

■ Immer bergauf oder verdampft gekühlt

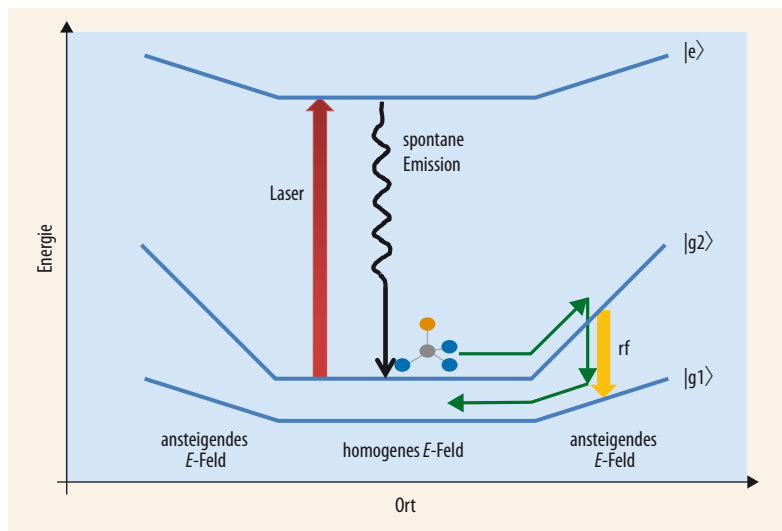
Zwei neue Kühlmethoden eröffnen die Möglichkeit, in Zukunft ein weites Spektrum molekularer Gase nahe dem absoluten Nullpunkt zu untersuchen.

Dank effektiver Kühlmethoden lassen sich atomare Gase seit Langem bei Temperaturen weit unterhalb von einem Mikrokkelvin untersuchen und nutzen, etwa für die Simulation wechselwirkender quantenmechanischer Vielteilchensysteme oder die hochpräzise Zeitmessung. Moleküle lassen sich hingegen aufgrund zusätzlicher quantenmechanischer Freiheitsgrade wesentlich schwerer auf ultratiefe Temperaturen abkühlen. Das ist bedauerlich, denn gerade diese Freiheitsgrade eröffnen ein enormes Forschungspotenzial.

Experimente mit ultrakalten Molekülen versprechen nicht nur spannende Erkenntnisse für die Quanten-Vielteilchenphysik, sondern auch für viele fundamentale Themen – von der Suche nach einem permanenten elektrischen Dipolmoment des Elektrons über Paritätsverletzungen in Molekülen bis hin zu Fragen aus Astrophysik, Chemie und Biologie [1].

Bislang gelang es mit Verfahren wie dem sog. Stark-Abbremsen [2] oder Kühlen mit kalten Puffergasen [3], eine Vielzahl molekularer Spezies auf einige zehn Millikelvin abzukühlen. Ultratiefe Temperaturen waren jedoch nur für ganz spezielle diatomare Moleküle zu erreichen, nämlich solche, die aus ultrakalten Atomen durch eine kontrollierte chemische Reaktion zusammengesetzt werden. Typische Beispiele hierfür sind Alkali-Alkali-Moleküle wie Cs_2 [4] oder KRb [5], die sich bei hohen Dichten und Temperaturen im Nanokelvin-Bereich in optischen Fallen speichern und manipulieren lassen. Zwei vielversprechende Kühlverfahren, die auf eine Vielzahl molekularer Spezies angewandt werden könnten, haben nun Gruppen am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) in Garching bzw. am JILA in Boulder (Colorado) vorgestellt.

Die Gruppe um Gerhard Rempe vom MPQ kühlt mit ihrer Methode polyatomare polare Fluorme-



Das Prinzip des sog. Sisyphus-Kühlens für Moleküle mit ausgeprägtem Dipolmoment [6]: Zunächst pumpt man diese mit einem Laser vom Zustand $|g_1\rangle$ in den höheren Vibrationszustand $|e\rangle$, von dem sie dann spontan in den Zustand $|g_2\rangle$ zerfallen. In $|g_2\rangle$ wechselwirken die Moleküle sehr stark mit dem elektrischen Feld E . Das Dipolmoment ist „sehr stark antiparallel“ zu E ausgerichtet, und die Moleküle verlieren beim Hinaufklettern der Potentialberge extrem viel kinetische

energie. Nun lässt sich ihr Rotationszustand $|g_2\rangle$ am höchsten Punkt mit Radiostrahlung (rf) in den Rotationszustand $|g_1\rangle$ zurückführen, dessen Dipolmoment „weniger stark antiparallel“ zu E ausgerichtet ist. Der Clou: Das Molekül gewinnt nun beim Hinunterlaufen des Potentialberges in den Randbereichen weniger kinetische Energie, als es durch das Hinaufklettern im Zustand $|g_2\rangle$ verloren hat. Dieser Kühlzyklus lässt sich nun wiederholen.

than-Moleküle (CH_3F) [6]. Dabei nutzten sie aus, dass viele Moleküle wie CH_3F wegen ihres elektrischen Dipolmoments sehr stark mit externen elektrischen Feldern wechselwirken, abhängig allerdings davon, in welchem Rotationszustand das Molekül präpariert wurde oder – salopper ausgedrückt – „wie stark“ parallel oder antiparallel das elektrische Dipolmoment des Moleküls entlang der elektrischen Feldachse ausgerichtet ist. Auf dieser zustandsselektiven Wechselwirkung der Moleküle mit äußeren elektrischen Feldern basiert das Kühlverfahren. Dafür werden die Moleküle zunächst auf 390 mK vorgekühlt und dann in einer elektrischen Feldkonfiguration gespeichert, die im Zentrum der Falle homogen ist, zu den Rändern hin aber ansteigt. Die Wissenschaftler haben die Methode optoelektrisches Sisyphus-Kühlen genannt, da die Moleküle unermüdlich Potentialberge erklimmen

müssen (Abb.). Erstaunlich ist die enorme Effektivität des Kühlprozesses. Wenige Zyklen reichten aus, um die Moleküle auf 29 mK abzukühlen und die Phasenraumdichte signifikant um einen Faktor 30 zu steigern. Zwar ist dies noch sehr weit vom anvisierten ultrakalten Bereich entfernt, aber die Physiker sind zuversichtlich, dass ihre Methode noch wesentlich tiefere Temperaturen erreichen kann, bei denen die Dichte des molekularen Ensembles genügend groß ist, um mit anderen Techniken weiter kühlen zu können.

Heiß muss raus
Eine der vielversprechendsten Methoden in diesem Zusammenhang ist die Verdampfungskühlung, wie nun die Gruppe von Jun Ye am JILA gezeigt hat [7]. Sie beruht darauf, die „heißesten“ Teilchen eines Gases in jedem Kühlschritt selektiv zu entfernen und anschließend das verbliebene Ensemble wieder ins

thermodynamische Gleichgewicht zu bringen (Rethermalisierung). Das muss so schnell geschehen, dass möglichst wenig Gasteilchen durch zustandsändernde Stöße oder chemische Reaktionen verloren gehen. Für Atome hat sich diese Methode etabliert, wobei entweder eine klassische Magnetfalle oder eine optische Dipolfalle zum Einsatz kommt. Bei der Magnetfalle wird das Potential konstant gehalten, und ein sich veränderndes Mikro- oder Radiowellenfeld wirft jeweils die heißesten Atome aus der Falle. Die Frequenz ist dabei so gewählt, dass sie Zeeman-Übergänge der Atome bei genügend hohem Magnetfeld anregt. Diese Bedingung ist an den Rändern der Falle erfüllt, wohin nur ausreichend schnelle Atome gelangen.

Die JILA-Forscher haben nun diese bekannte Methode auf die Kühlung eines Ensembles von OH-Molekülen übertragen. Die OH-Moleküle wurden zunächst mit einem „Stark-Abbremsler“ [2] vorgekühlt und dann in einer Magnetfalle eingeschlossen. OH hat neben seinem elektrischen Dipolmoment aufgrund seines elektronischen Drehimpulses auch ein magnetisches Moment, das sich zum Fangen der Moleküle in einer Magnetfalle ausnutzen lässt. Eine Kombination von elektrischen Feldpulsen und Mikrowellenpulsen ermöglicht

es nun, die heißesten Moleküle in einen Zustand zu überführen, in dem sie nicht mehr gefangen bleiben können. Diese Moleküle entweichen daher aus der Falle. Dadurch kühlte sich das Ensemble um eine Größenordnung ab, von 50 auf 5 Millikelvin, nur begrenzt durch apparative Einschränkungen. Dies entspricht – bei vernachlässigbaren Verlusten – einer beeindruckenden Zunahme der Phasenraumdichte um drei Größenordnungen. In der Tat zeigen Rechnungen, dass die Voraussetzungen für evaporative Kühlung mit tieferer Ausgangstemperatur des OH-Ensembles sogar noch günstiger ausfallen könnten.

Die Experimente sind umso beeindruckender, weil das verwendete OH-Molekül-Ensemble bisher keineswegs als der geeignetste Kandidat für Verdampfungskühlung galt. OH-Moleküle haben nämlich eine Tendenz zur Wasserstoffbrückenbindung (OH-OH) und wechselwirken daher stark anisotrop miteinander, was leicht zu zustandsändernden Stößen und zu Verlusten führen kann. Zusätzlich gibt es Verlustpfade durch chemische Reaktionen, beispielsweise der Form $\text{OH} + \text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$. Allerdings wechselwirken die Moleküle bei tiefen Temperaturen ganz anders miteinander, als es naiv klassisch zu erwarten wäre. Bei tiefen Temperaturen lassen sich alle Mole-

küle in einem spezifischen internen Quantenzustand präparieren. Im Falle der OH-Moleküle führt die interne quantenmechanische Struktur mit energetisch fast entarteten Quantenzuständen unterschiedlicher Parität zu einer effektiven langreichweitigen Abstoßung untereinander. Dieser Mechanismus unterdrückt Verluste, indem er die Moleküle „auf Abstand“ hält.

Durch beide Experimente – sowohl das optoelektrische Sisyphuskühlen als auch die Verdampfungskühlung – wurde mit Molekülen der ultrakalte Temperaturbereich bisher noch nicht erreicht. Es scheint allerdings, dass die Türen für eine Vielzahl molekularer Spezies nahe dem absoluten Nullpunkt weit geöffnet wurden und bi-atomare Moleküle in diesen Temperaturbereichen bald Gesellschaft bekommen werden.

Silke Ospelkaus

- [1] L. D. Carr, D. DeMille, R. V. Krems und Jun Ye, *New J. Phys.* **11**, 055049 (2009)
- [2] H. L. Bethlem, G. Berden und G. Meijer, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1558 (1999)
- [3] J. M. Doyle, B. Friedrich, J. Kim und D. Patterson, *Phys. Rev. A* **52**, 2515 (1995)
- [4] J. G. Danzl et al., *Science* **321**, 1062 (2008)
- [5] K.-K. Ni et al., *Science* **322**, 231 (2008)
- [6] M. Zeppenfeld et al., *Nature* **491**, 570 (2012)
- [7] B. K. Stuhl et al., *Nature* **492**, 396 (2012)

Prof. Dr. Silke Ospelkaus, Universität Hannover, Institut für Quantenoptik, Welfengarten 1, 30167 Hannover

GRENZEN DES WACHSTUMS

Warum variiert bei kleinen Laubbäumen die Blattgröße enorm von Art zu Art, während die Baumriesen allesamt 10 bis 20 cm lange Blätter haben? Diese Frage haben zwei Biophysiker beantwortet, indem sie das Kapillarsystem analysiert haben, das die in den Blättern erzeugten Nährstoffe im Baum verteilt. Dazu modulierten sie ein Blatt als semipermeable Röhre, in die nährstoffreiche Flüssigkeit strömt, und den Stamm als lange undurchlässige Röhre. Je länger das Blatt, desto mehr Flüssigkeit strömt Richtung Stängel. Umso länger aber der Stamm, desto größer ist der Widerstand, den er der Strömung entgegensetzt. Daraus ergibt sich eine Sättigung bei einer bestimmten Blattgröße, die von der Baumhöhe abhängt. Darüber hinaus zeigt sich, dass das Blatt auch eine Min-



destgröße haben muss, um die Versorgung sicherzustellen. Im Modell schneiden sich die beiden Kurven für Ober- und Untergrenze bei einer Blattgröße von rund 20 cm und einer Baumhöhe

von 100 Metern – dies stimmt gut mit den beobachteten Größen bei den höchsten Laubbäumen überein. (SJ) K. H. Jensen und M. A. Zwieniecki, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 018104 (2013)

K. Jensen/Harvard University und M. Zwieniecki/UC Davis