

Ohne Stau durch die Röhre : von Supraflüssigkeiten zu Supraleitern

Autor(en): **Köhl, Michael**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **95 (2004)**

Heft 19

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-857988>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ohne Stau durch die Röhre: Von Supraflüssigkeiten zu Supraleitern

Quantensysteme nahe am absoluten Temperaturnullpunkt

Nahe am absoluten Temperaturnullpunkt treten die Phänomene Supraleitung und Suprafluidität auf. Der Strom oder die Flüssigkeit bewegen sich widerstandslos. Beide Effekte können nur durch die Quantenmechanik erklärt werden und sind bis heute nicht vollständig verstanden. Seit kurzem gelingt es, atomare Gase bis nahe an den absoluten Temperaturnullpunkt abzukühlen und so ideale experimentelle Modellsysteme für Supraleiter und Supraflüssigkeiten herzustellen. So lernen Wissenschaftler die Materie bei extrem niedrigen Temperaturen kennen.

Bei tiefen Temperaturen verändert die Materie ihre Eigenschaften. Metalle wie Blei oder Quecksilber, die bei normalen Temperaturen vergleichsweise schlechte elektrische Leiter sind, werden zu Supra-

Michael Köhl

leitern, die elektrischen Strom ohne Widerstand leiten. Ähnlich wird Helium – bei Raumtemperatur ein Gas – bei der Temperatur von 4 Kelvin¹⁾ zunächst flüssig und unter 2,2 Kelvin supraflüssig. Supraflüssiges Helium fließt ohne Reibung durch kleinste Poren. Anzeichen sowohl von Suprafluidität als auch von Supraleitung wurden das erste Mal 1911 im

Labor von Heike Kamerlingh Onnes in Leiden (Niederlande) beobachtet [1]. Seitdem beschäftigen diese beiden Phänomene Generationen von Physikern, aber es bleiben trotz grosser Fortschritte (Tabelle I) wesentliche Fragen ungeklärt.

Supraleitung und Suprafluidität sind eng miteinander verwandt, und in beiden Fällen kann nur die Quantenmechanik zu einem Verständnis verhelfen. Beiden Phänomenen liegt zugrunde, dass es sich um makroskopische Quantenzustände handelt, d.h. ein signifikanter Anteil der Elektronen bzw. Helium-Atome in der Probe befindet sich in demselben quantenmechanischen Zustand und zeigt ein kollektives Verhalten. Bei Helium kön-

nen dies bis zu 10% aller Atome sein. Dies ist ein fundamentaler Unterschied zu einer herkömmlichen Flüssigkeit oder einem normalen elektrischen Leiter, wo sich alle 10^{23} Teilchen pro Kubikzentimeter über praktisch ebenso viele Quantenzustände verteilen.

Seit wenigen Jahren gelingt es im Labor, makroskopische Quantenzustände in Reinform zu produzieren, so genannte Bose-Einstein-Kondensate. Hier befinden sich weit über 90% aller Teilchen im gleichen Quantenzustand, und mit ihrer Hilfe will man den Mechanismen der Suprafluidität und der Supraleitung genauer auf die Spur kommen.

Bose-Einstein-Kondensation

Die Welt besteht aus Bosonen und Fermionen

Teilchen können in zwei unterschiedliche Klassen eingeteilt werden: Fermionen und Bosonen. Zu den Fermionen gehören die Atombausteine, also die Elektronen, Protonen und Neutronen sowie alle Atome, die aus einer ungeradzahigen Summe von Elektronen, Protonen und Neutronen bestehen. Allgemein bezeichnet man als Fermionen diejenigen Teilchen, deren Eigendrehimpuls (Spin) ein halbzahliges Vielfaches des Drehimpulsquantums $\hbar = h/2\pi$ (h : Plancksches Wirkungsquantum) ist. Bosonen hingegen sind Teilchen mit ganzzahligem Spin. Somit sind alle diejenigen Atome Bosonen, die aus einer geradzahigen Summe von Elektronen, Protonen und Neutronen bestehen, wie beispielsweise ^4He oder das Rubidium-Isotop ^{87}Rb . Die meisten in der Natur vorkommenden Isotope sind Bosonen.

Bosonische und fermionische Gase unterscheiden sich bei Raumtemperatur in ihren statistischen Eigenschaften nicht: Alle Teilchen sind über alle verfügbaren Zustände gleichmässig verteilt. Wenn man das Gas jedoch bis nahe an den absoluten Temperaturnullpunkt abkühlt, tritt ein Unterschied zwischen den beiden Teilchenarten zutage: Bosonen haben die Tendenz sich zu scharen, Fermionen meiden sich gegenseitig. Wenn ein Boson

Jahr	Preisträger	Arbeit
1913	Onnes	Erzeugung von flüssigem Helium
1962	Landau	Erklärung der Suprafluidität von ^4He
1972	Bardeen, Cooper, Schrieffer	BCS-Theorie zur Supraleitung
1973	Giaever, Josephson	Tunneleffekte in Supraleitern
1978	Kapitza	Arbeiten zur Tieftemperaturphysik
1987	Bednorz, Müller	Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung
1996	Lee, Osheroff, Richardson	Entdeckung der Suprafluidität von ^3He
1997	Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips	Laserkühlung
2001	Cornell, Ketterle, Wieman	Bose-Einstein-Kondensation in einem atomaren Gas
2003	Leggett, Abrikosov, Ginzburg	Theorie der Suprafluidität und Supraleitung

Tabelle I Physik-Nobelpreise auf dem Gebiet der Quantenphysik bei ultrakalten Temperaturen

einen bestimmten Quantenzustand besetzt hat, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sich ein zweites Boson in exakt dem gleichen Zustand niederlässt, dann ein drittes, ein viertes usw. Dieser Vorgang, bei dem sich schliesslich alle Bosonen im untersten Energiezustand versammeln und einen makroskopisch besetzten Quantenzustand bilden, heisst Bose-Einstein-Kondensation (Bild 1). Vorhergesagt wurde dieser Effekt bereits 1925, gemeinsam vom indischen Physiker Satyendra Bose und Albert Einstein. Fermionen verhalten sich grundlegend anders: Ihnen ist durch das Pauli-Prinzip verboten, dass jeweils zwei Teilchen sich in ein und demselben Zustand aufhalten. Demzufolge füllen sie bei hinreichend niedriger Temperatur die verfügbaren Energiezustände sukzessive auf (Bild 1) und bilden keinen makroskopisch besetzten Quantenzustand.

Heureka!

Ein Durchbruch in der Präparation makroskopischer Quantenzustände gelang 1995: Erstmals konnte ein Bose-Einstein-Kondensat in einem atomaren Gas in Reinform hergestellt werden [2]. Forscher in Boulder (USA) kühlten ein Gas aus Rubidium-Atomen auf eine Temperatur von etwa 100 Nanokelvin ab, hundert Milliardstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. Dabei konnten sie beobachten, wie praktisch alle Atome ihrer Probe den Zustand niedrigster Energie bevölkerten. Diese Entdeckung, die mittlerweile in vielen Labors auf der Welt reproduziert wurde, hat einen neuen Blick auf die Quantenmechanik eröffnet. Man kann das Bose-Einstein-Kondensat, das aus Millionen einzelner Atome besteht, durch eine einzige quantenmechanische Wellenfunktion beschreiben. Dabei ist es in der Tat «makroskopisch»:

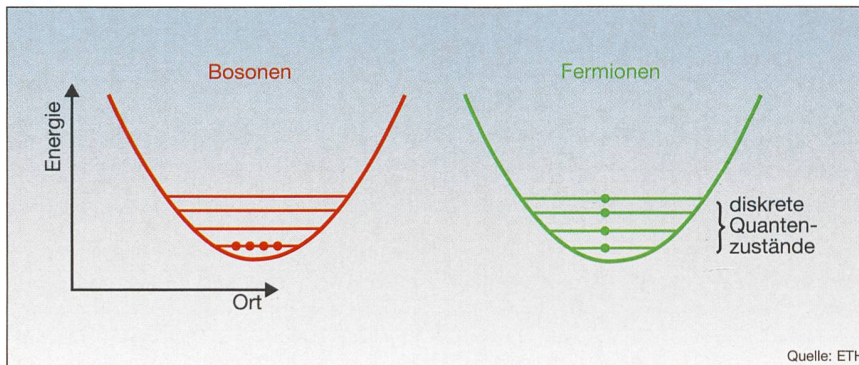


Bild 1 Bosonen und Fermionen bei niedrigen Temperaturen

Bosonen bilden ein Bose-Einstein-Kondensat im niedrigsten Energiezustand des Potentials, in dem die Teilchen gefangen sind. Fermionen dürfen wegen des Pauli-Prinzips jeden Energiezustand nur einfach besetzen.

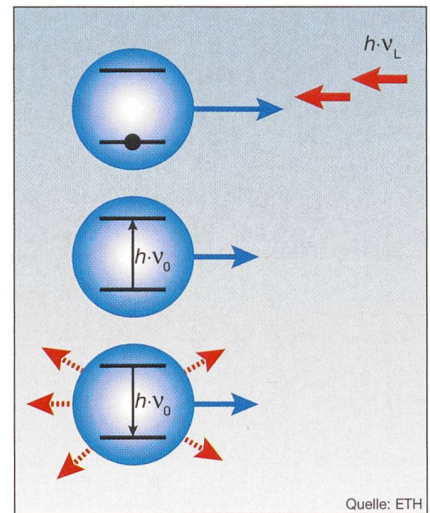


Bild 2 Prinzip der Laserkühlung

Ein Atom absorbiert Laserlicht der Frequenz ν_L und geht dabei von seinem Grundzustand in den angeregten Zustand über. Der Energieabstand zwischen Grund- und angeregtem Zustand ist $h \cdot \nu_0$ und somit etwas grösser als die Energie des absorbierten Lichts $h \cdot \nu_L$. Die Energiedifferenz wird der Bewegungsenergie (blauer Pfeil) des Atoms entnommen und verlangsamt dieses. Im dritten Schritt wird ein Lichtteilchen vom Atom emittiert, wobei die Richtung der Emission zufällig ist. Nach der Mittelung über viele Emissionszyklen erfährt das Atom keinen Rückstoss.

Mit einer Grösse von etwa 100 μm ist es 100 000-mal grösser als die individuellen Atome. Es ist selbst grösser als viele biologische Zellen – man könnte es mit blossen Auge sehen.

Weil in den atomaren Systemen – im Gegensatz zu supraflüssigem Helium – praktisch alle Atome an den Quanten-

Wie kühlt man etwas auf -273°C ?

Kühlen mit Laser

Temperatur ist ein Mass für die ungeordnete Bewegung von Teilchen. Je schneller sich die Atome bewegen, desto grösser ist die Temperatur eines Gases. Um ein Gas abzukühlen, muss man die Atome abbremsen. Die Technologie, Atomgase bis in den Nanokelvin-Temperaturbereich abzukühlen, wurde in den letzten 25 Jahren entwickelt und 1997 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Ein zentraler Punkt ist das Laserkühlen. Man kennt den umgekehrten Vorgang: Laser schneiden, schweiessen und heizen. Ein Stück Material absorbiert Energie aus einem Laserstrahl und erwärmt sich. In Forschungslabors ist die Umkehrung dieses Effekts gelungen, so dass Laser zum effizienten Kühlen eingesetzt wer-

den können. Diese Technik wird herkömmliche Kryostaten und Kühlschränke nicht ersetzen können, sie ist bisher auf die spezielle Anwendung in Atomgasen beschränkt. Die prinzipielle Idee besteht darin, dass man ein Atom mit einem Laserlichtfeld wechselwirken lässt, dessen Frequenz ν_L knapp unterhalb der Resonanzfrequenz des Atoms ν_0 liegt (Bild 2). Das Atom absorbiert ein Photon aus dem Laserstrahl und geht in seinen angeregten Zustand über. Von dort zerfällt es nach kurzer Zeit wieder in den Grundzustand, indem es ein Photon mit seiner Resonanzfrequenz ν_0 ausstrahlt. In diesem Absorptions-/Emissionszyklus verliert es die Energie $\Delta E = h \cdot (\nu_0 - \nu_L)$, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ist. Auf Grund der Energieerhaltung muss diese Differenz der Bewegungsenergie der Atome entnommen werden, d.h. das Atom wird langsamer. Für sich genommen ist

der Energieübertrag in einem solchen Vorgang klein, aber jedes Atom durchläuft pro Sekunde mehrere Millionen dieser Zyklen und wird dadurch stark abgebremst. Die Bremsbeschleunigung kann bis zu 10^9 -mal der Erdbeschleunigung entsprechen, Atome werden also effizient abgebremst, resp. gekühlt. Durch eine geschickte räumliche Anordnung von sechs Laserstrahlen und durch Kombination mit einem inhomogenen Magnetfeld erzielt man einen dreidimensionalen Einschluss der Atome und kann die Gaswolke in wenigen Sekunden bis auf ungefähr 100 Mikrokkelvin abkühlen.

Um das Laserkühlen effizient durchzuführen, benötigt man leistungsstarke, schmalbandige Laserlichtquellen. In unserem Experiment verwenden wir selbstgebaute Diodenlasersysteme. Ein Referenz-Laser wird in seiner

effekten beteiligt sind, können Theorien zur Suprafluidität mit hervorragender Präzision überprüft werden.

Atome beobachten

Wie kann man Atome bei derart niedrigen Temperaturen beobachten und ihre Eigenschaften vermessen? Atome bei einer Temperatur von 100 Nanokelvin bewegen sich langsam wie eine Schnecke: Sie haben eine Geschwindigkeit von wenigen Millimetern pro Sekunde. Im Experiment schaltet man schlagartig das Magnetfeld, das die Gaswolke einschliesst, aus und lässt die Atome sich frei im Raum ausbreiten. Nach einigen Millisekunden wird die Atomwolke mit einem Laserstrahl beleuchtet, aus dem die Atome Licht absorbieren. Dadurch entsteht ein Schatten im Strahl, der auf einer CCD-Kamera abgebildet wird und die räumliche Verteilung der Atome



Bild 3 Ausschnitt des im Experiment verwendeten Laseraufbaus

Insgesamt umfasst der Experimentaufbau 12 Lasersysteme und über 500 optische Komponenten.

Absolutfrequenz mit einer Genauigkeit von unter 1 MHz stabilisiert und seine Linienbreite durch optische Rückkopplung auf wenige 100 kHz reduziert. Dies entspricht einer relativen Frequenzstabilität von $\Delta\nu/\nu_L < 10^{-9}$. Anschliessend wird der Laserstrahl in einem Laserverstärker (Trapezverstärker) nachverstärkt, so dass bis zu 1,5 Watt Laserleistung bei einer Wellenlänge von 780 nm bereit stehen. Die hohen Anforderungen an die Genauigkeit der Laserfrequenz verlangen neben rauscharmen Regelungen und Stromversorgungen auch eine Temperaturstabilisierung sowie eine Vibrations- und Schallisolierung der Lasersysteme (Bild 3).

Kühlen durch Verdampfen

Um die Atome um einen weiteren Faktor 1000 abzukühlen, verwendet man eine Methode, die Verdampfungsküh-

widerspiegelt. Beim Übergang vom normalen (thermischen) Gas hin zum Bose-Einstein-Kondensat ändert sich die Form der Atomwolke: Im Bose-Einstein-Kondensat befinden sich alle Atome im gleichen Quantenzustand niedrigster Energie. Die Atome bewegen sich langsamer und haben eine höhere Dichte, was in den Bildern als scharfes Dichtemaximum zu erkennen ist. Eine nicht Bose-kondensierte Atomwolke ist weniger dicht und breiter ausgedehnt (Bild 4).

Aufbruch zu niedrigen Dimensionen

Wir leben in einer dreidimensionalen Welt. Wir bewegen uns in drei Dimensionen und denken «räumlich». Wenn unsere Welt nur zwei- oder eindimensional wäre, sähe unser Leben erheblich anders aus. In der Welt der Quantenmechanik spielen niederdimensionale Systeme eine wichtige Rolle: Beispielsweise tritt Hochtemperatur-Supraleitung in zweidimensionalen Schichten innerhalb der Materialien auf. Darüber hinaus können eindimensionale Quantensysteme oft exakt theoretisch berechnet werden und öffnen damit einen Blick ins Herz der Quantenphysik. Hier können Modellvorstellungen experimentell überprüft werden, während bei zwei- oder dreidimensionalen Systemen Näherungsverfahren verwendet werden müssen.

Drei, zwei, eins, ...

Was unterscheidet drei Dimensionen von einer Dimension? Vereinfacht ge-

ändert werden, dass die Atome aus dem Magnetfeldeinschluss herausfallen. Sie werden «verdampft». Um die Temperatur der Atome präzise einzustellen, muss sowohl die Magnetfeldstärke als auch die Mikrowellenfrequenz genau kontrolliert werden. Nach 20–30 Sekunden Verdampfungskühlung verbleibt ein Bose-Einstein Kondensat mit etwa einer Million Atomen bei Temperaturen unter 100 Nanokelvin. Das Bose-Einstein-Kondensat ist im inhomogenen Magnetfeld eingeschlossen und durch ein Vakuum thermisch von der Umgebung isoliert. Dort herrschen die tiefsten Temperaturen, die man überhaupt kennt [3].

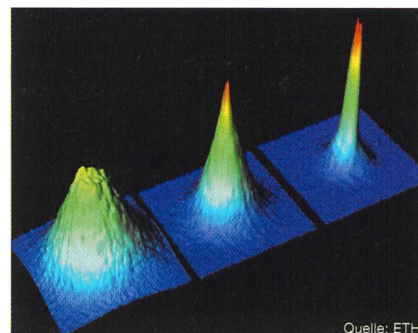


Bild 4 Übergang zum Bose-Einstein-Kondensat

Übergang von einem thermischen Gas (links) in ein Bose-Einstein-Kondensat (rechts). Gezeigt ist die räumliche Verteilung der Dichte der Atome.

sagt, können sich Teilchen in einer Dimension nur entlang einer Linie bewegen, aber nicht quer dazu. Etwa so, wie Kugeln in einem Rohr, dessen Innendurchmesser dem Kugeldurchmesser entspricht. In einem System mit stark abstossenden Wechselwirkungen sind diese Kugeln undurchdringlich, in einem schwach wechselwirkenden, supraflüssigen System durchdringen sich die Kugeln jedoch. Dort ist jedes Atom über die gesamte Ausdehnung des Gases delokalisiert, d.h. man trifft im Prinzip alle Atome überall gleichzeitig an.

Wenn man ein eindimensionales System an einem Ende anregt, wird der Ausgleich der Störung dadurch behindert, dass nur ein einziger Weg dafür zu Verfügung steht. Die Kugeln im Rohr stossen aneinander und je stärker die Wechselwirkung, desto grösser ist der Widerstand

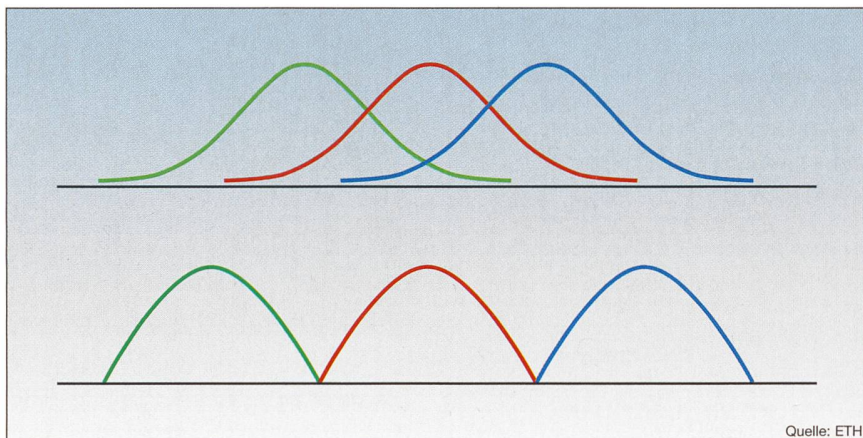


Bild 5 Wellenfunktion der Atome

Schematische Darstellung der Wellenfunktionen der Atome in einem eindimensionalen System. Oben: Schwache Wechselwirkungen. Die Wellenfunktionen der Atome durchdringen sich – die Atome sind delokalisiert. Die Phase der Atomwellen ist ungefähr konstant über die gesamte Länge des Systems und das Gas ist supraflüssig. Unten: Starke abstossende Wechselwirkungen. Die Atome sind aufgereiht wie auf einer Perlenkette. Das System ist nicht mehr supraflüssig, sondern weist eine starke Ordnung auf.

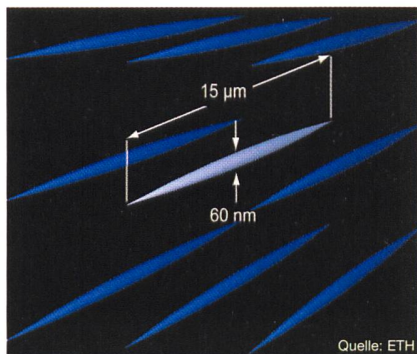


Bild 6 Atome werden im Gitter gefangen

Schematische Anordnung der eindimensionalen Miniaturfallen (nicht massstabsgetreu). Jede der insgesamt 3000 zigarrenförmigen Röhren enthält etwa 100 Atome. Der Abstand zwischen zwei benachbarten Röhren beträgt 413 nm.

– oder bildlich gesprochen: In einem stark wechselwirkenden eindimensionalen System herrscht immer Stau!

In zwei oder drei Dimensionen ist die Lage entspannter: Kleine Störungen gleichen sich über die vielen verfügbaren Wege aus. Was hier qualitativ beschrieben wurde, spiegelt die Situation wider, die zum Verschwinden der Suprafluidität in einer Dimension führt: Dadurch, dass Fluktuationen der Phase der Wellenfunktion der Atome eine vergleichsweise grosse Rolle spielen, bricht beim Übergang zur starken Wechselwirkung die Suprafluidität zusammen (Bild 5).

Ein Gas in einer Dimension

Ein Quantengas in einer Dimension kann in einem optischen Gitter erzeugt werden. Ein Laserstrahl, der von einem Spiegel genau zu sich zurückreflektiert

hergestellt werden, wird eine gute Messgenauigkeit erreicht [4].

Im Gegensatz zu supraflüssigem Helium ist man in atomaren Gasen in der Lage, die Wechselwirkungsenergie zwischen den Atomen experimentell zu verändern. Hierzu verwenden wir ein drittes Paar von Laserstrahlen, das entlang der Symmetrieachse der Miniaturfallen eingestrahlt wird. In den Minima dieses Stehwellenmusters erhöht sich die Dichte der Atome und durch die zusätzlichen Barrieren bewegen sich die Atome langsamer. Durch das dritte Paar von Laserstrahlen wird sowohl die Wechselwirkungsenergie U als auch die kinetische Energie J beeinflusst – der entscheidende Parameter ist das Verhältnis U/J dieser beiden Grössen. Je langsamer die Bewegung der Atome und umso grösser ihre Wechselwirkung, desto schwieriger ist es, eine konstante Phase über das gesamte Gas aufrechtzuerhalten.

Quantenfluktuationen sichtbar machen

Quantenfluktuationen der Phase der Wellenfunktion zerstören die Suprafluidität und ebnen den Weg in ein stark geordnetes System, einen so genannten Mott-Isolator. Mit einer interferometrischen Messung konnten wir bestimmen, wie gross der Bereich einer konstanten Phase der Wellenfunktion ist. Wenn man das Verhältnis von Wechselwirkungsenergie und kinetischer Energie U/J ändert, nimmt diese Phasenkohärenzlänge ab einem kritischen Wert plötzlich stark ab und das Gas ist nicht mehr supraflüssig. Der kritische Wert von U/J ist abhän-

wird, bildet ein Stehwellenmuster aus. Die Frequenz des Lasers ist so gewählt, dass die Atome in die Intensitätsmaxima des Stehwellenmusters hineingezogen werden. Verwendet man zwei sich kreuzende Stehwellen-Laserfelder, so bilden sich mehrere tausend regelmässig angeordnete, röhrenförmige Miniaturfallen. Jede Miniaturfalle für sich hat einen Durchmesser von 60 nm, eine Länge von 15 µm und enthält etwa 100 Atome (Bild 6). Die Eigenschaften von 100 Atomen alleine wären schwierig zu beobachten. Aber dadurch, dass immer gleichzeitig mehrere tausend Kopien des Systems

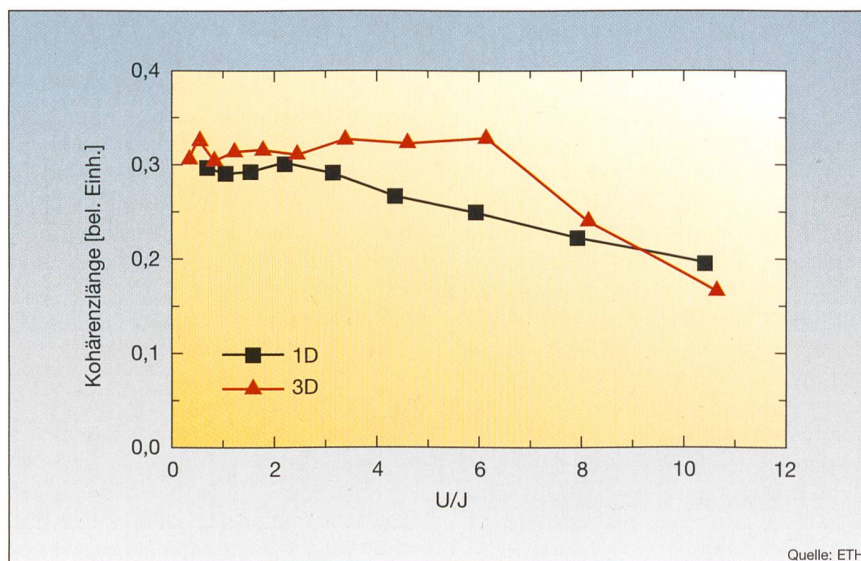


Bild 7 Wann beginnt die Suprafluidität?

Messung des Einflusses von Quantenfluktuationen auf eine eindimensionale Supraflüssigkeit. Aufgetragen ist eine Messgrösse proportional zur Phasenkohärenzlänge. In einem eindimensionalen System beginnt die Kohärenzlänge bei $U/J \approx 2$ zu sinken, in einem dreidimensionalen System erst bei $U/J \approx 6$ [5].

gig von der Dimension: In einer Dimension liegt er bei $U/J = 2$, in drei Dimensionen bei $U/J = 5,8$, was sich direkt im Experiment zeigt (Bild 7). Dieses Verhalten demonstriert, dass die Quantenfluktuationen in einem eindimensionalen System schon bei kleineren Wechselwirkungsstärken zu einem Zusammenbruch der Supraflüssigkeit führen als in drei Dimensionen – genau wie theoretisch vorhergesagt.

Ausblick: Atome statt Elektronen

Die beschriebenen Messungen zur Suprafluidität in einer Dimension sind der Ausgangspunkt für kommende Experimente, um die Supraleitung besser zu verstehen. In dieser Frage existieren konkurrierende theoretische Modelle, die experimentell überprüft werden müssen. Im Kern dieser Modelle steckt die Annahme, dass es sich bei der Hochtemperatur-Supraleitung um ein zweidimensionales Problem handelt. Ähnlich wie Suprafluidität in einer Dimension könnte auch die Supraleitung in zwei Dimensionen mit Atomen in optischen Gittern «experimentell simuliert» werden. Hierzu verwenden wir fermionische Atome (das Kalium-Isotop ^{40}K), um das Verhalten der Elektronen nachzuvollziehen. Atome anstatt Elektronen zu verwenden hat mehrere Vorteile. Sie bewegen sich auf Grund der grösseren Masse weniger schnell. Dadurch ereignen sich alle Vorgänge genügend langsam, dass sie direkt beobachtet werden können. Die Wechselwirkung zwischen zwei Atomen ist einstellbar. Sie kann von stark anziehend über null bis

stark abstossend eingestellt werden. Damit lässt sich eine Vielzahl von Effekten studieren. Ausserdem gibt es in optischen Gittern im Gegensatz zu Kristallen keine Fehlstellen oder sonstige Gitterfehler, sondern man arbeitet in einem System, das theoretisch genau beschrieben werden kann. Hier werden sich neue Erkenntnisse ergeben, wie sich die Materie in dem geheimnisvoll anmutenden Zustand eines Supraleiters wirklich verhält.

Referenzen

- [1] R.J. Donnelly, The discovery of superfluidity, *Physics Today* 7/1995, S. 30
- [2] E.A. Cornell, C.E. Wieman: Die Bose-Einstein-Kondensation, *Spektrum der Wissenschaft* 5/1998, S. 44; Originalarbeit: M.H. Anderson et al: Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor, *Science* 269, 198 (1995)

- [3] G.P. Collins: Das kälteste Gas im Universum, *Spektrum der Wissenschaft* 2/2001, S. 50; Guinness-Book of Records 2004
- [4] Originalarbeit: H. Moritz, T. Stöferle, M. Köhl, T. Esslinger, *Phys. Rev. Lett.* 91, 250402 (2003)
- [5] Originalarbeit: T. Stöferle, H. Moritz, C. Schori, M. Köhl, T. Esslinger, *Phys. Rev. Lett.* 92, 130403 (2004)

Angaben zum Autor

Dr. **Michael Köhl** arbeitet seit 2001 am Institut für Quantenelektronik der ETH Zürich. Seine Forschungsinteressen liegen auf dem Gebiet der ultrakalten Atomgase. Ein spezieller Dank geht an alle Mitarbeiter der Quantenoptik-Gruppe der ETH Zürich. Die Arbeiten wurden finanziell unterstützt vom Schweizer Nationalfonds und der ETH.
www.quantumoptics.ethz.ch, *ETH Zürich-Hönggerberg*, HPF D21, 8093 Zürich, koehl@phys.ethz.ch

¹ 0 Kelvin entspricht -273°C , dem absoluten Temperaturnullpunkt, Raumtemperatur (20°C) entspricht 293 K.

Plus de bouchon dans le tunnel: supraconducteurs et suprafluides

Des systèmes quantiques près du zéro absolu de température

A proximité du zéro absolu de température, on assiste aux phénomènes de supraconduction et de suprafluidité. Le courant ou le liquide se déplacent sans rencontrer de résistance. Ces deux effets ne peuvent s'expliquer que par la mécanique des quanta et ne sont toujours pas compris intégralement. Depuis peu, on parvient à refroidir des gaz atomiques jusqu'à proximité du zéro absolu pour réaliser des systèmes expérimentaux idéaux pour supraconducteurs et suprafluides. Les scientifiques font ainsi connaissance avec la matière à des températures extrêmement basses.