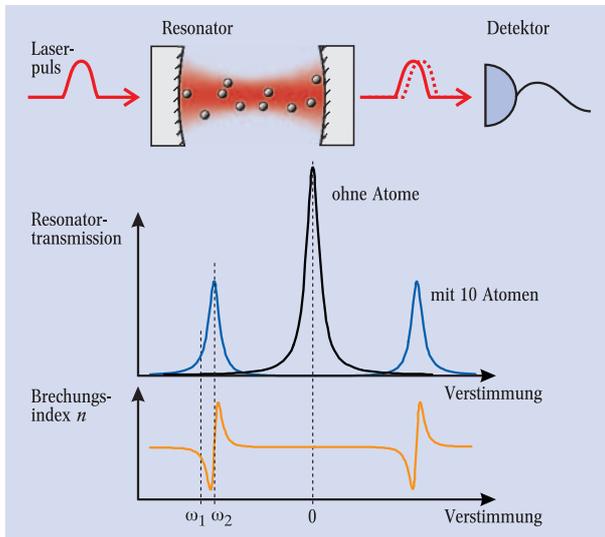


Dr. Pepijn Pinkse und Dr. Axel Kuhn, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching

aufgrund seiner hunderttausendfachen Spiegelung eine ähnliche Wirkung wie eine viel größere Atomwolke und beeinflusst daher merkbar die optischen Eigenschaften des Resonators [4]. Um diesen Einfluss zu steigern, verwenden Shimizu et al. langsame Rubidium-Atome aus einem atomaren Springbrunnen, sodass jedes Atom mehrere Mikrosekunden im Resonator bleibt.

Die Anwesenheit weniger Atome genügt, um die Resonanzfrequenz des leeren Resonators in zwei neue Resonanzlinien aufzuspalten. Der Brechungsindex variiert dispersionsartig auf jeder der beiden neuen Resonanzlinien (Abb.). Dies führt bei den Resonanzfrequenzen zu einer Reduktion der Gruppengeschwindigkeit und damit zur Verzö-



Im Mittel genügen bereits zehn Atome, um einen Laserpuls in einem Resonator zu verzögern oder zu beschleunigen (oben). Die Atome spalten die Resonanzfrequenz des leeren Resonators in zwei Linien auf, die mit einer Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex einhergehen (unten). Ein Puls der Frequenz ω_1 wird dadurch beschleunigt, ein Puls der Frequenz ω_2 abgebremst.

gerung von Lichtpulsen. Bei leicht kleineren oder größeren Frequenzen hat die Brechungsindexänderung ein umgekehrtes Vorzeichen, sodass die Pulse etwas beschleunigt werden. Ein wesentlicher Unterschied zu Experimenten in homogenen Gasen besteht darin, dass ein idealer Resonator bei der Resonanz vollständig transmittiert und nicht, wie ein freies Atom, seine Energie in alle Richtungen abstrahlt. Dies erlaubt es, beschleunigte oder verzögerte Lichtpulse zu beobachten, ohne weitere atomare Zustände und zusätzliche Lichtfelder, wie bei EIT, ins Spiel zu bringen.

Die Forscher haben beobachtet, dass eine mittlere Zahl von zehn Atomen im Resonator genügt, um

Lichtpulse entweder um 440 ns zu verzögern oder um 170 ns zu beschleunigen, d. h. ihre Gruppengeschwindigkeit ist „subluminal“ bzw. „superluminal“. Die Kausalität ist dabei nicht verletzt, da die superluminale Ausbreitung sich lediglich in einer Änderung der Pulsform innerhalb der Pulsdauer von ca. 5 μ s äußert. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass selbst ein leerer Resonator in der Lage ist, je nach Frequenzwahl Lichtpulse leicht zu verzögern oder zu beschleunigen.

Sollte es gelingen, den beobachteten Effekt mit nur einem einzelnen Atom oder Ion nachzuweisen, würden sich vollkommen neue Anwendungsbereiche eröffnen. Ein sehr langsames einzelnes Atom sollte hierzu genügen, wie Rechnungen von Shimizu et al. zeigen, die diesen Ansatz verfolgen. Ideal wäre natürlich, ein einzelnes Atom oder Ion in einem Resonator hoher Güte (Finesse) zu speichern. An einer Realisierung solcher Systeme wird weltweit intensiv gearbeitet, da Anwendungen in der Quanteninformationsverarbeitung auf der Hand liegen. Hat das Teilchen z. B. einen weiteren (Grund-)Zustand, der nicht an den Resonator koppelt und somit keine Verzögerung bewirkt, dann sollte ein Atom in einer Überlagerung zwischen beiden Grundzuständen zu einer Überlagerung zwischen einem verzögerten und nicht verzögerten Lichtpuls führen. Darüber hinaus sollte es auch möglich sein, die Transmission des Resonators in Abhängigkeit des atomaren Zustands zu schalten, und somit den Weg eines Lichtpulses oder Photons (reflektiert oder transmittiert) mit dem Zustand des Teilchens zu verschränken [5]. In den letzten Jahren wurden sogar mehrere Quellen für einzelne Photonen entwickelt, die zum Teil auf gekoppelten Atom-Resonator-Systemen basieren [6], die dem System von Shimizu vergleichbar sind. Man kann sich leicht ein Experiment vorstellen, in dem ein einzelnes Atom ein einzelnes Photon verzögert.

Das Experiment von Shimizu ist ein weiterer Schritt hin zur vollständigen Kontrolle quantenmechanischer Systeme. Dank dieser Kontrolle erlauben es moderne quantenoptische Experimente heute zum einen, grundlegende Gedankenexperimente zur Quantenmechanik durchzuführen, zum anderen drin-

gen sie in das konzeptionell neue Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung vor, das auf der deterministischen Kopplung verschiedener Quantensysteme beruht. Aus diesem sehr aktuellen Forschungsgebiet werden an dieser Stelle mit großer Sicherheit weitere Berichte folgen.

PEPIJN PINKSE UND AXEL KUHN

- [1] L. V. Hau et al., Nature **397**, 594 (1999)
- [2] D. F. Phillips et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001)
- [3] Yukiko Shimizu et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 233001 (2002)
- [4] P. Pinkse und G. Rempe, Phys. Bl., November 2000, S. 49
- [5] K. M. Gheri und H. Ritsch, Phys. Rev. A **56**, 3187 (1997)
- [6] A. Kuhn, M. Hennrich und G. Rempe, Phys. Rev. Lett. **89**, 067901 (2002)

Und es kondensiert doch ...

Nur durch raffinierte Tricks gelingt es, ultrakaltes Cäsium in den Club der Bose-Einstein-Kondensate aufzunehmen. Dabei offenbart es seine äußerst vielseitigen Wechselwirkungseigenschaften.

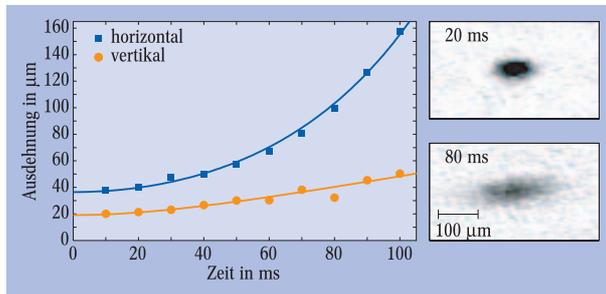
Von allen bislang untersuchten Quantengasen zeigt Cäsium (einziges stabiles Isotop: das Boson ^{133}Cs) das merkwürdigste Verhalten. Da es sich sehr effizient mit Lichtdruckkräften kühlen lässt, galt das schwerste stabile Alkaliatom beim Rennen um die Bose-Einstein-Kondensation ursprünglich als hoher Favorit. Während es in den vergangenen Jahren gelang, alle bosonischen Ein-Elektronen-Atome von Wasserstoff bis Rubidium bis zur Kondensation abzukühlen, schlugen sowohl „traditionelle“ Methoden wie Verdampfungskühlung in magnetischen Fallen [1] als auch neuere Ansätze mit optischen Kühl- und Speichermethoden [2] bei Cäsium fehl. Cäsium widersetzte sich der Kondensation vehement mittels inelastischer Stoßprozesse, welche unerwartet hohe Verlust- und Aufheizraten zur Folge hatten. Außerdem wurde bald klar, dass ein Cäsiumkondensat einem attraktiven Wechselwirkungspotential unterliegt, sodass dem Kondensat der sofortige Kollaps durch Implosion drohte.

Erst jetzt ist es Rudolf Grimm und seiner Gruppe an der Universität Innsbruck mittels ausgeklügel-

1) Der hiermit verbundene riesige Querschnitt von ca. $(1 \mu\text{m})^2$ für elastische Stöße sorgt für immense Frequenzverschiebungen in Cäsium-Atomuhren, welche pikanterweise Cäsium zum am wenigsten geeigneten Element für einen Zeitstandard machen.

ter Techniken gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) aus Cäsiumatomen herzustellen [3]. Der Schlüssel zum Erfolg bestand in der gezielten Manipulation der interatomaren Wechselwirkung unter Ausnutzung quantenmechanischer Streuresonanzen. Der Gruppe gelang so die größtmögliche Annäherung an ein ideales Gas mit der niedrigsten, jemals beobachteten mittleren Geschwindigkeit der Atome von wenigen Metern pro Stunde! Eindrucksvoller lässt sich die Bedeutung des absoluten Nullpunkts der gaskinetischen Temperatur wohl kaum demonstrieren.

Die erfolgreiche Strategie von Rudolf Grimm und seinen Mitarbeitern basiert auf zwei wesentlichen Fortschritten auf dem Gebiet der Quantengase. Zum einen besann



Die beiden Absorptionsbilder rechts zeigen die Expansion eines nicht-wechselwirkenden, nahezu idealen Cäsiumkondensats nach Ausschalten der optischen Falle. Die Datenpunkte geben die 1/e-Breite der Dichteverteilung als Funktion der Dauer der freien Expansion wieder. In vertikaler Richtung unterliegt das Kondensat keinen Kräften, da die Schwerkraft durch eine magnetische Levitationskraft kompensiert wird, und steht deshalb nahezu still. (aus [3])

man sich auf die Vorzüge optischer Atomfallen, welche die Kraft auf das induzierte elektrische Dipolmoment ausnutzen [4]. Im Gegensatz zu magnetischen Fallen erlauben es diese Fallen, Atome im energetisch niedrigsten internen Atomzustand zu speichern. Inelastische Zweikörperstöße sind ausgeschlossen, da bei tiefen Temperaturen keine Energie mehr für exotherme Prozesse zur Verfügung steht.

Zum anderen wurde ausgenutzt, dass sich die interatomare Wechselwirkung durch ein äußeres Magnetfeld durchstimmen lässt. Bei ultrakalten Temperaturen kann die Wechselwirkung der Teilchen durch einen einzigen Parameter, die Streulänge für elastische s-Wellen-Streuung, charakterisiert werden. Diese Streulänge weist magnetfeldabhängig mehrere Polstellen auf, so genannte Feshbach-Resonanzen. Bei Cäsium hängt die Streulänge bereits bei kleinen

Magnetfeldern stark vom Feld ab. Im „Ausläufer“ einer sehr breiten Feshbach-Resonanz beträgt die Streulänge $-3000 a_B$ bei 0 G ($a_B = \text{Bohr-Radius}$)¹⁾ und wächst mit steigendem Magnetfeld bis zu $+1000 a_B$ bei 55 G. Bei etwa 17 G, dem Nulldurchgang der Streulänge, verhält sich das ultrakalte Ensemble wie ein ideales Gas. Neben dieser schwachen Magnetfeldabhängigkeit der Streulänge weist Cäsium eine Vielzahl sehr scharfer Feshbach-Resonanzen auf, deren präzise experimentelle Bestimmung und theoretische Analyse [5] dazu geführt haben, dass die Potentialfläche der Cs-Cs-Wechselwirkung mit unvergleichlicher Genauigkeit bekannt ist.

In einem kleinen Fenster von Magnetfeldwerten zwischen 21 und 25 G gelang es, das optisch gespeicherte Cäsiumgas durch Verdampfung entlang eines ausgeklügelten Pfads im Phasenraum bis hin zu einem reinen BEC aus etwa 16000 Atomen abzukühlen. Um die Schwerkraft zu kompensieren, wird die magnetische Dipolkraft in einem zusätzlich angelegten Quadrupol-Magnetfeld ausgenutzt (magnetische Levitation). Die „sanfte“ magnetische Durchstimbarkeit der internen Energie des Kondensats erlaubt es nun, die verschiedenen Regime der Selbstwechselwirkung von stark attraktiv, d. h. implodierenden Kondensaten bei negativer Streulänge, bis zu stark repulsiv, d. h. explodierenden Kondensaten bei positiver Streulänge, eindrucksvoll zu demonstrieren [3].

Besonders spektakulär ist das Verhalten des Kondensats bei verschwindender Wechselwirkung zwischen den Atomen, d. h. am Nulldurchgang der Streulänge. Dies entspricht genau dem von Bose und Einstein in ihrem Originalartikel von 1925 studierten Fall eines idealen Gases. Da das „ideale“ Kondensat keine interne Energie mehr besitzt, bleibt es im Raum stehen, wenn das Fallenpotential adiabatisch ausgeschaltet und die Gravitation weiterhin durch das magnetische Levitationsfeld kompensiert wird (Abb.). Die vertikale Ausdehnung des Kondensats beträgt nach 100 ms lediglich 50 μm , was einer mittleren kinetischen Energie von nur 600 pK (in Einheiten von k_B) entspricht. In horizontaler Richtung expandiert das Kondensat durch repulsive Kraftkomponenten des Levitationsfeldes hingegen etwas schneller. Die Innsbrucker Gruppe glaubt, durch einige einfache technische Modifikationen die verbleibende kinetische Energie sogar auf wenige pK reduzieren zu können.

Nachdem nun gezeigt wurde, wie man durch Anwendung der gesamten Trickkiste aus Atomphysik und Quantenoptik auch widerspenstige Elemente kondensieren kann, werden sicherlich weitere Elemente in den immer noch feinen Club der Bose-Einstein-Kondensate Aufnahme finden. Kondensate aus Cäsium selbst versprechen wichtige Anwendungen bei der Erzeugung molekularer BEC durch Feshbach-induzierte Rekombination, bei der Realisierung hochgenauer Atomuhren und der Präzisionsmessung fundamentaler Größen, wie etwa dem Rückstoß eines absorbierten Photons.

MATTHIAS WEIDEMÜLLER

- [1] D. Guéry-Odelin et al., Europhys. Lett. **44**, 25 (1998); A.M. Thomas et al., erscheint in J. Opt. B.
- [2] A. J. Kerman et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 439 (2000); D.-J. Han et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 724 (2000).
- [3] T. Weber, J. Herbig, M. Mark, H.-C. Nägerl, R. Grimm, Science **299**, 232, (2002).
- [4] M. Weidemüller und R. Grimm, Phys. Bl., Dezember 1999, S. 41.
- [5] C. Chin et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 2717 (2000); P. J. Leo et al., ibid., 2721 (2000).

Priv.-Doz. Dr. Matthias Weidemüller, Max-Planck-Institut für Kernphysik, 69029 Heidelberg

KURZGEFASST...

Interferometrie mit Röntgenlicht
Erstmals ist es gelungen, mit Röntgenlicht ein Interferenzmuster in einem Fabry-Perot-Interferometer zu erzeugen¹⁾. Physiker um Yuri Shvyd'ko (Uni Hamburg) nutzten dafür spezielle Spiegel aus Saphir, die Röntgenlicht allerdings nur in einem sehr engen Spektralbereich reflektieren. Mit spektral sehr scharfer Synchrotronstrahlung gelang es jedoch, ein Röntgen-Interferenzmuster zu erzeugen. Damit könnte sich ein besserer Wellenlängenstandard erreichen lassen.

Hinweis auf Neutrino-Oszillationen
Erste Messungen am japanischen KamLAND-Antineutrino-Detektor haben einen weiteren starken Hinweis auf die Existenz von Neutrino-Oszillationen erbracht. KamLAND detektierte über 145 Tage Antineutrinos aus Reaktoren. Die Messung von nur 54 Neutrinoereignissen statt 86 – wie nach dem Standardmodell erwartet – ist, so die beteiligten Forschern, nur mit der Annahme von Neutrino-Oszillationen zu vereinbaren²⁾.
1), 2) erscheinen in Phys. Rev. Lett.