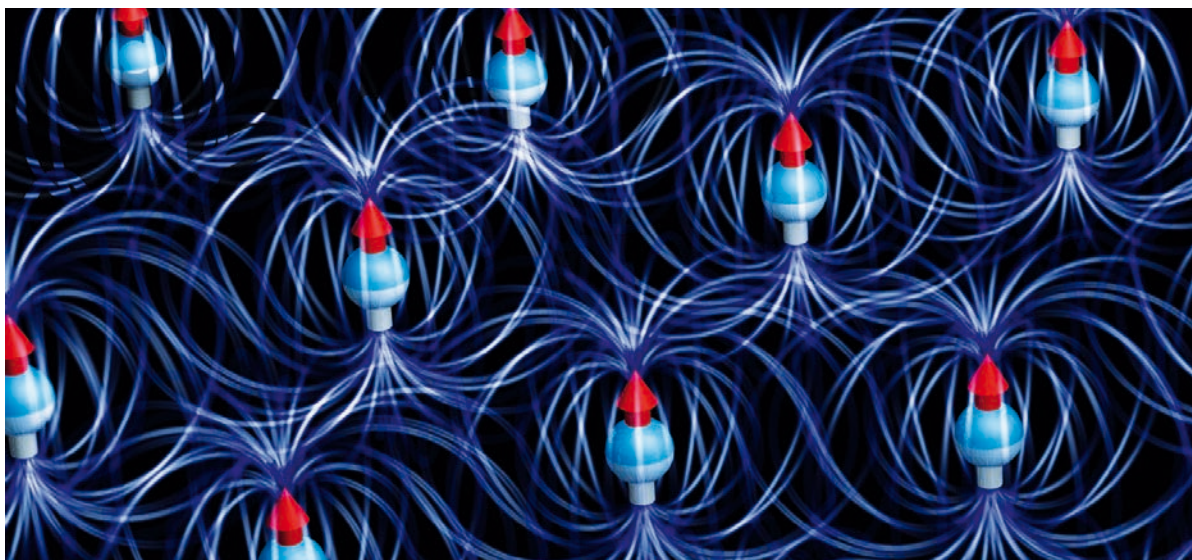


# Ultrakalt magnetisiert

Dipolare langreichweitige Wechselwirkungen lassen sich mit ultrakalten Quantengasen gezielt untersuchen und zur Quantensimulation nutzen.

Tim Langen und Manfred J. Mark



In dipolaren ultrakalten Quantengasen besitzen die Atome oder Moleküle ein sehr großes magnetisches oder elektrisches

Dipolmoment (Pfeile). Sobald die langreichweitige dipolare Wechselwirkung (Linien) dominiert, lassen sich mit

den Systemen neue exotische Vielteilchenphänomene untersuchen.

Seit zwei Jahrzehnten spielen ultrakalte Gase aus neutralen Atomen eine wichtige Rolle als Werkzeug in vielen Teilgebieten der Physik. Insbesondere können sie als Quantensimulator dienen, um komplexe Modelle aus der Festkörperphysik nachzubilden. Gase mit langreichweitigen Wechselwirkungen bieten dabei neue Einblicke und überraschende Erkenntnisse.

Ultrakalte Gase aus neutralen Atomen sind außerordentliche Quantensysteme – mittlerweile ist es in Experimenten möglich, einzelne Atome zu untersuchen und zu manipulieren [1]. Das eröffnet vielfältige Anwendungen in Vielteilchenphysik und nichtlinearer Physik, für Präzisionsmessungen und Materiewellen-Interferometrie [2]. Insbesondere als Quantensimulator haben ultrakalte Gase in den letzten Jahren von sich reden gemacht. Dabei bilden die präzise kontrollierbaren Quantengase ein sehr komplexes physikalisches System nach und simulieren dessen Verhalten in einem Experiment. Das gelang beispielsweise vor kurzem erstmals für das Heisenberg-Modell, das den Magnetismus in bestimmten Festkörpern beschreibt. Für große Teilchenzahlen können selbst die besten klassischen Supercomputer das Heisenberg-Modell nur näherungsweise berechnen – und das wird auf absehbare Zeit so bleiben.

Bei der Simulation ist die außerordentliche Kontrolle entscheidend, die über die Wechselwirkung zwischen den Atomen ausgeübt werden kann. Meist lässt sich die a priori komplizierte Wechselwirkung durch eine einfache Kontaktwechselwirkung beschreiben [3]. Diese ist kurzreichweitig und isotrop, sodass sich die Atome näherungsweise wie elastisch stoßende Billardkugeln verhalten (Infokasten). Die Kontaktwechselwirkung sorgt für viele faszinierende Phänomene und liegt beispielsweise der Suprafluidität von Bose-Einstein-Kondensaten und der Bildung von Cooper-Paaren in Gasen fermionischer Atome zugrunde. Allerdings

## KOMPAKT

- Magnetische Atome und elektrisch dipolare, heteronukleare Moleküle bieten die Möglichkeit, dipolare Wechselwirkungen bei ultrakalten Temperaturen gezielt zu untersuchen und zu kontrollieren.
- Bei Quantengasen, in denen solche Wechselwirkungen dominieren, treten im Vergleich zu üblichen Bose-Einstein-Kondensaten und Fermi-Gasen exotische neue Phänomene auf.
- Die Eigenschaften der Gase versprechen vielfältige Einblicke in Vielteilchensysteme mit langreichweitiger Wechselwirkung, um beispielsweise die Grundlagen des Magnetismus besser zu verstehen.

Dr. Tim Langen, Universität Stuttgart, 5. Physikalisches Institut und IQST, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart und Dr. Manfred J. Mark, Universität Innsbruck, Institut für Experimentalphysik, Technikerstr. 25/2, 6020 Innsbruck, Österreich

beruhen viele interessante Phänomene schon in der klassischen Physik auf langreichweitigen oder anisotropen Wechselwirkungen. Beispiele sind Ferroflüssigkeiten aus magnetischen Nanopartikeln, das Verhalten von Flüssigkristallen oder die Gravitation. Auch in der Quantenmechanik vermutet man, dass solche Wechselwirkungen essenziell sind, beispielsweise für die Grundlagen des Magnetismus oder die Hochtemperatur-Supraleitung.

Für ultrakalte Gase aus elektrisch neutralen Atomen sind langreichweitige Wechselwirkungen in der Regel vernachlässigbar. In den letzten Jahren ließen sie sich aber für speziell ausgewählte Atome und Moleküle beobachten und beeinflussten die physikalischen Vorgänge entscheidend. Am intensivsten erforscht sind Quantengase aus Übergangsmetallen wie Chrom oder Lanthanoiden wie Dysprosium und Erbium. Diese Elemente besitzen durch ihre Elektronenstruktur sehr große magnetische Dipolmomente und damit eine langreichweitige Dipol-Dipol-Wechselwirkung (**Infokasten**). Gleiches gilt für heteronukleare, diatomare Moleküle mit großen elektrischen Dipolmomenten. Weitere Systeme mit langreichweitigen Wechselwirkungen, auf die wir im Folgenden nicht näher eingehen, sind hochangeregte Rydberg-Atome [4] und dipolare Exziton-Polaritonen in Halbleiterstrukturen [5].

### Chrom als Vorreiter

Die ersten Experimente mit dipolaren Quantengasen gelangen mithilfe der Bose-Einstein-Kondensation von Chrom [6]. Die elektronische Grundzustandsstruktur von Chrom zeichnet sich durch eine Valenzschale

mit sechs Elektronen aus, deren Spins parallel ausgerichtet sind. Das ergibt ein Dipolmoment, das dem Sechsfachen des Bohrschen Magnetons  $\mu_B$  entspricht. Dagegen besitzen Alkaliatome, aus denen zuvor bereits Bose-Einstein-Kondensate erzeugt wurden, nur ein einzelnes Valenzelektron und somit nur ein Dipolmoment von einem  $\mu_B$ . Weil die dipolare Wechselwirkungsstärke quadratisch vom Dipolmoment abhängt, ist sie für Chrom also 36-mal höher und beträgt etwa 16 Prozent der Kontaktwechselwirkung. Darüber hinaus verändern Streuresonanzen, bei denen sich die Kontaktwechselwirkung nahezu ausschalten lässt, das Verhältnis der beiden Wechselwirkungen.

Eine erste messbare Auswirkung der dipolaren Wechselwirkung zeigt sich bereits am Dichteprofil der Gase. Üblicherweise beschreibt eine umgekehrte Parabel dieses Profil, das damit genau die Form eines typischen Fallenpotentials widerspiegelt, in dem die Atome gefangen werden. Sobald diese Parabel auf dem thermischen Hintergrund erscheint, gilt der Phasenübergang des Gases zum Bose-Einstein-Kondensat experimentell als vollzogen (**Abb. 1a**). In einem Gas aus dipolaren Atomen, die alle entlang einer Achse ausgerichtet sind, wird die Parabel richtungsabhängig gestaucht oder gestreckt: Hintereinander platzierte Dipole benötigen weniger Energie als Dipole, die Seite an Seite positioniert sind (**Abb. 1b**).

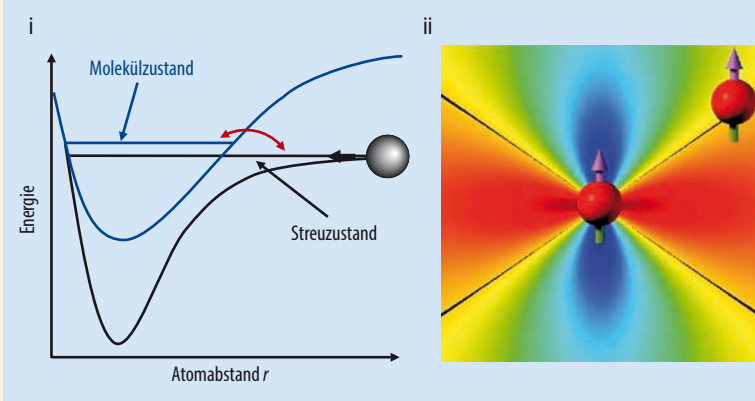
Als weitere Konsequenz der dipolaren Wechselwirkung ändert sich die Stabilität des Bose-Einstein-Kondensats. Für ein stabiles Kondensat mit einer Lebensdauer im Sekundenbereich muss die gesamte Wechselwirkung zwischen den Atomen abstoßend sein. Sonst erhöht sich die Dichte immer weiter, und es kommt zum Kollaps mit einer anschließenden

### WECHSELWIRKUNGEN ULTRAKALTER GASE

Die so genannte **Kontaktwechselwirkung** entsteht durch den Stoßprozess bzw. die Streuung zweier Atome (**Abb. i**). Die Wechselwirkung ist richtungsunabhängig und lässt sich durch die Streulänge beschreiben. Diese ist positiv (abstoßend) oder negativ (anziehend), abhängig von den Details der kurzreichweitigen Kräfte zwischen den Atomen (Reichweite etwa 5 nm).

**Feshbach-Resonanzen** sind Streuresonanzen bei bestimmten Magnetfeldern [3]. Dabei koppelt der Streuzustand mit gebundenen Molekülzuständen der beiden Atome, sodass sich die Streulänge dynamisch verändern lässt. Genau bei Resonanz divergiert die Streulänge, und es treten häufig verstärkt Atomverluste auf. Dann wandeln kurzzeitig gebildete Moleküle durch einen Stoß mit einem dritten Teilchen Bindungsenergie in Bewegungsenergie um und verlassen die Teilchenfalle (Dreikörperrekombination).

Bei der **dipolaren Wechselwirkung** verhalten sich die Wechselwirkungs-



Bei einer Feshbach-Resonanz koppeln Streuzustand und gebundener Molekülzustand (i). Die anisotrope Dipol-Dipol-Wechselwirkung zeichnet sich durch

Winkelbereiche aus, in denen sie abstoßend (ii, rot) und anziehend (blau) wirkt. Beim magischen Winkel (schwarz) verschwindet sie.

partner wie kleine Stabmagnete. Je nach Orientierung stoßen sie sich ab, ziehen sich an oder wechselwirken gar nicht (**Abb. ii**). Die Stärke der Wechselwirkung fällt mit dem Abstand gemäß  $1/r^3$  ab und ist langreichweitig. Die

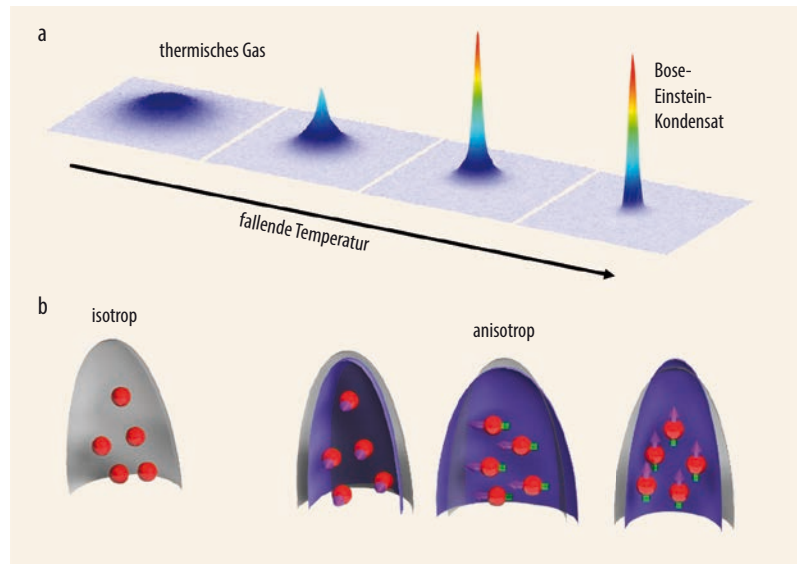
dipolare Wechselwirkung dominiert, wenn Atome mit großem magnetischen Moment oder heteronukleare Moleküle mit elektrischem Dipolmoment zum Einsatz kommen.

explosionsartigen Expansion, der so genannten Bose-Nova [7]. Die Richtungsabhängigkeit der dipolaren Wechselwirkung macht diesen Prozess nun wesentlich komplexer und hängt von der Anordnung der Dipole relativ zur Fallenform ab (Abb. 2a, b). Liegen die Dipole primär Seite an Seite, bleibt der Kollaps selbst bei leicht anziehender Kontaktwechselwirkung aus. Umgekehrt führt schon eine kleine abstoßende Wechselwirkung zum Kollabieren. Außerdem verändert die dipolare Wechselwirkung den Kollaps und die anschließende Bose-Nova massiv, was sich in einem faszinierenden Muster, das an ein atomares *d*-Orbital erinnert, widerspiegelt (Abb. 2c).

### Das Zeitalter der Lanthanoiden

Für Chrom dominiert die dipolare Wechselwirkung die Physik des Gases nur in der Nähe einer Streuresonanz vollkommen. Das ist eine entscheidende experimentelle Limitierung, weil dort die Teilchenverluste durch Dreikörperrekombination sehr groß sind und das Gas sehr schnell zerfällt. Eine Alternative stellen Atome aus der Gruppe der Lanthanoide dar, welche Dipolmomente von bis zu  $10 \mu_B$  besitzen. Hierbei haben sich vor allem Dysprosium [9] und Erbium [10] bewährt, da sie sich sehr effizient mit Lasern kühlen lassen. Die dipolare Wechselwirkungsstärke beider Elemente ist fast eine Größenordnung höher als für Chrom und dominiert ohne Streuresonanz. Außerdem besitzen beide Elemente mehrere stabile Isotope, sodass neben Bose-Einstein-Kondensaten auch ultrakalte Fermi-Gase und Mischungen untersucht werden können.

Von Beginn an fiel das ungewöhnliche Verhalten der Streueigenschaften bei den Lanthanoiden auf. In der Feshbach-Spektroskopie ergibt sich aus den Atomzahlverlusten als Funktion des Magnetfeldes die Position der Feshbach-Resonanzen (Infokasten). Daraus leiten sich im Allgemeinen die Streueigenschaften und im Speziellen die molekularen Potentiale ab. Während bei Gasen mit Kontaktwechselwirkung typischerweise 10 bis 20 breite Resonanzen in einem Magnetfeldbereich von 0 bis 1000 Gauss liegen, zeigen sich für Erbium und Dysprosium bereits zwischen 0 und 100 Gauss

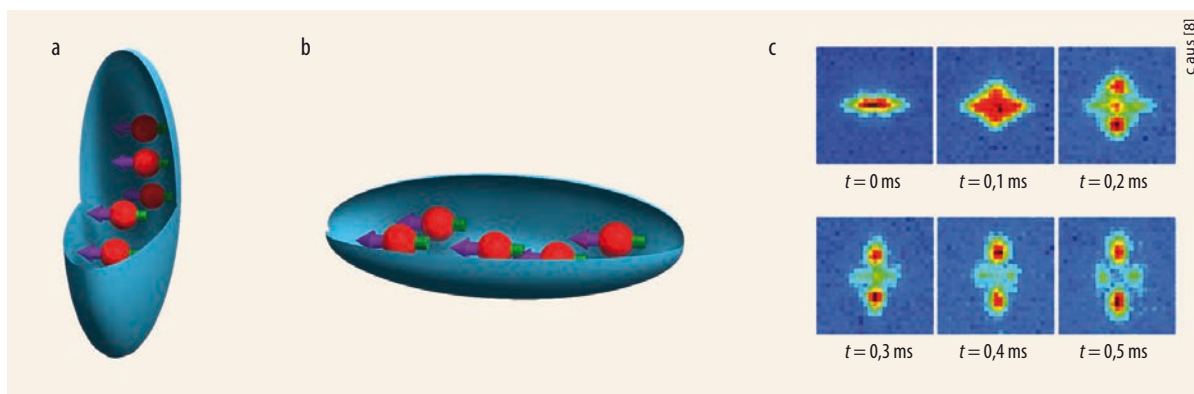


**Abb. 1** Der Phasenübergang eines thermischen Gases zu einem Bose-Einstein-Kondensat zeigt sich in der Impulsverteilung, wenn aus der thermischen Gauß-Verteilung eine schmale Parabel entsteht (a). Die invertierte Parabel beruht auf der parabolischen Form des Fallenpotentials (b). In dipolaren Gasen verzerrt die Anisotropie der Wechselwirkung diese Form im Vergleich zum isotropen Fall.

Hunderte von Resonanzen. In den dipolaren Gasen ist die Komplexität der Streuprozesse demnach deutlich höher. Außerdem zeigt die statistische Verteilung dieser Resonanzen (Abb. 3), dass der Streuprozess intrinsisch chaotisch verläuft [13].

Die dipolaren Fermi-Gase hielten noch eine weitere Überraschung parat. Normalerweise verschwindet die Kontaktwechselwirkung zwischen identischen Fermionen aufgrund des Pauli-Prinzips vollständig: Bei ultrakalten Temperaturen findet keine Streuung mehr statt. Um fermionische Quantengase zu erzeugen, sind Mischungen zweier Spinzustände üblich oder eine zusätzliche Spezies zum Kühlen nötig. Bei einem stark dipolaren fermionischen Erbium-Isotop reichte aber allein die dipolare Wechselwirkung aus, um sehr kalte Fermi-Gase identischer Fermionen zu erzeugen. Die lange Reichweite der Wechselwirkung verhinderte das Wirken des Pauli-Prinzips [14].

Deshalb eröffnen die dipolaren Fermi-Gase völlig neue Möglichkeiten, um Vielteilcheneffekte wie



**Abb. 2** Die Stabilität dipolarer Gase hängt stark von der Form des Fallenpotentials ab. In einer pfannkuchenfö-

migen Falle stoßen sich die Dipole primär ab (a), während sie sich in einer Zigarrenform primär anziehen (b).

Zeitrafferaufnahmen illustrieren den Kollaps eines dipolaren Bose-Einstein-Kondensats aus Chrom-Atomen (c).

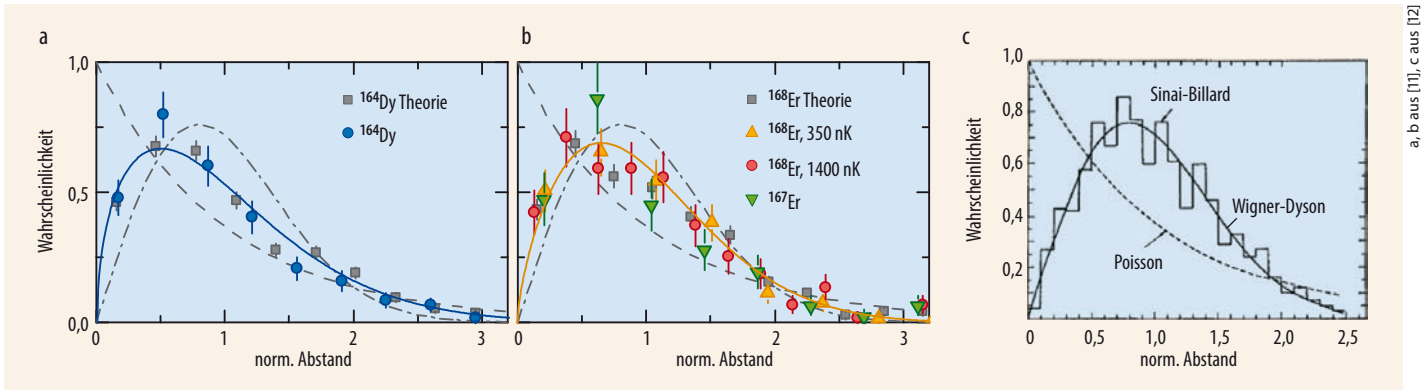


Abb. 3 Die statistische Verteilung des normalisierten Abstands der Streuresonanzen ähnelt für Dysprosium (a) und Erbium (b) einer Wigner-Dyson-Verteilung. Dieses Verhalten charakterisiert chaotische Systeme wie das Sinai-Billard als Beispiel eines klassisch chaotischen Systems (c).

die *d*-Wellen-Suprafluidität zu untersuchen und zu realisieren, die in Verbindung zu Hochtemperatur-Supraleitern steht. Beispielsweise gelang es erstmals, die gleichzeitige Dipol-Wechselwirkung zwischen vielen Teilchen in einem entarteten Fermi-Gas nachzuweisen: Die Fermi-Oberfläche – eine wichtige Eigenschaft zur Beschreibung von Cooper-Paaren und damit der Suprafluidität – verformte sich von einer Kugel in einen Ellipsoid mit kontrollierbarer Orientierung [15].

### Quantentropfen und Rotonen

Diese stark dipolaren Quantengase kollabieren auch nicht wie im Fall von Chrom – stattdessen wurde eine kristallartige Anordnung mehrerer kleiner Quantentropfen beobachtet (Abb. 4) [16]. Weitergehende Untersuchungen fanden als Ursache für dieses Verhalten Quantenfluktuationen, die bereits in den 1950er-Jahren erstmals berechnet wurden. Diese Fluktuationen ergeben sich aus der Unschärferelation der Quantenmechanik und führen zu minimalen Korrekturen der Molekularfeldnäherung, die normalerweise zur Beschreibung von Quantengasen ausreicht. Während des erwarteten Kollaps dipolarer Gase heben sich die Kontakt- und die Dipol-Wechselwirkung kurioserweise nahezu auf. Dann dominieren die Quantenfluktuationen das Geschehen und stabilisieren das dipolare Gas kurz vor dem Kollaps. Abhängig von den genauen

Parametern des Experiments entsteht eine Vielzahl von kleineren Tropfen [16] oder ein einzelner großer Tropfen [17, 18]. Diese neuen Quantenobjekte besitzen einige äußerst exotische Eigenschaften, beispielsweise eine Art Oberflächenspannung, welche die Tropfen selbst ohne externe Falle zusammenhält [19]. Allerdings ist ihre Dichte im Vergleich zu Helium- oder Wassertropfen um viele Größenordnungen kleiner.

In anderen Aspekten weisen die dipolaren Quantengase große Ähnlichkeiten zu suprafluidem Helium auf. Lev Landau (Physik-Nobelpreisträger 1962) führte das Konzept von Quasiteilchen ein, um die Eigenschaften von Supraflüssigkeiten wie Helium zu beschreiben [20]. Die Quasiteilchen sind Anregungen in der Supraflüssigkeit und heißen für niedrige Impulse Phononen. Landau erkannte, dass es auch Anregungen mit hohem Impuls geben muss, die trotzdem weniger Energie benötigen, so genannte Rotonen. Neutronenstreuexperimente bestätigten später diese bemerkenswerte Intuition. Die mikroskopische Ursache liegt wohl in den starken Wechselwirkungen und den damit einhergehenden starken Korrelationen zwischen den Helium-Atomen. Hier findet sich auch die Verbindung zu den dipolaren Quantengasen: Auf Basis der langreichweitigen anisotropen Wechselwirkung wurde vor etwa 15 Jahren das Vorhandensein ebensolcher Rotonen in dipolaren Quantengasen vorhergesagt [21]. Im Gegensatz zu Helium lassen sich die Eigenschaften der Rotonen wie Impuls oder Energie gezielt verän-

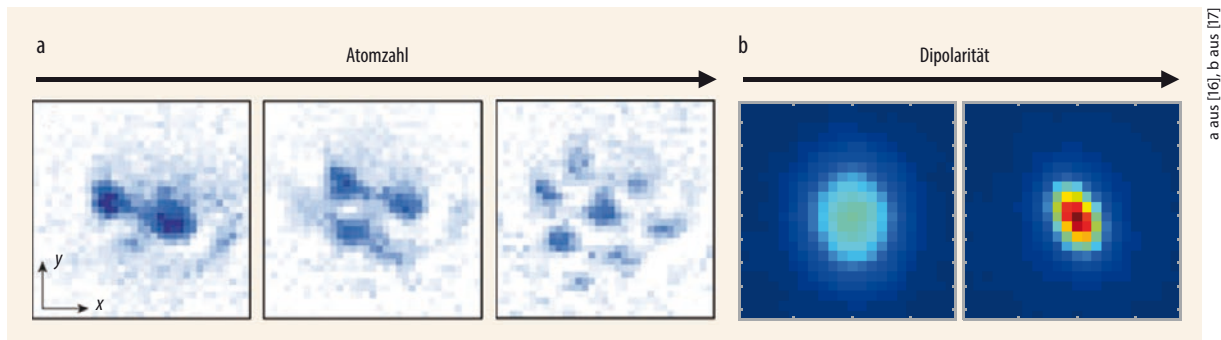


Abb. 4 Die Anzahl spontan gebildeter Quantentropfen in einem stark dipolaren Quantengas hängt von der Zahl der Atome ab (a). Bei geeigneter Fallenform kann ein Bose-Einstein-Kondensat auch in einen einzelnen großen Quantentropfen übergehen, der dann ohne Falle stabil ist (b).

dern. Kürzlich gelang der erstmalige experimentelle Nachweis dieser rotonischen Anregungen in einem dipolaren Quantengas (Abb. 5) [22].

### Quantensimulation in Kristallstrukturen

Mithilfe von Laserlicht lassen sich – alternativ zu einfachen Fallenpotentialen – auch periodische Potentialstrukturen realisieren. Innerhalb dieser künstlichen Gitterstrukturen verhalten sich die Atome ähnlich wie Elektronen in einem Metallgitter (Abb. 6), sodass sich in dieser Anordnung viele theoretische Modelle der Festkörperphysik simulieren lassen. Im Unterschied zu echten Festkörpersystemen sind diese optischen Gitterstrukturen nahezu frei von Defekten und ermöglichen es, relevante Parameter wie die Tunnelgeschwindigkeit zwischen Gitterplätzen oder die geometrische Anordnung der Gitterplätze (kubisch vs. hexagonal) dynamisch zu verändern. Diese Kontrolle der Gitterparameter kombiniert mit den Eigenschaften ultrakalter Quantengase erlaubt es, zahlreiche Festkörperefekte wie den Quantenphasenübergang zwischen einer Supraflüssigkeit und einem Mott-Isolator zu beobachten und detailliert zu untersuchen [24].

Dipolare Quantengase eignen sich dazu, eine ganz neue Klasse von Modellen zu simulieren, beispielsweise das erweiterte Bose-Hubbard-Modell [25], das langreichweitige Wechselwirkungen beinhaltet. In einigen dieser Modelle treten neue exotische Zustände auf, zum Beispiel der Schachbrett-Zustand, bei dem jeder zweite Gitterplatz unbesetzt bleibt, oder der Supra-solid, der als Hybridzustand sowohl Eigenschaften einer Supraflüssigkeit als auch eines festen Kristalls aufweist. Bei der ersten experimentellen Realisierung eines erweiterten Bose-Hubbard-Modells zeigte sich [26], dass die dipolare Wechselwirkung den Quantenphasenübergang vom suprafluiden Zustand in den Mott-Isolator signifikant beeinflusst (Abb. 6). Schon das Ändern der Ausrichtung der Dipole im Lichtkristall reicht aus, um Teile der Atomwolke in den jeweils anderen Zustand zu versetzen. Zusätzlich ließ sich die Modifikation des Anregungsspektrums aufgrund der Kopplung von Atomen zwischen benachbarten Gitterplätzen erstmals direkt nachweisen.

Neben der langreichweitigen Wechselwirkung ist als weitere Eigenschaft der Spin von Bedeutung. Klassisch betrachtet gibt er die Ausrichtung des magnetischen Dipols in Relation zum Magnetfeld an. Die Quantenmechanik beschränkt die Anzahl der möglichen Ausrichtungen anhand der Gesamtgröße des Spins. Beispielsweise besitzt Chrom einen Spin von  $S = 3$  und damit  $2S + 1 = 7$  Spinzustände. Aus der Kombination dieses Freiheitsgrads der Spinausrichtung mit der periodischen Anordnung in Gitterstrukturen ergeben sich quantenmechanische Modelle zur Beschreibung von Magnetismus wie das Heisenberg-Modell. Bei dipolaren Teilchen können die Spins direkt miteinander wechselwirken. Daher bieten sich solche Systeme besonders gut an, um Modelle des Quantenmagnetismus zu simulieren [26 – 28].

### Aufholjagd der heteronuklearen Moleküle

Einen anderen Zugang zu dipolarer Physik bieten heteronukleare Moleküle, die aufgrund ihrer asymmetrischen Ladungsverteilung elektrische Dipolmomente besitzen, welche bis zu  $10^4$ -mal größer sein können als magnetische Dipolmomente. Die Stärke hängt allerdings vom extern angelegten elektrischen Feld ab – ohne externe Felder verschwindet also das Dipolmoment. Gleichzeitig erlaubt es diese Abhängigkeit, die Stärke der Wechselwirkung mithilfe externer Felder oder Mikrowellen auf einfache Weise zu steuern [29].

Aufgrund der großen internen Komplexität von Molekülen ist es ungleich schwerer, ultrakalte Moleküle herzustellen als ultrakalte Atome. Die bisher erfolgreichste Technik beruht daher auf gekühlten Atomen. Zwei ultrakalte Gase unterschiedlicher Atome werden miteinander gemischt. In einem kontrollierten Vorgang, der Feshbach-Assoziation, lassen sich freie Atompaare gezielt in einen schwach gebundenen Molekülzustand überführen (Infokasten). Anschließend gilt es, diese in einem kohärenten Transfer mit zwei Lasern in den Grundzustand zu transferieren. Dort weisen sie ein permanentes Dipolmoment auf und sind deutlich stabiler gegenüber Kollisionen. Kohärenz ist hier besonders wichtig, da jedes Molekül eine Bindungsenergie von mehreren Tausend Kelvin verlieren muss, ohne

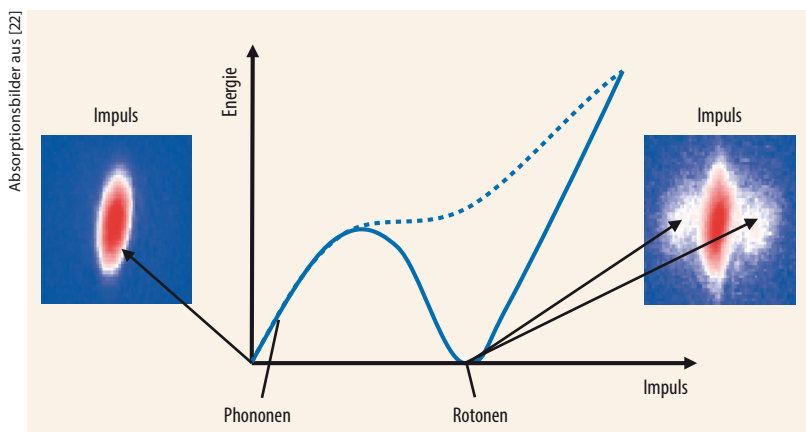
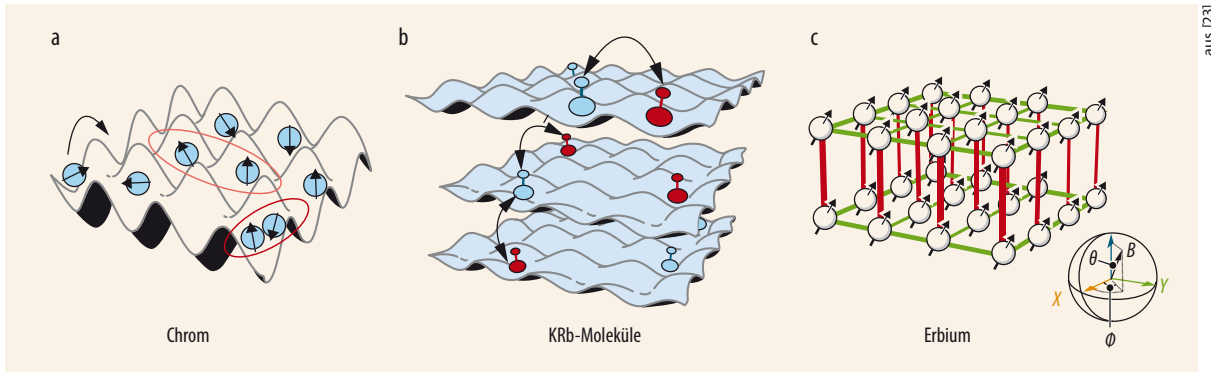


Abb. 5 Das Anregungsspektrum eines dipolaren Quantengases (gestrichelt) lässt sich durch Änderungen der Dipolarität so verformen, dass keine zusätzliche Energie zum Erzeugen von Rotonen nötig ist (durchgezogen). Dann entstehen die Rotonen spontan und erscheinen in Absorptionsspektren deutlich bei den entsprechenden Impulsen.



**Abb. 6** Dipole und ihre Wechselwirkungen lassen sich experimentell in einem optischen Gitter realisieren. Beispielsweise eignen sich Chrom-Atome (a) ebenso wie KRb-Moleküle im Grundzustand (b), um die Spindynamik zu simulieren. Erbium-Atome machen Quantenphasenübergänge experimentell zugänglich (c).

dabei die Nanokelvin-kalten Wolken aufzuheizen. Dieses Vorgehen eignet sich nur für molekulare Spezies, die aus kühlbaren Atomen bestehen – in der Regel Alkaliatome. Erstmals gelang dies mit KRb-Molekülen [30]. Mitterweile lassen sich auch andere dipolare molekulare Spezies wie LiCs, RbCs, NaRb oder NaK in den Grundzustand überführen.

Ein weiterer, seit langem bekannter und seit kurzem wieder intensiv verfolgter Zugang ist das direkte Kühlen von Molekülen. Bis vor wenigen Jahren ging man davon aus, dass die Standardtechniken der Atomkühlung prinzipiell nicht auf Moleküle übertragbar sind. Einerseits schien beispielsweise Laserkühlung aufgrund der großen Anzahl von Energieniveaus in Molekülen technisch nicht durchführbar. Andererseits galten molekulare Stoßprozesse aufgrund möglicher chemischer Reaktionen oder inelastischer Stöße als zu verlustbehaftet für Kühltechniken wie das Verdampfungskühlen. Kürzlich hat es sich aber herausgestellt, dass bei der Laserkühlung durch geschicktes Auswählen der Übergänge Moleküle wie SrF, CaF, YO und SrOH Temperaturen von wenigen Mikrokkelvin erreichen [31]. Außerdem zeigte sich, dass sich sowohl Stöße zwischen Molekülen als auch Stöße mit kalten Atomen zum weiteren Kühlen eignen könnten. Andere aus der Atomphysik bekannte Verfahren wie die Sisyphuskühlung ließen sich sogar auf größere Moleküle wie CH<sub>3</sub>F verallgemeinern [32].

In Zukunft ist es wichtig, die komplexen Eigenschaften der Wechselwirkung und die dipolaren Stoßprozesse der Moleküle zu verstehen. Bekannt ist, dass die komplexe interne Struktur leicht zu inelastischen Kollisionen und damit verbundenen Verlusten führen kann. Um dies zu unterdrücken, bieten sich pfannkuchenförmige Fallen an. Wie in den Experimenten mit Chrom verhindert der abstoßende Teil der dipolaren Wechselwirkung, dass sich die Moleküle zu nahe kommen. Eine weitere Alternative sind optische Gitter, in denen auf jedem Gitterplatz jeweils ein Molekül isoliert wird. Mit KRb-Molekülen ist es beispielsweise gelungen, die Plätze in einem optischen Gitter zu über 25 Prozent zu füllen, sodass die gefangenen Moleküle untereinander bereits langreichweitige Quantenkorrelationen aufbauen konnten [33].

Zusammen mit der Kontrolle der internen Zustände ergeben sich Spin-Modelle, deren Dynamik durch die komplexen Korrelationen die besten Computersimulationen an ihre Grenzen bringt. Außerdem ließ sich zeigen, dass solche Grundzustandsmoleküle Kohärenzzeiten von Sekunden aufweisen können [34]. Die lokale Manipulation einzelner Moleküle könnte daher in Zukunft dazu führen, Moleküle über die Dipol-Dipol-Wechselwirkung paarweise gezielt zu verschränken, um Fragen aus der Quanteninformationsverarbeitung zu untersuchen.

### Zusammenfassung

Ausgehend von den ersten, noch durch Molekularfeldnäherung beschreibbaren Experimenten dienten dipolare Quantengase in den letzten Jahren dazu, überraschende, neue Materiezustände zu entdecken und erste Quantensimulationen von Problemen aus der Festkörperphysik zu ermöglichen. Neue Experimente sollen die dipolaren Eigenschaften magnetischer Atome und polarer Moleküle und darüber hinaus auch von Rydberg-Atomen und Exziton-Polariton-Systemen nutzbar machen. Dieses junge Forschungsfeld wächst derzeit rasant. Im Blickfeld steht die Beobachtung vieler weiterer vorhergesagter Phänomene wie der *d*-Wellen-Suprafluidität und suprasolider Zustände, aber auch die Nutzung zur Quantensimulation und Quanteninformationsverarbeitung.

Einen wichtigen Schritt stellt dabei die Möglichkeit dar, dipolare Quantenteilchen im mikroskopischen Maßstab zu kontrollieren und zu beobachten. Techniken wie das Quantengas-Mikroskop [1] und optische Pinzetten sollen für dipolare Systeme adaptiert werden. Daraus könnten sich neue faszinierende und manchmal auch überraschende Beobachtungen ergeben, die unser Verständnis der dipolaren Quantenmaterie weiter vertiefen.

\*

Wir danken den Mitgliedern der DFG-Forschergruppe 2247 „From few to many-body physics with dipolar quantum gases“, in deren Rahmen viele der hier vorgestellten Ergebnisse realisiert wurden. Unser expliziter

Dank gilt Tilman Pfau und Francesca Ferlaino und ihren Arbeitsgruppen, die unsere Mitarbeit an diesem faszinierenden Forschungsfeld erst ermöglicht haben.

**Literatur**

[1] M. Greiner und I. Bloch, Physik Journal, Oktober 2015, S. 33  
 [2] P. Windpassinger, Physik in unserer Zeit 45(1), 26 (2014)  
 [3] J. H. Denschlag, H.-C. Nägerl und R. Grimm, Physik Journal, März 2004, S. 33  
 [4] M. Weidemüller, Physik Journal, Oktober 2017, S. 22  
 [5] M. Aßmann und M. Bayer, Physik Journal, Juli 2013, S. 22  
 [6] A. Griesmaier et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 160401 (2005); Q. Beaufils et al., Phys. Rev. A **77**, 061601 (2008)  
 [7] E. A. Donley et al., Nature **412**, 295 (2001)  
 [8] T. Lahaye et al., Phys. Rev. Lett **101**, 080401 (2008)  
 [9] M. Lu et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 190401 (2011)  
 [10] K. Aikawa et al., Phys. Rev. Lett. **108**, 210401 (2012)  
 [11] T. Maier et al., Phys. Rev. X **5**, 041029 (2015)  
 [12] O. Bohigas et al., Phys. Rev. Lett. **52**, 1 (1984)  
 [13] H. A. Weidemüller, Physik Journal, März 2004, S. 41  
 [14] K. Aikawa et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 010404 (2014)  
 [15] K. Aikawa et al., Science **345**, 1484 (2014)  
 [16] H. Kadau et al., Nature **530**, 194 (2016)  
 [17] L. Chomaz et al., Phys. Rev. X **6**, 041039 (2016)  
 [18] M. Schmitt et al., Nature **539**, 259 (2016)  
 [19] F. Wächtler und L. Santos, Physik Journal, Februar 2017, S. 22  
 [20] L. D. Landau, J. Phys. (Moscow) **5**, 71 (1941)  
 [21] L. Santos et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 250403 (2003)  
 [22] L. Chomaz et al., Nat. Phys. **14**, 442 (2018)  
 [23] J. L. Bohn et al., Science **357**, 1002 (2017)  
 [24] M. Vojta, Physik Journal, März 2002, S. 55  
 [25] T. Lahaye et al., Rep. Prog. Phys. **72**, 126401 (2009)  
 [26] S. Baier et al., Science **352**, 201 (2016)  
 [27] A. de Paz et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 185305 (2013)  
 [28] B. Yan et al., Nature **501**, 521 (2013)  
 [29] S. Ospelkaus, Physik Journal, Juni 2010, S. 37  
 [30] K.-K. Ni et al., Science **322**, 231 (2008)  
 [31] J. F. Barry et al., Nature **512**, 286 (2014); S. Truppe et al., Nat. Phys. **13**, 1173 (2017); M. T. Hummon et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 143001 (2013); I. Kozryyev et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 173201 (2017)  
 [32] M. Zeppenfeld et al., Nature **491**, 570 (2012)  
 [33] S. A. Moses et al., Science **350**, 659 (2015)  
 [34] J. W. Park et al., Science **357**, 372 (2017)

**DIE AUTOREN**

**Tim Langen** (FV Quantenoptik und Photonik) studierte Physik in Mainz, Marseille, Paris und Wien. Als Postdoc arbeitete er am JILA (Boulder, USA). Seit 2017 leitet er eine Nachwuchsgruppe zur Laserkühlung dipolarer Moleküle an der Universität Stuttgart.



**Manfred J. Mark** studierte Physik an der Universität Innsbruck und promovierte zu Quantengasen in optischen Gittern. Seit 2014 forscht er als Senior Scientist am IQOQI in der Arbeitsgruppe Dipolare Quantengase.



# Physik Journal Newsletter



Online-Meldungen der Redaktion, Neuigkeiten aus der DPG, TV-Tipps und mehr finden Sie in unserem Newsletter.

Sie möchten ihn erhalten?

Hinterlegen Sie Ihre E-Mail-Adresse und bestellen Sie den Newsletter unter:

[www.dpg-physik.de/mitgliedschaft/aenderung.html](http://www.dpg-physik.de/mitgliedschaft/aenderung.html)