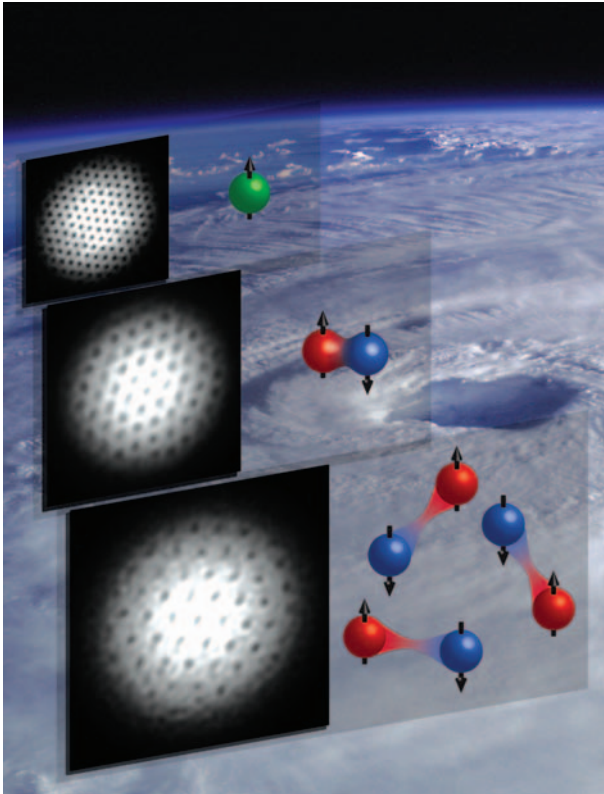


Revolution in der ultrakalten Quantenwelt

Vortices liefern einen überzeugenden Nachweis für Suprafluidität in ultrakalten Gasen aus fermionischen Atomen und öffnen neue Aussichten für die Modellierung von quantenmechanischen Vielteilchensystemen.

Fast genau zehn Jahre nach der ersten Beobachtung eines Bose-Einstein-Kondensats (BEC) in ultrakalten Atomgasen aus Bosonen



Eine Quantenflüssigkeit kann nicht als Ganzes rotieren, sondern bildet stattdessen Wirbel aus, die sich in einem regelmäßigen Gitter anordnen. Dies gilt für ein Bose-Einstein-Kondensat aus Na-Atomen (oben) oder aus je zwei ${}^6\text{Li}$ -Atomen bestehenden bosonischen Molekülen (Mitte) genau so wie für einen Zustand, in dem die Li-Atome Paare bilden ähnlich wie die Cooper Paare in einem Supraleiter (unten). (Quelle: M. Zwierlein, MIT)

zeichnet sich nun eine Revolution von ähnlicher Bedeutung ab. Für die Möglichkeit, fermionische Atome in einen suprafluiden Zustand abzukühlen, haben verschiedene Arbeitsgruppen in den letzten zwei Jahren einen packenden experimentellen Indizienbeweis geführt. Nun hat Wolfgang Ketterle mit seinen Mitarbeitern am MIT den endgültigen und spektakulären Beweis dafür vorgelegt [1].

Alle Teilchen lassen sich in Abhängigkeit ihres Spins in Bosonen und Fermionen einteilen. Ist der Spin ein ganzzahliges Vielfaches von $h/2\pi$ mit der Planckschen

Konstante h , so ist das Teilchen ein Boson. Ein ultrakaltes Ensemble dieser Teilchen kann in den Quantenzustand mit der niedrigstmöglichen Energie kondensieren und ein Bose-Einstein-Kondensat bilden. Teilchen mit halbzahligem Spin hingegen sind Fermionen und erfüllen das Pauli-Prinzip, wonach es zwei oder mehr Fermionen verboten ist, den gleichen Quantenzustand zu besetzen. Ein System einzelner Fermionen kann daher kein ultrakaltes Kondensat ähnlich einem BEC bilden.

Fermionen können jedoch in einen makroskopischen Quantenzustand, ein Suprafluid, kondensieren, wenn sie Paare bilden und diese zusammengesetzten Objekte ganzzahligen Spin und bosonischen Charakter haben. Die Bardeen-Cooper-Schrieffer-Theorie (BCS) [2] beschreibt z. B. den reibungslosen Transport von Elektronen in Supraleitern, indem sie zusammengesetzte Objekte einführt, sog. Cooper-Paare. Das große Interesse an ultrakalten Fermi-Gasen [3] rührt von der einzigartigen Möglichkeit her, mit ihrer Hilfe die Physik von Quantenmaterie im Allgemeinen zu modellieren – Table-top-Experimente versprechen Einsichten nicht nur in den Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung, sondern auch in die Physik, die Neutronensternen und dem Quark-Gluon-Plasma zugrunde liegt.

Ein entscheidender Parameter in diesen Experimenten ist die Stärke der Wechselwirkung zwischen zwei Fermionen, da diese Größe die Bindungsenergie und die Ausdehnung des Pairs bestimmt, und somit auch die makroskopischen Eigenschaften des Quantensystems. In einem ultrakalten Gas lässt sich die Paarwechselwirkung mithilfe eines Magnetfeldes verändern, falls eine sog. Feshbach-Resonanz existiert. Unterhalb dieser Resonanz befindet sich das System in einem Regime mit starker Paarung, in dem sich fermionische Atome zu bosonischen Molekülen zusammenschließen, die schließlich zu einem Molekül-BEC kondensieren können. Weit oberhalb der Feshbach-Resonanz führt die schwache Cooper-Paarung zu einem BCS-ähnlichen System. Mit der Möglichkeit, die Systemeigenschaften kontinuierlich zwischen diesen beiden Extremen zu variieren, lässt sich nun der lange Zeit schwer fassbare Übergang von einem BEC zu einem BCS-Zustand

untersuchen. Die grundlegenden Eigenschaften dieses Übergangs wurden an Gasen aus Lithium (${}^6\text{Li}$) und Kalium (${}^{40}\text{K}$) untersucht. In diesen Gasen gelang es, die Kondensation von Paaren zu beobachten [4, 5] und die kollektiven Schwingungen [6, 7], die Paarungsenergie [8] und die Wärmekapazität [9] zu beobachten. Obwohl diese Experimente, gemeinsam mit der Untermauerung durch die Theorie, schon einen recht überzeugenden Indizienbeweis geliefert hatten, fehlte bisher doch der wirklich schlagende Beweis.

Worin besteht eine eindeutige Signatur für das reibungslose Fließen in einem makroskopischen Quantenzustand? Eine Antwort ergibt sich aus der diskreten Natur des Drehimpulses in der Quantenmechanik. Eine Suprafluidität kann nicht wie ein klassisches Fluid rotieren, sondern ordnet sich in einem System von Vortices an, die jeder für sich einen Teil des gesamten Drehimpulses des Systems trägt. Diese winzigen Quanten-Tornados drängen Teilchen aus ihrem Inneren heraus, sodass filament-artige leere Wirbelkerne entstehen, die das Suprafluid durchsetzen. Da sich die Vortices gegenseitig abstoßen, kristallisieren sie im thermischen Gleichgewicht in ein hexagonales Gitter, das sog. Abrikosov-Gitter. Solche Strukturen sind eine wohlbekannte Signatur von Suprafluidität in einigen Supraleitern [2] und wurden auch in rotierenden BECs beobachtet.

Das neue Experiment mit einem rotierenden Fermi-Gas stellte Martin Zwierlein und Kollegen aus der Arbeitsgruppe von Wolfgang Ketterle vor große Herausforderungen. Zunächst verwendeten sie ein BEC aus Natrium-Atomen, um ihren Aufbau für die Erzeugung von Wirbeln zu optimieren (Abb., oben). Anschließend luden sie ein ultrakaltes Fermi-Gas aus ${}^6\text{Li}$ -Atomen in eine optische Falle, die sorgfältig auf eine möglichst runde Form optimiert war. Mit zwei zusätzlichen Laserstrahlen rührten sie wie mit Löffeln in der Quantenflüssigkeit, um dem Lithium-Gas einem Drehimpuls aufzuzwingen. Anschließend wurde das System für eine variable Zeit sich selbst überlassen, damit die Vortices entstehen und kristallisieren konnten.

Die Vortexkerne sind viel zu klein, um sie mit optischen Methoden direkt zu beobachten. Die

Autoren vergrößerten daher die Vortexkerne und das ganze Vortextgitter, indem sie die Laserfalle ausschalteten und das Atomgas im freien Raum expandieren ließen. Zusätzlich vergrößerten sie die Vortexkerne, und damit ihre Sichtbarkeit, indem sie die Wechselwirkungsstärke während der Expansion veränderten.

In dem Lithium-Gas erzeugten die Autoren zunächst ein Vortextgitter im molekularen BEC-Regime. In diesem Fall sind die Fermionen-Paare klein verglichen mit den typischen Abständen zwischen den Teilchen, und dicht gebundene, bosonische Moleküle entstehen (Abb., Mitte). In dem stark wechselwirkenden Regime nahe der Feshbach-Resonanz auf der BCS-Seite ist die Größe eines Paares vergleichbar mit dem typischen Abstand zwischen den Teilchen. In diesem Zustand können sich die Fermionen nicht zu isolierten Molekülen zusammenschließen – dennoch wurden aber ähnliche Wirbelmuster beobachtet (Abb., unten). Die für die Entstehung des Vortextgitters notwendige Zeit war rund hundertmal länger als die Zeitskala für die Expansion

– somit ist die Möglichkeit ausgeschlossen, dass sich die Vortices während der Expansion bilden.

Die spektakuläre Beobachtung von Vortices hat zusammen mit den bisherigen Schlüsselexperimenten [4–9] zu suprafluiden Fermi-Gasen eine neue Forschungsära eingeleitet, die weit über die Bose-Einstein-Kondensation hinausreicht. In einem unmittelbaren experimentellen Schritt lassen sich z. B. interferierende Lichtfelder nutzen, um ein Kristallgitter zu simulieren [10]. Damit erhält man z. B. ein einzigartiges Werkzeug, um Probleme der Festkörperphysik zu lösen. Und der erstaunliche Grad an experimenteller Kontrolle, den Zwierlein und seine Kollegen unter Beweis gestellt haben, lässt sich auf kompliziertere Systeme ausdehnen – gemischte Fermi-Systeme könnten genutzt werden, um einen Kern aus Protonen und Neutronen zu simulieren oder exotische Supraleiter. Der abschließende Nachweis von Suprafluidität in einem Fermi-System eröffnet somit phantastische neue Aussichten für viele unterschiedliche Gebiete der Vielteilchen-Quantenphysik.*)

RUDOLF GRIMM

- [1] M. W. Zwierlein, J. R. Abo-Shaeer, A. Schirotzek, C. H. Schunck und W. Ketterle, *Nature* **435**, 1047 (2005)
- [2] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2. Auflage, Dover Publications, New York (2004)
- [3] F. Chevy und C. Salomon, *Physics World*, März 2005, S. 43
- [4] C. Regal, M. Greiner und D. Jin, *Phys. Rev. Lett.* **92**, (2004)
- [5] M. W. Zwierlein et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 120403 (2004)
- [6] J. Kinast, S. L. Hemmer, M. E. Gehm, A. Turlapov und J. E. Thomas, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 150402 (2004)
- [7] M. Bartenstein et al., *Phys. Rev. Lett.* **92**, 203201 (2004)
- [8] C. Chin et al., *Science* **305**, 1128 (2004)
- [9] J. Kinast et al., *Science* **307**, 1296 (2005)
- [10] K. Bongs und K. Sengstock, *Physik Journal*, Mai 2005, S. 18

Prof. Dr. Rudolf Grimm, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, und Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Technikerstr., A-6020 Innsbruck

*) Dieser Artikel ist die übersetzte und überarbeitete Fassung eines zuerst in *Nature* **435**, 1035 (2005) erschienenen Artikels.