

Eiskalte Atome

Quantenphysik nahe dem absoluten Nullpunkt

Ultrakalte Quantengase sind ein neues und »heißes« Forschungsgebiet der Physik. Durch bahnbrechende Entdeckungen innerhalb des letzten Jahrzehnts sind die bisher getrennten Disziplinen der Festkörperphysik und der Atomphysik zusammengewachsen und erforschen gemeinsam in die Welt der ultrakalten Materie. Besonders fruchtbar ist dabei die Kooperation zwischen Theorie und Experiment, wie sie zum Beispiel zwischen unserer Gruppe für theoretische Physik und den experimentell arbeitenden Atomphysikern um Prof. Dr. Immanuel Bloch in Mainz besteht. Ultrakalte Atome in Teilchenfallen oder in optischen Gittern, wie sie in Mainz realisiert werden, sind ideale Testsysteme für die Vorhersagen der theoretischen Festkörperphysik, da sie es erlauben, eine Vielzahl komplexer Quantensysteme zu simulieren.

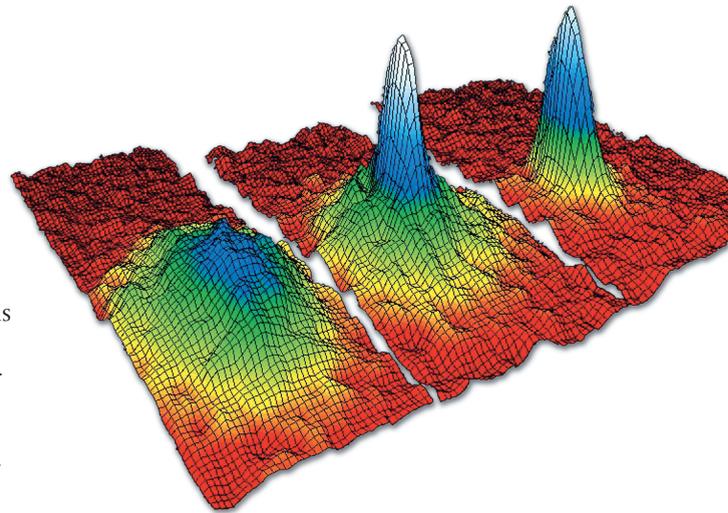
1995 gelang es Wolfgang Ketterle am Massachusetts Institute of Technology (MIT) sowie Eric Cornell und Carl Wieman am JILA in Colorado erstmals, sogenannte Bose-Einstein-Kondensate zu realisieren: Sie kühlten viele Millionen Atome so weit ab, dass die Gesetze der Quantentheorie wesentlich ins Spiel kommen. Es treten dann Effekte auf, wie man sie auch aus Festkörpern kennt, zum Beispiel die Supraleitung. Tatsächlich sind Bose-Kondensate die kältesten Orte im Universum, dicht am absoluten Nullpunkt (-273 Grad Celsius oder 0 Kelvin). Cornell, Ketterle und Wieman, die für ihre Leistung im Jahr 2001 den Nobelpreis für Physik erhielten, erweiterten damit den Blick auf eine Fülle faszinierender Naturphänomene, die im natürlichen Temperaturspektrum der Erde niemals auftreten würden.

Physik am absoluten Nullpunkt

Warum möchte man zu derart tiefen Temperaturen gelangen, und was erwartet man dort? Zum Verständnis ist folgende Analogie hilfreich 1: Man stelle sich vor, wir würden auf der Oberfläche der Sonne leben. Wegen der hohen Temperaturen gibt es dort nur gasförmige

Materie. Wasser, Eis, Schneeflocken wären uns unbekannt. Erst durch sehr starke Abkühlung im Labor würde man die Vielfalt der Materie beobachten, wie wir sie aus unserer Umgebung auf der Erde kennen. Ganz ähnlich ist die Situation, wenn wir nun von der uns vertrauten Umgebungstemperatur (zirka 300 Kelvin) zu tieferen Temperaturen gehen. Erst durch die Entwicklung von leistungsstarken Kühlmechanismen wurde 1911 das faszinierende Phänomen der Supraleitung entdeckt, bei dem Metalle sprunghaft ihren elektrischen Widerstand verlieren. Ein ähnliches Phänomen – die Superflüssigkeit – wurde in Helium beobachtet, welches unterhalb einer kritischen Temperatur völlig ohne Reibungswiderstand fließt. Beide Phänomene treten bei Temperaturen von wenigen Kelvin auf, das heißt etwa einem Hundertstel unserer Umgebungstemperatur.

Ultrakalte Atome wie die Bose-Einstein-Kondensate sind noch wesentlich kälter: weniger als ein Millionstel Kelvin! Diese Temperaturen



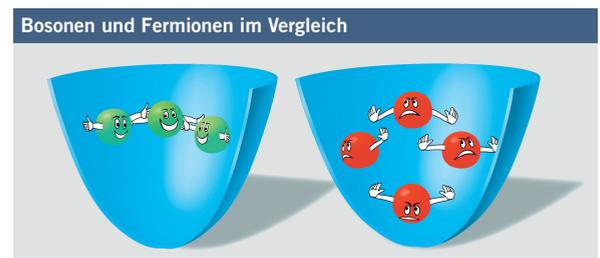
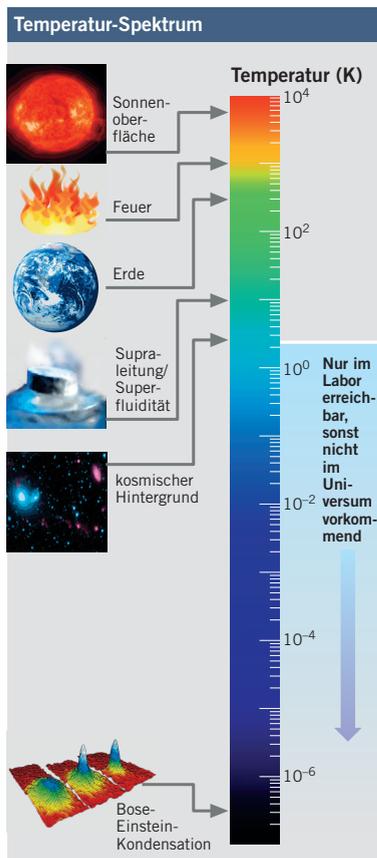
können nicht mehr durch gewöhnliche Kühlmethoden erreicht werden, sondern nur noch mittels Kühlung durch Licht, durch die Laserkühlung, für die 1997 der Nobelpreis vergeben wurde. Generell gilt, dass bei diesen tiefen Temperaturen Effekte der Quantentheorie sichtbar werden, die uns aus dem Alltag nicht bekannt sind.

Gesellige und schüchterne Teilchen

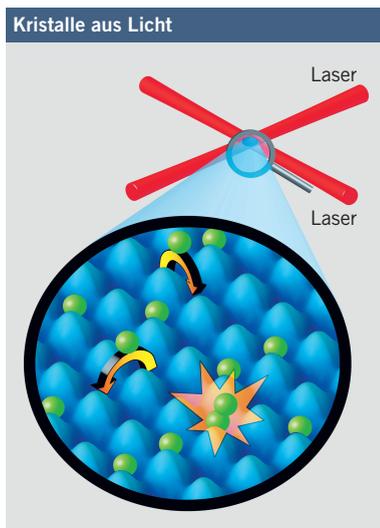
Eine zentrale Vorhersage der Quantentheorie ist, dass in der Natur zwei Sorten von Teilchen existieren: so genannte Bosonen und Fermionen (benannt nach dem indischen Physiker Satyendranath Bose und dem italienischen Physiker Enrico Fermi). Diese verhalten sich sehr unterschiedlich 2: Die Bosonen sind »gesellig« und halten sich gerne im selben Zustand auf. Bei tiefen Temperaturen kann dies zu der von Albert Einstein vorhergesagten Bose-Einstein-Kondensation führen, wo ein großer Anteil der

1 Bose-Einstein-Kondensate sind extrem kalt.

2 Atome in einer optischen, durch Licht erzeugten Falle (blauer Topf). Nach der Quantentheorie verhalten sich bosonische und fermionische Teilchen sehr unterschiedlich: Während Bosonen (links) sich gerne zusammen im selben Zustand aufhalten, sind Fermionen (rechts) Einzelgänger und gehen einander aus dem Weg.



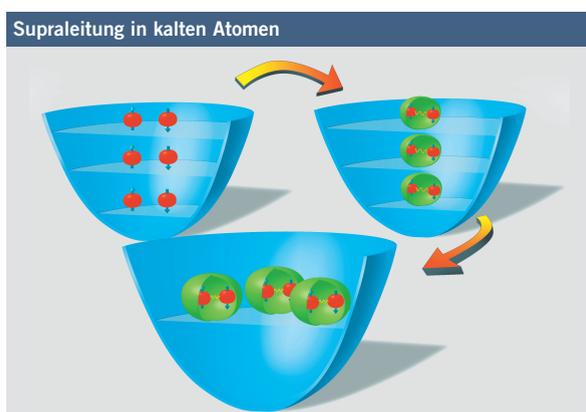
3 Optische Gitter lassen sich erzeugen, indem man mehrere Laserstrahlen überlagert. Man erhält dann einen künstlichen Kristall aus Licht, in dem sich Atome bewegen können, ähnlich wie Elektronen in einem Metall.



Teilchen exakt den gleichen Energie-Zustand besetzt. Man könnte auch sagen, die Bosonen bewegen sich dann im »Gleichschritt«, sie haben identische Eigenschaften und lassen sich durch keine Messung mehr voneinander unterscheiden. Diesen Zustand nennt man Bose-Einstein-Kondensat (BEC). Doch wie kann man experimentell nachweisen, dass es sich tatsächlich um einen solchen Zustand handelt? Die Quantentheorie sagt voraus, dass die kondensierten Teilchen sich wie eine einzige große Materiewelle verhalten. Tatsächlich sind die Welleneigenschaften durch Interferenzmessungen experimentell bestätigt worden.

Im Gegensatz dazu sagt uns die Quantentheorie, dass Fermionen einander aus dem Weg gehen und selbst bei noch so tiefen Temperaturen keine gleichen Zustände besetzen dürfen (Pauli-Prinzip). Diese Eigenschaft ist zum Beispiel dafür verantwortlich, dass Neutronensterne nicht kollabieren, weil selbst durch die enorme Gravitationskraft die fermionischen Neutronen nicht beliebig weit komprimiert werden

4 Supraleitung in kalten Atomen: Verschiedenartige fermionische Teilchen, zum Beispiel magnetische Atome mit zwei verschiedenen Richtungen der Magnetisierung (links oben), können Paare bilden (rechts oben). Diese so genannten Cooper-Paare verhalten sich wie Bosonen, halten sich bevorzugt im selben Zustand auf und bilden bei tiefen Temperaturen ein Bose-Kondensat (unten).



können. Dieses Phänomen – sozusagen ein Neutronenstern im Labor – ist in den letzten Jahren auch von verschiedenen Gruppen in Experimenten beobachtet worden, in denen ultrakalte fermionische Atome mittels Laserstrahlen in optischen Fallen eingefangen wurden.

Derartige Quanten-Eigenschaften, die uns aus der klassischen Physik und dem Alltag überhaupt nicht vertraut sind, lassen sich also in ultrakalten Atomwolken direkt beobachten. Indem man unterschiedliche Atomsorten verwendet, kann man sogar zwischen bosonischen und fermionischen Teilchen wählen. Auch Effekte der Wechselwirkung der Teilchen untereinander können untersucht werden; hier kann man im Labor von einer abstoßenden zu einer anziehenden Wechselwirkung »umschalten«. Diese Flexibilität und Regulierbarkeit machen ultrakalte Atome zu idealen Modellsystemen, und zwar gleichermaßen für Experimentatoren und Theoretiker.

Kristalle aus Licht

Ein weiterer entscheidender Durchbruch war die Kombination von kalten Atomen und optischen Gittern im Jahr 2002. Dieses bahnbrechende Experiment führte die Gruppe von Immanuel Bloch (mittlerweile an der Universität Mainz tätig) und Tilman Esslinger (mittlerweile ETH Zürich) im Münchener Labor des Nobelpreisträgers Theodor Hänsch durch. Unter optischen Gittern versteht man künstliche »Kristalle« aus Licht, die durch Überlagerung von Laserstrahlen erzeugt werden. **3** Man kann sich dies als eine stehende Welle vorstellen, analog einer schwingenden Saite, in der die Stärke des Lichtfelds periodisch vom Ort abhängt. In einer solchen stehenden Welle spüren die Atome ein regelmäßiges Gitterpotenzial, ähnlich den Elektronen in einem Metall. Das Potenzial dieses Gitters verändert ganz entscheidend die Eigenschaften der Teilchen und kann zum Beispiel dazu dienen, die Atome an festen Gitterplätzen einzufrieren.

Mittels kalter Atome und optischer Gitter können neuartige theoretische Modelle und Effekte realisiert werden, die bisher in Festkörpern experimentell nicht zugänglich waren. Sie ermöglichen es theoretischen Physikern wie mir

und meiner Arbeitsgruppe, Modellrechnungen und Ergebnisse von Computersimulationen direkt in »maßgeschneiderten« Experimenten zu testen. Dieses direkte Wechselspiel mit dem Experiment erklärt die große Faszination, die ultrakalte Atome in den letzten Jahren ausübten. Optische Gitter sind auch schon erfolgreich für erste Anwendungen im Bereich der Quanteninformatik eingesetzt worden und könnten in der Zukunft den Bau eines Quantencomputers ermöglichen.

Die wundersame Wandlung der Fermionen

In meiner Arbeitsgruppe interessieren wir uns vor allem für Effekte der Wechselwirkung zwischen den einzelnen Atomen, durch die sich deren Eigenschaften oft drastisch verändern. Ein schönes Beispiel hierfür sind Bosonen und Fermionen, die sich ohne Wechselwirkung sehr unterschiedlich verhalten. Falls man nun zwei verschiedene Sorten von Fermionen gemeinsam zu einem ultrakalten Gasgemisch abkühlt (beispielsweise magnetische Atome mit zwei möglichen Orientierungen der Magnetisierung), können diese durch eine Anziehung Paare bilden. **4** Die Quantentheorie sagt dann voraus, dass sich diese Cooper-Paare wie Bosonen verhalten! Das bedeutet: Durch die Paarbildung wird es den Fermionen möglich, zu mehreren den gleichen Zustand zu besetzen und zu kondensieren. **4** Gleichzeitig tritt auch hier der Effekt des reibungslosen Fließens auf. Man spricht deswegen von einer fermionischen Superflüssigkeit.

Wir haben als erste Arbeitsgruppe eine Theorie formuliert, die erklärt, wie dieses faszinierende Phänomen mittels optischer Gitter realisiert werden kann. Die Grundidee dabei ist, dass die Fermionen paarweise in Gittermulden »eingesperrt« werden und dadurch leichter Paare bilden können. Ein derartiges fermionisches Kondensat im optischen Gitter ist vor kurzem in der Arbeitsgruppe des Nobelpreisträgers Wolfgang Ketterle (MIT) realisiert worden.

Ein Quantensimulator für komplexe Festkörper

Die Ähnlichkeit optischer Gitter mit Festkörperkristallen hat uns außer-

dem motiviert, einen Vorschlag zu formulieren, der an sehr allgemeine Ideen des Nobelpreisträgers Richard Feynman von 1982 anknüpft: Man simuliere ein komplexes Quantensystem durch ein anderes, leichter kontrollierbares, um dadurch physikalische Einsicht zu gewinnen. Für die Umsetzung einer solchen Quantensimulation in optischen Gittern spricht der Vorteil, dass sich dort die Materialeigenschaften, beispielsweise die Geschwindigkeit der Teilchen, sehr leicht regeln lassen, indem man einfach die Intensität des Lasers verändert. Diese Regulierbarkeit ist in realen Festkörpern nicht gegeben beziehungsweise nur sehr schwer erreichbar. Deswegen sind optische Gitter ideale Laborsysteme, um komplexe Vielteilcheneffekte in kontrollierter Weise zu studieren.

Ein wichtiges Beispiel dafür sind die Hochtemperatur-Supraleiter. Diese vor etwa 20 Jahren entdeckte Materialklasse wird bei vergleichsweise hohen kritischen Temperaturen von bis zu 100 Kelvin supraleitend und hat bereits viele technologische Anwendungen gefunden. Ein klares theoretisches Verständnis für diese Materialien fehlt jedoch nach wie vor, trotz intensiver Forschungsanstrengungen. Dies liegt vor allem daran, dass die relevanten theoretischen Modelle, obwohl bereits gegenüber dem realen Material drastisch vereinfacht, immer noch zu komplex sind, um auf heute verfügbaren Rechnern effizient simuliert und gelöst zu werden.

Nach einem von uns im Jahr 2002 formulierten Vorschlag könnten an dieser Stelle ultrakalte fermionische Atome einen entscheidenden Fortschritt ermöglichen: Mit ihrer Hilfe kann man Modelle für Hochtemperatur-Supraleiter im Labor simulieren und dadurch testen, ob diese tatsächlich die richtige Physik beschreiben. Erste Experimente zur Implementierung dieses Programms mit wechselwirkenden Kalium-Atomen in einem optischen Gitter wurden bereits in der Arbeitsgruppe von Tilman Esslinger an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich durchgeführt. Derartige Quantensimulatoren werden, wenn im Experiment realisiert, ungleich leistungsstärker sein als heutige Großrechner. Ultimativ könnten sie zum gezielten Design von komplexen Materialien verwendet werden.

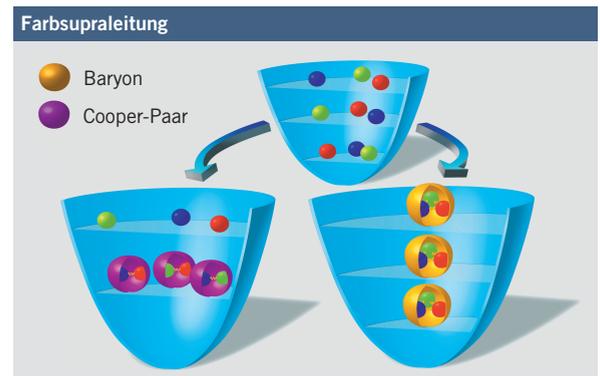
Kosmologische Experimente im Labor

Noch spektakulärere Möglichkeiten ergeben sich, wenn man berücksichtigt, dass Atome verschiedene magnetische Zustände besitzen. Anschaulich vorstellen kann man sich dies als eine Kompassnadel, die in verschiedene, aber nur endlich viele, durch die Quantentheorie festgelegte Richtungen zeigen kann. Für Elektronen gibt es nur zwei solcher magnetischer Ausrichtungen: oben und unten. Atome haben dagegen mehr als zwei magnetische Zustände, die man im Experiment mischen kann. Besonders interessant ist eine Mischung von drei verschiedenen magnetischen Zuständen fermionischer Atome, die man auch mit den Farben rot, blau und grün identifizieren kann. Hierdurch erhält man ein vereinfachtes Modellsystem für die Quantenchromodynamik (QCD), in der die elementaren Bestandteile, die Quarks, ebenfalls drei verschiedene Farbzustände annehmen können.

Wie wir vor kurzem nachgewiesen haben, kann man auf diesem Weg mit kalten Atomen so genannte Farb-Supraleiter realisieren, in denen bosonische Cooper-Paare in drei verschiedenen Farbkombinationen gebildet werden können, nämlich in rot-grün, rot-blau und in blau-grün. **■** Es wird vermutet, dass derartige farbsupraleitende Phasen auch im Inneren von Neutronensternen auftreten, wobei dort statt aus Atomen Farbkombinationen aus den sehr viel kleineren Quarks gebildet werden. Man kann also im Labor mit ultrakalten fermionischen Atomen Simulationen von kosmologischen Phänomenen durchführen!

Noch deutlicher wird diese Analogie, wenn man die Dichte der Atome verändert: Wie wir in neuen Modellrechnungen festgestellt haben, gibt es bei geringer Dichte einen Phasenübergang zu »baryonischer« Materie, wo jeweils drei verschiedenfarbige Atome ein farbneutrales »Baryon« bilden. **■** Genau dies geschieht auch in der uns umgebenden Materie: Dort fügen sich Gruppen von je drei Quarks zu Protonen und Neutronen zusammen, die dann Atomkerne bilden. Die kalten Atome stellen also eine Art Modellbaukasten für die Theorie der Quarks und ihrer Wechsel-

wirkungen (die QCD) dar. Interessant ist dies vor allem deswegen, weil zahlreiche Probleme der QCD wegen ihrer Komplexität – trotz großer Anstrengungen von Theoretikern – bisher ungelöst sind. An dieser Stelle können die kalten Atome durch Quantensimulationen im Labor einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der starken Wechselwirkung und der Theorie der Elementarteilchen leisten. Experimenten-



te hierzu sollen im Rahmen eines geplanten Transregio-Sonderforschungsbereichs der Arbeitsgruppe von Immanuel Bloch (Mainz) durchgeführt werden, mit theoretischer Unterstützung durch unsere Arbeitsgruppe.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das noch sehr junge Gebiet der ultrakalten Quantengase bereits eine Vielzahl von spannenden neuen Entwicklungen und Fragestellungen eröffnet hat. Vereinfacht ausgedrückt, stellen ultrakalte Atome einen sehr flexiblen Modellbaukasten dar, mit dem komplexe Festkörpersysteme simuliert werden können, aber auch fundamentale Fragestellungen aus anderen Bereichen der Physik, zum Beispiel aus der Theorie der Elementarteilchen und der Kosmologie. Gerade diese Interdisziplinarität macht das Gebiet für junge Wissenschaftler besonders attraktiv. Wir können uns also in den nächsten Jahren auf spannende neue Physik freuen. **◆**

■ Farbsupraleitung in einem System aus drei verschiedenen Sorten fermionischer Atome (rot, blau, grün) in einer optischen Falle. Die Atome können entweder verschiedenfarbige Cooper-Paare und damit einen Supraleiter bilden (links) oder sich in Gruppen von je dreien zu farbneutralen »Baryonen« zusammenfügen (rechts). Auf diese Weise können kalte Atome das Verhalten der Quarks in der Quantenchromodynamik simulieren.

Der Autor

Prof. Dr. Walter Hofstetter, 34, studierte in München und Oxford Physik. Nach der Promotion an der Universität Augsburg und Forschungsaufenthalten als Postdoc an der Harvard University und dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde er 2004 auf eine Universitätsprofessur an der RWTH Aachen berufen. Seit 2006 ist er Professor für Physik in Frankfurt. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich neben der Theorie ultrakalter Quantengase mit stark korrelierten Elektronensystemen und Transport in elektronischen Nanostrukturen.