

Forschung in Schwerelosigkeit

Quanten im All

Ein Bose-Einstein-Kondensat ist eine Art fünfter Aggregatzustand von Materie. Jetzt wurden so etwas auch auf der Internationalen Raumstation erzeugt. Was bringt uns das?

Von ROLAND WENGENMAYR



© Foto Nasa

Hallo, der Lieferdienst ist da: Blick von der Aussichtskuppel der ISS auf das Andocken der Cygnus-Kapsel, die unter anderem das Quantenexperiment mitbrachte.

An Bord der Internationalen Raumstation ISS kreist das Kälteste, was Menschen je ins All gebracht haben. Es ist kälter als der Weltraum selbst: weniger als ein zehnmilliardstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt. Derart heruntergekühlt, schweben einige tausend Atome des Elements Rubidium in einer kleinen Vakuumkammer des „Cold Atom Lab“. CAL, wie es kurz heißt, hat ein Team des Jet Propulsion Laboratory gebaut, eines Instituts der Nasa und des Caltech. Im Mai 2018 wurde es mit einem Cygnus-Raumtransporter zur ISS geschickt. Dazu mussten die Amerikaner eine hochempfindliche Versuchsanordnung, die normalerweise ein ganzes Labor füllt, auf die Maße eines großen Koffers schrumpfen und fit für den Ritt auf einer Rakete machen. Die Aktion gelang. Seit zwei Jahren laufen die Experimente, jetzt wurden in „Nature“ Ergebnisse publiziert.

Die extreme Kälte senkt den Bewegungsdrang der Rubidiumatome derart, dass sie ein sogenanntes Bose-Einstein-Kondensat bilden. Was ist das, und warum bringt man so etwas mit viel Aufwand ins Weltall? Maïke Lachmann kann beide Fragen beantworten. Die Doktorandin am Institut für Quantenoptik der Universität Hannover ist Erstautorin eines die „Nature“-Veröffentlichung begleitenden Kommentars. Für ihre eigenen Forschungen

schleudert sie ebenfalls Bose-Einstein-Kondensate an den Rand des Weltalls und lässt sie wieder herunterstürzen – mit Forschungsraketen.

Der fünfte Aggregatzustand

„Ein Bose-Einstein-Kondensat ist ein sehr exotischer Materiezustand“, sagt die Physikerin. Es sei gewissermaßen etwas Fünftes neben gasförmig, flüssig, fest und dem Plasma. Nun sind Atome eigentlich in allen Aggregatzuständen des Materials, das sie aufbauen, nicht nur Teilchen, sondern auch quantenmechanische Wellen. Bei extremer Kälte aber überlappen sich die Wellen der träge gewordenen Atome, bis diese zu einer einzigen Welle kondensieren – ein bisschen wie Ruderer in einem Drachenboot, die sich schließlich im Gleichtakt eingependelt haben. Albert Einstein beschrieb derartige, zu seiner Zeit noch hypothetische Zustände mit Methoden, die der Inder Satyendra Nath Bose Anfang der zwanziger Jahre entwickelt hatte. Bose-Einstein-Kondensate sind selbst Quantenobjekte, die aber, gemessen an dem, was in diesem Bereich der Physik sonst üblich ist, riesengroß sein können.

„Das Schöne ist, dass wir diesen gemeinsamen Quantenzustand der Atome mit einer einzigen quantenmechanischen Wellenfunktion beschreiben können“, sagt Lachmann. Das macht Bose-Einstein-Kondensate perfekt kontrollierbar, wodurch sie heute für terrestrische Quantenlabors ähnliche Bedeutung haben wie Mäuse in Biologie und Medizin. Allerdings stört die Erde. In ihrer Gravitation fällt die kalte Atomwolke nach unten, sobald man die zur Präparation nötigen, fein austarierten Magnetfelder und Laserstrahlen ausschaltet. Und wenn sie den Boden der Vakuumkammer erreicht, geht der Quantenzustand kaputt.

Die Physik des Werfens

Nun würde man aber Bose-Einstein-Kondensate gerne möglichst lange im freien Fall untersuchen können. Denn nur dann regiert die Quantenphysik völlig ungestört. „Die Quantenmechanik funktioniert in ihrem Gültigkeitsbereich perfekt, aber verstanden haben wir sie nicht“, sagt Claus Lämmerzahl. Der Bremer Physikprofessor versucht zusammen mit Kollegen seit gut 15 Jahren, Bose-Einstein-Kondensate der Schwerkraft länger zu entziehen. Seit 2007 ließ er sie immer mal wieder im Turm des Bremer Zentrums für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation herabfallen. Während des freien Falls in der 120 Meter hohen Vakuumröhre herrscht in der Experimentkapsel fast fünf Sekunden lang Schwerelosigkeit, während deren sich das schwebende Kondensat frei entfalten kann. Noch längere Schwerelosigkeit bieten Parabelflüge mit Forschungsflugzeugen, und in Maike Lachmanns Raketenexperimenten dauert der Schwebezustand sogar bis zu sechs Minuten.

Hinter alledem steckt die Physik des Werfens: Wenn man etwas energisch genug wirft, fällt es nicht mehr auf den Erdboden, sondern um die Erde herum. Genau das tut die ISS. Ein Experiment an Bord erlaubt es also im Prinzip, ein Bose-Einstein-Kondensat unbegrenzt lange schweben zu lassen. Völlig frei von Gravitation geschieht dies nicht, denn die Raumstation und alle Objekte an Bord inklusive der Besatzung erzeugen selbst Schwerfelder, allerdings sehr kleine. Deshalb spricht man statt von Schwerelosigkeit lieber von Mikrogravitation.

Wie groß kann etwas werden und Quantending bleiben?

CAL ist nun erst ein Anfang. Für die Zukunft ist ein Nachfolgeprojekt namens BECCAL (BEC steht für Bose-Einstein Condensate) geplant, an dem auch deutsche Forscher beteiligt sind. CAL sollte zunächst demonstrieren, dass ein so anspruchsvolles Experiment an Bord der ISS im Routinebetrieb laufen kann. Die damit maximal erreichte Lebensdauer der Bose-Einstein-Kondensate liegt bislang bei etwa einer Sekunde. Außerdem gelingt es, in der störungsarmen Mikrogravitation mehr Rubidiumatome in ein solches Kondensat hineinzulocken als unter vergleichbaren Bedingungen auf der Erde. Da überdies auch maximal gechillte Atome nie vollkommen stillstehen, dehnt sich die Rubidiumwolke nach der Präparation langsam aus.

Das führt zu einer grundlegenden Frage, welche die Physik schon lange umtreibt: Wie groß kann ein Quantenobjekt grundsätzlich werden? Sicher ist, dass in unserem makroskopischen Alltag eher selten etwa jemand einen Raum betritt, indem er durch die Wand tunnelt. Doch die Quantenmechanik setzt der Größe von Quantenobjekten keine grundsätzliche Grenze. Werden sie in ihrer Empfindlichkeit nicht gestört, könnten sie im Prinzip bis in unsere Welt des mit bloßem Auge Sichtbaren hineinreichen – es sei denn, bisher unbekannte Naturgesetze setzten doch ein Limit. Für das andere Ende der Größenskala wiederum, den Kosmos inklusive der Gravitation, ist die allgemeine Relativitätstheorie zuständig. Sie und die Quantenmechanik sind in ihren jeweiligen Gültigkeitsbereichen die bislang mit Abstand genauesten Theorien überhaupt. Aber sie passen nicht zusammen. Der Ehevertrag zwischen den zwei ungleichen Partnern wäre eine funktionierende Quantengravitation. Doch diese übergeordnete Theorie fehlt. Hinter Quantenexperimenten unter Mikrogravitation steht daher auch die Ausschau nach neuen Hinweisen, in welcher Richtung eine Quantengravitation zu suchen wäre.

Die Prinzessin spürt die Erbse

Quantenexperimente im Orbit versprechen aber auch die Entwicklung neuer Quantentechnologien. Denkbar sind etwa superempfindliche Sensoren für die Geodäsie, gewissermaßen eine Extremform der Geschichte von der Prinzessin auf der Erbse: Die Erde ist keine perfekte Kugel, daher schlingert die ISS im Orbit sozusagen etwas umher, und die winzigen Schwankungen im Gravitationsfeld, die dafür verantwortlich sind, bergen damit interessante geologische Informationen über die Region direkt unter der Raumstation, zum Beispiel, ob sich Wasser, Fels oder Erdöl unten befindet. Sogar Veränderungen der Meeresspiegel könnten solche Quantensensoren genau erfassen. Eine andere Anwendung wären Sensoren, die extrem fein auf Lageänderungen im Raum reagieren – in gewisser Hinsicht eine Quantenversion eines Kreiselkompasses. Damit ausgestattete Raumsonden könnten Ziele im Bereich der äußeren Planeten genauer ansteuern und würden weniger Brennstoff für Kurskorrekturen benötigen. Es gibt also nicht nur das eine Motiv für Quantenexperimente auf der ISS.

Quelle: F.A.S.