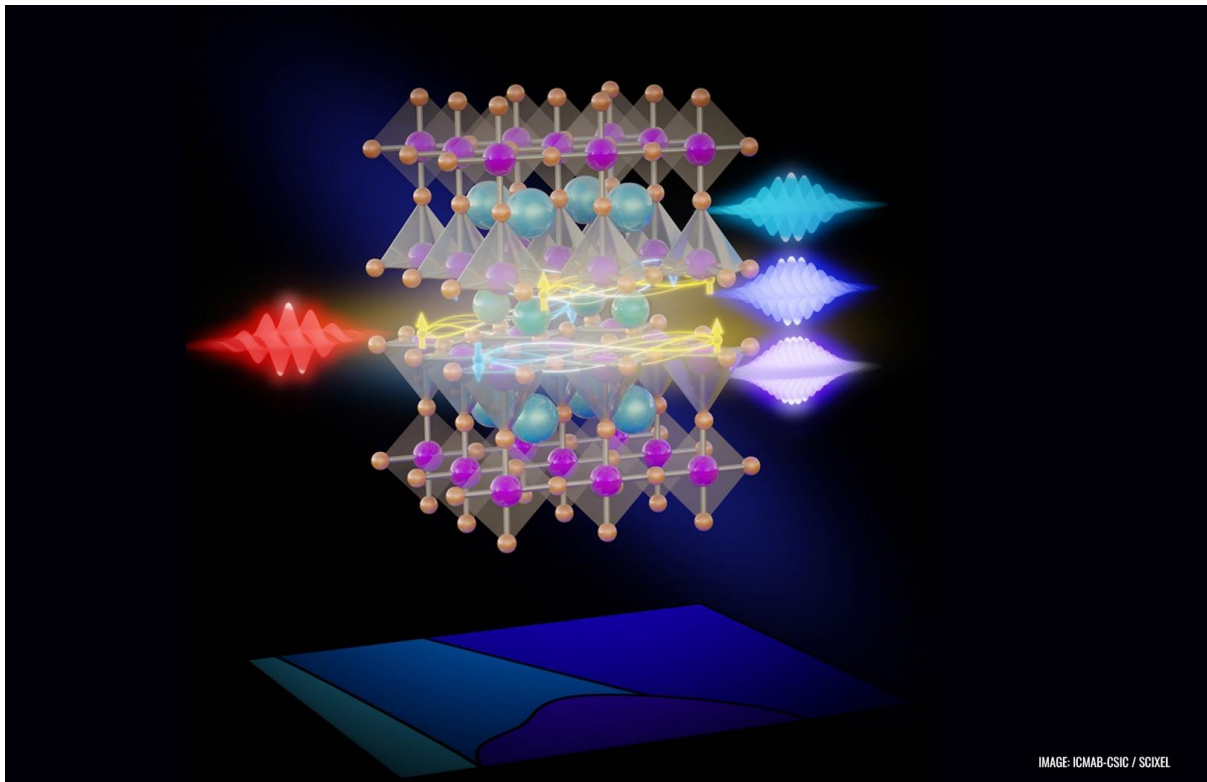




L'espectroscòpia d'alts harmònics revela les transicions de fase dels superconductors d'alta temperatura

Investigadors del ICFO, el ICMAB-CSIC i el Guangdong Technion-Israel Institute of Technology han desenvolupat una nova metodologia per a investigar i mesurar les transicions de fase quàntiques d'un superconductor d'alta temperatura mitjançant l'espectroscòpia d'alts harmònics.



Estructura cristal·lina del superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ (YBCO) il·luminat per una forta llum làser (vermell). Els processos electrònics ultraràpids induïts en el material condueixen a la radiació de llum a altes freqüències (làser lila), predominantment a múltiples de la freqüència làser. Aquest efecte, conegut com a generació d'alta harmònica, s'utilitza per investigar l'evolució dinàmica de les transicions de fase quàntica en aquests compostos i proporcionar una visió nova de la dinàmica microscòpica subjacent de la formació de parells de Cooper.

Els superconductors són aquells materials capaços de conduir l'electricitat sense cap resistència. Aquest fenomen es pot observar en materials refredats per sota de l'anomenada temperatura de transició dels superconductors, sovint a temperatures molt baixes (uns pocs graus per sobre del 0 absolut). Entre aquests tipus materials es troben els anomenats superconductors d'alta temperatura que es comporten com a superconductors a temperatures superiors a 77K (el punt d'ebullició del nitrogen líquid). Aquests materials s'estan mostrant com a essencials en el desenvolupament de nous dispositius electrònics i de processament de la informació, també en el d'ordinadors quàntics òptics i fins i tot per a millorar l'eficiència de les línies de distribució elèctrica.



No obstant això, s'ha vist que la superconductivitat a alta temperatura està estretament lligada al control de la seva dinàmica microscòpica. Fins ara, la detecció de les diferents fases quàntiques en aquests materials ha estat tot un repte. El coneixement dels processos físics d'aquests estats dinàmics és incomplet a causa de l'àmplia gamma d'estats quàntics que presenten. A més, els mètodes actuals utilitzats per a explorar aquestes dinàmiques a escales microscòpiques no tenen la sensibilitat suficient. Per tant, es necessiten noves eines per tal de comprendre millor l'evolució dinàmica de les fases d'aquesta mena de superconductors.

Ara, en un estudi internacional, els investigadors de l'ICFO Utso Bhattacharya, Ugaitz Elu, Tobias Grass, Piotr T. Grochowski, Themistoklis Sidiropoulos, Tobias Steinle i Igor *Tyulnev, dirigits pels professors de ICREA Jens Biegert i Maciej Lewenstein, en col·laboració amb els investigadors de l'ICMAB-CSIC, Jordi Alcalà i Anna Palau, i Marcelo Ciappina, del Guangdong Technion-Israel Institute of Technology, proposen una nova metodologia basada en l'ús de l'espectroscòpia d'alts harmònics (HHS per les seves sigles en anglès) per a investigar les transicions entre les diferents fases del YBCO, un material ceràmic format per òxids de coure, iode i bari i que és un conegut superconductor d'alta temperatura. És la primera vegada que s'utilitza una metodologia de diagnòstic i detecció no lineal i no pertorbadora per a comprendre el comportament de materials fortament correlacionats.

Veient els resultats experimentals obtinguts, els investigadors han anat més enllà i presenten en el treball publicat ara un nou model teòric per tal d'identificar la connexió entre els espectres òptics mesurats i les transicions entre els diferents estats quàntics del YBCO: metall estrany, "pseudogap" i superconductor.

L'estudi s'ha publicat recentment a la revista PNAS.

Els investigadors van utilitzar en el seu experiment pel·lícules molt fines (d'uns 100 nm de gruix) de YBCO col·locat sobre un micro refrigerador. Primer, van caracteritzar les propietats superconductores de les pel·lícules de YBCO per a confirmar la qualitat de les mostres. A continuació, mitjançant polsos ultracurts de làser infraroig, els autors de l'estudi van induir la generació d'alts harmònics en les mostres del material, col·locades dins d'una cambra de buit i refredades a una temperatura de 77K.

Els alts harmònics són els fotons d'alta energia emesos pels electrons d'un sistema quan aquest es col·loca en un camp làser intens. Aquests fotons emesos tenen una freqüència molt superior a la del camp làser conductor.

Els investigadors van registrar la radiació reflectida amb un espectrògraf per a poder estudiar l'espectre harmònic, que és on es poden distingir "les petjades" d'aquesta resposta òptica no lineal. D'aquesta manera van veure que l'espectre està relacionat amb les transicions de fase.

En veure aquests resultats experimentals en el laboratori i tenint en compte que no disposaven d'una teoria que pogués explicar allò que s'observava en la pràctica, els investigadors van desenvolupar un nou model aproximat de Hubbard de camp fort per tal de comprendre la relació existent entre els alts harmònics mesurats i la formació de l'anomenat "parell de Cooper", és a dir, els electrons acoblats responsables de la fase superconductora del material.

Els espectres d'alts harmònics calculats amb el nou model teòric van coincidir amb les dades experimentals registrades al laboratori. "El model reproduceix fidelment la forma funcional de les dades mesurades en tot el rang de temperatures i per a diversos ordres de magnitud d'amplitud harmònica", escriuen els autors en l'article. Aquest nou enfocament, segons assenyalen, ha permès



establir una connexió teòrica entre les mesures obtingudes i la dinàmica microscòpica subjacent, proporcionant una "nova i potent metodologia per a estudiar les transicions de fase quàntiques" en materials fortament correlacionats.

Finalment, l'equip destaca que el seu treball proporciona un "primer exemple notable" sobre com l'espectroscòpia d'alts harmònics pot utilitzar-se per a distingir les diferents fases correlacionades de la matèria. També consideren que la recerca marca el camí cap a una "comprensió refinada dels processos físics que ocorren dins dels superconductors d'alta temperatura".

ICFO Comunicació

[Article original](#)

High harmonic spectroscopy of quantum phase transitions in a high-T_c superconductor

Alcalà, J. Bhattacharya, U. Biegert, J., Ciappina, M., Elu, U., Grass, T., Grochowski, P.T., Lewenstein, M., Palau, A., Sidiropoulos, T.P.H., Steinle, T., Tyulnev, I.

PNAS 119 (40) e2207766119, 2022

[DOI: 10.1073/pnas.220776611](https://doi.org/10.1073/pnas.2207766119)