

Ilustración Mauricio Vázquez Rendón

Estroboscopia en el mundo cuántico de átomos, moléculas y fotones

Daniela Gallego Valencia

Física y estudiante de doctorado en Física
daniela.gallegov@udea.edu.co

José Luis Sanz Vicario

Químico. Físico. Doctor en Ciencias Químicas
jose.sanz@udea.edu.co

Grupo de Física Atómica y Molecular, Instituto de Física, Facultad
de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia.

Los fenómenos de la naturaleza pueden ser caracterizados por sus magnitudes, tanto espaciales (¿cuánto espacio ocupan?) como temporales (¿cuánto duran en el tiempo?). Así podemos tener desde distancias a galaxias de 10^{16} metros (un año luz) en el extremo de lo grande, hasta átomos con tamaños de 10^{-10} metros (un ángstrom) en el extremo opuesto. Igualmente, los tiempos propios del giro de un planeta alrededor de una estrella (cien millones de segundos o 10^8 segundos) son 20 órdenes de magnitud más grandes que el tiempo en que un electrón gira alrededor de un núcleo en un átomo (10^{-18} segundos).

Las escalas de tamaño y tiempo en metros y segundos no son casuales, están pensadas para la escala humana y así tener números de medida manejables. El ser humano como tal puede percibir y discriminar movimientos a simple vista con una resolución aproximada de 0.04 segundos (1/24 segundos), es decir, puede detectar movimientos que ocurren en algunas centésimas de segundo. De hecho, el cine clásico se grababa y proyectaba pasando un rollo de película a una velocidad de 24 fotogramas por segundo para que el ojo humano tuviera una sensación de continuidad en la imagen. Sin embargo, la tecnología actual ya permite tener cámaras comerciales de alta velocidad, consiguiendo hasta 3000 fotogramas por segundo. Con ellas se puede apreciar en detalle (cuando se proyectan en cámara lenta) desde la explosión de un globo de aire hasta el rápido movimiento del aleteo de un colibrí.

En un ejemplo inusitado de amor por la ciencia y la técnica, Leland Stanford, gobernador de California en 1878, aficionado a las carreras de caballos, se preguntaba si un caballo al galope apoya, al menos, una pata en el suelo o ninguna. Pregunta tan frívola en aquella época dio pie a que contratara los servicios del fotógrafo Eadweard Muybridge, quien ideó un método estroboscópico pionero usando 12 cámaras fotográficas a lo largo de 6 metros, que se disparaban en cuanto el caballo rompía un cordel conectado a cada una de ellas. La famosa secuencia de fotografías del galope (se puede ver en Wikipedia) dio la repuesta: hay momentos en los que el caballo mantiene las cuatro patas en el aire.

Si estos son movimientos rápidos que desde la percepción humana ya no pueden discernirse, ¿cuántos fotogramas por segundo se necesitarían para seguir el movimiento de una molécula de tamaño na-

nométrico (1 nanómetro = 10^{-9} metros)?

Los movimientos naturales de una molécula son su rotación espacial, las vibraciones de los átomos que la componen y el movimiento de los electrones dentro de la molécula; estos movimientos son diferentes y transcurren en el orden de los pico- (10^{-12}), femto- (10^{-15}) y atto- (10^{-18}) segundos, respectivamente. Esto viene a implicar que aquello que existe en la escala microscópica se mueve rapidísimamente, en escalas de tiempo infinitesimales. La percepción humana de 1/24 segundos es incapaz de discernir movimientos que ocurren en tiempos al menos de diez órdenes de magnitud menor.

Así, por ejemplo, para acercarse al mundo cuántico, el conejo blanco de *Alicia en el país de las maravillas* debería llevar consigo un reloj con cronómetro que marcara no las horas, los minutos o los segundos, sino los pico-, femto- y atto- segundos.

En los estudios de la química-física, si uno quiere determinar la estructura o dinámica de un sistema molecular, lo puede someter a la radiación para ver cómo responde el sistema ante el estímulo, lo cual da lugar a la espectroscopía, bien de absorción o de emisión.

La espectroscopía de emisión, por ejemplo, es como tirar un piano por las escaleras y poder imaginar cómo está construido por dentro solo con escuchar los muchos sonidos y la multitud de notas (una frecuencia por cada tecla) que se emiten durante su caída. La espectroscopía de átomos y moléculas funciona con el mismo principio: elucidar la estructura a través de las frecuencias que emite el átomo o la molécula cuando le llega el terremoto de una radiación tipo pulso láser. Que la radiación láser sea pulsada indica que actúa como el flash de una cámara, la iluminación tan solo dura un instante.

En química-física, el desarrollo técnico de los láseres pulsados con duración de flash de femto-segundos en los años ochenta permitió al Premio Nobel Ahmed Zewail generar una llave de entrada al estudio de las reacciones químicas ultrarrápidas, como poner el conejo blanco de Alicia con su cronómetro al lado de los núcleos de las moléculas y medir los tiempos del movimiento nuclear.

Con este cronómetro puede seguirse la evolución dinámica de las moléculas en el transcurso de las reacciones químicas. Hoy en día ya se han desarrollado láseres pulsados de attosegundos, que sería como encargarle al conejo blanco la tarea de cronometrar a los electrones, que son más rápidos que los núcleos, dentro de los átomos y las moléculas.

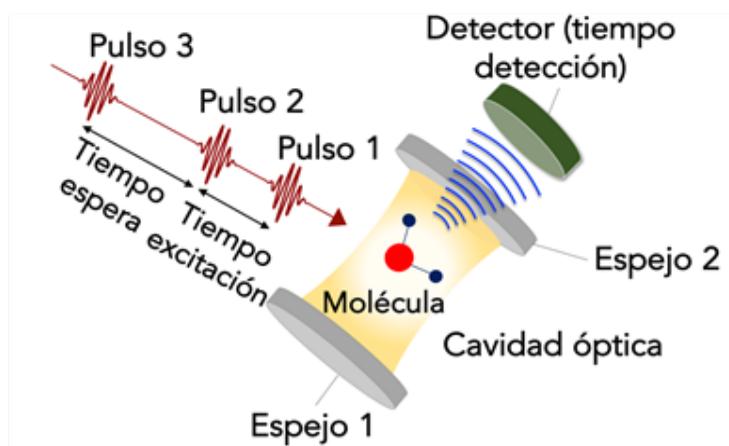


Figura 1. Esquema de la generación de espectroscopía 2D (estroboscópica) bidimensional: moléculas inmersas en una cavidad óptica con radiación confinada entre dos espejos reciben una secuencia de tres pulsos láser con tiempos de retraso entre ellos bien controlados. Luego, la molécula excitada emite radiación que es recogida por un detector después de un tiempo denominado tiempo de detección.

Fuente: elaborada por los autores.

Tomando fotos con láseres

El Grupo de Física Atómica y Molecular del Instituto de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales investiga los procesos dinámicos internos de moléculas introducidas dentro de un espacio entre dos espejos de alta reflexión que confinan luz en forma de fotones, llamados cavidades ópticas.

Es como si Alicia, reducida en tamaño con la píldora adecuada, cruzara a través de los espejos y pudiera ver cómo los fotones de la radiación dentro de la cavidad óptica interactúan con las moléculas materiales y forman un nuevo ente entrelazado caracterizado por propiedades tanto de radiación como de materia.

Para entender la estructura de este nuevo ente molécula-fotón, se puede someter el sistema a un conjunto sucesivo de tres láseres que lleguen secuencialmente a la cavidad óptica, separados por intervalos de tiempos como se ve en la figura 1. El intervalo temporal entre el pulso 1 y el pulso 2 se denomina tiempo de excitación, y el intervalo entre los pulsos 2 y 3 tiempo de espera. Una vez actúan los tres pulsos, el ente molécula-fotón emite radiación de respuesta, que se mide en un detector D, luego de transcurrir un tercer intervalo de tiempo conocido como tiempo de detección. Todos estos tiempos pueden ser cronometrados por el conejo blanco de Alicia. Nuestro objetivo es hacer *fotografías* del sistema con el mismo principio estroboscópico explicado antes: se excita el ente molécula-fotón y se inicia su movimiento (Pulso 1 + Pulso 2), se deja pasar un tiempo cronometrado de espera y se toma la fotografía del objeto (Pulso 3 + detección). Si hacemos un estudio estroboscópico para muchos tiempos de espera intermedios tendremos series de tiempos como fotogramas estroboscópicos conceptualmente similares a los que observa el conejo blanco de nuestra portada, con una pelota que rebota en el suelo.

En física, las series temporales, representadas como función del tiempo, son difíciles de analizar, y una herramienta esencial es trasladar esa información temporal a información en frecuencias. Si hacemos dicha transformación para los tiempos de excitación y los tiempos de detección, entonces tendremos unos fotogramas que dependen ahora de las frecuencias de excitación y de detección, en lugar de tiempos.

Un ejemplo de secuencia de este tipo de espectros 2D (2 dimensionales o bidimensionales por las dos frecuencias involucradas) se incluye en la figura 2. El sistema bajo estudio es una molécula con dos niveles de energía (fundamental y excitado) acoplada a la radiación dentro de una cavidad óptica. Los estados de radiación se entrelazan con los de la molécula para formar un nuevo ente (que aquí bautizamos como radícula) con otras nuevas energías (véase figura 2 A). Sobre este sistema así formado se hace incidir la secuencia de tres pulsos láser descrita antes. Los diferentes espectros 2D con resolución en el tiempo de espera nos indican que los estados absorben y emiten de forma diferente porque ellos cambian y se modifican en dicho tiempo de espera. De hecho, esta espectroscopía 2D nos permite hacer preguntas como la siguiente: si el sistema absorbe con una frecuencia de excitación, el sistema reemite, pero ¿en qué frecuencias de detección? Esta es la información que revelan los espectros 2D, a diferencia de los espectros simples de absorción tradicionales 1D (véase figura 2 B) que solo muestran picos en las frecuencias resonantes de excitación, pero no cuentan la historia del sistema, es decir, su estroboscopia temporal.

Estas espectroscopías multidimensionales no son una entelequia teórica, sino que se miden realmente en laboratorios avanzados usando agregados de moléculas en disolución inmersas en matrices dentro de

cavidades ópticas, y se obtienen secuencias de espectros 2D en función del tiempo de espera (con una resolución temporal de femtosegundos). Nuestro Grupo de Física Atómica y Molecular de investigación teórica está en contacto con investigadores experimentales de la Universidad Técnica de Múnich, en Alemania, quienes obtienen espectros 2D rutinariamente en el laboratorio, pero carecen de las herramientas teóricas para interpretarlos de forma adecuada. Nuestro grupo desarrolla actualmente herramientas teóricas y computacionales relevantes para la comprensión de estas señales estroboscópicas que surgen, desaparecen y parpadean en los espectros 2D, en una colaboración cercana entre la teoría y el experimento, una sinergia necesaria en la ciencia moderna. **X**

GLOSARIO

Estroboscopio: Sistema de grabación de película con flash de iluminación intermitente, donde se controla la duración de cada flash y el intervalo de tiempo entre ellos. El objeto queda grabado solo cuando este es iluminado por el flash en un corto espacio de tiempo.

Fotón: Es la partícula cuántica fundamental que conforma la luz o radiación.

Láser: El láser es Luz Amplificada por Emisión Estimulada de Radiación cuya fuente es un sistema atómico o molecular con una inversión de población: el estado excitado tiene más población que el fundamental y por desexcitación emite radiación.

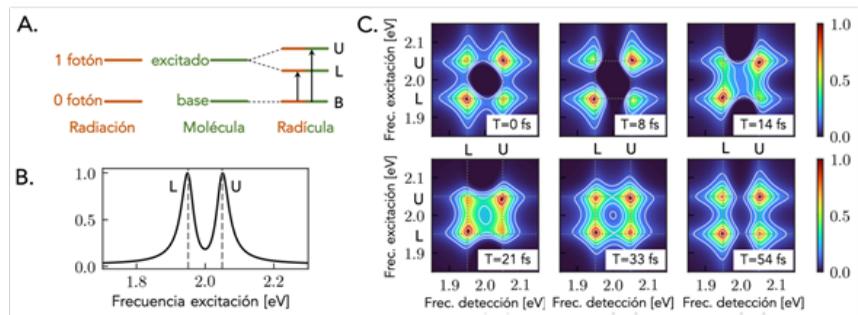


Figura 2. (A) Diagrama de dos niveles de radiación correspondientes a 0 fotón y 1 fotón, y de dos niveles de energía de una molécula (base y excitado). El nuevo ente radiación-materia acoplado (radícula) presenta nuevos niveles de energía G, L y U entre los que se absorbe y emite radiación. (B) Espectro 1D simple de absorción de radiación con picos en las posiciones de los nuevos niveles L y U de la radícula. (C) Espectros 2D bidimensionales en función de las frecuencias de excitación y de detección, como fotogramas de una secuencia estroboscópica a tiempos de espera $T = 0, 8, 14, 21, 33$ y 54 fs. En el tiempo $T = 54$ fs el sistema cuántico «rebota» como la pelota estroboscópica de la ilustración y muestra un fotograma similar al inicial en $T = 0$. **Fuente:** elaborada por los autores.