



## Científicos crean pulsos de attosegundos de duración en el rango del vacío ultravioleta para rastrear procesos ultrarrápidos en sistemas naturales

Un equipo de investigadores ha presentado en Nature Communications una nueva técnica capaz de generar y caracterizar pulsos de luz de attosegundos ( $10^{-18}$  segundos) en el rango espectral del vacío ultravioleta utilizando cristales semiconductores iluminados por intensos campos láser. Gracias a estos pulsos, es posible estudiar dinámicas ultrarrápidas en sistemas naturales que se encuentren en cualquier estado de la materia.

February 07, 2025

Los electrones en los átomos interactúan entre sí y con otras partículas, modificando su

movimiento, energías y otras características, en escalas de tiempo increíblemente rápidas, del orden de los attosegundos ( $10^{-17}$  segundos). Para capturar estos cambios ultrarrápidos se requieren pulsos de luz igualmente ultrarrápidos. La duración del pulso debe ser comparable a la del efecto que se desea observar; de lo contrario, sería como tratar de capturar el movimiento de las alas de un colibrí con una cámara de muy larga exposición.

A finales del siglo XIX, los físicos pensaban que solo era técnicamente posible generar pulsos de femtosegundos ( $10^{-15}$  segundos). Sin embargo, esto comenzó a cambiar a finales de la década de 1980, cuando se estableció la conexión entre la generación de altos armónicos y la attociencia. La generación de altos armónicos (HHG, por sus siglas en inglés) es un proceso que convierte fotones de baja frecuencia en fotones de mayor frecuencia. Lo que los investigadores descubrieron es que, cuando se emiten múltiples armónicos, estos pueden combinarse para formar un pulso de luz de attosegundos, algo que finalmente se logró en 200

. La attociencia nació con la generación y el uso de pulsos en el rango extremo del ultravioleta (XUV), lo que condujo al desarrollo de métodos de detección y caracterización centrados en estas frecuencias. Más de 20 años después, la creación de pulsos de attosegundos sigue estando centrada en la luz XUV. A pesar de los avances que han permitido los pulsos de attosegundos XUV, estos presentan una limitación importante: la mayoría de los átomos, al ser impactados por una fuente de luz tan energética, pierden uno o más electrones, es decir, se ionizan. Sin embargo, muchos procesos naturales de interés ocurren en átomos o ionizados, que permanecen en el llamado estado ligado. Dado que la luz XUV no permite estudiar estos estados ligados, los cuales se dan muy a menudo en los sistemas naturales, su análisis ha quedado fuera del alcance de la attociencia. Para abordar este problema, es necesario contar con una fuente capaz de generar pulsos de attosegundos de menor energía (por ejemplo, en el rango del vacío ultravioleta) y desarrollar nuevos métodos para medir sus principales características, como la duración e intensidad.

. Ahora, un equipo internacional de investigadores de ELI-ALPS, Guangdong Technion- Israel Institute of Technology, Technische Universität Wien, Université de Bordeaux-CNRS-CEA, Foundation for Research and Technology-Hellas (FORTH) y los investigadores del ICFO, **Philipp Stammer**, el **Dr. Javier Rivera-Dean** y el **Prof. ICREA Maciej Lewenstein**, ha logrado este objetivo. Por primera vez, el equipo ha demostrado **que los semiconductores iluminados por luz láser en el rango medio del infrarrojo emiten pulsos de attosegundos en el vacío ultravioleta (VUV)**. Además, han obtenido la forma temporal de estos pulsos y han medido su duración total. Estos resultados inéditos, publicados en Nature Communications, establecen las bases de una nueva técnica para estudiar cambios ultrarrápidos en sistemas naturales, preservando su estado ligado en lugar de inducir su ionización.

### **Producción y caracterización de pulsos de attosegundos VUV**

Para confirmar la generación de pulsos de attosegundos VUV y comprender sus propiedades,

los investigadores diseñaron e implementaron un experimento que combinaba materiales semiconductores con intensos campos laser.

En el experimento, un haz de luz en el rango medio del infrarrojo (mid-IR) iluminaba un cristal semiconductor, generando altos armónicos cuya superposición dio lugar a pulsos de attosegundos VUV. Estos pulsos fueron dirigidos hacia átomos de cesio, una de las pocas especies que, a diferencia de los átomos utilizados en los esquemas convencionales de atociencia, pueden ionizarse con luz VUV. Como se esperaba, en presencia del campo mid-IR, los pulsos VUV ionizaron los átomos de cesio. Analizando los electrones expulsados, los investigadores pudieron medir la sincronización (que ocurría en un rango de pocos attosegundos) de los altos armónicos que constituían los pulsos VUV, lo que permitió extraer información clave sobre ellos.

Los resultados experimentales coincidieron con las predicciones teóricas, **confirmando la generación de pulsos VUV con una duración de 950 attosegundos.**

### **Potencial para futuras técnicas**

Estos hallazgos presentan a los **semiconductores** iluminados por láseres intensos como una **nueva fuente de pulsos de attosegundos** y destacan su potencial para estudiar procesos ultrarrápidos en una gama más amplia de materiales. ¿Hemos desarrollado herramientas para rastrear dinámicas ultrarrápidas en estados ligados, los cuales ocurren con frecuencia en la naturaleza, en todos los estados de la materia, incluyendo átomos, moléculas en fase gaseosa y líquida, y sólidos? explica el Dr. Paraskevas Tzallas, investigador de FOR H i co-autor del artículo.

Los autores también destacan que, según estudios previos, la radiación HHG generada por átomos puede producir luz cuántica, con propiedades como el entrelazamiento el squeezing (compresión cuántica). Su investigación representa un paso crucial hacia la demostración experimental de este fenómeno en semiconductores, lo que, de lograrse, permitiría nuevas aplicaciones en diversas tareas de procesamiento de información cuántica. En conjunto, el Dr. Tzallas considera que **estas nuevas herramientas y metodologías podrían utilizarse para estudiar sistemas naturales, investigar sus dinámicas ultrarrápidas e incluso usarlas para diseñar nuevos estados de luz cuántica** ¿?

### **Referencia:**

Nayak, A., Rajak, D., Farkas, B. et al. Attosecond metrology of vacuum-ultraviolet high-order harmonics generated in semiconductors via laser-dressed photoionization of alkali metals. Nat Commun 16, 1428 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-567>

### **Agradecimientos:**

We thank Balint Kiss, Levente Abrok and Rajaram Shrestha for their technical support and their efforts on the operation of the mid-IR laser system. We also thank Arnold Peter Farkas, for the methods that he developed for introducing the Cs sample in the interaction chamber. The experiments were carried out at ELI ALPS, and ELI-ALPS is supported by the European Union and co-financed by the European Regional Development Fund (GINOP-2.3.6-15-2015-00001).

Tzallas group at FORTH acknowledges support from: The Hellenic Foundation for Research and Innovation (HFRI) and the General Secretariat for Research and Technology (GSRT) under grant agreement CO<sub>2</sub>toO<sub>2</sub> Nr.:015922, the European Union's HORIZON-MSCA-2023-DN-01 project QU-ATTO under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 101168628, the LASERLABEUROPE V (H2020-EU.1.4.1.2 grant no.871124), The H2020 Project IMPULSE (GA 871161), and ELI-ALPS.

Lewenstein group at ICFO acknowledges support from: ERC AdG NOQIA; Ministerio de Ciencia y Innovation Agencia Estatal de Investigaciones (PGC2018-097027-B-I00 / 10.13039/501100011033, CEX2019-000910-S / 10.13039 / 501100011033, Plan National FIDEUA PID 2019-106901GB-I00, FPI, QUANTERAMAQS PCI 2019-111828-2, QUANTERA DYNAMITE PCI 2022-132919, Proyectos de I+D+i i½Retos Colaboracioni½ QUSPIN RTC 2019-007196 7); MICIIN with funding from European Union Next Generation EU (PRTR-C17.I1) an by Generalitat de Catalunya; Fundacio Cellex; Fundacio Mir-Puig; Generalitat de Catalunya (European Social Fund FEDER and CERCA program, AGAUR Grant No. 2021 SGR 01 52, Quantum-CAT U16-011424, co-funded by ERDF Operational Program of Catalonia 2014-20 0); Barcelona Supercomputing Center MareNostrum (FI-2022-1-0042); EU Horizon 2020 FET-OPEN OPTologic (Grant No 899794); EU Horizon Europe Program (Grant Agreement 101080086-NeQST), National Science Centre, Poland (Symfonia Grant No. 2016/20/W/ST4/00314); ICFO Internal i½QuantumGaudii½ project; European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Skłodowska-Curie grant agreement No 101029393 (STREDCH) and No 847648 (i½La Caixa i½ Junior Leaders fellowships ID100010434 : LCF / BQ / PI19 / 11690013, LCF / BQ / PI20 / 11760031 LCF / BQ / PR20 / 11770012, LCF / BQ / PR21

11840013). Stammer acknowledges funding from: The European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 847517. J. Rivera-Dean acknowledges funding from: the Secretaria d'Universitats i Recerca del Departament d'Empresa i Coneixement de la Generalitat de Catalunya, the European Social Fund (L'FSE inverteix en el teu futur)-FEDER, the Government of Spain (Evero Ochoa CEX2019-000910-S and TRANQI), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, Generalitat de Catalunya (CERCA program) and the ERC AdG CERQUTE. Y. Mairesse acknowledges funding from the Agence Nationale de la Recherche (ANR)- Shotime (ANR-21-CE30-38-01), and thanks Samuel Beaulieu for fruitful discussion. M. F. Ciappina and C. Granados



acknowledge financial support from the Guangdong Province Science and Technology Major Project (Future functional materials under extreme conditions - 2021B0301030005) and Guangdong Natural Science Foundation (General Program project No. 2023A1515010871).