



Beim Weltraumspaziergang gelang den Astronauten Bob Behnken und Chris Cassidy dieses Foto eines Teils der Internationalen Raumstation ISS über dem Blauen Planeten. Rechts dockt die Raumkapsel Crew Dragon von SpaceX an, unten das japanische H-II Transfer Vehicle-9 und vorn das europäische Columbus-Modul für Laborexperimente.

NASA

## Quantenmaterie im Erdorbit

*An Bord der Internationalen Raumstation ISS sind exotische ultrakalte Gase hergestellt worden, ein Bose-Einstein-Kondensat. Diese Leistung ist nicht nur ein technologischer Meilenstein, sondern könnte unser Verständnis der Quantenphysik verbessern.*

Vor 25 Jahren wurde zum ersten Mal eine Materieform beobachtet, die als Bose-Einstein-Kondensat (BEK) bekannt geworden ist. Seitdem haben sich derartige Quantenzustände zu einem Schlüsselinstrument für die Untersuchungen in der Quantenphysik entwickelt, und sie werden routinemäßig in Hunderten von Labors auf der ganzen Welt hergestellt. David C. Aveline und sein Team haben auf der Internationalen Raumstation ISS ein Bose-Einstein-Kondensat produziert, das aus Rubidiumatomen besteht. Die Bedingung des fortwährenden freien Falls auf der Station bietet vollkommen neue Einsichten in die Natur des Materiekondensats und zu hochpräzisen Messungen daran (siehe Bild oben und S. 25).

### Ein Exot im kalten Käfig

Physiker bezeichnen Atome mit einer geraden Gesamtzahl von Protonen und Neutronen als bosonische Atome. Sie werden in einer magnetischen Falle gefangen. Daraus wird ein BEK erzeugt, wenn eine dichte Wolke dieser Atome auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt wird. In diesem ultrakalten Zustand bevölkern die Atome hauptsächlich den

niedrigsten Energiezustand der Falle. Ein zentrales Gesetz der Quantenphysik ist der Welle-Teilchen-Dualismus, nach dem jedes Teilchen als eine Materiewelle beschrieben werden kann. Der Vorteil eines BEK besteht darin, dass es ideal geeignet ist, um die Quanteneigenschaften zu testen, weil sich die gesamte Atomwolke wie eine einzige Materiewelle verhält. Diese Eigenschaft nennen die Physiker Quantenentartung.

Die Bose-Einstein-Kondensation wird durch Abkühlung der Atomwolke mit mehreren Verfahren erreicht, die den Einsatz von Licht und Magnetfeldern kombinieren. Ein häufig verwendeter letzter Schritt ist als Verdampfungskühlung bekannt. Bei diesem Ansatz werden die Atome in einer magnetischen Falle eingeschlossen, und diejenigen unter ihnen mit der höchsten Bewegungsenergie (die »heißesten«) werden mit Hilfe hochfrequenter Strahlung aus der Falle getrieben. Die übrigen Atome stoßen miteinander zusammen und erreichen das thermische Gleichgewicht bei einer niedrigeren mittleren Temperatur als der Ausgangstemperatur. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis ein BEK gebildet wird.

### Die Falle schnappt zu

Wie bereits erwähnt, erfordert die Bose-Einstein-Kondensation niedrige Temperaturen, bei denen sich die Atome kaum bewegen. Wenn jedoch ein BEK aus einer magnetischen Falle befreit wird, damit Experimente durchgeführt werden können, führen abstoßende Wechselwirkungen zwischen den Atomen dazu, dass sich die Wolke ausdehnt. Innerhalb weniger Sekunden wird das BEK zu stark verdünnt, als dass es nachgewiesen werden könnte. Die Ausdehnungsrate kann allerdings verringert werden, indem die Tiefe der Falle und damit die Dichte der Atome in der Falle reduziert wird.

Auf der Erde schränkt die Anziehungskraft des Planeten die Form möglicher magnetischer Fallen so ein, dass eine besonders tiefe Falle erforderlich ist, um den exotischen Quantenzustand zu erzeugen (siehe Kasten S. 25). Im Gegensatz dazu stellten Aveline und Kollegen fest, dass die extrem schwache Schwerkraft (Mikrogravitation) auf der Internationalen Raumstation die Herstellung von Rubidium-BEKs sogar mit »flachen« magnetischen Fallen ermöglichte. Dadurch konnte das Forscherteam auf der ISS das BEK nach

etwa einer Sekunde Ausdehnung untersuchen, ohne die Atome weiter manipulieren zu müssen.

Vor der Freisetzung eines BEKs beobachteten Aveline und Kollegen, dass das kompakt eingeschlossene Kondensat von einer halbförmigen Wolke aus Rubidiumatomen umgeben war und mit dieser wechselwirkte. Während der Verdampfungskühlung waren diese Atome in einen Zustand versetzt worden, der unempfindlich gegenüber Magnetfeldern ist. Die Atome wechselwirkten dann auf Grund ihrer quantenmechanischen Eigenschaften nur schwach mit dem Magnetfeld der Falle – ein Phänomen, das als Zeeman-Effekt zweiter Ordnung bezeichnet wird. Auf der Erde würden solche Atome durch die vorherrschende Schwerkraft aus der Falle entfernt. Im Orbit verbleiben sie jedoch in der Falle und könnten zum Beispiel zur direkten Herstellung ultrakalter Materialproben mit extrem niedriger Dichte verwendet werden.

Die Experimente der Autoren stehen erst am Anfang vieler spannender Studien über quantenentartete Gase. Die Mikrogravitation erlaubt es zum Beispiel, Atome mit Hilfe von Fallenformen, wie die einer Blase, einzuschließen oder zu führen, was auf der Erde nicht vernünftig machbar ist (siehe Grafik unten). Künftige Arbeiten über die Entwicklung solcher Atome werden Einblicke in die Physik mit wenigen Teilchen geben. Darüber hinaus sind Experimente zu Quantengasgemischen aus Kalium und Rubidium geplant.

BEK-Experimente im Erdorbit könnten auch die Atominterferometrie voranbringen – eine Messtechnik, die auf der Interferenz zwischen Materiewellen basiert. Die Empfindlichkeit eines Atominterferometers gegenüber Trägheitskräften ist proportional zum Quadrat der Zeit, welche die Atome im Interferometer verbleiben. Am Boden ist diese Zeit durch die endliche Freifallzeit begrenzt. Mikrogravitationseinrichtungen wie Raketen, Flugzeu-

ge und Falltürme wurden bereits früher zur Lösung dieses Problems eingesetzt, aber Atominterferometer in der Erdumlaufbahn würden deutlich mehr Versuchszyklen ermöglichen.

### Tests fundamentaler Hypothesen

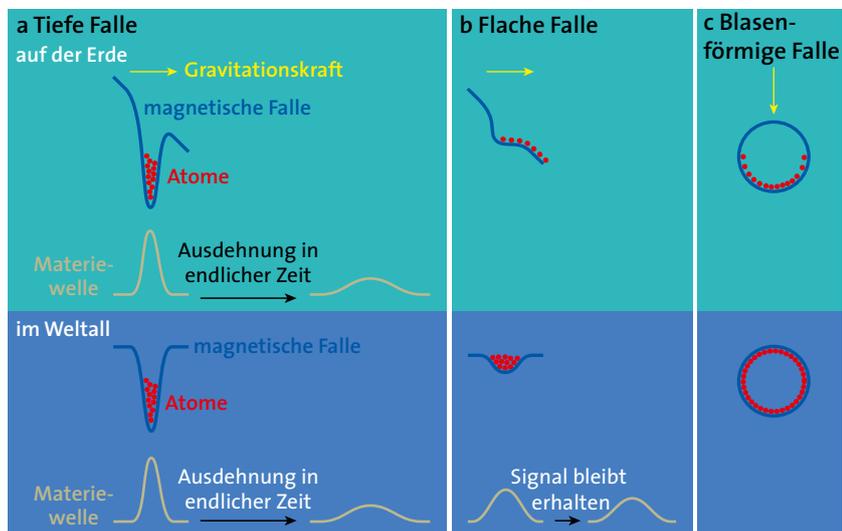
Für das künftige Ziel hochpräziser Messungen im Weltraum sind eine gründliche Analyse aller systematischen Effekte und die Umsetzung der am Boden entwickelten Techniken unerlässlich. Solche Messungen könnten weitere Tests gestatten, beispielsweise zu der Universalität des freien Falls, also zu dem Prinzip, dass alle Objekte in einem äußeren Schwerfeld identisch beschleunigen, oder auch zu Theorien der Dunklen Energie, welche für die beschleunigte Expansion des Universums verantwortlich gemacht wird (siehe SuW 7/2020, S. 26). Die zu erwartenden Empfindlichkeiten würden die BEK-Interferometrie ebenfalls für die Satellitennavigation und Erdbeobachtung interessant machen.

Die technologische Leistung von Aveline und seinem Team ist bemerkenswert. Ihre Apparate mussten den strengen Anforderungen der Internationalen Raumstation in Bezug auf Masse, Volumen und Leistungsaufnahme genügen und robust genug sein, um jahrelang ohne Wartung betrieben werden zu können. Bose-Einstein-Kondensate in der Erdumlaufbahn bieten neue Möglichkeiten für die Erforschung von Quantengasen sowie für die Atominterferometrie und ebnen den Weg für Missionen, die noch ehrgeiziger sind.

MAIKE D. LACHMANN UND ERNST M. RASEL arbeiten auf dem Gebiet der Quantenphysik am Institut für Quantenoptik an der Leibniz Universität Hannover.

## Atomfallen im Himmel und auf Erden

Ultrakalte Atome in einer Magnetfalle können einen Materiezustand bilden, der als Bose-Einstein-Kondensat bezeichnet wird. Eine tiefe Falle kann auf der Erde, wo die Anziehungskraft des Planeten die Form der Falle beeinflusst, und im Weltall verwendet werden. Wenn das Kondensat jedoch aus der Falle freigesetzt wird und sich für eine relativ lange Zeit frei ausdehnen kann, geht das Materiewellensignal verloren (siehe a). Eine flache Falle kann auf der Erde nicht verwendet werden, da die Atome nicht gegen die Schwerkraft des Planeten zusammengehalten werden können. Aveline und sein Team stellten fest, dass eine solche Falle im Weltraum funktioniert und dass das resultierende Materiewellensignal nach der gleichen Ausdehnungszeit wie im Fall a auf Grund einer langsameren Ausdehnungsrate sogar erhalten bleibt (siehe b). Ein Bose-Einstein-Kondensat konnte im Weltraum gleichmäßig über die Oberfläche einer blasenförmigen Falle eingegrenzt werden, aber nicht auf der Erde, wo sich die Atome an der Basis der Falle ansammeln (siehe c).



Aveline, D. C., et al.: Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab. Nature 582, 2020, fig. 1; Bearbeitung: SuW-Grafik

### Literaturhinweise

- Aveline, D. C. et al.:** Observation of Bose-Einstein condensates in an Earth-orbiting research lab. Nature 582, 2020
- Becker, D. et al.:** Space-borne Bose-Einstein condensation for precision interferometry. Nature 262, 2018

nature

© Springer Nature Limited  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
 Nature 582, S. 186–187, 2020