

Wigner-Kristall in zweidimensionalen Festkörpern?

Bei der Suche nach elektronischen Wigner-Kristallen gibt es neue Kandidaten und neue Diagnostiken.

Michael Bonitz und Jan-Philip Joost

Die Übergangsmetall-Dichalcogenide (TMDs) bieten faszinierende Möglichkeiten für die Beobachtung elektronischer Korrelationseffekte in Festkörpern. Mehrere Arbeiten gaben dieses Jahr den experimentellen Nachweis eines Elektronenkristalls bekannt [1–4] und interpretierten dies als Bestätigung [3, 4] für Eugene Wigners Vorhersage von 1934 [5]. Offen bleibt, wie stark das Kristallgitter die Elektronenkonfiguration bestimmt. Diese Frage könnte hochempfindliche Tunnelspektroskopie beantworten, die erstmals einzelne Elektronen direkt abbildet [2].

Aus der Quantenmechanik folgt, dass Elektronen in einem periodischen Kristallgitter räumlich delokalisierte Zustände (Bloch-Wellen) einnehmen, da dies ihre (kinetische) Energie K minimiert. Dieses Bild vernachlässigt die abstoßende Coulomb-Wechselwirkung der Elektronen untereinander: $V(r) = e^2/(4\pi\epsilon_0\epsilon_r r)$. In vielen Materialien ist sie von derselben Größenordnung wie K oder deutlich größer. Elektronen ohne jegliche kinetische Energie könnten die Wechselwirkungsenergie im Grundzustand

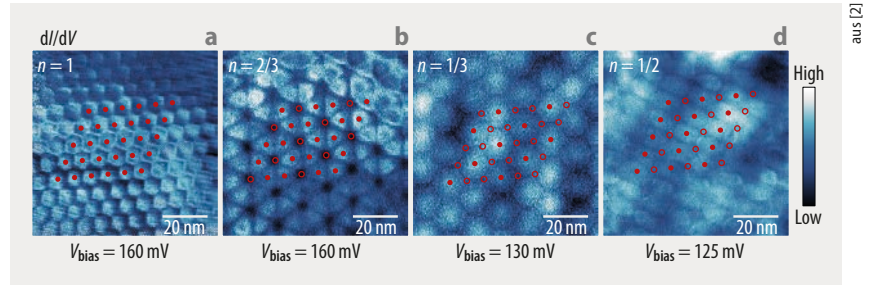


Abb. 1 Die Variation der Spannung V_{bias} an der Tunnelspitze stellt im Übergangsmetall-Dichalcogenid-Bilayer die verschiedenen Füllfaktoren n (bezogen auf das Moiré-Gitter) ein. Die differentiellen Leitfähigkeits-Scans zeigen die (un)besetzten Gitterplätze (volle bzw. offene rote Kreise). Je nach Füllfaktor tritt ein Mott-Isolator (a) oder ein verallgemeinerter Wigner-Kristall (b–c) auf.

durch eine räumlich periodische Anordnung lokalisierter freier (Leitungs- bzw. Valenz-)Elektronen minimieren.

Diesen hypothetischen Elektronenkristall hatte Wigner für das Elektronengas in Metallen vorhergesagt [5]. Ein zweifelsfreier experimenteller Nachweis der spontanen Kristallisation von Elektronen in Festkörpern fehlt bisher, da in einem Quantensystem die kinetische Energie immer endlich ist. Für die Kristallisation braucht es daher hinreichend niedrige Elektronendichten, sehr rei-

ne Proben und eine geringe Abschirmung der Coulomb-Wechselwirkung (geringe Dielektrizitätskonstante ϵ_r). Gleichzeitig ist die Kristallisation von Ladungen relativ einfach außerhalb einer Festkörpermatrix zu erreichen. So bilden Ionen und Elektronen in Fallen bei hinreichend tiefen Temperaturen spontan einen Kristall. Ein Kristall aus Ionen existiert auch im Inneren von Zwergsternen – eingebettet in ein ideales Fermi-Gas der Elektronen, welches das Fallenpotential ersetzt. In staubigen Plasmen oder kolloidalen Systemen kristallisieren hochgeladene Mikropartikel, was sich mit Einzelteilchen-Auflösung direkt beobachten lässt, z. B. [6].

In Festkörpern wurde die Kristallisation bisher nur im Magnetfeld demonstriert, da dieses Elektronentunneln und Kristallschmelzen unterbindet. Dagegen haben Alexej Abrikosov und andere Wigner-Kristalle ohne Magnetfeld in Halbleitern für Löcher vorhergesagt – bei hinreichend flachen Bändern und großer Lochmasse m_h , wo sie aber mit der Exzitonenbildung konkurrieren. Quanten-Monte-Carlo-Simulationen (QMC) bestätigen tatsächlich einen Loch-Wigner-Kristall, eingebettet in ein Elektronengas genau wie in Zwergsternen, sobald $m_h/m_e > 80$ erfüllt ist [7].

Die TMDs stellen nun einen neuen Kandidaten für Wigner-Kristalle

Kurzgefasst

Präzise Lebensdauer

Am Los Alamos Neutron Science Center, USA, ist es gelungen, die Lebensdauer des Neutrons präzise wie nie zu bestimmen: $\tau_n = (877,75 \pm 0,28_{\text{stat}} \pm 0,16_{\text{syst}})$ s. Dieser Wert, gemessen mit ultrakalten Neutronen, erhöht die Diskrepanz zum Ergebnis für schnelle Neutronen. Warum die Methoden verschiedene Werte liefern, bleibt unklar.

F. M. Gonzalez et al., Phys. Rev. Lett. **127**, 162501 (2021)

Wachsender Katalog

Die neueste Sammlung an Gravitationswelleneignissen umfasst 90 Signale – 35 mehr als bisher. Der vierte Beobachtungslauf soll nächstes Jahr beginnen.

LIGO Scientific Coll., VIRGO Coll. und KAGRA Coll., arXiv 2111.03606 (2021)

Training für neuronale Netze

Ein interdisziplinäres Forschungsteam der Universitäten Heidelberg und Bern, Schweiz, hat gepulste neuronale Netze entwickelt, die in Aufbau und Funktionsweise einem natürlichen Nervensystem ähneln. Um diese komplexen Systeme zu trainieren, haben die Forschenden einen Algorithmus erstellt, der die Informationen ausschließlich in den Pulsen kodiert und übermittelt. Das macht die Systeme schnell und effizient. Im Rahmen des Human Brain Project gelang es, das trainierte Netz auf dem neuromorphen Computer BrainScaleS-2 zu implementieren. Die Arbeiten könnten helfen, Ansätze des Deep Learning auf die Neurowissenschaft zu übertragen, um das menschliche Gehirn besser zu verstehen.

J. Göltz et al., Nat. Mach. Intell. **3**, 823 (2021)

in Festkörpern dar. Michael Crommie und Mitarbeiter demonstrierten zuerst durch ein neues optisches Verfahren zur Widerstands- und Kapazitätsmessung [1] und kurz darauf durch ortsaufgelöste Abbildung mittels Tunnel-spektroskopie (STM) die Lokalisation der Elektronen in WSe_2/WS_2 -Bilayern [2]. Allerdings ist STM nur sensitiv auf Oberflächenzustände. Um auch Zustände im Volumen zu detektieren, gibt es andere spezielle Techniken, z. B. [8]. Da sich die Elektronen im aktuellen System in Abständen von nur ca. 8 nm aufhalten, bedarf ihre direkte räumliche Beobachtung einer hohen Ortsauflösung und Sensitivität. Konventionelle STM-Verfahren ermöglichen dies zwar prinzipiell, modifizieren jedoch die Gitterstruktur der Elektronen durch die Tunnelspitze stark. Um dies zu verhindern, fügten die Autoren auf ihrem System eine Monolage Graphen hinzu und trennten sie mit einer 5 nm dicken hBN-Schicht vom WSe_2/WS_2 -Bilayer. Diese Trennschicht war einerseits dünn genug, damit die lokalisierten Elektronen im WSe_2/WS_2 die Elektronenstruktur im darüberliegenden Graphen modifizieren konnten, was die Gitteranordnung der Elektronen auch mit den zusätzlichen Schichten präzise detektierbar machte. Andererseits reichte die Dicke aus, damit die Tunnelspitze die Probe nicht beeinflusste.

In den bei variiertem Dotierung beobachteten Elektronenkonfigurationen (Abb. 1) deutet der Elektronenabstand von 8 nm auf niedrige Dichten hin. Bei einem Füllfaktor $n = 1$ liegt ein Mott-Isolator vor (Abb. 1a). Bei fraktioneller Füllung von $n = 1/3$ und $n = 2/3$ zeigt sich eine vollständig geänderte Elektronenstruktur mit Dreiecksgitter (Abb. 1b, c), wie man es bei einem Wigner-Kristall in 2D erwartet, oder bei $n = 1/2$ eine streifenförmige Anordnung (Abb. 1d).

Das untersuchte System zeichnet sich durch eine leichte Verdrehung der beiden Monolagen von etwa einem Grad relativ zueinander aus („Twisted Bilayer“-TMD). Dabei entsteht ein Übergitter in Form eines Moiré-Musters, dessen Potentialmaxima um mehr als das 25-Fache des ursprünglichen Gitterabstands auseinanderliegen. Der Abstand λ_w zwischen den

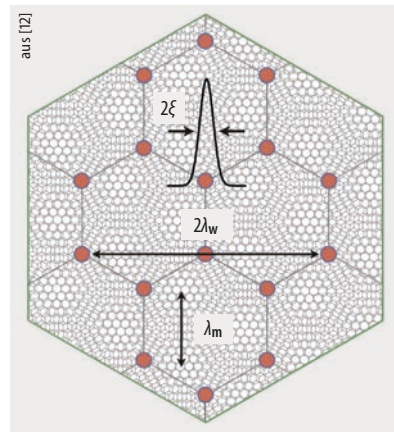


Abb. 2 Im Moiré-Übergitter (grau) sind die Elektronen (rot) eines verallgemeinerten Wigner-Kristalls an den Gitterplätzen lokalisiert – mit einer Breite 2ξ und einem Abstand λ_w für einen Füllfaktor $n = 2/3$.

Elektronen hängt vom Füllfaktor n ab, der durch die angelegte Spannung kontrolliert wird (Abb. 2). Wie Allan MacDonald und Mitarbeitende in theoretischen Arbeiten zeigten [9], lassen sich damit starke elektronische Korrelationen realisieren. Die Messergebnisse (Abb. 1) stimmen sehr gut mit der für dieses System erwarteten Moiré-Gitterstruktur überein – das Elektronengitter folgt also der darunter liegenden Potential-Landschaft. John Hubbard hatte einen solchen Zustand für eindimensionale Moleküle vorhergesagt und als „verallgemeinerten“ Wigner-Kristall bezeichnet [10]. Die Elektronenkonfiguration ist darin nicht ausschließlich Folge der repulsiven Coulomb-Wechselwirkung wie im Wigner-Kristall, sondern auch maßgeblich vom Kristallgitter (hier dem Moiré-Gitter) beeinflusst. Die aktuellen Experimente liefern ein klares Indiz für den Nachweis eines verallgemeinerten Wigner-Kristalls in Twisted Bilayer-TMDs [1, 2].

Gleichzeitig werfen die Experimente neue Fragen auf, etwa ob die Beobachtung von Elektronen-Lokalisation gleichbedeutend mit Kristallisation ist. Das ist nicht der Fall, denn genauso gut könnte es sich um eine stark korrelierte Elektronen-Flüssigkeit handeln. Für einen Kristall in zwei Dimensionen gilt es, die Existenz von (quasi-)langreichweitiger Ordnung nachzuweisen, wobei der „Fest-Flüssig“-Übergang nach dem Kosterlitz-Thouless-Szenario erfol-

gen sollte. Zur theoretischen Verifikation müsste über das populäre Moiré-Hubbard-Modell hinaus [9, 12] die endliche Ausdehnung der Elektronen 2ξ (Abb. 2) berücksichtigt werden, etwa durch QMC (siehe z. B. [11]).

Schließlich stellt sich die Frage, was die gefundenen Elektronenkonfigurationen mit einem „echten“ Wigner-Kristall gemein haben. Dafür wäre es interessant, die Tiefe des Moiré-Gitterpotentials zu reduzieren, z. B. durch ein Vergrößern des Schichtabstands. Sobald der Elektronenkristall für beliebige Dichten unterhalb eines kritischen Werts existiert und nicht nur für diskrete Werte des Füllparameters, liegt Wigner-Kristallisation vor. Alternativ lassen sich direkt TMD-Monolagen, etwa von MoSe_2 , untersuchen [3] oder MoSe_2 -Bilayer ohne Verdrehung [4]. Beide Arbeiten haben die Beobachtung von „echter“ Wigner-Kristallisation bekanntgegeben; allerdings erfolgte der Nachweis indirekt durch die Änderung der optischen Eigenschaften von Exzitonen bei der Wechselwirkung mit dem Elektronensystem. Auch für diese Systeme bleibt der Einfluss des Kristallgitters auf die Elektronenkonfiguration offen, könnte sich aber mithilfe der neuartigen Tunnelspektroskopie [2] klären lassen.

- [1] E. C. Regan et al., Nature **597**, 359 (2021)
- [2] H. Li et al., Nature **597**, 650 (2021)
- [3] T. Smoleński et al., Nature **595**, 53 (2021)
- [4] You Zhou et al., Nature **595**, 48 (2021)
- [5] E. Wigner, Phys. Rev. **46**, 1002 (1934); Trans. Faraday Soc. **34**, 678 (1938)
- [6] M. Bonitz et al., Rep. Prog. Phys. **73**, 066501 (2010)
- [7] M. Bonitz et al., Phys. Rev. Lett. **95**, 235006 (2005)
- [8] R. M. Feenstra et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 1176 (1993); H. Zheng et al., Nat. Comm. **5**, 2992 (2014)
- [9] Fengcheng Wu et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 026402 (2018)
- [10] J. Hubbard, Phys. Rev. B **17**, 494 (1978)
- [11] A. Filinov et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3851 (2001)
- [12] B. Padhi et al., Phys. Rev. B **103**, 125146 (2021)

Die Autoren

Prof. Dr. Michael Bonitz und **Jan-Philip Joost**, Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Christian-Albrechts-Universität Kiel, Leibnizstraße 15, 24118 Kiel