

Moleküle kalt gestellt

Die präzise Kontrolle über atomare Quantengase eröffnet neue Perspektiven in der Molekülphysik.

Silke Ospelkaus

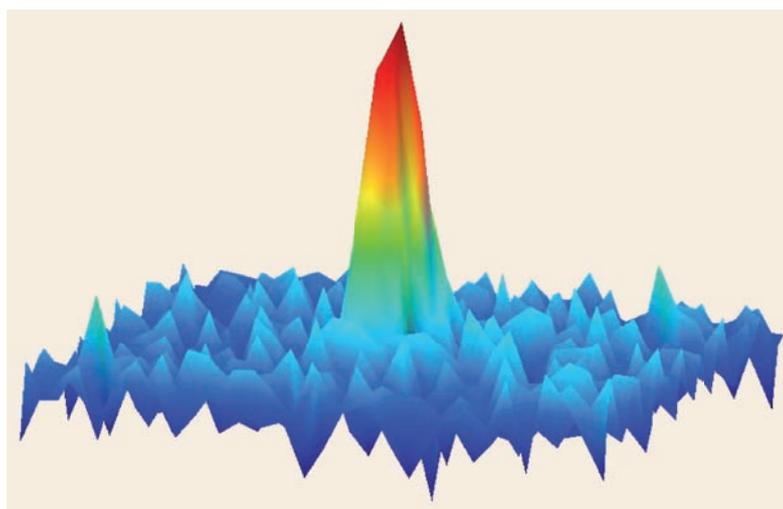
Die Möglichkeit, Atome auf immer niedrigere Temperaturen zu kühlen und dabei immer besser zu kontrollieren, hat Atomphysik und Quantenoptik revolutioniert. Doch was mit Atomen gelingt, möchten Physiker wie Chemiker auch mit Molekülen erreichen. So ist die chemische Welt nahe des absoluten Temperaturnullpunkts keineswegs erstarrt, denn aufgrund quantenmechanischer Effekte ergeben sich neue Reaktionswege. Doch die Erzeugung molekularer Gase bei solch tiefen Temperaturen erweist sich als eine große Herausforderung.

Je kälter Atome und Moleküle sind, umso langsamer werden sie, allerdings keinesfalls langweiliger, denn bei extrem tiefen Temperaturen rücken neue Materiezustände ins Blickfeld. Bestes Beispiel sind die 1995 erstmals erzeugten Bose-Einstein-Kondensate aus Atomen. Bis dahin war es ein langer Weg für die Experimentalphysiker, denn die Voraussagen von Bose und Einstein stammen aus dem Jahr 1924. Doch was ist mit Molekülen? „Kaltgestellt“ zeigen sie noch deutlich vielfältigere und komplexere Phänomene. Als Zusammenschlüsse von Atomen besitzen sie Schwingungs- und Rotationsfreiheitsgrade und können wiederum neue Verbindungen bilden.

Aber laufen überhaupt chemische Reaktionen ab, wenn die Moleküle zuvor auf Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts abgekühlt wurden? Die Antwort lautet „ja“, auch wenn – wie wir sehen werden – eine solche ultrakalte Chemie einer anderen Reaktionsdynamik unterliegt, die etwa durch quantenmechanisches Tunneln geprägt wird. Gerade das macht Experimente mit ultrakalten Molekülen so reizvoll, denn es sind exotische Reaktionswege und -produkte zu erwarten.

Doch Moleküle extrem zu kühlen eröffnet noch eine Vielzahl anderer Perspektiven, beispielsweise für hochpräzise spektroskopische oder interferometrische Messungen für die Suche nach Physik jenseits etablierter Modelle. Ultrakalte Gase aus polaren Molekülen zeigen eine starke, langreichweitige und anisotrope elektrische Wechselwirkung. Quantenentartete Gase solcher Moleküle eröffnen somit ein neues Feld der Vielteilchenphysik, mit neuartigen quantenmechanischen Phasen. Die langreichweitige Wechselwirkung ist auch Basis neuer Zugänge zur Quanteninformationsverarbeitung.

Allerdings ist es äußerst knifflig, solche Gase auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt zu brin-



Dies ist eines der ersten Bilder eines ultrakalten, dichten Gases aus KRb-Molekülen, in dem sich jedes der Moleküle im Zustand niedrigster Energie befindet. Das Bild wurde in Experimenten am JILA gewonnen, indem die Absorption von

Laserlicht durch die Moleküle gemessen wurde, aus der sich die räumliche Verteilung und Dichte (erkennbar an der Höhe der Spitzen und der Farbkodierung) des Gases ergibt.

gen, denn Moleküle widersetzen sich mit ihren Rotations- und Vibrationsfreiheitsgraden weitgehend den etablierten Kühlverfahren für Atome wie z. B. Laserkühlung. Zwar gibt es durchaus direkte Kühlmethode für Moleküle, wie das Abbremsen durch elektrische, magnetische oder optische Felder oder durch Stöße mit einem Hintergrundgas kalter Atome, doch geraten diese bislang bei Temperaturen von einigen Millikelvin an ihre Grenzen. Das ist noch einige Größenordnungen von den anvisierten Temperaturen unterhalb eines Mikrokelvins entfernt.

KOMPAKT

- Ausgehend von atomaren Quantengasen lassen sich in kontrollierter Weise die verschiedensten Arten von ultrakalten Molekülen herstellen und studieren.
- Das Spektrum reicht dabei von sehr schwach gebundenen Feshbach-Molekülen über tief gebundene diatomische Moleküle im elektronischen Rotations- und Vibrationsgrundzustand bis hin zu neuartigen Molekülbindungen in Rydberg-Gasen.
- Die präzise Kontrolle über interne und externe Freiheitsgrade der resultierenden molekularen Gase eröffnet weit reichende Perspektiven wie z. B. das Studium ultrakalter chemischer Reaktionen.

Dr. Silke Ospelkaus,
Max-Planck-Institut
für Quantenoptik,
Hans-Kopfermann-
Str. 1, 85748 Garching

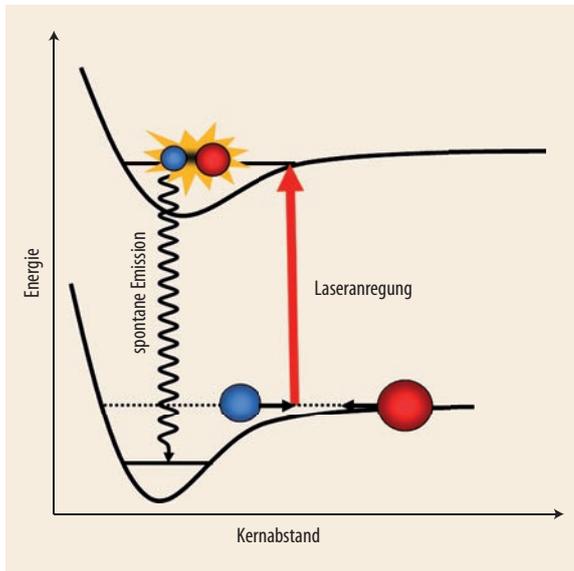


Abb. 1 Bei der Photoassoziation absorbieren zwei stoßende Atome ein Photon und bilden ein gebundenes Molekül in einem elektronisch angeregten Molekülpotential. Aufgrund der kurzen Lebensdauer des angeregten Zustandes zerfällt dieses Molekül unter Emission eines Photons entweder wieder in zwei freie Atome oder bildet ein gebundenes Molekül im elektronischen Grundzustandspotential.

Zugleich gibt es jedoch auch einen ungewöhnlichen Zugang: Aus ultrakalten atomaren Gasen lässt sich nämlich in kontrollierter Weise mit Licht und Magnetfeldern ein weites Spektrum ultrakalter molekularer Gase erzeugen. Genau definierte interne und externe Freiheitsgrade der Atome werden dabei in genau definierte Quantenzustände der Moleküle überführt. Die dabei erzeugten Verbindungen sind in mehrerlei Hinsicht exotisch. Zunächst einmal sind sie meist auf solche zwei- oder dreiatomigen Moleküle beschränkt, deren atomare Konstituenten sich mit Standardmethoden bis nahe dem absoluten Nullpunkt abkühlen lassen. Dazu zählen vor allem solche mit Alkali- oder Erdalkaliatomen wie Rb_2 , Cs_2 , RbK oder Sr_2 oder auch $YbRb$. Ein anderer exotischer Aspekt ist, dass einige Moleküle in hochangeregten Vibrationsniveaus mit fast verschwindend geringer Bindungsenergie von einigen 10^{-10} eV gebildet werden. Dies entspricht einer thermischen Energie von $1 \mu K$. Ob schwach oder stark gebunden, unter bestimmten Bedingungen weisen aus Atomen zusammengebastelte Moleküle eine erstaunliche Stabilität auf und erlauben somit das Studium chemischer Reaktionen bei bislang unzugänglichen Temperaturen und Bindungsenergien.

Von Atom- zum Molekülgasen

Wenn es darum geht, ultrakalte Atomgase in ebensolche Molekülgasen zu konvertieren, sind Techniken notwendig, mit denen sich ihre Bindungsenergie kontrolliert und ohne das Ensemble aufzuheizen abführen lässt. In ersten Versuchen gelang es schon 1993, ultrakalte Na- und Rb-Atome mit Licht zu ultrakalten Dimeren (Na_2 bzw. Rb_2) zu verbinden (**Abb. 1**) [1, 2].

Dabei absorbieren zwei miteinander stoßende Atome ein Photon und bilden ein Molekül in einem elektronisch angeregten Molekülpotential. Dieses hat nur eine kurze Lebensdauer, sodass dieses Molekül durch spontane Emission eines Photons wieder in den elektronischen Grundzustand zurückfällt. Hier kann es entweder wieder in seinen Ausgangszustand (also zwei freie Atome) zerfallen oder ein gebundenes Molekül in einem bestimmten Rotations- und Vibrationszustand bilden. Das Photon transportiert hierbei die Bindungsenergie ab, sodass diese nicht in kinetische Energie des Moleküls umgesetzt wird. Lediglich die Energie des Photonenrückstoßes ($300 nK$) überträgt sich auf das Molekül. Durch geschickte Wahl des elektronisch angeregten Molekülzustands oder eines weiteren Laserfelds gelang es, kontrolliert ultrakalte Moleküle mit einer Temperatur im μK -Bereich in ihren elektronischen Rotations- und Vibrationsgrundzustand (kurz: Rovibrationsgrundzustand) zu bringen [3, 4]. Doch bisher hat es sich als problematisch erwiesen, gleichzeitig entsprechend dichte molekulare Gase zu erzeugen. Die Anzahl der erzeugten Moleküle liegt nur bei rund hundert pro Sekunde. Deshalb dürfte es noch ein weiter Weg sein, mithilfe dieser Methoden molekulare Bose-Einstein-Kondensate zu erzeugen.

Das gelang jedoch mit einer anderen Technik – der sog. Feshbach-Molekülbildung. Hier werden, ausgehend von ultrakalten atomaren Gasen, Moleküle in einem sehr hoch angeregten Vibrationsniveau präpariert. Aufgrund der extrem schwachen Bindung sind diese

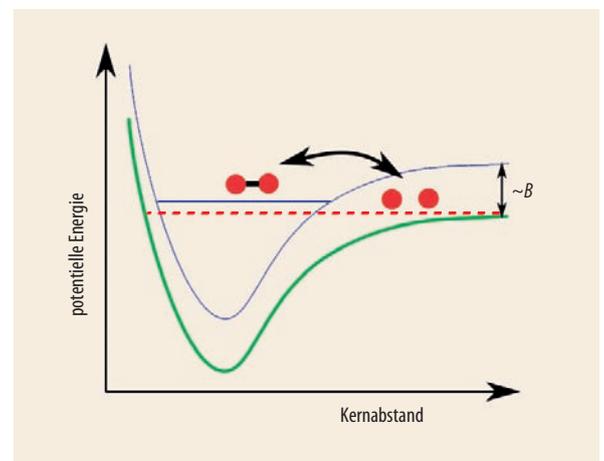


Abb. 2 Im Schwerpunktsystem zweier Atome bestimmt das gemeinsame Molekülpotential die Relativbewegung: Wegen der kleinen kinetischen Energieskala der Atome im Vergleich zum Molekülpotential läuft ein stoßendes Atompaar praktisch auf der Dissoziationsenergie (gestrichelte Linie) aufeinander zu, bis der abstoßende Anteil des Molekülpotentials es bei kleinen Abständen reflektiert. Für die Feshbach-Molekülbildung werden der atomare Zustand und der schwach gebundene Molekülzustand durch ein Magnetfeld B zur Entartung gebracht, das aufgrund der unterschiedlichen magnetischen Momente der Zweikörperzustände die relative Energie der beiden Zustände gegeneinander verändert. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen den beiden Zuständen kreuzen sich diese jedoch nicht, sondern werden kohärent ineinander überführt. Diese verbotene Kreuzung erlaubt es dann, die stoßenden Atome durch eine einfache Magnetfeldrampe in Moleküle mit hochangeregten Vibrationsniveaus zu überführen.

Moleküle außergewöhnlich groß. Ihre Ausdehnung von mehreren hundert Bohr-Radien liegt zwei bis drei Größenordnungen über der von Molekülen in ihrem Rovibrationsgrundzustand. Diese Feshbach-Moleküle lassen sich verblüffend einfach in ultrakalten Atomgasen erzeugen (Abb. 2). Im Gegensatz zur Photoassoziation bilden sich die Moleküle in kohärenter Weise. Das erlaubt es, ein Atomensemble mit seinen äußeren Freiheitsgraden auf ein Molekülensemble zu projizieren, ohne auch nur die Rückstoßenergie eines Photons zu übertragen. So lässt sich ein quantenentartetes Gas von Atomen in ein quantenentartetes Gas von Feshbach-Molekülen überführen. Auch lassen sich kohärente Überlagerungen aus Molekülen und Atomen herstellen.

Ihre große interne Energie macht Feshbach-Moleküle sehr zerbrechlich, da sie durch Stöße sehr einfach in tiefer gelegene Vibrationsniveaus zerfallen können. Dennoch ließ sich mit ihnen das erste und bisher einzige molekulare Bose-Einstein-Kondensat herstellen [5, 6]: Wird ein bosonisches Feshbach-Molekül aus zwei fermionischen Atomen zusammengesetzt, so besitzt das resultierende Molekül eine erstaunliche Stabilität. Aufgrund des Pauli-Prinzips sind in diesem Fall inelastische Stöße stark unterdrückt!

Kürzlich zeigten zwei Forschergruppen eine andere Möglichkeit, Feshbach-Moleküle zu stabilisieren: In unseren Experimenten am JILA sowie in Experimenten in Innsbruck gelang es, schwach gebundene Feshbach-Moleküle mit einer kinetischen Energie von einigen 100 nK kohärent in ihren Rovibrationsgrundzustand zu überführen, ohne dabei ihre kinetische Energie zu verändern. Bemerkenswert ist, dass hierbei eine Ener-

giedifferenz zwischen Ausgangs- und Endzustand von 0,5 eV überwunden wird – entsprechend einer thermischen Energie von 6000 K –, ohne auch nur einen Bruchteil dieser Energie in die Translationsfreiheitsgrade der Moleküle übergehen zu lassen. Im Experiment dient hierzu ein induzierter optischer Raman-Prozess (STIRAP) [7]. Hierbei werden die Feshbach-Moleküle mit kurzen Laserpulsen unterschiedlicher Frequenz bestrahlt. Das Licht koppelt dann den Ausgangszustand des Moleküls über einen elektronisch angeregten Zustand an den internen Rotations- und Vibrationsgrundzustand (Abb. 3). Das Licht sorgt auch für eine ausgeglichene Energiebilanz und trägt gewissermaßen die Bindungsenergie der Moleküle von 6000 K davon. Der kohärente Raman-Prozess ist sehr effizient und erlaubt, bis zu 90 Prozent der Feshbach-Moleküle in den Rovibrationsgrundzustand zu kühlen. Aufgrund der kohärenten Natur des Prozesses ist es außerdem möglich, externe Eigenschaften des Feshbach-Molekül-gases wie Dichteverteilung und Temperatur direkt auf das stark gebundene Ensemble zu übertragen und somit ein quantenentartetes Gas von Feshbach-Molekülen in ein quantenentartetes Gas von Grundzustandsmolekülen zu überführen. Bei Experimenten in Innsbruck ließen sich so ultrakalte dichte Cs₂- und Rb₂-Molekül-gase erzeugen [8, 9]. In unseren Experimenten in Boulder gelang dies mit KRb-Molekülen [10].

Warum sind solche Quantengase aus Grundzustandsmolekülen nun interessant? Neben der wesentlich größeren Stabilität weisen Moleküle wie KRb, die aus zwei unterschiedlichen Atomen bestehen, noch eine weitere besondere Eigenschaft auf: Sie besitzen eine

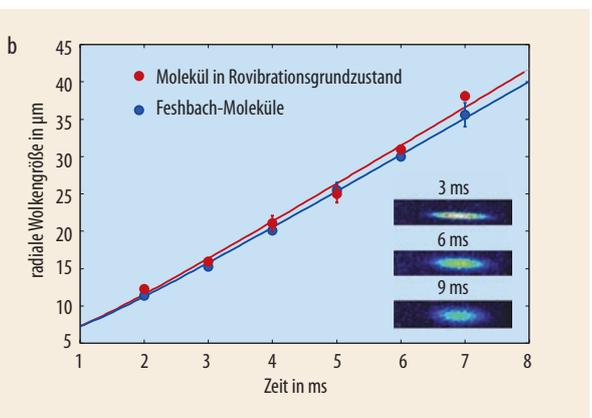
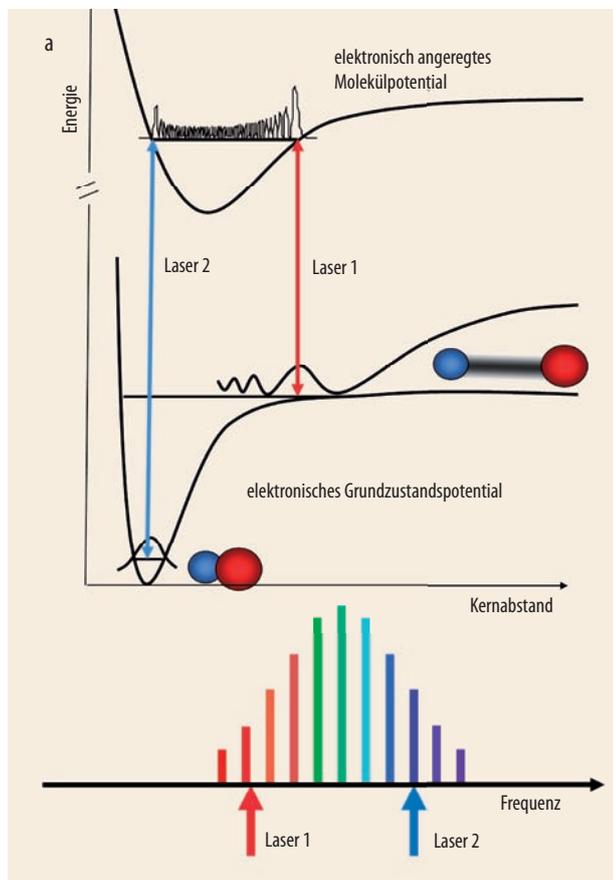


Abb. 3 Mithilfe zweier Laser-Felder gelingt es, die Feshbach-Moleküle kohärent an den Rovibrationsgrundzustand im elektronischen molekularen Grundzustandspotential zu koppeln (a). Die Phasenkohärenz zwischen den beteiligten Laserfeldern mit einer Frequenzdifferenz von 125 THz lässt sich dadurch sicherstellen, dass ein Frequenzkamm als Referenz für die Laser dient. Der theoretische maximal mögliche Transfer ist 100 Prozent. Im Experiment wurden bisher 90 Prozent beobachtet. Der Transfer ist technisch begrenzt. Die Temperatur der Feshbach- und der Grundzustandsmoleküle wird bestimmt, in dem man misst, wie die molekularen Ensembles nach dem Ausschalten des externen Fallenpotentials expandieren (b). In diesem Fall wurden Temperaturen von $T=430(20)$ nK und $T=400(15)$ nK gemessen. Folglich findet der Transfer statt, ohne Energie auf das Ensemble zu übertragen.

nach S. Ospelkaus et al. [10]

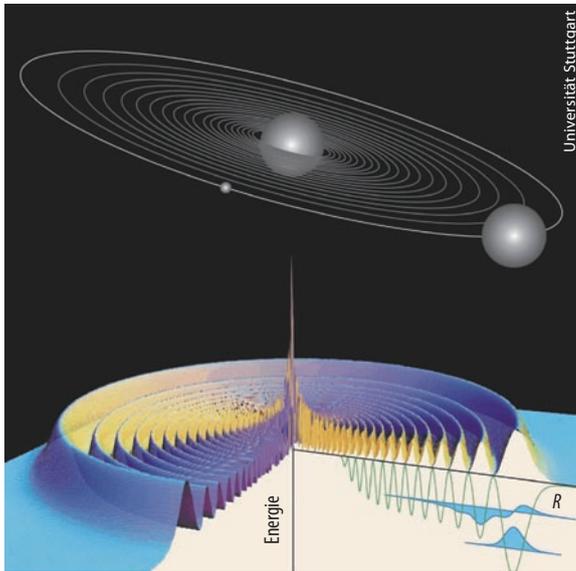


Abb. 4 Das Elektron eines Rydberg-Elektrons kreist auf einer hochangeregten Bahn und bindet dadurch ein zweites Atom (oben). Unten ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons für den 35s-Zustand des Rubidiumatoms dargestellt, zusammen mit dem Potential des Rydberg-Moleküls (grün) und der Wellenfunktionen der zwei gebundenen Molekülzustände (hellblau) mit Bindungsenergien im Bereich von 10^{-8} eV.

asymetrische elektronische Ladungsverteilung entlang ihrer internuklearen Achse und somit ein elektrisches Dipolmoment. Im Gegensatz zur kurzreichweitigen Wechselwirkung zwischen Atomen ist die elektrische Wechselwirkung zwischen solchen Molekülen langreichweitig und anisotrop. Dies eröffnet neue Möglichkeiten, um Quantengase zu manipulieren und kontrollieren, sowie vollkommen neue Perspektiven für die Vielteilchen-Quantenphysik.

Forscher um Tilman Pfau von der Universität Stuttgart gelang es, in einem ultrakalten Gas von Rubidium-Atomen noch ausgefallener Moleküle zu präparieren und sogar einen neuartigen molekularen Bindungsmechanismus nachzuweisen [11]. Anders als bei bekannten kovalenten oder ionischen Bindungen entstehen dabei außergewöhnlich große Moleküle mit Bindungslängen von mehr als 100 nm – vergleichbar mit der Größe kleiner Viren. Die erzeugten Moleküle bestehen aus einem Rydberg-Atom und einem Atom in seinem elektronischen Grundzustand.¹⁾ Das Rydberg-Elektron in seiner hochangeregten Bahn führt bei jedem klassischen Umlauf um seinen Atomkern einen niederenergetischen Streuprozess mit dem Atom im Grundzustand aus. Diese Streuprozesse wiederholen sich rund 150 Milliarden Mal pro Sekunde und induzieren eine Anziehung zwischen den Streupartnern, die dann zur Molekülbindung führt. Anschaulich gesagt, polarisiert das Rydberg-Elektron das Grundzustandsatom bei jedem Umlauf und bindet es somit an seine eigene Umlaufbahn. Form und Tiefe des entstehenden Molekülpotentials werden im Wesentlichen durch die Aufenthaltswahrscheinlichkeitsdichte des Rydberg-Elektrons bestimmt (Abb. 4). Diese oszilliert jedoch und zeigt eine ganze Reihe von Maxima als Funktion des Radius. Das Potential für das Grundzu-

¹⁾ Kürzlich ließen sich sogar triatomige Moleküle aus einem Rydberg-Atom und zwei Grundzustandsmolekülen nachweisen.

standsatom ist dort am tiefsten, wo die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Rydberg-Elektrons am größten ist. Dies definiert dann den molekularen Bindungsabstand. Allerdings unterstützt dieses oszillierende Potential neben dem Vibrationsgrundzustand auch sehr schwach gebundene angeregte Vibrationszustände.

Der erstmalige Nachweis dieser exotischen Moleküle eröffnet weit reichende Möglichkeiten. Durch zusätzliche Anregungen können wesentlich stärker gebundene Moleküle hergestellt werden. Diese besitzen ein sehr großes Dipolmoment und lassen sich daher präzise durch externe Felder manipulieren.

Ultrakalte Chemie

Bereits in den 80er-Jahren zielten wegweisende Arbeiten mit Molekularstrahlen darauf ab, chemische Reaktionen einschließlich ihres Ausgangs- und Eingangszustands so weit wie möglich zu kontrollieren. Dazu dienten Techniken wie Geschwindigkeitsselektion, winkelaufgelöste Messungen oder molekulares Alignment, d. h. die Ausrichtung der Molekülachsen mit einem sehr starken Laserfeld. Allerdings blieb bei all diesen Experimenten eine signifikante thermische Energie im Spiel.

Molekülensembles mit verschwindender kinetischer Energie erlauben es nun, nicht nur die inneren, sondern auch die äußeren Freiheitsgrade (die kinetische Energie) der beteiligten Moleküle präzise zu steuern. Mit nie da gewesener Energieauflösung lässt sich dann jeder Schritt einer chemischen Reaktion genau analysieren, auf der Basis eines genau definierten einlaufenden Zustandes und eines einzelnen möglichen chemischen Reaktionsergebnisses.

Normalerweise untersucht man chemische Reaktionen bei Temperaturen von einigen zehn bis hundert Kelvin. Dass diese auch bei verschwindend geringen Temperaturen stattfinden können, scheint unserer Intuition zu widersprechen. Eine chemische Reaktion

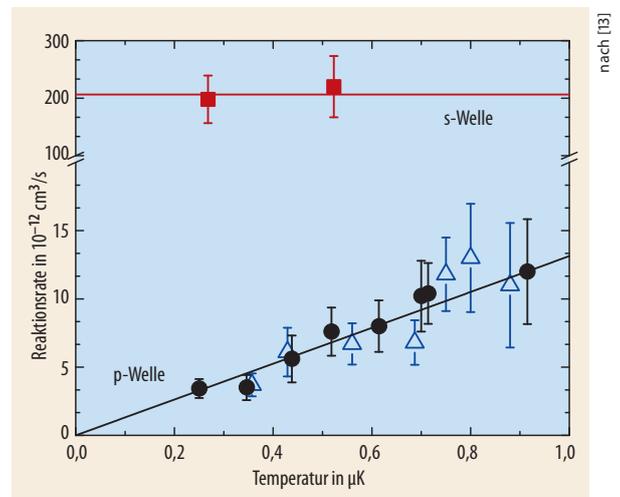


Abb. 5 In einem fermionischen Gas aus ununterscheidbaren KRB-Molekülen laufen chemische Reaktionen um einen Faktor zehn- bis hundertmal langsamer ab als in einer 1:1-Mischung zweier Quantenzustände.

basiert letztlich auf dem Stoß zwischen zwei Partnern, bei denen eine chemische Bindung gebrochen und eine andere Bindung eingegangen wird. Um zu verstehen, wie ultrakalte chemische Reaktionen ablaufen, müssen wir also ultrakalte Stöße betrachten. Hier übernimmt die Quantenmechanik eine entscheidende Rolle, weil bei tiefen Temperaturen die thermische de Broglie-Wellenlänge der Stoßpartner wächst. Aufgrund der ausgeprägten Wellennatur der ultrakalten Teilchen bestimmt nun die Quantenstatistik die Dynamik der Stöße, während die Tunnelwahrscheinlichkeiten von den Drehimpuls- und Reaktionsbarrieren abhängen. Zwei Forscherteams ist kürzlich ein erster Einstieg in die ultrakalte Chemie gelungen:

Die Gruppe von Rudi Grimm in Innsbruck untersuchte bei ultratiefen Temperaturen eine elementare Austauschreaktion der Form $A_2 + B \rightarrow AB + A$ [12]. Die Reaktionspartner waren in diesem Fall sehr schwach gebundene Cs-Feshbach-Moleküle, deren atomare Konstituenten sich in genau definierten Hyperfeinzuständen A oder B befanden. In den Experimenten bildeten sich 4000 sehr schwach gebundene Cs_2 -Moleküle (A_2) aus den zunächst vorhandenen rund 30 000 Cs-Atomen in einem bestimmten Hyperfeinzustand A. Mit Mikrowellenstrahlung wurden die verbleibenden Atome in einen anderen Hyperfeinzustand B transferiert und dann die chemische Austauschreaktion studiert. Das besondere an diesen Experimenten ist zweierlei: Erstens lässt sich durch eine präzise Wahl äußerer Parameter – hier das magnetische Feld – kontrollieren, ob die genannte Reaktion endotherm oder exotherm verläuft und somit bei ultrakalten Temperaturen verboten oder erlaubt ist. Zweitens verbleiben die Reaktionsprodukte aufgrund der sehr kleinen Energiedifferenzen zwischen Ausgangs- und Endzustand im äußeren Potential gefangen und sind somit nachweisbar. Chemische Reaktionen werden in diesen Experimenten also direkt gemessen und nicht aus Fallenverlusten deduziert. Dabei zeigte sich auch eine eindeutige Signatur für chemische Reaktionen. Eine Austauschreaktion fand oberhalb einer kritischen Feldstärke statt, die hierbei genau dem Magnetfeld entspricht, bei dem Ein- und Ausgangszustand energetisch entartet sind. Dies ist ein eindeutiges Zeichen dafür, dass die Reaktionen nur dann stattfinden können, wenn Energie in der Reaktion frei wird. Zusätzlich stellten die Forscher fest, dass die Rate, mit der chemische Reaktionen stattfinden, sehr stark vom äußeren Magnetfeld abhängt.

Dass quantenmechanische Gesetze die Dynamik chemischer Reaktionen bei ultrakalten Temperaturen bestimmen, machen die Experimente deutlich, die wir in der Gruppe von Deborah Jin und Jun Ye am JILA durchgeführt haben [13]. Wir arbeiten im Gegensatz zur Innsbrucker Arbeitsgruppe mit tief gebundenen Molekülen in ihrem elektronischen Rotations- und Vibrationsgrundzustand und untersuchen insbesondere chemische Reaktionen zwischen K-Atomen und KRb-Molekülen sowie exotherme Reaktionen der Form $KRb + KRb \rightarrow K_2 + Rb_2$. Die Dynamik dieser Prozesse lässt sich über Verluste der KRb-Moleküle aus der

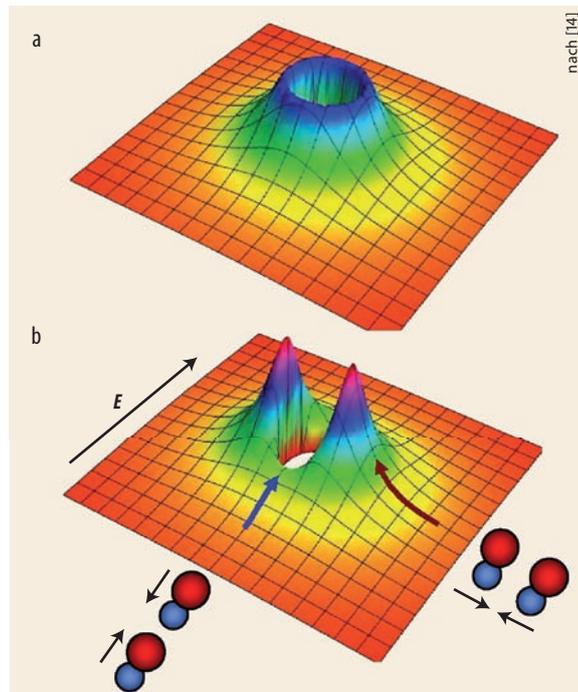
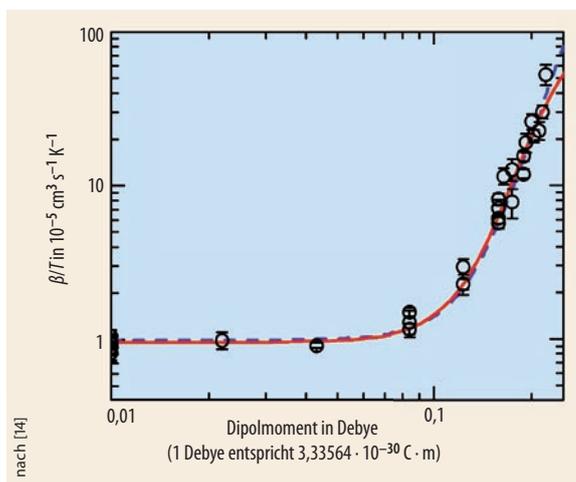


Abb. 6 Für eine chemische Reaktion müssen die fermionischen KRb-Molekülen durch die Zentrifugalbarriere für p-Stöße tunneln (a). Da die relative kinetische Energie der stoßenden Moleküle (≈ 300 nK) wesentlich kleiner ist als die Höhe der Zentrifugalbarriere ($16 \mu\text{K}$), sind Tunnelprozesse jedoch stark unterdrückt. Ein äußeres elektrisches Feld induziert ein Dipolmoment in den KRb-Molekülen (b). Ist die Dipol-Dipol-Wechselwirkung anziehend, sinkt die Zentrifugalbarriere stark ab, ist sie abstoßend, wird die Barriere überhöht. Chemische Reaktionen werden dann je nach Stoßkanal verstärkt oder unterdrückt.

Falle beobachten. In den Experimenten präparierten wir dichte molekulare fermionische KRb-Wolken bei Temperaturen von 150 bis 300 nK. Die resultierenden Moleküle bewegen sich somit extrem langsam. Während chemische Reaktionen in einem Gas identischer Fermionen nur sehr langsam ablaufen, finden sehr schnelle chemische Reaktionen in einem 1:1-Gemisch zweier Quantenzustände statt. In diesem Fall war die chemische Reaktionsrate zehn- bis hundertmal höher (Abb. 5). Zusätzlich steigt die Reaktionsrate im ersten Fall linear mit der Temperatur an, während sie im zweiten Fall temperaturunabhängig ist. Dies zeigt sich in den Experimenten durch die Präparation eines molekularen Ensembles in einem Gemisch aus zwei Hyperfeinzuständen bzw. eines einzigen Hyperfeinzustandes im Rovibrationsgrundzustand.

Die unterschiedlichen Raten der chemischen Reaktionen lassen sich allerdings durch einfache quantenmechanische Gesetzmäßigkeiten weitgehend verstehen: Bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt finden Stöße in einem definierten Drehimpulsstoßkanal statt. Sind zwei kollidierende Teilchen unterscheidbar, so können sie zentral mit verschwindendem relativen Drehimpuls kollidieren. Diese Stöße sind extrem effektiv und wahrscheinlich. Im Limit ultrakalter Temperaturen sind sie temperaturunabhängig (s-Welle). Stoßen jedoch identische Fermionen miteinander, so geschieht dies aufgrund des Pauli-Prinzips mit endlichem Drehimpuls (p-Welle). Dieser Stoßkanal ist

Abb. 7 In einem dreidimensionalen homogenen Gas identischer fermionischer KRb-Moleküle überwiegt der Einfluss der Stöße mit attraktiver Wechselwirkung. Deshalb wächst die chemische Reaktionsrate stark mit der Größe des Dipolmomentes der Moleküle.



aber mit einer endlichen zentrifugalen Energiebarriere verknüpft, durch die die Reaktionspartner tunneln müssen, um chemisch miteinander zu reagieren. Diese Tunnelprozesse sind jedoch sehr stark unterdrückt und begrenzen somit die Reaktionsrate. Gleichzeitig wird das Tunneln durch die Drehimpulsbarriere umso wahrscheinlicher, je größer die Energie der stoßenden Teilchen ist. Dies erklärt die beobachtete Temperaturabhängigkeit der Reaktionsrate.

Die chemische Reaktivität zwischen Molekülen lässt sich dank der quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten sehr stark beeinflussen. So unterdrückt ein langreichweitiges repulsives Potential, wie eine Zentrifugalbarriere, effektiv chemische Reaktionen. Erste Schritte in diese Richtung sind kürzlich ebenfalls am JILA gelungen, wiederum in unseren Experimenten mit KRb-Molekülen in ihrem Rovibrationsgrundzustand (Abb. 6) [14]. Wir beobachteten einen dramatischen Anstieg der chemischen Reaktivität unter dem Einfluss eines externen elektrischen Feldes. In dem verwendeten homogenen dreidimensionalen Gas sind sowohl Stöße mit repulsiver als auch Stöße attraktiver Wechselwirkung erlaubt. In den Experimenten überwiegt dann der Einfluss der attraktiven Wechselwirkung, was zu einer stark ansteigenden chemischen Reaktionsrate oberhalb eines bestimmten kritischen Dipolmomentes der Moleküle führt (Abb. 7).

Während in unseren Experimenten am JILA eine Verstärkung der chemischen Reaktionen beobachtet wurde, sollte es umgekehrt auch möglich sein, selektiv ein repulsives Potential mit dieser langreichweitigen Wechselwirkung zu erzeugen und somit chemische Reaktionen zu unterdrücken. Ein solches Szenario haben Peter Zoller und Mitarbeiter vorgeschlagen [15]. So könnten sich KRb-Moleküle in eine zweidimensionale Geometrie einschließen lassen. Darin wären dann nur noch repulsive Wechselwirkungen zwischen den Molekülen möglich, die je nach Stärke des induzierten Dipolmomentes chemische Reaktionen fast vollständig unterdrücken könnten. Diese würden das vollkommen neue Feld chemischer Reaktionen in restriktiven äußeren Geometrien erschließen.

Die ersten Schritte in das Gebiet der ultrakalten chemischen Reaktionen geschahen mit Alkali-Molekülen.

Allerdings sind theoretisch wie experimentell auch andere Systeme von großem Interesse. So ergibt sich mithilfe von Modellpotentialen die Vorhersage, dass auch chemische Reaktionen der Form $F + H_2 \rightarrow HF + H$ trotz einer signifikanten chemischen Reaktionsbarriere sehr effektiv bei verschwindend geringer kinetischer Energie der Reaktionspartner ablaufen sollten. In experimenteller Hinsicht arbeiten mehrere Gruppen an der direkten Kühlung und Präparation kalter OH-, NH₃- oder auch SO₂-Moleküle, mit dem Ziel chemische Reaktionen zu studieren.

In den letzten Jahren hat das Feld ultrakalter Moleküle einen rasanten Fortschritt erlebt. Lag der Schwerpunkt der Forschung bis vor kurzem noch in der Entwicklung von Techniken, um ultrakalte Molekülensembles zu präparieren, so sind diese für einige diatomische Moleküle mittlerweile so ausgereift, dass sich der Fokus bereits in Richtung der Anwendung verschiebt. So profitieren Präzisionsexperimente davon, wenn die Moleküle ultrakalt und somit extrem langsam sind. Denn dann erhöht sich die Wechselwirkungszeit in spektroskopischen Experimenten und damit deren Auflösung.²⁾ Auf der unmittelbaren Agenda stehen neben der Erzeugung quantenentarteter Molekülensembles in ihrem Rovibrationsgrundzustand viele fundamentale Fragestellungen der Vielteilchen-Quantenphysik.

Literatur

- [1] P. D. Lett et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 2200 (1993)
- [2] J. D. Miller, R. A. Cline und D. J. Heinzen, Phys. Rev. Lett. **71**, 2204 (1993)
- [3] J. M. Sage, S. Saimis, T. Bergeman und D. DeMille, Phys. Rev. Lett. **94**, 203001 (2005)
- [4] J. Deighmayr et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 133004 (2008)
- [5] S. Jochim et al., Science **302**, 2101 (2003)
- [6] M. Greiner, C. A. Regal und D. S. Jin, Nature **426**, 537 (2003).
- [7] N. V. Vitanov, T. Halfmann, B. W. Shore und K. Bergmann, Ann. Rev. Phys. Chem. **52**, 763-809 (2001)
- [8] J. G. Danzl et al., Nature Physics **6**, 265 (2010), arXiv:0909.4700
- [9] F. Lang et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 133005 (2008)
- [10] K.-K. Ni et al., Science **322**, 231 (2008); S. Ospelkaus et al., Faraday Discuss. **142**, 351 (2009); S. Ospelkaus et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 030402 (2010)
- [11] V. Bendkowsky et al., Nature **458**, 1005 (2009)
- [12] S. Knoop et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 053201 (2010)
- [13] S. Ospelkaus et al., Science **327**, 853 (2010)
- [14] K.-K. Ni et al., Nature **464**, 1324 (2010)
- [15] H. P. Büchler et al., Phys. Rev. Lett. **98**, 060404 (2007)

DIE AUTORIN

Silke Ospelkaus (FV Quantenoptik / Photonik und FV Atomphysik) hat in Bonn Physik studiert und mit einer externen Diplomarbeit in Fribourg abgeschlossen. Anschließend promovierte sie an der Universität Hamburg. 2007 erhielt sie ein Feodor-Lynen-Stipendium der Humboldt-Stiftung und ging zu Deborah Jin und Jun Ye ans JILA in Boulder. Im selben Jahr wurde sie zusammen mit ihrem Mann mit dem Dissertationspreis der Sektion AMOP ausgezeichnet. Seit September 2009 baut sie eine unabhängige Minerva-Forschungsgruppe am MPQ auf. Seit Januar 2010 ist sie in Elternzeit, hinter der nicht nur die Forschung, sondern auch Hobbies wie Rennradfahren und Musizieren zurücktreten müssen.



2) Das ist auch von Interesse für grundlegende Experimente, die Effekte jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik suchen wie eine zeitliche Veränderung der Feinstrukturkonstanten oder des Verhältnisses von Elektronen- und Protonenmasse, wie sie in modernen Vereinheitlichungstheorien nicht ausgeschlossen sind.