



Científics creen polsos d'attosegons de durada en el rang del buit ultraviolat per rastrejar processos ultrarapids en sistemes naturals

Un equip d'investigadors ha presentat a Nature Communications una nova tècnica capaç de generar i caracteritzar polsos de llum d'attosegons (10^{-18} segons) en el rang espectral del buit ultraviolat utilitzant cristalls semiconductors il·luminats per intensos camps laser. Gràcies a aquests polsos, es pot estudiar dinàmiques ultrarapides en sistemes naturals que es troben en qualsevol estat de la matèria.

February 07, 2025

Els electrons en els àtoms interactuen entre si i amb altres partícules, modificant el seu moviment, energies i altres característiques en escales de temps increïblement ràpides, de

l'ordre dels attosegons (10^{-15} segons). Per capturar aquests canvis ultrarapids, es requereix polsos de llum igualment ultrarapids. La durada del pols ha de ser comparable a la de l'efecte que es vol observar; en cas contrari, seria com intentar capturar el moviment de les ales d'un colibrí amb una càmera de molt llarga exposició

A finals del segle XIX, els físics pensaven que només era tècnicament possible generar polsos de femtosegons (10^{-14} segons). Tanmateix, això va començar a canviar a finals de la dècada de 1980, quan es va establir la connexió entre la generació d'alts harmonics i l'attociència. La generació d'alts harmonics (HHG, per les seves sigles en anglès) és un procés que converteix fotons de baixa freqüència en fotons de freqüència més alta. El que els investigadors van descobrir és que, quan s'emeten múltiples harmonics, aquests poden combinar-se per formar un pols de llum d'attosegons, cosa que finalment es va aconseguir el 2001. L'attociència va néixer amb la generació i l'ús de polsos en el rang extrem de l'ultraviolat (XUV), fet que va conduir al desenvolupament de mètodes de detecció i caracterització centrats en aquestes freqüències. Més de 20 anys després, la creació de polsos d'attosegons continua centrada en la llum XUV. Tot i els avenços que han permès els polsos d'attosegons XUV, aquests presenten una limitació important: la majoria dels àtoms, en ser impactats per una font de llum tan energètica, perden un o més electrons, és a dir, s'ionitzen. Ara bé, molts processos naturals d'interès es produeixen en àtoms no ionitzats, que romanen en l'anomenat estat lligat. Atès que la llum XUV no permet estudiar aquests estats lligats, els quals es produeixen molt sovint en els sistemes naturals, la seva anàlisi ha quedat fora de l'abast de l'attociència. Per abordar aquest problema, es necessita comptar amb una font capaç de generar polsos d'attosegons de menor energia (per exemple, en el rang del buit ultraviolat) i desenvolupar nous mètodes per mesurar-ne les principals característiques com la durada i la intensitat. Ara, un equip internacional d'investigadors de ELI-ALPS, Guangdong Technion-Israel Institute of Technology, Technische Universität Wien, Université de Bordeaux-CNRS CEA, Foundation for Research and Technology-Hellas (FORTH) i els investigadors de l'ICFO, en **Philipp Stammer**, el **Dr. Javier Rivera-Dean** i el **Prof. ICREA Maciej Lewenstein**, ha assolit aquest objectiu. Per primera vegada, l'equip ha demostrat que **els semiconductors il·luminats per llum laser en el rang mitjà de l'infraroig emeten polsos d'attosegons en el buit ultraviolat** (VUV, per les sigles en anglès). A més, han obtingut la forma temporal d'aquests polsos i n'han mesurat la durada total. Aquests resultats inèdits, publicats a Nature Communications, estableixen les bases d'una nova tècnica per estudiar canvis ultrarapids en sistemes naturals, preservant el seu estat lligat en lloc d'induir-ne la ionització.

Producció i caracterització de polsos d'attosegons VUV

Per confirmar la generació de polsos d'attosegons VUV i comprendre'n les propietats, els investigadors van dissenyar i implementar un experiment que combinava materials semiconductors amb intensos camps laser.

En l'experiment, un feix de llum en el rang mitja de l'infraroig (mid-IR) il·luminava un cristal semiconductor, generant alts harmonics, la superposicio dels quals va donar lloc a polso d'attosegons VUV. Aquests polsos es van dirigir cap a atoms de cesi, una de les poque especies que, a diferencia dels atoms utilitzats en els esquemes convencionals d'attociencia es poden ionitzar amb llum VUV. Tal com s'esperava, en presencia del camp mid-IR, el polsos VUV van ionitzar els atoms de cesi. Analitzant els electrons expulsats, el investigadors van poder mesurar la sincronitzacio (que es produia en un rang de poc attosegons) dels alts harmonics que constitueien els polsos VUV, fet que va permetre extreure'n informacio clau

Els resultats experimentals van coincidir amb les prediccions teoriques **confirmant la generacio de polsos VUV amb una durada de 950 attosegons.**

Potencial per a futures techniques

Aquests descobriments presenten els **semiconductors** il·luminats per lasers intensos com una **nova font de polsos d'attosegons** i destaquen el seu potencial per estudiar processos ultrarapids en una gamma mes amplia de materials. **¿Hem desenvolupat eines per rastrejar dinamiques ultrarapides en estats lligats (els quals es produeixen freqüentment a la natura) en tots els estats de la materia, incloent-hi atoms, molecules en fase gasosa i liquida i solids?** explica el Dr. Paraskevas Tzallas, investigador de FORTH i co-autor de l'article. Els autors tambe destaquen que, segons estudis previs, la radiacio HHG generada per atoms pot produir llum quantica, amb propietats com l'entrellacament o el squeezing (compressio quantica). La seva investigacio representa un pas crucial cap a la demostracio experimental d'aquest fenomen en semiconductors, fet que, si s'aconsegueix, permetria noves aplicacions en diverses tasques de processament d'informacio quantica. En conjunt, el Dr. Tzallas considera **que aquestes noves eines i metodologies podrien utilitzar-se per estudiar sistemes naturals, investigar-ne les dinamiques ultrarapides i fins i tot fer-les servir per dissenyar nous estats de llum quantica?**

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>

###

Agraiments:

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 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 i Retos Colaboracioni 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 0152, Quantum-CAT U16-011424, co-funded by ERDF Operational Program of Catalonia 2014-2020); 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 i QuantumGaudi project; European Union's Horizon 2020 research and innovation program under the Marie-Skłodowska-Curie grant agreement No 101029393 (STREDCH) and No 847648 (i La Caixa i 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 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 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 CERQUITE. 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).