

## ■ Schwebende Quantentröpfchen

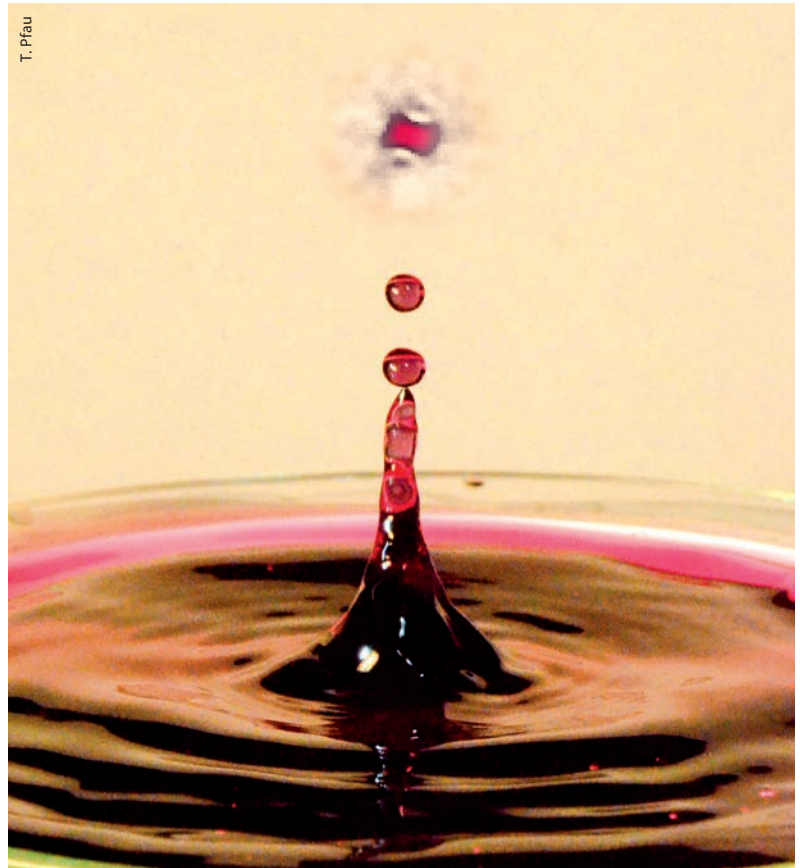
Bei extrem verdünnten Quantentröpfchen beruht die Oberflächenspannung auf rein quantenphysikalischen Prozessen.

Wassertropfen erhalten ihre charakteristische Form durch die Oberflächenspannung, die durch kohäsive Kräfte zwischen den Molekülen zustande kommt. Ein ähnlicher Effekt hält Heliumtröpfchen zusammen, die in den vergangenen Jahrzehnten großes Interesse auf sich gezogen haben. Denn sie bieten die Möglichkeit, das besondere Verhalten eines mesoskopischen Superfluids zu studieren. Während diese Flüssigkeiten eine hohe Dichte besitzen, haben neueste Experimente mit ultrakalten Atomen in der Gruppe von Tilman Pfau in Stuttgart eine fundamental neue Form von extrem verdünnten Quantentröpfchen offenbart [1]. Im Gegensatz zu Wasser- oder Heliumtröpfchen hat deren Oberflächenspannung einen rein quantenphysikalischen Ursprung.

Bosonen tendieren aufgrund ihrer Quantenstatistik dazu, sich unterhalb einer kritischen Temperatur in einem einzigen Quantenzustand zu sammeln, der als Bose-Einstein-Kondensat (BEC) bekannt ist. Dessen Eigenschaften sind seit vielen Jahren Gegenstand intensiver Untersuchungen und lassen sich typischerweise durch eine semi-klassische Molekularfeldtheorie gut beschreiben. In dieser charakterisiert ein komplexes Feld  $\psi$ , die Wellenfunktion des Kondensats, die kondensierten Teilchen.

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Teilchen gibt es auch am absoluten Temperaturnullpunkt eine endliche Anzahl nicht-kondensierter Teilchen, welche die Zustandsgleichung des Kondensats modifizieren. Das ist bereits seit einem halben Jahrhundert bekannt [2]. Diese Quantenfluktuationen sind nicht in der Molekularfeldnäherung enthalten. In den meisten BEC-Experimenten sind die Fluktuationen vernachlässigbar klein gegenüber dem Molekularfeldbeitrag.

Die Situation ändert sich aber in Quantengasen mit starken Dipol-



Gewöhnliche Weintropfen (unten) und ein Quantentröpfchen (ganz oben)

Dipol-Wechselwirkungen, wie neue Experimente mit Dysprosium- und Erbiumatomen in den Gruppen von Tilman Pfau in Stuttgart [1] und von Francesca Ferlaino in Innsbruck [3] zeigen. Im Gegensatz zu ihren nicht dipolaren Gegenstücken, in denen die Teilchen nur über kurzreichweitige und isotrope Wechselwirkungen miteinander interagieren, besitzen diese stark magnetischen Atome zusätzliche langreichweitige und anisotrope Wechselwirkungen. Interessanterweise können sich diese gegenseitig aufheben, wodurch der Molekularfeldbeitrag anormal klein wird. Die Quantenfluktuationen verschwinden jedoch nicht, sondern erlangen entscheidende Bedeutung für die Eigenschaften des Kondensats. Insbesondere führen genügend schwache kurzreichweitige Wechselwirkungen zu einem attraktiven Molekularfeldterm, der proportional zur Dichte

$n$  ist und eine Implosion des Kondensats verursacht. Quantenfluktuationen bewirken einen repulsiven Term proportional zu  $n^{3/2}$ , der den durch den Molekularfeldbeitrag induzierten Kollaps bei einer kritischen Dichte stoppt.<sup>1)</sup>

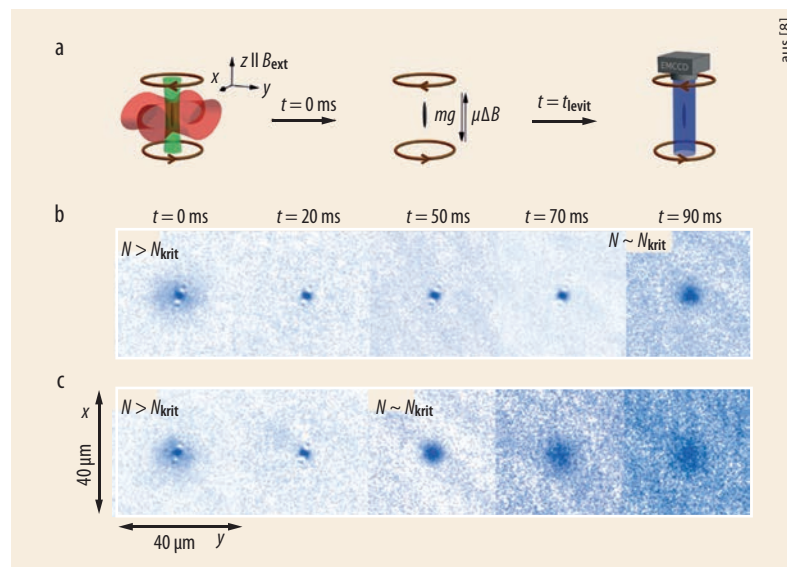
Eine solche reine Quantenstabilisierung eines dipolaren Kondensats zeigte sich erstmals 2015 in einem grundlegenden Experiment in Stuttgart [1]. Dabei wurde ein molekularfeldstabiles Dysprosiumkondensat destabilisiert, indem die Stärke der kurzreichweitigen Wechselwirkung abrupt reduziert wurde. Während das Kondensat bei ähnlichen Experimenten mit Chromatomen einige Jahre zuvor kollabierte, bildeten sich in den Dysprosiumkondensaten langlebige Quantentröpfchen, die bis zu einigen hundert Millisekunden überlebten. Diese ordneten sich in einer quasi-kristallinen Struktur an,

1) Die erhöhte Bedeutung der Quantenfluktuationen in Systemen mit konkurrierenden Wechselwirkungen wurde zuerst im Kontext von binären BEC gezeigt [4].

die den charakteristischen Stacheln der Rosensweig-Muster magnetischer Fluide ähneln. Das Ergebnis war innerhalb der damaligen prävalenten Molekularfeldtheorie unerwartet und initiierte in den vergangenen Monaten viele experimentelle und theoretische Untersuchungen solcher Systeme. Erste Modelle setzten auf anormal große Dreikörper-Wechselwirkungen als Stabilitätsmechanismus. Tilman Pfau's Gruppe zeigte jedoch, dass nur Quantenfluktuationen mit den experimentellen Ergebnissen in Einklang zu bringen sind [5]. Detaillierte theoretische Arbeiten bestätigten dies [6].

Neueste Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten aus Erbiumatomen in Innsbruck belegten, dass die Stabilisierung durch Quantenfluktuationen eine allgemeine und qualitativ neu entdeckte Eigenschaft stark dipolarer Gase ist und nicht etwa eine Besonderheit von Dysprosium [3]. Bei diesen Experimenten kam eine andere Fallen-geometrie zum Einsatz. Wurde die Stärke der kurzreichweitigen Wechselwirkung reduziert, zeigte sich ein Übergang von einem regulären molekularfeldstabilen Kondensat zu einem einzigen Makrotropfchen. Simulationen stimmten sehr gut mit den Messergebnissen überein und unterstrichen quantitativ die wesentliche Rolle der Quantenfluktuation.

Theoretische Überlegungen offenbarten zudem einen Parameterbereich, in welchem die Oberflächenspannung zu selbst gebundenen Tropfchen führt. In Experimenten mit Dysprosium gelang es kürzlich, diese Voraussage zu bestätigen [7]. Dazu wurde die



**Abb. 1** Ablauf des Experiments mit Dysprosiumatomen: Ein Tröpfchen wird zuerst in einer optischen Falle hergestellt (a); nach dem Abschalten der Falle wird das Tröpfchen magnetisch zum Schweben gebracht und nach einer festen Zeit  $t_{\text{levit}}$  abgebildet. Ein Tröpfchen mit einer großen Teilchenanzahl  $N$

(b) bleibt länger selbst gebunden als ein Tröpfchen mit geringer Teilchenanzahl (c). Nach etwa 70 ms sinkt bei großem  $N$  die Teilchenzahl durch Atomverluste unter den kritischen Wert  $N_{\text{krit}}$ , und die Teilchen des Tröpfchens fliegen abrupt auseinander.

zugrundeliegende Falle entfernt. Ein magnetisches Feld diente dazu, die Gravitation zu kompensieren und die Atome zum Schweben zu bringen. Während das Kondensat typischerweise nach Entfernen der Falle schnell in alle Richtungen expandiert, bilden genügend große Dysprosiumtröpfchen aufgrund der Quantenstabilisierung aber das erste dreidimensionale selbst gebundene Kondensat überhaupt.

Diese Experimente haben fundamental neue Physik im Feld der ultrakalten dipolaren Gase offenbart, die sich qualitativ von nicht-dipolaren Systemen unterscheiden. Theorie und Experiment stehen dadurch vor einer Vielzahl neuer faszinierender Fragen und Herausforderungen. Dazu zählen die Un-

tersuchung der Eigenschaften von selbst gebundenen Tröpfchen und von Quantentropfchen in niedrigdimensionalen Systemen sowie die Erzeugung extrem niedriger Temperaturen.

Falk Wächtler und Luis Santos

- [1] H. Kadau et al., Nature **530**, 194 (2016)
- [2] T. D. Lee, K. Huang und C. N. Yang, Phys. Rev. **106**, 1135 (1957)
- [3] L. Chomaz et al., Phys. Rev. X **6**, 041039 (2016)
- [4] D. S. Petrov, Phys. Rev. Lett. **115**, 155302 (2015)
- [5] I. Ferrier-Barbut et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 215301 (2016)
- [6] F. Wächtler und L. Santos, Phys. Rev. A **93**, 061603(R) (2016); R. N. Bisset et al., Phys. Rev. A **94**, 033619 (2016)
- [7] M. Schmitt et al., Nature **539**, 259 (2016)

Dr. Falk Wächtler und Prof. Dr. Luis Santos, Institut für Theoretische Physik, Leibniz Universität Hannover

Das Physikportal

pro-physik.de

Registrieren Sie sich jetzt auf

[www.pro-physik.de/register](http://www.pro-physik.de/register)

und folgen Sie uns auf Facebook und Twitter.

WILEY-VCH