



Revelant l'estructura quantica oculta del grafe bicapa girat mitjancant llum de terahertz

Investigadors de l'ICFO, en una col·laboració internacional, ha utilitzat llum de terahertz per explorar fenòmens exòtics dins de grafe bicapa girat en angle màgic. Aquest enfocament revela comportaments previament invisibles i proporciona informació directa sobre la geometria quantica de les funcions d'on electroniques, el marc fonamental subjacent a aquests fenòmens.

March 27, 2025

Han passat menys de deu anys des que els científics van col·locar dues capes de grafe l'un sobre l'altra, les van girar exactament $1,1^\circ$ i van observar l'aparició de fenòmens exòtics com la superconductivitat i fases topològiques de la matèria. L'aparició d'aquesta nova física ha atret l'atenció de la comunitat científica, i aviat el sistema en conjunt es va conèixer com a "grafe bicapa girat en angle màgic". Aquest angle màgic ha estat estudiat extensament des de llavors, la major part dels esforços

s centrant-se a entendre com les interaccions electroniques donen lloc a aquestes fases quantiques col·lectives exotiques. Tanmateix, s'ha predit que els electrons a nivell individual també poden exhibir comportaments quantics intrigants determinats per la geometria de seves funcions d'ona, es a dir, la seva geometria quantica. Ara bé, observar aquests comportaments segueix suposant un gran repte.

Recentment, un equip d'investigadors de l'ICFO, **Dr. Roshan Krishna Kumar**, **en Geng Li**, **en Riccardo Bertini**, **el Dr. Krystian Nowakowski**, **el Dr. Sebastian Castilla**, **el Dr. Hitesh Agarwal**, **Sergi Batlle Porro**, **Matteo Ceccanti**, **el Dr. Antoine Reserbat-Plantey**, **la Dra. Giulia Piccinini**, **el Dr. Julien Barrier**, **la Dra. Ekaterina Khestanova**, **el Dr. Petr Stepanov**, dirigits pel **Prof.**

ICREA Frank Koppens, ha aportat nous coneixements sobre la geometria quantica del grafe bicapa girat en angle magic. Utilitzant llum en el regim dels terahertz, han revelat comportaments quantics anormals dels electrons quan aquests experimenten certes transicions energetiques, generant corrent sense que s'hi apliqui cap camp electric.

D'aquesta manera, els investigadors han desvelat fenomens electronics que sovint romanen ocults en els experiments de transport quantic, el metode principal per caracteritzar aquest tipus de materials. A més, la tecnica proposada ha permetes entendre amb més profunditat la naturalesa quantica fonamental de les fases d'alta temperatura que poden sorgir en el grafe. L'estudi, publicat a *Nature Materials*, s'ha dut a terme en col·laboracio amb The University of Texas, Massachusetts Institute of Technology, Imdea Nanoscience, RWTH Aachen University Forschungszentrum Jülich, CNRS, National Institute for Materials Science (Namiki, Tsukuba), California Institute of Technology, Donostia International Physics Center, Nanyang Technological University, University of Notre Dame, National High Magnetic Field Laboratory (Tallahassee, Florida) i Florida State University.

Llum de terahertz per a revelar efectes d'interaccio

Segons els investigadors, experiments anteriors van analitzar el material fent servir llum de l'infraroig mitja. En canvi, **ells han utilitzat una font d'energia més baixa, en el regim dels terahertz, que ha estat essencial per a accedir a les propietats quantiques dels electrons.**

¿Els experiments amb terahertz encara requereixen coneixements i habilitats especialitzades? explica el Dr. Roshan Krishna Kumar, primer autor de l'article.

Simplement no hi ha tantes fonts ni components optics que siguin fàcils d'utilitzar per a aquest tipus d'estudi.

A més, treballar amb aquesta mena de llum i detectar-la es especialment difícil a causa de la desproporció entre els dispositius estàndard (que tenen dimensions de desenes de micres) i la longitud d'ona de la llum de terahertz (que es de centenars de micres). Aquests obstacles expliquen per què els intents previs s'havien centrat principalment en el regim de l'infraroig mitja. Per a nosaltres, ha estat un repte. Però finalment hem aconseguit registrar una resposta significativa fent servir un sistema criogenic, construït al nostre laboratori, acoblat a un laser de gas de terahertz. També hem tingut la sort que els nostres dispositius

enien una resposta intrinsecament alta en el regim dels terahertzsi $\frac{1}{2}$, afegeix el i

El paper de la geometria quantica

Despres d'una investigacio mes detallada, els científics van confirmar que aquests efectes sorgeixen a partir del caracter de l'estat quantic dels electrons, codificat en la seva funcio d'ona. En el grafe bicapa girat, la configuracio fisica (com l'angle de torsio entre capes) i l'alineacio amb certs substrats (per exemple, el nitrur de bor hexagonal) influeixen directament en la seva geometria quantica, es a dir, en la forma i estructura de la funcio d'ona dels electrons. Cada cop es compren millor que els canvis en la geometria quantica poden alterar profundament les propietats electroniques, en alguns casos conduint a la superconductivitat i les fases topologiques. No obstant això, com que aquesta informacio esta codificada tant en l'amplitud com en la fase de les funcions d'ona, rastrejar com evolucionen i com aquesta transformacio afecta el comportament del material es extremadament dificil.

Per mesurar aquestes propietats de la funcio d'ona, els investigadors van enviar llum de terahertz a la mostra de grafe girat. L'excitacio resultant va causar "salts quantics" en la posicio dels electrons, generant una fotocorrent. Aquest fenomen es especialment interessant perque la fotocorrent es genera dins del cristall, a diferencia de la majoria de respostes optoelectroniques conegudes, que ocorren en unions PN. Aquesta fotocorrent es va registrar mitjancant mesures de la polaritzacio, analitzant les respostes electroniques en direccions especificiques.

Curiosament, això va revelar un comportament complex, ja que la direccio de la fotocorrent canviava segons el nombre d'electrons presents a la xarxa del grafe girat, indicant que les interaccions electroniques remodelen la geometria quantica de les particules individuals en el sistema.

D'aquesta manera, els investigadors han aconseguit rastrejar els canvis en la geometria quantica, ja que aquests quedaven impresos directament en la fotocorrent detectada, cosa que les mesures tradicionals de transport quantic no havien pogut revelar. Cal destacar que la propietat mesurada no s'origina en la coneguda curvatura de Berry, sino en una quantitat diferent anomenada vectors de desplaçament. Així, **aquest estudi estableix els experiments de fotocorrent de terahertz com una nova tecnica per explorar la geometria quantica en materials quantics, especialment en sistemes de banda plana** (on l'energia dels estats electronics no depen del seu moment) **amb ressonancies intrinseques en el regim dels terahertz.**

A mes, s'han observat diversos fenomens que havien romas ocults en experiments anteriors, incloent-hi bretxes d'energia entre diferents estats electronics que normalment queden emmascarades en els experiments de transport quantic, i com les interaccions electroniques modifiquen els nivells d'energia.

"Hem fet els nostres experiments a temperatures relativament altes, per sobre aquelles on

normalment es manifesten els fenòmens més exòtics. Tot i així, la fotocorrent ha revelat diverses característiques noves", comparteix Riccardo Bertini, estudiant de doctorat i autor principal de l'article. I es pregunta: "Que passaria si poguessim arribar a temperatures encara més baixes? Probablement podríem descobrir comportaments encara més intrigants i desconeguts en el grafe bicapa girat en angle màgic. Seria fascinant veure altres investigadors aplicar aquesta tècnica a diferents materials quàntics, i potser revelar que la geometria quàntica juga un paper fonamental en altres fases exòtiques de la matèria". A més de l'interès fonamental, el treball, realitzat en el marc del projecte [PhotoTBG](#), amb el suport de FLAG-ERA, obre el camí cap a una nova generació de fotodetectors de terahertz amb sensibilitat a la polarització incorporada, capaces de descodificar l'estat de polarització de la llum incident.

Referència:

Krishna Kumar, R., Li, G., Bertini, R. et al. Terahertz photocurrent probe of quantum geometry and interactions in magic-angle twisted bilayer graphene. Nat. Mater. (2025).

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41563-025-02180-3>

Agraïments:

R. B acknowledges funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 847517. J.B. acknowledges support from the European Union's Horizon Europe program under grant agreement 101105218. E. K acknowledges Marie-Sklodowska-Curie Fellowship, Project SUPERTERA, Ref. 101033521. P.A.P, Z.Z and F.G acknowledges support from the "Severo Ochoa" Programme for Centres of Excellence in R&D (Grant No. SEV-2016-0686). Z.Z. acknowledges support funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 101034431 and from the "Severo Ochoa" Programme for Centres of Excellence in R&D (CEX2020-001039-S / AEI / 10.13039/501100011033). P.A.P and F.G. acknowledge funding from the European Commission, within the Graphene Flagship, Core 3, grant number 881603 and from grants NMat2D (Comunidad de Madrid, Spain), SprQuMat and (MAD2D-CM)-MRR MATERIALES AVANZADOS-IMDEA-NC. S.B.P acknowledges the support of the Presencia de la Agencia Estatal de Investigación within the Convocatoria de tramitación anticipada, correspondiente al año 2020, de las ayudas para contratos predoctorales (Ref. PRE2020-094404) para la formación de doctores contemplada en el Subprograma Estatal de Formación del Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica de Innovación 2017-2020, cofinanciado por el Fondo Social Europeo. E.I. and C.S acknowledge funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agree

ent No. 881603 (Graphene Flagship) and from the European Research Council (ERC) under grant agreement No. 820254, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany's Excellence Strategy - Cluster of Excellence Matter and Light for Quantum Computing (ML4Q) EXC 2004/1 - 390534769. H.A. acknowledges funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 665884. K.W. and T.T. acknowledge support from the JSPS KAKENHI (Grant Numbers 20H00354 and 23H02052) and World Premier International Research Center Initiative (WPI), MEXT, Japan. J. S acknowledges the Singapore Ministry of Education Tier 2 grant MOE-T2EP50222-0011. G.R. expresses gratitude for the support by the Simons Foundation, and the ARO MURI Grant No. W911NF-16-1-0361 and the Institute of Quantum Information and Matter. C.L. was supported by start-up funds from Florida State University and the National High Magnetic Field Laboratory. The National High Magnetic Field Laboratory is supported by the National Science Foundation through NSF/DMR-212556 and the State of Florida. PJH acknowledges support by the National Science Foundation (DMR-1809802), the STC Center for Integrated Quantum Materials (NSF Grant No. DMR1231319), the Gordon and Betty Moore Foundation's EPiQS Initiative through Grant GBMF9463, the Ramon Areces Foundation, and the ICFO Distinguished Visiting Professor program. This material is based upon work supported by the Air Force Office of Scientific Research under award number FA8655-23-17047. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the United States Air Force. C. S. acknowledges the support by the FLAG-ERA grant PhotoTBG, by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG German Research Foundation) - 471733165. R. K K and F. H. K acknowledges funding by M IN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by the European Union Next Generation EU/PRTR" PCI2021-122020-2A within the FLAG-ERA grant [PhotoTBG], by ICFO, RWTH Aachen.