



Energías alternativas

Matrimonio entre nanociencia y biociencia

Angel Rubio, NanoBio Spectroscopy Group, Departamento de Física de Materiales, UPV/EHU.

Quando se descubran y comprendan todas las leyes científicas subyacentes a la nanociencia podrá llevarse a cabo la idea visionaria expuesta por Richard Feynman en 1959 en su famosa charla *There is plenty of room at the bottom*, donde expuso: “quiero referirme al problema de la manipulación y control de cosas a pequeña escala..., lo que he demostrado es que hay lugar para ello, que es posible disminuir de forma práctica el tamaño de las cosas. Ahora quiero mostrar que hay sitio de sobra. No voy a ocuparme del modo en que vamos a hacerlo, sino solo que es, en principio, posible. No lo estamos haciendo, sencillamente, porque todavía no nos hemos puesto a ello”. Esto ha cambiado en las últimas décadas con el surgir de la ciencia a escala nanométrica. Las innovaciones en todos los campos pasan generalmente por desarrollos básicos e ideas sencillas. Este es el caso y las nano/bio-ciencias moldearán y definirán los avances en los campos tecnológicos, sociales y energéticos en los años venideros.

A la escala del nanómetro la materia ofrece propiedades diferentes y, muchas veces, sorprendentes de tal manera que las fronteras entre disciplinas científicas y técnicas pre-establecidas se difumina; esto es,

.....
Angel Rubio, doctor en Ciencias Físicas, catedrático de Física de la Materia Condensada (UPV/EHU), responsable del Grupo de NanoBio Espectroscopia en el Departamento de Física de Materiales, UPV/EHU y director externo de la Sociedad Max Planck y Chairman de la European Theoretical Spectroscopy Facility (ETF). Autor de más de 300 artículos. Uno de los científicos españoles más citados según el ISI en ámbitos como la física, la química y la ciencia de materiales.



la nanociencia en su naturaleza más fundamental presenta un fuerte carácter multidisciplinar. Nos beneficiamos de la dependencia de las propiedades con el tamaño de la nano-partícula para, por ejemplo, el diseño de etiquetas biológicas (fluorescencia de puntos cuánticos); electrónica molecular, materiales de alta eficiencia en aplicaciones energéticas y computación cuántica, entre otros.

Así, la realización de la nanociencia en nanotecnología se convertirá en una de las tecnologías claves en el siglo XXI: una tecnología que puede ofrecer soluciones a muchos de los problemas actuales mediante materiales, componentes y sistemas más pequeños, más ligeros, más rápidos y con mejores prestaciones. Como tal abre nuevas puertas de mercado y puede tener aportaciones esenciales en ciencias de la

salud, medioambientales^[1] y energías renovables, además de la obvias en electrónica molecular y en miniaturización de componentes. El nano-tecnólogo es un arquitecto y diseñador que en vez de usar ladrillos como elemento base usa átomos y moléculas. Tomando la cita de Alfred Forchel, “dado que la tendencia a la miniaturización no es una moda pasajera, sino que tiene ya mucho historial, es previsible que, en muchos campos, las aplicaciones se hagan a escalas cada vez más pequeñas, de lo micro a lo nano, en todas las disciplinas, desde la tecnología de la información a la química. No hace falta ser clarividente para pensar que todo continuará encogiéndose para alcanzar el tamaño más pequeño posible (un ejemplo de esta tendencia son los elementos de construcción)”, está claro que con la capacidad que se tiene en la actualidad para el control de la escala atómica y la comprensión de las estructuras biológicas se ha abierto una multitud de posibles aplicaciones de la nanociencia. En resumen, tienen el potencial para cambiar (¡a mejor!) la sociedad aprovechando de manera más eficiente los recursos naturales a nuestra disposición.

MATRIMONIO ENTRE NANO Y BIOCENCIAS

La nanotecnología tiene un espejo claro en la naturaleza ya que ésta ha encontrado soluciones eficaces a problemas básicos. Una característica frecuente es que la materia viva se estructura al nivel de detalle más fino, esto es, a nivel atómico (en realidad estos procesos son los que se quieren desarrollar por los nano-ingenieros). En este sentido podemos decir que la biología supera las fantasías más atrevidas con las que se han presentado los robots moleculares. Pasemos a mirar el nano-cosmos con esta perspectiva biomimética, ilustrando cómo estas ideas podrían ser importadas en nuestras técnicas de producción para la mejora y creación de nuevos dispositivos. Hay muchos ejemplos claros de nano-ingeniería en la naturaleza. Por ejemplo, el sistema de regulación del agua en las hojas de las plantas está frecuentemente regulado por forisomas, que son músculos de tamaño microscópico que abren canales en el sistema capilar de la planta o los bloquea si ésta se lesiona.

Otra de las tecnologías más refinadas a escala molecular es el proceso de la fotosíntesis, que se encarga de convertir mediante las clorofilas la luz solar en energía en las plantas. El centro de absorción es simplemente una serie de porfirinas adecuadamente distribuidas para maximizar el proceso de absorción y ulterior transformación de la luz en energía. Quien pueda copiar este proceso mediante la nanotecnología tendrá acceso directo a una fuente de energía limpia y casi inagotable (ver algunas propuestas en Figura 1). En este sentido, el grupo de Daniel Nocera, químico del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), ha propuesto recientemente un dispositivo que ejecuta la fotosíntesis artificial, esto es, hojas eficientes de materiales inorgánicos. La nueva hoja está hecha a partir de materiales de bajo costo ampliamente disponibles (silicio, níquel y cobalto) y emula a la química de las plantas, que usan energía de la luz solar para producir electrones y cargas positivas dentro de la hoja, y luego dividen el agua en oxígeno e hidrógeno. Además, en este momento la hoja artificial es aproximadamente 10 veces más eficiente en la realización de la fotosíntesis que una hoja natural.

[1] Desarrollando nuevos productos y procesos de producción más ajustados a usos específicos, ahorrando recursos y disminuyendo las emisiones de ruidos y agentes químicos así como optimizando la cadena de producción y uso energético.

Ya en animales, muchos tienen una alta capacidad de aferrarse a las paredes (por ejemplo, escarabajos, moscas, arañas, salamandras, etc.); se adhieren mediante pelos minúsculos a la superficie mediante fuerzas de interacción van der Waals. A pesar de la debilidad de este tipo de enlaces, el hecho de que se creen millones de puntos de adherencia hace que la salamandrina se pueda fijar en la pared. Los enlaces se rompen siguiendo el mismo proceso que cuando se retira una cinta adhesiva. Otro proceso nano-métrico es la bio-mineralización; por ejemplo, el nácar de los mejillones consiste de innumerables nano-cristales de piedra caliza del tipo aragonita que por sí solos son frágiles pero se mantienen unidos por proteínas elásticas en forma de tornillo (el peso de la proteína es muy inferior al de los cristales). Este esquema también es usado por los erizos de mar para reforzar sus pinchos. Otros procesos nanométricos cotidianos que podríamos destacar son los siguientes: I) la descripción del proceso de la visión en humanos que está ligada en un proceso ultra-rápido de isomerización cis-trans del retinal una vez que el fotón es absorbido II) el movimiento de los mosquitos hacia el objetivo (sensor nano-métrico químico), III) portar oxígeno a las células (mediante la hemoglobina de la sangre), IV) los procesos de migración de pájaros y su orientación con el campo magnético terrestre.

Esta claro que la naturaleza se ha beneficiado del hecho de que las nanopartículas adquieren propiedades nuevas cuando su tamaño es del orden de los nanómetros.

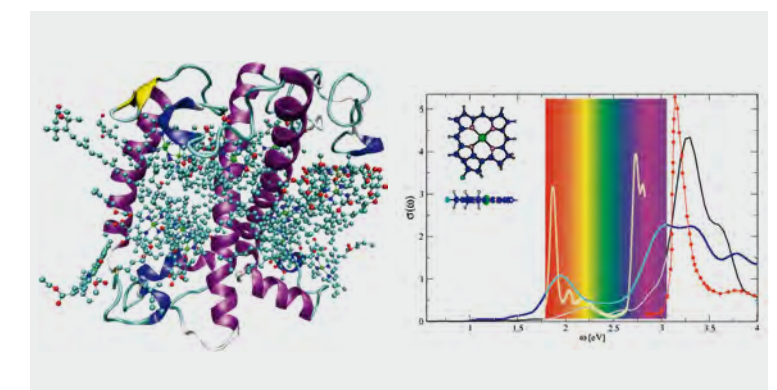
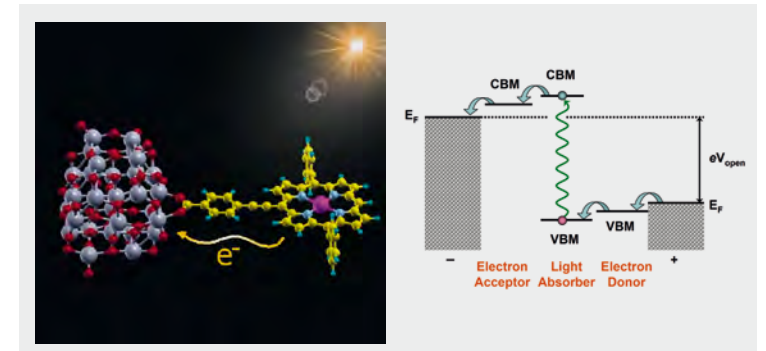


Figura 1: Arriba, esquema de un célula foto-voltaica de Grätzel *donor-acceptor*, donde el centro activo es una porfirina (*dye*). Abajo, estructura de un *Light-harvesting-complex* (LHC) sencillo correspondiente a la espinaca (consistente de 17000 átomos!) se muestra la relevancia de romper la simetría cuadrada de la porfirina para inducir absorción con luz visible y poder describir correctamente el color de la espinaca o la absorción del *dye* en la célula foto-voltaica.

NUEVOS MATERIALES PARA APLICACIONES ENERGÉTICAS

Pasamos a otras líneas de interés abordando algunas aplicaciones que entroncan con el sector energético. Por ejemplo, el recubrimiento de vidrios con nano-partículas puede ayudar a la climatización de los hogares, coches, etc., reflejando la radiación térmica o luminosa en mayor o menor medida mediante un control electrónico (en el caso de que se comercialice supondrá un gran ahorro energético en el futuro). Cabría pensar también en diseñar la pintura de los coches con nano-partículas de tal forma que se usasen para convertir la energía solar en electricidad. Otro aspecto ligado con la energía es la posibilidad de usar nano-partículas para aumentar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno que luego se usaría como combustible; hay diferentes propuestas en el mercado, todas ellas basadas en la mayor relación superficie/volumen en estas nano-partículas (por ejemplo, con los nanotubos de carbono). Otro campo es el de la realización de pilas de combustible, que ofrecen un alto rendimiento y donde la aportación de la nanociencia a esta tecnología es muy importante: nuevas superficies nano-estructuradas, películas cerámicas y catalizadores. Esta tecnología es completamente limpia,

por ejemplo, en la pila de hidrógeno se combinan el hidrógeno y oxígeno para formar agua (que es el residuo), los electrones que se transfieren del hidrógeno al oxígeno son los que se usan en la pila para generar electricidad. Esta pila ayudará claramente al motor eléctrico a tomar puestos de vanguardia como el mejor y más limpio de los motores para transporte y otros usos. Estas pilas podrán usarse en el hogar para generar tanto electricidad como calor y son un avance claro de la nanotecnología que afectará a nuestra vida cotidiana.

Un ejemplo reciente que hemos desarrollado en el grupo de investigación que dirijo, y que ha salido publicado en el mes de marzo en *Nature Communications* (2013), consiste en la búsqueda de materiales orgánicos más económicos, flexibles y eficientes a la hora de convertir la energía solar en eléctrica, en calor u otro tipo de energía. Para ello hemos investigado los procesos físicos fundamentales que ocurren en un dispositivo artificial constituido por moléculas orgánicas (triada caroteno-profirina-fulereno). Las moléculas elegidas participan en los procesos de fotosíntesis natural, por lo que el dispositivo puede absorber la luz de forma eficiente (ver figura 2).

En los dispositivos artificiales de fotosíntesis y foto-voltaicos la conversión de luz en electricidad se considera, generalmente, que ocurre en la escala de tiempo de femtosegundos y que implica un proceso incoherente de transferencia de electrones. Sin embargo, nuestro trabajo identifica que el proceso de generación de corriente eléctrica inducida por la luz absorbida tiene coherencia cuántica, es decir, es un proceso estable y robusto de 25 femtosegundos de duración en el que no se producen pérdidas. Además, los resultados indican que ese proceso está mediado por las vibraciones de un conector entre el fullereno y la porfirina (ver figura 2): primeramente, se absorbe la energía solar; luego, se generan los pares portadores de carga y, al separar estos pares, se obtiene corriente eléctrica. Identificamos el componente microscópico que dicta la separación de carga, después de que la luz sea absorbida, y que da lugar al establecimiento de la corriente eléctrica. Este componente es el que une la molécula que absorbe la luz (porfirina) con la que recibe el electrón (fulereno). Al conocer el mecanismo que provoca esta separación, se puede optimizar el sistema y controlarlo. De hecho, ahora estamos buscando cómo mejorar y caracterizar la *interface*, de tal manera que se puedan diseñar dispositivos, que sean eficientes y que duren en el tiempo. En definitiva, que sean sostenibles.

MATERIALES FUERA DEL EQUILIBRIO

Hasta el momento, se ha concentrado en el estudio de propiedades de materiales más o menos complejos. Sin embargo, hay una gran posibilidad futura en el diseño de materiales explotando las propiedades de los mismos no en su estado fundamental sino en un estado excitado, por ejemplo, el control de la reactividad como en la catálisis activada en estados excitados; o en auto-ensamblaje de nano-estructuras moduladas por láseres de femtosegundo (10^{-15} segundos). Los siguientes retos se pueden realizar gracias a los avances espectaculares en control de la duración e intensidades de los láseres pulsados. Este es un campo muy activo en la actualidad, y cabe destacar en este sentido la concesión del premio Nobel de Química en 1999 a A.H. Zewail por sus estudios de los estados de transición en reacciones químicas mediante espectroscopias de resolución en la escala del femtosegundo.

En un trabajo reciente del grupo publicado en *Proceedings of the National Academy of Science* (PNAS) a finales del año pasado, hemos de-

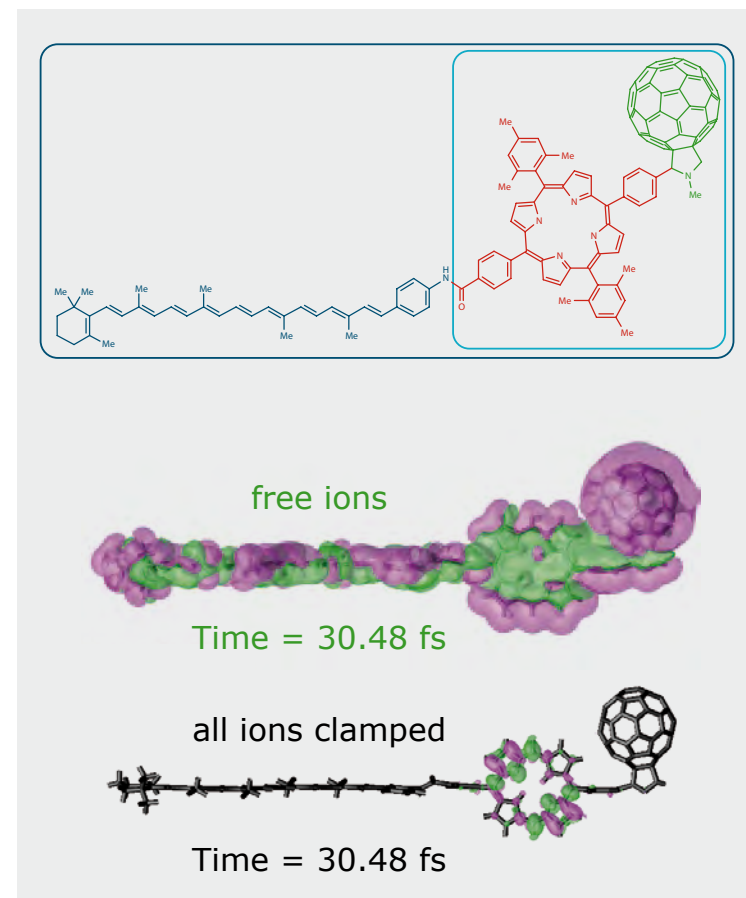


Figura 2: Esquema del compuesto orgánico Donor (carotene)-acceptor (fulereno) y receptor (porfirina) que hemos usado para abordar los primeros pasos de la conversión de energía solar en eléctrica. Al cabo de 25fs y ayudado por las vibraciones nucleares se consigue la transferencia y separación de las cargas positivas y negativas. El grupo aryl que conecta el fullereno con la porfirina es el que actúa de canalizador de todo el proceso, si este queda fijo no se produce la separación de carga. (*Nature Communications* 4, 1602 (2013)).

mostrado que se puede extraer hidrógeno de un gas de fácil obtención y bajo coste, el acetileno, encapsulado en nanoestructuras de carbono. Para ello se ha utilizado un novedoso método basado en láseres ultra-rápidos. En concreto, lo que hicieron fue confinar moléculas de acetileno en la cavidad interna de un tubo de carbono de aproximadamente un nanómetro de diámetro, para activar la ruptura de los enlaces carbono-hidrogeno del acetileno y, de esta manera, liberar hidrógeno (ver Figura 3). Ahora bien, en el caso del acetileno, la extracción de hidrógeno requiere la ruptura de los enlaces carbono-hidrógeno, que son muy fuertes, así que, tras confinar las moléculas en el tubo, hemos usado un láser pulsado para conseguir romper los enlaces y liberar el hidrógeno. Las conclusiones de esta investigación dan un paso adelante en la búsqueda de combustibles alternativos.

MOTORES MOLECULARES

Cabe empezar mirando lo que decía el protagonista de la guerra de los mundos: “Lo que más asombra al ser humano cuando considera sus aparatos es el hecho curioso de que no aparezca entre ellos el elemento predominante en nuestros mecanismos: la rueda”. Para construir un motor molecular no basta con hacer una versión en miniatura de uno ya existente, sino que uno debe preocuparse de cómo aportar la energía necesaria para el movimiento molecular se beneficie del caos del entorno (en la mayoría de los casos, esto puede ser un obstáculo que impida el movimiento mismo). Un ejemplo biológico que pone de manifiesto la idea de motor molecular consiste en la descripción de la contracción muscular. Es bien sabido desde hace tiempo que el deslizamiento de las proteínas miosina y actina es responsable de este efecto. Las moléculas convierten la energía química (ATP) en cinética con un rendimiento del 50%. Este proceso no es determinístico sino estocástico; la miosina salta

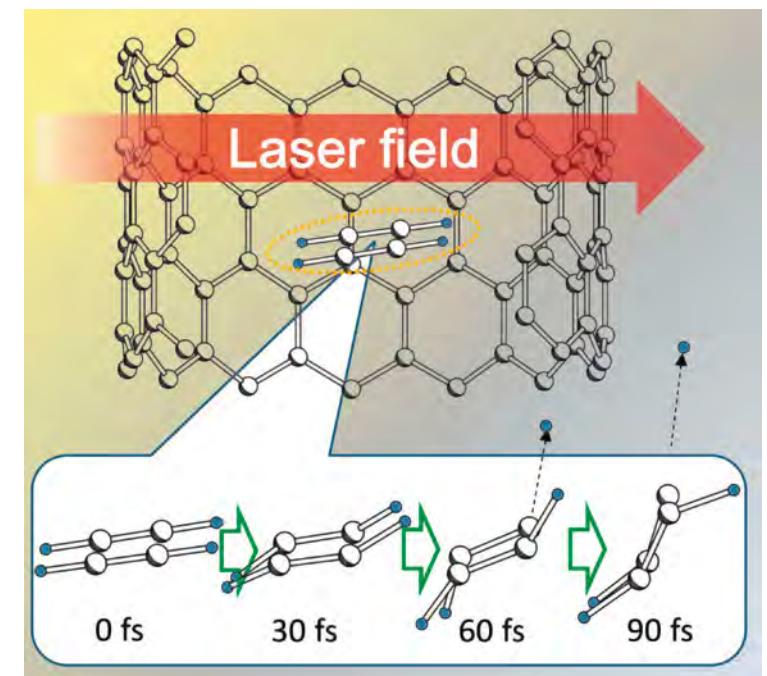


Figura 3: Esquema del proceso de foto-fragmentación de acetileno encapsulado en nanotubos de Carbono donde se ilustra la extracción del Hidrógeno molecular. (PNAS 109, 8861 - 8865 (2012)).

estocásticamente longitudes de 5.5nm (separación de las moléculas de actina en la fibra muscular) cada vez que consume una molécula de ATP. Al hacerlo tira de un filamento de actina y se produce el movimiento molecular. Aunque el proceso está en fase de investigación básica, todavía quedan muchas incógnitas en la descripción de este proceso de contracción muscular. Por supuesto, en un campo más genérico están los músculos artificiales con movimientos fluidos (interesan no sólo para prótesis artificiales sin también a los constructores de satélites para desplegar suavemente artefactos en órbita).

Desde von Neumann, uno de los sueños que definen las raíces de la ciencia de computación aplicada a los autómatas es descubrir sistemas sencillos que sean capaces de auto-organizarse para formar estructuras más complejas con funcionalidades específicas. Las células vivas son los únicos ejemplos que tenemos en la actualidad de arquitectura molecular que soportan el proceso de crecimiento en complejidad. Se está investigando mucho en el desarrollo de sistemas físico-químicos (ej. células artificiales) que permitan avanzar en la comprensión y control del proceso de integración y complejidad. En el estado actual de conocimiento, no sabemos construir máquinas auto-replicas de ningún tipo, ni grandes ni pequeñas. De estudios en biología se ha visto que el nivel mínimo de complejidad en una célula que pueda auto-replicarse es de unos 300 genes. Por lo tanto, debemos a von Neumann una idea básica que permite el concepto de auto-replicación: basado en un proceso doble, primero, como un conjunto de instrucciones cuya interpretación desemboca en la construcción de la reproducción del dispositivo; segundo, como un conjunto de datos susceptibles de copiarse sin interpretación que se añade al dispositivo creado de tal forma que también sea auto-replicable. Esta dicotomía transcripción-traducción es fundamental para entender el auto-replicado en la naturaleza, por ejemplo las células se valen de su genotipo para su auto-descripción; el ADN del genoma se copia sin apenas interpretación para formar el ARN y luego se interpreta para sintetizar las proteínas.

Quedan bastantes preguntas abiertas como: ¿dónde extraer la energía de una máquina nanométrica autónoma? Ésta, a imagen de los procesos en células descritos antes, debe ser a través de procesos químicos con el anteriormente descrito del ATP; falta por desarrollar una estrategia para las futuras máquinas nanométricas. Luego hay que definir e implementar procesos para almacenar la información necesaria para el funcionamiento de la máquina (como hace, por ejemplo, la célula vía el ADN).

No basta con soñar con el desarrollo de los nano-robots quirúrgicos que viajan a través de las venas y reconstruyen el material dañado, antes de llegar a esta etapa se debe invertir una cantidad enorme de tiempo y trabajo tanto de investigación como de formación, hay que dominar el carácter interdisciplinar de este campo: física, química matemáticas, de tal manera que todos los conocimientos básicos puedan ser usados en aras del desarrollo de las 'nano-fantasías' que, aunque no sean alcanzables, sí que dejarán un rastro impresionante de aplicaciones y nuevas ideas por el camino, que servirán para ir modelando el futuro más cercano y, en particular, para construir lo que se ha venido en llamar la sociedad de la información, que deberá suponer una mejora sustancial de la calidad de vida. ■