

1 Megabar einen Kompressibilitätsfaktor von 6 verglichen mit der Ausgangsdichte von $0,17 \text{ g/cm}^3$ (bei 20 K) in fluidem Wasserstoff festgestellt, ein viel höherer Wert als der von Sesame vorhergesagte Faktor von 4 [3]. Diese Diskrepanz erschwert zum Beispiel die Modellierung von Jupiter oder der mittlerweile entdeckten extrasolaren Planeten. Auch für die Trägheitsfusion hätten die Messungen am Wasserstoff entscheidende Konsequenzen. Bei diesem zur Magnetfusion wie in Tokamaks oder Stellaratoren alternativen Szenario soll durch Beschuss mit einer ganzen Batterie von Hochleistungslasern ein mit Deuterium und Tritium gefülltes Kügelchen um den Faktor 1000 komprimiert werden, um den Fusionsprozess zu zünden.

Die Laser-Experimente von 1996 stellen ebenso wie jetzt die neuen Experimente mit Eisen die theoretischen Modelle der Sesame-Datenbank infrage und werden deshalb sehr kontrovers diskutiert, wobei mögliche systematische Fehler dieser Methode, etwa durch sog. *Preheating* der Probe oder durch ungleichmäßige Schockwellenausbreitung, aufgeführt werden. Andere theoretische Zustandsgleichungen für Wasserstoff, die z. B. ein H_2 -Gemisch mit Dissoziation und Ionisation behandeln, stützen hingegen die Laser-Daten.

Das Wasserstoff-Rätsel ist durch neue Experimente am Sandia National Laboratory in den USA allerdings wieder komplizierter geworden. Die dort verfügbaren enormen Magnetfelder haben M. Knudsen und Mitarbeiter benutzt, um kleine Metallplättchen mit bis zu 28 km/s auf Wasserstoff zu schießen und so Schockwellen zu erzeugen [4]. Die Ergebnisse zeigen im Gegensatz zu den Laser-Daten nur sehr kleine Abweichungen von den Sesame-Werten, speziell im Bereich um 1 Megabar. Offenbar sind weitere detaillierte Untersuchungen mit diesen beiden relativ neuen Techniken nötig, um Klarheit über das Verhalten von Materialien bei sehr hohen Drücken zu erhalten. Auch die theoretischen Modelle und Simulationen müssen einer eingehenden Prüfung unterzogen werden, um Experiment und Theorie wieder in Übereinstimmung zu bringen.

RONALD REDMER

- [1] D. Batani et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 235502 (2002)
- [2] <http://t1web.lanl.gov/doc/SESAMEdbasetxt.html>
- [3] L. B. Da Silva et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 483 (1997)
- [4] M. Knudsen et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 225501 (2002)

Kohärenter Molekül-Atom-Cocktail

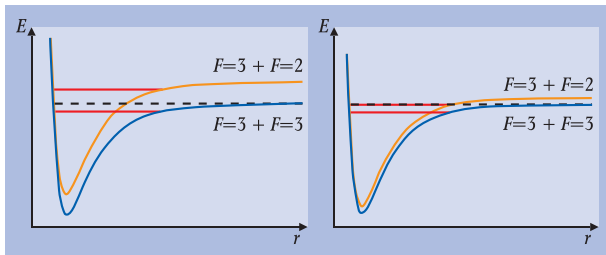
Die Bose-Einstein-Kondensation (BEC) atomarer Gase ist im Jahr 1 nach dem Nobelpreis weiterhin für Überraschungen gut. Jetzt haben amerikanische Physiker einen Indizienbeweis für ein Bose-Einstein-Kondensat aus Molekülen erbracht.

Wieder einmal sind es die Nobelpreisträger selber, die die Entwicklung vorantreiben. Am JILA in Boulder, wo es vor sieben Jahren zum ersten Mal gelang, ein BEC aus neutralen Atomen in einer Magnetfalle zu erzeugen, wurde kürzlich eine kohärente Überlagerung aus einem Atom- und einem Molekül-Kondensat beobachtet [1]. Dieser spektakuläre Durchbruch ist für Quantenchemiker, Atomoptiker und Laserkühler gleichermaßen faszinierend.

Fassen wir zuerst kurz zusammen, was die Gruppe von Carl Wieman beobachtet hat. Ausgangspunkt ist ein ^{85}Rb -Kondensat, das außer dieser Gruppe bisher niemand beherrscht, denn anders als das „Standardatom“ ^{87}Rb ist ^{85}Rb sehr schwer durch Verdampfung zu kühlen. Das liegt an den komplexen, aber auch interessanten Kollisionseigenschaften dieses Isotops. Unter normalen Umständen, das heißt bei kleinen Magnetfeldern, ziehen sich ^{85}Rb -Atome an. Die Kondensation führt daher zu einem instabilen Zustand, in dem sich recht heiße Rb_2 -Moleküle bilden. Schon zur erfolgreichen Kondensation musste die Gruppe daher eine so genannte Feshbach-Resonanz einsetzen [2], bei der die Molekülpotentiale durch externe Magnetfelder so verändert werden, dass die Streulänge von negativen zu positiven Werten durchgestimmt werden konnte. Auf diese Weise lässt sich die Wechselwirkung von attraktiv auf repulsiv umschalten und damit ein Kondensat stabilisieren.

Grundlage dieser Feshbach-Resonanz sind dicht beieinander liegende Molekülpotentiale, die für große Abstände zwischen den Ato-

men den unterschiedlichen Hyperfeinzuständen der freien Atome zu geordnet werden können. Im externen Magnetfeld können nun die gebundenen Zustände des energetisch höher liegenden Potentials mit dem Dissoziationsniveau der niedrigeren Energieniveaus und damit mit der Energie extrem kalter stoßender Teilchen in Resonanz gebracht werden (s. Abb.). Mithilfe eines äußeren Magnetfelds lässt sich also ein gebundener Molekülzustand – sozusagen als Materiewellenresonator – an die einlaufenden Materiewellen freier miteinander stoßender Atome kohärent ankoppeln. Zunächst wurde diese Resonanz in der JILA-Gruppe dazu benutzt, das ^{85}Rb -Kon-



Die für die kohärente Erzeugung von Rb_2 -Molekülen entscheidende Feshbach-Resonanz kommt zustande, wenn durch ein äußeres Magnetfeld der gebundene Zustand im Molekülpotential eines Hyperfeinzustand-Paares (rot) resonant wird mit der Dissoziationsenergie (gestrichelt) eines anderen Paares (rechts). Links sind die Potentiale ohne äußeres Magnetfeld skizziert.

densat überhaupt zu erzeugen und zu stabilisieren [3]. Anschließend konnten Donley et al. durch Ändern des Magnetfelds die Wechselwirkung auf attraktiv umschalten und das Kondensat kontrolliert in den instabilen Bereich bringen, um seinen Kollaps zu studieren [4]. Dabei zeigte sich eindrücklich die zerstörerische Kraft dieser Resonanz.

Daher kam es um so überraschender, dass sie jetzt diese Resonanz gezähmt und zur kohärenten Kontrolle eingesetzt haben. Dazu hat Wiemans Gruppe die Ankopplung an den gebundenen Zustand kohärent und gepulst geschaltet. Der freie Atomzustand wird mithilfe eines gepulsten Magnetfeldes kurz an den gebundenen gekoppelt, wobei ein Teil der Atome in einen gebundenen Molekül-Zustand überführt wird. Dann folgt für etwa 100 Mikrosekunden eine freie Evolution, dann wieder ein Magnetpuls zur Ankopplung an den gebundenen Zustand. Gemessen wird die Zahl der freien Atome als Funktion der Zeit zwischen den beiden Pulsen. Die klaren Interferenzen in diesem Signal deuten auf eine kohärente Phasenevolution hin. Ganz analog kommt übrigens ein Ramsey-Interfe-

renzsinal in einer Atomuhr zustande. Die sich entwickelnde Phasendifferenz zeigt hier eine Frequenz, die zu der berechenbaren Energiedifferenz der beiden Zustände „frei“ und „gebunden“ gehört. Damit ist ein eindeutiger Nachweis geführt, dass durch den Koppelpuls eine kohärente, das heißt phasenstarre Überlagerung zwischen freien Atomen und Molekülen erzeugt wurde. Bis zu 50 % der Atome konnten dabei in unsichtbare Moleküle umgewandelt werden. Der Vollständigkeit halber wäre es natürlich schön, auch die Moleküle direkt nachzuweisen, was experimentell jetzt auch in Vorbereitung ist.

Warum ist das Ergebnis für Forscher verschiedener Ausrichtungen interessant? Nehmen wir zunächst den Atomoptiker: Bose-Einstein-Kondensate haben viele Gemeinsamkeiten mit einem Laser, und so wurden bald Atomlaser entwickelt und für Experimente mit Solitonen, Vierwellenmischung und Materiewellenverstärkung eingesetzt. Mit der kohärenten Bildung von Molekülen steht nun ein Mechanismus zur Frequenzverdopplung von Materiewellen zur Verfügung, denn aus zwei Atomen der Masse m wird ein Molekül der Masse $2m$ mit der halben de Broglie-Wellenlänge. Damit wurde die Analogie der Entwicklung der nichtlinearen Atomoptik zur Lichtoptik abgerundet. Ähnlich der periodischen Erzeugung von frequenzkonvertiertem Licht in einem nichtlinearen nicht phasengepassten Kristall zeigt sich auch in diesem Experiment eine periodische Konversion, da die „Brechungsindizes“ für Atome und Moleküle, also der Grund- und Obermateriewelle unterschiedlich sind.

Analysieren wir das Experiment aus Sicht des Quantenchemikers: Die Quantenkontrolle über die Freiheitsgrade von Reaktionspartnern ist schon jetzt sehr weit fortgeschritten. Vor allem die internen Freiheitsgrade (die Energieniveaus), aber auch die externen Freiheitsgrade der Bewegung lassen sich mithilfe von Lasern gut beherrschen. In dem hier beschriebenen Experiment wird jedoch quasi bei verschwindender Temperatur ein Überlagerungszustand chemisch unterschiedlicher Substanzen kontrolliert erzeugt. Die beiden beteiligten Zustände zweier freier oder gebundener Atome unterscheiden sich durch eine ganze Reihe von Quantenzahlen. Nicht nur die elektroni-

schen Zustände befinden sich in diesem Überlagerungszustand, sondern auch die Freiheitsgrade der Bewegung: Aus Ort und Impuls der freien Atome werden Rotations- und Vibrationszustände der Moleküle. Quantenkontrolle über externe und interne Zustände einzelner Atome lässt sich somit jetzt auch auf eine makroskopische Anzahl Moleküle übertragen.

Zuletzt die Sichtweise des Laserkühlers: Aufgrund ihrer komplexen inneren Struktur sind Moleküle nur sehr schwer für die Standardkühltechniken zugänglich, die zur Kondensation von Atomen geführt haben. Neue Verfahren, etwa für polare Moleküle, sind zwar sehr vielversprechend [5], aber noch weit von der Bose-Einstein-Kondensation entfernt. Das Experiment von Donley et al. zeigt einen neuen Weg auf, ultrakalte Moleküle zu erzeugen: Kühle die atomaren Bestandteile zunächst separat und erzeuge die gewünschten Moleküle durch die kontrollierte Chemie kalter Gase. Dieser Weg wurde zwar schon zuvor durch Photoassoziation kalter Moleküle besprochen [6], aber bisher fehlt hier noch der Nachweis, dass sich dabei tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat aus Molekülen bildet.

Wenn man die Moleküle direkt sehen könnte, ließen sich viele interessante Fragen experimentell beantworten: In welchem Zustand werden die Moleküle erzeugt? Liegt wirklich ein molekulares Bose-Einstein-Kondensat vor? Gelingt es, die hochangeregten Moleküle kohärent in ihren Grundzustand zu transferieren? Kann man auch komplexere Moleküle wie heteronukleare Moleküle auf diese Weise produzieren und damit ein stark dipolares Quantengas erzeugen? Die Vielfalt an neuen Freiheitsgraden, die Moleküle in das Gebiet der Quantengase einbringen, wird Physiker in den verschiedensten Arbeitsrichtungen zu phantasievollen Träumen und Visionen anregen.

TILMAN PFAU

Prof. Dr. Tilman Pfauf, Physikalisches Institut, Universität Stuttgart, 70550 Stuttgart

- [1] E. A. Donley et al. *Nature* **417**, 529 (2002)
- [2] E. Tiesinga et al., *Phys. Rev. A* **46**, R1167 (1992)
- [3] S. L. Cornish et al., *Phys. Rev. Lett.* **85**, 1795 (2000)
- [4] E. A. Donley et al., *Nature* **412**, 295 (2001)
- [5] G. Meijer, *Physik Journal*, Mai 2002, S. 41
- [6] R. H. Wynar et al., *Science* **287**, 1016 (2000)