

■ Eindimensionale Paare

Mit ultrakalten Atomgasen lässt sich ein bislang unbekannter Kopplungsmechanismus in einer Dimension untersuchen.

Bisweilen haben kleine Ursachen enorme Auswirkungen: So kann in der Festkörperphysik eine beliebig kleine Anziehungskraft zwischen Fermionen mit entgegengesetzt gerichtetem (halbzahligen) Spin und Impuls zur Bildung eines Paares führen, das die Eigenschaften eines Bosons aufweist, also einen ganzzahligen Spin. Unter gewissen Bedingungen bilden solche Cooper-Paare ein Bose-Einstein-Kondensat und gehen von einem thermischen Gasgemisch in eine makroskopische kohärente Materiewelle über, die spektakuläre Eigenschaften aufweist: widerstandslosen Stromfluss in einem Supraleiter oder reibungslosen Fluss in einer Superflüssigkeit. Aufgrund dieser bemerkenswerten Paarbildung, die Bardeen, Cooper und Schrieffer (BCS) erstmals beschrieben haben, tritt Supraleitung in einer großen Klasse von Materialien auf. In den letzten Jahren ist es gelungen, diesen Mechanismus auch in der Welt der Atomphysik mit ultrakalten Gasen aus fermionischen Atomen ausführlich zu untersuchen [1, 2]. Was aber geschieht mit diesem BCS-Zustand, wenn die beiden Spin-Zustände („up“ und „down“) im System nicht mit gleichen Häufigkeiten auftreten? Fulde und Ferrel [3] sowie Larkin und Ovchinnikov [4] hatten für diesen Fall bereits vor mehr als vierzig Jahren einen neuartigen Zustand vorhergesagt, der abwechselnd superflüssige und normalflüssige Regionen enthält. Amerikanische Physiker haben nun in einem ultrakalten Gas aus Lithium-6-Atomen Indizien für diesen Zustand gefunden [5].

In einem Festkörper lässt sich ein Ungleichgewicht der Spins durch Anlegen eines Magnetfelds erzielen. Bei ultrakalten Atomgasen reicht dagegen eine Anfangsdifferenz zwischen Atomen mit Spin-up und Spin-down. Intuitiv würde man erwarten, dass ein größeres Ungleichgewicht es den Atomen erschwert, sich mit einem passenden

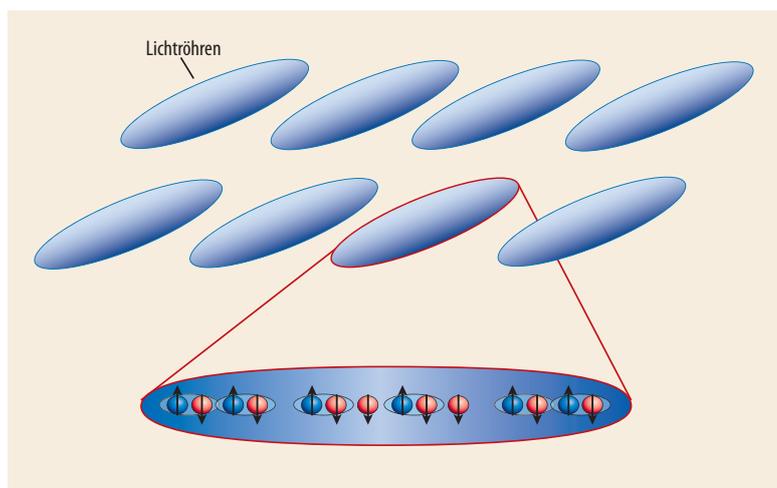


Abb. 1 Durch Interferenz zweier stehender Lichtwellen (nicht gezeigt) lässt sich eine parallele Anordnung eindimensionaler „Lichtröhren“ erzeugen. Füllt man in diese Röhren ein ultrakaltes Gas aus fermionischen Atomen, in dem es einen

Überschuss von einem der beiden Spin-zustände „up“ und „down“ gibt, so sind die Atome in den „Flügeln“ vollständig gepaart, während sich die überschüssigen Atome im Kern konzentrieren.

Partner zusammenzutun, und somit die Suprafluidität behindert. Und in der Tat zeigen die Experimente genau dies. Etwas technischer ausgedrückt liegt das daran, dass die Fermi-Flächen der beiden Komponenten, also die Grenzen im Impulsraum zwischen besetzten und unbesetzten Zuständen, unterschiedlich groß sind. Dies erschwert die Paarbildung.

Fulde, Ferrel, Larkin und Ovchinnikov haben einen raffinierten Ausweg gefunden, wie sich trotz eines solchen Spin-Ungleichgewichts ein superflüssiger Zustand einstellen kann. Sie haben einen Zustand vorgeschlagen, bei dem die einzelnen Paare nicht in Ruhe sind, sondern netto einen gewissen Impuls besitzen. Dieser FFLO-Zustand entspricht einer Phasenseparation auf mikroskopischer Skala, da er abwechselnd superflüssige und normalflüssige Regionen enthält. In letztere „zwängen“ sich die überschüssigen Atome mit dem häufigeren Spin hinein. Obwohl schon intensiv in Festkörpern und in letzter Zeit auch ausgiebig in ultrakalten Atomgasen nach einem solchen FFLO-Zustand mit seinem exotischen Paarungsmechanismus

gesucht wurde, steht ein zweifelsfreier Nachweis noch immer aus. Mit ihrem Experiment sind Liao et al. diesem Ziel einen großen Schritt näher gekommen.

In drei Dimensionen (3D) nimmt der FFLO-Zustand wahrscheinlich nur einen winzigen Bereich im Phasendiagramm möglicher Materiezustände ein, was seine Beobachtung fast unmöglich macht. In einer Dimension (1D) sieht die Sache jedoch vielversprechend aus aufgrund einer „Verschachtelung“ der Fermi-Flächen, die dazu führt, dass sich die Flächen der beiden Komponenten an ihren Rändern berühren. Dadurch ist der FFLO-Zustand eine wesentlich robustere Phase in einer Dimension [6] und nimmt große Bereiche des Phasendiagramms ein [7]. Liao und Kollegen sperrten das Zwei-Spin-Gasgemisch deshalb in eindimensionale „Lichtröhren“, die durch die Interferenz von zwei senkrecht zueinander ausgerichteten stehenden Lichtwellen entstehen (Abb. 1). In jeder Röhre können sich die Atome in Längsrichtung frei bewegen, nicht jedoch quer dazu. Die Wissenschaftler bestimmten nun ortsabhängig die Anzahldiffe-

renzen zwischen den beiden Spin-Zustands-Komponenten sowie die Anzahldichte des Minderheitszustands für eine Reihe von Spin-Ungleichgewichten (Polarisationen) des Gasgemischs.

Die Daten zeigen ein eindrucksvolles Ergebnis. Im Unterschied zu drei Dimensionen sind nun über einen weiten Bereich von Polarisierungen nur die Ränder des Gasgemischs vollständig gepaart, während im Zentrum ein Überschuss von einer der beiden Spin-Zustands-Komponenten herrscht (Abb. 1). Dieses Verhalten – und die allgemeine Ortsabhängigkeit der Dichteverteilungen von sowohl der Minderheitskomponente als auch der Differenz der zwei Spin-Zustände als Funktion der Polarisierung – stimmen hervorragend mit den theoretischen Ergebnissen für ein solches eindimensionales FFLO-System überein. Die Arbeit von Liao und Kollegen ist aber noch aus einem anderen Grund

bemerkenswert. Einfache Erweiterungen ihres Experiments sollten es ermöglichen, den Übergang von 1D zu 3D zu erforschen. Dazu ist es nur notwendig, die Tiefe der Lichtpotentiale zu reduzieren, sodass die „Lichtrohre“ miteinander koppeln. In 3D unterscheidet sich die Natur der gepaarten Zustände deutlich von der in 1D, da die Cooper-Paare dann netto keinen Impuls tragen.

Ob es sich beim partiell polarisierten Kern tatsächlich um einen superflüssigen FFLO-Zustand handelt, muss allerdings erst noch gezeigt werden. Bisher wurden weder Anzeichen für Superfluidität noch der charakteristische Fingerabdruck eines FFLO-Zustands entdeckt – die beiden Impulskomponenten der Superflüssigkeit, die die mikroskopische Phasenseparation hervorruft. Eine Erweiterung des Experiments von Liao und Kollegen sollte es ermöglichen, diese charakteristische Impulsverteilung in einer einzelnen Röhre zu messen.

Der Theorie zufolge könnten dafür auch noch tiefere Temperaturen nötig sein. Mehr als vierzig Jahre nach den ursprünglichen Überlegungen ist das Rennen um die eindeutige Beobachtung des FFLO-Zustands also nach wie vor im Gange, aber Liao und Kollegen haben einen erfolgversprechenden Weg zur Zielinie aufgezeigt.^{*)}

Immanuel Bloch

- [1] *I. Bloch, J. Dalibard und W. Zwerger*, Rev. Mod. Phys. **80**, 885 (2008)
- [2] *S. Giorgini, L. Pitaevskii und S. Stringari*, Rev. Mod. Phys. **80**, 1215 (2008)
- [3] *P. Fulde und R. A. Ferrell*, Phys. Rev. **135**, A550 (1964)
- [4] *A. I. Larkin und Y. N. Ovchinnikov*, Sov. Phys. JETP **20**, 762 (1965)
- [5] *Y. Liao et al.*, Nature **467**, 567 (2010)
- [6] *K. Yang*, Phys. Rev. B **63**, 140511 (2001)
- [7] *G. Orso*, Phys. Rev. Lett. **98**, 070402 (2007)

Prof. Dr. Immanuel Bloch, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching

*) Dieser Artikel ist die übersetzte und bearbeitete Fassung eines zuerst in Nature **467**, 535 (2010) erschienenen Artikels.