

FESTKÖRPER

Magie im Flachland

Von der Hochtemperatursupraleitung über ultrasensible Quantensensoren bis hin zu stabilen Quantencomputern: Zweidimensionale Materialien bergen ein erstaunliches Potenzial. In den letzten Jahren gab es bei der Erforschung der neuen Wunderstoffe große Fortschritte.

» spektrum.de/artikel/2108280



Charles Wood ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in New York.

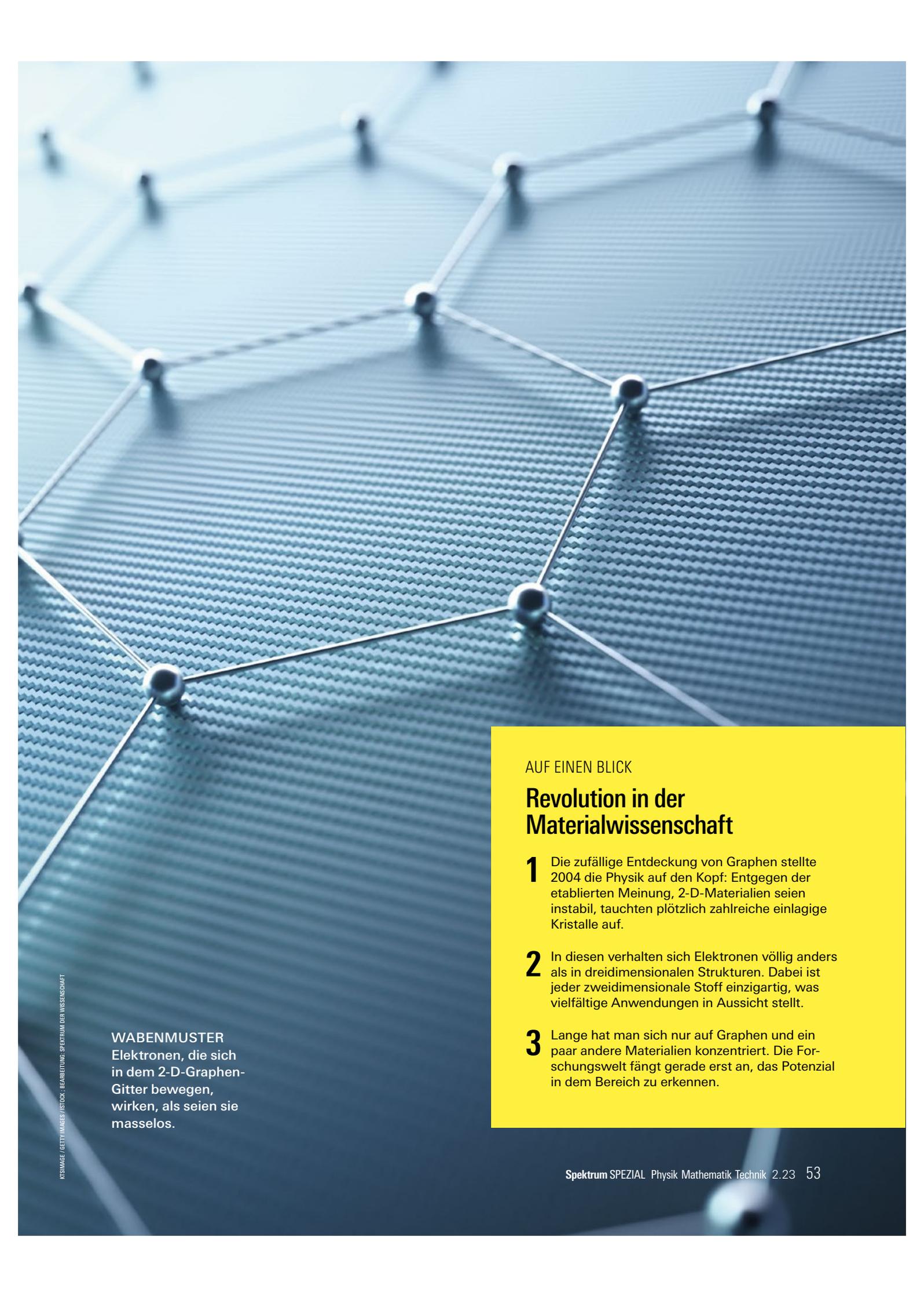
Alles begann mit einem Stück Klebeband. Die Physiker Andre Geim und Konstantin Novoselov stellten 2004 überrascht fest, dass sie damit von einem Graphitblock einige Flocken abziehen konnten, die bloß die Dicke eines Atoms hatten. Auf diese Weise hatten sie das erste zweidimensionale Material geschaffen – obwohl theoretische Physiker das für unmöglich erklärt hatten. Als sie mit der hauchdünnen Schicht herumexperimentierten, erkannten sie, dass sich deren Eigenschaften radikal von jenen dreidimensionaler Materialien unterscheiden. Graphen, wie Geim und Novoselov es nannten, begründete eine völlig neue Kategorie von Stoffen. Ihre Entdeckung veränderte die Festkörperphysik. Tausende von Forscherinnen und Forscher begannen ebenfalls, an Graphen zu arbeiten, und träumten von den vielfältigen Technologien, die es ermöglichen könnte. Bereits 2010 wurden Geim und Novoselov mit dem Nobelpreis für Physik geehrt.

Im selben Jahr sahen die junge Physikerin Jie Shan und ihr Kollege Kin Fai Mak von der Columbia University

Anzeichen dafür, dass zweidimensionale Schichten von Molybdänit noch außergewöhnlicher sein könnten als Graphen. Molybdänit sieht selbst für das geschulte Auge fast genauso aus wie Graphit: ein silbrig glänzender Kristall. Beide Materialien werfen Flocken ab, die sich zur Herstellung von Bleistiften eignen. Man sollte sich von diesen Äußerlichkeiten aber nicht täuschen lassen. Trotz ihrer Ähnlichkeit bilden die Atomgitter der Stoffe für die darin befindlichen Elektronen völlig verschiedene Welten. Das stellte erstmals der schwedische Chemiker Carl Scheele 1778 fest, als er beide Minerale in Säuren tauchte. Die grellen Gaswolken, die dabei entstanden, sahen alles andere als gleich aus. So kam er zu dem Schluss, dass Molybdänit eine neue Substanz sein musste. Der Wissenschaftler bezahlte die Experimente schließlich mit dem Leben, er starb im Alter von 43 Jahren an einer Schwermetallvergiftung.

Dennoch fand Molybdänit seinen Weg in die Anwendung: Weil es schnell in pulverförmige Fragmente zerfällt, entwickelte es sich im Lauf des 20. Jahrhunderts zu einem beliebten Schmiermittel. Es ließ Skier besser durch den Schnee gleiten und glättete den Austritt von Kugeln aus Gewehrläufen. Diese »Flockigkeit« ermöglicht es auch, zweidimensionale Schichten des Kristalls zu gewinnen, wie bei Graphit.

Das weniger bekannte Mineral ist sehr schwierig zu erforschen. Trotzdem faszinierte es Shan und Mak. Das Duo widmete sich fast ein Jahrzehnt lang den einlagigen



WABENMUSTER
Elektronen, die sich
in dem 2-D-Graphen-
Gitter bewegen,
wirken, als seien sie
masselos.

KTSIMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK - BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

AUF EINEN BLICK

Revolution in der Materialwissenschaft

- 1** Die zufällige Entdeckung von Graphen stellte 2004 die Physik auf den Kopf: Entgegen der etablierten Meinung, 2-D-Materialien seien instabil, tauchten plötzlich zahlreiche einlagige Kristalle auf.
- 2** In diesen verhalten sich Elektronen völlig anders als in dreidimensionalen Strukturen. Dabei ist jeder zweidimensionale Stoff einzigartig, was vielfältige Anwendungen in Aussicht stellt.
- 3** Lange hat man sich nur auf Graphen und ein paar andere Materialien konzentriert. Die Forschungswelt fängt gerade erst an, das Potenzial in dem Bereich zu erkennen.

Schichten von Molybdänit (oder Molybdändisulfid, der im Labor hergestellten Variante des Kristalls) und einer Familie eng verwandter Stoffe.

Jetzt zählen sich ihre Bemühungen aus. Shan und Mak, die inzwischen miteinander verheiratet sind, leiten seit 2018 gemeinsam eine Forschungsgruppe an der Cornell University. Dort konnten sie zeigen, dass zweidimensionale Materialien eine enorme Vielfalt an exotischen Quantenphänomenen hervorrufen. »Es ist verrückt«, sagt ihr Kollege James Hone, der das Labor mit hochwertigen Kristallen versorgt. »Man kann die gesamte moderne Festkörperphysik in einem einzigen Materialsystem durchführen.«

Die Gruppe von Shan und Mak hat völlig ungeahnte Verhaltensweisen von Elektronen beobachtet. Sie hat die Teilchen dazu gebracht, zu einer Quantenflüssigkeit zu verschmelzen und zu verschiedenen eisähnlichen Strukturen einzufrieren. Die Forscherinnen und Forscher haben Gitter aus gigantischen künstlichen Atomen zusammengesetzt, die nun grundlegende Theorien auf den Prüfstand stellen. Außerdem konnten sie jahrzehntealte

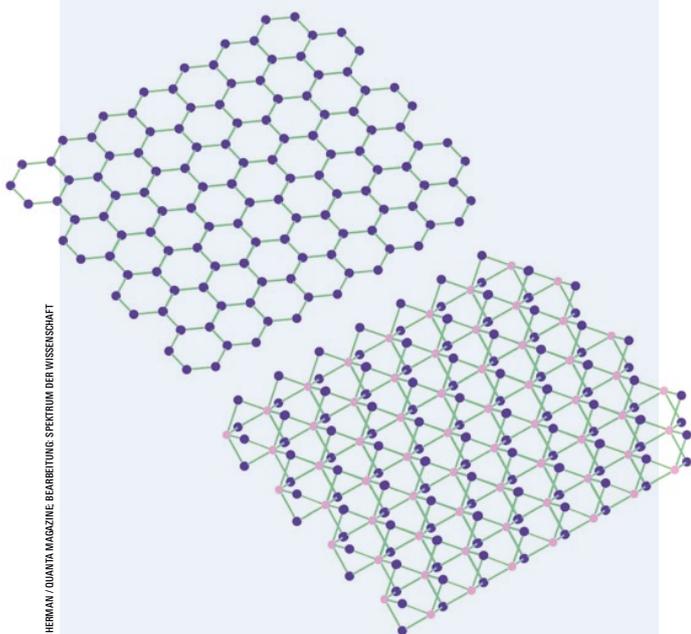
Fragen der Festkörperphysik beantworten. Und sie sind noch längst nicht fertig.

Die Eigenschaften eines Materials sind durch das Verhalten der Elektronen bestimmt. In Leitern wie Metallen fließen die Teilchen mit Leichtigkeit zwischen den Atomen umher. In Isolatoren wie Holz oder Glas bleiben sie hingegen an Ort und Stelle. Halbleiter wie Silizium liegen irgendwo dazwischen: Führt man Energie zu, kann man ihre Elektronen in Bewegung bringen. Das macht solche Stoffe ideal für das Ein- und Ausschalten von Strömen – die Aufgabe eines Transistors. In den letzten 50 Jahren haben Festkörperphysiker neben diesen drei grundlegenden Materialtypen noch viele weitere exotische Stoffe entdeckt, in denen sich die Elektronen völlig anders verhalten.

Für eine der größten Überraschungen sorgten die beiden IBM-Forscher Georg Bednorz und Alex Müller im Jahr 1986, als sie einen elektrischen Strom beobachteten, der sich ohne jeglichen Widerstand durch einen Kupferoxidkristall (Cuprat) bewegte. Supraleitung war damals zwar schon bekannt, aber nur in Materialien, die man bis auf wenige Grad über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15$ Grad Celsius) abgekühlt hatte. Tatsächlich besagten die theoretischen Modelle, dass Strom nur bei solchen Temperaturen widerstandsfrei fließen kann. Bednorz und Müller hatten das Phänomen jedoch bei rekordverdächtigen 35 Kelvin (etwa -238 Grad Celsius) gemessen. Bald darauf entdeckte man weitere Cuprate, die sogar oberhalb von 100 Kelvin supraleitend sind. Damit war ein Traum geboren, der bis heute eines der wichtigsten Ziele der Festkörperphysik ist: eine Substanz zu finden, die Strom bei Raumtemperatur ohne Widerstand befördert. Das würde verlustfreie Stromleitungen, schwebende Fahrzeuge und andere hocheffiziente Geräte ermöglichen – und so den Energiebedarf der Menschheit erheblich reduzieren.

Physik in zwei Dimensionen

Die Welt der 2-D-Materialien eröffnete sich durch die Entdeckung von Graphen 2004. Dabei handelt es sich um Kohlenstoffatome, die in einem hexagonalen Gitter angeordnet sind (oben). Neben Graphen bergen auch zweidimensionale Schichten von Molybdändisulfid (unten) erstaunliche Eigenschaften.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Paarung verändert die Natur der Teilchen

Supraleitung wird möglich, weil sich Elektronen, die sich normalerweise gegenseitig abstoßen, bei niedrigen Temperaturen in manchen Kristallen plötzlich zu Paaren zusammenschließen. Das Paar kann dann als »Boson« betrachtet werden – so nennt man eine von zwei Teilchenfamilien, welche die grundlegenden Eigenschaften aller Partikel bestimmt. Während materieartige Elementarteilchen (wie Elektronen, Quarks oder Neutrinos) zur Klasse der Fermionen gehören, die sich niemals im gleichen Zustand am selben Ort befinden können, sind Photonen und Gluonen Bosonen, die das problemlos schaffen. Die bosonischen Elektronenpaare sind ebenfalls dazu in der Lage: Sie verschmelzen zu einer Quantenflüssigkeit, die reibungsfrei fließen kann.

Das ist allerdings nur bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt oder unter sehr hohem Druck möglich. Denn nur dann können die anziehenden Kräfte (hergerufen etwa durch Atomschwingungen), welche die Elektronen zu Bosonen paaren, die elektrische Abstoßung



JOHN CHAPMAN / PICTURE DISCOVERY / ALAMY / JILL MOYBENTE / P6 / CC BY-SA 4.0 / CREATIVE COMMONS BY / LICENSING / SP / 07684008

MOLYBDÄNIT Das Mineral wird häufig zu pulverförmigen Bruchstücken zermahlen und als industrielles Schmiermittel verwendet. Doch Physiker haben entdeckt, dass 2-D-Folien des hexagonalen Kristalls neuartige Verhaltensweisen von Elektronen hervorrufen.

der Teilchen überwinden. Wegen dieser extremen Bedingungen lässt sich die Supraleitung nicht in alltäglichen Geräten verwenden. Doch Cuprate haben gezeigt, dass bestimmte Atomgitter die Elektronen extrem fest aneinanderkleben – vielleicht sogar so fest, dass sie sich selbst bei Raumtemperatur nicht voneinander lösen.

Aber auch 40 Jahre nach der Entdeckung von Bednorz und Müller weiß niemand, wie der Klebstoff in Cupraten funktioniert – geschweige denn, wie man Kristalle optimieren kann, um den Effekt zu verstärken. Stattdessen untersuchen Fachleute auf gut Glück verschiedene Materialien, in der Hoffnung, dass sie bei möglichst hohen Temperaturen ihre Supraleitfähigkeit behalten. »Immerhin ist die Festkörperphysik ein Bereich, in dem es viele Zufälle gibt«, sagt Kim. Ein solcher war auch die Entdeckung von zweidimensionalen Stoffen im Jahr 2004.

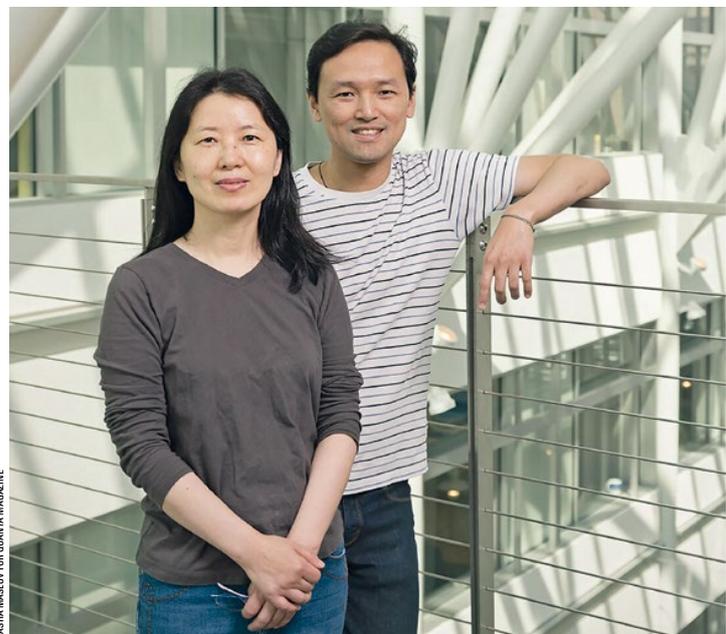
Geim und Novoselov arbeiteten damals an der University of Manchester mit Graphit. Der Kristall besteht aus locker gebundenen einatomigen Lagen aus Kohlenstoffatomen, die in einem »hexagonalen« Gitter aus Sechsecken angeordnet sind. Theoretiker hatten schon lange vorhergesagt, dass ohne den stabilisierenden Einfluss der vielen Schichten hitzebedingte Schwingungen einen einlagigen Film aufbrechen würden. Demnach wäre eine rein zweidimensionale Schicht instabil und würde sich beispielsweise aufrollen. Doch Geim und Novoselov

fanden heraus, dass sie mit einem einfachen Klebeband stabile, atomar dünne Lagen abziehen konnten. Graphen war das erste wirklich flache Material – eine Ebene, auf der Elektronen frei herumgleiten können.

Ein neues Material voller Überraschungen

Der Physiker James Hone von der Columbia University entdeckte dann, dass der dünnste Stoff der Welt auch der stärkste ist. Das war eine bemerkenswerte Überraschung für einen Kristall, von dem man dachte, er würde überhaupt nicht zusammenhalten. Was die Fachwelt an Graphen jedoch am meisten faszinierte, war die Art und Weise, wie sich Elektronen darin verhalten: Auch wenn sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit fließen, wirken sie wie Photonen – nichts kann sie verlangsamen. Normalerweise werden Elektronen oft durch das Atomgitter, durch das sie sich bewegen, ausgebremst und erscheinen dadurch schwerer als ihre eigentliche Masse. Unbewegliche Elektronen eines Isolators wirken beispielsweise, als wären sie unendlich schwer: Man kann einem Isolator viel Energie zuführen, die Teilchen bewegen sich trotzdem nicht. Das flache Gitter von Graphen lässt sie jedoch mit einer Million Meter pro Sekunde umherschwirren, was nur ein paar hundert Mal langsamer ist als die Lichtgeschwindigkeit. Die Elektronen wirken, als wären sie masselos, was Graphen extrem leitfähig macht.

Um das Wundermaterial entstand schnell ein ganzes Forschungsfeld. Und die Fachleute begannen auch, über den Tellerrand zu schauen. Könnten zweidimensionale Flocken aus anderen Substanzen eigene Superkräfte

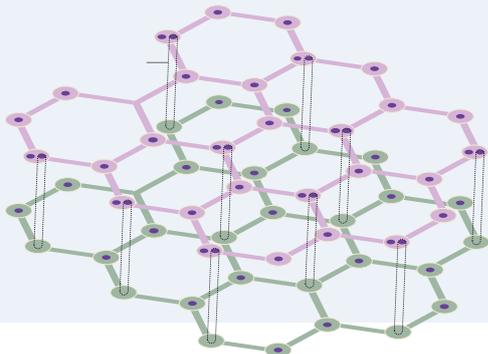


SASHA MASLOV / EIR QUANTA MAGAZINE

TEAMARBEIT Jie Shan und ihr Kollege Kin Fai Mak leiten eine Gruppe von ein paar Dutzend Studierenden und Nachwuchsforschern.

Gegensätze ziehen sich an

In geschichteten 2-D-Materialien ziehen die Elektronen der einen Lage die Löcher (fehlende Elektronen) der darunterliegenden an. Diese Elektron-Loch-Paare, so genannte Exzitone, bewegen sich durch ein Material, als seien sie eigenständige Teilchen.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE, BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

haben? Hone gehörte zu denjenigen, die weiter ausholten. 2009 untersuchte er einige mechanische Eigenschaften des zweidimensionalen Graphitzwillings Molybdädisulfid und übergab den Kristall anschließend an zwei Optikspezialisten im Columbia-Labor von Tony Heinz. Es war eine beiläufige Handlung, die aber die Karriere aller Beteiligten verändert hat.

Die Probe landete in den Händen von Jie Shan, einer jungen Gastprofessorin, und dem Doktoranden Kin Fai Mak. Die beiden hatten zuvor untersucht, wie Graphen mit Licht wechselwirkt. Durch die schnellen Elektronen ist der Stoff ein fantastischer Leiter, aber Mak und Shan brauchten für ihre Forschung eigentlich Halbleiter, deren Elektronenfluss sie ein- und ausschalten konnten.

Molybdädisulfid ist ein solcher Halbleiter. Wie Shan und Mak bald herausfanden, besitzt es – genauso wie Graphit – im Zweidimensionalen erstaunliche Eigenschaften. Wenn sie einen Laser auf dreidimensionale Kristalle aus Molybdädisulfid richteten, blieben diese dunkel. Als die zwei Forscher jedoch einzelne Schichten mit Klebeband abrissen und die gleiche Prozedur wiederholten, leuchteten die zweidimensionalen Filme hell auf. Forschungen anderer Gruppen haben das Ergebnis später bestätigt. »Das ist schon verblüffend«, sagt Mak. »Man hat nur eine einzige Schicht aus Atomen, und sie kann 100 Prozent des Lichts wie ein perfekter Spiegel reflektieren.« Diese Eigenschaft könnte zu spektakulären optischen Geräten führen. »Plötzlich begannen alle, die mit Lasern arbeiten, sich für zweidimensionale Materialien zu interessieren«, so Hone.

Mit Molybdädisulfid als zweites Wundermaterial eröffneten sich zahlreiche neue Möglichkeiten. Denn das Material gehört zu der großen Familie von Übergangsmetall-Dichalkogeniden (englisch: transition metal dichalco-

genide, kurz: TMD), von denen es inzwischen etliche gibt. Sie bestehen aus Atomen des mittleren metallischen Bereichs des Periodensystems (wie Molybdän) und Paaren von Chalkogeniden (wie Schwefel). Molybdädisulfid ist das einzige natürlich vorkommende TMD, aber es existieren dutzende weitere, die sich im Labor herstellen lassen, wie Wolframdisulfid oder Molybdänditellurid. Die meisten bestehen aus schwach gebundenen Schichten, was sie für eine Klebebandbehandlung ideal macht.

Die anfängliche Begeisterung ebte allerdings bald ab, als die Fachleute mehr als bloß etwas Glanz aus den TMDs herausholen wollten. Denn neben optischen Untersuchungen mit Lasern sind so genannte Transportmessungen wichtig, bei denen man Elektronen über Elektroden in ein Material pumpt und deren Verhalten untersucht. Die Gruppe von Wang wandte sich nach kurzer Zeit wieder Graphen zu, nachdem sie vergeblich versucht hatten, Metallelektroden an Molybdädisulfid anzubringen. »Das war für unsere Gruppe einige Jahre lang der Stolperstein«, sagt er. »Selbst jetzt sind wir nicht sehr gut im Herstellen von elektrischen Kontakten.« Es schien, als sei der stärkste Vorteil von TMDs gegenüber Graphen gleichzeitig ihre größte Schwäche: Da Halbleiter schlechte Leiter sind, ist es schwierig, Elektronen hinein- oder herauszubekommen.

Auch Mak und Shan zweifelten anfangs. »Uns war wirklich nicht klar, ob wir weiter an Graphen oder an dem neuen Material arbeiten sollten«, erinnert sich Mak. »Aber da wir herausgefunden hatten, dass es dieses erstaunliche Reflexionsverhalten besitzt, haben wir noch ein paar zusätzliche Experimente damit gemacht.« Dabei faszinierte Molybdädisulfid die beiden Physiker zunehmend – und auch persönlich näherten sich Shan und Mak an.

Ein mühevoller Weg in die Forschung

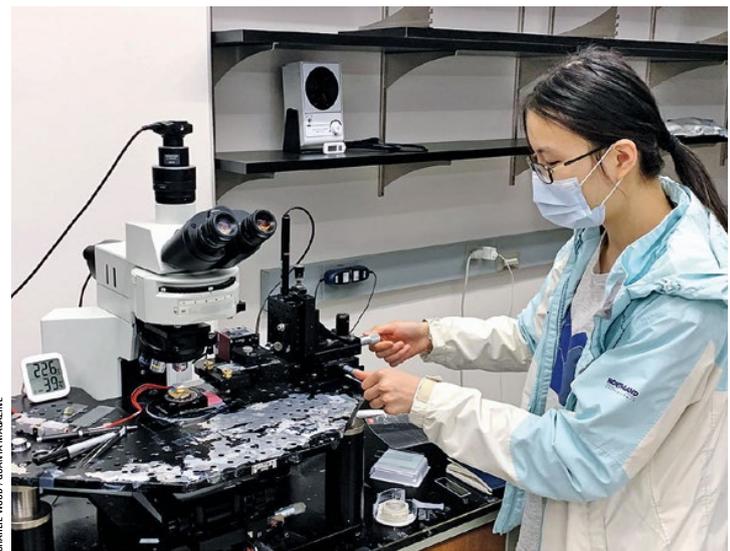
Lernen fiel Shan schon immer leicht. Als sie in den 1970er Jahren in der chinesischen Küstenprovinz Zhejiang aufwuchs, war sie eine Musterschülerin. Sie tat sich in Mathematik, Naturwissenschaften und Sprachen hervor und sicherte sich einen begehrten Platz an der University of Science and Technology of China in Hefei. Dort qualifizierte sie sich für ein kulturelles Austauschprogramm mit der Sowjetunion und ergriff die Chance, an der Staatlichen Universität in Moskau Russisch und Physik zu studieren: Zum Wintereinbruch erreichte sie die Stadt Irkutsk mitten in Sibirien. Nach nur einem Semester beherrschte Shan Russisch und lernte die karge Schönheit der winterlichen Landschaft zu schätzen.

Als der Kurs endete und der Schnee schmolz, reiste sie im Frühjahr 1990 weiter nach Moskau, um dort ihr Physikstudium zu beginnen – mitten in der Auflösung der Sowjetunion. Shan sah Panzer durch die Straßen in der Nähe der Universität rollen, als die Kommunisten versuchten, die Kontrolle über die Regierung wiederzuerlangen. Bei einer anderen Gelegenheit, kurz nach einer Abschlussprüfung, brachen Kämpfe aus. »Wir hörten Schüsse, und uns wurde gesagt, wir sollten das Licht im Wohnheim ausschalten«, erzählt sie. Alles, vom Essen bis zum Toiletten-

papier, war durch ein Coupon-System rationiert. Dennoch fühlte sich Shan durch die Unerschütterlichkeit ihrer Professoren inspiriert, die trotz der Unruhen ihre Forschung fortsetzten. Als die gewohnte Ordnung um sie herum zusammenbrach, veröffentlichte sie eine Arbeit über theoretische Optik, die dem US-Amerikaner Heinz am anderen Ende der Welt an der Columbia University auffiel. Er ermutigte Shan, sich in seiner Forschungseinrichtung zu bewerben. Die junge Physikerin zog daraufhin nach New York, um bei ihm zu promovieren.

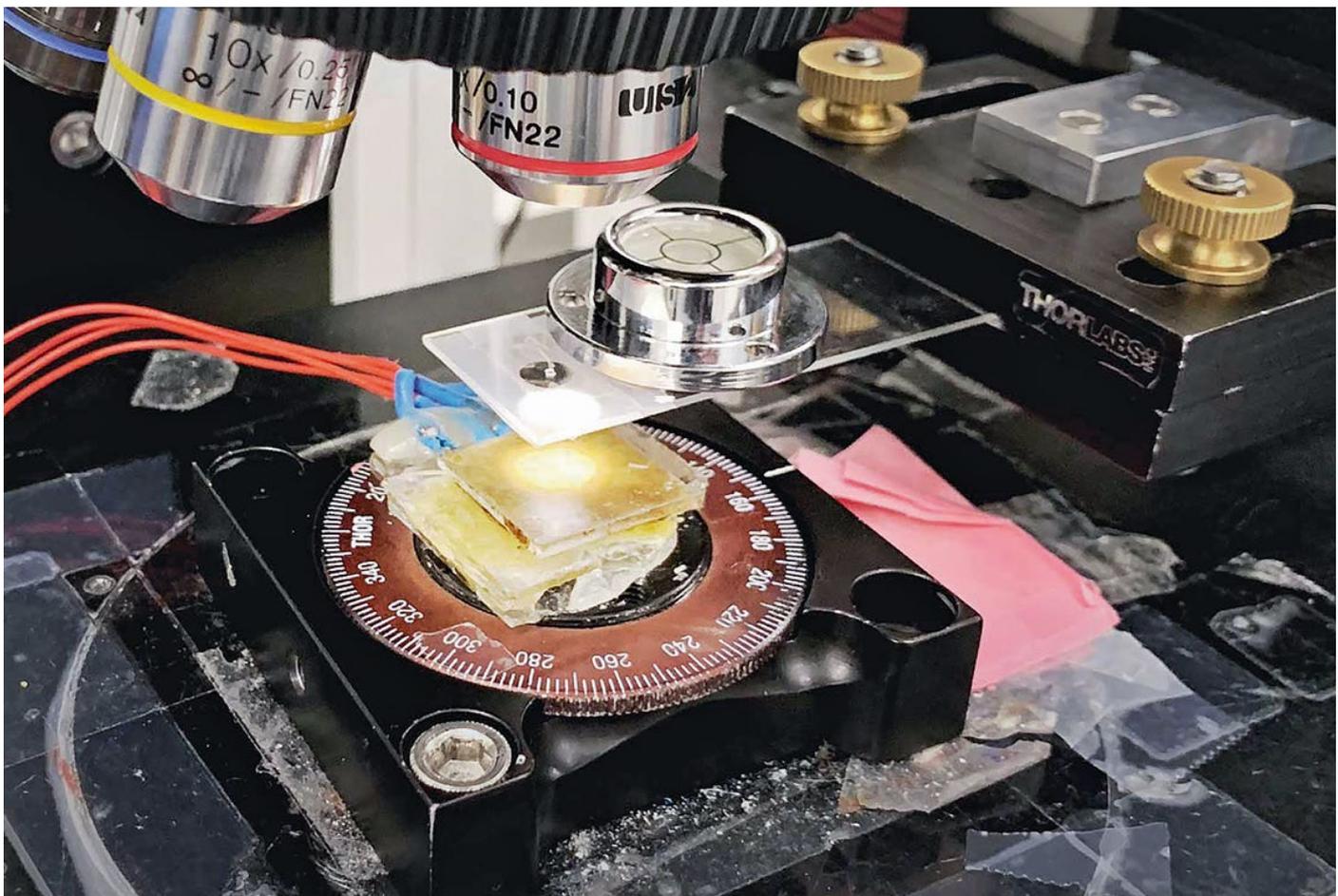
Die meisten Forscher nehmen nach ihrer Doktorarbeit eine Postdoktorandenstelle an, aber Shan ging 2001 direkt als außerordentliche Professorin an die Case Western Reserve University in Cleveland. Später kehrte sie während eines Sabbaticals in das Labor von Heinz an der Columbia University zurück. Dort begann sie die Zusammenarbeit mit dem damaligen Doktoranden Kin Fai Mak.

Mak war auf einem weniger turbulenten Weg in New York gelandet. Er wuchs in Hongkong auf und hatte es in der Schule schwer, weil er außer Physik kaum etwas beherrschte. Seine Forschungsarbeiten im Grundstudium an der Hong Kong University of Science and Technology fielen Heinz auf, der ihn ebenfalls an die Columbia University holte. Dort stürzte Mak sich in die Forschung und

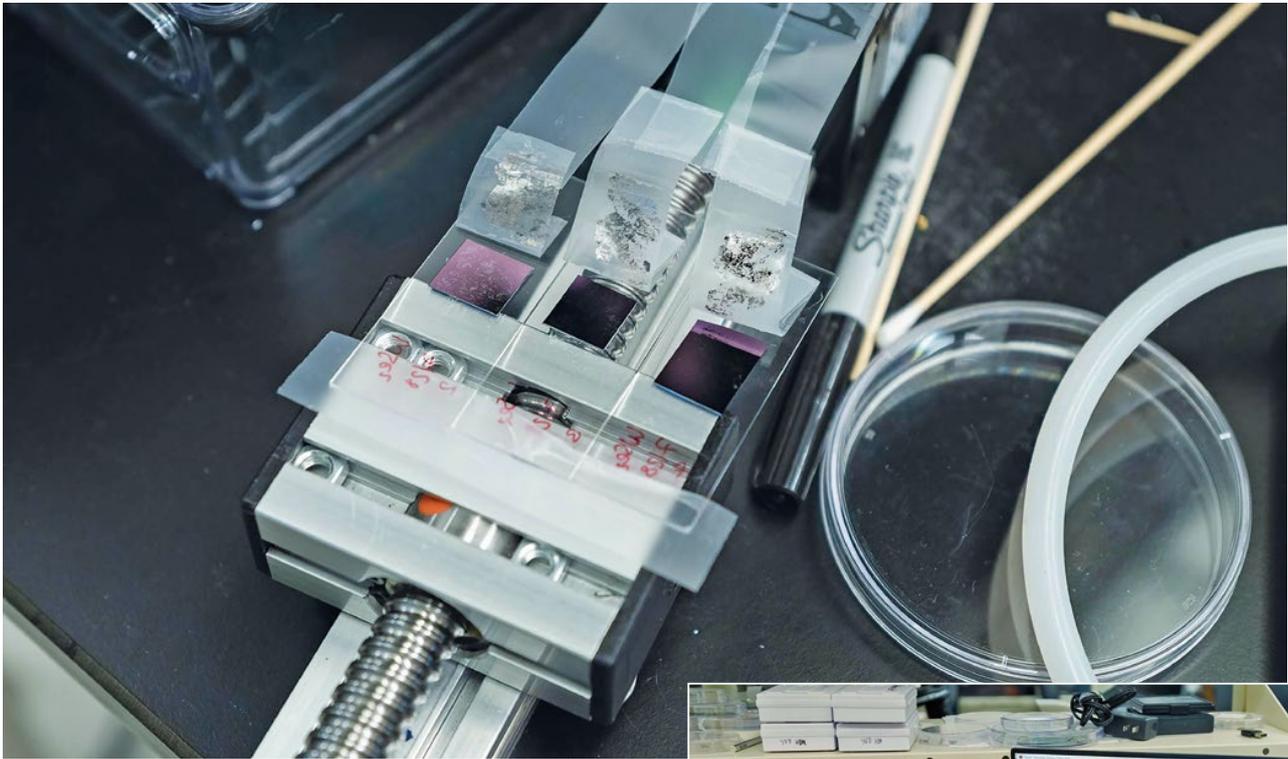


CHARLIE WOOD / QUANTA MAGAZINE

HÖCHSTE PRÄZISION Die Doktorandin Zhengchao Xia in der Gruppe von Mak und Shan verwendet einen motorisierten Positioniertisch, um Materialschichten zu einem neuen 2-D-Bauteil zu stapeln.



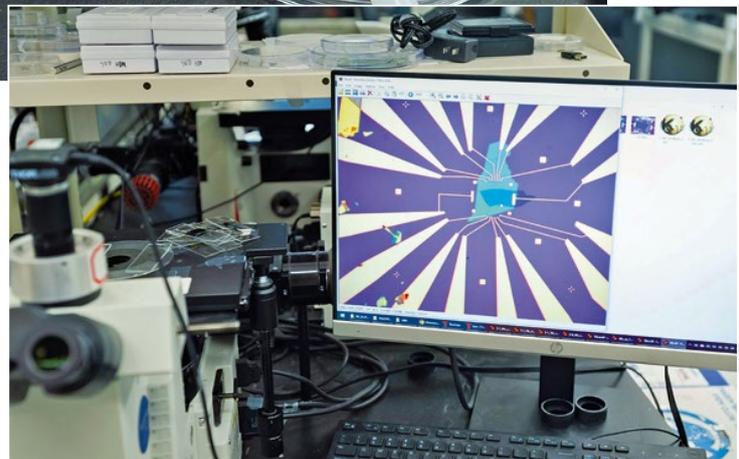
CHARLIE WOOD / QUANTA MAGAZINE



BEIDE FOTOS: SASHA MASLOV FÜR QUANTA MAGAZINE

verbrachte fast alle wachen Stunden im Labor. Unterbrochen wurde dies durch einen Ausflug in den kolumbianischen Amazonas-Regenwald, aus dem Mak erkrankt zurückkehrte. Wie sich herausstellte, litt er an einer seltenen Blutkrankheit, und so verbrachte er den Großteil des letzten Studienjahres im Krankenhaus. »Er schrieb hochkarätige Veröffentlichungen vom Krankenhausbett aus«, erinnert sich die Physikerin Andrea Young von der University of California, Santa Barbara. »Trotz alledem war er einer der produktivsten Studenten überhaupt«, so Heinz. Nach seiner Genesung wechselte Mak 2012 als Postdoc an die Cornell University in Ithaca, gerade als Shan wieder an die Case Western University in Ohio zurückgekehrt war. Die beiden Physiker verfolgten individuelle Projekte mit Graphen und anderen 2-D-Materialien, aber einigen Fragestellungen gingen sie weiterhin gemeinsam nach. Mak hatte an der Cornell University die hohe Kunst der Elektronentransportmessungen gelernt, die neben optischen Ansätzen (die Shan nutzt) eine zweite wichtige Methode darstellt, um die Bewegung von Elektronen zu bestimmen. Indem sie ihr Fachwissen kombinierten, konnten die Forscher den mysteriösen TMDs erstaunliche Geheimnisse entlocken.

Je mehr das Duo über TMDs erfuhr, desto faszinierender erschienen die Stoffe. Physiker konzentrieren sich in der Regel auf eine von zwei Eigenschaften von Elektronen: ihre Ladung oder ihren Spin, eine Art Eigendrehimpuls. Der elektrische Ladungsfluss bildet die Grundlage der modernen Elektronik. Ebenso lässt sich aber auch der Spin der Teilchen steuern, darauf fußt die »Spintronik«. Derartige Bauteile haben den Vorteil, dass sie mehr Informationen auf kleinerem Raum unterbringen können. 2014 entdeckte Mak mit seinen Kollegen, dass Elektronen in zweidimensionalem Molybdändisulfid eine dritte Eigenschaft besitzen, die sich für Anwendungen nutzen



SCHICHTEN STAPELN Forscher reißen Klebeband von einem Kristall ab, um zweidimensionale Schichten zu erzeugen (oben). Dann stapeln sie diese Lagen und bringen Elektroden an. Ein mikroskopisches Bild einer solchen Vorrichtung erscheint auf einem Computermonitor (unten).

ließe: Die Teilchen fließen stets mit einer von zwei möglichen Geschwindigkeiten. Das hat zu einem dritten Feld, der so genannten Valleytronik, geführt.

Elektronen sind nicht die einzigen Objekte, die sich durch einen Kristall bewegen. Physiker verfolgen auch Löcher, also Leerstellen, die entstehen, wenn Elektronen woandershin springen. Diese können wie echte positiv geladene Teilchen durch ein Material wandern. Zwischen Elektron und Loch besteht eine Anziehungskraft – und tatsächlich können sie sich kurzzeitig zu einem Paar, einem Exziton, zusammenschließen, bevor das Elektron die Leerstelle füllt. Shan und Mak haben die Anziehung zwischen Elektronen und Löchern in zweidimensionalem Wolframdiselenid gemessen und festgestellt, dass sie

hundertmal stärker ist als in einem typischen dreidimensionalen Halbleiter. Das heißt, Exzitonen könnten in TMDs besonders robust sein. Und das könnte wiederum für Supraleitung entscheidend sein.

Nach diesen Durchbrüchen erhielten Shan und Mak eine Stelle an der Pennsylvania State University und gründeten dort ein Labor, um sich voll und ganz den TMDs zu widmen. Und sie heirateten. In der Zwischenzeit stellte das Team um Hone fest, dass die Eigenschaften von Graphen noch erstaunlicher wurden, wenn man es auf den Isolator Bornitrid schichtete. Das war ein frühes Beispiel für einen wichtigen Aspekt von zweidimensionalen Materialien: ihre Stapelbarkeit (siehe »Spektrum« November 2019, S. 52).

Legt man ein 2-D-Material auf ein anderes, sind die Lagen nur den Bruchteil eines Nanometers voneinander entfernt – aus Sicht der Elektronen haben sie überhaupt keinen Abstand. Somit verschmelzen gestapelte Schichten zu einer einzelnen Substanz. »Es sind nicht einfach nur zwei Materialien«, erklärt Wang. »Man schafft wirklich einen neuen Stoff.«

Während Graphen ausschließlich aus Kohlenstoffatomen besteht, bringt die vielfältige Familie der TMDs dutzende Elemente mit sich. Jedes davon hat unterschiedliche Eigenschaften: Einige können unter richtigen Bedingungen magnetisch, andere supraleitend sein. Deshalb waren die Forscher gespannt, was geschehen würde, wenn man diese Materialien verbindet. Als Hones Gruppe Molybdändisulfid auf einem Isolator anordnete, brachte das Stapeln im Vergleich zu dem, was sie bei Graphen gesehen hatte, nur geringe Fortschritte. Wie sich herausstellte, hatten die Physiker die Qualität der beschafften TMD-Kristalle nicht überprüft. Die genaue Betrachtung unter dem Mikroskop, das atomare Auflösung besitzt, zeigte: Einige Atome saßen an der falschen Stelle, andere fehlten gänzlich. Zirka ein Prozent aller Gitterplätze wies ein Problem auf, was die Leitfähigkeit des Stoffs beeinträchtigte. Im Vergleich dazu war ihre Graphenprobe der Inbegriff von Perfektion, mit etwa einer Fehlstelle pro Million Atome. »Das Zeug, das wir gekauft hatten, war kompletter Müll«, so Hone.

Eine eigene Kristallzucht

2016 beschloss er daher, selbst TMDs in Forschungsqualität zu erzeugen. Er stellte einen Postdoc, Daniel Rhodes, ein, der Erfahrung damit hatte. Rhodes schmolz Pulver von Rohstoffen bei extrem hohen Temperaturen und kühlte sie dann wieder ab. Das neue Verfahren dauerte einen Monat – sehr viel länger als kommerzielle Methoden, die bereits nach einigen Tagen abgeschlossen sind. Aber es kamen TMD-Kristalle heraus, die hunderte bis tausende Male besser waren.

Bevor Shan und Mak die Vorteile von Hones zunehmend makellosen Stoffen nutzen konnten, mussten sie ein anderes Problem lösen. Wie lassen sich Elektronen in die Materialien ein- und wieder abführen? Das ist für die Transportuntersuchungen unerlässlich, die Mak als Postdoc gelernt hatte. Die beiden Forscher mussten sich dafür

mit unzähligen Details beschäftigen: Welche Art von Metall ist für die Elektrode geeignet? Wie weit sollte sie vom TMD entfernt sein? Welche Chemikalien braucht man zur Reinigung der Kontakte? Die schier endlosen Möglichkeiten, die sie durchprobieren mussten, beanspruchten viel Zeit und waren mühsam. Außerdem untersuchten sie jahrelang, wie man die mikroskopisch kleinen TMD-Schichten, die nur zehntelmillionstel Meter groß sind, anheben und stapeln kann. Doch all das sollte sich lohnen.

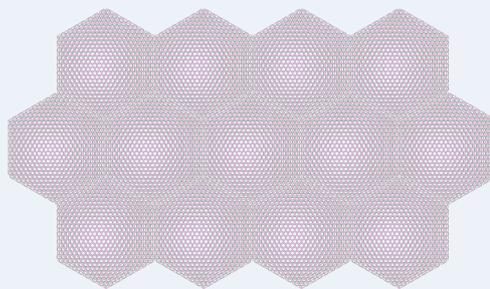
Das Paar zog nach Ithaca, New York, um erneut eine Stelle an der Cornell University anzutreten. Indem sie ihr dort seit 2018 gewonnenes Wissen mit den Kristallen von Hone kombinierten, erzeugten sie eine regelrechte Flut bahnbrechender Ergebnisse.

»Heute lässt sich aus irgendeinem Grund alles schwer handhaben«, sagt die Doktorandin Zhengchao Xia, die in der Forschungsgruppe von Mak und Shan arbeitet, als eine Bornitrid-Flocke droht sich abzulösen und auf die darunterliegende Siliziumoberfläche zurückzufallen. Das Blättchen klammert sich schwach an ein Stück Graphit, ähnlich wie Papier an der Oberfläche eines elektrostatisch geladenen Luftballons. Das Graphit klebt wiederum an einem zähflüssigen Tropfen aus Plastik auf einem Glasobjektträger. Über einen Computer steuert Xia einen motorisierten Ständer, der den Objektträger festhält. Wie eine Spielhallenbesucherin einen Greifautomaten mit einem Joystick bearbeitet, hebt sie den Stapel vorsichtig per Mausklick an und starrt konzentriert auf den Computermonitor, um zu sehen, ob sie das Bornitrid-Plättchen erwischt hat.

Das hat sie. Mit ein paar weiteren Klicks am Computer löst sich das zweilagige Objekt, und Xia legt die Flocken

Moiré-Übergitter

Wenn verschiedene zweidimensionale Materialien übereinandergeschichtet werden, deren hexagonale Gitter unterschiedlich groß sind, entsteht ein Moiré-Effekt. Der Versatz der Atome wiederholt sich in gleichen Abständen, wodurch sich ein Übergitter ergibt.



schnell, aber sorgfältig auf ein drittes Material, das mit Metallelektroden versehen ist. Dann erhitzt sie die Oberfläche und schmilzt damit den Kunststoffkleber auf dem Objektträger.

Vom Anfang bis zum Ende hat die Prozedur mehr als eine Stunde gedauert. Dabei hat Xia gerade einmal die untere Hälfte eines einfachen Materials zusammengesetzt. Sie zeigt mir einen anderen Stapel, den sie kürzlich zusammengebaut hat, und rattert einige der Bestandteile herunter, darunter die TMDs Wolframdiselenid und Molybdänditellurid. Es ist eines von dutzenden mikroskopischen »Sandwiches«, die sie im Lauf des letzten Jahres konstruiert und untersucht hat. Insgesamt besteht es aus zehn Schichten, die sie über mehrere Stunden aufeinandergestapelt hat.

Diese Schichtung von 2-D-Materialien verwirklicht einen lang gehegten Traum von Festkörperphysikern. Denn nun sind die Forscherinnen und Forscher nicht mehr bloß auf Stoffe beschränkt, die man im Boden findet oder langsam in einem Labor züchtet. Wie mit Legosteinen können sie jetzt hauchdünne Platten zusammenstecken, um maßgeschneiderte Strukturen mit gewünschten Eigenschaften zu bauen. Die erste große Entdeckung von Mak und Shan an der Cornell University betraf Exzitonen, gebundene Elektron-Loch-Paare, die bereits 2014 in TMDs beobachtet wurden. Exzitonen faszinieren Physiker, weil sie der Schlüssel zu einem der größten Ziele der Festkörperphysik sein könnten: Supraleitung bei Raumtemperatur.

Exzitonen spielen nach denselben seltsamen Regeln wie Elektronenpaare. Sie sind ebenfalls Bosonen, wodurch sie alle gemeinsam am gleichen Ort den energetisch günstigsten Zustand einnehmen können. Das macht sie zu einem Haufen ununterscheidbarer Teilchen, die sich

gleich verhalten, einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat. In diesem Zustand können sie bizarre Eigenschaften entwickeln, etwa ohne jeglichen Widerstand fließen – sie bilden dann ein »Suprafluid«. Und wenn ein Suprafluid elektrischen Strom führt, ist es supraleitend.

Im Gegensatz zu Elektronenpaaren, die sich gegenseitig abstoßen, verbinden sich Elektronen und Löcher gerne. Die Herausforderung bei der exzitonenbasierten Supraleitung besteht darin, das Elektron davon abzuhalten, das Loch zu füllen. Stattdessen muss man die elektrisch neutralen Paare dazu bringen, in einem Strom zu fließen – und das alles in einem möglichst warmen Raum. Bislang haben Mak und Shan das erste Problem gelöst. Und sie haben einen Plan, wie sie das zweite in Angriff nehmen könnten.

Auf der Suche nach Supraleitern, die auch bei Raumtemperatur funktionieren

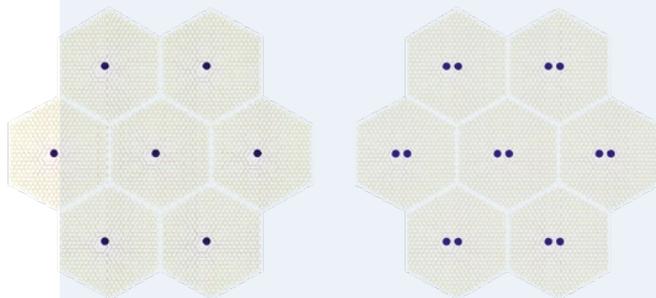
Damit eine Atomwolke überhaupt ein Bose-Einstein-Kondensat bildet, muss man sie mit starken Lasern abbremsen und sie so bis kurz über den absoluten Nullpunkt abkühlen, also auf etwa -270 Grad Celsius. Theoretiker vermuten jedoch seit Langem, dass Exzitonen-Kondensate auch bei höheren Temperaturen auftreten könnten. Die Cornell-Gruppe hat das mit stapelbaren TMDs überprüft. Dafür haben sie Elektronen in die obere Schicht eines zweilagigen Sandwichs eingeführt und gleichzeitig Elektronen aus der unteren Schicht entfernt, wodurch Löcher entstanden. Die Elektronen und Löcher verbanden zu Exzitonen, die extrem langlebig waren, weil die Elektronen nur sehr schwer in die untere Schicht dringen können, um die Löcher zu neutralisieren. Im Oktober 2019 meldete die Gruppe Anzeichen für ein Exzitonen-Kondensat bei vergleichsweise milden 100 Kelvin (zirka -170 Grad Celsius). In dieser Anordnung blieben die Exzitonen für etwa zehn Nanosekunden bestehen, was ihrer typischen Lebensdauer entspricht. Zwei Jahre später stellten die Forscher eine verbesserte Apparatur vor, in der die Exzitonen mehrere Millisekunden lang überdauerten.

Das Team versucht nun, die Exzitonen zum Fließen zu bringen. Allan MacDonald, ein theoretischer Physiker von der University of Texas in Austin und sein Doktorand Jung-Jung Su schlugen 2008 vor, ein elektrisches Feld anzulegen, damit sich sowohl Elektronen als auch Löcher in dieselbe Richtung bewegen. Um das im Labor umzusetzen, muss sich die Cornell-Gruppe wieder einmal mit ihrem ewigen Problemkind, den elektrischen Kontakten, auseinandersetzen. In diesem Fall braucht man mehrere Sätze von Elektroden an den TMD-Schichten: einige, um die Exzitonen herzustellen, und andere, um die Teilchen zu bewegen.

Shan und Mak glauben, dass sie auf dem besten Weg sind, Exzitonen bei bis zu 100 Kelvin zum Fließen zu bringen. Das sind für Menschen zwar immer noch extrem kalte Temperaturen (-173 Grad Celsius), aber es würde die sonst benötigten Nanokelvin-Bedingungen »um das Milliardenfache erhöhen«, wie Mak zu bedenken gibt.

Künstliche Atome

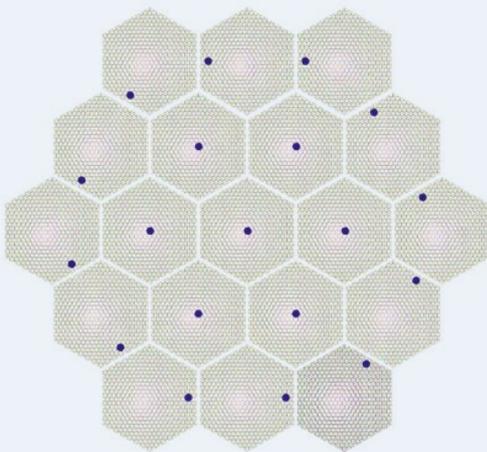
Fachleute haben herausgefunden, dass die wiederkehrenden Zellen von Moiré-Übergittern sich wie gigantische Atome verhalten. Indem man das elektrische Feld verändert, lässt sich die Anzahl der Elektronen variieren, die jede Zelle bewohnen. Somit ändert sich auch der Typ der simulierten Atome.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE BEARBEITUNG SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Chern-Isolator

Wenn man eine zweidimensionale Schicht verkehrt herum auf eine andere legt, zeigt das Moiré-Gitter ein ungewöhnliches Verhalten. Die Elektronen fließen den Rand des Materials entlang in eine Richtung, während die Teilchen im Inneren unbeweglich bleiben. Diese Art von Stoff ist als Chern-Isolator bekannt.



MERRILL SHERMAN / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Während sich das Cornell-Labor den TMD-Experimenten widmete, sorgte 2018 eine andere Überraschung für eine zweite 2-D-Materialrevolution. Der Physiker Pablo Jarillo-Herrero vom MIT hatte mit seinem Team zwei Graphenschichten leicht verdreht übereinandergestapelt, wodurch ein faszinierender neuer Stoff entstand (siehe »Spektrum« Januar 2020, S. 20). Indem sie die obere Schicht um exakt 1,1 Grad gegen die darunterliegenden Sechsecke rotierten, erzeugten sie einen leichten Versatz zwischen den Atomen. Dadurch ergab sich ein sich wiederholendes Muster großer »Superzellen«, das als Moiré-Übergitter bekannt ist. Der Theoretiker MacDonald hatte bereits 2011 mit einem Kollegen vorhergesagt, dass die einzigartige Kristallstruktur des Übergitters bei einem »magischen Winkel« von 1,1 Grad die Elektronen von Graphen verlangsamt, wodurch sie die Abstoßung ihrer Nachbarn spüren.

Wenn Elektronen sich gegenseitig wahrnehmen, passieren merkwürdige Dinge. Bei normalen Isolatoren, Leitern und Halbleitern geht man davon aus, dass Elektronen nur mit den Atomen wechselwirken – sich selbst nehmen sie hingegen nicht wahr, dafür rasen sie zu schnell umher. Bremst man sie jedoch, können sich die Elektronen anempeln und eine Reihe exotischer Quantenzustände bilden. Die Experimente von Jarillo-Herrero haben gezeigt, dass die Interaktionen der Elektronen in

verdrehem Graphen aus bisher ungeklärten Gründen zu einer besonders starken Form der Supraleitung führt.

Aber es passieren weitere seltsame Sachen: In dem Supergitter nehmen die Teilchen die einzelnen Atome nicht wahr, sondern erleben die Superzellen wie riesige Atome. Da diese mit mehreren Elektronen gefüllt sind, können einzelne Quantenzustände aus vielen Elektronen entstehen. Durch ein zusätzliches elektrisches Feld, das die durchschnittliche Anzahl der Elektronen pro Superzelle erhöht oder verringert, konnte die Gruppe von Jarillo-Herrero das zweilagige Material wahlweise zu einem Supraleiter oder einem Isolator machen – oder eine Reihe anderer merkwürdiger Zustände kreieren.

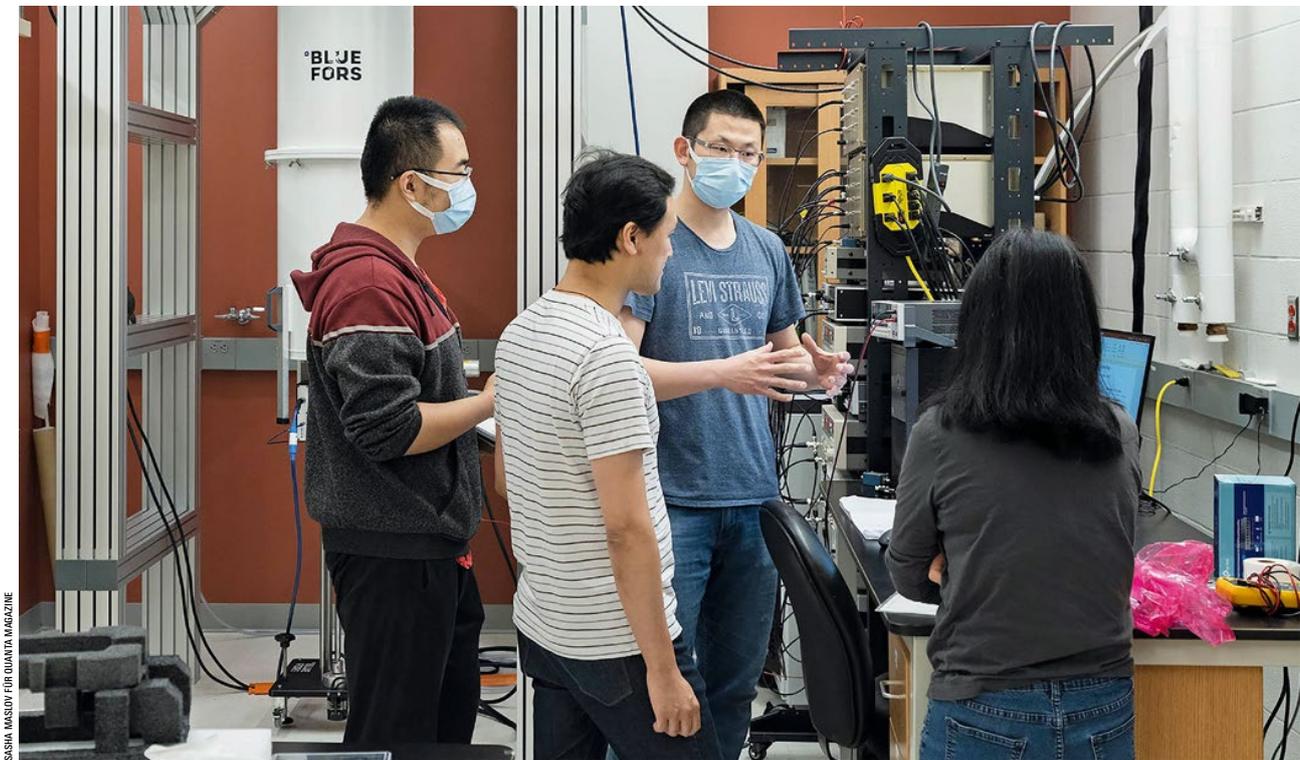
Physikerinnen und Physiker auf der ganzen Welt stürzten sich auf das neue Gebiet der »Twistronik«. Aber viele haben festgestellt, dass das Verdrehen schwieriger ist, als es scheint. Es ist nicht leicht, die Atome in die magische 1,1-Grad-Fehlstellung zu rücken. Häufig entstehen in den dünnen Schichten Knicke, die ihre Eigenschaften völlig verändern. Wie Xia von der Cornell University erzählte, brauche man normalerweise Dutzende von Versuchen, bis ein funktionsfähiges Material entsteht. Und selbst dann verhält sich jede Probe anders, so dass es fast unmöglich ist, manche Experimente zu wiederholen.

Auch hier erweisen sich TMDs als hilfreich: Sie bieten eine viel einfachere Möglichkeit, Moiré-Supergitter herzustellen. Denn TMDs können hexagonale Gitter unterschiedlicher Größe haben. Das Übereinanderstapeln eines Gitters aus etwas größeren Sechsecken über ein kleineres erzeugt daher ein Moiré-Muster, genau wie bei der Winkelverschiebung – nur dass keine Drehung zwischen den Schichten nötig ist, was die Umsetzung erheblich vereinfacht. Entsprechend gelingt es Xia in vier von fünf Fällen, ein TMD-Moiré-Material herzustellen.

Supergitter als riesige Atomsimulatoren

Diese Stoffe eignen sich ideal, um die Wechselwirkungen von Elektronen zu untersuchen. Da die TMDs Halbleiter sind, wirken ihre Elektronen schwer, im Gegensatz zu den »masselosen« Teilchen in Graphen. Und die gigantischen Moiré-Zellen verlangsamen sie zusätzlich: Während Elektronen in gewöhnlichen Kristallen von einem Atom zum benachbarten tunneln können, ist das in Moiré-Gittern kaum möglich, da die Superzellen etwa 100-mal weiter voneinander entfernt sind. Dadurch tummeln sie sich in einem kleinen Bereich und kommen miteinander in Kontakt.

Wang war einer der Ersten, der das Potenzial von TMD-Moiré-Supergittern erkannte. Berechnungen legten nahe, dass sich Elektronen in diesen Materialien in einer Art Kristallstruktur anordnen würden – wie es sonst Atome tun. In einem solchen so genannten Wigner-Kristall führt die starke Abstoßung zwischen den Elektronen dazu, dass sie an einem festen Platz festkleben. Wangs Team veröffentlichte 2021 das erste Bild eines solchen Zustands. Etwa zeitgleich entdeckten Shan und Mak, dass Elektronen in ihren TMD-Moiré-Gittern in fast zwei Dutzend verschiedenen Wigner-Mustern kristallisieren können.



SASHA MASDOV FÜR QUANTA MAGAZINE

KÜHLSCHRANK Labormitglieder von Shan und Mak unterhalten sich neben dem Apparat, der ihre Geräte auf kryogene Temperaturen kühlt.

Die TMD-Moiré-Materialien haben noch eine weitere faszinierende Eigenschaft: Macdonald und seine Mitarbeiter hatten 2018 vorausgesagt, dass die Stoffe eines der wichtigsten theoretischen Konzepte der Festkörperphysik perfekt umsetzen: das Hubbard-Modell, das herangezogen wird, um etliche Verhaltensweisen von Elektronen zu verstehen. Martin Gutzwiller, Junjiro Kanamori und John Hubbard haben das Modell 1963 unabhängig voneinander ausgearbeitet. Es bricht die enorme Vielfalt von Kristallen auf ihre wesentlichen Merkmale herunter.

Bei dem Modell geht man davon aus, dass in einem Gitter aus Atomen auf jedes Elektron zwei konkurrierende Kräfte einwirken: Es möchte sich einerseits bewegen und zu einem benachbarten Atom tunneln, andererseits wird es von den dort befindlichen Elektronen abgestoßen. Je nachdem, welche Kraft überwiegt, ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften, etwa die eines Isolators oder eines Leiters. Das Problem des Hubbard-Modells besteht darin, dass es sich bis auf den einfachsten Fall (Atome, die in einer Reihe angeordnet sind) mathematisch nicht lösen lässt.

Nun könnte man mit TMD-Moiré-Materialien das Hubbard-Modell im Labor simulieren – und so möglicherweise eines der größten Rätsel des Fachgebiets knacken: die Art des Klebstoffs identifizieren, der Elektronen zu supraleitenden Paaren in Cupraten verbindet. Anstatt sich mit einer unlösbaren Gleichung herumzuschlagen, »können wir nun einfach ein Experiment durchführen«, so Macdonald.

Um das Hubbard-Modell experimentell umzusetzen, haben Shan und Mak Schichten aus Wolframdisele- nid und

Wolframsulfid übereinandergestapelt, die ein Moiré-Supergitter bilden. Mit Elektroden können die Forscher das elektrische Feld, das durch das TMD-Sandwich verläuft, erhöhen oder verringern. Damit lässt sich steuern, wie viele Elektronen jede Superzelle füllen. Da sich die Zellen wie riesige Atome verhalten, ist der Wechsel von einem zu zwei Elektronen pro Superzelle wie die Umwandlung eines Gitters aus Wasserstoffatomen in eines aus Heliumteilchen. Im März 2020 ließen sich Atome mit bis zu zwei Elektronen erzeugen; im Sommer 2022 waren es schon acht. In gewisser Weise haben die Physiker so das uralte Ziel der Alchemie, Blei in Gold zu verwandeln, erreicht. Sie können sogar ein Gitter aus fiktiven Atomen mit beispielsweise je 1,38 Elektronen bilden.

Mak und Shan haben die Riesenatome und damit das Hubbard-Modell vollständig unter Kontrolle. Sie können die Atomgitter nach Belieben umformen. Eine Fähigkeit, die selbst für andere Festkörperphysiker an Magie grenzt. »Wenn ich ihre aufregendste und beeindruckendste Leistung benennen sollte, dann ist das diese«, so Kim.

Mit dem Modell konnten Shan und Mak eine 70 Jahre alte Frage beantworten: Angenommen, man würde einen Isolator nehmen und seine Atome verändern, um ihn in ein leitendes Metall zu verwandeln – wie würde die Umwandlung erfolgen? Abrupt oder allmählich? Mit ihrer Moiré-Alchemie konnte das Team der Cornell University das Gedankenexperiment 2021 im Labor umsetzen. Zunächst erzeugten die Forscher ein TMD-Übergitter, das sich wie ein Isolator verhielt. Dafür mussten sie die simulierten Atome sehr schwer machen, so dass sie die Elektronen an sich binden. Dann verkleinerten sie die Atome so lange, bis die Elektronen frei herumhüpfen konnten und das Übergitter zu einem leitenden Metall wurde. Sie beobachteten einen allmählich sinkenden elektrischen Widerstand. Der Übergang von einem Zustand in den

nächsten ist also nicht abrupt – und damit anders als bei Wasser, das plötzlich zu gefrieren beginnt. Dieses Ergebnis war für Fachleute spannend, da es eine interessante Möglichkeit eröffnete: Die Elektronen des Übergitters könnten eine lange gesuchte Art von Fluid bilden, eine Quantenspinflüssigkeit. Anders als sonst üblich würden sich die Spins der Elektronen bei extrem niedrigen Temperaturen nicht geordnet ausrichten – was weit reichende Folgen hat. So könnten die Partikel ein Verhalten annehmen, das beispielsweise für den Bau von Quantencomputern extrem vielversprechend ist.

Fast zur gleichen Zeit machte das Paar eine Entdeckung, die einige Physiker als seine bisher bedeutendste ansehen. »Es war eigentlich ein totaler Zufall«, sagt Mak. »Niemand hat damit gerechnet.« Als sie mit ihrer Forschung am Hubbard-Modell begannen, verwendeten die Wissenschaftler TMD-Sandwiches, bei denen die Sechsecke auf den beiden Schichten gleich ausgerichtet sind, Übergangsmetalle auf Übergangsmetalle und Chalkogenide auf Chalkogenide. Damals entdeckten sie den allmählichen Übergang vom Isolator zum Metall. Dann wiederholten sie zufällig das Experiment mit Materialien, die entgegengesetzt gestapelt waren (Übergangsmetall auf Chalkogenid).

Wie zuvor sank der Widerstand, als die Elektronen begannen, zu benachbarten Atomen zu hüpfen. Doch dann stürzte er plötzlich abrupt ab, und zwar so, dass sich die Forscher fragten, ob die Moiré-Schicht zum Supraleiter wurde. Als sie die Probe weiter untersuchten, stellten sie allerdings fest, dass sie auf den quantenanomalen Hall-Effekt gestoßen waren. Dabei verhalten sich die Elektronen an den Rändern des Materials vollkommen anders als in der Mitte, wo sie in einem isolierenden Zustand gefangen sind. An den Rändern fließen sie hingegen quasi ungestört in eine festgelegte Richtung, was den extrem niedrigen Widerstand erklärt, den die Forscher gemessen hatten. Durch Zufall hatten sie eine außergewöhnliche Art von Materie geschaffen, die als Chern-Isolator bekannt ist (siehe »Chern-Isolator«).

Die Ergebnisse häufen sich

2013 wurde der quantenanomale Hall-Effekt erstmals beobachtet. Dieser ist sehr empfindlich und bricht normalerweise zusammen, wenn die Temperatur über einige hundertstel Kelvin steigt. Youngs Gruppe in Santa Barbara hatte den Effekt 2019 in verdrehtem doppelagigem Graphen bei etwa 5 Kelvin nachgewiesen. Das Problem: Der Twist um 1,1 Grad ist wie oben beschrieben schwer umzusetzen und das Ergebnis somit kaum reproduzierbar. Nun haben Shan und Mak den Effekt bei fast der gleichen Temperatur erzielt – in einem TMD-Sandwich ohne Verdrehung, das jeder nachbauen kann. Sie sind überzeugt, dass sie mit etwas Tüftelei Chern-Isolatoren erzeugen können, die bis 50 oder 100 Kelvin bestehen bleiben. Sollten sie Erfolg haben, könnte das zu einer weiteren Möglichkeit führen, Strom ohne Widerstand fließen zu lassen – zumindest für winzige »Nanodrähte«.

Die bahnbrechenden Ergebnisse häufen sich, und die Forscher sind nicht zu bremsen. Als ich das Labor an der

Cornell University besuchte, beaufsichtigte Mak die Studierenden an einem riesigen Kühlschranks, mit dem sie ihre Geräte auf Temperaturen herunterkühlen, die tausendmal kälter sind als jene, mit denen sie bisher gearbeitet haben. Bei den »wärmeren« Bedingungen gab es bereits so viel Neues zu entdecken, dass die Gruppe noch keine Gelegenheit hatte, den kryogenen Bereich nach Anzeichen von Supraleitfähigkeit zu durchsuchen. Sollten die TMDs supraleitend werden, würde das eine wichtige Frage beantworten: Ob die besondere Form von Magnetismus, die Cupraten eigen ist und bei TMDs fehlt, ein wesentlicher Bestandteil des elektronenbindenden Klebstoffs ist.

Mak, Shan und ihre Gruppe haben noch nicht einmal damit begonnen, einige der ausgefalleneren TMDs zu untersuchen. Trotzdem spekulieren sie schon über die neuen technologischen Möglichkeiten, die sich durch ihre Fortschritte eröffnen könnten: Selbst wenn Hochtemperatursupraleitung schwer zu erreichen ist, ließen sich die Bose-Einstein-Kondensate für ultraempfindliche Quantensensoren nutzen. Zudem könnte eine bessere Kontrolle der Chern-Isolatoren leistungsstarke Quantencomputer erlauben. Und das sind nur die offensichtlichen Ideen.

Verbesserungen in der Materialwissenschaft führen oft zu Anwendungen, die niemand kommen sah. So hätten die Entwickler des Transistors sicherlich kaum Smartphones vorhergesagt, die von Milliarden ihrer mikroskopisch kleinen Schalter angetrieben werden. Und die Erfinder von Glasfasern, die damals Licht über ihren Labortisch hin- und herschickten, haben sich wahrscheinlich nicht ausgemalt, dass eines Tages tausende Kilometer lange optische Unterwasserkabel ganze Kontinente miteinander verbinden würden. Zweidimensionale Materialien könnten sich in ähnlich unvorhersehbare Richtungen entwickeln. ◀

QUELLEN

Mak, K. F. et al.: The valley effect in MoS₂ transistors. *Science* 344, 2014

Mak, K. F. et al.: Simulation of Hubbard model physics in WSe₂/WS₂ moiré superlattices. *Nature* 579, 2020

Shan, J. et al.: Correlated insulating states at fractional fillings of moiré superlattices. *Nature* 587, 2020

Shan, J. et al.: Quantum anomalous Hall effect from inter-twined moiré bands. *Nature* 600, 2021

Wang, Z. et al.: Evidence of high-temperature exciton condensation in two-dimensional atomic double layers. *Nature* 574, 2019



Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und bearbeitete Fassung des Artikels »Physics Duo Finds Magic in Two Dimensions« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.