



## Rastrejant transicions de fase topologica amb techniques d'absorció de raigs X

Un equip internacional d'investigadors presenta a **Reports on Progress in Physics Original Research** un experiment numeric que demostra la possibilitat de capturar transicions de fase topologic a través d'un esquema de espectroscopia d'absorció de raigs X. E superar limitacions anteriors en la resolució d'energia, el mètode permetrà avançar les investigacions en sistemes rellevants per aplicacions en optoelectrònica.

October 28, 2024

Els àtoms dels sòlids, líquids i gasos exhibeixen disposicions i comportaments molt diferents. En els sòlids, els àtoms estan empaquetats de manera compacta en un patró regular; en els líquids, els àtoms estan a prop els uns dels altres, però disposats de manera aleatòria i amb certa llibertat de moviment; i en els gasos, els àtoms estan més separats i poden moure's lliurement. Aquestes característiques defineixen les fases convencionals de la matèria.

Quan un s'endinsa en el món quàntic, emergeixen altres fases de la matèria que no tenen res a veure amb la distribució o mobilitat atòmica. Aquestes són les **fases topològiques**. En aquest àmbit, algunes propietats de les partícules dins d'un material (com àtoms o electrons) poden estar connectades a través d'un fenomen conegut com entrellacament de llarg abast. Quan un parell de partícules està entrellacat, en canviar o mesurar-ne una, l'altra es veu afectada de manera immediata, independentment de la distància entre elles. Aquestes partícules poden estar entrellacades en un patró complex, que s'esten per tot el sistema. Diferents patrons d'entrellacament dels electrons del material o altres partícules quàntiques defineixen diferents fases topològiques. Així, en alterar la manera en que les partícules estan entrellacades, en lloc de la seva disposició espacial, es produeix una transició de fase. Els estats topològics de la matèria ofereixen la possibilitat de crear materials exòtics, que poden ser, per exemple, aïllants en el seu interior però amb estats conductors a la superfície. En els darrers anys, s'ha produït un gran progrés en el desenvolupament d'aquests materials moderns. A tall d'exemple, alguns aïllants topològicament no trivials es van poder induir mitjançant l'ús de lasers ultracurts i intensos. Tanmateix, aquests aïllants topològics induïts per la llum només existeixen mentre el pols del laser està actiu, és a dir, durant diversos femtosegons (10<sup>-15</sup> segons). Això imposa un requisit important a l'hora d'estudiar-los: caracteritzar-los, ja que cal una sonda ultraràpida en l'escala de femtosegons per poder capturar les fases topològiques ultraràpides.

Malgrat el progrés significatiu en aquesta direcció, encara queden alguns reptes per resoldre. Per exemple, l'espectroscòpia de fotoemissió amb resolució angular (ARPES) ha demostrat ser efectiva per investigar aquests sistemes topològics, però presenta un inconvenient: com més curta és la durada del pols de sondeig (i, en conseqüència, més proper es troba a capturar la naturalesa ultraràpida del material), menor és la resolució i l'energia fotoelectrònica.

Recentment, un equip liderat per la [Universitat Autònoma de Madrid](#), amb la col·laboració d'investigadors de [ICFO](#), el [Dr. Emilio Pisanty](#), el [Dr. Alexandre Dauphin](#) i el professor [ICREA Maciej Lewenstein](#); [l'Institut de Física de Metalls M. N. Mikheev de la branca dels Urals de l'Acadèmia de Ciències de Rússia](#); el [King's College London](#); la [Universitat de Salamanca](#); la [Max Planck POSTECH/KOREA Research Initiative](#) i el [Centre de Física de la Matèria Condensada \(IFIMAC\)](#), va presentar un esquema complementari a l'ARPES a Reports on Progress in Physics Original Research. En un experiment numèric recolzat per un model teòric, l'equip va demostrar que l'**espectroscòpia d'absorció de rajos X pot capturar directament les transicions de fase topològica**.

**El mètode utilitza polsos de sondeig ultracurts que no pateixen una reducció en la resolució de l'energia.** Aquest enfocament permet avançar en l'estudi de sistemes rellevants per a aplicacions en optoelectrònica, la investigació dels quals havia estat, fins ara, limitada per la compromesa relació entre la durada del pols i la resolució energètica.

### Les transicions de fase topologica deixen una empremta en l'absorció

Els investigadors van simular l'acció de dos polsos ultracurts, separats per un retard temporal, sobre una monocapa de nitrur de bor hexagonal (hBN). Un d'ells era un pols de rajos X polaritzat linealment i l'altre un pols infraroig intens polaritzat circularment. En canviar la [polarització](#) circular d'aquest últim d'esquerra a dreta, també canviava l'absorció de la mostra. Va ser aquesta dependència la que els va permetre inferir la fase topològica del material.

El nostre esquema ultraràpid era molt sensible a les transicions de fase topològica. Quan la fase topològica canviava, una senyal quedava impresa en l'espectre d'absorció, explica el professor ICREA Maciej Lewenstein. Per tant, aquest mètode podria utilitzar-se per estudiar fases topològiques i identificar transicions de fase topològica en alguns materials. Ara necessitem un disseny experimental per poder demostrar-ho en un escenari re

#### Referència:

Juan F P Mosquera et al 2024 Rep. Prog. Phys. **87** 11790

DOI: 10.1088/1361-6633/ad889

#### Agraïments:

J.F.P.M, G.C., M.M., and A.P. acknowledge Comunidad de Madrid through TALENTO grant refs. 2017-T1/IND-5432 and 2021-5A/IND-20959, and the Spanish Ministry of Science, Innovation and Universities & the State Research Agency through grants refs. PID2021-126560NB-I00 and CNS2022-135803 (MCIU/AEI/FEDER, UE), and the Marie Curie Programme for Units of Excellence in R&D (CEX2023-001316-M), and FASLGHT network (RED2022-134391-T), and computer resources and assistance provided by Centro de Computación Científica de la Universidad Autónoma de Madrid (FI-2021-1-0032), Institut de Biocomputación y Física de Sistemas Complejos de la Universidad de Zaragoza (FI-2020-3-0008), and Barcelona Supercomputing Center (FI-2020-1-0005, FI2021-2-023, FI-2021-3-0019). This publication is based upon work from COST Action NEXT, CA2148 supported by COST (European Cooperation in Science and Technology). M. Malakhov's work also carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme Quantum No. 122021000038-7). E.P. acknowledges Royal Society funding under URF/R1/211390, RF/RE/210255 and RF/RE/231081. CFO and ex-ICFO co-authors acknowledge Europea Research Council AdG NOQIA; CIN/AEI (PGC2018-0910.13039/501100011033, CEX2019-000910-S/10.13039/501100011033, Plan National FIDEUA PID2019-106901GB-I00, Plan National STAMEENA PID2022-139099B, I00, project funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR (PRTRC17.I1), FPI); QUANTERA MAQS PCI201-111828-2); QUANTERA DYNAMITE PCI2022-132919, QuantERA II Programme co-funded

by European Union's Horizon 2020 program under Grant Agreement No 101017733); Ministry for Digital Transformation and of Civil Service of the Spanish Government through the UANTUM 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 European Union. (HORIZON-CL4-2022-QUANTUM-02-SGA PASQuanS2.1, 101113690, EU Horizon 2020 FETOPEN OPTologic, Grant No 899794), EU Horizon Europe Program (This project has received funding from the European Union'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; European Union's Horizon 2020 program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 847648  $\frac{1}{2}$ La Caixa $\frac{1}{2}$  Junior Leaders fellowships, La Caixa $\frac{1}{2}$  Foundation (ID 100010434) CF/BQ/PR23/11980043. A.C. thanks to the Sistema Nacional de Investigacion (SNI) de Panama for financial support.