

tirarse de la Universidad en la que trabajaba, pudiendo permanecer en sus laboratorios a costa de una reducción en su sueldo. Durante años solicitó subsidios que le fueran negados. Durante mucho tiempo concretó ella misma sus experimentos, ya que no contaba con un equipo de trabajo. Su trabajo seminal publicado en 2005 fue

previamente rechazado por otra editorial y la importancia de sus hallazgos fue reconocida tardíamente. Evidentemente, nada de esto alcanzó para desalentarla y logró algo mucho más importante que el premio Nobel: haber contribuido a salvar millones de vidas en el transcurso de la pandemia por SARS-CoV-2. 

## LECTURAS SUGERIDAS

**BRENNER S, JACOB F & MESELSON M**, 1961, 'An unstable intermediate carrying information from genes to ribosomes for protein synthesis', *Nature*, 190: 576-581. DOI: 10.1038/190576a0

**KARIKÓ K, BUCKSTEIN M, NI H & WEISSMAN D**, 2005, 'Suppression of RNA recognition by Toll-like receptors: The impact of nucleoside modification and the evolutionary origin of RNA', *Immunity*, 23 (2):165-75. DOI: 10.1016/j.immuni.2005.06.008

**MARTINON F, KRISHNAN S, LENZEN G, MAGNÉ R, GOMARD E, GUILLET JG, LÉVY JP & MEULIEN P**, 1993, 'Induction of virus-specific cytotoxic T lymphocytes in vivo by liposome-entrapped mRNA', *European Journal of Immunology*, 23 (7): 1719-1722. DOI: 10.1002/eji.1830230749



**Jorge Geffner**

Doctor en bioquímica, UBA.  
Investigador superior en el  
INBIRS, UBA-Conicet.  
Profesor titular, Facultad de  
Medicina, UBA.  
[jorgegeffner@gmail.com](mailto:jorgegeffner@gmail.com)

## FÍSICA

### Diego Arbó

Instituto de Astronomía y Física del Espacio, UBA-Conicet

## La física del attosegundo

Todos, alguna vez, hemos visto fotografías nocturnas de calles donde las luces de los automóviles aparecen estiradas, o las de autos de Fórmula 1 que aparecen borroneados. Este 'estiramiento/borronéo' obedece a que el tiempo de exposición de la fotografía es más largo que el movimiento del objeto fotografiado. ¿Cómo solucionarlo? Obviamente, disminuyendo el tiempo de exposición, lo que aumentaría entonces la nitidez, o resolución de la imagen. Pero supongamos que queremos fotografiar el bamboleo de los electrones en un átomo. No hay cámara fotográfica que pueda discernir ese movimiento. Se necesita una tecnología nueva para este descomunal desafío.

Los investigadores responsables del desarrollo de la tecnología de generación de pulsos láser extremadamente cortos fueron honrados con el premio Nobel

2023. La Real Academia de Ciencias de Suecia reconoció al campo de la física del attosegundo (quedará claro qué es más adelante) y a los físicos Pierre Agostini, Ferenc Krausz y Anne L'Huillier con el galardón 'por los métodos experimentales que generan pulsos de luz de attosegundos para el estudio de la dinámica de los electrones en la materia'. L'Huillier es la quinta mujer de la historia laureada Nobel en física, después de Maria Sklodowska Curie (1903), Maria Goeppert-Mayer (1963), Donna Strickland (2018) y Andrea Ghez (2020).

El comportamiento de los electrones en la materia está descrito por la física cuántica, cuyos procesos tienen lugar en escalas de tiempo ultracortas. Las escalas temporales del movimiento de los electrones en la materia son del orden de los attosegundos. ¿Pero qué es un attosegundo? Todos sabe-



Pierre Agostini



Ferenc Krausz



Anne L'Huillier

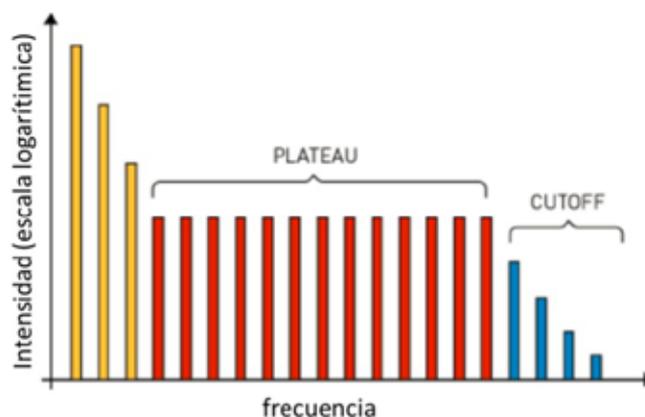
mos qué es un segundo: nuestro corazón late aproximadamente una vez por segundo. Dividamos al segundo en un millón de partes. Cada una de esas partes se llama microsegundo (y se denota  $10^{-6}$  s). Dividamos nuevamente en un millón de partes a un microsegundo. Cada una de esas partes se llama picosegundo ( $10^{-12}$  s). Un picosegundo es la billonésima parte de un segundo. Este lapso diminuto es, todavía, enorme comparado con el meneo de los electrones en la materia. Volvamos a dividir en un millón de partes a un picosegundo. Cada una de esas partes se llama attosegundo ( $10^{-18}$  s), o sea, una trillonésima de segundo. Para dar una idea, hay tantos attosegundos en un segundo como segundos han transcurrido desde el Big Bang. El físico danés Niels Bohr (1885-1962, Nobel de física 1922) teorizó que, en un átomo de hidrógeno, el electrón orbita al núcleo en 150 attosegundos. Ahora sí llegamos al dominio del movimiento de los electrones en la materia: bienvenidos al reino de los attosegundos.

La historia comienza en 1905, un *annus mirabilis* para la física cuando Albert Einstein formula, entre otros hallazgos fundamentales, la ley del efecto fotoeléctrico por el que recibiría, dieciséis años más tarde, el premio Nobel de física. En el efecto fotoeléctrico, cuando la radiación electromagnética —como la luz ultravioleta— impacta una placa metálica, se produce la emisión de electrones. En aquel entonces no era posible medir un tiempo de retardo entre el impacto de los fotones y la eyección de los electrones. Los físicos supusieron, entonces, que el efecto fotoeléctrico era instantáneo y se concentraron en la energía, un campo de estudio que se conoce como espectroscopía de fotoelectrones. Pero los electrones ¿se emiten instantáneamente como se suponía? Si no lo hacen, ¿cuánto tiempo les lleva a los fotones arrancar a los electrones del material?

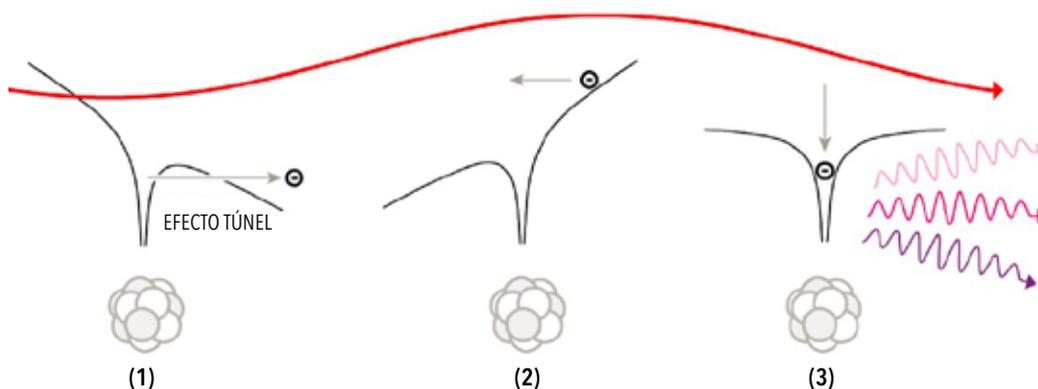
Para responder estas preguntas fue necesaria la creación de un dispositivo extraordinario por su diseño, por las propiedades únicas de su luz, por la física que involucra y por las aplicaciones que permite: el rayo láser. Los primeros —el láser fue creado en 1960 por el norteamericano Theodore Maiman (1927-2007)— emitían pulsos de milisegundos, una duración que se logró disminuir trabajosamente hasta alcanzar el femtosegundo ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s} = 1000 \text{ as}$ ) recién

en la última década del siglo pasado. Con esto los investigadores pudieron rastrear la dinámica molecular y capturar la evolución de las reacciones químicas, un logro que llevó al egipcio Ahmed Zewail (1946-2016) al premio Nobel de química de 1999. Las duraciones de estos pulsos láser (de femtosegundos), sin embargo, eran todavía demasiado largas para discernir el movimiento de los escurridizos electrones en la materia. Para investigar este movimiento, los científicos necesitaban ir más allá de las limitaciones del rendimiento de los láseres más modernos.

En 1987, Anne L'Huillier (1958) y su equipo, primero en el CEA Paris-Saclay en Francia, y luego en la Universidad de Lund en Suecia, usaron un rayo láser infrarrojo para producir armónicos (sobretonos) de longitud de onda más corta y más fuertes que el láser original. Así como las cuerdas de una guitarra vibran no solo en su tono fundamental sino también en sus sobretonos, la luz emitida por un gas noble se emite no solo en su frecuencia fundamental, sino también en sus armónicos superiores. Cuando la luz láser incide en el gas y afecta a sus átomos, provoca vibraciones electromagnéticas que distorsionan el campo eléctrico que mantiene a los electrones alrededor del núcleo atómico. El canadiense Paul Corkum (1943) explicó el proceso en su famoso modelo de los tres pasos (figura 2):



**Figura 1.** Un espectro genérico de generación de armónicos altos con sus tres rasgos característicos: la caída de intensidad inicial, la meseta y el corte. Cortesía de la Real Academia de Ciencias de Suecia.



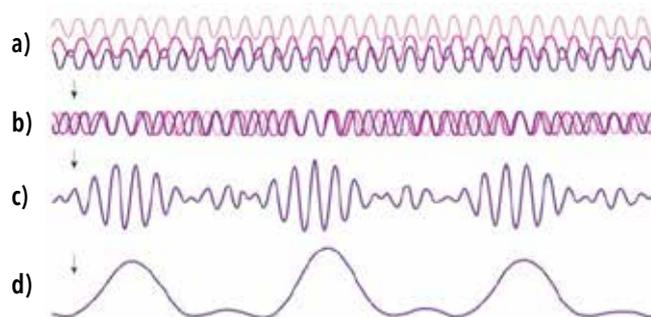
**Figura 2.** Modelo semiclásico de tres pasos de Paul Corkum. En el primer paso, el campo láser provoca ionización por efecto túnel; en el segundo paso, el campo láser acelera el electrón. Cuando el campo se invierte en el siguiente medio ciclo, el electrón puede regresar al ion y recombinarse. En el tercer paso, el proceso de recombinación convierte la energía cinética del electrón en un fotón ultravioleta extremo (XUV). Cortesía de la Real Academia de Ciencias de Suecia.

(1) los electrones pueden escapar de los átomos –ionización–. (2) Durante su excursión, el electrón gana mucha energía extra del campo eléctrico de la luz láser. Sin embargo, el campo eléctrico de la luz vibra continuamente y, cuando cambia de dirección, un electrón suelto puede regresar al núcleo de su átomo. (3) Para volver a unirse al núcleo, debe liberar su exceso de energía en forma de pulso de luz. Estos pulsos de luz de los electrones son los que crean los armónicos o sobretonos que aparecen en los experimentos.

La superposición de algunos de estos armónicos superiores lleva naturalmente a la formación de trenes de pulsos de duración de centenas de attosegundos (figura 3). Con su contribución, Anne L’Huillier condujo a la ruptura, en 2001, de la barrera del femtosegundo. En el mismo centro de investigación en el que trece años antes se lograba la generación de armónicos de alta frecuencia, Pierre Agostini (1941) y su grupo produjeron un tren de pulsos de tan solo 250 attosegundos de duración, cuya medición se realizó usando un truco especial poniendo el tren de pulsos junto con una parte retrasada del pulso láser original, para ver cómo estaban los armónicos en fase entre sí. A esta técnica metrológica se la denominó RABBIT (*Reconstruction of Attosecond Beating By Interference of two-photon Transitions*) –el conejo de la galera–.

Simultáneamente, Ferenc Krausz (1962) y su grupo de investigación de la Universidad Tecnológica de Viena, en Austria, trabajaban en una técnica para aislar un solo pulso de attosegundo. El pulso que lograron aislar duró 650 attosegundos y el grupo lo utilizó para rastrear y estudiar la ionización. Estos experimentos demostraron que se podían observar y medir pulsos de attosegundos. Poco menos de una década después, el área de investigación había avanzado hasta el punto de que Krausz y su nuevo equipo, en el Instituto Max Planck de Óptica Cuántica en Alemania, pudieron cuantificar la escala de tiempo del efecto fotoeléctrico de los electrones en los átomos de neón. Los científicos combinaron pulsos de 200 attosegundos con pulsos infrarrojos y encontraron que la ionización –emisión de electrones– de una subcapa (2p) del átomo de neón tomó alrededor de 21 attosegundos más que la ionización de otra (2s). Sin embargo, complicados desarrollos teóricos expuestos por diferentes grupos discrepaban en un factor 2. Justamente, el grupo de L’Huillier resolvió la discrepancia haciendo uso del espectro HHG obtenido por interferencias de fase estable entre pulsos de attosegundos en un tren.

Desde los comienzos de este siglo, es posible producir pulsos de hasta unas pocas docenas de attosegundos, y esta tecnología está en constante desarrollo. Ahora que el mundo de los attosegundos se ha vuelto accesible, estos breves destellos de luz pueden usarse para estudiar los movimientos de los electrones. Los pulsos de attosegundos permiten medir el tiempo que tarda un electrón en ser separado de un átomo, y examinar cómo ese tiempo depende de cuán



**Figura 3.** Si se filtran tres frecuencias (a) –plateau de la figura 1– y se superponen en (b), se observa el fenómeno de interferencia constructiva cuando los picos y valles coinciden y destructiva en caso contrario, formando así un tren de pulsos (c) cuya duración se mide con la envolvente (d). Cortesía de la Real Academia de Ciencias de Suecia

estrechamente unido está el electrón al núcleo atómico. Es posible reconstruir cómo oscila la distribución de electrones en moléculas y materiales. Los pulsos de attosegundos se pueden utilizar para examinar los procesos internos de la materia e identificar diferentes eventos.

Estos pulsos se han utilizado para explorar la física detallada de átomos y moléculas y tienen aplicaciones potenciales en áreas que van desde la electrónica hasta la medicina. Actualmente, este campo de estudio es cada vez mayor y, aunque todavía es una disciplina en crecimiento, ya se habla de las posibles aplicaciones que la física del attosegundo y el estudio detallado del movimiento, el control y la localización de los electrones puede traer a la ciencia. Por ejemplo, el cambio instantáneo de las propiedades de un material, transformándolo de aislante a conductor en un santiamén: con un solo pulso de attosegundos sería posible actuar sobre los electrones e incrementar su conductividad hasta en 18 órdenes de magnitud. Esto podría disminuir los tiempos de la electrónica (nano- o picosegundos) hasta un millón de veces (femto- o attosegundos). Se podrían producir computadoras no solo de unos pocos Gigahertz como ahora, sino de Petahertz (un millón de GHz). ¡Computadoras un millón de veces más veloces que las actuales!

En otro ejemplo, se pueden utilizar pulsos de attosegundos para empujar moléculas, que emiten una señal medible. La señal de las moléculas tiene una estructura especial, una especie de huella digital que revela de qué molécula se trata, y entre sus posibles aplicaciones se encuentra el diagnóstico médico. Sería posible detectar ciertas alteraciones en sistemas biológicos y células sometidas a estos breves y potentes pulsos. Así, si se dispone de una muestra de sangre que se ilumina con uno de esos pulsos, las moléculas se excitarían, y sería posible detectar si alguna de ellas lo hace de forma distinta al resto o si ha habido algún cambio en la muestra, según como sea emitido el pulso. Esta aplicación supondría una nueva esperanza en el campo de la detección y tratamiento, y el mismo Ferenc Krausz está actualmente abocado a su estudio.

En la Argentina, existen algunos grupos teóricos estudiando el maravilloso mundo de la ciencia del attosegundo. El Grupo de Dinámica Cuántica en la Materia en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio –IAFE– (UBA-Conicet), el Instituto de Física de Rosario –IFIR– (UNR-Conicet), la División de Física Atómica, Molecular y Óptica del Centro Atómico Bariloche –CAB– (CNEA) y el Centro de Investigaciones Ópticas –CIOP– (Conicet-UNLP). Lamentablemente, no existen laboratorios en América Latina con desarrollo experimental que combine la generación de attopulsos con el estudio de los electrones en la materia.

En resumen, el área de la física del attosegundo –o attofísica– apunta al entendimiento profundo del movimiento de los electrones a escalas atómicas. Pero no solo

permite la observación en tiempo real y medición de la dinámica electrónica en átomos, moléculas y sólidos, sino también su control y manipulación. La attofísica nos permite observar y controlar la materia en el micromundo, viendo bajo una nueva luz procesos increíblemente rápidos de objetos extremadamente pequeños. **CH**



### Diego Arbó

Doctor en ciencias físicas, UBA.

Investigador independiente del Conicet en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE).

Profesor adjunto de la UBA.

[diego.arbo@uba.ar](mailto:diego.arbo@uba.ar)

## QUÍMICA

### Eduardo D Martínez y Paula C Angelomé

Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CNEA-Conicet

El premio Nobel de química este año se otorgó en partes iguales a tres reconocidos investigadores por ‘el descubrimiento y la síntesis de puntos cuánticos’. Uno de los galardonados fue Moungi Gabriel Bawendi, nacido en París (Francia) en 1961 y afiliado al momento de la premiación al Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), Cambridge, Estados Unidos. Otro de los premiados fue Louis Eugene Brus, nacido en Cleveland (Estados Unidos) en 1943, quien trabaja en la Universidad de Columbia (Nueva York) y era empleado de Bell Laboratories al momento de su descubrimiento. El tercer laureado fue el físico Alexei Ivanovich Ekimov, nacido en 1945 en la actual Rusia (en ese momento, parte de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas, URSS). Ekimov se desempeña actualmente en el sector privado, en la empresa Nanocrystals Technology Inc. radicada en Nueva York, Estados Unidos.

### Materiales y sus propiedades

Para comprender de qué se trata el tema de investigación reconocido en esta ocasión, debemos interiorizarnos en la química inorgánica, en la ciencia de los materiales y en la física de los electrones en sistemas confinados. Para empezar, podemos partir con una clasificación tradicional de los materiales entre orgánicos e inorgánicos, aunque actualmente existen materiales híbridos que combinan ambos tipos. Dentro del primer campo caben todas aquellas sustancias formadas princi-

palmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, entre las cuales encontramos, por ejemplo, polímeros de amplia aplicación industrial como el polietileno. En tanto, en los materiales inorgánicos se pueden encontrar otros elementos de la tabla periódica como componentes principales. Esta última definición es (muy) general e incluye los óxidos, los cristales iónicos, los metales, los vidrios y muchos más. Más detalladamente, podemos agrupar los materiales inorgánicos en tres categorías: metales, semiconductores y dieléctricos. La diferencia fundamental entre estas categorías radica en la forma en que los electrones son capaces de desplazarse o ubicarse dentro de los materiales. Físicamente esto está determinado por lo que se conoce como *bandas de energía*. La disposición particular de los átomos en el material, formando estructuras cristalinas, es decir, en un arreglo periódico, conlleva a la formación de una estructura electrónica en la que prevalecen dos bandas, llamadas *de valencia* y *de conducción*. Mientras los electrones de la banda de valencia son responsables de los enlaces con átomos vecinos y están localizados en posiciones cercanas al núcleo del átomo del cual provienen (podríamos decir que se encuentran ‘fijos’), los elec-



Louis E Brus



Moungi G Bawendi



Alexei I Ekimov