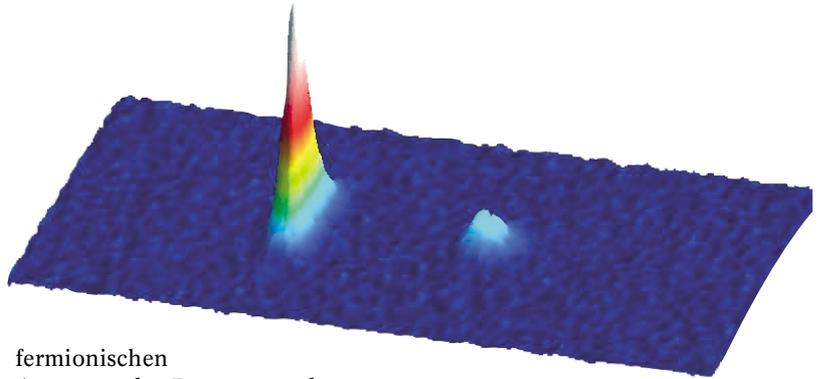


Moleküle am absoluten Nullpunkt

Ultrakalte Moleküle erobern die Welt der Quantengase

Johannes Hecker Denschlag, Hanns-Christoph Nägerl und Rudolf Grimm



Die erstmalige Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats (BEC) eines schwach wechselwirkenden Gases im Jahre 1995 begründete ein neues Forschungsfeld, das in rascher Folge faszinierende Erkenntnisse lieferte. Bis vor kurzem gelang es jedoch nur, Atome zu einem BEC zu kondensieren. Erst Ende 2003 entschied sich das Wettrennen mehrerer Arbeitsgruppen um das erste Bose-Einstein-Kondensat aus Molekülen. Aus fermionischen Atomen ließen sich nahe am absoluten Temperatur-Nullpunkt bosonische Molekül-BECs erzeugen. Dies eröffnet neue Perspektiven z. B. für die hochpräzise Molekülspektroskopie, die Interferometrie mit Materiewellen und das Verständnis der Supraleitung.

Die Physik ultrakalter atomarer Gase hat in den letzten Jahren spektakuläre Erfolge verbucht. Ein aufsehenerregender Durchbruch war im Jahr 1995 die Erzeugung von Bose-Einstein-Kondensaten (BEC) mit bosonischen Alkali-Atomen, eine Leistung, die mit dem Nobelpreis des Jahres 2001 gewürdigt wurde. Es folgte eine Reihe von eindrucksvollen Experimenten [1, 2], so zum Beispiel die erste Realisierung eines Materiewellenverstärkers, die Anregung von Materiewellen-Solitonen und Vortizes und die direkte Beobachtung eines Quantenphasenübergangs. Für Gase aus fermionischen Atomen war die erstmalige Erzeugung eines entarteten Fermi-Gases im Jahr 1999 ein wichtiger Meilenstein [3]. Der experimentelle Fortschritt auf dem Gebiet der kalten Atomgase wirft daher die Frage auf, ob es auch für Molekül-gase möglich ist, den gesamten quantenmechanischen Zustand des Gases vollständig zu kontrollieren. Quantengase aus Molekülen würden neue Möglichkeiten für die hochpräzise Molekülspektroskopie eröffnen, sie könnten das Studium von vollständig kohärenten chemischen Prozessen ermöglichen, sie wären neue Kandidaten zur Verwendung in Materiewellen-Interferometern, und sie könnten das Verständnis von Cooper-Paar-Bildung und damit der Supraleitung vertiefen. Doch wie erzeugt man ein molekulares Quantengas? Muss man dazu die Moleküle mit aufwändigen Methoden herabkühlen? Unter welchen Umständen kann ein solches Quantengas überhaupt stabil sein? Und welche ersten Experimente lassen sich daran durchführen? In diesem Artikel berichten wir über das neue Forschungsgebiet der molekularen Quantengase und auch über die ganz erstaunliche Tatsache, dass die

fermionischen Atomgase das Rennen um das erste BEC aus Molekülen entschieden haben.

Ebenso wie bei Atomen verstehen wir unter einem Quantengas aus Molekülen ganz allgemein ein Gas, bei dem die Phasenraum-dichte, d. h. die mittlere Anzahl von Teilchen pro erlaubtem Quantenzustand, in die Größenordnung von 1 oder darüber kommt – man spricht dann von Quantentartung. Bei einer solchen Phasenraum-dichte prägt die Quantenstatistik den Charakter des Gases. Für bosonische Gase beispielsweise ist der Übergang in ein BEC möglich, wohingegen Fermi-Gase sich aufgrund des Pauli-Prinzips gegen jegliche weitere Komprimierung sperren. Für ein Gas bedeutet eine so hohe Phasenraum-dichte, dass die thermische de-Broglie-Wellenlänge auf den mittleren Abstand zwischen den Teilchen anwachsen muss. Es ist also eine starke Abkühlung des Gases nötig. Bei Atomgasen geht man üblicherweise in einem Zwei-Stufen-Prozess vor: Zuerst werden die Atome mit Hilfe von Laserstrahlen gekühlt. Sie lassen sich dadurch einfangen und in der Falle weiter kühlen. Schließlich unterzieht man die Atome einer kontrollierten Verdampfungskühlung, bei der die „heißesten“ Atome aus der Falle entkommen und dadurch die Temperatur der verbleibenden Atome weiter sinkt, bis zur Quantenentartung. Bei den komplexeren Molekülen gelang es bislang jedoch nicht, die Laserkühlung umzusetzen. Für Atomgase beruht die hohe Kühleffizienz der Laserkühlung auf der einfachen Struktur der Energieniveaus und der deshalb möglichen Ausbildung eines geschlossenen Niveausystems, sodass sich viele tausend Laserphotonen an einem Atom streuen lassen. Für Moleküle hingegen gibt es aufgrund der Vibrationszustände zu viele mögliche Verlustkanäle, d. h. zu viele Möglichkeiten, die Laseranregung durch spontanen Zerfall in nicht wieder anregbare Unterniveaus zu verlieren. Die Ausbildung eines geschlossenen Systems für einen effizienten Laserkühlkreislauf ist somit nicht möglich. Für die Erzeugung von ultrakalten Molekülen müssen daher andere Wege beschritten werden.

Eine in den letzten Jahren entwickelte Methode, um Moleküle in allen drei Raumrichtungen abzukühlen, beruht auf dem Prinzip der Puffergaskühlung. Die Moleküle werden dazu mit einem sehr kalten Hintergrundgas in Kontakt gebracht, beispielsweise mit He

Der Weg zu einem Bose-Einstein-Kondensat aus Molekülen: In einem atomaren Bose-Einstein-Kondensat (Spitze links) lässt sich ein Teil der Atome kohärent in einen gebundenen Molekülzustand überführen und anschließend extrahieren (kleiner Hügel rechts).

Dr. Johannes Hecker Denschlag, Dr. Hanns-Christoph Nägerl, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck, Technikerstraße 25, A-6020 Innsbruck, und Prof. Dr. Rudolf Grimm, Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck und Institut für Quantenoptik und Quanteninformation, Österreichische Akademie der Wissenschaften, A-6020 Innsbruck

bei 300 mK aus einem Mischungskryostaten. Wenn sie paramagnetisch sind, lassen sie sich anschließend in einer magnetischen Falle speichern [4]. Durch Verdampfungskühlung, ähnlich wie bei den Atomgasen, sollte es in Zukunft möglich sein, die Phasenraumdichte weiter zu erhöhen. Eine weitere Methode beruht auf der Möglichkeit, polare Moleküle aus einem Molekularstrahl in zeitabhängigen inhomogenen elektrischen Feldern abzubremesen [5]. Dabei wird ausgenutzt, dass die Moleküle im bewegten Bezugssystem des Molekularstrahls durch adiabatische Kühlung beim Austritt aus der Düse bereits sehr kalt sind. Beispielsweise ist es gelungen, ND_3 -Moleküle in eine elektrostatische Falle bei Dichten von 10^7 Molekülen pro Kubikzentimeter und Temperaturen von 25 mK einzufangen. Ein großer Vorteil der bisher angesprochenen Methoden besteht darin, dass sich jeweils eine ganze Klasse von Molekülen kühlen und speichern lässt. Auf die spezielle atomare Zusammensetzung kommt es nicht an, solange die Moleküle paramagnetisch bzw. polar sind. Außerdem befinden sich die Moleküle im Allgemeinen in niedrig gelegenen Vibrationszuständen und sind daher auch intern sehr „kalt“, ein weiterer Vorteil, da die mögliche Freisetzung innerer Energie zu Aufheizen und Verlust

führen kann. Allerdings sind die erreichbaren Phasenraumdichten noch viel zu gering, um in den Bereich der Quantenentartung vorzudringen.

Das Problem der direkten Molekülkühlung lässt sich dadurch umgehen, dass man Moleküle aus einem Ensemble von vorgekühlten Atomen heraus assoziiert. Bei der Photoassoziation bindet man jeweils zwei Atome mithilfe von Laserlicht zu einem Molekül zusammen. Damit ist es gelungen, sehr kalte Moleküle im elektronischen Grundzustand zu erzeugen. Die geringe Temperatur der Moleküle im Mikrokkelvinbereich erlaubt es, sie effizient in einer magnetischen oder optischen Falle einzusperren. Die Photoassoziation hat sich zu einer sehr wichtigen Methode zur Spektroskopie von Molekülzuständen entwickelt, jedoch ist man auch hier noch weit weg von der direkten Erzeugung eines molekularen Quantengases.

Erzeugung von molekularen Quantengasen mittels Feshbach-Resonanzen

Es existiert jedoch eine weitere, verblüffend einfache Methode, um in ultrakalten Atomgasen, insbesondere atomaren Quantengasen, Moleküle zu erzeugen. Die Atome eines Bose-Einstein-Kondensats lassen sich

Feshbach-Resonanz und Streulänge

Feshbach-Resonanzen sind quantenmechanische Streuresonanzen, die zuerst im Rahmen der Kernphysik diskutiert wurden (siehe z.B. *H. Feshbach*, *Theoretical Nuclear Physics*, Wiley, New

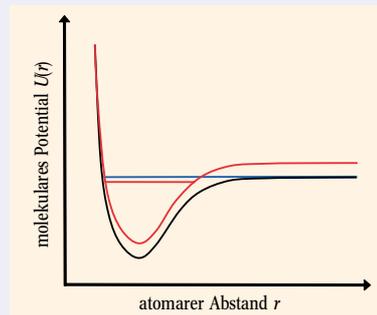


Abb. i: Molekülpotential, welches den Stoß zweier freier niedrigerenergetischer Atome beschreibt (schwarz), und ein weiteres gebundenen Zustand trägt (tiefer liegende Zustände sind nicht eingezeichnet). Asymptotisch unterscheiden sich die beiden Molekülpotentiale dadurch, dass sie unterschiedlichen Spinzuständen entsprechen. Die Energie des gebundenen Zustands unterscheidet sich nur wenig von der (nahezu verschwindenden) Stoßenergie der beiden freien Atome (Streuzustand, blau).

York (1992)). Das Grundprinzip besteht darin, dass ein Streuzustand bei einer gewissen Streuenergie an einen gebundenen Zustand koppeln kann. In der Physik ultrakalter Gase findet der Streuprozess bei einer nahezu verschwindenden Streuenergie statt. Eine Feshbach-Resonanz tritt hier als magnetisch abstimmbare Streuresonanz auf, wenn der Zustand von zwei freien, miteinander stoßenden Atomen, der sog. atomare Streuzustand, an einen molekularen, d. h. gebundenen Zustand

koppeln kann. Wenn Streuzustand und gebundener Zustand unterschiedliche magnetische Momente besitzen, lassen sich ihre Energien mithilfe eines externen Magnetfeldes zur Übereinstimmung bringen (Entartung).

Typische Streuparameter wie z.B. die s-Wellen-Streulänge und der elastische Wirkungsquerschnitt variieren erheblich in der Nähe einer Feshbach-Resonanz. Aber auch inelastische Prozesse wie z. B. die Drei-Körper-Rekombination sind in der Nähe einer Feshbach-Resonanz verstärkt. Die s-Wellen-Streulänge ist von zentraler Bedeutung bei der Beschreibung ultrakalter Stöße, da sie die Streueigenschaften vollständig festlegt. Die Streulänge ist positiv, wenn die Energie des gebundenen Zustands leicht unterhalb der Energie des Streuzustands liegt (wie in Abb. i eingezeichnet und wie in Abb. ii A links vom Kreuzungspunkt der Zustandsenergien realisiert). Sie ist negativ, wenn die Energie des Molekülzustands oberhalb des Streuzustands liegt. Bei Resonanz divergiert die Streulänge (siehe Abb. ii B) und der elastische Wirkungsquerschnitt ist resonant überhöht (siehe Abb. ii C). Die Breite der Resonanz wird durch die Kopplungsstärke und die Differenz der magnetischen Momente der Zustände gegeben. Für ein atomares BEC beispielsweise hat die Existenz einer Feshbach-Resonanz dramatische Konsequenzen. Die effektive Wechselwirkung der Atome im Kondensat, die sog. Mean-Field-Wechselwirkung, ist proportional zur Streulänge. Sie ist anziehend für negative Werte der Streulänge. Das BEC kann dann kollabieren. Für positive Werte ist diese Wechselwirkung abstoßend, was zu stabilen Kondensaten führt. Mithilfe einer Feshbach-Resonanz lässt

sich also ein abstimmbares Quantengas realisieren. Des Weiteren lassen sich an einer Feshbach-Resonanz Moleküle auf kohärente Weise erzeugen. Dazu verringert man das Magnetfeld über die Resonanz hinweg, um an der in Abb. ii gezeigten „vermiedenen Kreuzung“ von dem Atom-Zustand (schwarz) auf den Molekül-Zustand (rot) zu wechseln.

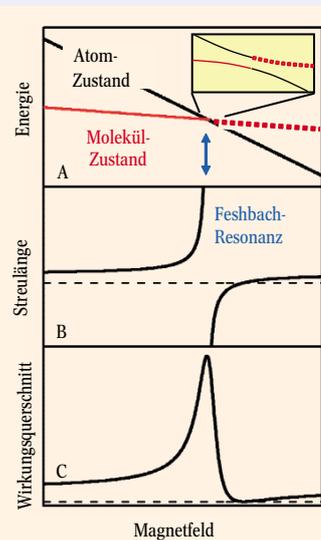


Abb. ii: Eine Feshbach-Resonanz kann durch Kopplung zwischen atomarem Streuzustand und gebundenem Molekülzustand entstehen. Abb. A zeigt die Zeeman-Energie der Zustände als Funktion eines externen Magnetfelds. Bei einem gewissen Magnetfeld (durch den Pfeil angedeutet) kreuzen sich die Zustände. Die Kopplung der Zustände führt zu einer „vermiedenen Kreuzung“, wie im Ausschnitt gezeigt. Die s-Wellen-Streulänge divergiert an dieser Stelle (Abb. B) und der elastische Wirkungsquerschnitt (Abb. C) zeigt ein stark resonantes Verhalten.

nämlich kohärent von einem atomaren Zustand in einen gebundenen Molekülzustand überführen. Da die beiden Zustände verschiedene magnetische Momente besitzen, ist es möglich, die Energien dieser Zustände zur Entartung zu bringen, indem man die Stärke eines homogenen Magnetfelds variiert. Durch die Wechselwirkung der Atome kreuzen sich die beiden Zustände nicht, sondern gehen ineinander über. Dieses Phänomen nennt man Feshbach-Resonanz (siehe Infokasten). Genauer gesagt, verbindet die Feshbach-Resonanz den atomaren Streuzustand mit genau einem sehr schwach gebundenen, d. h. sehr hoch angeregten Vibrationszustand des Moleküls. Die Ausdehnung eines solchen Moleküls kann dann viele hundert Bohr-Radien betragen. Zur Bildung von Molekülen kann man eine Feshbach-Resonanz nun auf prinzipiell zwei unterschiedliche Arten ausnützen:

► Zum einen ist die Rate für die so genannte „Drei-Körper-Rekombination“, d. h. die Bildung eines zweiatomigen Moleküls unter Zuhilfenahme eines für die Energieerhaltung notwendigen dritten Stoßpartners, in der Nähe einer Feshbach-Resonanz stark erhöht. Setzt man also das Magnetfeld in die Nähe der Resonanz, so bilden sich in einem kalten Gas bei hinreichend hoher Dichte Moleküle.

► Zum anderen lässt sich eine Feshbach-Resonanz aber auch ausnutzen, um zweiatomige Moleküle in dem hochangeregten Zustand auf kohärente Weise zu erzeugen. Dazu variiert man das Magnetfeld hinreichend langsam über die Resonanz hinweg, sodass zwei Atome an der durch die Feshbach-Resonanz bedingten „vermiedenen Niveaureizung“ adiabatisch in ein Molekül überführt werden. In diesem dynamischen Fall spricht man von einer „Feshbach-Rampe“.

Eine solche Rampe sollte eine Materiewellenkohärenz der Atome auf die Moleküle abbilden. Somit ist es im Prinzip möglich, eine vollständige Kontrolle über die gesamte Wellenfunktion des Moleküls zu erhalten, vorausgesetzt, dass man den atomaren Ausgangszustand entsprechend kontrolliert. Ein BEC an Atomen ließe sich also, so die Hoffnung, in eines aus Molekülen überführen. Ebenso könnte ein entartetes Fermi-Gas durch kohärente Bildung von (bosonischen) Molekülen ein molekulares BEC ergeben. Die theoretischen Voraussagen gehen sogar noch weiter: Ein Molekül-BEC mit fermionischen Konstituenten sollte auf der Seite einer Feshbach-Resonanz, auf der die Wechselwirkung effektiv anziehend ist, die Bildung von Cooper-Paaren und daher das Studium von verschiedenen suprafluiden Regimes ermöglichen.

Im Folgenden gehen wir zuerst auf die Erzeugung von Molekül-Quantengasen aus bosonischen Atomen mittels Feshbach-Resonanzen ein. Der Ausgangspunkt wird dementsprechend ein atomares BEC sein. Anschließend wenden wir uns dem fermionischen Fall zu. Wir werden sehen, dass ultrakalte Moleküle aus fermionischen Atomen für einige Überraschungen gut sind.

Molekulare Materiewellen aus atomaren Bose-Einstein-Kondensaten

Ein Bose-Einstein-Kondensat stellt einen makroskopischen Quantenzustand dar, in dem alle Atome als Materiewelle im perfekten Gleichklang schwingen. Werden nun Atompaare im BEC durch die Kopplung auf einer Feshbach-Resonanz zu Molekülen gebunden, so eröffnet sich die faszinierende Perspektive, kohärente molekulare Materiewellen zu erzeugen. Dies hat

eine Reihe von Experimenten stimuliert, die kürzlich am JILA in Boulder, in unserer Arbeitsgruppe an der Universität Innsbruck [7], am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching [8] und am MIT in Cambridge [9] durchgeführt wurden.

In Carl Wiemans Arbeitsgruppe in Boulder wird ein magnetisch gespeichertes ^{85}Rb -Kondensat verwendet [6]. Im Gegensatz zu dem im BEC-Experiment gängigen Isotop ^{87}Rb lässt sich hier zwar die Kondensation nur mit erheblichem Aufwand erreichen, doch existiert bei einem relativ niedrigen Magnetfeld von 155 G eine Feshbach-Resonanz, die sich gut für eine gezielte Manipulation der Molekülzustände eignet. Das Experiment basiert auf abrupten Änderungen des Magnetfeldes, die

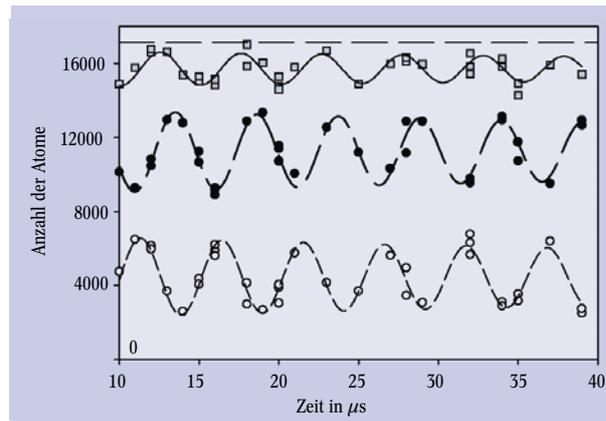


Abb. 1: An einem ^{85}Rb -Kondensat mit anfangs 17000 Atomen zeigt sich nach zwei kurzen Magnetfeldsprüngen an die Feshbach-Resonanz ein oszillatorisches Verhalten als Funktion der dazwischen liegenden Haltezeit. Sowohl die im BEC verbleibende Anzahl von Atomen (\bullet) als auch eine neu entstehende Komponente von aufgeheizten Atomen (\circ) oszillieren mit einer Frequenz, die exakt der molekularen Bindungsenergie entspricht. Die Summe der beobachteten Atome (\square) weist auf eine fehlende Komponente hin, die als molekulare Population gedeutet werden kann. (aus [6])

plötzliche Änderungen der Molekülzustände bewirken. So kann nach Präparation des Kondensats bei 166 G ein gezielter Magnetfeldsprung in die unmittelbare Nähe der Resonanz Atompaare in den angekoppelten Molekülzustand projizieren. Der Gruppe in Boulder gelang es so, eine molekulare Komponente im BEC zu erzeugen, die sich zunächst in Verlusten aus dem atomaren Anteil äußerte. Durch wiederholte Magnetfeldsprünge an die Resonanz gelang dann ein Nachweis der Phasenkohärenz des molekularen Anteils relativ zum Atomkondensat. Dabei wurden interferierende molekulare Beiträge mit einer relativen Materiewellenphase erzeugt, die von dem zeitlichen Abstand der Magnetfeldsprünge abhing. Bei den Messungen zeigte sich eine entsprechende Oszillation in der Zahl der insgesamt verbleibenden Atome (Abb. 1). Die beobachtete Frequenz entsprach dabei gerade der Bindungsenergie des Moleküls. Dieses erste Experiment lieferte auch deutliche Hinweise auf die komplexe Vielteilchendynamik des gesamten Prozesses. Mit der Erzeugung der Moleküle ändern sich auch die Wechselwirkungen im atomaren Kondensat und es entstehen kollektive Anregungen. Diese können Atome aus dem Kondensat herausschleudern, wodurch eine heißere, thermische Komponente entsteht. Zwar gelang es in diesem Experiment nicht, Moleküle direkt zu beobachten, doch hinterließen die Moleküle in den beobachteten Oszillationen ihren eindeutigen Fingerabdruck.

Lassen sich die entstehenden Moleküle auch direkt beobachten und kann so z. B. die zeitliche Dynamik der ultrakalten Molekülwolke untersucht werden? Ein eindeutiges Ja auf diese Frage lieferten kürzlich zwei Experimente, die nahezu zeitgleich in unserer Arbeitsgruppe in Innsbruck und am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching durchgeführt wurden. Beide Experimente verfolgen die gleiche Grundidee: Nach Anwendung einer Feshbach-Rampe werden die Moleküle von dem atomaren BEC durch einen Magnetfeldgradienten räumlich getrennt. Nach einer freien Entwicklungszeit wird eine umgekehrte Feshbach-Rampe dazu verwendet, die schwach gebundenen Moleküle wieder aufzubrechen und anschließend die wieder entstandenen Atome über ihre starke Absorption von Laserlicht nachzuweisen. Finden diese Aufnahmen hinreichend schnell nach dem Aufbrechen statt, spiegeln sie direkt die Molekülwolke wieder und liefern so wichtige Informationen über Ort und Größe des Ensembles.

In unserem Innsbrucker Experiment wird hierfür ein BEC aus Cäsium-Atomen verwendet [7]. Die Wechselwirkung zwischen Cäsium-Atomen hat außergewöhnliche Eigenschaften und bietet eine Reihe von verschiedenartigen Feshbach-Resonanzen bei sehr niedrigen Magnetfeldern von wenigen 10 G. Diese be-

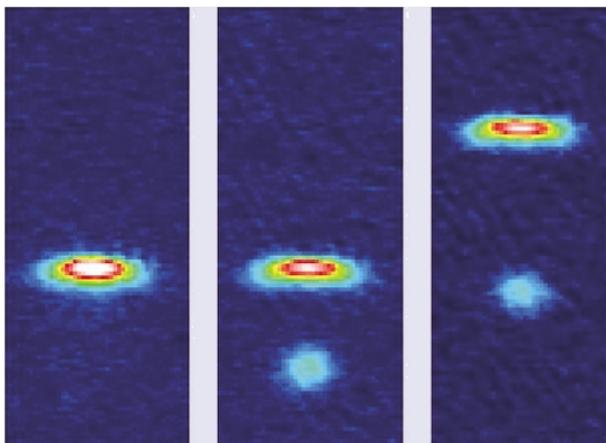


Abb. 2: An einem magnetischen levitiertem Cäsium-BEC mit 50000 Atomen (links) lässt sich eine ultrakalte Cs₂-Molekülwolke extrahieren. Die etwa 3000 Moleküle werden wegen ihres geringeren magnetischen Moments nicht vollständig levitiert und fallen daher aus dem BEC heraus (Mitte, 12 ms nach ihrer Erzeugung, 150 μm unterhalb des Kondensats). Wird der vertikale Magnetfeldgradient gleichzeitig mit der Erzeugung der Moleküle erhöht, können die Moleküle levitiert werden (rechts). Die nach oben „fallenden“ Atome verschwinden dann schnell aus der Beobachtungsregion.

sonderen Eigenschaften sind mit dafür verantwortlich, dass sich Cäsium über lange Zeit störrisch gegen alle Kondensationsversuche gewehrt hatte und ein BEC erst durch ein neuartiges optisches Verfahren erzeugt werden konnte. Eine Besonderheit dieser Methode ist ein magnetisches Levitationsfeld, das die Atome quasi in Schwerelosigkeit hält, indem die Gravitation durch ein inhomogenes Magnetfeld exakt kompensiert wird. Für die Molekülerzeugung benutzen wir eine Magnetfeldrampe über eine sehr schmale, nur wenige mG breite Resonanz bei 20 G. Diese Resonanz liegt nur wenige Gauß unterhalb des Feldes, bei dem das Kondensat erzeugt wird. Die entstehenden Moleküle haben ein um ca. 40 % geringeres magnetisches Moment als ein ungebundenes Atompaar und werden somit nicht levitiert. Sie fallen deshalb sofort nach ihrer Erzeugung mit dem

0,4-fachen der Erdbeschleunigung aus dem BEC heraus und lassen sich mit der oben beschriebenen Methode ortsaufgelöst detektieren (Abb. 2).

Wenn man den Magnetfeldgradienten unmittelbar nach der Feshbach-Rampe hochschaltet, lassen sich die Moleküle levitieren und so über lange Zeiten hinweg beobachten. Insbesondere konnten wir so die Expansion einer Wolke von 3000 Molekülen beobachten, um deren extrem niedrige Temperatur zu bestimmen. Unsere Messungen liefern eine konservative Obergrenze von 9 nK und sind sogar mit der Temperatur Null verträglich. Der Vergleich mit den niedrigsten bisher für ultrakalte Moleküle gemessenen Temperaturen im μK-Bereich belegt den dramatischen Fortschritt auf dem Gebiet. Bereits unterhalb von 6 nK sollte das Molekülensemble quantenentartet sein und so Eigenschaften eines molekularen BECs aufweisen. Wegen der kohärenten Natur von sowohl der atomaren Quelle als auch den Konversionsprozess ist dies auch plausibel, doch mussten wir den Beweis hierfür zunächst noch schuldig bleiben.

Das Experiment in Gerhard Rempes Arbeitsgruppe in Garching geht von einem ⁸⁷Rb-BEC aus, welches zunächst in einer magnetischen Falle erzeugt, in eine optische Falle umgeladen und dann in einen geeigneten

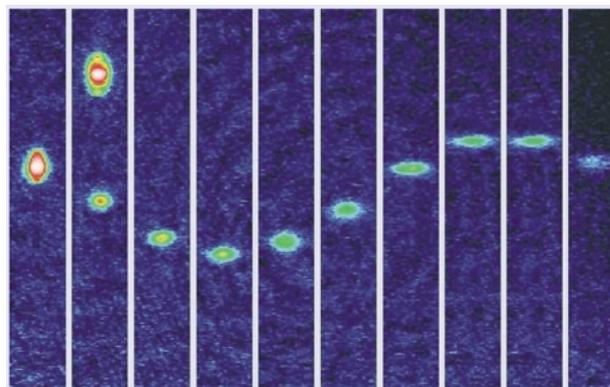


Abb. 3: Nach der Extraktion von ultrakalten Molekülen aus einem ⁸⁷Rb-Kondensat führt die Molekülwolke im magnetischen Gradientenfeld eine eindimensionale räumliche Oszillation aus. Die Absorptionbilder entstanden im Abstand von 2 ms und zeigen einen Raumbereich von 1,7 mm × 0,24 mm. (Quelle: S. Dürr und G. Rempé)

Spinzustand transferiert wird [8]. Feshbach-Resonanzen liegen hier oberhalb von 1 kG, sodass eine große experimentelle Herausforderung in der sehr präzisen Kontrolle von hohen Magnetfeldern besteht. Zur Molekülerzeugung wird eine Magnetfeldrampe verwendet, die kurz nach dem Ausschalten der optischen Falle eine Resonanz bei 1007,4 G überstreicht. Durch einen zusätzlichen Magnetfeldgradienten wird dann wie im vorher beschriebenen Experiment eine räumliche Separation des molekularen Ensembles von dem verbleibenden atomaren BEC erreicht (Abb. 3).

Ein verblüffendes Verhalten zeigte sich in der weiteren räumlichen Bewegung der ultrakalten Molekülwolke im magnetischen Gradientenfeld. Das Garchinger Team beobachtete eine räumliche Oszillation der gesamten Wolke um einen Ort, an dem ein Magnetfeld von 1001,7 G herrschte. Die Moleküle können hier offenbar in einem lokalen Potentialminimum eindimensional gefangen werden. Die Erklärung für dieses erstaunliche Verhalten liefert ein weiteres Molekülniveau, welches genau bei diesem Feld zu einer sog. ver-

miedenen Niveaureuzung führt. Für die Translationsbewegung der Moleküle entsteht dadurch ein lokales Potentialminimum als räumliches Oszillationszentrum. Diese überraschende Beobachtung liefert ein Beispiel für die vielfältigen Eigenschaften, die ultrakalte Moleküle wegen ihrer komplexen inneren Struktur aufweisen.

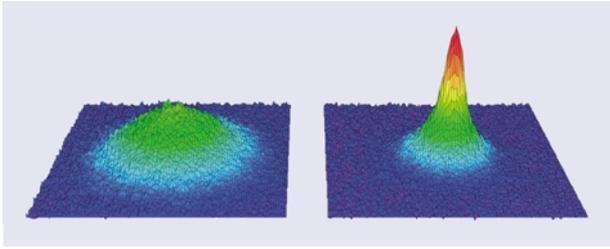


Abb. 4: Dichteverteilungen von $^{40}\text{K}_2$ -Molekülwolken nach 20 ms freier Expansion für ein thermisches Gas (links) und für ein teilweise Bose-Einstein-kondensiertes Gas (rechts) mit einem Kondensatanteil von 12 %. Die bimodale Verteilung (feine Spitze auf breitem thermischen Untergrund) des rechten Bildes ist ein charakteristisches Zeichen für Bose-Einstein-Kondensation. (Quelle: M. Greiner)

Die schwach gebundenen Moleküle, die über eine Feshbach-Resonanz in einem sehr hoch angeregten Vibrationszustand erzeugt werden, haben sehr viel innere Energie. Wenn diese in Atom-Molekül- und Molekül-Molekül-Stößen durch Vibrationsabregung freigesetzt wird, werden die Teilchen sofort aus der Falle hinausgeschleudert. Tatsächlich treten für die aus einem atomaren BEC erzeugten Moleküle entsprechende Verluste auf der Zeitskala von wenigen Millisekunden auf. Ein solches Molekülgas kann daher kaum durch elastische Stöße thermalisieren oder gar einer weiteren Verdampfungskühlung unterzogen werden. Wolfgang Ketterles Arbeitsgruppe am MIT gelang es kürzlich, mit Molekülen, die ausgehend von einem Natrium-BEC über eine Feshbach-Rampe erzeugt wurden, dennoch eine Phasenraumdichte von 20 zu erreichen [9]. Das Molekülgas hatte dabei zwar nicht genügend Zeit, das thermische Gleichgewicht zu erreichen, war aber klar im Bereich der Quantenentartung.

Alles deutet darauf hin, dass sich auf der Basis atomarer BECs Materiewellen aus Molekülen mit makroskopischer Kohärenz erzeugen lassen. Der komplexe Umwandlungsprozess, der zu einer kohärenten Molekülwolke führt, ist zwar längst noch nicht vollständig verstanden, doch eröffnet die Verfügbarkeit einer Quelle von molekularer Quantenmaterie viele faszinierende Perspektiven von fundamentalen Untersuchungen an quantenentarteten Gasen mit vielen inneren Freiheitsgraden bis hin zu Anwendungen für künftige Präzisionsmessungen.

Mit gepaarten Fermionen zum Bose-Einstein-Kondensat

Fügen wir zwei fermionische Atome zu einem Molekül zusammen, so hat dieses ganzzahligen Spin und ist damit ein Boson! Mit der Quantenstatistik ändert sich grundlegend der Charakter des Systems. Aus einem Gas ultrakalter Fermionen, die sich aufgrund des Pauli-Verbots nicht zu nahe kommen können, wird ein molekulares Bose-Gas, welches in ein BEC kondensieren kann.

Überraschenderweise sorgt das fermionische Innenleben solcher Moleküle für eine außergewöhnliche

Stabilität gegenüber den inelastischen Stößen, die Molekülwolken aus atomaren BECs so schnell zerfallen lassen. Für sehr schwach gebundene „Fermionen-Moleküle“ kann die Lebensdauer eines dichten Molekülensembles wesentlich größer sein als im Fall bosonischer Konstituenten und statt weniger Millisekunden viele Sekunden betragen. Woran liegt das? Da die Moleküle sehr schwach gebunden sind, ist der mittlere Abstand der Atome in einem Molekül recht groß (bis zu $0,1 \mu\text{m}$). Um dieses Molekül in einem inelastischen Stoß in einen stärker gebundenen und damit auch stärker lokalisierten Zustand zu überführen, müssten sich, anschaulich gesprochen, die fermionischen Atome der kollidierenden Moleküle sehr nahe kommen. Diese Annäherung ist aber aufgrund des Pauli-Verbots stark unterdrückt, was zu niedrigen inelastischen Stoßraten führt.

Die Entdeckung dieser außergewöhnlich langen Lebensdauern, die genügend Zeit für eine effiziente Verdampfungskühlung bis hin zur Bose-Einstein-Kondensation erlauben, hat im Sommer 2003 ein packendes Wettrennen um das erste Molekül-BEC ausgelöst. Dieses wurde bereits im November 2003 entschieden. Deborah Jins Gruppe in Boulder und unserer Arbeitsgruppe in Innsbruck gelang es zeitgleich, Fermionen-Moleküle zu kondensieren [10, 11]. Mit wenigen Wochen Abstand folgte auch Wolfgang Ketterles Arbeitsgruppe am MIT [12].

Einen ersten Durchbruch in den Experimenten mit Fermi-Gasen aus Atomen markiert das Jahr 1999, als Brian de Marco und Deborah Jin in Boulder erstmals Kalium-40 Fermionen bis zur Entartung kühlten [3]. In einem entarteten Fermi-Gas sind bei der Temperatur $T = 0$ die niedrigsten quantenmechanischen Zustände der Atomfalle bis zur Fermi-Energie E_F gefüllt. Mittlerweile haben weltweit sieben experimentelle Forschungsgruppen über die Erzeugung von entarteten Fermi-Gasen berichtet: vier in den USA und drei in Europa. Im Vergleich zu den über 50 weltweit existierenden BEC-Experimenten ist dies eine noch sehr überschaubare Anzahl!

Um ein Fermi-Gas auf niedrigste Temperaturen mit Verdampfungskühlung herunterzukühlen, verwendet man Gemische aus nichtidentischen Atomen, z. B. Atome in verschiedenen Spinzuständen. Stöße zwischen den nichtidentischen Teilchen führen zur Thermalisierung des Ensembles, eine Grundvoraussetzung des Verdampfungskühlens. Ein ein-komponentiges Gas hingegen wäre nicht verwendbar, da die identischen Fermionen bei extrem niedrigen Temperaturen aufgrund des Pauli-Prinzips nicht miteinander wechselwirken. Für solche Experimente bieten weit verstimte optische Dipolfallen ideale Voraussetzungen, denn sie halten Atome verschiedener Spins gleichermaßen gefangen. Zusätzlich kann der optischen Falle ein beliebiges Magnetfeld überlagert werden, um über eine Feshbach-Resonanz die Wechselwirkung abzustimmen. Wenn sich das thermische Gleichgewicht durch elastische Stöße schnell genug einstellt, kann das Gas einfach und effizient durch Verdampfung abgekühlt werden, indem man die Tiefe der optischen Dipolfalle kontrolliert verringert.

Im Laufe des Jahres 2003 gelang es einigen Grup-

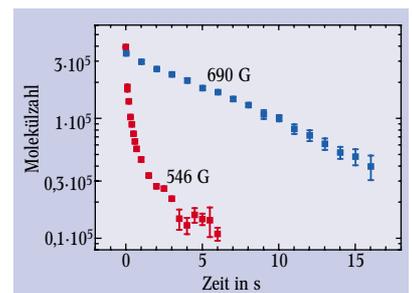


Abb. 5: Die Stabilität von $^6\text{Li}_2$ -Molekülgasen hängt stark vom Magnetfeld ab. Während das Gas bei 546 G schnell nicht-exponentiell zerfällt, zeigt es bei 690 G einen sehr langsamen exponentiellen Zerfall mit einer Lebensdauer von etwa 10 s – ausreichend für eine effiziente Verdampfungskühlung.

pen, dimere Moleküle aus kalten fermionischen Atomen (^{40}K und ^6Li) herzustellen [13–16], wobei sich die Moleküle jeweils aus zwei Atomen mit unterschiedlichen Spins zusammensetzen. Jins Gruppe erzeugte, ausgehend von einem entarteten Quantengas von ^{40}K , einige hunderttausend Dimere, indem sie ähnlich wie in den beschriebenen Experimenten mit Bosonen mit einer adiabatischen Magnetfeldrampe über eine Feshbach-Resonanz hinwegstrich. Mit Hilfe von Radiofrequenz-Spektroskopie wurden die Moleküle eindeutig nachgewiesen und weiter untersucht. Mittlerweile schafft es die Gruppe, fast 90 % der fermionischen Atome reversibel in Moleküle zu überführen. Dabei wurden Lebensdauern von bis zu 100 ms beobachtet. Diese Zeit reicht aus, um ein $^{40}\text{K}_2$ -Molekülkondensat durch adiabatisches Überqueren einer Feshbach-Resonanz herzustellen [13]. Ausgehend von einem entarteten Fermi-See von Kalium-Atomen gelang es so, kondensierte Molekülgaswolken mit einigen hunderttausend Teil-

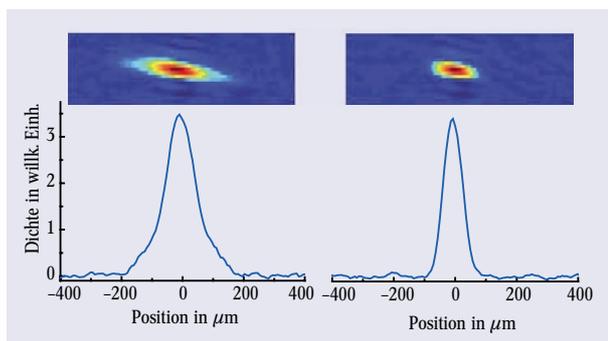


Abb. 6: Absorptionaufnahmen (oben) und zugehörige Dichteprofile (unten) von Bose-Einstein-Kondensaten aus $^6\text{Li}_2$ -Molekülen. Die teilweise kondensierte Molekülwolke (links) zeigt eine charakteristische bimodale Dichteverteilung mit einem Kondensatanteil von ca. 30 %. Bei der rechten Molekülwolke ist kein thermischer Untergrund mehr erkennbar und ein reines Kondensat ist realisiert. Für die Absorptionaufnahmen werden die Li_2 -Moleküle mithilfe von resonantem Laserlicht zunächst aufgebrochen und im Anschluss die Atomwolken abgebildet. Die Abbildungen entstanden in situ, d.h. ohne vorherige freie Expansion der Molekülwolken.

chen zu erzeugen, sobald die Temperatur T des Fermi-Sees kleiner als $0,17 T_F$ war. ($T_F = E_F/k_B$ ist die Fermi-Temperatur und k_B die Boltzmann-Konstante). Jins Gruppe nahm Bilder der Molekülwolke auf, indem sie die Moleküle mit einem Radiofrequenzpuls aufbrach, um sofort anschließend die Atomverteilung wie üblich über die Absorption abzubilden. Abb. 4 zeigt zwei Molekülwolken nach 20 ms freier Expansion. Bei $T = 0,19 T_F$ liegt noch ein thermisches Gas mit gaußförmiger Dichteverteilung vor, während bei einer Temperatur von $T = 0,06 T_F$ eine bimodale Verteilung erscheint, ein klares Zeichen für Bose-Einstein-Kondensation.

Als besonderer Glücksgriff erweisen sich $^6\text{Li}_2$ -Moleküle, denn ihre Lebensdauer ist noch deutlich größer als die von $^{40}\text{K}_2$. Für das $^6\text{Li}_2$ -Dimer in der Nähe einer Feshbach-Resonanz haben die Arbeitsgruppe von C. Salomon an der ENS Paris [14] und unser Innsbrucker Team [15] Lebensdauern im Bereich von vielen Sekunden beobachtet, wie unsere Messungen in Abb. 5 demonstrieren. Die außergewöhnlichen Lebensdauern erlauben es, Lithium-Moleküle einfach durch Drei-Körper-Stöße ohne adiabatisches Überqueren der Feshbach-Resonanz zu erzeugen. Setzen wir z. B. unser kaltes Atomgas (ca. 10^6 Atome, Temperatur ca. $2 \mu\text{K}$) auf die positive Seite der

Feshbach-Resonanz, wo die Atome eine schwache Molekülbindung eingehen können, so bilden sich bei einem Magnetfeld von 690 G innerhalb weniger Sekunden etwa 300000 Moleküle. Bei der *Drei-Körper-Rekombination* wird die Bindungsenergie des Moleküls als kinetische Energie freigesetzt. Diese Energie darf nicht zu hoch sein, wenn sie mittels Evaporation weggekühlt werden soll. Dementsprechend fanden wir optimale Molekülproduktionsbedingungen, wenn die Bindungsenergie in etwa der Falltiefe entspricht.

Der letzte Schritt zur Bose-Einstein-Kondensation war dann erstaunlich einfach. Nach der Produktion der $^6\text{Li}_2$ -Moleküle setzten wir die Verdampfungskühlung fort, bis die Moleküle kondensierten. Dabei war auch eine Optimierung des Magnetfeldes notwendig, dessen Stärke sich experimentell zu 764 G ergab. Der Evaporationsprozess erwies sich als äußerst effizient, sodass sich 20 % der anfänglich 1,5 Millionen Atome in der kondensierten Molekülwolke wieder fanden.

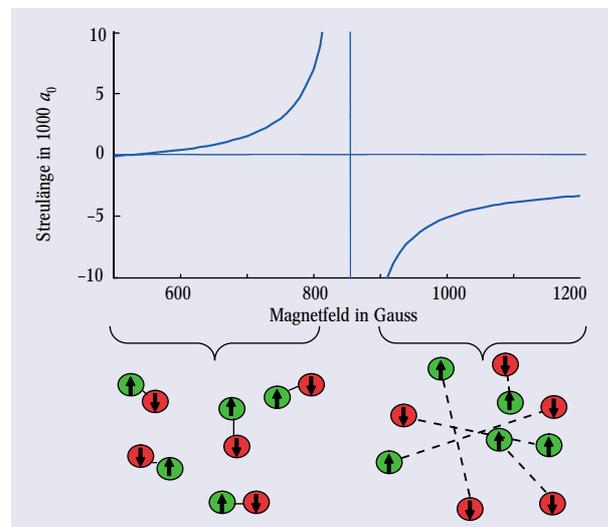


Abb. 7: Links der breiten Feshbach-Resonanz für ^6Li bei einem Magnetfeld von 850 Gauß ist die Streulänge positiv und ein schwach gebundener, bosonischer Molekülzustand existiert, der in ein BEC kondensieren kann. Auf der rechten Flanke der Resonanz ist die Streulänge negativ, was mit einer effektiv anziehenden Wechselwirkung zwischen den Atomen einhergeht. Falls die Temperatur des Fermi-Gases niedrig genug ist, sollten sich dort „Cooper-Paare“ bilden (BCS-Regime). Diese Bindung zwischen den Atomen (hier gestrichelt angedeutet) ist sehr locker und kann weit über typische Atomabstände im Fermi-Gas hinausreichen, ganz im Gegensatz zu den gut lokalisierten Molekülen bei positiver Streulänge.

Diese überraschend gute Effizienz ist auf die hohen elastischen Stoßraten zwischen den Molekülen von einigen kHz in Kombination mit äußerst geringen inelastischen Verlusten zurückzuführen. Am Ende der Verdampfungskühlung lag ein solch dichtes und kaltes Gas von 150000 $^6\text{Li}_2$ -Molekülen im thermischen Gleichgewicht vor, wie es nur im Kondensat existieren kann. Unsere Experimente zur kollektiven Anregung des Kondensats sowie eine erste Messung zur „mean-field“ Selbstwechselwirkung bestätigten die theoretischen Erwartungen. Mittlerweile beobachten wir auch das charakteristische bimodale Profil einer teilweise kondensierten Molekülwolke im Bereich des Phasenübergangs (Abb. 6) und erzeugen reine Kondensate ohne erkennbaren thermischen Anteil mit bis zu 200000 Molekülen.

Wolfgang Ketterles Gruppe am MIT kühlte ein

Fermi-Gas aus $3,5 \cdot 10^7$ Lithium-Atomen zunächst mit einem Puffergas kalter Natrium-Atome in einer Magnetfalle vor, bevor es in eine optische Dipolfalle transferiert wurde. Anschließend gelang es dem Team, mit der gleichen Evaporationsmethode wie im Innsbrucker Experiment sehr große Kondensate von bis zu 900000 ${}^6\text{Li}_2$ -Molekülen zu erzeugen [12]. Dabei wurde auch der Phasenübergang vom thermischen Molekülgas zum Kondensat untersucht.

Ausblick

Aller Voraussicht nach stehen wir mit der Kondensation der Moleküle am Anfang einer Reihe spannender neuer Experimente mit ultrakalten „zusammengesetzten Bosonen“. Erstmals bietet sich hier die Möglichkeit, die Kopplungsstärke der fermionischen Konstituenten beliebig zu variieren und so verschiedene Regimes der Paarbildung zu untersuchen. So wurde für den Bereich negativer Streulänge oberhalb der Feshbach-Resonanz (Abb. 7) eine Cooper-Paarbildung vorhergesagt, deren Nachweis eine nächste große Herausforderung darstellt [17]. Die atomaren Cooper-Paare bewirken dann eine Suprafluidität, ähnlich wie wir es von ${}^3\text{He}$ und der Supraleitung kennen. Nach der gängigen Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) Theorie der Supraleitung verbinden sich jeweils zwei Elektronen im elektrischen Leiter zu einem Cooper-Paar, um dann verlustfrei strömen zu können. Analog dazu finden sich im atomaren Fermi-Gas zwei Atome an der Fermi-Kante zusammen, die entgegengesetzten Impuls haben und so ein Paar mit Gesamtimpuls Null bilden. Im Unterschied zur Supraleitung, bei der die Anziehung der Elektronen über den Austausch von Phononen vermittelt wird, wechselwirken die Atome direkt miteinander. Diese Bindung zwischen den Atomen ist sehr locker und kann weit über typische Atomabstände im Fermi-Gas hinausreichen, ganz im Gegensatz zu den gut lokalisierten Molekülen bei positiver Streulänge.

Eine faszinierende Perspektive besteht in der einzigartigen experimentellen Möglichkeit, kontinuierlich den Übergang von der suprafluiden BEC-Phase zur suprafluiden BCS-Phase zu verfolgen. Dieser Übergang kann stetig und reversibel durchgeführt werden, wobei die verschiedenen Regimes starker und schwacher Kopplung nahtlos durchquert werden können. Direkt auf der Feshbach-Resonanz ist zwischen den beiden Grenzfällen eines Molekül-gases und eines atomaren Fermi-Gases ein stark wechselwirkendes Vielteilchensystem realisiert. Dieses stellt ein Modellsystem mit universellem Charakter dar, welches z. B. interessante Analogien zu Neutronensternen aufweist. Darüber hinaus haben stark gekoppelte Fermionen einen engen Bezug zur Hochtemperatur-Supraleitung, deren Mechanismen viele offene Fragen aufwerfen. In unseren ersten Experimenten zu Regimes resonanter Kopplung [18] konnten wir das Molekül-BEC kontinuierlich und reversibel in ein extrem kaltes atomares Fermi-Gas umwandeln und die Wechselwirkungsstärke im Übergangsbereich charakterisieren.

Just bei Redaktionsschluss erschien ein aufsehenerregender Artikel [19] von Jins Gruppe, der von der Kondensation fermionischer, stark wechselwirkender Atompaare in direkter Nähe der Feshbach-Resonanz berichtet. Bei diesen Atompaaren tritt eine starke Überhöhung der Impulsverteilung bei verschwindendem Impuls auf, wenn die Gastemperaturen im Bereich von $1/10$ der Fermi-Temperatur liegt.

Dank

Den Mitgliedern unseres Teams, die in vielfältiger Weise zu den Innsbrucker Arbeiten beigetragen haben, möchten wir herzlich danken. Für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des SFB „Control and Measurement of Coherent Quantum Systems“ danken wir dem Österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF). Unser weiterer Dank gilt dem Europäischen Netzwerk „Cold Molecules“.

Literatur

- [1] A. Görlitz und T. Pfau, Phys. Blätter, Mai 2000, S. 55
- [2] K. Sengstock, W. Ertmer und M. Lewenstein, Phys. Blätter, März 2001, S. 33
- [3] B. de Marco und D. S. Jin, Science **285**, 1703 (1999)
- [4] J. D. Weinstein et al., Nature **395**, 148 (1998).
- [5] G. Meijer, Physik Journal, Mai 2002, S. 41
- [6] E. A. Donley, N. R. Claussen, S. T. Thompson und C. Wieman, Nature **412**, 529 (2002)
- [7] J. Herbig et al., Science **301**, 1510 (2003)
- [8] S. Dürr, T. Volz, A. Marte und G. Rempe, Phys. Rev. Lett. **92**, 020406 (2004)
- [9] K. Xu et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 210402 (2003)
- [10] S. Jochim et al., Science **302**, 2101 (2003). (2003)
- [11] M. Greiner, C. Regal und D. Jin, Nature **426**, 538
- [12] M. W. Zwierlein et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 250401 (2003)
- [13] C. A. Regal, C. Ticknor, J. L. Bohn und D. S. Jin, Nature **424**, 47 (2003)
- [14] J. Cubizolles et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 240401 (2003)
- [15] S. Jochim et al., Phys. Rev. Lett. **91**, 240402 (2003).
- [16] K. Strecker, G. Partridge und R. Hulet, Phys. Rev. Lett. **91**, 080406 (2003)
- [17] A. Cho, Science **301**, 750 (2003)
- [18] M. Bartenstein et al., Phys. Rev. Lett., im Druck; <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0401109>
- [19] C. A. Regal, M. Greiner und D. S. Jin, Phys. Rev. Lett. **92**, 040403 (2004)

Die Autoren



Hanns-Christoph Nägerl (links) studierte in Göttingen und Innsbruck und arbeitete danach als Postdoc am Caltech in Pasadena. Seit Herbst 2000 ist er Universitätsassistent in Innsbruck. In seiner Freizeit im Winter sucht er stets, die kürzeste und schnellste Strecke von Berg zu Tal mit dem Snowboard zu finden. **Johannes Hecker Denschlag** (rechts) studierte Physik in Mainz, Marseille und Innsbruck. Mit einem Feodor Lynen-Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung ging er 1998 als Postdoc an das National Institute for Standards and Technology, Gaithersburg, USA. Seit Herbst 2000 ist er Universitätsassistent am Institut für Experimentalphysik in Innsbruck. In seiner Freizeit genießt er die Berge, besonders auf einer Berghütte bei einer guten Portion Tiroler Gröstl. **Rudolf Grimm** (Mitte) promovierte 1989 an der ETH Zürich. Nach einem Postdoc-Aufenthalt am Institut für Spektroskopie in Troitsk bei Moskau war er von 1990 bis 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Kernphysik tätig. Seit 2000 ist er Professor für Experimentalphysik an der Universität Innsbruck. Freizeit hat er seitdem keine mehr.