

■ Seltene Erden – heiß diskutiert und nun auch ultrakalt

Quantengase aus Dysprosium und Erbium weisen aufgrund der großen magnetischen Momente ungewöhnliche Eigenschaften auf.

Bei extrem tiefen Temperaturen von nur wenigen 100 Nanokelvin zeigen atomare Gase plötzlich ihre Quantennatur: Bosonen drängen sich alle in denselben Quantenzustand und bilden ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC). Identische Fermionen versuchen hingegen wegen des Pauli-Prinzips, genau dies zu vermeiden, und besetzen die niedrigsten zur Verfügung stehenden Energiezustände jeweils einfach bis zur Fermi-Energie E_f . Diese rein quantenstatistischen Effekte benötigen im Gegensatz zu anderen Kondensationsphänomenen keine Wechselwirkung. Wirklich spannend wird die Physik der Quantengase aber erst durch Wechselwirkungen zwischen den Atomen. Diese können zu kollektivem Verhalten der Atome und damit z. B. zu Superfluidität, Kristallisation oder der Ausbildung anderer exotischer Materiezustände führen. Solche korrelierten Zustände entstehen aus dem Wechselspiel zwischen lang- und kurzreichweitigen, isotropen und anisotropen, attraktiven und repulsiven Kräften zwischen den Atomen. Da sich zwei identische Fermionen nie am selben Ort aufhalten können, ist eine langreichweitige Kraft nötig, um überhaupt eine Wechselwirkung beobachten zu können. Die Wechselwirkung zweier Dipole ist eine solche Kraft, die zudem anisotrop ist – sowohl ihre Stärke als auch ihr Vorzeichen hängen von der Ausrichtung der Dipole zueinander ab (Abb. 1).⁸⁾ Kürzlich ist es den Gruppen um Francesca Ferlaino in Innsbruck [1] und Benjamin Lev in Stanford [2] gelungen, Quantengase mit zwei neuen atomaren Spezies zu erzeugen, die sich – neben der Tatsache, dass es sich mit bosonischem Erbium (^{168}Er) und fermionischem Dysprosium (^{163}Dy) um recht exotische Elemente aus der Gruppe der seltenen Erden handelt – vor allem durch ihre großen magnetischen Dipolmomente auszeichnen.

Die Bose-Einstein-Kondensation von bosonischem ^{164}Dy war der Gruppe aus Stanford bereits Mitte letzten Jahres gelungen [3]. Nun hat sie auch erstmals ein stark dipolares Fermion bis zur Quantenentartung gekühlt. Dysprosium hat mit $10 \mu_B$ das größte atomare Dipolmoment im Periodensystem, und auch bei Erbium ist der Wert mit $7 \mu_B$ sehr groß. Verglichen mit den am häufigsten verwendeten Alkalimetallen mit maximal $1 \mu_B$ im Grundzustand, führt dies zu einer sehr viel größeren Dipol-Dipol-Wechselwirkung, da diese quadratisch mit dem Dipolmoment skaliert. Noch wichtiger ist der Vergleich der Wechselwirkungsstärke mit anderen relevanten Energieskalen im System; das ist die isotrope Kontaktwechselwirkung für Bosonen bzw. die Fermi-Energie für Fermionen. In beiden Fällen geht auch die Masse ein, die jeweils mehr als drei Mal so groß ist wie die von Chrom (^{52}Cr) – dem bisher einzigen Element, das als Quantengas das stark dipolare Regime erreicht hat [4].

Der stark dipolare Charakter eines BEC kann sich in einem Kollaps äußern, der aufgrund der Anisotropie der Wechselwirkung von der Geometrie der Falle abhängt. Faszinierend daran ist, dass Flugzeitaufnahmen der implodierten Wolke eine hantelförmige Struktur aufweisen, welche die Symmetrie der zugrunde liegenden Wechselwirkung widerspiegelt. Einen solchen Kollaps konnte unsere Gruppe 2008 erstmals in einem ^{52}Cr -BEC beobachten [5]. Allerdings war es dafür nötig, mithilfe einer sog. Feshbach-Resonanz den Streuquerschnitt der Atome zu minimieren, um die Dipol-Dipol-Wechselwirkung zur dominanten Kraft zu machen. Dafür sind große homogene Magnetfelder nötig, die präzise und schnell angefahren werden müssen. Erbium weist hingegen schon bei sehr kleinen Magnetfeldern eine ganze Reihe von Resonanzen auf, und die Innsbrucker Gruppe hat

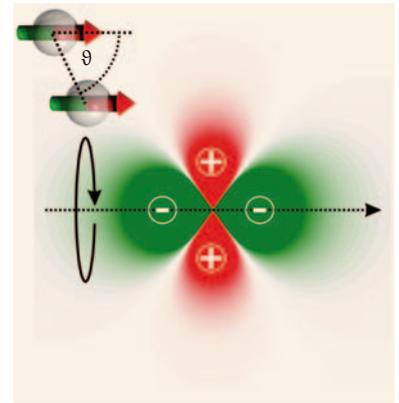


Abb. 1 Neben der Dipol-Dipol-Wechselwirkung tritt bei einem nicht rein dipolaren Gas auch die isotrope van-der-Waals-Wechselwirkung auf, symbolisiert durch die grauen Kugeln (links oben). Die Wechselwirkung ist anisotrop und je nach Winkel ϑ attraktiv (grün/-) oder repulsiv (rot/+). Bezüglich der Polarisationsrichtung besteht eine Rotations-symmetrie.

eindrucksvoll gezeigt, dass ein Feld von nur einem Gauss ausreicht, um den dipolaren Kollaps des Erbium-Kondensats zu induzieren (Abb. 2). Das große Dipolmoment von Dy erlaubt es möglicherweise, ganz auf den Einsatz solcher Resonanzen zu verzichten.

Ein weiterer Unterschied zwischen dem Übergangsmetall Chrom und den seltenen Erden besteht darin, dass letztere auch im Grundzustand Bahndrehimpuls besitzen (Erbium hat einen ^3H - und Dysprosium einen ^5I -Grundzustand), während die Cr-Atome ihr magnetisches Moment einzig aus dem Spin der ungepaarten Elektronen beziehen. Dies lässt aufgrund der mit dem großen Bahndrehimpuls verbundenen Anisotropie der Streupotentiale auch auf interessante Experimente zur Stoßphysik dieser Atome hoffen.

Ungeachtet ihrer vielversprechenden Eigenschaften haben die beiden Exoten allerdings ein komplexes Termschema, das zunächst im Hinblick auf die Laserkühlung wenig aussichtsreich erscheint. Für diese ist es nötig, tausende Photonen resonant zu streuen, sodass ein Termschema mit geschlossenen

⁸⁾ Da in vielen Experimenten ein externes Feld anliegt, das die Atome polarisiert, entscheidet die Orientierung des Abstandsvektors zwischen zwei Teilchen über Stärke und Vorzeichen der Kraft.

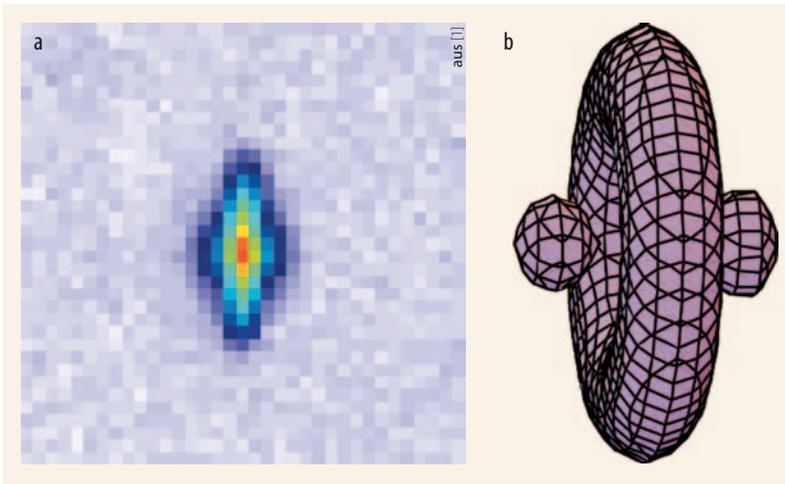


Abb. 2 Nach dem dipolaren Kollaps eines Bose-Einstein-Kondensates aus Erbium-Atomen spiegelt die gemessene Dichteverteilung (a: Flugzeitaufnahme) die hantelförmige Winkelabhängigkeit

(b) der Dipol-Dipol-Wechselwirkung wider. Die Polarisationsrichtung liegt hier horizontal in der Bildebene der Abbildung.

Übergängen vorteilhaft ist. Obwohl Erbium keinen geschlossenen Übergang aufweist, gelang 2006 am NIST dessen Laserkühlung: Die Atome kehren zwar über Zerfallskaskaden nur sehr langsam in ihren elektronischen Grundzustand zurück, sie können in dieser Zeit, während der sie für die Kühllaser „blind“ sind, jedoch wegen des großen Dipolmoments nicht aus der Falle entkommen [6]. Dies hat die Innsbrucker Gruppe genutzt und innerhalb von nur zwei Jahren das Ziel erreicht. Auch die Gruppe um Benjamin Lev hat sich von der erfolgreichen Laserkühlung von

Er inspirieren lassen und nutzt einen optischen Übergang mit einer Linienbreite von unter 2 kHz für die Kühlung auf 10 μK . Um das Fermi-Gas zu erzeugen und dabei das Problem verbotener Stöße zwischen identischen Fermionen zu umgehen, werden die vorgekühlten ^{161}Dy -Fermionen gemeinsam mit ^{162}Dy -Bosonen in eine optische Falle geladen, sodass die Kühlung durch Stöße zwischen den verschiedenen Isotopen zustande kommt („sympathisches“ Kühlen). Darüber hinaus konnte die Gruppe Thermalisierung zwischen den ^{161}Dy -Fermionen aufgrund der langreichwei-

tigen Wechselwirkung beobachten, auch ohne die Bosonen.

Die neuen Ergebnisse lassen also auf viele spannende Experimente zu stark dipolaren Gasen hoffen. Ein Hauptaugenmerk wird dabei sicher auf der Suche nach korrelierten Zuständen liegen, z. B. Supra-solidität, 2D-Solitonen, Rotonen und verschiedene magnetische Phasen. Aber auch die außergewöhnlichen Elektronenkonfigurationen der Grundzustände versprechen neue Physik von ultrakalten Stößen. Die viel diskutierte Preisexplosion bei den seltenen Erden wird die Forscher jedenfalls nicht abhalten können – ein entartetes Dysprosium-Gas mit 20 000 Atomen kostet selbst heutzutage nur etwa 10^{-16} Euro.

Axel Griesmaier

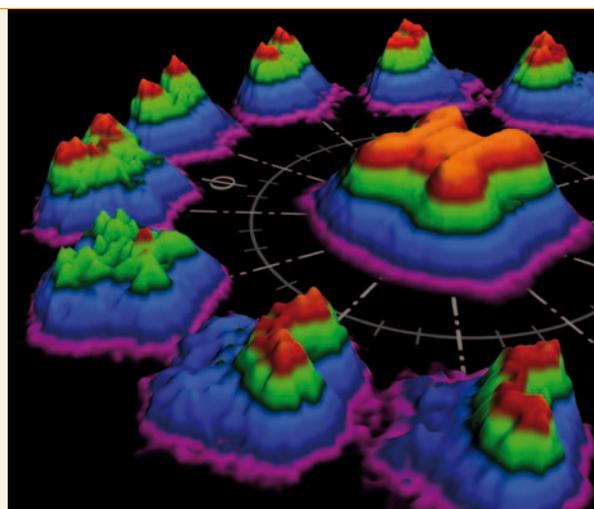
- [1] K. Aikawa, A. Frisch, M. Mark, S. Baier, A. Rietzler, R. Grimm und F. Ferlaino, Phys. Rev. Lett. **108**, 210401 (2012)
- [2] M. Lu, N. Q. Burdick und B. L. Lev, Phys. Rev. Lett. **108**, 215301 (2012)
- [3] M. Lu, N. Q. Burdick, S. Ho Youn und B. L. Lev, Phys. Rev. Lett. **107**, 190401 (2011)
- [4] T. Lahaye, T. Koch, B. Fröhlich, M. Fattori, J. Metz, A. Griesmaier, S. Giovanazzi und T. Pfau, Nature **448**, 672 (2007)
- [5] T. Lahaye, J. Metz, B. Fröhlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi und M. Ueda, Phys. Rev. Lett. **101**, 080401 (2008)
- [6] J. J. McClelland und J. L. Hanssen, Phys. Rev. Lett. **96**, 143005 (2006)

Dr. Axel Griesmaier,
5. Physikalisches
Institut, Universität
Stuttgart, Pfaffen-
waldring 57,
70569 Stuttgart

KARAMBOLAGE IM ATOM

Trifft ein intensiver Laserpuls auf ein Atom, wird nicht selten ein Elektron aus dem Atom herausgelöst, bei der Doppelionisation sind es gar zwei Elektronen. Diesen Prozess haben Forscher vom MPI für Quantenoptik in Garching erstmals mit Attosekundengenauigkeit verfolgt. Dazu schickten sie einen 4 fs kurzen Laserpuls, der nur aus einer Schwingung bestand, auf Argonatome. Das elektrische Feld des Lichts ionisierte die meisten Atome einfach, bei jedem tausendsten Atom trat aber nicht-sequenzielle Doppelionisation auf: Das elektrische Feld des Pulses beschleunigt dabei zunächst das erste Elektron, bevor sich das Feld umkehrt und das Elektron zurück treibt auf den Atomrumpf, mit dem es nach rund 1,8 fs kollidiert. Bei der Rekollision regt das Elektron ein zweites an, das nur 400 as später das Atom verlässt – noch bevor der zweite Wellenberg des Laserpulses eintrifft. Das ist überraschend, denn bislang war man davon ausgegangen, dass das Elektron dem Atomrumpf erst beim Erreichen der maximalen Amplitude des Wellenbergs entkommt. Diese Methode könnte einen tieferen Einblick in das Zusammenspiel von Elektronen bei chemischen Reaktionen ermöglichen. (MPQ)

B. Bergues et al., Nature Commun. **3**, 813 (2012)



Die aus Messdaten gewonnenen 3D-Reliefs zeigen, wie sich die Geschwindigkeiten der beiden Elektronen für unterschiedliche Verläufe des elektrischen Feldes des anregenden Laserpulses verändern. Das Relief in der Mitte ist die Summe dieser Einzelmessungen.

C. Hackenberger/LMU