



CONFERENCIAS

*GRAFENO DE ÁNGULO MÁGICO:
EL "TWIST AND SHOUT"
DE LOS MATERIALES CUÁNTICOS*

Por **PABLO JARILLO,
CECIL AND IDA GREEN**

Professor of Physics, Instituto de Tecnología
de Massachusetts (MIT)

Los estados de la materia cuántica más fascinantes, y menos entendidos, del Universo suelen emerger a partir del comportamiento colectivo de partículas elementales. En esta conferencia, organizada en colaboración con la Real Sociedad Española de Física, Pablo Jarillo-Herrero explica cómo las fuertes interacciones entre los electrones en el grafeno de ángulo mágico están llevando a un nuevo paradigma en la investigación de las fases más enigmáticas de los materiales cuánticos, como la superconductividad no convencional o los nuevos estados topológicos en la frontera de la Física.

DESDE hace bastante tiempo, la comunidad científica, y en particular los físicos, vienen investigando los estados de la materia donde las interacciones entre los constituyentes básicos son muy fuertes. Un ejemplo es el plasma de gluones y quarks. Una especie de sopa que apareció unos pocos nanosegundos después del Big Bang, en la que los quarks y los gluones, que son los responsables de una interacción de la materia que se llama la interacción fuerte, se mezclan en una interacción muy fuerte. Es algo que hoy día podemos recrear en las colisiones de iones pesados, en los aceleradores de partículas. Es un estado de la materia que aún hoy no entendemos demasiado, pero sobre el que hay mucha investigación porque es responsable, entre otras cosas, de lo que ocurrió inmediatamente después del Big Bang y de cómo se formaron todas las cosas que hay en el universo.

Otro ejemplo son las estrellas de neutrones, que son como una cebolla formada por distintas capas, cada una de las cuales representan diferentes fases de la materia. Los astrofísicos, que son muy creativos cuando dan nombre a las cosas, las llaman "nuclear pasta"; a partir de ahí hay una fase "bucatini", una fase "espagueti", la fase "lasaña", etcétera. En estas diferentes capas, los neutrones están interactuando de manera muy fuerte y dando lugar a distintos tipos de fases de la materia, dependiendo de cómo interactúan las distintas capas.

Otro estado de la materia son los denominados estados topológicos. Hay un estado que se llama el estado del efecto Hall cuántico fraccionario, donde los electrones interactúan muy fuerte entre ellos y, de repente, en presencia de un campo magnético, adquieren una carga que, en vez de ser la carga del electrón, es la carga del electrón dividido por tres. Esto no existe cuando tienes un electrón aislado, pero en esta fase de la materia se puede

dar. Este comportamiento colectivo de todos los electrones da lugar a un resultado en el que los electrones tienen su carga dividida por tres.

Adentrándonos un poco más en el terreno de la física de los materiales cuánticos, una gran parte de la comunidad está estudiando lo que se llaman materiales cuánticos correlacionados muy fuertemente, y el ejemplo más típico son los superconductores de alta temperatura. Hace más de 30 años que se descubrieron estos superconductores y sabemos que podrían tener aplicaciones tecnológicas increíbles y revolucionar la tecnología, pero, como no los entendemos, no sabemos muy bien qué hacer o cómo diseñar mejores superconductores.

En la mecánica cuántica, si nos centramos en la física de una sola partícula, donde no se tienen en cuenta las interacciones fuertes, podemos tener dos tipos de comportamientos en la materia: cualquier material o es un conductor (como el oro u otro metal) o es un aislante (por ejemplo, el diamante). Ahora, el oro y el diamante, además de servir para la fabricación de joyas, también son muy útiles en productos de alta tecnología. La mayoría de los circuitos de los teléfonos móviles o los ordenadores portátiles tienen cableado de oro; y, hoy en día, los diamantes se utilizan para el procesamiento de información cuántica.

Si uno empieza a considerar las interacciones entre los electrones y, particularmente, en el caso de que estas interacciones sean muy fuertes, podemos tener otro tipo de



comportamiento: los aislantes correlacionados. Un ejemplo serían los aislantes de Mott. Imaginemos que tenemos un material con una serie de átomos y en cada uno de estos átomos puede haber dos electrones, pero solo pongo uno. Teóricamente, este material sería un conductor, porque los electrones pueden saltar de un átomo a otro y conducir la electricidad. ¿Qué ocurre? Que hay materiales en los que esta ocupación doble de un átomo cuesta mucha energía. Los electrones se repelen y no quieren estar en el mismo átomo, por lo que quedan como encallados y no se pueden mover. Como no se puede mover ningún electrón, esto es un aislante; pero es un aislante de Mott porque los electrones interactúan muy fuertemente, se repelen muy fuertemente.

EL GRAFENO ES EL MATERIAL MÁS FUERTE QUE EXISTE, EL MÁS LIGERO Y EL MEJOR CONDUCTOR DE ELECTRICIDAD Y CALOR

Los aislantes de Mott son el compuesto originario en los superconductores cupratos de alta temperatura. En estos superconductores, hay unos planos de átomos de óxido de cobre, con un electrón en cada uno de estos átomos de cobre y, normalmente, están encallados y no se pueden mover. Es decir, tenemos un

aislante de Mott. Sin embargo, si quitas algunos de esos electrones del material, los electrones que quedan tienen átomos donde no hay electrones al lado, con lo cual pueden saltar de un átomo a otro.

El modelo que intenta describir cómo esos electrones pueden saltar de un átomo a otro cuando hay unos huecos se llama el modelo de Hubbard. John Hubbard era un físico teórico y propuso este modelo en el año 1963, antes de que se descubrieran estos superconductores. Pero este modelo teórico no se puede calcular de manera precisa. Aún hoy, después de más de 50 años, los físicos teóricos no entienden bien este modelo. Durante años, distintos grupos han intentado enfoques distintos para intentar entender la física de electrones altamente correlacionados y la física de materiales cuánticos. Uno de los enfoques más exitosos y que más impacto está teniendo es el que está realizando los físicos atómicos, físicos que estudian redes de átomos a temperaturas ultrabajas. Han conseguido llevar a cabo el modelo de Hubbard en una red óptica en la que pudieron cambiar entre un aislante de Mott, si tenían interacciones muy fuertes, o un superfluido, si tenían interacciones atractivas y donde las interacciones no eran repulsivas. Esto fue realizado con átomos que tenían un espín entero, o "bosones", por lo que se denominó el modelo de Bose-Hubbard. Unos años más tarde consiguieron hacer cosas parecidas con átomos fermiónicos que tienen espín semi-entero, y se empezó a observar antiferromagnetismo, que es una de las cosas que se está estudiando actualmente.

El estudio de materiales cuánticos o la física de materiales cuánticos se puede realizar de dos formas. Una, es utilizar los materiales en sí, como en las redes cristalinas de un superconductor de alta temperatura, donde los átomos están espaciados por distancias de unos pocos ángstroms. No obstante, esto es

tan complicado que aún no sabemos cómo entenderlo teóricamente. Otra manera de hacerlo es con simulaciones en redes ópticas. Aquí tenemos mucho más control y las distancias entre los átomos son del orden de una micra; y, aunque no podemos enfriar lo que sería necesario, es un enfoque alternativo del que estamos aprendiendo mucho.

El grafeno de ángulo mágico

Existe también una plataforma complementaria entre estas dos: el grafeno de ángulo mágico en el que ponemos dos capas de grafeno una encima de la otra, rotadas un poquito, y formamos una red donde la celda unidad es del orden de 10 nm. Asociadas a estas longitudes tenemos también escalas de energía o de temperatura. En los materiales cuánticos, la energía o la escala de temperatura dominante es del orden de 100 K o incluso 1000 K. En las redes de átomos ultrafríos, tenemos 0,1 nK. En el grafeno, la escala de temperatura es de entre 1 K y 10 K, una escala bastante cómoda a la hora de investigar en el laboratorio.



El grafeno es un material que proviene del grafito y es el primer material bidimensional que fue aislado. El grafeno es una sola lámina de grafito, por decirlo de una manera. Es el material más fino que existe, que ha existido y que existirá, porque nada puede tener menos de un átomo de grosor. Es algo muy inusual y que incluso parecía teóricamente imposible. Sin embargo, los físicos rusos André Geim y Konstantín Novoselov, lo intentaron. Lo hicieron de forma muy creativa y muy simple, con grafito y una cinta de celo con la que fueron separando capas de grafito. Después de separar muchas capas, pegaron esa última cinta en un sustrato de silicio y tiraron de ella. La mayoría del grafito se quedó en la cinta de celo. Pero en el chip de silicio, al microscopio, descubrieron el grafeno. Geim y Novoselov fueron galardonados con el Premio Nobel, en 2010, por el aislamiento del grafeno, por el estudio de sus propiedades, y por la revolución que supuso decir: los materiales bidimensionales existen; no son solamente un producto de la imaginación, existen. De hecho, ahora tenemos cientos de estos materiales bidimensionales.

El grafeno tiene muchísimas propiedades que lo hacen muy especial. Es el material más fuerte que existe, el más ligero y el mejor conductor de electricidad y calor. Sirve hasta para fabricar membranas para desalinizar el agua. Es un material muy distinto a todos los materiales que tenemos. Y, por lo tanto, aún hace falta mucha investigación básica para entender realmente sus propiedades y, quizás, poder aplicarlas en el futuro. Muchas veces me preguntan: "¿Por qué no tenemos ya acceso a todas las aplicaciones del grafeno?". Es que lleva mucho tiempo pasar de una investigación básica a aplicaciones comerciales. Todavía quedan 20 o 30 años para que el grafeno se utilice de verdad.

Los físicos estamos interesados en el gra-

feno no por sus aplicaciones, aunque eso está bien, sino por las propiedades que lo hacen muy distinto de otros materiales. Los electrones se propagan por el grafeno de manera muy distinta a como se propagan en otros materiales convencionales, como el cobre o el silicio. De hecho, los electrones se comportan en el grafeno muy parecido a como las partículas ultrarrelativísticas circulan por el CERN.

En el CERN, que es un acelerador de partículas, los electrones circulan a una velocidad muy cercana a la velocidad de la luz. Esto es algo que ocurre también con los fotones. Los electrones en grafeno se propagan de manera muy parecida. Da igual cuál sea la energía de los electrones en el grafeno, siempre van a la misma velocidad, denominada velocidad de Fermi, que es parecida a la velocidad de los electrones en el cobre, pero los electrones en el cobre, dependiendo de cuál sea su energía, van más despacio o más deprisa. En el grafeno, no; siempre van a la misma velocidad.

En el grafeno los electrones atraviesan los obstáculos, no "rebotan" como ocurre en otros materiales. Rebotar significa que no conducen la electricidad tan bien. Hasta el grafeno, no existía ningún otro material conocido que hiciera esto. Ahora, tenemos el grafeno. Sin embargo, nos dimos cuenta de que hay otros materiales tridimensionales y probablemente también podemos aislarlos en capas de un solo átomo de grosor. Así que ahora tenemos montones de materiales que podemos aislar en una sola capa. Y no solamente eso. Alguien pensó: "Bueno, si tenemos tantos materiales aislados en una sola capa, ¿por qué no los unimos y creamos nuevos materiales?".

Materiales nuevos

Uno de estos materiales nuevos es el nitruro de boro hexagonal. Es muy parecido al grafeno, solo que, en vez de átomos de

carbono, tenemos átomos de boro y nitrógeno. Es un aislante y es el aislante más fino que existe, un solo átomo de grosor. Otro material, por ejemplo, es el diseleniuro de tungsteno. Este tiene tres átomos de grosor, en cada celda unidad, pero desde arriba se parece al grafeno. Este material es un semiconductor, emite luz y la luz que emite depende de las capas que tenga. Si tiene una sola capa, emite luz de un color; si tiene dos capas, emite luz de otro color. De hecho, hace unos años en mi laboratorio creamos el LED más fino del mundo, de menos de un nanómetro de grosor. Lo hicimos con una sola capa de diseleniuro de tungsteno.

Resulta que este tipo de heteroestructuras, de materiales bidimensionales, tienen propiedades muy distintas a cada una de las capas que se utilizan. Tienes un nuevo material que no existía antes, con propiedades mecánicas, ópticas y electrónicas muy distintas a las de cualquier otro material.

Algunos científicos nos dimos cuenta de que el aspecto más único de los materiales bidimensionales no era que pudieran combinarse para la creación de materiales nuevos, hay otras cosas parecidas. Lo absolutamente único y sin precedentes en la historia de la física de los materiales era esto de rotar una capa con respecto a la otra, lo cual conduce a propiedades electrónicas, ópticas y mecánicas que pueden ser totalmente diferentes de las propiedades de cada una de las capas involucradas en este proceso.

El grafeno está formado por hexágonos de átomos de carbono que, desde el punto de vista químico, son todos idénticos. Ahora, desde el punto de vista cristalográfico hay dos tipos de átomos, el tipo A y el tipo B. Eso es porque para formar una red con hexágonos necesitas dos tipos de átomos y dos vectores para completar la celda unidad. Si se calcula cuál es la

TODAVÍA QUEDAN 20 Ó 30 AÑOS PARA QUE EL GRAFENO TENGA APLICACIONES COMERCIALES

energía de los electrones como función de la cantidad de movimiento o momento de los electrones, el resultado es una estructura electrónica de energías que se asemeja a un cono.

Si se coloca grafeno encima de grafeno y se gira, se forma una superestructura periódica llamado patrón de moiré, con una periodicidad espacial que depende del ángulo de giro. Cuando el ángulo de giro es mayor, esta distancia es más pequeña. Cuando el ángulo de giro es muy pequeño, esta distancia se hace muy grande, en el caso de que las estructuras sean idénticas, como es el caso de poner grafeno encima de grafeno.

Si ponemos una capa de grafeno en contacto con otra, los electrones saben muy bien que existe la otra hoja de grafeno; de hecho, pueden hacer efecto túnel, pueden saltar de una hoja a otra, que lleva a una modificación de la estructura de niveles de energía. Esto es lo que ocurre cuando tienes, por ejemplo, dos átomos de hidrógeno y los acercas para formar una molécula de hidrógeno: un *bonding-antibonding state*, un estado de energía que baja y otro estado de energía que sube. Estamos formando un *gap*, solo que ahora nuestra molécula no es una molécula de átomos de hidrógeno, es una molécula gigante de átomos de carbono, por decirlo de alguna manera.

Ahora, estos conos de Dirac, se han acercado y debido a que se han cruzado aquí, ha habido una repulsión hacia abajo. Si los acerco más, hay una repulsión mayor y esa repul-



sión te lleva a un nivel de energía a 0. Esquemáticamente, cuando esta repulsión es igual a la distancia de 0 a este punto, se forma lo que se llama una banda plana, un estado de 0 energía, y eso ocurre a un ángulo de rotación que se llama el ángulo mágico. La condición de banda plana o *flat band* se consigue en el ángulo mágico. Esto es algo que fue predicho teóricamente en los años 2010-2011, y este ángulo es 1,1 grados para dos capas de grafeno, una encima de la otra.

Para ir de espacio de momentos a espacio real, tengo que hacer una *transformada de Fourier*. Y, ¿dónde están los electrones ahora? Resulta que les gusta acumularse en ciertas zonas del patrón de moiré, en regiones donde todos los átomos de carbono están unos encima de los otros; en las llamadas regiones de *AA stacking*. La distancia entre estas zonas de *AA stacking* es 13 nm. Esto va a formar el equivalente a mi red cristalina de átomos donde puedo controlar dónde están los electrones y puedo controlar la interacción entre ellos. Y esto es parte del descubrimiento que

hicimos: podemos tener esa estructura cristalina donde tenemos los electrones localizados y podemos controlarlos.

Todo empieza con un polímero transparente y una hoja de vidrio que vamos a utilizar para recoger el nitruro de boro. No es una sola capa, son como 10 nm, es bastante rígido, y lo utilizamos como sustrato. Luego traemos otro sustrato, en el que tenemos una sola lámina de grafeno. El truco ahora está en posicionar el sustrato a mitad de camino de la hoja de grafeno, de tal manera que rompemos la hoja de grafeno en dos. Tenemos el sustrato, bajo el cual tenemos la hoja de grafeno, y luego tenemos la lámina de vidrio con el polímero, con el nitruro de boro, y con la otra mitad del grafeno arriba.

Estas dos láminas de grafeno que están ahora a distintas alturas venían de la misma lámina de grafeno, del mismo cristal. Luego, los átomos de una están alineados con respecto a la otra. Ahora podemos rotar un ángulo, el que queramos, 1,1 grados, por ejemplo.

Y lo trasladamos encima del otro, con lo que tenemos las dos estructuras, planas atómicamente, una encima de la otra, a ese ángulo que hemos escogido arbitrariamente. Después cogemos las dos láminas y seguimos construyendo nuestro dispositivo electrónico. Al final tenemos un dispositivo electrónico en el que tenemos las dos láminas de grafeno de ángulo mágico rotadas una con respecto a la otra. Tenemos el boruro de nitrógeno arriba y abajo, encapsulado para que el grafeno quede bien protegido.

Podemos conectar las láminas de grafeno con electrodos y, muy importantemente, contamos con una pieza de metal de tal manera que el grafeno forma un condensador con esa pieza de metal y, si aplicamos un voltaje, podemos variar la densidad de carga en esta pieza de grafeno. Es una geometría que se llama de transistor de efecto campo, que es como los transistores que se utilizan en los teléfonos celulares o los ordenadores.

¿Qué pasa si el grafeno está en su ángulo mágico? Si pongo mi energía donde no hay densidad de estados, no tengo niveles de energía, por lo tanto, aquí no conduce nada, cero. El grafeno es un aislante. Si el potencial químico está donde tenemos un *band gap*, de nuevo el grafeno no conduce nada, tenemos también un aislante. Esto es lo que pasa en cualquier semiconductor, es lo normal. Pero ¿qué ocurre si ahora coloco mi potencial químico en el medio? Si lo pongo en el medio, resulta que estoy en medio de una banda, tengo un montón de estados de energía disponibles a los electrones para que conduzcan electricidad, sin embargo, hay un valor de la densidad que corresponde a dos huecos por celda moiré unidad, en donde el sistema conduce cero, es un aislante. Si ahora pongo dos electrones por celda unidad de moiré, también tengo un aislante. Este aislante es correlacionado, es parecido al aislante de Mott. Esto debería de

ser un buen metal y conducir muy bien, pero resulta que es un aislante. Hemos conseguido poner el mejor conductor del mundo encima del mejor conductor del mundo y que no conduzca nada. Esto lo hemos publicamos en *Nature*.

Al mismo tiempo nos dimos cuenta de que este comportamiento donde tienes esos estados aislantes correlacionados ocurre solamente si el ángulo entre estas dos capas es entre 1 y 1,2 grados. Si tienes 1,3 conduce muy bien. Si tienes 0,8 conduce muy bien. Es un comportamiento que está ligado a este ángulo mágico.

Mis estudiantes, entonces, se plantearon si esto no podría ser un superconductor. Para saber si algo es un superconductor, no hay que medir la conductividad, hay que medir la resistencia y ver si la resistencia es cero; porque la conductividad tendría que ser infinita y medir el infinito es difícil. Hicimos dispositivos nuevos en una geometría nueva que se llama geometría de 4-probe, que significa de cuatro puntos de inspección, y donde se puede medir muy bien si la resistencia de algo es cero. Y efectivamente, cuando medimos dispositivos de ángulo mágico observamos que la resistencia como función de la temperatura bajaba, de repente, un factor 100, 1000 por debajo de la resistencia en el estado normal. Era cero, básicamente por debajo de nuestro nivel de ruido; es decir, cero. Y esto ocurría para varios dispositivos. Lo publicamos en otro artículo en el mismo número de *Nature*.

De hecho, hay muchas otras pruebas que son necesarias para saber si un material es superconductor. Por ejemplo, observar que no hay disipación de energía hasta que se supera una cierta cantidad de corriente, la corriente crítica. Esto es un comportamiento típico de superconductores. Pero hicimos muchas otras pruebas de superconductividad bidi-



mensional, y todas se cumplían: estábamos ante un superconductor bidimensional. Un superconductor muy especial, porque resulta que podemos variar la densidad de carga continuamente y pasar de tener un aislante correlacionado a tener una bóveda de superconductividad.

Y, ¿cómo de fuerte es este superconductor? Se ha hecho una comparación con los superconductores de alta temperatura y resulta que los superconductores de alta temperatura superconducen a temperaturas de hasta 160 K, que son temperaturas muy altas. El grafeno conduce en torno a 1 K, 3 K en nuestros mejores dispositivos.

Pero los superconductores no se suelen comparar teniendo en cuenta cuál es la temperatura crítica, que es importante para las aplicaciones, pero que, desde el punto de vista de la física, no es el parámetro más importante. Normalmente, lo que uno compara es la densidad de carga del estado superconductor. Por ejemplo, el aluminio es un superconductor convencional, tiene una temperatura crítica de 1 K, pero tiene trillones y trillones y trillones de electrones.

El grafeno tiene una temperatura crítica parecida a la del aluminio, de hecho, superior, y tiene un factor en densidad de carga que es 10.000 veces menor. Dado los pocos electrones que tenemos en el grafeno, es increíble que superconduzca a una temperatura tan alta como lo hacen. Esto sitúa al grafeno de ángulo mágico en un caso extremo de superconductor no convencional, algo que ha generado mucho interés porque hay muchas cosas de los superconductores no convencionales que aún no entendemos.

Publicamos estos descubrimientos en abril de 2018 y la pregunta que todo el mundo se hacía era qué tipo de aislante correlacionado tenemos y qué tipo de superconductor tenemos. Hasta el momento hay más de 1.000 artículos intentando explicar estos resultados y los físicos teóricos, en este campo de los materiales cuánticos, no se ponen de acuerdo.

Grigory Volovik, un físico teórico muy distinguido que trabaja en Finlandia, nos envió un correo en el que decía: "Pablo, por fin habéis realizado experimentalmente todo lo que yo he predicho antes". En realidad, reci-

bimos muchos correos como el suyo, pero él nos envió un artículo que sí me sorprendió. Resulta que, durante décadas, desde los años 50, se han llevado a cabo experimentos, como uno o dos por década, en el que se medía la conductividad del grafito y parecía que era un superconductor de altísima temperatura; en algunos experimentos, incluso a temperatura ambiente. Pero estos experimentos no podían reproducirse; otros lo intentaban y no lo conseguían. Era algo esotérico que la comunidad científica no terminaba de creerse. Y hace cuatro años o cinco años, Grigory Volovik dijo: "Yo os voy a decir qué es lo que pasa aquí. En todos estos experimentos que se llevan haciendo desde hace décadas, lo que ocurre es que están cogiendo grafito donde las láminas de grafito están un poquito giradas las unas con respecto a las otras. Cuando haces eso, vas a tener bandas planas. Estas bandas planas van a dar lugar a superconductividad no convencional con un acoplamiento fuerte. Por eso tienes una superconductividad con una temperatura tan alta en este sistema". Eso lo publicó hace unos cinco años y nadie le hizo caso porque no estaba nada claro que pudiese ocurrir.

¿Qué ha pasado desde que publicamos nuestro descubrimiento? Lo primero es que hemos podido reproducir nuestros propios resultados. Esto no pasa siempre. Y ahora tenemos muchos más dispositivos y estamos viendo cómo la temperatura varía con el ángulo de rotación.

Ahora, mejor aún que poder reproducir tus resultados, es que otros los puedan reproducir. Y muchos grupos ya lo han conseguido. Varios grupos de todo el mundo, algunos en España, han reproducido nuestros resultados de manera totalmente independiente. Ahí es cuando un descubrimiento se convierte en ciencia de verdad, cuando otros grupos son capaces de reproducir tus resultados.

Hemos encontrado muchísimos comportamientos de otros tipos de física de estados correlacionados, incluyendo magnetismo y topología, que está presente en estos sistemas, y es algo que realmente ha permitido conectar tres grandes comunidades científicas de la materia condensada moderna de una manera totalmente nueva. Una, la comunidad que investiga en grafito y otros materiales bidimensionales. Otra, es la que estudia los superconductores de alta temperatura y otros materiales cuánticos. Y otra, es la comunidad que estudia materia condensada topológica, el efecto Hall cuántico fraccionario. Y esos tres tipos de física se unen y son importantes para explicar las estructuras correlacionadas

UN DESCUBRIMIENTO SE CONVIERTE EN CIENCIA DE VERDAD, CUANDO OTROS GRUPOS SON CAPACES DE REPRODUCIR TUS RESULTADOS

de moiré, como el grafito de ángulo mágico. Estas comunidades de físicos, que antes no hablaban mucho con nosotros porque no tenían mucho de qué hablar, ahora están interactuando continuamente, y es una experiencia que, desde luego para mí, es extremadamente enriquecedora. Esto es algo con lo que estoy aprendiendo muchísimo y con lo que estoy muy entusiasmado.

Esto no es solo grafito sobre grafito. Resulta que como ahora tenemos materiales bidimensionales, con todos los tipos de comportamientos que existen en el universo, tenemos sistemas tipo de Dirac y topológicos, tenemos aislantes, tenemos superconductores, imanes y cosas exóticas como los *quantum*

spin liquids. Todos estos comportamientos que ocurren en una sola capa, ahora los ponemos uno encima de los otros rotados. Y si antes no había interacciones fuertes, como en el caso del grafito, aparecerán. Si ya tenían interacciones fuertes, que muchos de estos materiales ya tienen en sí interacciones fuertes en una sola capa, ahora las modificaremos cuando pongamos uno encima de otro. Con lo cual, los teóricos están entusiasmados calculando los ángulos mágicos para todos los materiales que existen y tenemos cientos y cientos de combinaciones.

¿Cuáles son las aplicaciones potenciales? No tengo ni idea. De momento esto lo hacemos por curiosidad intelectual y por entender mejor estos sistemas, pero si a uno le presionan desde el punto de vista de un ingeniero, podemos decir que hemos fabricado un transistor superconductor, y que si variamos un voltaje se vuelve aislante. Los transistores superconductores son muy útiles para la computación clásica criogénica. Hoy día disipa tanta energía en un ordenador normal o en un servidor de datos normal, que muchas veces te conviene enfriarlo a 4 K y hacer toda la computación clásica, pero con superconductores. Más exótico es utilizar un transistor superconductor para hacer qubits o bits cuánticos en la computación cuántica, en la que la tecnología actual más moderna se basa en superconductores, pero superconductores que no son transistores.

Por último, si la superconductividad es del tipo que algunos teóricos proponen, se podría utilizar en la computación cuántica topológica, que es más robusta al desorden, más robusta a la decoherencia de los procesos cuánticos que ocurren, que normalmente te estropean tu computación cuántica, y quizá podría ser mucho más útil. Si acaso, esto lo veremos a 10, 20, 40, 50 años vista, pero es posible que ocurra.

Bio



PABLO JARILLO

Se licenció en Física en la Universidad de Valencia (1999), realizó estudios de posgrado en la Universidad de California en San Diego y se doctoró en la Universidad Técnica de Delft (2005) teniendo como director de tesis a Leo P. Kouwenhoven. Comenzó a trabajar como investigador posdoctoral en la Universidad de Columbia, en Nueva York, hasta que en 2008 se incorporó al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) como profesor e investigador, donde estudia las propiedades electrónicas y ópticas de materiales bidimensionales como el grafito en el Área de Física de la Materia Condensada, del Departamento de Física. En sus últimas investigaciones, han destacado sus aportaciones «sobre transistores cuánticos en nanotubos de carbono» y la superconductividad que ofrece «un sistema sencillo de dos láminas de grafito» cuando gira una sobre otra con un ángulo de 1,1 grados. Entre los premios y reconocimientos que ha recibido se encuentran, entre otros: el Premio a Investigadores Noveles de 2006 de la Real Sociedad Española de Física; el Presidential Early Career Award for Scientists and Engineers (PECASE) 2012, otorgado por el presidente de Estados Unidos, Barack Obama, el premio más prestigioso que el gobierno estadounidense da a un joven investigador. En el año 2020 fue galardonado con el Premio Wolf en Física y el Premio Oliver E. Buckley de Materia Condensada.