

Neuer Schwung durch kalte Atome

Kalte Atome in angeregten Bändern sind vielversprechend für die Suche nach topologischen Superflüssigkeiten.

Tobias Grass

Während alle Teilchen des Standardmodells in zwei Kategorien fallen – Bosonen oder Fermionen –, existieren mit den elementaren Anregungen komplexer Vielteilchen-Systeme, beispielsweise in Form von lokalen Abweichungen von der Grundzustandsdichte, auch (Quasi-)Teilchen jenseits dieser Dualität, sogenannte Anyonen. Systeme, die solche Anyonen zulassen, sind wesentlich durch topologische Eigenschaften gekennzeichnet, zum Beispiel durch das Vorhandensein eines magnetischen Feldes oder anderer intrinsischer Mechanismen, welche die Zeitumkehrinvarianz brechen, die also das dynamische Verhalten nach einer Zeitspiegelung verändern. Besonders interessant ist die Verbindung von topologischen Eigenschaften und Supraleitung: Meist sind die Anregungen eines Supraleiters eine Mischung aus Teilchen- und Loch-Zuständen. Das schließt, als seltenen Spezialfall, die Möglichkeit ein, dass die Erzeugung einer elementaren Anregung nicht von deren Vernichtung zu unterscheiden ist. Anregungen mit dieser exotischen Eigenschaft sind als Majorana-Moden bekannt. Bei ihnen handelt es sich um Anyonen, denn jeweils zwei räumlich getrennte Majorana-Moden bewirken eine zweifache Entartung, und der

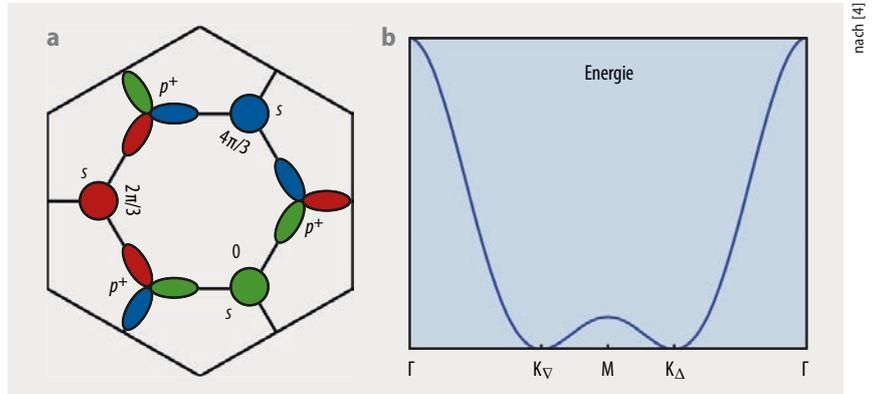


Abb. 1 In der Einheitszelle des Bornitrid-Gitters (a) füllen die kalten ⁸⁷Rb-Atome das zweite Energieband (b), dessen Minima in den K-Punkten liegen. Wird nur ein K-Punkt besetzt, ist die Zeitumkehrinvarianz gebrochen und auf jedem zweiten Gitterplatz dominieren p⁺-Orbitale mit Drehimpuls-Quantenzahl +1.

Austausch der Majoranas führt die entarteten Zustände ineinander über. Das weicht klar vom Verhalten von Bosonen oder Fermionen ab, bei denen der Austausch identischer Teilchen höchstens das Vorzeichen der Wellenfunktion beeinflusst. Insbesondere lassen sich jeweils zwei entartete Zustände als Qubit auffassen, sodass der Austausch von Majoranas eine interessante, topologisch robuste Möglichkeit der Quanteninformationsverarbeitung in Aussicht stellt [1].

Von wenigen elektronischen Materialien wie Sr₂RuO₄ abgesehen kommen für eine solche topolo-

gische Supraleitung bislang vor allem „Misch“-Systeme infrage [2]. Bei diesen erzeugt der Paarungsterm eines normalen Supraleiters an der Grenze zu einem Material mit starker Spin-Orbit-Kopplung mögliche Majorana-Anregungen. Allerdings ist eine zweifelsfreie Identifikation der topologischen Anregungen bis heute unerreicht [3]. Forschenden aus China, USA und Deutschland ist es nun gelungen [4], das bosonische Analogon eines chiralen Supraleiters künstlich zu erzeugen, ein chirales Superfluid [5]. Da dieses sich durch ähnliche topologische Anregungen wie der

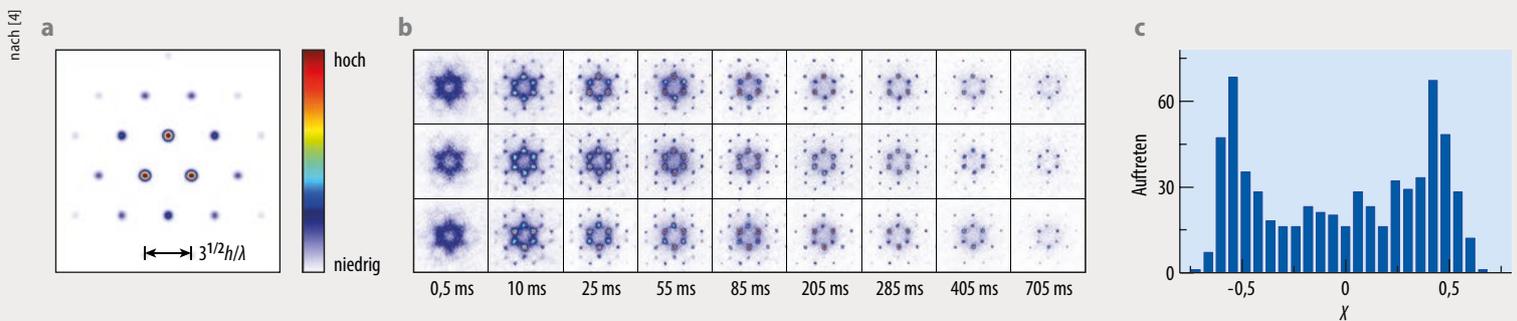


Abb. 2 Die Symmetriebrechung des Superfluids ist an der Impulsverteilung erkennbar, in der nur drei (anstelle von sechs) Peaks hervorstechen. Die theoretische Erwartung ist in (a) abgebildet. Mittels Time-of-flight-Verfahren lässt sich nach einer Re-Kondensationsphase (abgebildet für Re-Kondensationszeiten zwischen 0,5 bis 705 ms) diese Erwartung experimentell bestätigen (b). Die obere Reihe zeigt ein chirales Superfluid, in deutlichem Gegensatz zu einem Kondensat ohne Symmetriebrechung (untere Reihe). Wie stark und wie häufig bei wiederholter Ausführung des Experiments die Symmetrie gebrochen wird, zeigt das Histogramm in (c). Der Parameter χ , gegeben durch den Kontrast zwischen den Besetzungszahlen in den K-Punkten, dient hier als Maß für die Symmetriebrechung.

topologische Supraleiter auszeichnet, hat sich die Arena für Majorana-artige Teilchen um eine vielversprechende Plattform erweitert. Die Realisierung des chiralen Kondensats in dem aktuellen Experiment basiert auf kalten Atomen (^{87}Rb) in einem optisch erzeugten Gitterpotential. Diese Kombination stellt ein flexibel justierbares Quantensystem dar, das sich vorzüglich zur Simulation vielfältiger Quanteneigenschaften eignet und das in den letzten 20 Jahren die Quantensimulation als neue Forschungsrichtung entscheidend geprägt hat [6].

Um die Brechung der Zeitumkehrinvarianz zu erreichen, die das chirale Superfluid von einem herkömmlichen Kondensat unterscheidet, verwendeten die Forschenden eine ausgeklügelte Gitterstruktur, wie sie auch in hexagonalem Bornitrid zu finden ist (**Abb. 1a**). Wesentliches Kennzeichen ist ein Potential, das auf abwechselnden Gitterplätzen alterniert. Der künstliche Ursprung des Gitters ermöglicht es, die zwei Untergitter abrupt zu vertauschen. Dadurch gelangen die Atome in das energetisch angeregte zweite Band. Dessen Energieminimum ist nicht wie im ersten Band im Zentrum der Brillouin-Zone lokalisiert (dem Gamma-Punkt), sondern in zwei Punkten am Rand der Brillouin-Zone (den K-Punkten, **Abb. 1b**). Im weiteren Verlauf des Experiments führen interatomare Wechselwirkung und ein Verlust von Atomen in die Umgebung dazu, dass das System in einem der beiden K-Punkte re-kondensieren kann. Die Entscheidung für einen der K-Punkte erfolgt spontan (**Abb. 2c**). Dies kommt einer spontanen Brechung der Zeitumkehrinvarianz gleich.

Besonders deutlich spiegelt sich die Brechung der Zeitumkehrinvarianz im Drehimpuls des Systems wider. Durch die gewählte Gitterstruktur besetzen die Atome nicht nur s -förmige Orbitale (Drehimpuls-Quantenzahl 0), sondern auch die zweifach entarteten p -Bänder (Drehimpuls-Quantenzahlen +1 und -1, **Abb. 1a**). Ist der Energieunterschied zwischen den Gitterplätzen besonders groß gewählt, kann in einem K-Punkt das p -Band mit Drehimpuls-Quantenzahlen +1 vorherrschen ($p_x + ip_y$ -Symmetrie),

während der andere K-Punkt durch das p -Band mit Drehimpuls-Quantenzahl -1 beschrieben wird ($p_x - ip_y$ -Symmetrie). Während der Re-Kondensation erlangt das atomare Gas einen hohen Gesamt-Drehimpuls.

Ein grundlegender Vorteil kalter Atome gegenüber elektronischen Systemen sind ihre vielfältigen Detektionsmöglichkeiten. Die Time-of-flight-Methode ermittelt die atomare Dichte nach einer festgelegten Expansionsphase des kalten Gases, was genaue Rückschlüsse auf die Impulsverteilung des Kondensats erlaubt. Hiermit ist es den Forschenden gelungen, den chiralen Charakter des Superfluids klar nachzuweisen, wie die Übereinstimmung der theoretisch erwarteten und der gemessenen Impulsverteilungen zeigt (**Abb. 2a, b**).

Dass die Anregungen des Systems tatsächlich enge Verwandte des exotischen Majorana-Teilchens sind, bleibt allerdings nur eine theoretische Schlussfolgerung. Das aktuelle Experiment ist daher keineswegs der Schlusspunkt einer langen Suche. Vielmehr eröffnet es vielfältige neue Forschungsmöglichkeiten, um topologische Anregungen in kontrollierbaren Quantensystemen zu erzeugen – möglicherweise durch Defektstellen im optischen Gitter – und um deren anyonische Eigenschaften nachzuweisen und schließlich technologisch nutzbar zu machen.

- [1] S. Das Sarma, M. Freedman und C. Nayak, *Npj Quantum Inf.* **1**, 15001 (2015)
- [2] M. Sato und Y. Ando, *Rep. Prog. Phys.* **80**, 076501 (2017)
- [3] P. Yu et al., *Nat. Phys.* **17**, 482 (2021)
- [4] X.-Q. Wang et al., *Nature* **596**, 227 (2021)
- [5] M. Di Liberto, A. Hemmerich und C. Morais Smith, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 163001 (2016)
- [6] M. Lewenstein, A. Sanpera und V. Ahufinger, *Ultracold Atoms in Optical Lattices*, Oxford University Press (2012)

Der Autor

Dr. Tobias Grass, ICFO – The Institute of Photonic Sciences, Mediterranean Technology Park Av. Carl Friedrich Gauss, 3, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spanien

Hochauflösendes mid-IR Spektrometer



- Wellenlänge 1500 bis 6300 nm
- Auflösung 2 nm
- Faser und Freistrahleingang
- Programmierbare Ansteuerung
- Kontinuierliche Messung mit hoher Messrate



A.P.E
www.ape-berlin.de