

Javier García de Abajo.

Instituto de Óptica Daza Valdés.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. CSIC. España.

Dijo el hombre: “Haya luz entre los átomos”.

1. Introducción

Nuestra experiencia sensorial directa se cifra en tiempos que medimos en segundos, horas, días, distancias de milímetros, metros, kilómetros, masas de gramos, kilogramos, toneladas, estrechos rangos extendidos por la ciencia hasta abarcar la inmensidad temporal, espacial y material del universo, hasta escudriñar los procesos más veloces y minúsculos del microcosmos en desafío de la propia definición del espacio y del tiempo. Y ahora nos interesa lo pequeño. Porque las cosas pequeñas tardan menos en desplazarse a lo largo de recorridos que les son afines y lo que les sucede nos parece casi instantáneo. Por ejemplo los virus cuando se multiplican a un ritmo increíble con consecuencias devastadoras pese a su tamaño diminuto, o el ordenador que devuelve un mensaje tras presionar una tecla. El dominio del mundo microscópico nos brinda la posibilidad de gestionar información rápidamente, tanto mejor cuanto más cortas son las distancias involucradas: una mayor potencia de cálculo y almacenamiento de datos requiere componentes de menor dimensión en un *microchip*.¹ Este es el *mantra* de la industria microelectrónica de hoy. Y la marcha hacia la miniaturización continúa y se ha extendido sin freno a otras tecnologías, hasta concebir una tecnología única

¹ Hay varios tiempos característicos de los procesos que se desenvuelven en escalas nanométricas y que se pueden clasificar en dos categorías diferentes: los asociados a reajustes en posiciones atómicas, tales como las transiciones de fase caracterizadas por reordenamientos colectivos de los átomos de un material (tiempos de entre nano- y pico-segundos); y las excitaciones electrónicas, como los plasmones que se discutirán más adelante, con tiempos de oscilación colectiva comparables (y en algunos casos relacionados) con el lapso que requiere la luz para viajar a través de los nano-objetos considerados, típicamente en el rango entre femto- y ato-segundos.

que aglutina a todas y cuyo paradigma es el control de los procesos materiales a la escala del nanómetro: la nanotecnología.

Pero, ¿por qué el nanómetro? ¿Por qué no indagar entre los vacíos subatómicos? ¿Quizás porque el mundo de los átomos y sus combinaciones químicas elementales ofrecen el grado necesario de complejidad e interrelación que precisa la aparición de propiedades emergentes (e.g., la vida)?² Sea como fuere, los avances tecnológicos acaecidos en las dos últimas décadas nos han aproximado rápidamente al control directo de objetos nanoscópicos, con numerosos ejemplos que incluyen la síntesis de nanopartículas de diferente morfología, pinzas ópticas para fijarlas y moverlas en el espacio con precisión exquisita, microscopios de efecto túnel para observar e incluso mover átomos individuales mediante puntas atómicas, y un sinfín de técnicas diferentes que proliferan en la efervescencia de la nueva tecnología.

¿Nueva? ¿Acaso no es la naturaleza la primera nanotecnóloga? Guiada por el azar, ha logrado reflexionar sobre sí misma a través de la compleja secuencia de eventos nanoscópicos que nos otorga consciencia. No somos sino pruebas andantes y pensantes de las profundas ramificaciones derivadas del concepto simple de auto-ensamblado. O quizás si revisamos algunas reliquias históricas, como la célebre copa que muestra el mito del rey Lycurgus (siglo IV a.C.), encontremos también vestigios de nanotecnología: su color rojizo o verdoso según se vea o no al trasluz responde a las propiedades ópticas de nanopartículas de oro dispersas en el vidrio que le da forma.

² El principio antrópico reverbera en cuestiones como éstas, junto a otras como el porqué del tamaño de los humanos, entre uno metro y dos metros.



Copa de Lycurgus (siglo IV a.C.) iluminada desde el exterior (izquierda) y desde el interior (centro), e imagen de microscopio electrónico de una nanopartícula de oro encontrada en el vidrio del que está hecha (derecha).

En cambio, la nanotecnología se sitúa en la esfera de la voluntad, la memoria y el entendimiento humanos, aspectos consustanciales del método científico que la distancian de los azares históricos o naturales. Por primera vez en la historia somos capaces de dominar, registrar y entender el mundo microscópico a la escala más pequeña posible, compatible con las condiciones ambientales de nuestro entorno. La nanotecnología aspira a perfeccionar ese control y hacerlo útil, y muchos científicos y tecnólogos la elevan al rango de revolución: la conjunción de diferentes campos del saber en una fiesta de interdisciplinaridad donde las materias tradicionales se desdibujan en favor de una gran ciencia al estilo renacentista y donde se adivinan paradigmas insospechados de amplia repercusión social.

Los campos electromagnéticos, y en concreto la luz,³ forman parte privilegiada de esta joven disciplina al ser portadores de información e instrumentos de medida y control. La *nanofotónica* se encarga del estudio de la

³ Los campos electromagnéticos se miden a través de la fuerza que ejercen sobre cargas y corrientes eléctricas, fuentes a su vez de dichos campos. Cargas y corrientes sufren oscilaciones similares a las de un columpio en torno a su posición de equilibrio, de manera que la frecuencia de oscilación es una propiedad importante (por ejemplo, los 50 ciclos por segundo de la corriente en la red eléctrica), y por tanto también lo es la longitud de onda o distancia que recorre el campo durante un ciclo de oscilación a una velocidad constante de aproximadamente 300.000 km/s (la de la luz en el vacío). El espectro de longitudes de onda posibles es infinito y estamos acostumbrados a utilizar nombres diferentes para referirnos a campos electromagnéticos asociados a intervalos distintos de ese rango: rayos x y gamma para las longitudes muy cortas, ondas de radio de diversa frecuencia (por ejemplo, los 100 MHz de algunas estaciones de FM, correspondientes a longitudes de onda de 3 metros) o luz visible para el intervalo de 300 a 700 nanómetros (el color proviene precisamente del cambio en la longitud de onda). Todas éstas son manifestaciones del mismo fenómeno físico: la propagación de ondas electromagnéticas predichas por Sir J. C. Maxwell y descubiertas por H. Hertz en el siglo XIX.

luz a escala nanométrica y beneficia a la biología, la química y la ingeniería a través de esquemas novedosos de microscopía, de modificación externa de reacciones y de dispositivos integrados para conmutación óptica. Y como las demás disciplinas de lo *nano*, la nanofotónica se enfrenta al reto de lidiar con las reglas de juego del mundo de lo pequeño, donde la física cuántica es dueña y señora, y los conceptos deterministas pierden su utilidad. Sin embargo, estas nuevas reglas producen fenómenos sin parangón en el mundo macroscópico y se convierten por ello en una ventaja para el nanotecnólogo.

Mientras los biólogos moleculares se esfuerzan en entender los detalles de la auto-replicación celular, físicos e ingenieros descubren recetas para lograr auto-ensamblado de entes nanoscópicos inertes (ópalos, auto-organización de moléculas complejas, etc.) en su afán por emular los procesos naturales de la vida (*top-down approach*) y con fe en encontrar propiedades emergentes desconocidas. Otras estrategias se decantan por construir castillos microscópicos de ladrillos moleculares (*bottom-up approach*), controlados con precisión por herramientas como las pinzas ópticas. Todo ello en estrictas condiciones de laboratorio (ultra-alto vacío y pureza química). Resulta sorprendente comprobar cómo la naturaleza que pretendemos imitar es aún capaz de sintetizar las mejores estructuras fotónicas conocidas, y lo hace en medios turbios, en un charco.

2. Control nanométrico del flujo de luz

Algunos de los avances más significativos de la nanofotónica se han centrado en los metamateriales, cuyas propiedades ópticas superan y complementan las de los materiales que se encuentran en la naturaleza o las de los sintetizados con técnicas químicas y físicas convencionales. Los metamateriales se construyen de forma artificial a partir de componentes microscópicas, organizadas en general en disposiciones periódicas, y presentan respuesta óptica asimilable a la de medios continuos sin estructura, cuyo manejo resulta sencillo al venir descritos por constantes efectivas. El índice de refracción, definido por el cambio angular en la dirección de propagación de la luz al atravesar una superficie, es una de esas constantes sobre las cuales se han producido importantes avances, como la demostración experimental de medios

de índice negativo en los que la dirección de difracción es contraria a la intuición. El profesor Sir John B. Pendry, del Imperial College (Londres), fue pionero en el diseño de este tipo de materiales y mostró en el año 2000 cómo podrían ser utilizados para fabricar *lentes perfectas*, capaces de formar imágenes con precisión superior a la impuesta por el límite de difracción, que impide resolver detalles inferiores a media longitud de onda (una fracción de la micra para luz visible). En realidad se han construido lentes perfectas tan sólo para microondas, pero su concepción ha supuesto una fuente de inspiración para muchos grupos de investigación en busca de fenómenos ópticos extraordinarios.

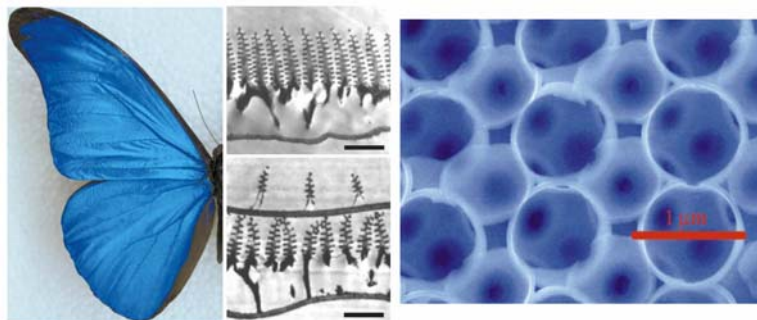
Entre ellos destacan los materiales invisibles, indistinguibles del aire porque tienen su mismo índice de refracción. Otra estrategia para lograr invisibilidad, demostrada por el profesor Pendry y sus colaboradores durante 2006, consiste en rodear el objeto que se quiere hacer desaparecer de una coraza para desviar las ondas electromagnéticas de forma adecuada, como los escudos de las naves de los *romulans* en *Star Trek*. De nuevo, estos materiales han sido confeccionados tan sólo para microondas (este logro ha captado la atención de la prensa internacional), aunque su extensión a frecuencias altas (por ejemplo el infrarrojo cercano) es una cuestión más técnica que conceptual.

Recientemente se ha logrado un alto grado de invisibilidad en metales, opacos en general, pero que se tornan transparentes al ser perforados por redes periódicas de agujeros. La transmisión de luz a través de un solo agujero resulta enormemente reducida si es pequeño frente a la longitud de onda, mientras el efecto cooperativo de una disposición periódica de agujeros induce resonancias que apilan intensidad de luz en las cercanías de los mismos, produciendo una transmisión neta cercana al 100%, al menos para rayos infrarrojos y agujeros nanoscópicos.

Otro avance singular consiste en modificar drásticamente la velocidad de propagación de la luz, afectada doblemente por el índice de refracción: a través del propio valor del índice y debido a su variación con el color (dispersión). La dispersión puede alcanzar cotas muy elevadas en determinados gases

convenientemente iluminados, donde se ha conseguido frenar la luz hasta velocidades inferiores a la de una persona en movimiento.

Estos fenómenos se sustentan en general en el control del flujo luminoso a escala nanométrica (muy por debajo de la longitud de onda) para crear la ilusión de medios continuos efectivos, aunque se han descubierto efectos igualmente sorprendentes en materiales de estructura más gruesa. Por ejemplo, en los llamados cristales fotónicos, donde el índice de refracción aparece modulado periódicamente en el espacio y donde la luz se comporta de manera análoga a los electrones sensibles a la disposición periódica de los átomos en el seno de un cristal sólido convencional. Emergen por tanto conceptos análogos a los de aislante y conductor eléctricos, pero para la luz. En concreto, los cristales fotónicos aislantes (*photonic band-gap materials*) permiten reflejarla por completo sin absorción alguna, o también guiarla a través de defectos concatenados. En este contexto se han construido guías de luz capaces de cambiar su dirección de propagación en distancias de tan sólo una micra, con el consiguiente potencial para reducir componentes ordinarias de circuitos ópticos tales como las fibras de sílice, portadoras de señales de teléfono, *internet* y televisión, y que requieren milímetros para lograr el mismo efecto.



Los colores vivos de las mariposas (izquierda: ala de *M. Rhetenor*) no son producidos por pigmentación sino por iridiscencia de nano-estructuras naturales (centro: imagen de microscopio electrónico del ala de *M. Rhetenor*, tomada de P. Vukusic y J. R. Sambles, *Science* **852**, 2003; las barras indican 1.8 micras). Los científicos imitan la naturaleza y buscan efectos similares en cristales fotónicos (derecha: ópalo inverso sintetizado por los grupos de los profesores F. Meseguer y C. López, *Nature* **405**, 2000).

En otra vertiente, la fuerza de enlace entre moléculas se puede determinar ahora con facilidad gracias a técnicas desarrolladas en el ámbito de la nanofotónica, pues las señales electromagnéticas ejercen fuerzas sobre objetos capaces incluso de moverlos. De hecho, la luz transporta energía y momento (cantidad de movimiento), magnitudes conservadas en cualquier proceso físico y que se transfieren al rebotar sobre un objeto ejerciendo presión de la misma forma que una raqueta de tenis recula al ser impactada por una bola a gran velocidad. Tanto las velas solares (en fase de desarrollo por la NASA para propulsión de naves espaciales) como las pinzas ópticas emplean este fenómeno. Éstas últimas permiten estudiar micro- y nano-objetos atrapados en un haz de luz focalizada. Incluso se han desarrollado pinzas holográficas para atrapar y mover simultáneamente hasta varias decenas de nanopartículas de manera individualizada.

Los conceptos de campo cercano, campo evanescente y resonancia son importantes en todos estos ejemplos. La nanofotónica se centra principalmente en el llamado campo cercano, referido a distancias próximas a los objetos sobre los cuales la luz se refleja, se absorbe o se dispersa, tomando como regla de medir la longitud de onda. El campo cercano presenta un comportamiento complejo, similar al de las ondas sobre la superficie del agua en un estanque en su evolución aparentemente caprichosa en las vecindades de la orilla o en presencia de algún objeto flotante que las perturbe. En el campo cercano aparecen contribuciones de los llamados campos evanescentes, incapaces de propagar energía, y por tanto inmunes al conocido principio de conservación al que otros campos (los propagantes) están sometidos. Los plasmones de superficie ilustran claramente el concepto de campo evanescente, pues son excitaciones de electrones de conducción, similares a las de un plasma, que al no propagar energía en dirección perpendicular a la superficie están condenadas a vivir en sus inmediaciones (en la práctica hasta que desaparecen devoradas por otros modos de movimiento ávidos de energía, como las excitaciones electrónicas o los fonones). Los plasmones también se pueden entender en su faceta de resonancias en las cuales un campo externo evanescente se amplifica por interacción con una superficie plana. El estudio de la creación y guiado de

plasmones en superficies metálicas estructuradas constituye el núcleo central de la plasmónica, de la que se esperan desarrollos esenciales para futuros circuitos ópticos.

Asimismo, existen plasmones en nanopartículas metálicas, observables en las bandas de absorción óptica. Al contrario que en superficies planas, los plasmones de nanopartículas pueden escapar de ellas por acoplamiento directo con luz propagante. La longitud de onda de estos plasmones depende críticamente de la composición y morfología de las partículas, convertidas en objeto de estudio de un amplio campo de la nanofotónica interesado en sintonizar e intensificar este tipo de resonancias. En una esfera más artística, la presencia de nanopartículas metálicas en medios transparentes los tiñe de colores que varían según sean las condiciones de iluminación, tal y como sucede en la copa de Lycurgus.

3. Algunas aplicaciones

Las enormes esperanzas depositadas en la nanotecnología se reflejan en un sinfín de aplicaciones potenciales como nano-robots, cura del cáncer o polvo inteligente. Si bien es cierto que se está avanzando rápidamente en diversos frentes, existe todavía un gran salto tecnológico entre la ingeniería actual y la complejidad de los procesos biológicos, máximo exponente de la nanotecnología natural. Posiblemente el camino aún por recorrer sea largo y arduo antes de ver satisfechas las promesas de la nueva tecnología.

La nanofotónica no es inmune a este estado de euforia. La dura competencia por fuentes de financiación empuja a menudo a científicos y tecnólogos a presentar un futuro halagüeño casi inmediato ante sus mecenas, auspiciados en parte por claros síntomas que evidencian una auténtica revolución en tecnologías fotónicas. Aunque las aplicaciones concretas puedan demorarse, los éxitos antes mencionados están generando una estela de avances básicos en conmutación óptica, bio-sensores, microscopía, etc.

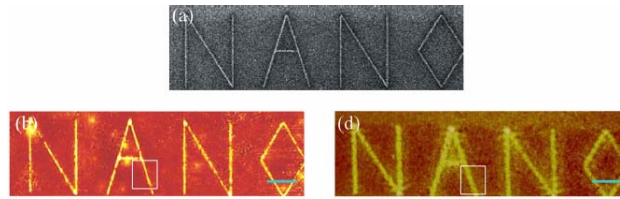
El computador óptico ha sido la gran promesa de los últimos lustros, destinado a reemplazar los ordenadores convencionales en favor de otros que

puedan transmitir y procesar información más rápidamente.⁴ Este es un claro ejemplo de promesa aún no cumplida sobre la cual sin embargo se están acumulando avances significativos en el ámbito de la nanofotónica. Quizás el resultado final no sea la fabricación masiva de este tipo de computadores, pero los esfuerzos destinados a diseñar nuevos dispositivos nano-ópticos parecen dar sus frutos y ya existen numerosos diseños de dispositivos en fase de estudio para su viabilidad comercial, con importantes aplicaciones en telecomunicaciones.

La medicina será sin duda la gran beneficiaria de la nanotecnología, donde la nanofotónica está contribuyendo a través de detectores capaces de rastrear bio-moléculas en bajísimas concentraciones, de cuya presencia se infieren por ejemplo determinadas patologías. Los plasmones de superficie cobran relevancia en este contexto, pues amplifican la respuesta óptica que permite identificar moléculas específicas. De hecho, existen desde hace varios años dispositivos para medir el nivel de azúcar en alícuotas de sangre mediante observación de cambios de color producidos por plasmones.

Gran parte de los esfuerzos en nanofotónica se orientan a vencer el límite de difracción. Éste es el caso de una ingeniosa demostración experimental del uso de campos evanescentes hecha por el profesor Xiang Zhang de la Universidad de Berkeley, quien presentaba este verano en diversos foros científicos imágenes con resolución espacial superior a la de los mejores microscopios ópticos. También es importante poder proyectar luz con detalles cada vez más pequeños, que pueden ser fijados mediante técnicas de litografía, conceptualmente análogas al proceso de revelado fotográfico. En esta línea, la empresa *Intel*, en su empeño por seguir la ley formulada por su co-fundador Gordon E. Moore, ha anunciado recientemente la fabricación de *microchips* con detalles de 45 nm.

⁴ Varios pulsos de luz de distinto color pueden circular por una misma fibra simultáneamente, cada uno de ellos equivalente a una señal eléctrica que precisaría un hilo conductor diferente en los circuitos electrónicos convencionales.



El concepto de lente perfecta ideado por el profesor J. B. Pendry ha conducido recientemente a una realización imperfecta pero capaz de resolver detalles nanoscópicos, como los de la palabra NANO impresa por litografía en la imagen superior y observada con la nueva lente (abajo a la izquierda). La imagen obtenida por un microscopio convencional de alta resolución es claramente menos nítida (derecha). (Resultados del grupo del profesor X. Zhang, *Science* **303**, 2004.)

La nanofotónica fomenta sin duda al desarrollo paralelo de otras tecnologías como la computación cuántica, cuyos pilares se asientan en la mecánica cuántica y el principio de incertidumbre de Heisenberg. El *qubit* es el elemento básico de información del computador cuántico y representa un sistema de dos niveles (por ejemplo un átomo relajado o excitado). El principio de incertidumbre permite a cada *qubit* estar en cualquiera de sus dos estados simultáneamente, de manera que una operación realizada sobre un conjunto de cien *qubits* afecta al total de $2 \times 2 \times \dots \times 2 \times 2 \sim 10^{30}$ estados colectivos distintos. No he podido encontrar ningún prefijo para denotar esta cantidad astronómica.⁵ Aunque sólo ha sido posible combinar una decena de *qubits* hasta ahora, cada nuevo *qubit* añadido incrementará la potencia de cálculo en un factor de dos. Por el momento la computación cuántica ya se ha traducido en productos comerciales: los sistemas de criptografía cuántica, basados en señales ópticas codificadas de forma tan segura que cualquier intento de interceptar un mensaje sólo puede destruirlo sin que nadie lea su contenido.

Pero lo más interesante está aún por llegar. Dejando de lado la frivolidad del uso de nanopartículas en cremas solares para disminuir su aspecto lechoso, los objetivos de la nanofotónica alcanzables a corto plazo incluyen la localización y el almacenamiento de cuantos de energía luminosa en cavidades ópticas resonantes (de la misma forma que los circuitos electrónicos guardan información codificada en señales eléctricas), filtros para bombillas que dejen

⁵ Kilo (10^3), mega (10^6), giga (10^9), tera (10^{12}), peta (10^{15}), exa (10^{18}), zetta (10^{21}), yotta (10^{24}). Hemos de acostumbrarnos a los prefijos que se avecinan.

escapar la luz visible sin disipar inútilmente energía en el infrarrojo (calor), o nanopartículas dispensadoras de medicamentos mediante marcadores biológicos activados por luz de colores específicos (de nuevo gracias a los plasmones). Y si dejamos volar la imaginación encontramos retos como la posibilidad de extraer energía del vacío (efecto Casimir) o la fabricación de polvo inteligente, dispersado en la atmósfera y portador de señales ópticas inmunes a eventuales catástrofes.

En suma, una larga lista de aplicaciones que poblarán nuestro entorno para hacerlo más amigable, para extender nuestra visión del mundo hasta los mismos intersticios atómicos, o quizás precisamente para todo lo contrario. Sólo el tiempo lo dirá.

Madrid, 10 de noviembre de 2006