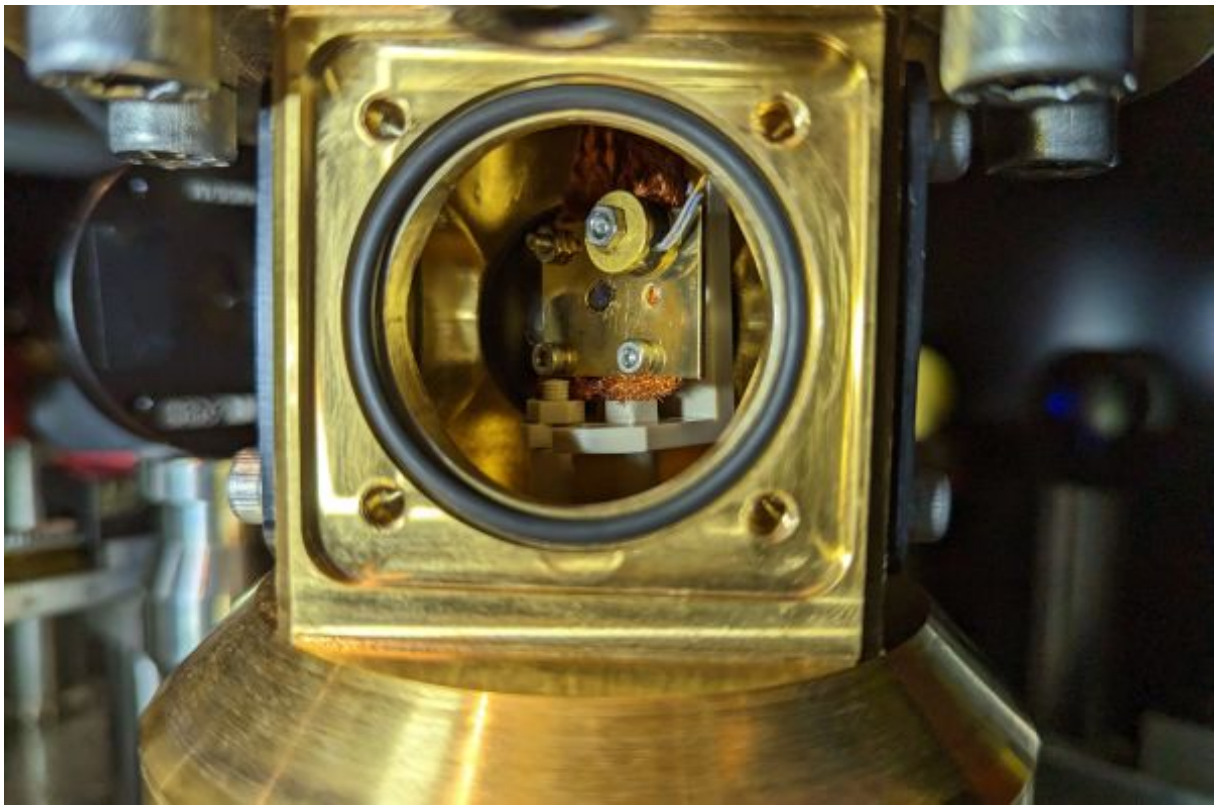


El ICFO clarifica como se forma un precursor de la superconductividad

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 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

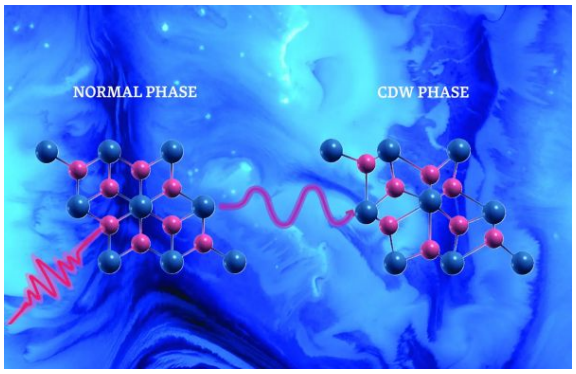
En particular, el equipo investigo el TiSe? enviando un pulso laser de infrarrojo medio y midiendo la intensidad de los armonicos resultantes en todas las direcciones. La muestra fue colocada en una camara criostatica cuidadosamente disenada, que permitio a los

investigadores reducir la temperatura hasta 14 Kelvin (muy por debajo de la temperatura de transicion de fase de 200 Kelvin), lo que les permitio observar el comportamiento de la CDW. Las mediciones demostraron que cuando los atomos se desplazan de manera distinta a lo largo de diferentes direcciones, la respuesta en los armonicos altos varia consecuentemente en cada direccion. i¿½Incluso un pequeno desplazamiento puede desencadenar un camb o macroscopico, dando lugar a una variacion muy fuerte en la senal armonicai¿½, comenta gor Tyulnev, primer autor del articulo. i¿½Esto no se habia observado con tecnicas tradici nales como ARPES, y solo fue insinuado recientemente en estudios con STM -probabl mente porque los metodos anteriores descartaban la senal como ruido o no eran lo suficient mente sensibles para detectarlai¿½. Dado que la intensidad del CDW esta directamente rel cionada con el movimiento atomico, en la practica la senal armonica actuo como una sonda ensible a esta fase c
antica. Para comprender mejor la conexion entre la generacion de armonicos a tos, el desplazamiento atomico y el comportamiento de la CDW, el equipo colaboro con l Prof. ICREA Maciej Lewenstein y su grupo en el ICFO. Sus aportaciones teoricas fueron c uciales para interpretar los resultados experimentales y revelar los mecanismos subyac ntes 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 f nonicos influyen en la generacion de armonicos altos, esta herramienta podria utiliza se para estudiarlos y, potencialmente, distinguirlos entre si. Segun el Prof. ICREA del I FO 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 TiSe?.** 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 i¿½TRANSFORMERi¿½ (788218), ERC Proof of Concept Grant i¿½miniXi¿½ (40010), FET-OPEN i¿½PETAComi¿½ (829153), FET-OPEN i¿½OPTOlogici¿½ (8

9794), FET-OPEN i¿½TwistedNanoi¿½ (101046424), Laserlab-Europe (871124), MINE
O for Plan Nacional PID2020-112664 GB-I00; QU-ATTO, 101168628; AGAUR for 2017
GR 1639, MINECO for i¿½Severo Ochoai¿½ (CEX2019-000910-S), Fundacio Cel
ex Barcelona, the CERCA Programme/Generalitat de Catalunya, and the Alexander von Hum
oldt Foundation for the Friedrich Wilhelm Bessel Prize. I.T. and J.B. acknow
edge support from Marie Sk?odowska-Curie ITN i¿½smart-Xi¿½ (860553). ICFO-QOT gro
p acknowledges support from the European Research Cou
cil for AdG NOQIA; MCIN/AEI (PGC2018-0910.13039/501100011033, CEX2019-000910-S/1
.13039 / 501100011033, Plan National FIDEUA PID2019-106901GB-I00, Plan National STA
EENA PID2022-139099NB, I00, project funded by MCIN/AEI/10.13039/5
1100011033 and by the i¿½EU NextGenerationEU/PRTR" (PRTR-C17.I1), FPI); QUANTERA M
QS PCI2019-111828-2; QUANTERA DYNAMITE PCI2022-132919, QuantERA II Programme co-fun
ed by EU Horizon 2020 program Grant No 101017733; Ministry for Digital Transformation and o
Civil Service of the Spanish Government through the QUANTUM ENIA project call - Qua
tum Spain project, and by the European Union through the Recovery, Transf
rmation 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); B
rcelona Supercomputing Center MareNostrum (FI-2023-3-0024); Funded by the EU. This pro
ect has received funding from the EU's Horizon Europe research and innovation pr
gram under grant agreement No 101080086 NeQSTGrant Agreement 101080086 - NeQST; IC
O Internal i¿½QuantumGaudii¿½ project. This study forms part of the Advanced Materi
ls programme and was supported by MCIN with funding from European Union NextGenerationE
(PRTR-C17.I1) and by Generalitat Valenciana.



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