

## ■ Flimmerndes Kondensat

Ein Experiment mit Photonen weist große Fluktuationen der Teilchenzahl in einem idealen Bose-Einstein-Kondensat nach.

Die Erforschung von Bose-Einstein-Kondensaten ist auch nach fast zwanzig Jahren noch ein „heißes Eisen“. Das liegt zum einen daran, dass ultrakalte Quantengase in idealer Weise prädestiniert sind, physikalische Phänomene zu simulieren, die eigentlich anderen Teildisziplinen zuzuordnen sind. Zum anderen werden ständig weitere Bose-Einstein-Kondensate präpariert, was nicht nur die Universalität dieses makroskopischen Quantenphänomens unterstreicht, sondern häufig auch neue Perspektiven für die Grundlagenforschung eröffnet. Ein Paradebeispiel hierfür ist das Bose-Einstein-Kondensat von Photonen, welches das Team um Martin Weitz an der Universität Bonn 2010 bei Raumtemperatur realisierte [1, 2]. Die jüngste Arbeit zur Photonenzahlstatistik zeigt, dass sich mit dieser neuen kohärenten Lichtquelle sogar grundlegende Fragen der statistischen Physik untersuchen lassen [3].

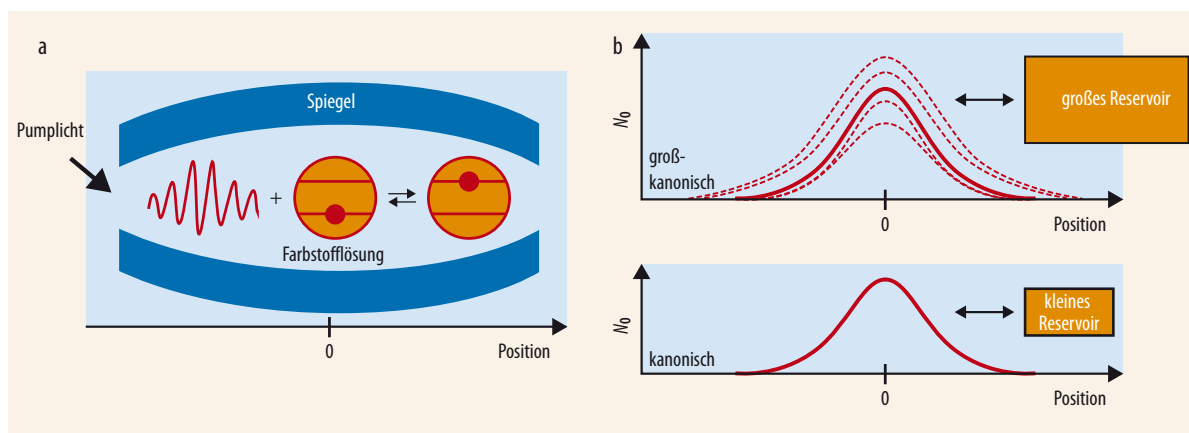
Bose-Einstein-Kondensate werden, wie auch andere Vielteilchensysteme im thermischen Gleichgewicht, statistisch im Rahmen der Ensembletheorie beschrieben [4]. Hierzu betrachtet man eine fiktive Menge solcher Systeme unter gleichartigen thermodynamischen Bedingungen, die sich aber in ihren jeweiligen mikroskopischen

Realisierungen unterscheiden. Ein solches Ensemble ermöglicht statistische Vorhersagen in Form von Ensemblemittelwerten, die sich mit thermodynamischen Größen identifizieren lassen. So beschreibt das mikrokanonische Ensemble ein isoliertes System, das keinen Kontakt zur Umgebung hat, sodass sowohl Energie als auch Teilchenzahl fest vorgegeben sind. Im Unterschied dazu fluktuiert im kanonischen Ensemble die Energie um einen Ensemblemittelwert, der durch die Temperatur eines angekoppelten Wärmereservoirs bestimmt ist. Im großkanonischen Ensemble kann das betrachtete System sogar Energie und Teilchen mit einem Reservoir austauschen, was zu Fluktuationen in beiden Größen führt.

Ist man am thermodynamischen Limes eines unendlich großen Systems interessiert, so sind diese verschiedenen Zugänge in der Regel in dem Sinne austauschbar, dass die Vorhersagen aller drei Ensembles für eine thermodynamische Größe übereinstimmen. Als statistischer Physiker wählt man daher im thermodynamischen Limes häufig das Ensemble für eine konkrete Rechnung, das den geringsten Aufwand verspricht. Beispielsweise muss ein atomares Bose-Einstein-Kondensat mit Hilfe magnetischer

Fallen von seiner Umgebung isoliert werden, damit es sich mit ausgeklügelten Kühlverfahren auf Temperaturen von weniger als ein Millionstel Kelvin abkühlen lässt. Damit werden zwar atomare Bose-Einstein-Kondensate experimentell als mikrokanonisches Ensemble präpariert, der Einfachheit halber aber häufig als großkanonisches Ensemble beschrieben. Dies ist aber natürlich nur dann gerechtfertigt, wenn die relativen Teilchenfluktuationen des großkanonischen Ensembles im thermodynamischen Limes verschwinden, also  $\delta N/N \rightarrow 0$  für die mittlere Teilchenzahl  $N$  und ihre Standardabweichung  $\delta N$ .

Überraschenderweise ist diese Annahme aber beim großkanonischen Ensemble des idealen Bose-Gases größtmöglichst verletzt. Aufgrund der Bose-Einstein-Statistik weist dort die Besetzung eines beliebigen Einteilchen-Zustandes relative Fluktuationen von 100 Prozent auf [4]. Da dies aber auch für die makroskopische Besetzung des Grundzustandes in einem Bose-Einstein-Kondensat gilt, folgt hieraus  $\delta N_0 \approx N_0$ . In der Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes, wenn also fast alle Bosonen in den Grundzustand kondensiert sind, sollten dann statistische Fluktuationen von der Größenordnung



Bose-Einstein-Kondensat von Photonen in Mikrokavität mit Farbstofflösung (a) [1]: Farbstoffmoleküle im Resonator absorbieren und emittieren ständig die Photonen des Pumplichts. Die Farbstoff-

lösung bildet daher sowohl ein Wärme- als auch ein Teilchenreservoir. Ist das Reservoir groß genug, fluktuiert die Photonenzahl im Kondensat stark (großkanonische Bedingungen, b) [3].

Diese Fluktuationen verschwinden für ein kleineres Reservoir, sodass kanonische Bedingungen vorliegen.

der Teilchenzahl auftreten, also  $\delta N \approx N$ . Angesichts dieser virulenten Teilchenzahlfluktuationen oder „großkanonischen Fluktuationkatastrophe“ [5] ergibt sich eine paradoxe Situation: Auch wenn das großkanonische Ensemble des idealen Bose-Gases im thermodynamischen Limes beispielsweise die Kondensationstemperatur oder die Grundzustandsbesetzung richtig vorhersagt, so versagt es offenbar bei der Behandlung der Teilchenzahlfluktuationen. Theoretiker haben daher sogar die radikale These vertreten, dass das großkanonische Ensemble des idealen Bose-Gases unterhalb der Kondensationstemperatur gar kein physikalisches System beschreibt [6].

Dem Bonner Team ist es nun aber gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat von Photonen unter großkanonischen Bedingungen nachzuweisen [3]. In diesem Experiment regt ein Laser in einer Mikrokavität Photonen an, deren Bewegung senkrecht zu den beiden Spiegeln „ausgefroren“, parallel

dazu aber kaum eingeschränkt ist. Dadurch verhalten sich die masselosen Photonen im dreidimensionalen Hohlraum effektiv wie ein zweidimensionales Gas nicht-relativistischer massiver Teilchen. Da die beiden Hohlraumspiegel außerdem leicht gekrümmt sind, befindet sich das massive zweidimensionale Photonengas effektiv in einem harmonischen Potential [1, 2]. Für das Bonner Experiment ist nun entscheidend, dass der Hohlraum zwischen den Spiegeln mit einer Farbstofflösung gefüllt ist (Abb. 1a). Häufige Stöße des Lösungsmittels mit den Farbstoffmolekülen regen deren interne Schwingungs- und Rotationszustände ständig an und ab. Dabei ist der Farbstoff so gewählt, dass bei diesen inkohärenten Absorptions- und Emissionsprozessen das Photonengas im Hohlraum beteiligt ist. Dadurch wirkt die Farbstofflösung zum einen als Wärmereservoir, welches das effektiv zweidimensionale Gas massiver Photonen bei Raumtemperatur ins thermische Gleichgewicht

bringt [7]. Aufgrund der ständigen Umwandlung von Photonen und Farbstoffmolekülen im Grund- und im angeregten Zustand bilden die Farbstoffmoleküle aber auch ein Teilchenreservoir. Dabei ist nur die Gesamtzahl von Photonen und molekularen Anregungen konstant. Im Gegensatz zu einem atomaren Bose-Gas ist die Zahl der Photonen also nicht erhalten.

Diese Teilchenzahlfluktuationen des Photonengases in der kondensierten Phase lassen sich experimentell mit Hilfe einer zeitaufgelösten Intensitätsmessung untersuchen [3]. Befinden sich 30 Prozent aller Photonen in der Mikrokavität im Kondensat, so kommt es zu relativen Fluktuationen der Kondensatteilchenzahl  $\delta N_0/N_0$  von etwa 80 Prozent. Dieses ungewöhnlich starke Flimmern entspricht genau der zu erwartenden großkanonischen Fluktuationkatastrophe des idealen Bose-Gases [5]. Dabei ist das Photonengas insofern ideal, als die Selbstwechselwirkung der Photonen vernachlässigbar klein ist [1].

Priv.-Doz. Dr. Axel Pelster, Fachbereich Physik und Forschungszentrum OPTIMAS, Technische Universität Kaiserslautern, Erwin-Schrödinger-Straße 46, 67663 Kaiserslautern

Den Bonner Physikern ist es außerdem gelungen, den Reservoirtyp und damit die Ensemblebedingungen gezielt zu verändern: Zum einen ist die Zahl der Farbstoffmoleküle variierbar. Zum anderen lässt sich über die chemische Zusammensetzung der Moleküle deren Anregungsfrequenz gegenüber der Frequenz der Kavitätsmode verschieben, was die Kopplung des Photonengases an das Teilchenreservoir beeinflusst. Diese beiden Kontrollparameter erlauben es, die effektive Größe des Teilchenreservoirs um etwa drei Größenordnungen zu modifizieren. Ist das Teilchenreservoir klein ge-

nug, verschwinden schließlich die relativen Fluktuationen der Kondensatteilchenzahl  $\delta N_0/N_0$  sogar, was dem kanonischen Ensemble entspricht (Abb. 1b). Die gemessene Photonenstatistik beim kontinuierlichen Übergang zwischen großkanonischem und kanonischem Ensemble lässt sich mit Hilfe eines einfachen statistischen Modells sogar quantitativ verstehen [8]. Damit ist es erstmalig gelungen, einen vom Ensemble abhängigen statistischen Effekt in einem Bose-Einstein-Kondensat experimentell zu detektieren. In Zukunft wird zu untersuchen sein, inwieweit ein solches gezieltes Reservoirdesign

auch bei anderen Bose-Einstein-Kondensaten möglich ist.

Axel Pelster

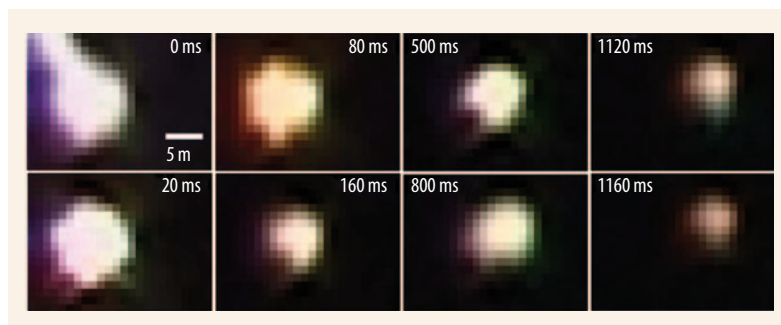
[1] J. Klaers, J. Schmitt, F. Vewinger und M. Weitz, *Nature* **468**, 545 (2010)  
 [2] A. Pelster, *Physik Journal*, Januar 2011, S. 20  
 [3] J. Schmitt et al., *Phys. Rev. Lett.* **112**, 030401 (2014)  
 [4] F. Schwabl, *Statistische Mechanik*, 3. Auflage, Springer, Berlin (2006)  
 [5] M. Holthaus, E. Kalinowski und K. Kirsten, *Ann. Phys. (N.Y.)* **270**, 198 (1998)  
 [6] R.M. Ziff, G.E. Uhlenbeck und M. Kac, *Phys. Rep.* **32**, 169 (1977)  
 [7] J. Klaers, F. Vewinger und M. Weitz, *Nat. Phys.* **6**, 512 (2010)  
 [8] J. Klaers et al., *Phys. Rev. Lett.* **108**, 160403 (2012)

## ■ Kugelblitz in freier Wildbahn

In China ist es erstmals gelungen, einen Kugelblitz gleichzeitig zu filmen und spektroskopisch zu untersuchen.

Nach jedem meiner Vorträge über Entladungen in und um Gewitterwolken [1] fragt unvermeidlich jemand aus dem Publikum nach Kugelblitzen. Das ist eigentlich erstaunlich, denn die meisten Menschen – zumindest in West-Europa – haben noch nie einen gesehen. Dennoch scheinen sie interessanter zu sein als die gewaltigen Blitze, die sich vor unseren Augen ereignen – insbesondere bei einem Urlaub am Mittelmeer oder in den Tropen. Wahrscheinlich liegt die Attraktion darin, dass Kugelblitze sich durch ihre Seltenheit bislang der wissenschaftlichen Erforschung im Wesentlichen entzogen haben und die Wissenschaft herauszufordern scheinen.

Chinesischen Wissenschaftlern ist es jetzt aber gelungen, einen Kugelblitz „in freier Wildbahn“ genau zu beobachten und zu vermessen – ein echter Glückstreffer [2]. Das eigentliche Ziel der Untersuchung auf einer Hochebene im Nordwesten Chinas war, das Spektrum von Wolke-Erde-Blitzen zu messen, die dort sehr häufig auftreten. Bei einer Messung erzeugte ein solcher Blitz an seinem Einschlagpunkt eine runde Leuchterscheinung, die anschließend noch 1,64 Sekunden lang zu



Die vergrößerten Farbbilder des Kugelblitzes zeigen einen deutlichen Farb-

wechsel, der im Einklang mit den spektroskopischen Beobachtungen ist.

sehen war. Das Ereignis hielt eine digitale Videokamera mit 50 Bildern pro Sekunde fest und zeitweise auch eine Hochgeschwindigkeitskamera mit 3000 Bildern pro Sekunde. Vor den Kameralinsen waren jeweils Transmissionsbeugungsgitter montiert, um das Spektrum aufzunehmen. Die Beobachtung war zudem GPS-kontrolliert.

Anhand der Verzögerung des Donners gegen den Blitz und aufgrund der Bilder des Blitzereignisses in einen Hang ließ sich die Entfernung auf 900 Meter abschätzen. Der glühende Ball hatte demnach einen Durchmesser von etwa fünf Metern und bewegte sich in der Bildebene mit 8,6 m/s seitwärts und gleichzeitig leicht aufwärts, wobei er wahrscheinlich vom Boden abhob.

Die neuseeländischen Chemiker John Abrahamson und James Dinniss schlugen vor 15 Jahren eine viel versprechende Theorie dafür vor, wie bei einem Blitzeinschlag im Boden eine runde, sekundenlange Leuchterscheinung entstehen kann [3, 4]. Ausgangspunkt ist die bekannte Tatsache, dass Blitze die Gesteine an ihrem Einschlagpunkt aufschmelzen und im Boden Fulgurite („Blitzverglasung“) bilden können. Dabei verdampft ein Teil des in der Regel silikathaltigen Bodens. In Folgeereignissen löst der ebenfalls enthaltene Kohlenstoff den Sauerstoff der Silikate. Es entsteht ein heißes Gas aus Siliziumatomen. Diese können filamentartige Netzwerke bilden, ähnlich wie aus Kohlenstoff ausgedehnte Struk-