

El ICFO clarifica como se forma un precursor de la superconductividad

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

Ahora, investigadores del ICFO y otros colaboradores han estudiado estas ondas de densidad de carga aplicando, por primera vez, una técnica láser llamada espectroscopia de generación de altos armónicos. El nuevo método óptico tiene una sensibilidad extrema, lo que ha permitido detectar sutiles asimetrías en el comportamiento de la muestra que habían pasado desapercibidas con otras técnicas. Este conocimiento fundamental podría ser clave para lograr fases cuánticas correlacionadas (como la superconductividad) a temperatura ambiente. La técnica, anunciada en *Communications Materials*, también podría 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 solido), mientras que otros apuntan a correlaciones entre excitones (estados ligados entre un electron que abandona su sitio en la banda de valencia y el hueco que deja atras). Hasta ahora, los experimentos no han logrado distinguir claramente entre ambas hipotesis. 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 generacion de armonicos altos (una tecnica basada en laser que hace que los materiales emitan luz en forma de armonicos superiores al haz entrante) a un sistema CDW. El metodo demostro ser extremadamente sensible al movimiento atomico y a los cambios de simetria en el material, revelando que el desplazamiento atomico en diferentes direcciones espaciales afecta la intensidad de la CDW de forma correspondiente. Ademas, gracias a esta nueva tecnica optica ultrarrapida, ahora es posible acceder a la escala temporal de la respuesta excitonica, mientras que el proceso puede modelarse mediante teoria de campo medio. El estudio, publicado en *Communications Materials*, tambien conto con la colaboracion de ETH Zurich, la Universidad Adam Mickiewicz, el Donostia International Physics Center y la Universidad de Valencia.

Hacia la resolucion de un debate historico sobre la formacion de CDW

En particular, el equipo investigo el TiSe? enviando un pulso laser de infrarrojo medio y midiendo la intensidad de los armonicos resultantes en todas las direcciones. La muestra fue colocada en una camara criostatica cuidadosamente disenada, que permitio 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 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

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

al juego. Más allá de sus aportaciones científicas, la técnica también ofrece ventajas prácticas. Al ser una sonda totalmente óptica y no invasiva, es más sencilla y accesible que los métodos tradicionales, lo que la hace ideal para estudiar y caracterizar cristales, materiales 2D y nanodispositivos. Además, dado que tanto los efectos excitónicos como los fonónicos influyen en la generación de armónicos altos, esta herramienta podría utilizarse para estudiarlos y, potencialmente, distinguirlos entre sí. Según el Prof. ICREA del ICFO Jens Biegert, autor senior del estudio, **Nuestro enfoque podría ayudar a resolver el debate histórico sobre el mecanismo principal detrás de la formación de CDW en el TiSe₂.** Con suerte, pronto podremos responder a la gran pregunta: ¿Surge la CDW a partir de efecto electrón-fonón, o excitónicos?

Referencia:

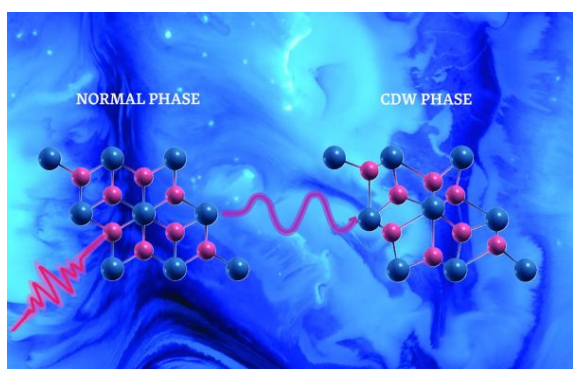
Tyulnev, I., Zhang, L., Vamos, L. et al. High harmonic spectroscopy reveals anisotropy of the charge-density-wave phase transition in TiSe₂. *Commun Mater* **6**, 152 (2025).

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 OPTOLOGICI (8

9794), FET-OPEN $\frac{1}{2}$ TwistedNano $\frac{1}{2}$ (101046424), Laserlab-Europe (871124), MINEO for Plan Nacional PID2020-112664 GB-I00; QU-ATTO, 101168628; AGAUR for 2017 GR 1639, MINECO for $\frac{1}{2}$ Severo Ochoa $\frac{1}{2}$ (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 $\frac{1}{2}$ smart-Xi $\frac{1}{2}$ (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 $\frac{1}{2}$ EU NextGenerationEU/PRTR" (PRTR-C17.I1), 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 (European 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 $\frac{1}{2}$ QuantumGaudi $\frac{1}{2}$ 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.



Esquema de las fases normal y CDW en el TiSe₂ investigadas en el estudio. Fuente: ICFO.