

QUANTENOPTIK

Ideen für neue Sensoren

Im Januar ist in der Schweiz der neue Nationale Forschungsschwerpunkt «Quantenwissenschaft und -technologie» an den Start gegangen, an dem sich auch Forschungsgruppen der Universität Basel beteiligen, darunter das Team des Quantenoptikers Philipp Treutlein. Die Physiker erzeugen Bose-Einstein-Kondensate auf Atomchips und lassen diese mit geeigneten Systemen in Wechselwirkung treten. Die Ergebnisse liefern unter anderem Ideen für neue Sensoren.

BEATE PEISELER-SUTTER

Wenn Gase aus bosonischen Atomen (z.B. Rubidium) in magnetischen Fallen durch Laser- und evaporative Kühlung bis auf wenige Nanokelvin über dem absoluten Nullpunkt abgekühlt werden, kommt es zur Bose-Einstein-Kondensation (siehe Kasten). Im Zuge der extremen Abkühlung werden die Atome langsam wie Fussgänger und lassen sich bequem studieren. Zusätzlich gehen sie kollektiv in einen gemeinsamen energetischen Grundzustand über und können dann mit einer einzigen Wellenfunktion beschrieben werden. Dieses makroskopische Quantenphänomen, manchmal ist von einem «Superatom» die Rede, lässt sich sehr genau kontrollieren und ermöglicht quantenphysikalische Experimente mit gut beschreibbaren Ergebnissen. Bose-Einstein-Kondensate (BECs) bilden auch die Grundlage für Atomlaser, die keinen kohä-

renten Photonenstrahl, sondern einen kohärenten Materiewellenstrahl aussenden.

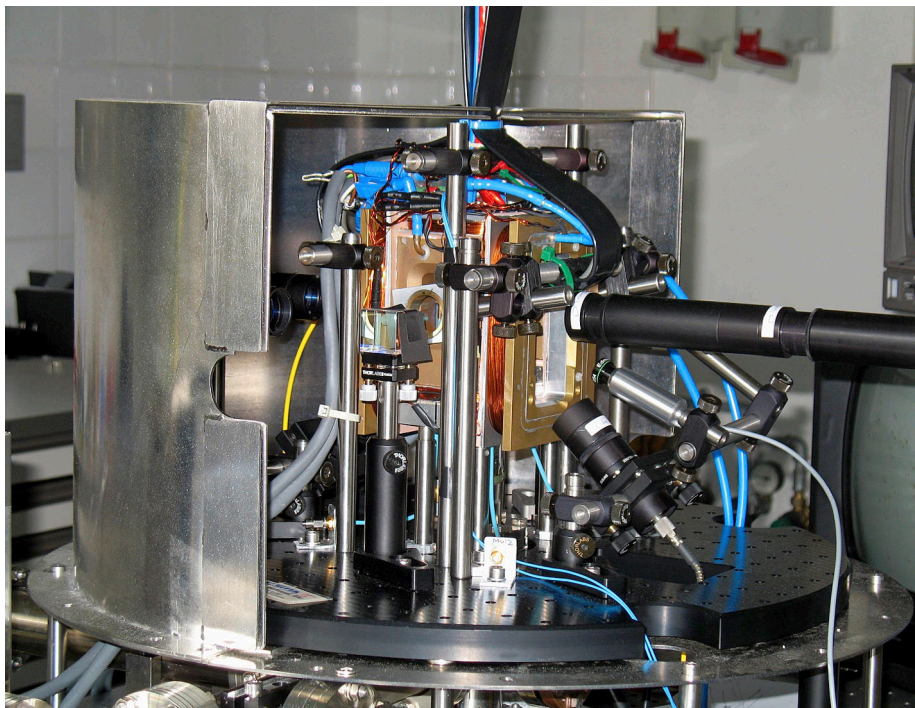
Anwendungen von präziser Atomuhr bis zum Quantencomputer denkbar

Seit sich BECs mit deutlich gesenktem apparativen und energetischen Aufwand in Rekordzeit auf handlichen Mikrochips realisieren und manipulieren lassen – 2001 gelang Forschern um Nobelpreisträger Theodor Hänsch an der Universität München und am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching der Durchbruch – haben die Experimente noch einmal enormen Aufschwung erfahren. Nicht nur die Grundlagenforscher sind begeistert. Ihre Experimente stellen auch neue technologische Anwendungen in Aussicht, von besseren Interferometern über präzisere Atomuhren bis hin zu besonders empfindlichen Sensoren. Last but not least sind BECs als Bauteile für Quantencomputer

im Gespräch, Rechner, die Rechenschritte nicht nacheinander, sondern simultan bewältigen sollen, indem sie auf die Möglichkeit der Überlagerung von Quantenzuständen zugreifen.

Zur Erzeugung von BECs auf Atomchips werden Rubidiumatome – hergestellt durch elektrisches Erhitzen aus Rubidiumchromat und einem Reduktionsmittel – in eine unter den Chip geklebte Vakuumkammer aus Glas geleitet und in einer magnetooptischen Falle (MOT) eingefangen und vorgekühlt (siehe Kasten). Damit der räumliche Laserbeschuss gelingt, muss die Chipoberfläche verspiegelt sein. Nach dem Erhalt der kalten Atomwolke werden die MOT ab- und die Ströme in den Leiterbahnen des Siliziumchips eingeschaltet. Die von ihnen verursachten Magnetfelder halten die Atomwolke unter dem Chip in einem Potenzialtopf in der Schwebe. Die Forscher planen und verlegen die Leiterbahnen in den mehrlagigen Chips so komplex, dass sich eine oder mehrere Magnetfallen an verschiedenen Orten aufbauen lassen und das BEC zum Beispiel schrittweise verschoben werden kann. Auch die Geometrie der Fallen und ihr Potenzial lassen sich variieren, weshalb sich ein und derselbe, von den meisten Grundlagenforschern selbst entworfene und hergestellte Chip für ganz unterschiedliche Experimente eignet.

Bei Einhaltung eines Mindestabstandes von wenigen Mikrometern zwischen dem ultrakalten Kondensat und der zimmertemperaturwarmen Chipoberfläche sind die thermischen Wechselwirkungen überraschenderweise unbedeutend, sodass sich eine zusätzliche Kühlung erübrigt. Die ursprünglich von Jakob Reichel, inzwischen Professor am Pariser Kastler-Brossel Laboratorium, und Kollegen aus Hänschs Team entwickelten Atomchips werden inzwischen von der 2007 von Hänsch und Reichel mitgegründeten US-amerikanischen Start-up-Firma ColdQuanta vermarktet. Ausser den Chips wird auch das Know-how der Hänschen Mitar-



Apparatur für Experimente mit ultrakalten Atomen auf Atomchips. Der Chip befindet sich im Zentrum der Apparatur, umgeben von Spulen für die Magnetfelderzeugung und Laseroptik für Laserkühlung und Abbildung der Atome. Die Apparatur kann mit einer Magnetfeldabschirmung umgeben werden (auf dem Bild halb offen).

Bild: Philipp Treutlein

chen die Rolle des nanomechanischen Oszillators übernehmen», überlegt Treutlein. Ausserdem stellt sich die Frage, ob sich mit den nur ein paar tausend Atome zählenden BECs auch der Quantenzustand des Resonators manipulieren lässt (Quantum State Engineering).

Mikrowellen sind ein weiteres externes System, mit dem die Basler Atomchip-Experten BECs zu Leibe rücken. Vergangenen Sommer vermeldete die Gruppe, dass sich die Kondensate zur quantitativen Vermessung von Mikrowellenfeldern nutzen lassen, wie sie zum Beispiel von Mikrowellenschaltkreisen in Mobiltelefonen und Geräten mit WLAN-Empfänger erzeugt werden. Deren Funktionstüchtigkeit wird bislang mit makroskopischen Sonden überprüft, ein zeitaufwändiges Prozedere, bei dem es zu Störungen des Mikrowellenfeldes kommen kann. Um die Atomwolke über dem Schaltkreis an die jeweils zu vermessende Stelle zu bewegen, bedienen sich die Atomchip-Experten verschiebbarer Magnetfallen. Durch die Wechselwirkung mit den lokalen Federn kommt es in den Atomen zu einer Änderung des inneren Zustands, die mit resonantem Laserlicht sichtbar gemacht werden kann. Eine CCD-Kamera zeichnet die zustandsabhängige Lichtabsorption als quantitativ auswertbares Schattenbild auf (state-selective absorption imaging). Aus diesem lässt sich dann das Mikrowellenfeld rekonstruieren. 2005 hatten Forscher um Jörg Schmiedmayer von der Technischen Universität Wien in Nature berichtet, dass sich statische Magnetfelder auf ähnliche Weise vermessen lassen.

Hochsensibles Messgerät

Mikrowellenfelder können auch dazu dienen, ein BEC auf einem Atomchip aufzuspalten. Die beiden resultierenden Atomstrahlen können anschliessend überlagert werden. Das Resultat ist ein Atom-Interferometer, ein hoch sensibles Messgerät, mit dem z. B. Rotationsbewegungen oder minimale Änderungen der Erdanziehung bestimmt werden können, was u. a. neue Navigations-, Öl- und Wassersuchgeräte verspricht. Wie das funktioniert, erklärten Treutlein & Co 2009 in Nature Physics: Zunächst werden die BEC-Atome durch einen kurzen Radiowellenpuls aus einem Zustand mit nach unten weisenden Spins in einen Überlagerungszustand mit senkrecht nach unten und senkrecht nach oben weisenden Spins überführt. Anschliessend wurden die

Atome mittels zustandsselektiver Mikrowellenpotenziale räumlich voneinander getrennt. Nach dem Abschalten der Mikrowellen konnten sie durch einen erneuten Radiowellenpuls wiedervereinigt werden. Dabei wurde ein für die Überlagerung von Wellen typisches Interferenzmuster sichtbar. Die Forscher beobachteten bei diesem Experiment auch, dass die Atome im Überlagerungszustand, während der räumlichen Trennung, wegen elastischer Stösse untereinander eine «Spin-Quetschung» (spin squeezing) erfahren. Für die Spin-Ausrichtung gilt die Heisenbergsche Unschärferelation, ein Gesetz der Quantenphysik, das erklärt, warum Messungen am Quantenlimit von einer Unschärfe, einem Quantenrauschen, begleitet sind.

Die Quetschung des Spins führt dazu, dass die zuvor symmetrisch verteilte Unschärfe in einer Richtung abnimmt und in der anderen grösser wird. Es kommt zu einer Verschränkung der Atome, die in der Folge ein nahezu perfekt synchrones Verhalten zeigen. Dass das Quantenrauschen in einer Richtung abnimmt, erhöht die Präzision von Messungen unter Verwendung von

BECs. Bisher waren auf Atomchips keine Atom-Atom-Verschränkungen gelungen, was der Technik, die unter anderem zum Herzstück von Interferometern, Atomuhren und Sensoren werden soll, Minuspunkte einbrachte. Im Frühjahr 2010 berichteten die Gruppen von Treutlein und Hänsch in Nature vom grossen Durchbruch. Die zur Spin-Quetschung führenden Stösse hatten die Forscher wiederum mit Mikrowellenfeldern kontrolliert. Für Systeme aus stabil verschränkten Teilchen, die noch bei grosser Entfernung voneinander in ihren Eigenschaften verbunden bleiben, ergeben sich auch Anwendungen im Bereich der Nachrichtentechnik, zum Beispiel bei der abhörsicheren Übertragung von Nachrichten. Die Schweizer Firma ID Quantique entwickelt bereits Verschlüsselungssysteme, die auf der Basis verschränkter Photonen basieren.

Atome im Schrittempo

Bestimmte neutrale Atome lassen sich für geraume Zeit in magneto-optischen Fallen (magneto-optical trap, kurz MOT) fangen. Um aufheizende Stösse mit dem Hintergrundgas zu vermeiden, finden solche Experimente im Ultrahochvakuum statt. In der MOT erzeugen Magnetspulen magnetische Felder mit einem lokalen Minimum, einem Potenzialtopf, in dem sich nur sehr langsame bzw. kalte Atome festsetzen lassen. Die Abkühlung des atomaren Gases auf entsprechend niedrigen Temperaturen von wenigen Millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt von null Kelvin (0K) oder minus 273,15°C gelingt durch einen räumlichen Beschuss mit Laserlicht, dessen Frequenz leicht rotverstimmt ist gegenüber einem atomaren Übergang. Aus den drei Raumrichtungen werden jeweils zwei gegenläufige Laserstrahlen auf die Falle gerichtet.

Bei jeder Frontalkollision absorbieren die Atome ein Photon, erfahren einen Rückstoss und verlieren kinetische Energie. Eine zusätzliche Abkühlung auf unter einem Millionstel Grad über 0K erfolgt danach durch eine evaporative Kühlung in einer reinen Magnetfalle. Entweder wird der Potenzialtopf abgeflacht und/oder den schnellsten Teilchen wird durch die Einstrahlung von Radiowellen aus dem Topf «herausgeholfen». Das Ergebnis sind ultrakalte Gase, bei denen sich die Atome im Schrittempo bewegen. Wie in anderen Nanosystemen auch, treten Quanteneffekte in den Vordergrund, so dass die Systeme zum Beispiel gleichzeitig Teilchen- und Wellencharakter zeigen. Dass die ultrakalten Gase nicht kondensieren, liegt an der geringen Teilchendichte, auf die bei den Tieftemperaturexperimenten geachtet wird. An Gasen aus bosonischen Atomen lässt sich trotzdem eine Art der Kondensation beobachten, allerdings eine nicht-klassische Form, die 1924 von den Physikern Satyendranath Bose und Albert Einstein vorhergesagte, 1995 von den Physikern Eric Cornell und Carl Wieman erstmals nachgewiesene Bose-Einstein-Kondensation.

Der Grund: Anders als fermionische Atome mit einer ungeraden Anzahl Elektronen plus Protonen plus Neutronen und folglich halbzahligen Drehimpuls bzw. Spin können bosonische Atome mit ganzzahligen Spin (z. B. bestimmte Isotope von Lithium, Natrium, Rubidium usw.) unterhalb einer Grenztemperatur ein und denselben quantenmechanischen Grundzustand besetzen.

(bp)