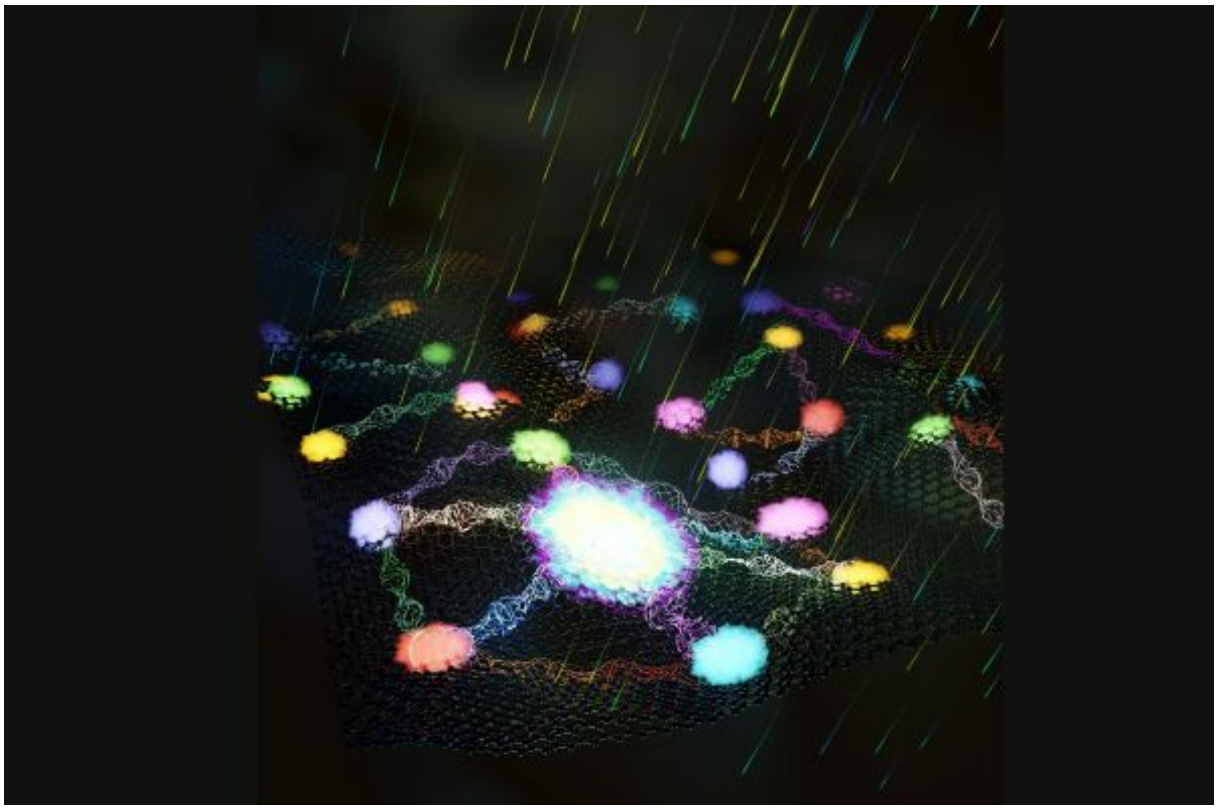


Revelant l?estructura quantica oculta del grafe bicapa girat mitjancant llum de terahertzs

Investigadors de l'ICFO, en una col·laboracio internacional, ha utilitzat llum de terahertzs per explorar fenomens exotics dins de grafe bicapa girat en angle magic. Aquest enfocament revel comportaments previament invisibles i proporciona informaci directa sobre la geometria quantica de les funcions d'on electroniques, el marc fonamental subjacent a aquests fenomens.

March 27, 2025

Han passat menys de deu anys des que els cientifics van col·locar dues capes de grafe l'un sobre l'altra, les van girar exactament 1,1° i van observar l'aparicio de fenomens exotics c m la superconductivitat i fases topologiques de la materia. L'aparicio d'aquesta nova fisica a atreure l'atencio de la comunitat cientifica, i aviat el sistema en conjunt es va coneixer com a "grafe bicapa girat en angle magic
. Aquest angle magic ha estat estudiat extensament des de llavors, la major part dels esforc

s centrant-se a entendre com les interaccions electroniques donen lloc a aquestes fas
s quantiques col·lectives exotiques. Tanmateix, s'ha predit que els electrons a nivell individ
al tambe poden exhibir comportaments quantics intrigants determinats per la geometria de
es seves funcions d'ona, es a dir, la seva geometria quantica. Ara be, observar aque
ts comportaments segueix suposant un gran rep
e. Recentment, un equip d'investigadors de l'ICFO, el **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 terahertzs, han revelat comportaments quantics anomals 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 mes, la tecnica proposada ha permes entendre amb mes 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 o
 Texas, Massachussets Institue 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, Nanya
g Technological University, University of Notre Dame, National High Magnetic Field Laborato
y (Tallahassee, Florida) i Florida State Universit

Llum de terahertzs 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 mes baixa, en el regim dels terahertzs, que ha estat essencial per a accedir a les propietats quantiques dels electrons**.

i¿½Els experiments amb terahertzs encara requereixen coneixements i habilita
s especialitzadesi¿½, explica el Dr. Roshan Krishna Kumar, primer autor de l'arti
le. i¿½Simplement no hi ha tantes fonts ni components optics que siguin facils d'utilitzar per a aquest tipus d'estud
si¿½. A mes, treballar amb aquesta mena de llum i detectar-la es especialment dificil a cau
a de la desproporcio entre els dispositius estandard (que tenen dimensions de desenes de m
cres) i la longitud d'ona de la llum de terahertzs (que es de centenars de micres). Aquests o
stacles expliquen per que els intents previs s'havien centrat principalment en el regim de l'i
fraroig mitja. i¿½Per a nosaltres, ha estat un repte. Pero finalment hem aconseguit reg
strar una resposta significativa fent servir un sistema criogenic, construit al nostre laboratori, acoblat a un laser de gas de terahertzs. Tambe hem tingut la sort que els nostres dispositius

enien una resposta intrinsecament alta en el regim dels terahertzsi¿½, afegeix el i

El paper de la geometria quantica

Despres d'una investigacio mes detallada, els cientifics 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 aixo, 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 terahertzs 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 especifiques.

Curiosament, aixo 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 desplacament. Aixi, **aquest estudi estableix els experiments de fotocorrent de terahertzs 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 terahertzs.**

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 fenomens mes exotics. Tot i aixi, la fotocorrent ha revelat diverses caracteristiques noves", comparteix Riccardo Bertini, estudiant de doctorat i autor principal de l'article. I es pregunta: "Que passaria si poguessim arribar a temperatures encara mes baixes? Probablement podriem descobrir comportaments encara mes intrigants i desconeguts en el grafe bicapa girat en angle magic. Seria fascinant veure altres investigadors aplicar aquesta tecnica a diferents materials quantics, i potser revelar que la geometria quantica juga un paper fonamental en altres fases exotiques de la materia".
A mes de l'interes fonamental, el treball, realitzat en el marc del projecte PhotoTBG, amb el suport the FLAG-ERA, obre el cami cap a una nova generacio de fotodetectors de terahertzs amb sensibilitat a la polaritzacio incorporada, capacos de descodificar l'estat de polaritzacio de la llum incident.

Referencia:
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

Agraiments:
R. B acknowledges funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Sk?odowska-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 Sk?odowska-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 i¿½Presenc a de la Agencia Estatal de Investigacioni¿½ within the i¿½Convocatoria de trami acion anticipada, correspondente al ano 2020, de las ayudas para contractos predoctorales (Ref. PRE2020-094404) para la formacion de doctores contemplada en el Subprograma Esta al de Fromacion del Programa Estatal de Promocion del Talento y su Empleabilidad en I+D+i, en el marco del Plan Estatal de Investigacon Cientifica y Tecnica de Innovacion 2017 2020, cofinanciado por el Fondo Social Europeoi¿½. E.I. and C.S acknowledge funding rom 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) und
r grant agreement No. 820254, the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German
esearch Foundation) under Germany's Excellence Strategy - Cluster of Excellence Matter and L
ght for Quantum Computing (ML4Q) EXC 2004/1 - 390534769. H.A. acknowledge funding
rom the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme und
r Marie Sk?odowska-Curie grant agreement no. 665884. K.W. and T.T. acknowledge support
rom the JSPS KAKENHI (Grant Numbers 20H00354 and 23H02052) and World Premier Inter
ational Research Center Initiative (WPI), MEXT, Japan. J. S acknowledges the Singapore Min
stry of Education Tier 2 grant MOE-T2EP50222-0011. G.R. expresses gratitude for the suppor
by the Simons Foundation, and the ARO MURI Grant No. W911NF-16-1-0361 and the Inst
tute of Quantum Information and Matter. C.L. was supported by start-up funds from Flori
a State University and the National High Magnetic Field Laboratory. The National High Magnet
c Field Laboratory is supported by the National Science Foundation through NSF/DMR-212
556 and the State of Florida. PJH acknowledges support by the National Science Fo
ndation (DMR-1809802), the STC Center for Integrated Quantum Materials (NSF G
ant No. DMR1231319), the Gordon and Betty Moore Foundation's EPiQS Initiative throu
h Grant GBMF9463, the Ramon Areces Foundation, and the ICFO Distinguished Visiting P
ofessor program. This material is based upon work supported by the Air Force Office of Sc
entific Research under award number FA8655-23-17047. Any opinions findings, and conclu
ions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not nec
ssarily reflect the views of the United States Air Force. C. S. acknowledges the supporte
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 i¿½European Union Next Generati
nEU/PRTR" PCI2021-122020-2A within the FLAG-ERA grant [PhotoTBG], by ICFO, RWTH Aachen.