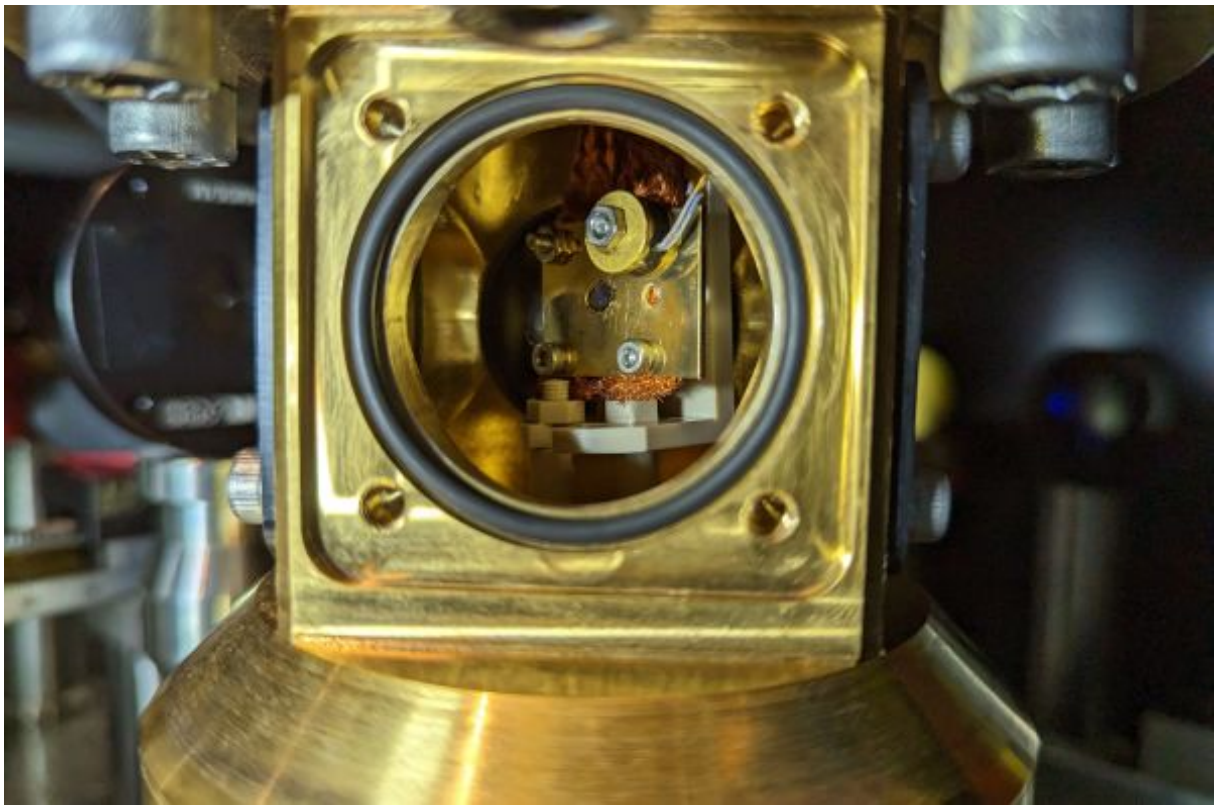


L?ICFO aclareix com es forma un precursor de la superconductivitat

Les ones de densitat de carrega son un precursor de fases quantiques exotiques, com la superconductivitat. Malgrat la seva importancia, entendre com aquestes es formen en certs materials encara es una incognita.

Ara, els investigadors de l'ICFO i altres col·laboradors han estudia aquestes ones de densitat de carrega aplicant, per primer vegada, una tecnica laser anomenada espectroscopia d generacio d'harmonics alts. El nou metode optic te una sensibilita extrema, la qual cosa ha permes detectar asimetries subtils en e comportament de la mostra que havien passat desapercebude amb altres tecniques. Aquest coneixement fonamental podria se clau per aconseguir fases quantiques correlacionades (com l superconductivitat) a temperatura ambient. La tecnica, anunciad aCommunications Materials, tambe 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 electrics 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 desplacament 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 d transicio de fase de 200 Kelvin), cosa que els va permetre observar el comportament de l CDW

Les mesures van demostrar que, quan els atoms es desplacen de manera diferent al llarg d diverses direccions, la resposta en harmonics alts varia en conseqüencia a cada direcci . i¿½Fins i tot un petit desplacament pot desencadenar un canvi macroscopic, provocant una variacio molt forta en el senyal harmonici¿½, comenta Igor Tyulnev, primer autor de l'ar icle. i¿½Aixo no s'havia observat amb tecniques tradicionals com l'ARPES, i nomes s'havia nsinuat recentment en estudis amb STM -probablement perque els metodes anteriors descar aven el senyal com a soroll o no eren prou sensibles per detectar-lo.i¿½ Com que la intens tat de la CDW esta directament relacionada amb el moviment atomic, en la practica el senyal harmonic va actuar com una sonda sensible a aquesta fase quantica. Per entendre millor la connexio entre la generacio d'harmonics alts, el desplacamen atomic i el comportament de la CDW, l'equip va col·laborar amb el Prof. ICREA Maciej Lewe stein i el seu grup a l'ICFO. Les seves aportacions teoriques van ser crucials per inte pretar els resultats experimentals i revelar els mecanismes subjace ts en joc. Mes enlla de les aportacions cientifiques, la tecnica tambe ofereix avantatges pr ctics. Com que es una sonda totalment optica i no invasiva, es mes senzilla i accessible que ls metodes tradicionals, cosa que la fa ideal per estudiar i caracteritzar cristalls, mat rials 2D i nanodispositius. A mes, donat que tant els efectes excitonics com els fononics in lueixen en la generacio d'harmonics alts, aquesta eina podria utilitzar-se per estu iar-los i, potencialment, distingir-los entre si. Segons el Prof. ICREA de l'ICFO Jens Bie ert, autor senior de l'estudi: **Estudis¿½ enfocament podria ajudar a resoldre el debat historic sobre el mecanisme principal darrere la formacio de la CDW en el TiSe?.** Amb una mica de sort, aviat podrem respondre la gran pregunta: la CDW sorgeix a partir d'efectes electro-fono o excitonics?i¿

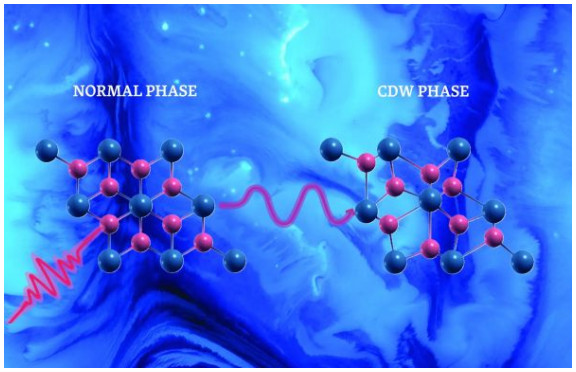
Referencia:

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

Agraiments:

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 les fases normal i CDW en el TiSe2 investigades a l'estudi. Font: ICFO.