

## PREMIO NOBEL DE FÍSICA 2023

(Diciembre de 2023)

El Premio Nobel de Física 2023 fue otorgado a:

- Pierre Agostini, The Ohio State University, Columbus, USA.
- Ferenc Krausz, Max Planck Institute of Quantum Optics, Garching, Germany and Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich, Germany.
- Anne L’Huillier, Lund University, Sweden.

*“Por desarrollar métodos experimentales, que facilitan la generación de pulsos de luz de attosegundos de duración que permitirán el estudio de la dinámica electrónica en la materia”[1]*

Para contextualizar lo dicho por la Academia Sueca debemos tener presente que **Atto** (símbolo **a**) es un prefijo del Sistema Internacional que indica un factor de  $10^{-18}$ . El origen de este prefijo es la palabra danesa *atten*, que significa “dieciocho”. Esta unidad de tiempo es tan corta que hay tantos attosegundos en un segundo como segundos ha habido desde los albores del universo, hace aproximadamente 13.800 millones de años. En esta escala de tiempo, el tiempo prácticamente está detenido para todo, excepto para los electrones.

Así las cosas, la física de attosegundos es la ciencia de los movimientos electrónicos a escala atómica, a menudo provocados por la luz. La fuerza que las ondas de luz visible/infrarroja ejercen sobre las partículas cargadas no es constante en el tiempo y varía en cientos de attosegundos. Los electrones pueden responder a estas variaciones hiperrápidas cambiando su estado (posición, velocidad) en esta misma escala de tiempo.

La física de attosegundos (as), se originó adaptando ideas que estaban bien desarrolladas en la física del plasma. Esta adaptación condujo directamente al modelo de recoliación lo que permitió

unificar aspectos de la física atómica que previamente no se entendían bien, como la ionización por encima del umbral y la generación de armónicos de alto orden. En los 22 años transcurridos desde la primera demostración experimental, la física de attosegundos se convirtió en un compendio de muchos aspectos relacionados con la interacción de la luz de alta intensidad con la materia, de la óptica no lineal extrema, de los armónicos de alto orden que se extienden hasta los rayos X blandos y de las mediciones de los intervalos más cortos de tiempo producidos por los seres humanos.

Este milenio presenció la llegada de los pulsos de luz ultracortos y, con estos, la aparición de una nueva y radical tecnología que está trasladando la espectroscopia de resolución temporal y las técnicas de control de la escala de tiempo molecular (femtosegundos) a la escala de tiempo electrónica (attosegundos).

De hecho, los pulsos de luz de attosegundos se crearon a principios de la década de 1990, cuando los físicos utilizaron intensos pulsos de láser para ionizar átomos de gases nobles, produciendo radiación de alta energía simultáneamente con los pulsos de luz originales. Kenneth Kulander, sus colaboradores y Paul Corkum exploraron la teoría de esta “generación de armónicos superiores” y en 1993 llegaron a un modelo simple del proceso: durante cada medio ciclo, el campo eléctrico oscilante de un pulso láser intenso arranca los electrones de los átomos del gas, los acelera y luego los empuja nuevamente hacia atrás para que vuelvan a chocar (electrones de recoliación) con los iones de origen. Cada colisión produce una breve ráfaga de fotones en el ultravioleta extremo (XUV).

El trabajo teórico y experimental preliminar, en particular el de Anne L’Huillier y sus colegas [2], demostraron que impulsando la generación de armónicos de alto orden con múltiples ciclos de láseres de femtosegundos se deberían producir pulsos de luz de attosegundos con tasas de repetición del doble de la frecuencia del láser. Sin embargo, las secuencias de pulsos de attosegundos no fueron comprobadas rigurosamente hasta el 2001 cuando Pierre Agostini y su grupo [3], codificaron las propiedades del pulso

en electrones foto-ionizados y luego midieron las propiedades de estas así llamadas réplicas foto-electrónicas. Unos meses más tarde, Ferenc Krausz y sus colaboradores [4], informaron la generación de pulsos aislados de attosegundos de duración, mediante el filtrado de un tren de pulsos. Para ello, el equipo perfeccionó la forma de guiar y hacer recolisionar los electrones utilizando los campos eléctricos de unos pocos períodos de pulsos láser intensos con su forma de onda tan finamente ajustada que cada pulso dio como resultado la generación de un único evento de recolisión reproducible, logrando así la producción de un pulso aislado y reproducible con duración de attosegundos.

Estos pulsos fotónicos aislados con duración de attosegundos están en capacidad de disparar el decaimiento atómico Auger y la fotoionización en átomos y sólidos, y permiten estudiar la dinámica electrónica resultante de la interacción de campos eléctricos oscilantes sincronizados con pulsos de láser.

Los procesos de ionización generados en los átomos tras la interacción con armónicos superiores de la radiación desencadenan cambios electrónicos y estructurales y, tanto los pulsos de attosegundos de electrones como de fotones emitidos, proporcionan instantáneas de la estructura y dinámica del sistema en el instante de la recolisión. Esta información estructural y dinámica es accesible y obtenible, lo que ha permitido reportar mediciones de la dinámica de protones en attosegundos y la dinámica multi-electrónica en moléculas, así como la obtención de imágenes de estructuras moleculares obtenidas mediante difracción de electrones de recolisión. Cuando se dispone de pulsos más fuertes en attosegundos, se puede obtener información con resolución espacial de Angstrom y una resolución temporal de attosegundos. Se puede afirmar que la tecnología de attosegundos ya se ha consolidado y se espera que con nuevos desarrollos de la ingeniería de las ondas luminosas, compuestas de frecuencias que van del ultravioleta al infrarrojo, sea posible un control sin precedentes del movimiento de los electrones. Si bien, los pulsos ultracortos de rayos X disponibles en la actualidad no tienen aún la intensidad necesaria que permita bombear (excitar) y sondear (monitorear) los cambios inducidos,

base de la espectroscopia de rayos X, se vislumbra el acceso a pulsos de rayos X duros coherentes en attosegundos que revolucionarían la investigación, haciendo posible ampliar la espectroscopia de resolución temporal al dominio de los attosegundos y posibilitando el uso de estos pulsos, tanto para inducir como para sondear transiciones electrónicas ligadas o no ligadas en átomos o moléculas. En última instancia, la ingeniería de ondas de luz debería dar acceso a pulsos de una duración equivalente a la unidad atómica de tiempo ( $\sim 24$  as), lo cual permitiría captar, e incluso controlar, los movimientos más rápidos fuera del núcleo atómico.

El muestreo de alta fidelidad y sensibilidad de los campos eléctricos también es prometedor ya que abriría nuevas rutas para el estudio de la composición molecular de los sistemas biológicos, tal que el sondeo de los cambios en los estados fisiológicos de los organismos vivos permitirá el monitoreo de la salud y eventualmente la detección prematura de enfermedades.

## Referencias

- [1] Comunicado de la Real Academia Sueca de Ciencias Oct. 3 de 2023. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/>
- [2] Philippe Antoine, Anne L'Huillier, and Maciej Lewenstein, Phys. Rev. Lett. 77, 1234 (1996). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.1234>
- [3] E. A. Nersesov, S. V. Popruzhenko, D. F. Zaretsky, W. Becker, and P. Agostini, Phys. Rev. A 64, 023419 (2001). DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.64.023419>
- [4] M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann, G. A. Reider, N. Milosevic, T. Brabec, P. Corkum, U. Heinzmann, M. Drescher and F. Krausz. Attosecond metrology. Nature 414, 509–513 (2001). DOI:<https://doi.org/10.1038/35107000>

***Dr. rer. nat. Pedro Hernan Sánchez Machet***  
*Profesor Asociado*  
*Universidad Nacional de Colombia*