



El grafe bicapa girat en angle magic conte dues especies electroniques diferents

Un equip d'investigadors ha proporcionat evidencia directa de la coexistencia de dues 'especies' electroniques en el grafe bicapa girat en angle magic. La tecnica, basada en mesures termoelectriques, ofereix una nova visio de les fases fortament correlacionades d'aquesta plataforma de materia condensada.

June 04, 2025

A mitjans del segle XX es va teoritzar la idea d'una capa de grafit d'un sol atom de gruix. El terme [i \$\frac{1}{2}\$ grafe](#) va ser introduït alguns anys mes tard, el 1986, pels quimics Hanns-Peter Boehm, Ralph Setton i Eberhard Stumpp. Un cop es van aconseguir produir capes individuals de grafe, els científics van adonar-se de les seves propietats sorprenents: flexibles, lleugers pero forts, excel·lents conductors termics i electricos, i hostes d'una gran varietat de fenomenos fisics intrigans. Tanmateix, resulta que dues capes de grafe poden formar un sistema encara mes fascina

t. Això es va evidenciar al març de 2018, quan un equip internacional liderat per Pablo Jarillo-Herrero del MIT va informar sobre el descobriment de [superconductivitat](#) després d'apilar dues capes de grafe amb un angle de rotació d'aproximadament $1,1^\circ$. En aquest angle tan específic, conegut com a 'angle màgic', les propietats electròniques canvien de manera tan dràstica que sorgeixen fenòmens físics exòtics, com la superconductivitat descoberta. Malgrat els enormes i nombrosos esforços en la recerca sobre el grafe bicapa girat en angle màgic (MATBG, per les seves sigles en anglès), encara queden moltes preguntes obertes. Una d'elles està relacionada amb la seva estructura de bandes d'energia. Normalment, en un sòlid, els electrons poden moure's a través d'un rang de bandes d'energia, i la curvatura d'aquestes bandes determina com de ràpid poden desplaçar-se els electrons, és a dir, quin és la seva massa efectiva. Però en el MATBG, algunes de les bandes són gairebé planes. Com es comporten i quines són les conseqüències d'aquest comportament?

Ara, els investigadors de l'ICFO, **Dr. Rafael Luque Merino**, el **Dr. Jaime Diez-Merida** (actualment membre del grup [STM on 2D Quantum Materials](#) de l'ICFO), l'**Andrés Diez-Carlon**, el **Dr. Paul Seifert**, liderats per l'antic Professor de l'ICFO, el Dr. Dmitri K. Efetov, ara Professor a [Ludwig-Maximilians-Universität](#) i [Munich Center for Quantum Science and Technology](#) (MCQST), juntament amb altres centres de recerca, han proporcionat evidència experimental de la coexistència de dues 'especíes' electròniques en les bandes planes de MATBG. $\frac{1}{2}$ Això ja s'havia insinuat experimentalment abans, però encara en mancava evidència directa, que ara hem proporcionat per primera vegada $\frac{1}{2}$, comenta el Dr. Rafael Luque Merino, primer autor de l'article. Una de les especíes correspon a electrons itinerants, similars als electrons 'lliures' convencionals. Aquests electrons poden moure's a través del material, transportant càrrega i calor. A causa de la seva alta mobilitat i baixa massa efectiva, de vegades se'ls anomena 'portadors lleugers'. L'altra especíe es troba en orbitals altament localitzats, on els electrons presenten interaccions molt fortes entre si, la qual cosa provoca una reducció dràstica de la seva mobilitat. En conseqüència, aquests 'portadors pesants' no contribueixen significativament al transport de càrrega i

Els investigadors van registrar una resposta termoelectrònica poc convencional

La interacció entre portadors pesants i lleugers, que tenen propietats molt diferents, va donar lloc a una resposta termoelectrònica inusual. Per registrar-la, els investigadors van utilitzar un feix laser enfocat per escalfar localment els electrons del MATBG. Ajustant adequadament el muntatge experimental, van aconseguir 'dirigir' el gradient de temperatura que segueixen els electrons calents. Com que els electrons transporten càrrega, això va generar de manera natural un voltatge, és a dir, un senyal termoelectrònic. $\frac{1}{2}$ Seria natural esperar que la resposta termoelectrònica global de tots els electrons es cancel·les en certs nivells d'ocupació de les bandes planes, $\frac{1}{2}$ va dir el Dr. Luque Merino. $\frac{1}{2}$ Però aquestes

no es el cas. Resulta que, en aquestes ocupacions específiques, els portadors pesant estan increïblement localitzats i no contribueixen al senyal termoelectric. Això es degut a la seva naturalesa localitzada i fortament interactu

El mètode proposat, basat en mesures termoelectriques, ha demostrat ser una eina potent per explorar l'asimetria en les propietats dels electrons en bandes planes. Com que la presència d'interaccions fortes entre electrons fa temps que es coneix com la causa subjacent de molts efectes físics correlacionats, **la tècnica també podria aplicar-se a moltes altres fases correlacionades que apareixen en [materials 2D](#) girats.**

A més, l'equip va observar que el sistema es comportava de manera diferent segons la temperatura. En particular, a temperatures baixes (criogèniques), els portadors lleugers dominaven la resposta. Però, sorprenentment, a temperatures més altes, els rols s'invertien. **«Hem descobert que aquests resultats poden explicar-se de manera natural dins aquest escenari de dues espècies electròniques, mitjançant el model anomenat Topological Heavy Fermion per al grafe bicapa girat,»** explica el Dr. Luque Merino. Segons aquest mètode, proposat per Andrei Bernevig i Zhi-Da Song, les termoelectricitats tant a baixa com a alta temperatura poden entendre's d'una manera força elegant. **«Després del nostre descobriment, crec que cada vegada més persones exploraran aquest marc de 'fermions pesants' per modelar les propietats del grafe girat. Amb sort, això ajudarà a aclarir com funcionen aquests materials tan intrigants.»**

Referència:

Merino, R.L., C?lug?ru, D., Hu, H. et al. Interplay between light and heavy electron bands in magic-angle twisted bilayer graphene. Nat. Phys. (2025).

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02912-x>

Agraïments:

D.C. acknowledges the hospitality of the Donostia International Physics Center, at which this work was carried out. B.A.B. was supported by DOE grant number DE-SC0016239. D.C. was supported by the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement number 101020833) and by Simons Investigator grant number 404513, the Gordon and Betty Moore Foundation through grant number GBMF8685 towards the Princeton theory programme, the Gordon and Betty Moore Foundation's EPIQS Initiative (grant number GBMF11070), the Office of Naval Research (ONR grant number N00014-20-1-2303), the Global Collaborative Network Grant at Princeton University, BSF Israel US foundation number 2018226 and NSF-MERSEC (grant number MERSEC DMR 2011750). D.C. also gratefully acknowledges the support provided by the Leverhulme Trust. H.H. was supported by the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement

number 101020833) and the Schmidt Fund Grant. P.S. acknowledges support from the Alexander von-Humboldt Foundation and the German Federal Ministry for Education and Research through the Feodor-Lynen programme. J.D.-M. acknowledges support from the INPhINIT 'la Caixa' Foundation (ID 100010434) fellowship programme (grant number LCF/BQ/DI19/11730021). D.K.E. acknowledges funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement number 852927) and the German Research Foundation (DFG) under the priority programme SPP2244 (project number 535146365). K.W. and T.T. acknowledge support from the Elemental Strategy Initiative conducted by the MEXT, Japan (grant number JPMXP0112101001), and JSPS KAKENHI (grant numbers 19H05790, 20H00354 and 21H05233).