

Riesiges Quantenobjekt – völlig schwerelos

Mit einer speziellen Apparatur gelang es Physikern, ein Bose-Einstein-Kondensat mehr als eine Sekunde lang im schwerelosen Zustand zu beobachten. In dieser Zeit dehnte es sich auf zwei Millimeter Länge aus – eine für Quantenobjekte gigantische Größe.

VON CLAUD LÄMMERZAHN, HAUKE MÜNTINGA UND REINHOLD WALSER

Die meisten Alltagsphänomene gehorchen der klassischen newtonschen Physik. Im submikroskopischen Bereich der Elementarteilchen gelten dagegen die teils paradox wirkenden Gesetze der Quantenmechanik. Besonders interessant für Physiker ist die Schnittstelle zwischen den beiden Domänen. In diesen Übergangsbereich fällt beispielsweise die Bose-Einstein-Kondensation atomarer Gase. In den 1920er Jahren von Albert Einstein (1879–1955) und Satyendranath Bose (1894–1974) vorhergesagt, wurde sie 1995 zum ersten Mal im Labor realisiert. Dabei besetzen bis zu einige Millionen Atome gemeinsam den tiefsten Energiezustand.

Infolgedessen verlieren sie ihre Individualität und lassen sich durch eine einzige kollektive Wellenfunktion beschreiben. Eine solche Materiewelle, die makroskopische Ausdehnungen erreichen kann, eignet sich für hochpräzise interferometrische Messungen – sowohl in der Grundlagenforschung als auch bei praktischen Anwendungen wie der Geodäsie oder der Weltraumnavigation.

Um ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen, fangen Physiker neutrale Atome in einem Ultrahochvakuum berührungsfrei in optischen Dipol- oder Magnetfallen ein und kühlen sie bis auf wenige milliardstel Kelvin (Temperatur über dem absoluten Nullpunkt bei $-273,15$ Grad Celsius) ab. Dabei gehen die Teilchen in den erwähnten kollektiven Quantenzustand über. Nach dem Abstellen der Falle kann man ihr Verhalten beobachten. Ein klassisches Gas würde sich unter diesen Umständen gleichmäßig nach allen Seiten ausdehnen –

nicht so das Bose-Einstein-Kondensat. Es merkt sich gleichsam die Form der meist asymmetrischen Falle und breitet sich am schnellsten in die Richtung aus, in der es am stärksten eingeeignet war.

Da die Atomwolke in einem gewöhnlichen Labor der Erdanziehung unterliegt, sind solche Beobachtungen jedoch durch die Größe der Vakuumkammer auf einige hundertstel Sekunden beschränkt. Anders wäre es in der Schwerelosigkeit. Dann fiel das Kondensat nicht mehr zu Boden, sondern ließe sich während der freien Expansion relativ lange beobachten. Auch bei den erwähnten Materiewelleninterferometern wäre eine möglichst lange Flugzeit der Atomwolke in dem Gerät erwünscht, da die Genauigkeit der Messung vom Quadrat dieser Zeit abhängt. Einer der wenigen Orte auf der Erde, an denen sich zumindest für mehrere Sekunden Schwerelosigkeit herstellen lässt, ist der 146 Meter hohe Fallturm am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen.

Im Rahmen des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR finanzierten Projekts QUANTUS haben unter Leitung von Ernst Rasel vom Institut für Quantenoptik der Universität Hannover Wissenschaftler verschiedener Forschungseinrichtungen eine Apparatur entwickelt, die sich für Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten in diesem Turm eignet. Sie ist rund zwei Meter hoch, hat einen Durchmesser von 81 Zentimetern und wiegt nur 234 Kilogramm. Auf einem Raum von knapp ei-



Alle Instrumente zum Erzeugen des Bose-Einstein-Kondensats sind in einer nur zwei Meter hohen und 81 Zentimeter breiten Fallkapsel untergebracht. Hauke Müntinga aus der Arbeitsgruppe von Claus Lämmerzahl führt hier gerade Arbeiten an der Hochvakuumpumpe durch. Eine Ebene tiefer ist die Vakuumkammer zu sehen, in der das Kondensat entsteht. Auf den Ebenen über der Pumpe befinden sich die Laser, optische Bänke und die Lasersteuerungselektronik. Ganz unten sind weitere Steuerungselektronik sowie die Energieversorgung verstaubt.

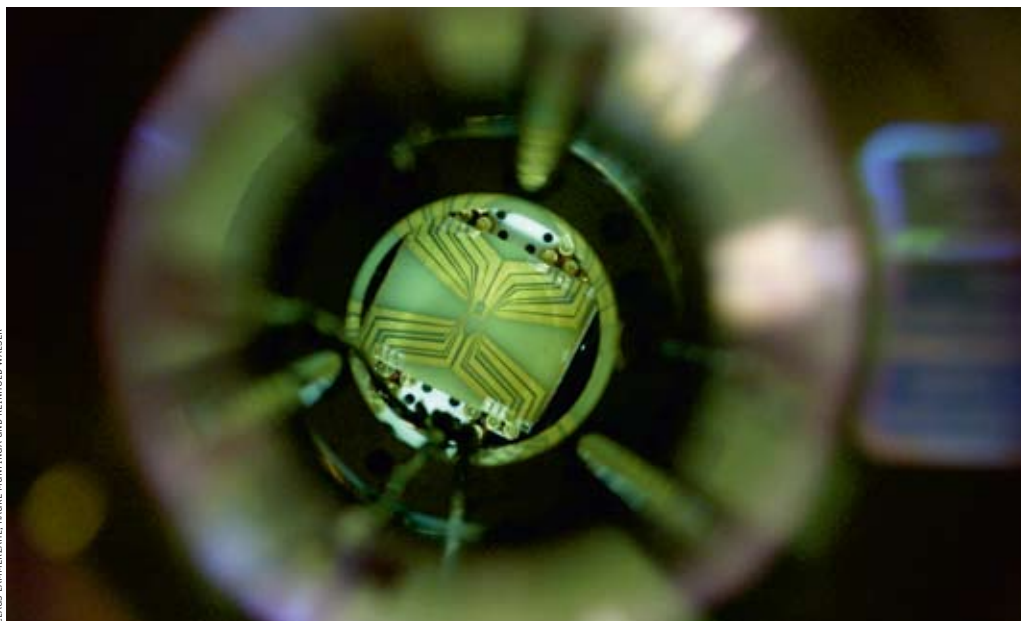
Auf dem Atomchip, in dem das Bose-Einstein-Kondensat entsteht, sind Leiterbahnen aus Gold angebracht. Schon bei geringem Stromfluss erzeugen sie ein stark inhomogenes Magnetfeld, in dem sich gasförmige Atome einschließen lassen. Die Oberfläche des Chips ist mit einer Beschichtung versehen, die ihn bei den verwendeten Laserwellenlängen als Spiegel für die magnetooptische Falle wirken lässt, in der die Atome zunächst gefangen sind.

nem halben Kubikmeter beherbergt sie somit eine Ausrüstung, die sonst ein komplettes Labor einnimmt. Dazu gehören eine Vakuumkammer inklusive Vakuumpumpen, ein Lasersystem mit Elektronik zur Frequenzstabilisierung, Spulen zur Erzeugung der notwendigen Magnetfelder, ein Steuerrechner und die komplette Stromversorgung.

Beim Auftreffen am Boden taucht die Fallkapsel mit einer Geschwindigkeit von etwa 170 Kilometer pro Stunde in einen mit Polystyrolkügelchen gefüllten Behälter ein und wird dabei mit bis zu 50-facher Erdbeschleunigung abgebremst. Damit das Lasersystem dieser extremen mechanischen Belastung standhält, wurde es in Modulbauweise aus selbst entwickelten, miniaturisierten optischen Komponenten zusammengesetzt.

Extreme Magnetfeldgradienten

Kernstück der Apparatur ist ein so genannter Atomchip mit Leiterbahnstrukturen aus Gold in einer bestimmten Anordnung. In ihrer Nähe lassen sich mit relativ niedrigen Strömen extrem hohe Magnetfeldgradienten erzeugen, wie sie zum Einschließen und Kühlen der eingebrachten Atome notwendig sind. Die Vorrichtung verbraucht wesentlich weniger Energie als die aus vielen hundert Drahtwicklungen bestehenden Spulen, mit denen Magnetfelder normalerweise hergestellt werden. Außerdem benötigt sie nicht so viel Platz, und das Kondensat bildet sich wegen der hohen Feldgradienten sehr schnell. Dieser Aufbau hat bisher über 200-mal den Sturz in die



CLAUS JÄMMERZAHN, PAULKE MÜNTINGA UND REINHOLD WÄLSER

Tiefe am Bremer Fallturm überstanden. In ihm herrschte dabei auf einer Strecke von 110 Metern jeweils 4,7 Sekunden lang Mikrogravitation – mit einer Restbeschleunigung von nur einem millionstel g .

Bei den Fallversuchen wurden, während die Kapsel noch in der Spitze des Fallturms hing, etwa zehn Millionen Atome des Rubidiumisotops ^{87}Rb zunächst in einer magnetooptischen Falle eingefangen. Nach dem Ausklinken traten durch die Beschleunigung mechanische Störschwingungen auf, die erst abklingen mussten, was etwa eine Sekunde dauerte. Danach wurden die Atome in die vom Atomchip erzeugte rein magnetische Falle überführt und dort per Verdampfungskühlung in etwa 1,5 Sekunden auf die extrem tiefe Temperatur von wenigen milliardstel Kelvin gebracht. Dabei entstand ein Bose-Einstein-Kondensat aus etwa 10000 Atomen, das sich nach dem Abschalten der Falle bis zu eine Sekunde lang frei ausdehnte. Seine Vermessung mit einer Digitalkamera ergab, dass das kollektive Wellenpaket bei seiner Expansion die für ein Quantenobjekt gigantische Ausdehnung von etwa zwei Millimetern in Fallrichtung erreichte.

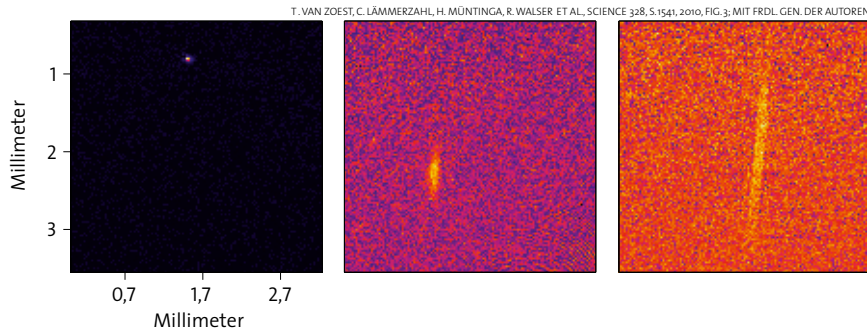
Im Bremer Fallturm ist auch ein Katapult installiert, mit dem die Kapsel in die Höhe geschossen werden kann, bevor sie wieder herunterfällt. Dadurch

verdoppelt sich die Experimentierzeit. Entsprechende Experimente, bei denen sich dann noch mehr Atome abkühlen lassen, sind in Vorbereitung.

Jetzt gilt es, die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse für praktische Anwendungen und grundlagenphysikalische Experimente nutzbar zu machen. So lässt sich ein so genannter Inertialsensor auf Basis eines Materiewelleninterferometers realisieren. Dabei wird das Bose-Einstein-Kondensat mit Laserpulsen in zwei Teile aufgespalten, die sich entlang verschiedener Wege bewegen. Weitere Laserpulse führen die beiden Materiewolken wieder zusammen. Dabei bildet sich ein Interferenzmuster, das Rückschlüsse auf die Kräfte zulässt, die auf sie gewirkt haben. Entsprechende Versuche sind in normalen Labors und in der Fallturmapparatur bereits geglückt.

Ein solches Interferometer würde unter Schwerelosigkeit eine viel höhere Genauigkeit erreichen als am Boden. Mit ihm ließe sich beispielsweise das lokale Gravitationsfeld der Erde mit höchster Präzision vermessen. Daraus ergäben sich wertvolle Erkenntnisse über geologische Strukturen oder Rohstoffvorkommen. Auch zur Navigation von Satelliten im Weltraum könnten Inertialsensoren dienen.

Abgesehen von solchen praktischen Anwendungen ließen sich mit Materie-



Diese farbkodierten Absorptionenaufnahmen des Bose-Einstein-Kondensats im Fallturm zeigen die optische Dichte der Atomwolke zu verschiedenen Zeiten: Je heller die Farbe, desto höher ist sie. Nach 30 Millisekunden (links) erscheint das Kondensat noch punktförmig. Nach 500 Millisekunden (Mitte) hat es sich vor allem in Fallrichtung deutlich gestreckt – und nach einer Sekunde (rechts) auf mehr als zwei Millimeter ausgedehnt.

welleninterferometern aber auch viele grundlegende physikalische Fragestellungen untersuchen. Von besonderem Interesse ist dabei ein quantenmechanischer Test von Einsteins Äquivalenzprinzip, wonach kein Unterschied zwischen schwerer und träger Masse besteht. Zwei Materiewelleninterferometer mit unterschiedlichen Atomsorten am gleichen Ort sollten einen solchen Test ermöglichen. Das Ergebnis

verspricht neue Erkenntnisse zu einer der spannendsten Fragen in der heutigen Physik: wie sich Quantenmechanik und Relativitätstheorie vereinbaren lassen. Zwischen beiden klappt bisher eine tiefe Kluft. Etliche Ansätze, sie zu überbrücken – etwa die Stringtheorie –, sagen Abweichungen vom Äquivalenzprinzip voraus. Für ein solches Experiment entsteht derzeit eine weitere Apparatur, in der zusätzlich zu einem Bose-Einstein-

Kondensat aus Rubidium ein zweites aus Kalium erzeugt werden kann.

Mit ultrakalten Gasen in der Schwerelosigkeit ließe sich auch ermitteln, wie lange Materiewellen ihre Kohärenz bewahren. Desgleichen könnte man prüfen, ob bei kleinsten Abständen Abweichungen vom newtonschen Gravitationspotenzial auftreten. Manche Theoretiker halten das für denkbar. Und schließlich bieten Bose-Einstein-Kondensate im freien Fall auch die Möglichkeit, noch tiefere Temperaturen als bisher zu erreichen und dabei eventuell neue Phänomene zu entdecken – gemäß dem Leitspruch des berühmten Physikers Richard Feynman (1918–1988): »*There's plenty of room at the bottom*« (»Es ist noch reichlich Platz da unten«).

Claus Lämmerzahl ist Physikprofessor am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation der Universität Bremen. **Hauke Müntinga** promoviert dort über das beschriebene Experiment. **Reinhold Walser** ist Professor für theoretische Physik an der Technischen Universität Darmstadt.

ASTRONOMIE

Nova produziert Gammastrahlung

Mit dem Satelliten Fermi haben Astronomen festgestellt, dass eine Nova energiereiche Gammastrahlung aussendet. Bisher herrschte die Ansicht, nur Supernovae seien dazu in der Lage.

VON JAN HATTENBACH

Der Nova-Ausbruch von V407 Cygni am 10. März 2010 wäre an sich nicht weiter bemerkenswert gewesen – schließlich beobachten Astronomen allein in der Milchstraße jedes Jahr Dutzende solcher Ereignisse. Für Überraschung sorgte jedoch, dass auch das Weltraumteleskop Fermi die Himmelserscheinung registrierte, obwohl es nicht im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums beobachtet, sondern im hochenergetischen Gammabereich (*Science* 329, S. 817). Eine Nova,

die Gammastrahlung mit Energien von mehreren Gigaelektronvolt emittiert, war bisher unbekannt. Eine solch hochenergetische Emission galt als Besonderheit der viel gewaltigeren – und wesentlich selteneren – Supernovae.

Der Ausdruck Nova leitet sich von lateinisch *stella nova*, neuer Stern, ab. So nannten Astronomen früher ein sternartiges Objekt, das plötzlich am Firmament erscheint. Als Supernova wird die noch wesentlich energiereichere Variante bezeichnet, die so hell werden kann,

dass sie sogar am Taghimmel mit bloßem Auge sichtbar ist. Allerdings handelt es sich bei beiden Erscheinungen um das Gegenteil einer Sterngeburt. Sie markieren stattdessen die letzte Lebensphase oder sogar den gewaltsamen Tod eines Sterns. Dabei unterscheiden sich Novae und Supernovae nicht nur in ihrer Helligkeit. Vielmehr verkörpern sie unterschiedliche Klassen astronomischer Objekte. Freilich gibt es zwischen einigen Novae und bestimmten Supernovae auch Gemeinsamkeiten.