

## ■ Ultrakalt und magnetisch

Erstmals ist es gelungen, eine sog. Quanten-Ferroflüssigkeit aus Chrom-Atomen herzustellen, in der die Wechselwirkungen zwischen den magnetischen Dipolen dominieren.

Die Physik der ultrakalten Gase hat in den vergangenen Jahren einen dramatischen Fortschritt erlebt mit spektakulären Entdeckungen wie der Beobachtung der Bose-Einstein-Kondensation, des Mott-Isolator-Übergangs oder der Herstellung von fermionischen Superfluiden [1]. Einen neuen Meilenstein hat nun die Gruppe von Tilman Pfau an der Universität Stuttgart erreicht, indem sie ein ultrakaltes Bose-Gas aus Chrom-Atomen erzeugt hat, in welchem magnetische Dipol-Dipol-Kräfte die interatomaren Wechselwirkungen dominieren [2]. Damit haben die Wissenschaftler eine qualitativ neue Art ultrakalter Materie geschaffen, die sie als Quanten-Ferroflüssigkeit bezeichnen. Die Experimente erwiesen sich als extrem aufwändig und verknüpfen

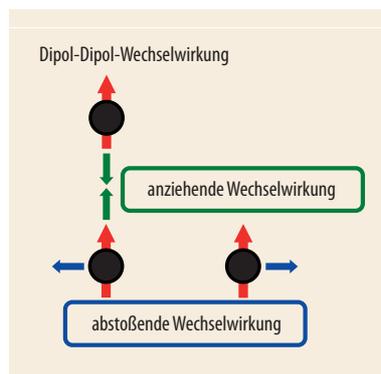


Abb. 1 Aufgrund ihres anisotropen Charakters ist die Dipol-Dipol-Wechselwirkung zwischen vertikal orientierten Dipolen (rote Pfeile) für relative Abstände entlang der Ausrichtung der Dipole anziehend (grüne Pfeile), für relative Abstände senkrecht zur Orientierung der Dipole jedoch abstoßend (blaue Pfeile).<sup>1)</sup>

die besten und fortschrittlichsten Techniken im Bereich ultrakalter Atome. Denn Chrom-Atome lassen

sich außerordentlich schwer einsperren, da die Verluste z. B. infolge inelastischer Streuung sehr hoch sind. Darüber hinaus war eine optische Falle notwendig, in der sich mit speziellen Tricks die Phasenraumdichte erhöhen lässt. Diese Experimente öffnen nun den Weg, um die faszinierende Physik von stark wechselwirkenden ultrakalten dipolaren Gasen zu beobachten [3].

Schon vor einigen Jahren begann Tilman Pfau mit der Arbeit an Chrom, doch selbst das Erreichen eines BEC gestaltete sich schwierig und gelang erst 2005 [4]. Auch wenn in diesen Pionierarbeiten die magnetische Dipol-Wechselwirkung viel schwächer war als die van der Waals-Wechselwirkung, war der Effekt sichtbar, denn selbst eine sehr schwache Dipol-Wechselwirkung verändert die

1) Die Anisotropie wird beschrieben durch  $V(r) = d^2/r^3(1-3\cos^2\theta)$ , wobei  $d$  das Dipolmoment,  $r$  der relative Abstand und  $\theta$  der Winkel zwischen Dipolmoment und relativem Abstand ist.

2) Dieses Phänomen haben die Stuttgarter Physiker um T. Pfau gerade in den letzten Wochen beobachtet.

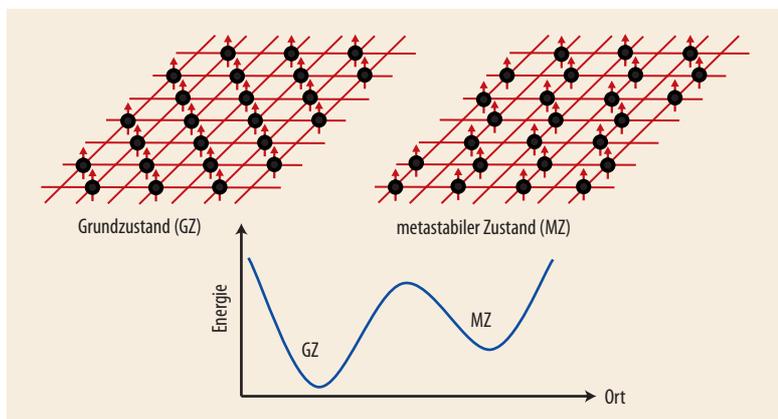


Abb. 2 Beispiel für eine isolierende Phase von dipolaren Atomen in optischen Gittern mit nichtganzzahligem Füllfaktor:

Grund- und metastabile Zustände sind lokale Minima der Energie, die durch Energiebarrieren getrennt sind.

Ausbreitung des Gases nach dem Öffnen der Falle [5].

Parallel dazu wurden Feshbach-Resonanzen gefunden und untersucht [6], mit denen sich bei geeignetem Magnetfeld Zustände von wechselwirkenden Atompaares resonant mit den gebundenen Zuständen von Paaren in einem anderen Wechselwirkungskanal koppeln lassen. Dabei ist es möglich, die Streueigenschaften der Atome, die mittels van der Waals-Kräften wechselwirken, nach Belieben zu verändern und „auszuschalten“. Genau dies wurde in der Tat in der aktuellen Arbeit erreicht [2], indem die van der Waals-Wechselwirkung verglichen mit der Dipol-Dipol-Wechselwirkung schwach eingestellt wurde. Mit denselben Nachweistechniken wie in [5] beobachteten T. Pfau und seine Kollegen, dass sich die Kondensatexpansion stark änderte. Der Vergleich mit einer ab-initio-Rechnung erlaubt es unzweifelhaft, das Verhältnis von Dipol-Dipol- zu van der Waals-Wechselwirkung zu bestimmen und direkt nachzuweisen, dass ein Quantenferrofluid erreicht wurde.

Doch warum gelten solche dipolaren Quantengase (DQG) für die Physik der ultrakalten Materie geradezu als „Heiliger Gral“? Ganz einfach, weil sie dipolar sind und Dipol-Dipol-Wechselwirkungen mehrere hochinteressante Eigenschaften zeigen: Sie sind langreichweitig und anisotrop – je nach Winkel zwischen dem Dipolmoment und dem Vektor der wechselwirkenden Paare können sie abstoßend oder anzie-

hend sein. Für vertikal polarisierte Dipole (Abb. 1) wären die Wechselwirkungen in einem Gas, das in einer „Pfannkuchen-förmigen“ horizontalen Falle eingespermt ist, vorwiegend abstoßend. Umgekehrt wären sie für ein Gas, das in einer „Zigarren-förmigen“ Falle gefangen ist, überwiegend anziehend.

Theoretiker haben bereits darauf hingewiesen, dass DQG interessante neue Phänomene im Vergleich zu den bekannten bosonischen oder fermionischen Superflüssigkeiten oder Systemen im Mott-Isolator-Zustand zeigen könnten: So hängt die BEC-Stabilität von der Fallengeometrie ab, und am Temperaturnullpunkt existiert ein Quantenphasenübergang. Für genügend langgestreckte Fallen ähnelt das BEC einem solchen mit negativer Streulänge und erlebt einen Kollaps, wenn die Zahl der eingespermteten Atome größer als ein kritischer Wert wird.<sup>2)</sup> Für runde Fallen ist das System zwar stabiler, allerdings tritt eine neue Instabilität auf, die sich durch das sog. Roton-Maxon-Minimum im Anregungsspektrum ankündigt [7] – solch ein Minimum ist analog zu dem in stark wechselwirkendem superfluiden Helium.

Aufgrund der langreichweitigen Wechselwirkungen können polarisierte Fermionen einen superfluiden BCS-Zustand bilden. Das fermionische Superfluid ist eher von der Art eines p-Wellen-Supraleiters. Wiederum gibt es einen Quantenphasenübergang in der Falle; für genügend runde Fallen verschwindet

der BCS-Übergang bei endlicher Temperatur. Rotierende, dipolare Gase sind perfekte Kandidaten, um Zustände analog zu denen beim fraktionalen Quanten-Hall-Effekt (oder sogar noch exotischere Zustände) zu beobachten [8]. Dipolare Gase in optischen Gittern zeigen eine ganzen „Zoo“ bislang unbeobachteter Phasen, wie die sog. Schachbrett-Phase oder die super-solide Phase. Ferner haben Gitter dipolarer Gase viele metastabile Zustände mit langen Lebenszeiten, die eventuell als Quantenspeicher dienen könnten [9] (Abb. 2).

Aus diesen Gründen war und ist die Herstellung und Untersuchung von DQG eines der Ziele mehrerer führender Forschungsgruppen weltweit: Entweder nutzen sie magnetische Dipole wie Tilman Pfau oder zielen auf heteronukleare Moleküle ab wie Gerard Meijer am Fritz-Haber-Institut, John Doyle in Harvard und David DeMille in Yale.

Der aktuelle Erfolg der Stuttgarter Gruppe ist ein extrem wichtiger Schritt vorwärts. Die Community im Bereich ultrakalter Atome wartet gespannt auf die nächsten Schritte, die zu den oben genannten Phänomenen führen. Dabei lassen es rasche Fortschritte sowohl bei den Fallen- als auch den Kühltechniken bei heteronuklearen Molekülen erwarten, dass auch stark wechselwirkende dipolare Gase mit elektrischen Dipol-Wechselwirkungen zu erreichen sein sollten.

Chiara Menotti und Maciej Lewenstein

- [1] M. Lewenstein et al., *Advances in Physics* **56**, 243 (2007) (cond-mat/0606771); S. Giorgini, L. P. Pitaevskii und S. Stringari, *cond-mat/0706.3360*; I. Bloch, J. Dalibard und W. Zwerger, arXiv:0704.3011
- [2] T. Lahaye et al., *Nature* **448**, 672 (2007)
- [3] M. A. Baranov et al., *Phys. Scr.* **T102**, 74 (2002); M. A. Baranov, in Vorbereitung
- [4] A. Griesmaier et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 160401 (2005)
- [5] J. Stuhler et al., *Phys. Rev. Lett.* **95**, 150406 (2005)
- [6] J. Werner et al., *Phys. Rev. Lett.* **94**, 183201 (2005)
- [7] L. Santos, G. V. Shlyapnikov und M. Lewenstein, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 250403 (2003)
- [8] M. A. Baranov, K. Osterloh und M. Lewenstein, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 070404 (2005)
- [9] C. Menotti, C. Trefzger und M. Lewenstein, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 235301 (2007)

Dr. Chiara Menotti und Prof. Dr. Maciej Lewenstein, Institut de Ciències Fotòniques (ICFO), Mediterranean Technology Park, 08860 Castelldefels (Barcelona), Spanien