

L'ICFO aclareix com es forma un precursor de la superconductivitat

Les ones de densitat de carrega són un precursor de fases quàntiques exòtiques, com la superconductivitat. Malgrat la seva importància, entendre com aquestes es formen en certs materials encara és una incògnita.

Ara, els investigadors de l'ICFO i altres col·laboradors han estudiat aquestes ones de densitat de carrega aplicant, per primera vegada, una tècnica laser anomenada espectroscòpia de generació d'harmonics altes. El nou mètode òptic té una sensibilitat extrema, la qual cosa ha permès detectar asimetries subtils en el comportament de la mostra que havien passat desapercebudes amb altres tècniques. Aquest coneixement fonamental podria ser clau per aconseguir fases quàntiques correlacionades (com la superconductivitat) a temperatura ambient. La tècnica, anunciada a *Communications Materials*, també podria utilitzar-se per estudiar i caracteritzar cristalls, materials bidimensionals (2D) i nanodispositius.

July 25, 2025

Solem associar els efectes quantics amb l'ambit microscopic dels atoms, electrons i fotons. Tanmateix, alguns fenomens quantics tenen lloc a escales molt mes grans, fins i tot macroscopiques. La superconductivitat i la superfluidesa, per exemple, permeten que els corrents electricos o els liquids flueixin sense resistencia quan s'assoleixen temperatures ultrafredes. Tot i que aquestes fases quantiques exotiques de la materia sorgeixen a partir d'interaccions subtils entre els portadors de carrega (com els electrons) i la xarxa atomica, els seus efectes es manifesten en el regim macroscopic.

L'ona de densitat de carrega (CDW, per les seves sigles en angles) sol apareixer com a precursor d'aquestes fases quantiques correlacionades i podria ser clau a l'hora d'assolir-les a temperatura ambient. Aquesta es manifesta quan tant la distribucio dels electrons com les posicions dels atoms formen un patro ondulatori repetitiu (o, mes tecnicament, una estructura de supercel·lula periodica). Tanmateix, el mecanisme principal darrere la formaci de la CDW en alguns materials (com el TiSe?) continua essent objecte de debat. Algun l'atribueixen a interaccions entre electrons i fonons (excitacions col·lectives dels atoms en n solid), mentre que d'altres apunten a correlacions entre excitons (estats lligats entre n electro que abandona el seu lloc a la banda de valencia i el forat que deixa enrere). Fins ar , els experiments no han pogut distingir clarament entre les dues hipotesi

. Investigadors de l'ICFO del grup [d'Attoscience and Ultrafast Optics](#), l'Igor Tyulnev, el Dr. **Lenard Vamos** i la **Julita Poborska**, liderats pel Prof. **ICREA Jens Biegert**; juntament amb investigadors del grup de [Quantum Optics Theory](#), el Dr. **Lin Zhang** i el Prof. **ICREA Maciej Lewenstein**, han adoptat un enfocament radicalment nou aplicant l'espectroscopia de generacio d'harmonics alts (una tecnica laser que fa que els materials emetin llum en forma d'harmonics superiors al feix incident) a un sistema CDW.

El metode ha resultat ser extremadament sensible al moviment atomic i als canvis de simetria en el material, revelant que el desplaçament atomic en diferents direccions espacials afecta la intensitat de la CDW de manera corresponent. A mes, gracies a aquesta nova tecnica optica ultrarapida, ara es possible accedir a l'escala temporal de la resposta excitonica, mentre que el proces pot modelar-se mitjancant teoria de camp mitja. L'estudi, publicat a *Communications Materials*, tambe va comptar amb la col·laboracio de l'ETH Zurich, l'Universitat Adam Mickiewicz, el Donostia International Physics Center i la Universitat d'Valencia

Cap a la resolucio d'un debat historic sobre la formacio de la CDW

En particular, l'equip va investigar el TiSe? enviant-hi un pols laser de l'infraroig mitja i mesurant la intensitat dels harmonics resultants en totes direccions. La mostra va ser col·locada en una cambra criostatica dissenyada amb molta cura, que va permetre al

investigadors reduir la temperatura fins als 14 Kelvin (molt per sota de la temperatura de transició de fase de 200 Kelvin), cosa que els va permetre observar el comportament de la CDW

Les mesures van demostrar que, quan els àtoms es desplacen de manera diferent al llarg de diverses direccions, la resposta en harmònics alts varia en conseqüència a cada direcció. Fins i tot un petit desplaçament pot desencadenar un canvi macroscòpic, provocant una variació molt forta en el senyal harmònic, comenta Igor Tyulnev, primer autor de l'article. Això no s'havia observat amb tècniques tradicionals com l'ARPES, i només s'havia insinuat recentment en estudis amb STM -probablement perquè els mètodes anteriors descaraven el senyal com a soroll o no eren prou sensibles per detectar-lo. Com que la intensitat de la CDW està directament relacionada amb el moviment atòmic, en la pràctica el senyal harmònic va actuar com una sonda sensible a aquesta fase quàntica. Per entendre millor la connexió entre la generació d'harmònics alts, el desplaçament atòmic i el comportament de la CDW, l'equip va col·laborar amb el Prof. ICREA Maciej Lewenstein i el seu grup a l'ICFO. Les seves aportacions teòriques van ser crucials per interpretar els resultats experimentals i revelar els mecanismes subjacents en joc. Més enllà de les aportacions científiques, la tècnica també ofereix avantatges pràctics. Com que és una sonda totalment òptica i no invasiva, és més senzilla i accessible que els mètodes tradicionals, cosa que la fa ideal per estudiar i caracteritzar cristalls, materials 2D i nanodispositius. A més, donat que tant els efectes excitònics com els fonònics interueixen en la generació d'harmònics alts, aquesta eina podria utilitzar-se per estudiar-los i, potencialment, distingir-los entre si. Segons el Prof. ICREA de l'ICFO Jens Bierert, autor senior de l'article, **l'estudi enfocat podria ajudar a resoldre el debat històric sobre el mecanisme principal darrere la formació de la CDW en el TiSe₂**. Amb una mica de sort, aviat podrem respondre la gran pregunta: la CDW sorgeix a partir d'efectes electro-fonònics o excitònics?

Referència:

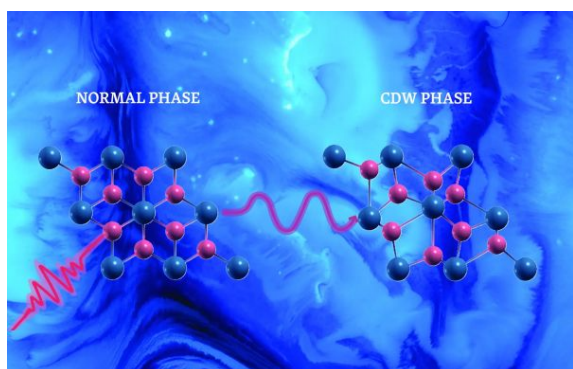
Tyulnev, I., Zhang, L., Vamos, L. et al. High harmonic spectroscopy reveals anisotropy of the charge-density-wave phase transition in TiSe₂. *Commun Mater* **6**, 152 (2025).

DOI: <https://doi.org/10.1038/s43246-025-00873-5>

Agraïments:

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 (89794), FET-OPEN TwistedNanoi (101046424), Laserlab-Europe (871124), MINE

O for Plan Nacional PID2020-112664 GB-I00; QU-ATTO, 101168628; AGAUR for 2017 GR 1639, MINECO for $i\frac{1}{2}$ Severo Ochoa*i\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 $i\frac{1}{2}$ smart-Xi*i\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 $i\frac{1}{2}$ 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 NeQSTGrant Agreement 101080086 - NeQST; ICFO Internal $i\frac{1}{2}$ QuantumGaudi*i\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 les fases normal i CDW en el TiSe₂ investigades a l'estudi. Font: ICFO.