está determinada por las posiciones relativas de sus átomos y por el conjunto de interacciones cuánticas entre ellos, es decir, un conjunto de estados cuánticos entrelazados sobre toda la molécula. Por ello la información contenida en el código puede ser tan grande y puede ser leída y procesada tan rápidamente a través de sus interferencias con los estados cuánticos de las moléculas del entorno. De ahí la posibilidad de que el mismo código, idéntico para todas las células de un organismo, se pueda expresar de tantas formas diferentes según el momento y el entorno.

La célula, como depositaria del código genético, es el módulo básico y esencial de todo ser vivo. Cada una de ellas es una verdadera factoría especializada cuyos múltiples y complejos procesos internos se coordinan y organizan siguiendo las instrucciones o mensajes del código propio almacenado en sus genes y que, además, puede interactuar o intercambiar información mediante «interferencia química» con los «mensajes» de las células del entorno.

Esta organización modular se extiende a un nivel superior cuando las células forman parte de un órgano y finalmente de todo un organismo vivo. Ciertamente, la característica más importante de todo organismo vivo es precisamente ese estado de organización dinámica o de coherencia global entre todos sus órganos y funciones, una coherencia que se mantiene, aún siendo muy variable con el tiempo, a lo largo de su vida. De acuerdo con estas ideas, la forma del organismo vivo en cada instante es el resultado de un cálculo en tiempo real ejecutado por miles de millones de nano-procesadores en paralelo coordinados globalmente de forma jerárquica para dar un estado resultante dinámicamente estable. (18)

Cuando la coherencia global del sistema se pierde, debido a causas externas o a un proceso genéticamente programado de apoptosis, el organismo, el individuo muere. Sin embargo, es un hecho experimental el que esa coherencia se puede mantener al menos temporalmente sobre partes separadas del organismo, haciendo posible, por tanto, la conservación y los trasplantes de órganos.

Debemos dejar bien claro que no nos estamos refiriendo a conceptos metafísicos como sería el del alma, sino a una coherencia característica de un sistema modular complejo. Más aún, para muchos autores contemporáneos, esta coherencia no tiene por qué ser cuántica, sino una coherencia funcional emergente de la pura complejidad como la que regula, por ejemplo, el funcionamiento auto-organizado de una gran ciudad o el de la economía mundial.

Resulta entonces que el organismo vivo, que funciona en su conjunto como un supercomputador capaz de ejercer funciones cada vez más competitivas dentro del mecanismo evolutivo de la selección natural de Darwin, no es otra cosa que un portador y procesador activo, un transmisor adaptativo de la información del código, por medio del cual el código es capaz de perdurar a lo largo de múltiples generaciones, competir e ir adaptándose estadísticamente al medio, es decir ir evolucionando inteligentemente.

Mediante los correspondientes mecanismos reproductivos, la evolución produce así múltiples ejemplares de un código cuántico (por tanto intrínsecamente no copiable), mediante la generación de copias, no del código en sí mismo, sino del supercomputador que lo almacena y procesa, el organismo vivo. Hace ya muchos años, el genial Stanislaw Lem había ya intuido y expresado magistralmente en una de sus obras, (19) que, en la evolución de la vida, los individuos vivos no son importantes, son puros portadores provisionales del código, de usar y tirar, como diríamos ahora. Lo importante para la vida es la supervivencia del código, de la especie, no del individuo. Según Lem, el código genético de cada especie, que contiene no solo sus características sino también su historia evolutiva, podría ser comparable a una inmensa creación literaria escrita por la evolución, editada en un gran número de ejemplares y leída y asimilada por un gran número de lectores. Solo los best-sellers han dejado huella perdurable.

Si, por otra parte, en términos informáticos, el código genético se pudiera considerar como un programa, se trataría de un programa con propiedades muy especiales; en primer lugar, porque es un programa capaz de auto-replicarse y en segundo lugar porque se ha auto-ensamblado siguiendo el mecanismo de Darwin. Puesto que la evolución es un hecho, las ideas precedentes implican que muchos de los programas que lo precedieron fueron también programas viables y, por tanto, pueden ser subprogramas o subcomponentes del código evolucionado actual de cada especie.

Existen alternativas mucho más pragmáticas, casi ingeniería, en la forma de abordar el problema. Estas se basan en las propiedades estadísticas emergentes de los sistemas complejos con interacciones de corto alcance y entre próximos vecinos que sean susceptibles de establecer mecanismos de realimentación.

Esta forma de pensar, menos provocativa, es por tanto la más comúnmente aceptada. Es un hecho muy general el que, en sistemas complejos de elementos relativamente simples interconectados, emergen espontáneamente, auto-organizadamente, formas reconocibles de nivel superior de organización. Estamos rodeados en nuestra escala de múltiples ejemplos de estas formas auto-organizadas: las ciudades, las colonias de hormigas, los corales, los ecosistemas, los sistemas económicos, la

comunidad científica, la cultura. Es evidente que la complejidad es un factor importante que todos estos sistemas tienen en común a la hora de modelar su funcionamiento y evolución. Pero otro factor siempre presente en estos sistemas es la capacidad de procesar información, de decidir en cada momento, aunque sea de forma muy elemental, por parte de sus componentes elementales o individuos.

El problema está en el origen. Para evolucionar es necesario que cada elemento del sistema evolutivo tenga una mínima capacidad de adaptación, una mínima inteligencia, una mínima capacidad de procesar información. Seres inteligentes, organismos vivos, células, bacterias... al final de esta cadena o al principio de la vida está una macromolécula. Los átomos no evolucionan, son siempre iguales (salvo que sean radiactivos); las moléculas complejas, las proteínas por ejemplo sí pueden evolucionar.

Este primer componente de la evolución requeriría también una mínima capacidad de cálculo, procesar información, adaptación. Todo parece cuadrar si las macromoléculas fuesen procesadores cuánticos. Para que pudiesen evolucionar sería necesario conferirles una cierta capacidad de selección, de decisión en cada momento. Ello solo sería posible teniendo en cuenta la naturaleza cuántica de los subsistemas moleculares y su dinámica en condiciones siempre fuera del equilibrio termodinámico.

En este sentido, y con independencia de la proliferación de iluminados por la mística de la cuántica, que son muchos, especialmente en USA, están apareciendo recientemente trabajos serios que aportan ideas y desarrollos interesantes sobre el tema del papel de la física cuántica en la evolución. Un aspecto especialmente interesante de estas ideas es su aplicación a la evolución del código genético.

La información contenida en el código es muy posible que esté almacenada sobre la nano-estructura de la propia cadena de ADN que le sirve de soporte material. Esta estructura está determinada por las posiciones relativas de sus átomos y por el conjunto de interacciones cuánticas entre ellos, es decir, un conjunto de estados cuánticos entrelazados sobre toda, o sobre segmentos de, la molécula.

Cuando se ensambla una nueva molécula de ADN sobre el patrón de la anterior, lo que se produce es una copia del soporte material del código, una copia de la información cuántica a pesar de que la información cuántica no es copiable, o como dicen los teóricos, clonable.

El éxito de tal invención, comparable en cierto modo con el de la imprenta, fue enorme puesto que posibilitó la reproducción en gran escala de aquella primera y especial molécula. A partir de ese momento puede decirse que se disparó la evolución, de forma similar a como la imprenta produjo una rápida expansión de la cultura.

Gracias precisamente a su naturaleza cuántica, intuimos, la cantidad de información contenida en el código puede ser tan inmensa y, a pesar de ello, puede ser leída y procesada rápidamente a través de sus interacciones con los estados cuánticos de las moléculas del entorno bio-químico que lo rodea. De ahí también la posibilidad de que el mismo código, idéntico para todas las células de un organismo, se pueda expresar de múltiples formas, tan diferentes como son sus distintas células (piel, huesos, cerebro, por ejemplo), y ello según el momento de su desarrollo y del entorno cambiante en que se encuentre, para dar lugar a los diferentes órganos, funcionalidades y acciones de un ser vivo.

Es este un tema de enorme actualidad y rápido desarrollo dentro de las nano-bio-ciencias. En él trabajan hombro con hombro físicos, químicos, informáticos y biólogos a pesar de las dificultades que presenta el entendimiento entre disciplinas tradicionalmente tan alejadas. Nuevas ideas y sorprendentes resultados experimentales van apareciendo en las publicaciones más recientes a lo largo de esta década, aunque todavía no han llegado a disipar la mayoría de las dudas, muy razonables por cierto, de los investigadores más familiarizados con las ideas clásicas. Digamos que tiene que pasar todavía bastante tiempo antes de que pueda lograrse un consenso.

Por otro lado, a pesar de ser muy conscientes de la modestia de nuestro punto de partida en la investigación de la evolución, comenzamos a pensar que la vida, como la conocemos, no es probablemente la única, ni la última, posible vía evolutiva.

Si, con un esfuerzo de imaginación, pudiéramos considerar los hitos del desarrollo de las ideas y de la cultura, como nuevos códigos evolutivos capaces de crear, transmitir, replicar y procesar información, suficientemente complejos, suficientemente numerosos, competitivos, interactivos y soportados físicamente por nuestros cerebros biológicos y por sus extensiones artificiales como son las bibliotecas, los bancos de datos, los procesadores electrónicos, los algoritmos de búsqueda, las redes informáticas, etc., resultaría posible pensar que se está abriendo una nueva e interesantísima vía evolutiva, la evolución de una cultura y de una inteligencia artificial colectiva.

Entonces, los humanos seríamos portadores involuntarios, actores en el mejor de los casos o, con el tiempo, meros espectadores de un desarrollo rapidísimo, un punto de inflexión, una revolución evolutiva en la que formas elementales y especies de nueva naturaleza van a competir dentro de un ecosistema poblado por innumerables formas nacidas del conocimiento y de la creatividad de la literatura, la poesía, las artes plásticas, la música, las ciencias, la tecnología, la cultura en suma.

Las consecuencias de esta nueva evolución, explosiva si se compara con la escala de los tiempos geológicos o de la evolución misma de la vida, son mucho más difíciles de imaginar.

La investigación española en nanotecnología

Para concluir este capítulo, volveremos a poner los pies en el suelo y nos referiremos al estado de las nanociencias y la nanotecnología en nuestro entorno cercano y en las actuales circunstancias. De entrada, convendría aclarar cuál es, en España, la capacidad de investigación en estos temas, con el objetivo de ayudar a conectar los avances de la investigación en nanotecnología con los intereses y la perspectiva en defensa. Resultaría además que al analizar cuantitativamente esta capacidad investigadora y la comparáramos con la de otros países, nos llevaríamos una sorpresa. Veamos por qué.

A finales de los años 90 del siglo pasado, cuando se comenzaba a popularizar en los programas de investigación de la Comisión Europea el tema de las nanociencias y nanotecnologías, un pequeño grupo de investigadores españoles, Antonio Correia, Pedro Serena y el autor de este capítulo, decidimos poner en marcha una iniciativa para conocer y aunar en lo posible el potencial nanotecnológico, tanto en investigación básica como en tecnología e industria, de nuestro país. Creamos para ello la red Nanospain, de formato similar al de otras iniciativas europeas, con la ayuda de diferentes instituciones y organizaciones. Esta red resultó utilísima, prosperó rápidamente y continúa activa en estos momentos. Los detalles pueden encontrarse en www.nanospain.org (20) pero lo que queremos comentar aquí brevemente es lo siguiente: son miembros de Nanospain, algo más de 2.000 investigadores que trabajan actualmente en España en 362 grupos universitarios, del CSIC, otros OPI, fundaciones y empresas cuyo listado detallado es accesible en esa página a cualquier interesado.

En la página web de la red Nanospain podemos encontrar, por ejemplo, un catálogo de las 96 empresas españolas activas en nanotecnología. Se encuentra también el catálogo actualizado en 2014 de las 65 empresas fabricantes y comercializadoras de grafeno en todo el mundo y la noticia de que, en el programa de la Comisión Europea, Graphene FlagShip, financiado con mil millones de euros, España ocupa el segundo lugar entre los países europeos con mayor participación. El proyecto financiado más recientemente se refiere a la desalinización de agua de mar, está liderado por el centro Tecnalia, y se basa en un nuevo método capacitivo con electrodos de membranas de grafeno que promete seriamente multiplicar la eficiencia energética del estado del arte actual en desalinización.

Sin embargo, a pesar de la evidencia de que el nivel de la nanotecnología española es excelente y cuenta con una comunidad investigadora muy numerosa e iniciativas empresariales de primer nivel tecnológico, no existe una clara reacción del gobierno en el sentido de apoyar claramente e incentivar esta excepcional capacidad. Una gran parte de la financiación, que todavía mantiene la actividad de la mayoría de los grupos, se

consigue en Europa en convocatorias competitivas. Se está desaprovechando con ello una oportunidad única, la de poner en valor la extraordinaria capacidad investigadora de nuestro país en nanotecnología para invertir en ella de forma decidida y coordinada. Esta capacidad no resulta nada despreciable para otros países del entorno europeo que, en vista de este descuido nuestro, se están llevando a los mejores investigadores para trabajar en sus instituciones y empresas.

En cuanto a la preocupación difundida por los medios de comunicación sobre la posible peligrosidad de la investigación en nanotecnología y de la dispersión en el medio ambiente de nanopartículas de diverso tipo como consecuencia de agresiones terroristas o accidentes industriales, conviene aportar aquí argumentos positivos frente a las proclamas de los que pretenden frenar la investigación en este campo.

La enorme experiencia acumulada por la naturaleza en sus desarrollos de nanotecnología natural, nos proporciona unas defensas muy poderosas y sistemas inmunológicos de los seres vivos están preparados para destruir agresores nano de muchos tipos. Siempre ha habido nanopartículas de origen natural y potencialmente perjudiciales, en suspensión en el aire o en el agua, pero los seres vivos son capaces de eliminarlas o de expulsarlas continuamente. Contra agresores vivos nanométricos, también en evolución como, por ejemplo, los virus, la lucha es muy dura y continua desde hace mucho tiempo pero parece que ha sido posible mantener un cierto equilibrio a largo plazo.

El mayor peligro de los productos nanotecnológicos que se están poniendo en el mercado aceleradamente y en escala global, es precisamente el de no haber sido ensayados concienzudamente durante un largo espacio de tiempo para garantizar su seguridad y compatibilidad con la vida a largo plazo como ya ha hecho la evolución.

Los agresores para los que la naturaleza no ha desarrollado defensas son algunos agentes químicos y drogas de diseño, pequeñas moléculas en general capaces de atravesar las barreras de las membranas celulares y, por otro lado, los elementos radioactivos que nunca fueron utilizados por la naturaleza para nada, por la manifiesta incompatibilidad con la vida de las radiaciones ionizantes.

En conclusión, cuanto más se progrese en la investigación, cuanto más se sepa y se trabaje en los aspectos científicos básicos y aplicaciones de las nanotecnologías, menos oportunidades se les dará a potenciales agresores, incluso en situaciones imprevistas. El mayor peligro es la ignorancia y la mejor defensa, ya se sabe, es estar informados y preparados.

Bibliografía

1. Bowen, M., y otros. *Large magnetoresistance in Fe/MgO/FeCo(001) epitaxial tunnel junctions on GaAs(001)*. 10 de septiembre de 2001. Vol. 79, 11, pág. 1655.
2. Roco, Mihail (Mike) C. http://www.ecole-doctorale-cli.org/ecole-doctorale/IMG/pdf/NNI_Past_Present_Future.pdf. [En línea] 20 de febrero de 2006.
3. Roco, Mihail (Mike) C. y Bainbridge, William S. *WTEC Study on convergence of Knowledge, Technology and Society: Beyond Convergence of Nano-Bio-Info-Cognitive Technologies*. s.l.: WTEC, 2013.
4. Holmes, Mark J., y otros. *Room-Temperature Triggered Single Photon Emission from a III-Nitride Site-Controlled Nanowire Quantum*. 2014. 14 (2), págs. 982–986.
5. Boitier, Fabien, y otros. *Electrically Injected Photon-Pair Source at Room Temperature*. 2014. 112, págs. 183901-1 183901-5.
6. Fernando, Briones Fernández-Pola. *ES2067381(1994), US 5431735, GB 2274468 (1994) y US 5482892 (1995)*.
7. <http://www.niteurope.com/>. [En línea] [Citado el 15 de agosto de 2014].
8. Rodrigo, M.T., y otros. *Polycrystalline lead selenide x-y addressed un-cooled focal plane arrays*. Agosto de 2003. Vol. 44, 4.
9. Silveira, Juan Pedro, y otros. *Micromachined methane sensor based on low resolution spectral modulation of IR absorption radiation*. 30 de mayo de 1988. Vol. 48, 1-3, págs. 305–307.
10. Briones, Fernando, Golmayo, Dolores y Ortiz, C. *The role of oxygen in the sensitization of photoconductive PbSe films*. 24 de Abril de 1981. Vol. 78, 4, págs. 385–395.
11. Muñoz Rojo, Miguel, y otros. *Decrease in thermal conductivity in polymeric P3HT nanowires by size-reduction induced by crystal orientation: new approaches towards thermal transport engineering of organic materials*. 21 de julio de 2014. 14, págs. 7858-7865.
12. www.mecwins.com. [En línea] [Citado el 22 de septiembre de 2014].
13. de Garis, Hugo, y otros. *A world survey of artificial brain projects, Part I: Large-scale brain simulations*. Diciembre de 2010. Vol. 74, 1-3, págs. 3–29.
14. Goertzel, Ben, y otros. *A world survey of artificial brain projects, Part II: Biologically inspired cognitive architectures*. Diciembre de 2010. Vol. 74, 1-3, págs. 30–49.
15. Galindo Tixaire, Alberto y Seoane Prado, Carlos. *Quanta y vida: discurso para la recepción pública del académico electo Excmo. Sr. D. Al-*

berto Galindo Tixaire, leído el día 7 de junio de 2011, y contestación del académico de número Excmo. Sr. D. Carlos Seoane Prado. s.l.: Real Academia Nacional de Medicina, 2011.

16. Martín Municio, Ángel. «Proteómica: ¿Qué son y para qué sirven las proteínas?». *Horizontes culturales 2000*. s.l.: Espasa, págs. 89-117.
17. von Neumann, John. «Probabilistic Logics and the syntesis of reliable organisms from unreliable components. [ed.] C. E. Shannon y J. McCarthy». *Automata Studies*. s.l.: Princeton University Press, 1956, págs. 43-98.
18. *Living Systems are Dynamically Stable by Computing Themselves at the Quantum Level*. Igamberdiev, Abir U. 2, 30 de junio de 2003, *Entropy*, Vol. 5, págs. 76-87.
19. Lem, Stanislaw. *Wielkosc Urojona (Un valor imaginario)*. s.l.: Bruguera, 1983. 9788402094735.
20. www.nanospain.org. [En línea] [Citado el 30 de septiembre de 2014].