



Rastreando transiciones de fase topológica con técnicas de absorción de rayos X

Un equipo internacional de investigadores presenta en **Reports on Progress in Physics Original Research** un experimento numérico que demuestra la posibilidad de capturar transiciones de fase topológica a través de un esquema de espectroscopia de absorción de rayos X. Al superar limitaciones anteriores en la resolución de energía, el método permitirá avanzar la investigación en sistemas relevantes para aplicaciones e optoelectrónica.

October 28, 2024

Los átomos de los sólidos, líquidos y gases exhiben disposiciones y comportamientos muy diferentes. En los sólidos, los átomos están empaquetados de forma compacta en un patrón regular; en los líquidos, los átomos están cerca entre sí, pero dispuestos de forma aleatoria y con cierta libertad de movimiento; y en los gases, los átomos están más separados y pueden

moverse libremente. Estas características definen las fases convencionales de la materia. Cuando se entra en el mundo cuántico, surgen otras fases de la materia que nada tienen que ver con la distribución o movilidad atómica. Estas son las **fases topológicas**. En este ámbito, algunas propiedades de las partículas dentro de un material (como átomos o electrones) pueden estar conectadas a través de un fenómeno conocido como entrelazamiento de largo alcance. Cuando un par de partículas está entrelazado, al cambiar o medir una de ellas, la otra se ve afectada de inmediato, independientemente de la distancia entre ambas. Estas partículas pueden estar entrelazadas en un patrón complejo, que se extiende por todo el sistema. Diferentes 'patrones de entrelazamiento' de los electrones del material u otras partículas cuánticas definen diferentes fases topológicas. Así, al alterar la forma en que las partículas están entrelazadas, en lugar de su disposición espacial, se produce una transición de fase.

Los estados topológicos de la materia ofrecen la posibilidad de crear materiales exóticos, que pueden ser, por ejemplo, aislantes en el interior, pero con estados conductores en la superficie. En los últimos años, ha habido un enorme progreso en el desarrollo de estos materiales modernos. A modo de ejemplo, algunos aislantes topológicamente no triviales pudieron ser inducidos mediante el uso de láseres ultracortos e intensos. Sin embargo, estos aislantes topológicos inducidos por la luz solo existen mientras el pulso del láser está activo, es decir, durante varios femtosegundos (10⁻¹⁵ segundos). Esto impone un requisito

importante a la hora de estudiar y caracterizarlos, ya que hace falta una sonda ultrarrápida a la escala de femtosegundos para poder capturar las fases topológicas ultrarrápidas

A pesar del progreso significativo en esta dirección, aun quedan algunos desafíos por resolver. Por ejemplo, la espectroscopia de fotoemisión con resolución angular (ARPES) ha demostrado ser efectiva para investigar estos sistemas topológicos, pero presenta un inconveniente: cuanto más corta es la duración del pulso de sondeo (y, en consecuencia más cerca se está de capturar la naturaleza ultrarrápida del material), menor es la resolución de energía fotoelectrónica

Recientemente, un equipo liderado por la [Universidad Autónoma de Madrid](#), con la colaboración de investigadores del [ICFO](#), el [Dr. Emilio Pisanty](#), el [Dr. Alexandre Dauphin](#) y el [profesor ICREA Maciej Lewenstein](#); el [Instituto de Física de Metales M. N. Mikheev de la Rama Ural de la Academia de Ciencias de Rusia](#); el [King's College London](#); la [Universidad de Salamanca](#); la [Max Planck POSTECH/KOREA Research Initiative](#) y el [Centro de Física de la Materia Condensada \(IFIMAC\)](#), presentó un esquema complementario a la ARPES en Reports on Progress in Physics Original Research. En un experimento numérico respaldado por un modelo teórico, el equipo demostró que **la espectroscopia de absorción de rayos X puede capturar directamente las transiciones de fase topológica.**

El método emplea pulsos de sondeo ultracortos que no sufren de una reducción en la resolución de energía. Este enfoque permite avanzar en el estudio de sistemas relevantes para aplicaciones en optoelectrónica, cuya investigación había estado, hasta ahora, frenada

por la comprometida relación entre la duración del pulso y la resolución energética.

Las transiciones de fase topológica dejan una huella en la absorción

Los investigadores simularon la acción de dos pulsos ultracortos, separados por un retardo temporal, sobre una monocapa de nitruro de boro hexagonal (hBN). Uno de ellos era un pulso de rayos X polarizado linealmente y el otro un pulso infrarrojo intenso polarizado circularmente. Al cambiar la [polarización](#) circular de este último de izquierda a derecha, también cambiaba la absorción de la muestra. Fue esta dependencia lo que les permitió inferir la fase topológica del material.

¿Nuestro esquema ultrarrápido era muy sensible a las transiciones de fase topológica. Cuando la fase topológica cambiaba, una señal quedaba impresa en el espectro de absorción. ¿, explica el profesor ICREA Maciej Lewenstein. ¿Por lo tanto, este método podría utilizarse para estudiar fases topológicas e identificar transiciones de fase topológica en algunos materiales. Ahora necesitamos un diseño experimental para poder demostrarlo en un escenario real.

Referencia:

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

DOI: 10.1088/1361-6633/ad889

Agradecimientos:

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 ¿María e Maeztui¿ Programme for Units of Excellence in R&D (CEX2023-001316-M), and FASL GHT 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), Instituto 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\ERE\210255 and RF\ERE\231081. CFO and ex-ICFO co-authors acknowledge European 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 PID2022-139099

B, 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 QuantumGaudii project; European Union's Horizon 2020 program under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 847648 La Caixa Junior Leaders fellowships, La Caixa Foundation (ID 100010434) CF/BQ/PR23/11980043. A.C. thanks to the Sistema Nacional de Investigacion (SNI) de Panama for financial support.