

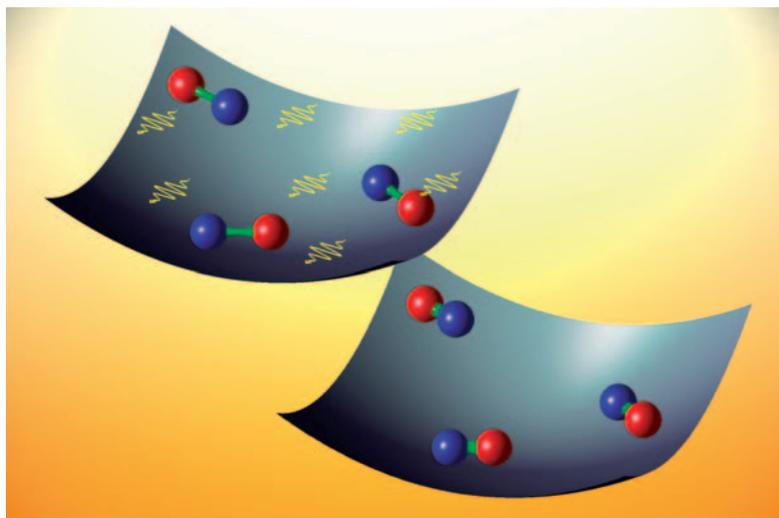
■ Tiefer gelegt und echt cool: Moleküle aus der Retorte

Fast zeitgleich ist es mehreren Forschergruppen gelungen, ultrakalte Moleküle zu erzeugen, die sich in ihrem Grundzustand befinden.

+) STIRAP steht für Stimulierte Raman-Streuung mit Adiabatischer Passage, vgl. *K. Bergmann*, Physik Journal, Juli/August 2003, S. 67

Das Forschungsgebiet der kalten Atome sorgt seit seiner Entstehung Mitte der 80er-Jahre immer wieder für neue faszinierende Entwicklungen und Erkenntnisse [1]. Dieser Erfolg hat schon früh auch den Wunsch nach ultrakalten Molekülen aufkommen lassen. Im Vergleich zu Atomen besitzen Moleküle eine komplexere innere Struktur, die zu zusätzlichen Freiheitsgraden führt, wie etwa Rotation oder Vibration. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für Experimente und Anwendungen, die mit Atomen allein nicht zu realisieren sind. Ist es möglich, ein ultrakaltes Molekül-Ensemble in einem genau definierten Quantenzustand zu erzeugen und es auf dem Quantenniveau zu kontrollieren? Lassen sich Bose-Einstein-Kondensate (BEC) aus Molekülen herstellen? So lauteten frühe Fragen.

Das große Problem dabei ist, Molekülwolken auf extrem niedrige Temperaturen im Mikro- oder Nano-Kelvin-Bereich abzukühlen. Die bei Atomen so erfolgreiche Laserkühlung versagt im Allgemeinen bei Molekülen, weil sich aufgrund der komplexeren Struktur ihrer Energieniveaus kein geschlossener optischer Kühlübergang finden lässt. Deswegen wurden in den letzten Jahren andere Ansätze entwickelt, um kalte, dichte Molekülensembles zu erzeugen. Solche Ansätze basieren einerseits darauf, die Moleküle abzubremesen, ihre Geschwindigkeit zu selektieren und sie mit einem Puffergas zu kühlen [2]. Andererseits lassen sich ultrakalte Moleküle auch direkt aus einem ultrakalten Gas von Atomen durch Zusammenfügen (Assoziation) herstellen. Dabei paaren sich benachbarte Atome des ultrakalten Atomgases und gehen eine chemische Bindung ein. Obwohl diese Methode zunächst etwas umständlich scheint, hat es gerade hier in den letzten Monaten große Fortschritte gegeben.



Schwach gebundene Moleküle mit großem Kernabstand lassen sich durch einen Lichtpuls in stark gebundene überführen.

Es gibt im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, um kontrolliert ultrakalte Moleküle aus ultrakalten Atomen zu gewinnen: Entweder zwei Atome werden durch einen optischen Übergang mit Laserstrahlung zusammengeschweißt (Photoassoziation) oder in einem durch Magnetfelder kontrollierten Stoß vereinigt (Magnetoassoziation). Im Allgemeinen sind solche Moleküle extrem schwach gebunden und hoch angeregt im Vibrationsspektrum. Sie sind sehr zerbrechlich und zerfallen unkontrolliert in tiefer gebundene Zustände, sobald sie mit weiteren Teilchen zusammenstoßen. Nur in einem speziellen Sonderfall, bei dem das Molekül aus zwei fermionischen Atomen besteht, lassen sich solche inelastischen Prozesse aufgrund des Pauli-Prinzips unterdrücken. Tatsächlich wurde auf der Basis solcher schwach gebundenen Moleküle in den letzten Jahren eine Flut höchst bemerkenswerter wissenschaftlicher Resultate gewonnen, z. B. die ersten molekularen BECs und neuartige suprafluide Fermi-Gase [3].

Die übrigen Spezies schwach gebundener Moleküle hatten bisher aufgrund ihrer Zerbrechlichkeit ein gewisses Manko. Angespornt durch den Erfolg der molekularen BECs, setzte nun ein Wettlauf verschie-

dener Forschergruppen ein, diese Moleküle zu „stabilisieren“. Ziel war es, kalte und dichte Wolken *tiefgebundener* Moleküle zu erzeugen, die sich letztendlich im Rotations- und Vibrationsgrundzustand (rovibronischer Grundzustand) befinden sollten. Da solche Moleküle sich in einem Potentialminimum befinden, sollten sie stabiler als die schwach gebundenen sein. Praktisch zeitgleich erreichten jetzt fünf Arbeitsgruppen mit binären Alkalimolekülen wie Cs₂, RbK, LiCs und Rb₂ auf unterschiedliche Weise dieses Ziel: die Gruppen von Pierre Pillet in Paris [4], Christoph Nägerl in Innsbruck [5], Jun Ye und Deborah Jin in Boulder (Co) [6], Matthias Weidemüller in Freiburg [7] sowie die Gruppe von Rudolf Grimm und dem Autor in Innsbruck [8].

In den Pariser und Freiburger Experimenten mit Photoassoziation [4, 7] dienten raffinierte optische Anregungsschemata dazu, einerseits recht selektiv den Molekülgrundzustand zu bevölkern und andererseits ungewünschte Molekülzustände relativ effizient zu entleeren. Auf diese Weise entstanden pro Sekunde bis zu 10⁵ kalte Grundzustandsmoleküle mit Temperaturen von wenigen 100 μ K, die sich möglicherweise in einer Falle sammeln lassen.

ao. Prof. Dr. Johannes Hecker Denschlag, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstraße 25 / IV, 6020 Innsbruck, Österreich

In Boulder und Innsbruck gelang es, magneto-assoziierte, schwach gebundene Moleküle mit einem speziellen, induzierten optischen Raman-Prozess (STIRAP)[†] in tief gebundene Moleküle zu überführen [5, 6, 8], wobei in [6, 8] tatsächlich ein Rotations-Vibrations-Grundzustand erreicht wurde. Der STIRAP-Prozess ist kohärent, extrem zustandsselektiv, hocheffizient (momentan bis zu 90 %), schnell (einige μs) und reversibel. Eigenschaften des schwach gebundenen Ensembles wie Dichteverteilung, Temperatur, Phasenraumdichte und Quantenentartung gehen dabei direkt auf das tief gebundene Ensemble über. Da die Ensembles schwach gebundener Moleküle zuvor relativ effizient aus einem quantenentarteten atomaren Gas (BEC oder Fermi-See) gewonnen wurden, sind sie und die Ensembles stark gebundener Moleküle entweder auch quantenentartet oder zumindest nicht weit davon entfernt.

Vielseitige Perspektiven

Wie groß sind nun die Lebensdauern der Moleküle im rovibronischen Grundzustand? Bis zu 200 ms wurden schon beobachtet. Dennoch kann es viele Gründe für Molekülverluste geben. Diese hängen sehr vom Umfeld der Moleküle ab, und in zukünftigen Experimenten gilt es daher, Verluste sorgfältig zu untersuchen. Eine wichtige Rolle könnte z. B. spielen, ob der gesamte Elektronenspin der Moleküle 0 (Singulett) oder 1 (Triplet) ist. Der Rovibrationsgrundzustand der Tripletmoleküle der Alkalimetalle liegt energetisch höher als der Singulettgrundzustand und kann daher prinzipiell in einen Singulettzustand relaxieren. Es wird interessant sein herauszufinden, wie stark dieser Zerfallsprozess ist. Trotz ihrer wahrscheinlich kürzeren Lebensdauer weisen Tripletmoleküle gegenüber Singulettmolekülen aber auch Vorteile auf. Sie besitzen ein viel stärkeres magnetisches Moment und eine entsprechende Hyperfeinstruktur. Ähnlich wie bei den Alkali-Atomen sollte sich dann die Wechselwirkung zwischen den

Molekülen über das Magnetfeld kontrollieren lassen, was sich als ein zentrales Hilfsmittel der ultrakalten Quantengase herausgestellt hat.

Weiterhin ist bei tief gebundenen Molekülen zu unterscheiden, ob sie polar oder nicht-polar sind. Polare Moleküle sind heteronuklear, d. h. sie bestehen aus verschiedenen Elementen, wie RbK oder LiCs. Die Bindungselektronen verteilen sich aufgrund unterschiedlicher Elektronenaffinität ungleich auf die beiden Atomrümpfe, sodass ein elektrischer Dipol entsteht. Als Konsequenz wechselwirken zwei polare Moleküle nicht mehr nur über die kurzreichweitige van-der-Waals-Kraft, die für nicht-polare Moleküle dominiert, sondern über langreichweite elektrische Dipol-Dipol-Kräfte, die sich außerdem durch ihre Anisotropie auszeichnen. Ultrakalte Gase polarer Moleküle haben damit qualitativ Eigenschaften, die bei Atomgasen nicht zu finden sind, da Atome (im Grundzustand) niemals polar sein können.

Ob polar oder nicht-polar, Triplet oder Singulett, fermionisch oder bosonisch, alle Moleküle im rovibronischen Grundzustand liefern neue Möglichkeiten für sich ergänzende Experimente. Neben der Erzeugung entarteter Molekülquantengase und Anwendungen für Präzisionsmessungen stehen Fragestellungen aus der Festkörperphysik, der Bau eines Quantencomputers sowie ultrakalte Chemie auf dem Spielplan, mit großen Herausforderungen für Theorie und Experiment.

Johannes Hecker Denschlag

- [1] siehe z. B. den Schwerpunkt „Ultracold matter“ in *Nature* **416**, 206 (2002)
- [2] J. Doyle, B. Friedrich, R. V. Krems und F. Masnou-Seeuws, *Eur. Phys. J. D.* **31**, 149 (2004)
- [3] J. Hecker Denschlag, H.-C. Nägerl und R. Grimm, *Physik Journal*, März 2004, S. 33
- [4] M. Viteau et al., *Science* **321**, 232 (2008)
- [5] J. G. Danzl et al., *Science* **321**, 1062 (2008)
- [6] K.-K. Ni et al., *Science* **322**, 231 (2008)
- [7] J. Deiglmayr et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 133004 (2008)
- [8] F. Lang et al., *Phys. Rev. Lett.* **101**, 133005 (2008)