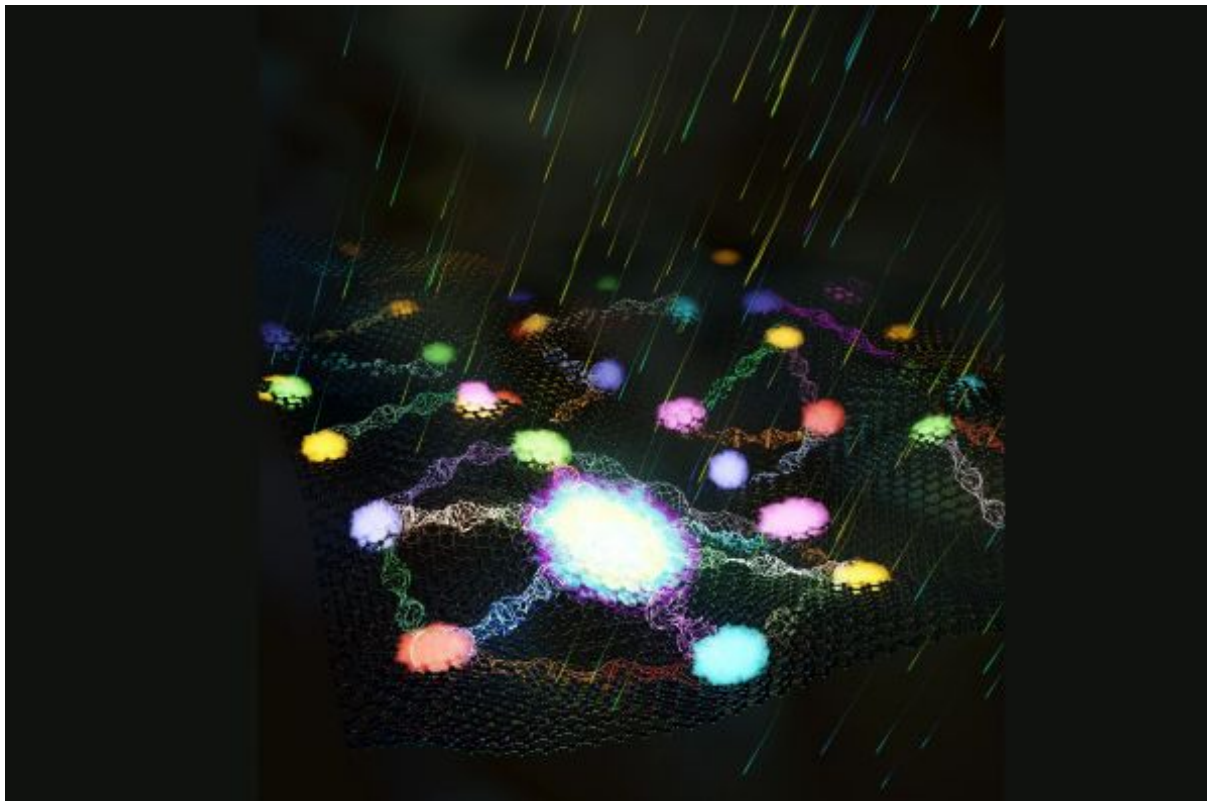




Revelando la estructura cuantica oculta del grafeno bicapa rotado con luz de terahercios

Investigadores del ICFO, en una colaboracion internacional, han utilizado luz de terahercios para explorar fenomenos exoticos dentro del grafeno bicapa rotado en angulo magico. Este enfoque revela comportamientos previamente invisibles y proporciona informacion directa sobre la geometria cuantica de las funciones de onda electronicas, el marco fundamental subyacente a estos fenomenos.

March 27, 2025

Han pasado menos de diez anos desde que los cientificos colocaron dos capas de grafeno una sobre otra, las giraron exactamente 1.1° y observaron la aparicion de fenomenos exotico como superconductividad y fases topologicas de la materia. El desbloqueo de esta nueva fisica atrajo la atencion de la comunidad cientifica, y pronto el sistema en conjunto se conocio como "grafeno bicapa rotado en angulo magico"

Este angulo magico ha sido estudiado extensamente desde entonces, la mayoría de los esfuerzos centrandose en comprender como las interacciones electronicas conducen a estas exóticas fases cuanticas colectivas. Sin embargo, se ha predicho que los electrones a nivel individual tambien exhiben comportamientos cuanticos intrigantes determinados por la geometria de sus funciones de onda, es decir, su geometria cuantica. Con todo, la observacion de estos comportamientos sigue siendo un gran reto

Ahora, un equipo de investigadores del ICFO, **eDr. Roshan Krishna Kumar, Geng Li, 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**, dirigidos por el **Prof. ICREA Frank Koppens**, ha aportado nuevos conocimientos sobre la geometria cuantica del grafeno bicapa rotado en angulo magico. Usando luz en el regimen de los terahercios, revelaron comportamientos cuanticos anómalos de los electrones cuando estos experimentan ciertas transiciones energeticas, generando corriente sin que se aplique un campo electrico. De esta manera, los investigadores desvelaron fenomenos electronicos que a menudo permanecen ocultos en los experimentos de transporte cuantico, el metodo principal para caracterizar este tipo de materiales. Además, la tecnica propuesta permitio entender con mayor profundidad la naturaleza cuantica fundamental de las fases de alta temperatura que pueden surgir en el grafeno. El estudio, publicado en *Nature Materials*, se llevo a cabo en colaboracion con 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) y Florida State University

Luz de terahercios para revelar efectos de interaccion

Segun los investigadores, experimentos previos analizaron el material usando luz del rango medio del infrarrojo. En cambio, **ellos utilizaron una fuente de menor energia, en el regimen de terahercios, lo que fue esencial para acceder a las propiedades cuanticas de los electrones**. "Los experimentos con terahercios todavia requieren conocimientos y habilidades especializadas", explica el Dr. Roshan Krishna Kumar, primer autor del articulo. "Simplemente no hay tantas fuentes ni componentes opticos que sean faciles de usar para este tipo de estudios".

Además, trabajar y detectar este tipo de luz es particularmente dificil debido a la desproporcion entre los dispositivos estandar (que tienen dimensiones de decenas de micrometros) y la longitud de onda de la luz de terahercios (que es de cientos de micrometros). Estos obstaculos explican por que los intentos anteriores se centraron principalmente en el rango medio del infrarrojo. "Para nosotros, fue un desafio. Pero finalmente logramos registrar una respuesta significativa utilizando un sistema criogenico,

construido en nuestro laboratorio, acoplado a un laser de gas de terahercios. Tambien tuvimos la suerte de que nuestros dispositivos tenian una respuesta intrinsecamente alta en el regimen de los terahercios", anade el investigador.

El papel de la geometria cuantica

Tras investigar mas a fondo las muestras, los investigadores confirmaron que estos efectos surgen a partir del caracter del estado cuantico de los electrones, codificado en su funcion de onda. En el grafeno bicapa rotado, la configuracion fisica (como el angulo de torsion entre las capas) y la alineacion con ciertos sustratos (por ejemplo, el nitruro de boro hexagonal) influyen directamente en su geometria cuantica, es decir, en la forma y estructura de la funcion de onda de los electrones. En concreto, se esta empezando a comprender que los cambios en la geometria cuantica pueden alterar profundamente las propiedades electronicas, en algunos casos impulsando la superconductividad y las fases topologicas. Sin embargo, dado que esta informacion esta codificada tanto en la amplitud como en la fase de las funciones de onda, rastrear como evolucionan y como esta transformacion afecta el comportamiento del material es extremadamente dificil.

Para medir estas propiedades de la funcion de onda, los investigadores enviaron luz de terahercios a la muestra de grafeno rotado. La excitacion resultante causo "saltos cuanticos" en la posicion de los electrones, generando una corriente fotonica. Este fenomeno es particularmente interesante porque la fotocorriente se genera en el interior del cristal, a diferencia de la mayoria de las respuestas optoelectronicas conocidas, que ocurren en uniones PN. Esta fotocorriente se registro mediante mediciones de la polarizacion, analizando las respuestas electronicas en direcciones especificas. Curiosamente, esto revelo un comportamiento complejo en el que la direccion de la fotocorriente cambiaba segun el numero de electrones presentes en la red del grafeno rotado, indicando que las interacciones electronicas remodelan la geometria cuantica de las particulas individuales en el sistema.

De esta manera, los investigadores lograron rastrear cambios en la geometria cuantica, ya que quedaron impresos directamente en la fotocorriente detectada, algo que las mediciones tradicionales de transporte cuantico no habian podido revelar. Cabe destacar que la propiedad medida no se origina en la conocida curvatura de Berry, sino en una cantidad distinta conocida como vectores de desplazamiento. Por todo ello, **este estudio establece los experimentos de fotocorriente de terahercios como una nueva tecnica para explorar la geometria cuantica en materiales cuanticos, especialmente en sistemas de banda plana (donde la energia de los estados electronicos no depende de su momento) con resonancias intrinsecas en el rango de terahercios.**

Ademas, observaron una variedad de fenomenos que habian permanecido ocultos en experimentos anteriores, incluyendo brechas de energia entre diferentes estados

electronicos que normalmente quedan enmascaradas en experimentos de transporte cuantico, y como las interacciones electronicas modifican los niveles de energia.

"Hicimos nuestros experimentos a temperaturas relativamente altas, por encima de aquellas en las que normalmente se manifiestan los fenomenos mas exóticos. Aun así, la fotocorriente revelo varias características nuevas", comenta Riccardo Bertini, estudiante de doctorado y autor principal del artículo. Y se pregunta: "¿Que pasaria si lográramos alcanzar temperatura aun mas bajas? Podríamos descubrir comportamientos aun mas intrigantes y desconocido en el grafeno bicapa rotado en angulo magico. Seria fascinante ver a otros investigadores aplicar esta tecnica a diferentes materiales cuanticos y quizas revelar que la geometri cuantica juega un papel fundamental en otras fases exóticas de la materia"

Ademas del interes fundamental, el trabajo, realizado en el marco del proyecto [PhotoTBG](#), con el apoyo de FLAG-ERA, allana el camino hacia una nueva generacion de fotodetectores de terahercios con sensibilidad de polarizacion incorporada, capaces de decodificar el estado de polarizacion de la luz incidente.

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>

Agradecimientos:

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 agreement 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. acknowledge 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 MINECO/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.