

Spinentartung – bei zwei Leitfähigkeitsquanten in der thermischen Leitfähigkeit. Das bedeutet, dass für Gold bei Zimmertemperatur tatsächlich eine Quantisierung der beiden Leitfähigkeiten nachweisbar ist. Zum anderen befinden sich die Maximalwerte der Verteilung sehr gut auf der Diagonalen, was die Gültigkeit des Wiedemann-Franz-Gesetzes bestätigt. Die geringe

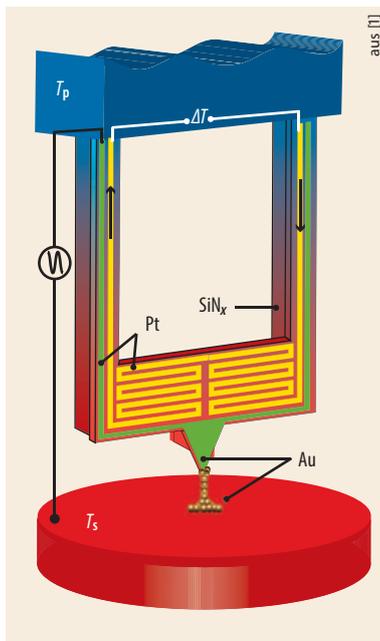


Abb. 2 Zwei Thermometerträger bilden den Rahmen des Sensors. Die mäandrierende Platin-Leiterbahn (gelb) dient als Thermometer, während mit den äußeren Leiterbahnen (grün) der elektrische Widerstand des Punktkontakts bestimmt wird. Der Wärmestrom erzeugt eine Temperaturdifferenz zwischen dem oberen Ende des Sensors (blau) und der Spitze direkt oberhalb des Punktkontakts (rot).

Abweichung von wenigen Prozent über alle Messungen lässt sich mit dem phononischen Beitrag zur Wärmeleitung sowie Wärmeübertrag aus dem Nahfeld erklären [5].

Anders sieht die Situation für Platin aus. Zwar folgt das Histogramm wieder dem Verlauf der Diagonalen, ausgeprägte Häufungen bei den Leitfähigkeitsquanten treten aber nicht auf. Berechnungen und Simulationen liefern die elektronische Struktur des Platins als mögliche Erklärung: Bei Zimmertemperatur sind mehrere parallele Leitfähigkeitskanäle vorhanden, zwischen denen thermisch angeregt geschaltet wird. Eine aufwändige Kombination aus Molekulardynamik, Dichtefunktionaltheorie und Nichtgleichgewichts-Greens-Formalismus beschreibt die experimentellen Verhältnisse möglichst detailliert. Simulation und Experiment stimmten für Gold und Platin sehr gut überein. Dieser theoretische Ansatz stellt allgemein ein mächtiges Werkzeug dar, um verschiedenste komplexe Fragestellungen in diesem Bereich zu behandeln.

Über das wissenschaftliche Interesse an diesen Resultaten hinaus erlaubt es der experimentelle Aufbau, thermische Leitfähigkeiten einzelner Moleküle zu messen und die physikalischen Eigenschaften kleinster Systeme gezielter zu erforschen. Außerdem ist es möglich, diese Systeme elektrisch und thermisch präzise zu designen.

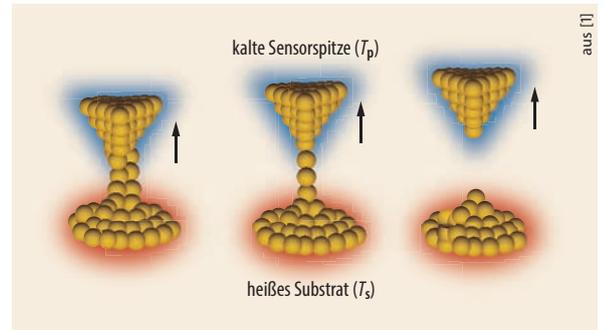


Abb. 3 Um Punktkontakte zu erzeugen, beginnt man mit Verbindungen aus vielen Atomen (links). Beim langsamen Auseinanderziehen lösen sich diese, bis eine Kette von Atomen verbleibt (Mitte). Weiteres Auseinanderziehen zerreißt die Verbindung: Es fließt kein Strom mehr (rechts).

Wie schnell sich dieses Forschungsgebiet aktuell entwickelt, zeigt ein Artikel einer Gruppe am IBM Forschungszentrum in Rüschlikon. Die Schweizer Forscher haben das Thermometer zur Messung des Wärmestroms in einer Membrananordnung der Probe integriert und kamen zu ähnlichen Resultaten und Schlussfolgerungen [6].

Achim Kittel

- [1] L. Cui et al., Science 10.1126/science.aam6622 (2017)
- [2] G. Wiedemann und R. Franz, Annalen der Physik **165**, 497 (1853)
- [3] B. J. van Wees, et al., Phys. Rev. Lett. **60**, 848 (1988)
- [4] M. Buttiker et al., Phys. Rev. B **31**, 6207 (1985)
- [5] K. Kloppstech et al., Nat. Comm. (2017) DOI: 10.1038/ncomms14475
- [6] N. Mosso et al., Nat. Nanotechnol. (2017) DOI: 10.1038/NNANO.2016.302

Prof. Dr. Achim Kittel, Institut für Physik, Universität Oldenburg, Carl-von-Ossietzky Str. 9 – 11, 26129 Oldenburg

■ Kalte Atome in suprasolider Phase

Physiker erzeugen in kalten Gasen eine lichtinduzierte Phase, die gleichzeitig kristallin und supraflüssig ist.

Seit über hundert Jahren kennen wir Supraflüssigkeiten wie ^4He , die bei sehr niedrigen Temperaturen ohne Reibung fließen können. Die Quantenmechanik sagt jedoch noch Exotischeres vorher: Suprasolide Phasen, in denen ein Stoff sowohl kristallin als auch supraflüssig ist. Doch wie kann Materie gleichzeitig diese beiden Eigenschaften haben? Dies widerspricht unserer Intuition. Kein Wunder

also, dass darüber seit vielen Jahrzehnten heftig diskutiert wird [1]: Lässt sich ein Suprasolid zusammenpressen? Folgt seine Masse einer extern angewandten Rotation wie bei einem Festkörper oder entkoppelt sie wie bei supraflüssigem ^4He ? Muss man sich einen suprasoliden Körper als eine Flüssigkeit mit einer Dichtewelle vorstellen, d. h. mit einer langreichweitigen, periodisch modulierten Massen-

verteilung (Abb. 1a)? Oder als einen Kristall mit einer zusätzlichen flüssigen Komponente (Abb. 1b)? In der Tat sind beide Sichtweisen richtig.

Obwohl Eugene Gross bereits 1957 ein detailliertes Szenario entwickelt hat, wie suprasolide Phasen realisierbar sein könnten (Abb. 1a) [2], ließen sich diese bisher experimentell nicht zweifelsfrei nachweisen. Die zweite Sichtweise geht von einem fast perfekten Kristall mit

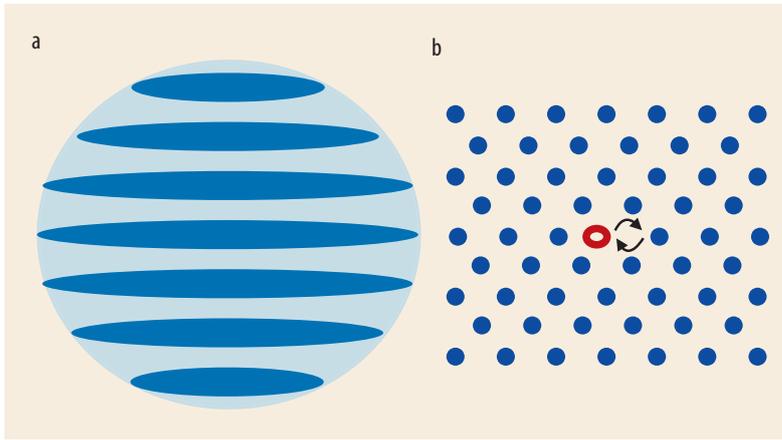


Abb. 1 Ein Suprasolid könnte durch eine langreichweitige Dichtewelle in einer Supraflüssigkeit (a) [2] oder die Deloka-

lisierung von Atomen in einem bosonischen Kristall entstehen (b) [3].

wenigen Leerstellen aus (Abb. 1b). Benachbarte Atome können durch Quantenfluktuationen diese Leerstellen füllen und so selbst eine Leerstelle hinterlassen [3]. Da dies in einem bosonischen Quantenkristall ohne Energieaufwand geschieht, würde es zur Kondensation eines kleinen Teils der Atome führen und Phänomene, die normalerweise in Supraflüssigkeiten vorkommen, erklären. Das leichte Element ^4He bildet bei einem Druck von mindestens 25 Bar einen Kristall, der die ausgeprägtesten quantenmechanischen Eigenschaften aufweist.

Eunsong Kim und Moses H. W. Chan stellten vor 15 Jahren eine kleine Massenkopplung in einem Torsionsoszillator fest [4], indem sie eine kleine Abweichung der Resonanzperiode im Vergleich zu der eines klassischen Systems beobachteten. Das weckte das Interesse an suprasoliden Phasen neu. Leider hat sich mittlerweile herausgestellt, dass die Interpretation dieser Experimente falsch war. Heutzutage ist unstrittig, dass auch der Grundzustand von ^4He ein Isolator ohne Leerstellen ist. Seitdem haben numerische Simulationen gezeigt, dass sich Suprasolidität entlang von Defekten wie Versetzungen und Korngrenzen ausbilden kann, was zu noch exotischeren Phänomenen führt. Diese Annahmen sind erst vor Kurzem experimentell bestätigt worden [5].

Die Suche nach Suprasolidität im Grundzustand blieb offen, und

andere Systeme rückten in den Mittelpunkt der Forschung. So stellen kalte Gase flexible Werkzeuge für eine „Quantensimulation“ von Suprasolidität dar, weil sie besonders rein, modifizierbar und kontrollierbar sind. Damit gelangen tatsächlich große Fortschritte. Die Arbeitsgruppe von Tilman Esslinger an der ETH Zürich konnte 2010 ein so genanntes Gittersuprasolid nachweisen [6], das die diskrete Symmetrie eines zugrundeliegenden Gitters weiter bricht. Dazu kühlten die Forscher ein verdünntes Gas von ^{87}Rb -Atomen auf ein paar Nanokelvin ab. Die Atome bildeten dann ein Bose-Einstein-Kondensat, das sich wie eine Supraflüssigkeit verhält. Dieses Kondensat wird in eine optische Kavität gebracht, die einem optischen Resonator mit zwei Spiegeln ähnelt. Ein Pumplaser mit einer Frequenz nahe der Resonanzfrequenz des Resonators beleuchtet die Atome von der Seite. Ist der Pumplaser ausreichend stark,

streuen Photonen am atomaren Gas, und die Atome gehen in einen selbstorganisierten Zustand über, wobei sie sich nur in jedem zweiten Minimum des Lichtpotentials befinden. Da es dazu zwei äquivalente Möglichkeiten gibt, entspricht dies einer diskreten Symmetriebrechung. Als erfolgreicher Nachweis für Suprasolidität gilt aber nur die spontane Symmetriebrechung des kontinuierlichen Raums.

Spontan gebrochen

Zwei Experimente haben nun genau diesen Schritt realisiert: Sie konnten die Translationsinvarianz im kontinuierlichen Raum brechen und gleichzeitig Phasenkohärenz herstellen, die für eine Supraflüssigkeit notwendig ist.

Die Esslinger-Arbeitsgruppe erweiterte das frühere Experiment um eine zweite Kavität [7]. Der subtile Unterschied ist nun, dass man die jeweiligen diskreten Symmetrien von zwei Kavitäten zu einer größeren Symmetrie kombinieren kann, die äquivalent zu der des kontinuierlichen Raums ist. Wenn beide Kavitäten fast gleiche Eigenschaften haben, gibt es einen kleinen Parameterbereich, in dem man gleichzeitig kristalline und supraflüssige Ordnungen durch Analyse der atomaren Impulsverteilung messen kann (Abb. 2): Ohne Lichtstreuung tritt nur ein starkes Signal in der Mitte auf (das periodisch wiederholt wird), das auf Suprafluidität hinweist (Abb. 2a). In Anwesenheit von Licht in den Kavitäten sind zusätzliche, für die suprasolide Phase charakteristische Signale unter bestimmten Winkeln

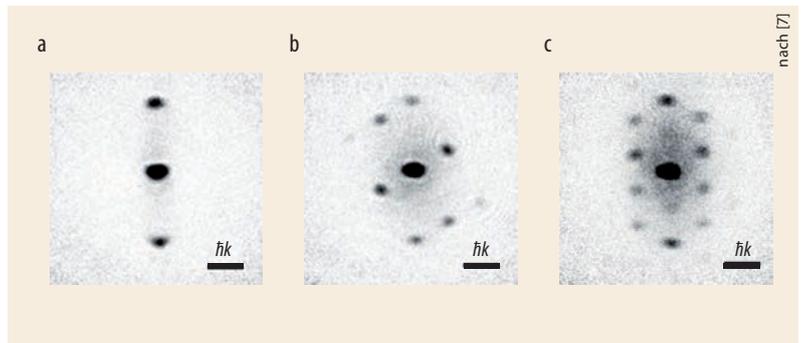


Abb. 2 Die atomare Impulsverteilung in einem Bose-Einstein-Kondensat von ^4He ohne Lichtstreuung (a) und mit Licht-

streuung in einer (b) bzw. in beiden Kavitäten (c).

zu sehen, die durch die Kavitätsorientierung festgelegt sind.

Die Physiker aus der Arbeitsgruppe von Wolfgang Ketterle am MIT kühlen ^{23}Na -Atome bis zur Kondensation [8]. Ein Zwei-Photonen-Raman-Laser induziert dann eine effektive Spin-Bahn-Kopplung zwischen den Atomen. Jeder effektiven Spinkomponente entsprechen zwei Impulse, die eine stehende Welle und damit atomare Dichtestreifen verursachen. Diese ließen sich bisher nicht experimentell beobachten. Bei den effektiven Spinkomponenten handelt es sich nicht um atomare Hyperfeinniveaus, sondern um die zwei Niveaus eines asymmetrischen Doppeltopf-Potentials, das durch die Überlagerung von zwei Lasern mit doppelter Frequenz entsteht. Die Streifen bilden sich senkrecht dazu. Obwohl sich suprafluide Streifen und suprasolide Quantenkristalle unterscheiden, haben sie die gleichen Symmetriebrechungseigenschaften. Ferner

wird im Experiment die diskrete Symmetrie entlang der Richtung des Doppeltopf-Potentials weiter gebrochen. Dieses ist äquivalent zu einem Gittersuprasolid.

Zusammenfassend ist es nun gelungen, suprasolide Eigenschaften in kalten Gasen im Sinne von **Abb. 1a** experimentell nachzuweisen. Möglich war dies durch bestimmte Wechselwirkungen zwischen Licht und Atomen, mit denen sich ein langreichweitiges Potential herstellen lässt. Die wesentlich neue Erkenntnis liegt in der spontanen Symmetriebrechung der Translationsinvarianz im kontinuierlichen Raum. Die Experimentatoren sind nun in der Lage, die kontraintuitiven Eigenschaften von Suprasoliden zu untersuchen. Sie kommen dem Ziel immer näher, Suprasolidität durch Zweiteilchenwechselwirkung in einem kontinuierlichen System herzustellen, das nur aus einer Komponente und möglichst wenigen Atomen pro Einheitszelle

besteht. Die Existenz einer suprasoliden Phase unter diesen Bedingungen bleibt theoretisch hoch umstritten.

Lode Pollet

- [1] *M. Boninsegni* und *N. V. Prokof'ev*, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 759 (2012)
- [2] *E. P. Gross*, *Phys. Rev. B* **106**, 161 (1957)
- [3] *A. F. Andreev* und *I. M. Lifshitz*, *Sov. Phys. JETP* **29**, 1107 (1969)
- [4] *E. Kim* und *M. H. W. Chan*, *Nature* **427**, 225 (2004); *Science* **305**, 1941 (2004)
- [5] *S. G. Soyler* et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**, 175301 (2009); *M. W. Ray* und *R. B. Hallock*, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 235301 (2008); *A. B. Kuklov* et al., *Phys. Rev. B* **90**, 184508 (2014)
- [6] *K. Baumann* et al., *Nature* **464**, 1301 (2010)
- [7] *J. Léonard* et al., *Nature* **543**, 87 (2017)
- [8] *J.-R. Li* et al., *Nature* **543**, 91 (2017)

Prof. Dr. Lode Pollet,
Department für Physik,
Arnold Sommerfeld Center A405,
LMU München, The-
resienstr 37, 80333
München



WILEY

NEW!

**Your Daily
Quantum of Photonics**

PhotonicsViews.com
The international
news platform for industry
and research in

- Optics
- Photonics
- Laser Technology

PhotonicsViews.com