

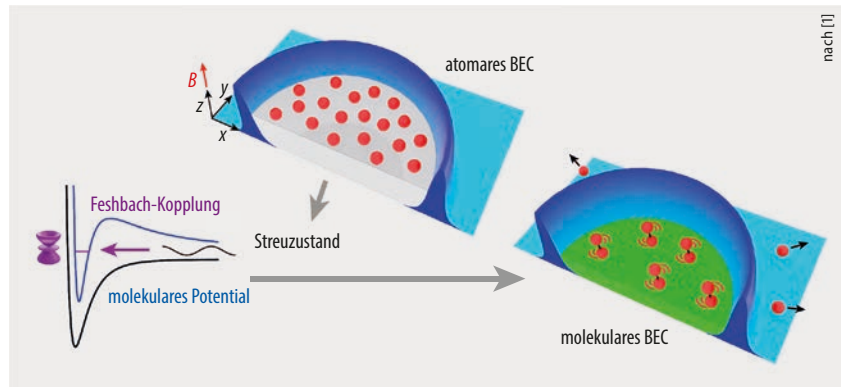
# Mit Rotation zur Kondensation

Erstmals ist es gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat von Molekülen in einem hoch angeregten Rotations- und Vibrationszustand zu präparieren.

Selim Jochim und Philipp Preiss

Die Bose-Einstein-Kondensation tritt bei ununterscheidbaren Teilchen auf. So spielt es meist keine Rolle, dass die Teilchen, die das Kondensat bilden, selbst wieder zusammengesetzt sind oder eine gewisse Ausdehnung haben: Am Ende entscheidet nur der Gesamtspin von Atomkern und Elektronen darüber, ob es sich um ein Boson oder Fermion handelt. Für die Vielteilchenphysik interessant wird die Zusammengesetztheit allerdings dann, wenn die Stärke der Bindung so schwach ist, dass sie mit anderen Energien im System konkurriert, beispielsweise der Fermi-Energie in einem Fermi-Gas.

Im Fokus der Forschung stand deshalb in den letzten zwei Jahrzehnten die Paarung zweier fermionischer Atome zu einem näherungsweise bosonischen Paar. Ist die Paarungsenergie klein gegenüber der Fermi-Energie, so entsteht bei niedrigen Temperaturen ein supraflüssiges System. Das lässt sich analog zu konventionellen Supraleitern mithilfe der BCS-Theorie beschreiben: Die dominierende Energieskala ist die Fermi-Energie, Paarkorrelationen im Impuls an der Fermi-Oberfläche senken die Energie nur unmerklich ab. In den ersten Experimenten gelang es, die Anziehung zwischen den Atomen so zu erhöhen, dass diese Cooper-Paare zu stark gebundenen Molekülen wurden, wobei deren Bindungsenergie die Fermi-Energie als größte Energieskala ablöst. Die ununterscheidbaren bosonischen Moleküle bildeten ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC), das sich vollständig reversibel wieder in ein System mit fermionischer Statistik überführen lässt. Dieses paradigmatische Phänomen heißt BEC-BCS-Übergang. Nun ist es der Gruppe von Cheng Chin an der University of Chicago, USA, erstmals gelungen, dies auch für bosonische Atome zu realisieren [1].



**Abb. 1** Der Ausgangspunkt der Präparation eines Bose-Einstein-Kondensats von Molekülen ist ein scheibenförmiges, homogenes Bose-Einstein-Kondensat aus atomarem Cäsium (rot). In der Nähe einer Feshbach-Resonanz (blaue Kurve) koppelt ein angeregter molekularer Zustand mit freien Atomzuständen. In einem Streuprozess können dann jeweils zwei Atome des Bose-Einstein-Kondensats zu einem Molekülzustand (lila) binden.

Bereits als Postdoktorand an der Universität Innsbruck, Österreich, war Cheng Chin an Arbeiten mit fermionischen  $^6\text{Li}$ -Atomen beteiligt. Seither suchte er einen Weg, um bosonische Teilchen nicht in zwei fermionische, sondern in zwei bosonische Atome zu teilen; das resultierende Bose-Einstein-Kondensat hätte die doppelte Teilchendichte. Noch in Innsbruck experimentierte Cheng Chin in der Gruppe von Rudolf Grimm erstmals mit Cäsium-Atomen, die er in ein molekulares Quantengas konvertieren konnte [2]. Dafür beeinflusste er die Wechselwirkung mittels einer sogenannten magnetischen Feshbach-Resonanz [3] und nutzte geschickt die innere Struktur der Atome aus: Unterschiedliche interne Zustände der Atome besitzen verschiedene magnetische Momente. In der Nähe der Resonanz führt dies zu einer Abhängigkeit der Wechselwirkung zwischen den Atomen von einem angelegten Magnetfeld. So entsteht aus zwei ungebundenen Atomen ein gebundenes Molekül mit einer Bindungsenergie, die vom Magnetfeld abhängt.

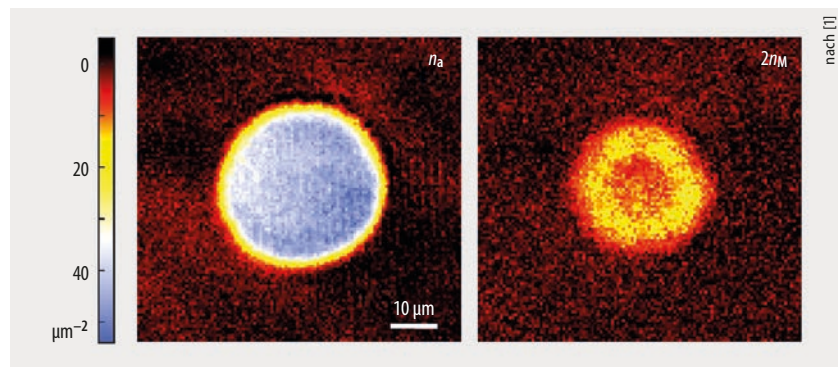
Diese einzigartige Einstellbarkeit birgt aber auch Nachteile: Für die Welt der ultrakalten Gase sind Energien

relevant, die einer thermischen Energie weniger Nanokelvin entsprechen. Der entstehende Bindungszustand ist der am höchsten angeregte, den das Molekülpotential zur Verfügung stellt, gebunden nur um wenige Piko-elektronenvolt. In der Molekülphysik ist aber bekannt, dass die internen Freiheitsgrade – also Rotations- und Schwingungsanregungen – normalerweise sehr schnell mit dem Bewegungsfreiheitsgrad thermalisieren. Dabei wird Energie entsprechend der Tiefe des Molekülpotentials von mehr als einem Elektronenvolt frei. Es ist die große Kunst des Experimentierens mit ultrakalten Atomen, derartige Mechanismen zu verhindern, um ein möglichst ideales Modellsystem für längere Zeit zu erhalten.

Bei Systemen aus fermionischen Atomen half unter anderem das Pauli-Prinzip, eine solche Relaxation zu verhindern: Zwei identische Fermionen können sich nicht beliebig nahe kommen. So gelang es, ein Gas höchstangeregter Moleküle in einen wohldefinierten internen Zustand eines Bose-Einstein-Kondensats aus Molekülen zu überführen. Für Systeme aus bosonischen Atomen scheiterte dies, obwohl sich Moleküle in

der Nähe einer Feshbach-Resonanz erzeugen ließen. Diese relaxierten aber nach sehr kurzer Lebensdauer aus ihrem hochangeregten Zustand ohne Nachweis eines thermischen Gleichgewichts. Das schürte die Hoffnung auf die Realisierung neuartiger und spannender Systeme. Der Theoretiker Jason Ho von der Ohio State University (USA) betonte, dass die Bose-Statistik der Konstituenten einen unerwarteten Phasenübergang erster Ordnung durch topologische Anregungen ermöglicht. Der entscheidende Durchbruch gelang der Gruppe um Cheng Chin, als sie eine Feshbach-Resonanz untersuchte, bei der ein Molekül mit hohem Drehimpuls an das Kontinuum freier Teilchen koppelt. Dabei entsteht ein Molekül im  $g$ -Wellenzustand mit vier Quanten Drehimpuls [1].

Die Experimente basieren auf vielen technischen Neuerungen der letzten Jahre: Mithilfe eines geschickt geformten optischen Potentials erzeugten die Forschenden ein homogenes zweidimensionales Bose-Einstein-Kondensat (**Abb. 1**). Durch eine Magnetfeldrampe in der Nähe der Feshbach-Resonanz wurde ein Teil des atomaren Gases in Moleküle konvertiert (**Abb. 2**). Um sich davon zu überzeugen, dass das molekulare Gas tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat ist, untersuchten sie die Zustandsgleichung des Gases, indem sie dessen Dichte als Funktion des chemischen Potentials bestimmten. Es zeigte sich, dass die Moleküle



**Abb. 2** Die Absorptionsabbildung zeigt, dass aus dem atomaren Bose-Einstein-Kondensat (links) nach Herstellung der Moleküle ein molekulares Kondensat (rechts) geworden ist.

ausreichend stabil für die Bose-Einstein-Kondensation waren. Bedenkt man, dass jedes einzelne Molekül mit maximaler Amplitude schwingt und zusätzlich vier Quanten Rotationsenergie besitzt, ist es kaum vorstellbar, dass ausgerechnet dieses Ensemble mit Temperaturen von Nanokelvin kondensiert. Der genaue Mechanismus hinter dieser außergewöhnlichen Stabilität ist noch unverstanden, liegt aber vermutlich an der schnellen Rotation: Symmetrien könnten den Zerfall in weniger stark rotierende Zustände blockieren.

Insbesondere der große Drehimpuls der  $g$ -Wellenmoleküle begeistert Theoretiker an diesem experimentellen Durchbruch. So betont Jason Ho, dass der Drehimpuls der Moleküle zu Randströmen führe. Deren Detektion könnte den seit langem unverstandenen intrinsischen Drehimpuls in der A-Phase von superfluidem  $^3\text{He}$  erklären [4]. Cheng Chin möchte sei-

ne Methode auch in der Wenigteilchen-Physik anwenden: So sollten es molekulare Feshbach-Resonanzen erlauben, die Wechselwirkung zwischen Molekülen einzustellen und auf diese Weise  $\text{Cs}_2$ -Dimere deterministisch zu  $\text{Cs}_4$ -Tetrameren zu assoziieren [5]. Dadurch ließe sich ultrakalte Chemie mit exakter Kontrolle über Reaktionszustände betreiben.

- [1] Zh. Zhang et al., Nature **592**, 708 (2021)
- [2] J. Herbig et al., Science **301**, 1510 (2003)
- [3] Ch. Chin et al., Rev. Mod. Phys. **82**, 1225 (2010)
- [4] T.-L. Ho, arXiv:2101.05431 (2021)
- [5] Ch. Chin et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 123201 (2005)

## Die Autoren

**Prof. Dr. Selim Jochim** und **Dr. Philipp Preiss**, Physikalisches Institut, Universität Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 226, 69120 Heidelberg

## Kurzgefasst

### Doppelte Messung

Physiker des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik wiesen ein einzelnes Photon zweimal nach, das sich in einer optischen Faser frei bewegt. Dies erforderte eine zerstörungsfreie Methode, bei der das Photon auf ein Rubidium-Atom in einer optischen Kavität trifft. Dadurch ändert sich der Quantenzustand des Atoms. Das bestätigten die Forscher mit einem Laserpuls, den sie ebenfalls in die 60 Meter lange Faser einspeisten. Die Technik kann helfen, Photonen bei der Quantenkommunikation zu überwachen.

E. Distante et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 253603 (2021)

### Kollektive Ekstase

Ein Empa-Team hat mit Kollegen aus Lausanne, Zürich und vom Paul Scherrer Institut ein Farbstoffsystem entwickelt, das bis zu 60 Prozent des eingestrahlt Lichts wieder als Licht abstrahlt. Dazu platzierte das Team Farbstoffmoleküle an den Phasengrenzen einer Emulsion aus Wasser und Hexylamin. Kleinwinkel-Neutronenstreuung zeigte, dass sich die länglichen Moleküle dort wie Streichhölzer in der Schachtel anordnen. So geht kaum Licht verloren – ein Vorteil für die Diagnostik in lebendem Gewebe.

S. B. Anantharaman et al., Adv. Sci. **8**, 1903080 (2021)

### Erfolgreicher Praxistest

Chinesische Forschende haben erstmals nachgewiesen, dass der Austausch von Quantenschlüsseln über hunderte Kilometer in einer optischen Faser möglich ist. Anders als in bisherigen Experimenten war die 428 Kilometer lange Faser nicht in einem Laborraum aufgewickelt, sondern auf einer Distanz von 300 Kilometern verlegt. An beiden Endpunkten kodierten die Forschenden Qubits in einzelne Photonen. Auf halber Strecke zeigten sie, dass diese die gleiche Information tragen, ohne sie absolut zu bestimmen.

Hui Liu et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 250502 (2021)