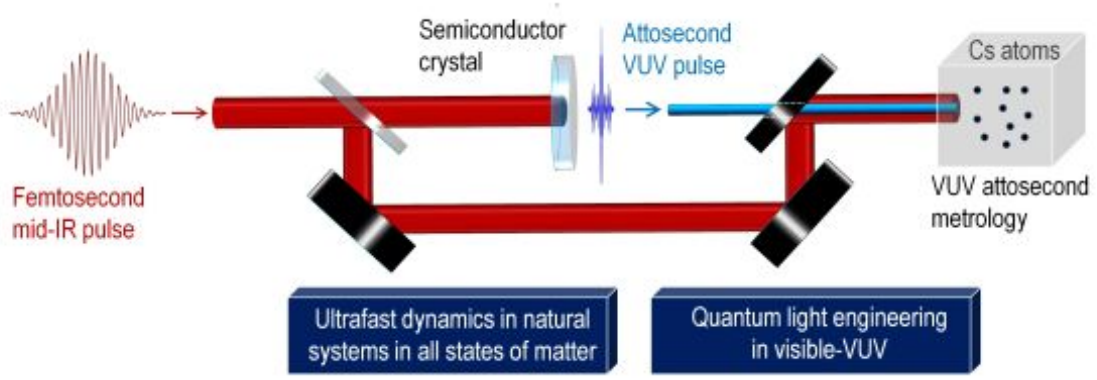


Cientificos crean pulsos de attosegundos de duracion en el rango del vacio ultravioleta para rastrear procesos ultrarrapidos en sistemas naturales

Un equipo de investigadores ha presentado en Nature Communications una nueva tecnica capaz de generar y caracterizar pulsos de luz de attosegundos (10?¹? segundos) en e rango espectral del vacio ultravioleta utilizando cristale semiconductores iluminados por intensos campos laser. Gracias estos pulsos, es posible estudiar dinamicas ultrarrapidas e sistemas naturales que se encuentren en cualquier estado de l materia.

February 07, 2025

Los electrones en los atomos interactuan entre si y con otras particulas, modificando su

movimiento, energias y otras caracteristicas, en escalas de tiempo increiblemente rapidas, del orden de los attosegundos (10?¹? segundos). Para capturar estos cambios ultrarrapidos se requieren pulsos de luz igualmente ultrarrapidos. La duracion del pulso debe se comparable a la del efecto que se desea observar; de lo contrario, seria como tratar d capturar el movimiento de las alas de un colibri con una camara de muy larga exposicion A finales del siglo XIX, los fisicos pensaban que solo era tecnicamente posible generar pulso de femtosegundos (10?¹? segundos). Sin embargo, esto comenzo a cambiar a finales de a decada de 1980, cuando se establecio la conexion entre la generacion de altos armonicos y la attociencia. La generacion de altos armonicos (HHG, por sus siglas en ingles) es n proceso que convierte fotones de baja frecuencia en fotones de mayor frecuencia. Lo que l s investigadores descubrieron es que, cuando se emiten multiples armonicos, estos pued n combinarse para formar un pulso de luz de attosegundos, algo que finalmente se logro n 200
. La attociencia nacio con la generacion y el uso de pulsos en el rango extremo del ultraviole a (XUV), lo que condujo al desarrollo de metodos de deteccion y caracterizacion centrados n estas frecuencias. Mas de 20 anos despues, la creacion de pulsos de attosegundos sig e estando centrada en la luz XUV. A pesar de los avances que han permitido los pulsos e attosegundos XUV, estos presentan una limitacion importante: la mayoria de los atomos, l ser impactados por una fuente de luz tan energetica, pierden uno o mas electrones, es deci , se ionizan. Sin embargo, muchos procesos naturales de interes ocurren en atomos o ionizados, que permanecen en el llamado estado ligado. Dado que la luz XUV no permi e estudiar estos estados ligados, los cuales se dan muy a menudo en los sistemas naturales, u analisis ha quedado fuera del alcance de la attociencia. Para abordar este problema, s necesario contar con una fuente capaz de generar pulsos de attosegundos de menor energ a (por ejemplo, en el rango del vacio ultravioleta) y desarrollar nuevos metodos para medir s s principales caracteristicas, como la duracion e intensida
. Ahora, un equipo internacional de investigadores de ELI-ALPS, Guangdong Technion- Isra l Institute of Technology, Technische Universitat Wien, Universite de Bordeaux-CNRS-CE , 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 laser en el rango medio del infrarrojo emiten pulsos de attosegundos en el vacio ultravioleta (VUV).** Ademas, han obtenido la forma temporal de estos pulsos y han medido su duracion total. Estos resultados ineditos, publicados en Nature Communications, establecen las bases de una nueva tecnica para estudiar cambios ultrarrapidos en sistemas naturales, preservando su estado ligado en lugar de inducir su ionizacion.

Produccion y caracterizacion de pulsos de attosegundos VUV

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

los investigadores disenaron 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 armonicos cuya superposicion dio lugar a pulsos de attosegundos VUV. Estos pulsos fueron dirigidos hacia atomos de cesio, una de las pocas especies que, a diferencia de los atomos utilizados en los esquemas convencionales de attociencia, pueden ionizarse con luz VUV. Como se esperaba, en presencia del campo mid-IR, los pulsos VUV ionizaron los atomos de cesio. Analizando los electrones expulsados, los investigadores pudieron medir la sincronizacion (que ocurria en un rango de pocos attosegundos) de los altos armonicos que constituian los pulsos VUV, lo que permitio extraer informacion clave sobre ellos.
Los resultados experimentales coincidieron con las predicciones teoricas, **confirmando la generacion de pulsos VUV con una duracion de 950 attosegundos.**

Potencial para futuras tecnicas
Estos hallazgos presentan a los **semiconductores** iluminados por laseres intensos como una **nueva fuente de pulsos de attosegundos** y destacan su potencial para estudiar procesos ultrarrapidos en una gama mas amplia de materiales. i¿½Hemos desarrollado herramient
s para rastrear dinamicas ultrarrapidas en estados ligados, los cuales ocurren con frecuenc
a en la naturaleza, en todos los estados de la materia, incluyendo atomos, moleculas en fa
e gaseosa y liquida, y solidosi¿½, explica el Dr. Parasakevas Tzallas, investigador de FOR
H i co-autor del artic
lo. Los autores tambien destacan que, segun estudios previos, la radiacion HHG generada por atomos puede producir luz cuantica, con propiedades como el entrelazamiento
el squeezing (compresion cuantica). Su investigacion representa un paso crucial haci
la demostracion experimental de este fenomeno en semiconductores, lo que, de logra
se, permitiria nuevas aplicaciones en diversas tareas de procesamiento de informacion cuant
ca. En conjunto, el Dr. Tzallas considera que **estas nuevas herramientas y metodologias podrian utilizarse para estudiar sistemas naturales, investigar sus dinamicas ultrarrapidas e incluso usarlas para disenar nuevos estados de luz cuantica**i¿?

Referencia:
Nayak, A., Rajak, D., Farkas, B. et al. Attosecond metrology of vacuum-ultraviolet high-ord
r harmonics generated in semiconductors via laser-dressed photoionization of alka
i metals. Nat Commun 16, 1428 (20
5). 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 CO2toO2 Nr.:015922, the European Union's HORIZON-MSCA-2023-DN-01 project QU-ATTO under the Marie Sk?odowska-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 i¿½Retos Colaboracioni¿½ 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 Catal nya (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 020 FET-OPEN OPTOlogic (Grant No 899794); EU Horizon Europe Program (Grant Agree ent 101080086-NeQST), National Science Centre, Poland (Symfonia Grant No. 2016/20/W/ST4/00314); ICFO Internal i¿½QuantumGaudii¿½ project; European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Sk?odowska-Cur e grant agreement No 101029393 (STREDCH) and No 847648 (i¿½La Caixai¿½ Ju ior 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 esearch and innovation programme under the Marie Sk?odowska-Curie grant agreement N 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 Eur pean 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, Ge eralitat de Catalunya (CERCA program) and the ERC AdG CERQUTE. Y. Mairesse acknowle ges 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 M
jor Project (Future functional materials under extreme conditions - 2021B0301030005) a
d Guangdong Natural Science Foundation (General Program project No. 2023A1515010871).