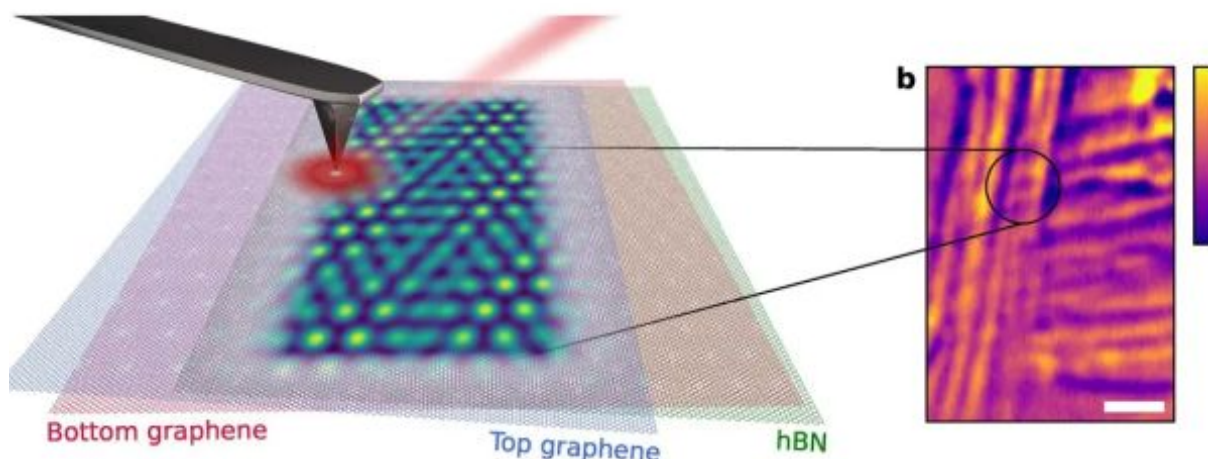




Primera observación espacial completa de una superred de segundo orden en una bicapa rotada de grafeno

Un equipo liderado por ICFO logra mapear, por primera vez, la distribución espacial completa de una superred de segundo orden dentro de un dispositivo de bicapa rotada de grafeno, ofreciendo una comprensión fundamental más profunda y revelando características previamente ocultas de este tipo de estructuras. Estas estructuras son muy sensibles a la tensión y al ángulo de giro entre las capas, por lo que podrían usarse a modo de *¿1/2 lupai* para detectar desviaciones en estos parámetros al diseñar dispositivos de grafeno bicapa.

October 02, 2024

En marzo de 2018, un equipo internacional dirigido por Pablo Jarillo-Herrero del MIT informó sobre el descubrimiento de [superconductividad](#) cuando dos láminas de [grafeno](#) (una capa

bidimensional, es decir, de un átomo de grosor, de grafito) se apilaban una sobre otra con un ángulo de giro de 1.1° . La pequeña rotación entre las capas induce un patrón de interferencia (conocido como patrón moiré) con una periodicidad que depende del ángulo de giro. Para este ángulo mágico específico de 1.1° , las propiedades electrónicas cambian de una manera tan dramática que aparecen fenómenos exóticos como la superconductividad descubierta. Después de eso, científicos de materiales de todo el mundo comenzaron a apilar y girar [materiales bidimensionales](#), con la esperanza de que surgieran efectos interesantes, como interacciones correlacionadas y superconductividad. Como se esperaba, rotaciones ligeras dieron sistemáticamente lugar a fenómenos físicos exóticos, alterando drásticamente las propiedades electrónicas de las monocapas por sí solas.

Hoy en día, los dispositivos de bicapa rotada ya son una práctica bastante "estándar", y la comunidad ha comenzado a aumentar el número de capas rotadas. Esto puede provocar un efecto de interferencia entre las redes moiré correspondientes a diferentes pares de bicapas rotadas. Como resultado, tal "superred moiré de dos redes moiré" puede tener periodicidades de cientos de nanómetros, excediendo las de las redes moiré subyacentes. Debido a este aumento tan considerable en la periodicidad, la llamada superred de segundo orden (SOSL, por sus siglas en inglés) puede observarse espacialmente con técnicas ópticas. Aunque algunas técnicas (como la STM) han proporcionado información sobre los mecanismos que ocurren dentro de este tipo de estructuras, estas solo pueden abordar una pequeña subsección del dispositivo, ofreciendo información limitada. En cambio, una visualización directa y completa de la distribución espacial de las SOSLs a lo largo de un dispositivo proporcionaría un conocimiento fundamental más profundo y potencialmente revelaría características que todavía no han sido descubiertas.

La observación de la distribución espacial de toda una SOSL aún estaba pendiente hasta que, recientemente, se publicó un artículo en Nature Materials. [Investigadores del ICFO](#), el Dr. **Niels C. H. Hesp**, **Sergi Batlle-Porro**, el Dr. **Roshan Krishna Kumar**, el Dr. **Hitesh Agarwal**, el Dr. **David Barcons Ruiz**, el Dr. **Hanan Herzig Sheinfux**, el Dr. **Petr Stepanov**, liderados por el Prof. **ICREA Frank H. L. Koppens**, en colaboración con [NIMS](#) y la [Universidad de Notre Dame](#), informaron sobre un nuevo tipo de experimento que, por primera vez, mapea la SOSL entera dentro de un dispositivo bicapa rotada de grafeno.

El equipo apiló dos capas de grafeno sobre una capa de nitruro de boro hexagonal (hBN). Luego realizaron mediciones criogénicas de fotovoltaje a escala nanométrica (en resumen, cryoSNOM) y mediciones de transporte electrónico. Las primeras combinan una alta resolución espacial con una sensibilidad extrema a las propiedades electrónicas locales, mientras que las segundas se utilizaron para verificar los ángulos de torsión entre las capas y confirmar la presencia de la física del ángulo mágico. Respaldado por simulaciones, el equipo finalmente desveló la **sensibilidad sin precedentes de las SOSLs a la tensión experimentada por el material y al ángulo de giro entre las capas**. Sin embargo, el viaje para

llegar hasta estos resultados estuvo repleto de sorpresas.

De problemas de medicion a indicios de una SOSL

Toda la historia comenzo cuando el equipo aplico nanoimagenes criogenicas y mediciones de transporte electronico a la muestra. El objetivo inicial era obtener indicios de fisica correlacionada y superconductividad, pero durante el proceso observaron algunos patrones inusuales que nadie habia visto antes. Su reaccion inmediata fue suponer que le sucedia algo al sistema de medicion.

¿El cryoSNOM estaba enfrentando muchos problemas, por lo que sospechamos que el cabezal (el punto de contacto del sistema de medicion con la muestra) estaba roto? No, explica el Dr. Niels Hesp, primer autor del articulo. Pero parecia ser que, al menos en ese momento concreto, el sistema de medicion funcionaba perfectamente. Entonces decidieron explorar mas a fondo estos patrones inesperados, los cuales presentaban una alta periodicidad (de unos 400 nanometros), en un intento de descubrir su naturaleza y origen. Al final, los investigadores se dieron cuenta de que estas periodicidades de largo alcance eran un claro indicio de SOSLs. ¿Eso tambien fue muy extraordinario, debido a que es muy improbable tener un dispositivo preparado en este estado? Sí, recuerda Hesp, ya que es muy dificil obtener los angulos de giro exactamente correctos. El equipo no tenia esa intencion en un principio, pero aprovecharon la oportunidad. Así, cambiaron de rumbo y se enfocaron en el siguiente paso: realizar las mediciones adecuadas en la muestra para caracterizarla completamente. Sabian que era un desafio, y que con el minimo voltaje el dispositivo podria quemarse. Debian ser extremadamente cuidadosos. ¿En algun momento, el cryoSNOM inesperadamente comenzo a calentarse, lo que rompio parcialmente la muestra. Pude arreglarlo a tiempo, evitando danos irreparables. Afortunadamente, el dispositivo solo tenia un pequeno agujero en el medio, dejando la superred de segundo orden sorprendentemente intacta? Sí, comparte el Dr. Petr Stepanov. Otra sorpresa llego justo despues de eso, cuando los investigadores notaron en las simulaciones que **la superred de segundo orden se manifiesta cuando la alineacion entre las capas de grafeno coincide exactamente con el 'angulo magico' de la bicapa rotada de grafeno**. Sin embargo, Hesp senala la inexistencia de una relacion fundamental entre ambos fenomenos: **No vemos ninguna causalidad entre el angulo de torsion donde ocurre la fisica del angulo magico y donde ocurre una SOSL, y por lo tanto para nosotros es una coincidencia**. Sin embargo, esto significa que cuando el angulo de giro de la capa de hBN esta ajustado correctamente, **el dispositivo de bicapa rotada de grafeno no solo muestra fisica del angulo magico, sino que tambien alberga una SOSL, lo que hace que la fisica de las bicapas de grafeno rotadas con el angulo magico sea aun mas rica**. Hesp tambien sospecha que, aunque a primera vista la configuracion informada no modifica la fisica del angulo magico, si que afectara al modo en que algunos fenomenos exoticos (como el efecto Hall anomalo) se manifiestan dentro de estos sistemas.

Una "lupa" para ajustar con precision la tension y los angulos de torsion en la bicapa de grafeno

Las observaciones espaciales holísticas que el equipo realizó mostraron que pequeñas variaciones en la tensión y el ángulo de torsión provocaban cambios drásticos en la estructura de la superred de segundo orden. En este sentido, **el método presentado sirve como una lupa para detectar pequeñas desviaciones con respecto a la tensión y los ángulos de torsión deseados**. De este modo, **se podría usar para realizar controles de calidad en dispositivos de bicapas de grafeno rotadas con el ángulo mágico, evitando inexactitudes durante su proceso de fabricación.**

Hesp, quien comenzó este proyecto justo al final de su doctorado, está orgulloso de como resultó todo: ¿Si me preguntas cuál es la belleza de este trabajo, diría que no solo es a fascinante riqueza en superredes que uno puede crear, sino también el hecho de que revela un efecto significativo que está presente en gran parte de las bicapas rotadas de grafito pero que pasaba desapercibido cuando la gente las estudiaba?

Referencia:

Hesp, N.C.H., Batlle-Porro, S., Krishna Kumar, R. et al. Cryogenic nano-imaging of second-order moiré superlattices. Nat. Mater. (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41563-024-01993-y>

Acknowledgements:

F.H.L.K. acknowledges financial support from the Government of Catalonia through the SGR grant, and from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness through the Severo Ochoa Programme for Centres of Excellence in R&D (no. SEV-2015-0522) and Explora Ciencia (no. FIS2017-91599-EXP). F.H.L.K. also acknowledges support from the Fundació Cellex Barcelona, Generalitat de Catalunya, through the CERCA program and the Mineco grant Plan Nacional (no. FIS2016-81044-P) and the Agency for Management of University and Research Grants (AGAUR) (no. 2017-SGR-1656). Furthermore, the research leading to these results has received funding from the European Union's Horizon 2020 programme under grant agreement nos. 785219 (Graphene Flagship Core2), 881603 (Graphene Flagship Core3) and 820378 (Quantum Flagship). This work was supported by the ERC under grant agreement no. 726001 (TOPONANOP). P.S. acknowledges support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant no. 754510. N.C.H.H. acknowledges funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement no. 665884. K.W. and T.T. acknowledge support from JSPS KAKENHI (grant nos. 19H05790, 20H00354 and 21H05233). This project has received funding from the 'Presidencia de la Agencia Estatal de Investigación' within the PRE2020-094404 predoctoral fellowship.