



Mehr Licht!

Ricardo Díez Muiño.

Director del Centro de Física de Materiales CSIC-UPV/EHU y Director del Donostia International Physics Center, Donostia - San Sebastián.

De la misma manera que al entrar en una habitación a oscuras buscamos automáticamente con la mano el interruptor que nos permite iluminar el entorno, muchos físicos recurren de forma casi instintiva a la luz para orientarse en el mundo microscópico y entender cómo funciona la materia en la escala atómica. Este texto hace un breve repaso de la información que podemos adquirir al hacer incidir luz sobre sistemas de muy distinto tamaño y recoger los electrones que son emitidos en procesos de fotoemisión.

Cuenta la leyenda que al comienzo de la primavera de 1832, en su último momento de lucidez antes de morir, el escritor alemán Johann Wolfgang von Goethe gritó con voz quejumbrosa "mehr Licht!", "¡más luz!". Quizás porque la expresión cuadra perfectamente con el temperamento del romántico Goethe, capaz de vender su alma al diablo, al menos en la ficción, por un amor de juventud, esta frase se ha dado por cierta y ha generado no pocas interpretaciones. La más literaria y humana es que Goethe sentía la sombra oscura de la muerte acercándose y reclamaba, ansioso, un poco más de vida, una prolongación de su tiempo. Una interpretación más prosaica y no sé si más verosímil, es que Goethe simplemente solicitaba a una de sus asistentes que descorriera las cortinas de la ventana que daba al jardín para poder contemplar mejor la luz de la mañana. En cualquier caso, lo que parece muy poco probable es que con sus últimas palabras el bueno de Goethe estuviera reclamando estudios científicos más profundos sobre la naturaleza de la luz. A pesar de lo que pueda parecer, no sería esta nueva explicación de sus últimas palabras una teoría tan descabellada, puesto que en el siglo XIX la separación entre las disciplinas artísticas y científicas era menos acusada que en la actualidad. El propio Goethe era científico además de poeta, estaba en estrecho contacto con investigadores de su época y llegó a publicar incluso un libro de óptica en el que teorizaba sobre el fenómeno del color. A buen seguro que, de encontrarse en una situación vital más sosegada, Goethe hubiera reivindicado con firmeza más avances científicos sobre la luz.

El hecho de que sea la primera de las interpretaciones, la literaria, la que más aceptación haya encontrado es debido probablemente al simbolismo que la luz ha tenido siempre para el ser humano. La luz nos saca de la oscuridad, ilumina

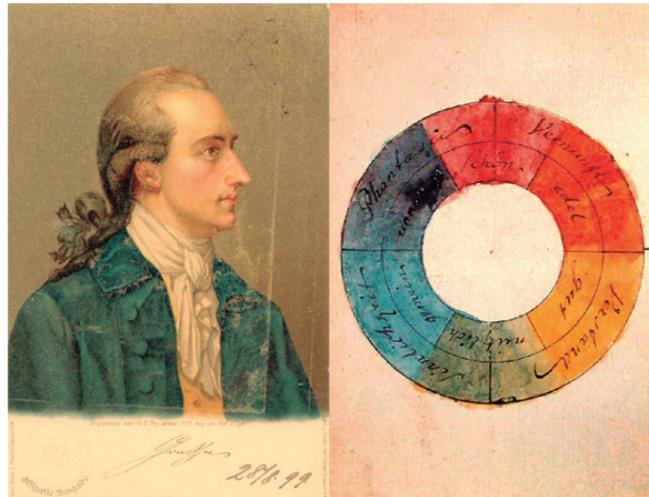


Figura 0. Además de sus obras literarias, Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) publicó varios trabajos científicos, entre ellos uno sobre la naturaleza de la luz y el color (*Teoría de los colores*, 1810).

nuestro mundo y es por tanto ayuda para el conocimiento de nuestro entorno. Ya en la tradición bíblica se dice que Dios vio que la luz era buena y que separó la luz de las tinieblas que cubrían el abismo. Arrojar luz sobre cualquier problema significa descubrir sus recovecos para poder afrontarlo de una manera más eficaz. Es la misma metáfora que llevó a llamar al siglo XVIII, aquel en el que se extendió el uso de la razón y el análisis para mejorar nuestra comprensión del mundo, el Siglo de las Luces.

La luz nos saca de la oscuridad, ilumina nuestro mundo y es por tanto ayuda para el conocimiento de nuestro entorno.

La iluminación de un objeto nos permite por tanto acceder a él en todos sus detalles. Pero hacer incidir luz sobre él puede ser también una forma de transmitirle energía. La luz solar focalizada por una lente es capaz de prender la llama y crear fuego. La energía transportada por la luz puede llegar incluso a romper el objeto, de la misma forma que las pistolas-láser en cualquier película de ciencia-ficción son capaces de agujerear las avanzadas armaduras protectoras de los soldados enemigos. Somos por tanto capaces de recoger información, pero también de modificar y romper cosas con la luz. Vamos a hablar en los párrafos siguientes de luz, del lugar en que se encuentra nuestro conocimiento actual de la luz y de algunos de los papeles protagonistas que ha adquirido en la ciencia actual, en particular cuando actúa en feliz pareja con otro de los grandes nombres de nuestro universo científico, el electrón.

RECORDANDO A LOS GRANDES

Aunque el progreso en la descripción científica de la naturaleza y efectos de la luz, como en cualquier otro problema científico, esté basado en numerosas contribuciones históricas que incluyen grandes nombres de la física como Newton o Maxwell y que han ido ampliando la frontera de nuestro conocimiento, existe una fecha que podríamos considerar clave en la comprensión actual de la interacción entre luz y materia: 1905, el Annus Mirabilis de Albert Einstein, el año en el que el físico alemán (después suizo y estadounidense) publicó en la entonces prestigiosa revista alemana *Annalen der Physik* cinco artículos históricos, básicos para el desarrollo de gran parte de la física moderna. Entre estos cinco artículos, hay tan solo uno que el propio Einstein calificó en su momento como 'revolucionario', aquel titulado 'Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz', en el que proponía la propagación de la luz a partir de la existencia de 'un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse y solo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas'. El nuevo planteamiento de Einstein suponía cuestionar la validez ilimitada de la teoría de la luz de Maxwell, que se basaba en una distribución continua de la energía del campo electromagnético. Maxwell, por quien Einstein sentía un enorme respeto intelectual, había sido capaz de formalizar matemáticamente gran parte de los avances que en la descripción de la electricidad y magnetismo se habían producido durante el siglo XIX, convirtiéndose en uno de los gigantes históricos de la física. El artículo de Einstein era por tanto una forma de rizar el rizo, de complementar y ampliar los trabajos de Maxwell, que eran ya reconocidos como uno de los grandes hitos en la historia de la física.

Unos años más tarde, en 1916, los cuantos de luz de Einstein se transformaron en auténticas partículas cuando él mismo propuso que estos cuantos no solo intercambiaban energía con la materia sino también cantidad de movimiento en una dirección determinada. Desde entonces, hemos aprendido a convivir con la enrevesada naturaleza de la luz, cuya descripción exige en ocasiones considerar que es una onda y en otras que es una partícula. Es la dualidad onda-corpúsculo. Diez años después, en 1926, las partículas de luz recibieron su bautismo y adquirieron el nombre de fotones gracias a un oficinista inesperado, el químico americano Gilbert N. Lewis, uno de los científicos que más veces estuvo cerca de obtener el Premio Nobel (se dice que hasta 35) sin llegar a conseguirlo nunca. Lewis acuñó por primera vez la palabra fotón en una carta a la revista *Nature*,

aunque su idea sobre las partículas de luz difería ligeramente de la de Einstein. Pero el término fotón pervivió.

El artículo de Einstein del año 1905 es la primera descripción teórica del efecto fotoeléctrico en términos de la absorción de fotones. En un proceso fotoeléctrico, un sistema cualquiera absorbe luz y utiliza esta energía absorbida para excitar electrones que pueden ser recogidos en el exterior. Dicho de otra forma, el fotón, la luz, desaparece y, en una especie de sacrificio generoso, su energía sirve para liberar un electrón. El hecho de que la energía aportada por la luz tenga que ser absorbida en forma de paquetes, de cuantos de energía bien definida, y no en la forma continua derivada de las ecuaciones de Maxwell, ha supuesto, como bien planteaba el propio Einstein, una verdadera revolución en la descripción de la interacción entre luz y materia.

RECOGIENDO ELECTRONES

El efecto fotoeléctrico o, de otra forma, el proceso de fotoemisión electrónica es la base a partir de la cual se han desarrollado infinidad de técnicas experimentales de caracterización y espectroscopía, tanto de átomos y moléculas en fase gaseosa como de superficies, nanoestructuras y sólidos. En todas estas técnicas, la luz funciona como una sonda, como una herramienta que utilizamos para extraer información, en este caso en forma de electrones, de nuestro sistema. Uno de los aspectos más interesantes de las técnicas de fotoemisión es que, dependiendo de la energía del haz que hacemos incidir sobre la muestra, podemos tener acceso a informaciones muy distintas sobre los sistemas que estudiamos.

Hemos aprendido a convivir con la enrevesada naturaleza de la luz, cuya descripción exige en ocasiones considerar que es una onda y en otras que es una partícula.

Desde un punto de vista general, los electrones que conforman la materia pueden estar muy ligados (necesitamos mucha energía para arrancarlos) o poco ligados (necesitamos menos energía). Son estos últimos, los electrones poco ligados, los denominados de valencia, los electrones relevantes en los procesos

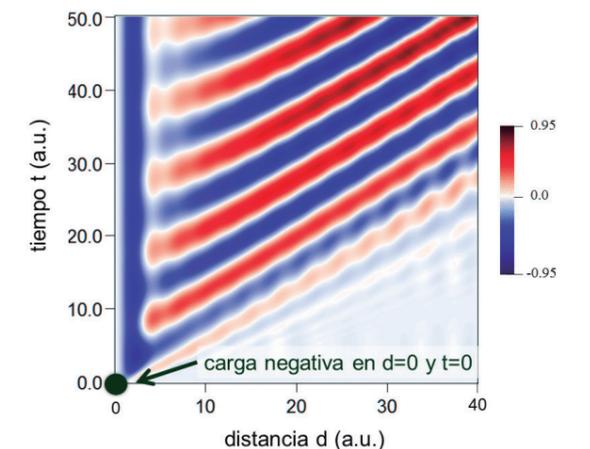


Figura 1. Densidad electrónica inducida en función de la distancia y el tiempo cuando introducimos una partícula cargada en un medio metálico. El apantallamiento se produce en tiempos ultrarrápidos, por debajo del atosegundo [A. Borisov et al. *Chem. Phys. Lett.* 387 95 (2004)].

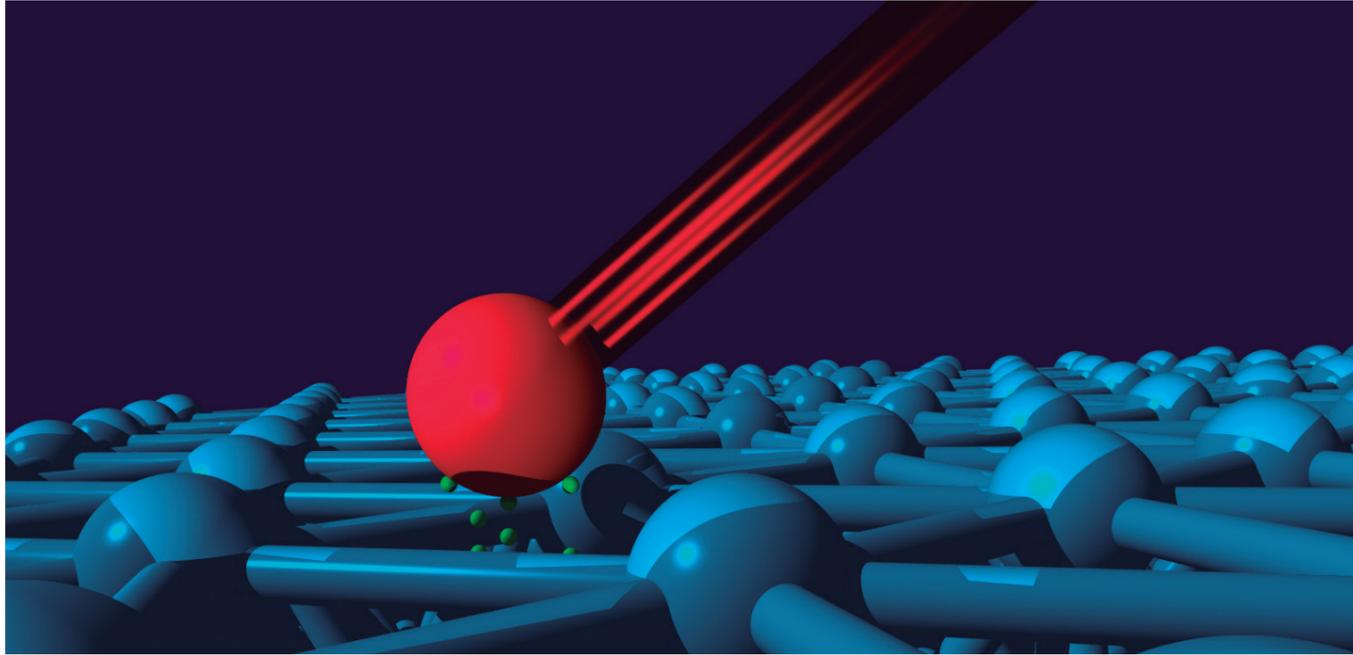


Figura 2. Átomos adsorbidos pueden transferir electrones a la superficie después de ser excitados con luz. [R. Díez Muiño et al. PNAS 108, 971 (2011)]

químicos. Son los que forman los enlaces y por tanto los responsables de que distintos átomos se junten o separen, una especie de 'pegamento' de la materia. Para extraer estos electrones de valencia de cualquier material necesitamos luz de frecuencia ultravioleta. Las técnicas de fotoemisión a partir de radiación ultravioleta, por tanto, nos proporcionan acceso a las propiedades electrónicas y químicas de los materiales y, de hecho, han sido la herramienta fundamental para acceder de forma experimental a la distribución periódica de los electrones en los sólidos cristalinos y para verificar la precisión de la descripción de estas propiedades en términos de su estructura de bandas.

Distinto es el caso de los electrones más ligados, aquellos que están más cercanos a los núcleos de los átomos y se sienten fuertemente atraídos por la carga de estos últimos. La extracción de estos electrones exige radiación de mayor energía, en la zona de los rayos X del espectro electromagnético. Una de las ventajas de fotoemitir estos electrones es que su energía de ligadura está definida de forma más precisa y es, en general, específica de cada átomo, similar a una huella dactilar. El espectro de fotoemisión por rayos X de un material es así una especie de identificación por huellas dactilares de los materiales, una potente herramienta de análisis químico.

La aparición de nuevas fuentes láser con pulsos extremadamente cortos nos ha permitido adentrarnos en el mundo ultrarrápido, en la química del femtosegundo y en la física del atosegundo.

En general, de la misma forma que en las películas americanas de cine clásico los heroicos protagonistas que se escapan de infernales prisiones encuentran todo tipo de dificultades y peleas antes de llegar a su destino, los electrones fotoemitidos, en su huida hacia el detector experimental que los espera con los brazos abiertos, encuentran otros átomos de material y sufren desvíos y colisiones. Algunos de estos electrones, los menos afortunados, no cumplen su

objetivo final de escapar del sistema pero los más exitosos, los que sí lo consiguen, son testigos valiosísimos, si sabemos preguntarles adecuadamente, de la conformación estructural del lugar del que vienen. La difracción de fotoelectrones y, en particular, de aquellos electrones que provienen de las capas más internas de un material y son excitados con rayos X, es por tanto una excelente herramienta para estudiar las propiedades estructurales de sólidos, superficies y nanoestructuras. El desarrollo de herramientas teóricas basadas en la simulación de las colisiones elásticas experimentadas por los electrones en su salida hacia el vacío partiendo de determinadas geometrías y la comparación de los resultados así obtenidos con la evidencia experimental es una fantástica puerta de acceso a la información estructural.

Variar la energía de la luz incidente nos permite por tanto seleccionar el tipo de información que podemos extraer de un determinado sistema. Podemos acceder a sus propiedades electrónicas, químicas o estructurales. Pero las propiedades de coherencia o incoherencia de la luz incidente y la selección de los tiempos en los que enviamos pulsos de luz nos permiten también acceder a información desde un punto de vista totalmente distinto. La aparición de nuevas fuentes láser con pulsos extremadamente cortos y el desarrollo de técnicas experimentales basadas en ellos nos ha permitido adentrarnos en el mundo ultrarrápido, en la química del femtosegundo y en la física del atosegundo. Un femtosegundo es la mil billonésima parte de un segundo y un atosegundo mil veces menos, la trillónésima parte de un segundo. Para hacernos una idea de las dimensiones de las que estamos hablando, en las que es fácil perderse: la proporción entre un atosegundo y diez segundos es aproximadamente la misma que entre diez segundos y la edad del Universo. Entre 1964 y 2001, el año en que se generó el primer pulso láser de duración inferior al femtosegundo, la duración de estos pulsos se ha reducido en tres órdenes de magnitud. Nos hemos garantizado así el acceso a una escala temporal totalmente nueva que estamos comenzando a explorar con un nivel de detalle impensable en el pasado. El salto cualitativo que supone acceder a la escala del atosegundo en el estudio de las propiedades electrónicas es espectacular, parecido al salto que supuso el paso de la fotografía fija al cine. En la actualidad, es posible obtener 'películas' de la dinámica molecular con resolución espacial inferior al Angstrom y resolución temporal inferior al femtosegundo.

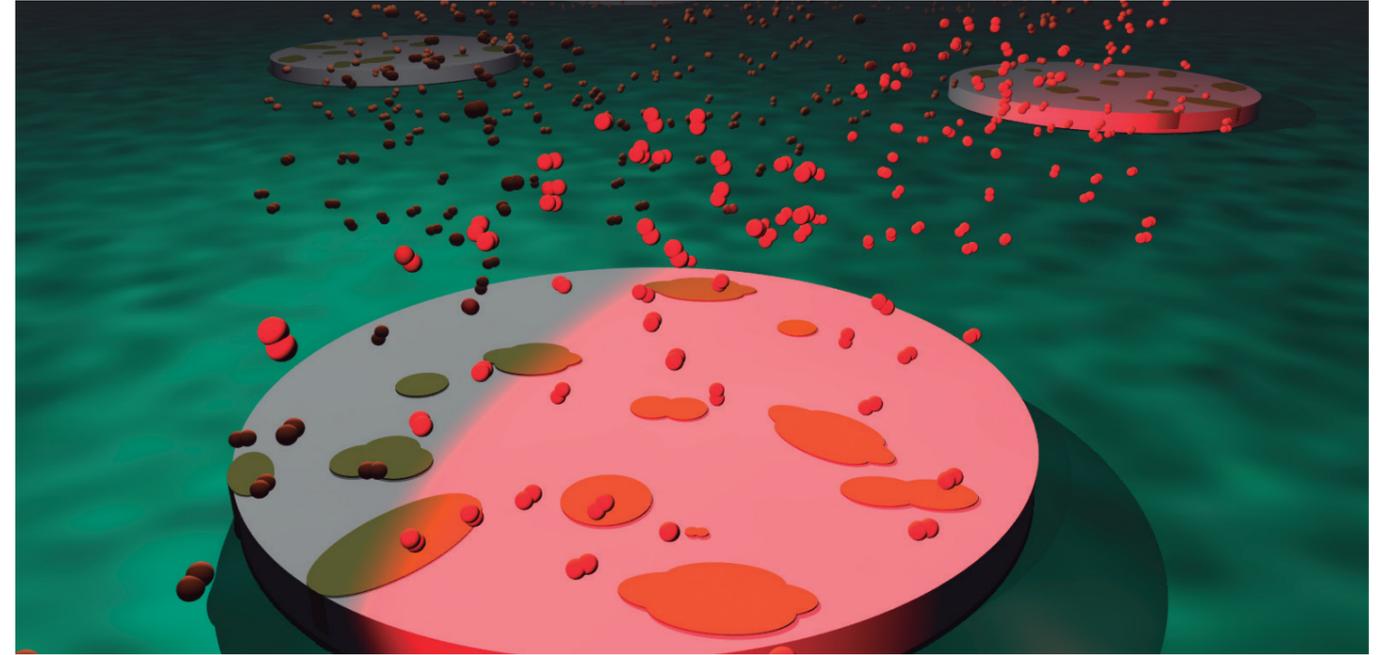


Figura 3. La variación en las propiedades ópticas de las nanoestructuras dependiendo de su forma, composición, tamaño o estructura puede convertirlas en fantásticos sensores químicos [ver por ejemplo M. Ameen Poyli, J. of Phys. Chem. 3, 2556 (2012)].

La luz no solo nos da una llave de entrada genérica al mundo del atosegundo; en realidad nos abre las puertas a varios submundos distintos, cada uno de ellos con sus peculiaridades propias. La fotoemisión permite avanzar en la comprensión de las propiedades electrónicas y la estructura de bandas de sistemas cristalinos macroscópicos, de superficies, pero también de átomos y moléculas, o de nanoestructuras. Nos permite estudiar el enorme rango de distancias en que se mueve la materia que conforma nuestro mundo, desde la física atómica y molecular hasta la física de materia condensada. Y en muchos de estos casos, además, nos adentra en el universo cuántico, un mundo en el que nuestra intuición macroscópica deja de ser válida y los fenómenos físicos y químicos resultan, cuando menos, sorprendentes. Vamos a proporcionar a continuación algunos ejemplos de ello, haciendo un recorrido progresivo desde sistemas que podemos considerar grandes (sólidos y superficies) hasta aquellos de tamaño inferior (nanopartículas y moléculas).

En medios metálicos típicos, el apantallamiento se produce en una escala de tiempos inferior al femtosegundo.

CREANDO CUASIPARTÍCULAS

El acceso experimental a tiempos ultracortos en la interacción de luz y materia ha permitido no solamente dar muchas respuestas sino también plantear nuevas preguntas y avanzar en territorios que hasta ahora eran únicamente campo de especulaciones teóricas. Un ejemplo de esta situación es el tiempo que tarda una carga en apantallarse en un medio metálico, uno de los fenómenos más complejos en física de la materia condensada. Cuando una carga eléctrica aparece en un metal, los electrones de este último reaccionan a su presencia modificando su posición, tratando de neutralizar su efecto y haciendo desaparecer el campo eléctrico a largas distancias. Este fenómeno, conocido como apantallamiento, es aún más difícil de describir cuando la carga externa está moviéndose y la densidad electrónica del metal tiene que reacomodarse a

cada instante para contrarrestar a la partícula viajera. La imagen más habitual para visualizar de manera simplificada la dinámica de esta carga y su densidad electrónica de apantallamiento sería la de una lancha motora desplazándose por el agua y creando en su derredor y, principalmente, en su parte posterior, una estela de agua de naturaleza ondulatoria. Un electrón fotoemitido desde un metal es un buen ejemplo de esta situación. El hueco de carga que deja detrás de sí este electrón también acaba apantallándose y este proceso ha de tenerse en cuenta para una interpretación precisa de los resultados experimentales de muchas espectroscopías.

En su intento de simplificar la descripción de la carga externa más la nube de densidad electrónica que le acompaña, los físicos de materia condensada agrupan a todo este conjunto y lo tratan como una 'cuasipartícula', una entidad distinta. Desde una perspectiva temporal, la pregunta obvia que surge es cuánto tiempo tarda en crearse el apantallamiento dinámico de una carga, es decir, cuál es el tiempo de creación de una cuasipartícula. La respuesta, basada tanto en medidas de la termalización de electrones como en cálculos de primeros principios, es que el apantallamiento y la aparición de efectos colectivos en el sólido no aparecen instantáneamente sino que requieren un tiempo finito para ser creados y que este tiempo depende además de la frecuencia de plasma del medio. En medios metálicos típicos, el apantallamiento se produce en una escala de tiempos inferior al femtosegundo. Es este por tanto un buen ejemplo de los nuevos conceptos que es necesario introducir en la descripción de los fenómenos cuando exploramos territorios cualitativamente nuevos a partir de mejoras técnicas. Hasta hace muy pocos años, podíamos considerar que el apantallamiento de una carga era instantáneo. El acceso experimental a escalas de tiempo inferiores al femtosegundo requiere incluir en la descripción del proceso efectos dinámicos. La evolución temporal, la dinámica en estos intervalos de tiempo, adquiere protagonismo.

RECORTANDO TIEMPOS

Cuando contemplamos un objeto, nuestra percepción en realidad se limita a su superficie. Lo que identificamos con la totalidad no es sino una realidad muy parcial. O ni siquiera una realidad, como argüían los filósofos de la Grecia clásica.



sica, a los que la existencia ontológica o no de superficies resultantes de dividir un cuerpo en dos mitades les provocaba no pocos quebraderos de cabeza. Lo que resulta intrigante es que esta dimensión externa de la materia no es solamente un mero recubrimiento sin relevancia, sino que muchas propiedades físicas y químicas de los objetos dependen o están muy condicionadas por sus propiedades superficiales. Las superficies son sistemas muy complejos, en los que perdemos parte de la simetría que pueda tener el sólido y que están especialmente preparadas para interactuar con el medio externo. Por eso también las superficies pueden ser funcionalizadas, es decir, pueden ser modificadas para cambiar su interacción con el exterior y por tanto su función. No es casual que existan sistemas biológicos, como el cerebro o las hojas de las plantas, cuyo desarrollo evolutivo esté basado en aumentar la proporción entre superficie y volumen. No es sino una forma de aumentar la funcionalidad, la actividad neuronal en el caso del cerebro o la actividad fotosintética en el caso de las hojas.

Sabemos más sobre los acoplamientos entre el movimiento de los núcleos de los adsorbatos y el movimiento de los electrones y somos capaces incluso de conocer cuál es el tiempo que tarda un electrón en ser transferido, en 'saltar' desde un átomo adsorbido en la superficie hasta esta última.

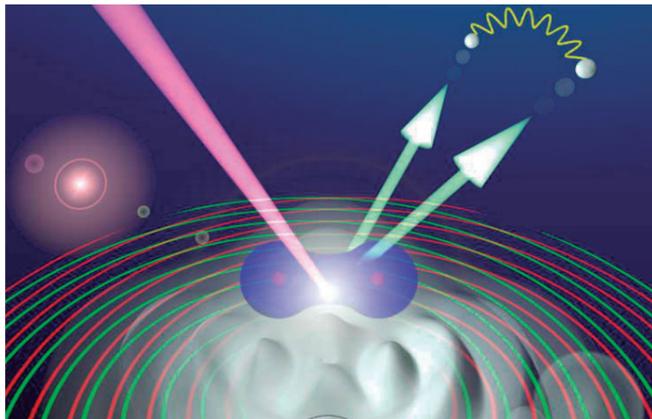


Figura 4. La luz permite emitir electrones desde moléculas diatómicas creando patrones de interferencia que nos proporcionan información muy precisa sobre su estructura electrónica [(D. Akoury et al., Science 318, 949 (2007)). Ilustración de Till Jahnke, Goethe Universität de Frankfurt, Alemania.

A finales de la década de 1960, el estudio de la ciencia de superficies se vio fuertemente impulsado por la confluencia de varios factores. El desarrollo de las técnicas de ultra alto vacío y la mayor facilidad a la hora de conseguir muestras de superficies cristalinas permitieron un mayor control sobre las propiedades físico-químicas y las condiciones de conservación de los sistemas estudiados. Por otra parte, desarrollos metodológicos relacionados con la teoría de muchos cuerpos y, en particular, con la difracción de electrones ayudaron al desarrollo e interpretación de los resultados de nuevas técnicas experimentales (Low Energy Electron Diffraction, LEED, por ejemplo), idóneas para este campo. El resultado de todo esto fue una auténtica explosión de actividad y generación de conocimiento en relación con las superficies de los materiales. La luz, o, de otra forma,

las técnicas basadas en la fotoemisión o la fotoabsorción, jugó también un papel crucial en este desarrollo, convirtiéndose en el medio principal para obtener información sobre las propiedades electrónicas de las superficies.

Cincuenta años más tarde, la ciencia de superficies se enfrenta a nuevas fronteras. Una de las más importantes es la descripción cuantitativa de la dinámica electrónica en superficies. La fotoexcitación de los electrones presentes en la superficie o en átomos y moléculas adsorbidos en superficies es una herramienta valiosísima para controlar, inducir o monitorizar procesos físico-químicos. Es la base de la fotoquímica o fotofísica en superficies. Y, una vez más, una de las claves está en los distintos ritmos o velocidades con los que se producen estos procesos y en la competencia temporal entre ellos, como si de una competición atlética se tratara.

Son distintas las técnicas experimentales que se utilizan para medir tiempos mediante luz, pero una de las más sofisticadas en el caso de superficies es la fotoemisión de dos fotones, en la que se envía un primer pulso láser para excitar la muestra, para inducir un cierto proceso electrónico, y poco después un segundo pulso láser, con un retraso temporal perfectamente determinado, para comprobar el estado del sistema excitado. Gracias a estas técnicas o a variaciones sobre ellas y a los avances en paralelo en la descripción teórica de la dinámica electrónica, basados fundamentalmente en cálculos numéricos de primeros principios, conocemos ahora los tiempos de vida de los electrones excitados en superficies, sabemos más sobre los acoplamientos entre el movimiento de los núcleos de los adsorbatos y el movimiento de los electrones y somos capaces incluso de conocer cuál es el tiempo que tarda un electrón en ser transferido, en 'saltar' desde un átomo adsorbido en la superficie hasta esta última. Son unos cientos de atosegundos, de nuevo una escala temporal inaccesible hasta hace muy poco tiempo. Estos tiempos son distintos además en función de la relación entre la magnetización de la superficie y el espín del electrón que salta. No menos importantes son los trabajos que se centran en estudiar la diferencia en los tiempos de fotoemisión entre electrones provenientes de estados muy ligados o de valencia en una superficie metálica, es decir, en 'cronometrar' en tiempos de atosegundos la carrera entre dos electrones que escapan de una superficie.

DISEÑANDO NANOESTRUCTURAS

En los últimos quince años, ha aumentado exponencialmente el interés por los sistemas de tamaño nanométrico. Las nanopartículas, los agregados, los sistemas de baja dimensionalidad en que los electrones están confinados en al menos una de las dimensiones del espacio, todos ellos se han convertido en las estrellas de muchos centros de investigación, además de aparecer de forma recurrente en medios de comunicación especializados y, de vez en cuando, incluso en los generalistas. En el mundo de la física, quizás el grafeno, representante señero de la nanociencia, sea el único nombre que pueda competir con el bosón de Higgs como protagonista mediático.

Estamos utilizando la luz para analizar el interior de los átomos, para aprender sobre el movimiento de sus electrones con resolución subatómica.

Uno de los motivos principales por los que los sistemas de tamaño nanométrico han despertado este merecido interés es porque pueden considerarse como un verdadero cruce de caminos. Las nanoestructuras están a medias entre la física molecular y la física de estado sólido, compartiendo algunos conceptos y metodologías con esta pero otros en cambio con aquella. Los sistemas de tamaño nanométrico son así referencias ideales para estudiar cómo emergen propiedades típicas del estado sólido en función del tamaño del sistema. Las nanopartículas están también a medio camino entre la física y la química e incluso la biología. Este carácter multidisciplinar de la nanociencia es uno de sus mayores atractivos desde el punto de vista de la investigación básica, pero no hay que olvidar que es su inmenso potencial tecnológico el que ha contribuido

igualmente a su actual desarrollo como disciplina. La variación de las propiedades electrónicas y ópticas de las nanoestructuras con su tamaño permite, en principio, controlar y ajustar estas propiedades externamente. Modificar el tamaño de una nanoestructura es así una manera de diseñar sus propiedades, como si de trajes a medida se trataran.

La interacción de luz con nanopartículas es uno de los campos más activos de la nanociencia y ha dado lugar a una actividad brillante, nunca mejor dicho, en los campos de la nanofotónica y la nanoplasmonia. Hay muchos textos, probablemente más amenos que este, incluyendo algunos en esta misma revista, en los que se repasa la espectacular actividad en estos campos, así que me limitaré a señalar aquí que las excitaciones plasmónicas generadas por la luz en las nanopartículas metálicas producen señales tan intensas y dependientes de las propiedades específicas de los sistemas, incluyendo su forma y tamaño, que las convierten en ideales para ser utilizadas como marcadores en técnicas de diagnóstico médico o como sensores en la detección de distintos componentes químicos, entre otras muchas aplicaciones.

Es posible acceder experimentalmente ahora mismo a la escala de tiempo durante la cual se produce una reacción química o se emite un electrón fotoexcitado en una superficie, una nanoestructura o una molécula.

Pero además de excitaciones colectivas o plasmones, la incidencia de luz sobre nanopartículas también puede crear excitaciones electrónicas del tipo par electrón-hueco. El estudio del decaimiento o termalización de estas excitaciones en función del tamaño de la nanopartícula es extremadamente útil para entender el papel de efectos como el apantallamiento o la densidad de estados en las colisiones entre electrones, que nos permitan optimizar su uso en el campo de la fotoquímica. Estudios desde primeros principios y medidas de termalización en nanopartículas metálicas muestran que los tiempos de vida de las excitaciones electrónicas son fuertemente dependientes de la localización espacial de las excitaciones y que hay que alcanzar tamaños relativamente grandes para recuperar el comportamiento que se encuentra en el estado sólido.

ROMPIENDO LADRILLOS

En este recorrido hacia sistemas cada vez más pequeños, llegamos por fin a los ladrillos a partir de los cuales construimos la materia, a los átomos y moléculas. La luz, cómo no, ha jugado un papel crucial en los avances de la física atómica y molecular, particularmente en las dos últimas décadas. El estudio de los procesos de fotoemisión en moléculas en fase gaseosa ha dado un salto cualitativo en los últimos años gracias a la medición de espectros de moléculas orientadas en el espacio y no promediadas sobre ángulos, como era habitual en el pasado. Esto es tanto como pasar de una perspectiva plana, unidimensional, a una perspectiva completa, multidimensional. Y gran parte de este adelanto se debe a una inteligente utilización del proceso de fotofragmentación molecular. Técnicas experimentales basadas en la medida en coincidencia temporal de la energía y dirección de cada uno de los constituyentes de una molécula, después de disociarla mediante una excitación electrónica inducida con luz, nos permiten obtener información precisa y preciosa sobre las especiales relaciones de interdependencia que existían entre estos constituyentes antes de la fragmentación.

La utilización de este tipo de técnicas combinada con la modelización teórica de estos procesos ha llevado por ejemplo a estudiar de forma detallada la fragmentación total mediante luz de moléculas de hidrógeno y deuterio en sus elementos constituyentes (dos iones positivos más dos electrones) o los efectos de interferencia en la fotoemisión de dos electrones en moléculas de hidrógeno, en un proceso similar al que se produce en el experimento de las rendijas de Young, uno de los diez experimentos más bellos en la historia de la física según

la revista Physics Today. En el caso de la molécula de hidrógeno, son los dos protones de la molécula los que juegan el papel de dos 'agujeros' emisores de electrones, solo que separados por una distancia extremadamente pequeña, muy inferior al nanómetro. En su viaje hacia el detector, cada uno de estos dos electrones presenta un patrón de interferencia como si se tratara de una onda y no de una partícula y hubiera sido emitido desde los dos centros al mismo tiempo.

Por otra parte y como hemos mencionado anteriormente, el cambio de milenio vino acompañado de la aparición de intensos pulsos de luz ultracortos, de tan solo unos pocos ciclos de duración, y que dieron lugar a la apertura de un campo nuevo, la física del atosegundo. Los primeros blancos a los que se dirigieron estas nuevas armas investigadoras fueron átomos y moléculas y su primer objetivo fue diseccionar la dinámica electrónica en estos sistemas. En ocasiones, los avances de la ciencia no nos permiten un momento de reposo, detenernos y pensar sobre lo conseguido en perspectiva. En casos como este, merece la pena hacerlo: estamos utilizando la luz para analizar el interior de los átomos, para aprender sobre el movimiento de sus electrones con resolución subatómica.

ILUMINANDO EL FUTURO

Gracias en parte al desarrollo de sofisticadas técnicas experimentales, muchas de ellas basadas en fuentes de luz láser, hemos conseguido avanzar espectacularmente en la comprensión de la dinámica electrónica en regiones de tamaño muy pequeño, de orden inferior a la nanoescala. Hasta hace muy poco, estas técnicas eran incapaces de obtener resoluciones temporales inferiores al femtosegundo, lo que nos impedía por ejemplo observar la dinámica electrónica en el tiempo en que se producen las reacciones químicas. La obtención de pulsos láser ultracortos ha cambiado radicalmente esta situación y ha permitido acceder al estudio de la dinámica electrónica que se produce en escalas de tiempo del femtosegundo o incluso del atosegundo. Por tanto, es posible acceder experimentalmente ahora mismo a la escala de tiempo durante la cual se produce una reacción química o se emite un electrón fotoexcitado en una superficie, una nanoestructura o una molécula.

De forma atrevida y provocadora podríamos decir que todo es química, que la química es la base de la vida y de la naturaleza. En última instancia, todas las reacciones químicas están controladas por los electrones. Entender por tanto las reglas que rigen el movimiento de los electrones y los tiempos en que se producen estos movimientos (es decir, la dinámica electrónica), es avanzar un paso más en la comprensión de nuestro mundo. La mejora, gracias a nuevas técnicas basadas en la excitación con fotones, de la resolución temporal en el estudio de la dinámica electrónica está llevando al electrón a transformarse, a pasar de ser una celebridad en el campo de la fotografía a una auténtica estrella cinematográfica. No es de extrañar por ello que el número de grupos, centros de investigación y grandes instalaciones dedicados al estudio de la interacción entre luz y materia sea enorme y siga creciendo. La reciente inauguración del sincrotrón ALBA en Barcelona o la apertura prevista en Europa y Estados Unidos de nuevas instalaciones basadas en los láseres de electrones libres (FEL, por sus siglas en inglés) son buenos ejemplos de ello.

En ocasiones se especula con que, así como el siglo XX ha sido el siglo de los electrones, el XXI pueda ser el siglo de los fotones. Independientemente de que esta excesiva simplificación sea cierta o no, lo que sí parece muy probable es que la luz va a estar muy presente en gran parte de los desarrollos científicos tecnológicos de los próximos años. Retomando el simbolismo de la luz como distintivo de conocimiento y belleza, podemos arriesgarnos a predecir que la ciencia del siglo XXI va a ser extremadamente hermosa, entre otras cosas porque estará llena de luz y porque esta ampliará majestuosamente nuestro conocimiento de la materia. La luz, por tanto, sigue y seguirá cumpliendo este objetivo de rescatarnos de las sombras de nuestra ignorancia e iluminar el mundo que nos rodea para su mejor comprensión. Solo tenemos que poner los medios necesarios, como sociedad convencida de que el avance en el conocimiento científico es una de las bases principales del progreso social, económico y ético, para que el futuro nos traiga mehr Licht, mucha, pero que mucha más luz.