

Image not found

El ICFO clarifica como se forma un precursor de la superconductividad

Las ondas de densidad de carga son un precursor de fases cuanticas exoticas, como la superconductividad. A pesar de su importancia, entender como se forman en ciertos materiales sigue siendo una incognita.

Ahora, investigadores del ICFO y otros colaboradores han estudiado estas ondas de densidad de carga aplicando, por primera vez, una tecnica laser llamada espectroscopia de generacion de altos armonicos. El nuevo metodo optico tiene una sensibilidad extrema, lo que ha permitido detectar sutiles asimetrias en el comportamiento de la muestra que habian pasado desapercibidas con otras tecnicas. Este conocimiento fundamental podria ser clave para lograr fases cuanticas correlacionadas (como la superconductividad) a temperatura ambiente. La tecnica, anunciada en *Communications Materials*, tambien podria utilizarse para estudiar y caracterizar cristales, materiales bidimensionales (2D) y nanodispositivos.

July 25, 2025

Solemos asociar los efectos cuanticos con el ambito microscopico de los atomos, electrones y fotones. Sin embargo, algunos fenomenos cuanticos ocurren a escalas mucho mayores, incluso macroscopicas. La superconductividad y la superfluidez, por ejemplo, permiten que las corrientes electricas o los fluidos fluyan sin resistencia cuando se alcanzan temperaturas ultrafrias. Aunque estas fases cuanticas exoticas de la materia surgen de interacciones sutiles entre los portadores de carga (como los electrones) y la red atomica, sus efectos se manifiestan en el regimen macroscopico.

La **onda de densidad de carga (CDW)**, por sus siglas en ingles) suele aparecer como precursor de estas fases cuanticas correlacionadas y podria ser clave para lograrlas a temperatura ambiente. Esta se manifiesta cuando tanto la distribucion de electrones como las posiciones de los atomos forman un patron ondulatorio repetitivo (o, mas tecnicamente, una estructura de supercelda periodica). Sin embargo, el mecanismo principal detras de la formacion de CDW en algunos materiales (como el TiSe?) sigue siendo motivo de debate. Algunos lo atribuyen a interacciones entre electrones y fonones (excitaciones colectivas de los atomos

en un sólido), mientras que otros apuntan a correlaciones entre excitones (estados ligados entre un electrón que abandona su sitio en la banda de valencia y el hueco que deja atrás). Hasta ahora, los experimentos no han logrado distinguir claramente entre ambas hipótesis. Investigadores del ICFO del grupo de [Attoscience and Ultrafast Optics](#), Igor Tyulnev, el Dr. Lenard Vamos y Julita Poborska, liderados por el Prof. ICREA Jens Biegert; junto con investigadores del grupo de [Quantum Optics Theory](#), el Dr. Lin Zhang y el Prof. ICREA Maciej Lewenstein, han adoptado ahora un enfoque radicalmente nuevo al aplicar la espectroscopia de generación de armónicos altos (una técnica basada en láser que hace que los materiales emitan luz en forma de armónicos superiores al haz entrante) a un sistema CDW. El método demostró ser extremadamente sensible al movimiento atómico y a los cambios de simetría en el material, revelando que el desplazamiento atómico en diferentes direcciones espaciales afecta la intensidad de la CDW de forma correspondiente. Además, gracias a esta nueva técnica óptica ultrarrápida, ahora es posible acceder a la escala temporal de la respuesta excitónica, mientras que el proceso puede modelarse mediante teoría de campo medio. El estudio, publicado en *Communications Materials*, también contó con la colaboración de ETH Zurich, la Universidad Adam Mickiewicz, el Donostia International Physics Center y la Universidad de Valencia.

Hacia la resolución de un debate histórico sobre la formación de CDW

En particular, el equipo investigó el TiSe₂ enviando un pulso láser de infrarrojo medio y midiendo la intensidad de los armónicos resultantes en todas las direcciones. La muestra fue colocada en una cámara criostática cuidadosamente diseñada, que permitió a los investigadores reducir la temperatura hasta 14 Kelvin (muy por debajo de la temperatura de transición de fase de 200 Kelvin), lo que les permitió observar el comportamiento de la CDW. Las mediciones demostraron que cuando los átomos se desplazan de manera distinta a lo largo de diferentes direcciones, la respuesta en los armónicos altos varía consecuentemente en cada dirección. Incluso un pequeño desplazamiento puede desencadenar un cambio macroscópico, dando lugar a una variación muy fuerte en la señal armónica, comenta Igor Tyulnev, primer autor del artículo. Esto no se había observado con técnicas tradicionales como ARPES, y solo fue insinuado recientemente en estudios con STM -probablemente porque los métodos anteriores descartaban la señal como ruido o no eran lo suficientemente sensibles para detectarla. Dado que la intensidad de la CDW está directamente relacionada con el movimiento atómico, en la práctica la señal armónica actuó como una sonda sensible a esta fase c

antiga. Para comprender mejor la conexión entre la generación de armónicos altos, el desplazamiento atómico y el comportamiento de la CDW, el equipo colaboró con el Prof. ICREA Maciej Lewenstein y su grupo en el ICFO. Sus aportaciones teóricas fueron cruciales para interpretar los resultados experimentales y revelar los mecanismos subyacentes e

juego. Mas alla de sus aportaciones cientificas, la tecnica tambien ofrece ventajas practicas. Al ser una sonda totalmente optica y no invasiva, es mas sencilla y accesible que los metodos tradicionales, lo que la hace ideal para estudiar y caracterizar cristales, materia es 2D y nanodispositivos. Ademas, dado que tanto los efectos excitonicos como los fononicos influyen en la generacion de armonicos altos, esta herramienta podria utilizarse para estudiarlos y, potencialmente, distinguirlos entre si. Segun el Prof. ICREA del ICFO Jens Biegert, autor senior del estudio, **Nuestro enfoque podria ayudar a resolver el debate historico sobre el mecanismo principal detras de la formacion de CDW en el TiSe₂?** Con suerte, pronto podremos responder a la gran pregunta: ¿Surge la CDW a partir de efecto electron-fonon, o excitonicos?i?

Referencia:

Tyulnev, I., Zhang, L., Vamos, L. et al. High harmonic spectroscopy reveals anisotropy of the charge-density-wave phase transition in TiSe₂. *Commun Mater* **6**, 152 (2025).
DOI: <https://doi.org/10.1038/s43246-025-00873-5>

Agradecimientos:

J.B. acknowledges financial support from the European Research Council for ERC Advanced Grant *TRANSFORMER* (788218), ERC Proof of Concept Grant *miniXi* (40010), FET-OPEN *PETAComi* (829153), FET-OPEN *OPTologic* (89794), FET-OPEN *TwistedNanoi* (101046424), Laserlab-Europe (871124), MINECO for Plan Nacional PID2020-112664 GB-I00; QU-ATTO, 101168628; AGAUR for 2017 GR 1639, MINECO for *Severo Ochoa* (CEX2019-000910-S), Fundacio Cellex Barcelona, the CERCA Programme/Generalitat de Catalunya, and the Alexander von Humboldt Foundation for the Friedrich Wilhelm Bessel Prize. I.T. and J.B. acknowledge support from Marie Skłodowska-Curie ITN *smart-Xi* (860553). ICFO-QOT group acknowledges support from the European Research Council for AdG NOQIA; MCIN/AEI (PGC2018-0910.13039/501100011033, CEX2019-000910-S/1.13039 / 501100011033, Plan National FIDEUA PID2019-106901GB-I00, Plan National STAEENA PID2022-139099NB, I00, project funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the *EU NextGenerationEU/PRTR* (PRTR-C17.11), FPI); QUANTERA MQS PCI2019-111828-2; QUANTERA DYNAMITE PCI2022-132919, QuantERA II Programme co-funded by EU Horizon 2020 program Grant No 101017733; Ministry for Digital Transformation and Civil Service of the Spanish Government through the QUANTUM ENIA project call - Quantum Spain project, and by the European Union through the Recovery, Transformation and Resilience Plan - NextGenerationEU within the framework of the Digital Spain 2026 Agenda; Fundacio Cellex; Fundacio Mir-Puig; Generalitat de Catalunya (Europe

n Social Fund FEDER and CERCA program, AGAUR Grant No. 2021 SGR 01452, QuantumCAT U16-011424, co-funded by ERDF Operational Program of Catalonia 2014-2020); Barcelona Supercomputing Center MareNostrum (FI-2023-3-0024); Funded by the EU. This project has received funding from the EU's Horizon Europe research and innovation program under grant agreement No 101080086 NeQST Grant Agreement 101080086 - NeQST; ICFO Internal $\frac{1}{2}$ QuantumGaudii $\frac{1}{2}$ project. This study forms part of the Advanced Materials programme and was supported by MCIN with funding from European Union NextGenerationEU (PRTR-C17.I1) and by Generalitat Valenciana.

Image not found

Muestra TiSe₂ dentro del criostato.
Credito: ICFO.