

This is the peer reviewed version of the following article:

Klaers, Jan; Schmitt, Julian; Vewinger, Frank; Weitz, Martin (2011)
„Bose-Einstein-Kondensat aus Licht.“
Physik in unserer Zeit **42** (2), S. 58–59.
DOI: 10.1002/piuz.201190007.

which has been published in final form at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.201190007/>.

This article may be used for non-commercial purposes in accordance with Wiley Terms and Conditions for Self-Archiving.

Bose-Einstein-Kondensat aus Licht

Bose-Einstein-Kondensate (BEC) stellen einen Zustand von Quantengasen dar, den Satyendra Nath Bose und Albert Einstein in den 1920er Jahren für ein Gas von idealen Bosonen vorausgesagt haben [1]. In einem BEC verhalten sich die Teilchen im Grundzustand wie ein einzelnes „Superteilchen.“ Dies wurde erstmals 1995 mit atomaren Gasen realisiert, die auf Temperaturen im Nanokelvinbereich gekühlt wurden (Phys. Unserer Zeit 1996, 27 (5), 200 und 2003, 34 (4), 168). Seitdem gab es viele weitere Experimente mit verschiedenen bosonischen Teilchen, lediglich mit dem wohl bekanntesten Vertreter, dem Photon, ließ sich bislang kein BEC herstellen. Dies gelang kürzlich unserer Gruppe an der Universität Bonn [2].

Ein BEC entsteht bei Abkühlung eines Bosonengases in einem Phasenübergang. Dabei nimmt es einen Zustand mit makroskopischer Besetzung des Grundzustands ein. Im Energiespektrum erhält man unterhalb einer (dichteabhängigen) kritischen Temperatur eine scharfe Spitze bei der niedrigsten Energie des Systems, gefolgt von einem breiten „thermischen Schwanz.“ Im Gegensatz zu allen anderen Bosonen bildet ein Teilchenensemble von Photonen ein nahezu ideales bosonisches Gas. Dennoch lässt sich ein BEC aus Photonen nur schwer herstellen, weil die Teilchenzahl bei Abkühlung nicht erhalten ist.

Das bekannteste Beispiel eines Photonengases ist wohl die Schwarzkörperstrahlung, die im thermischen Gleichgewicht mit perfekt absorbierenden (schwarzen) Wänden steht. Diese zeigt bei Abkühlung eine Verschiebung des Spektrums in den langwelligen (roten) Bereich, das heißt die mittlere Energie sinkt. Gleichzeitig nimmt die Teilchenzahl ab, da die Photonen bei

kleinen Temperaturen an den Wänden absorbiert werden, statt zu kondensieren.

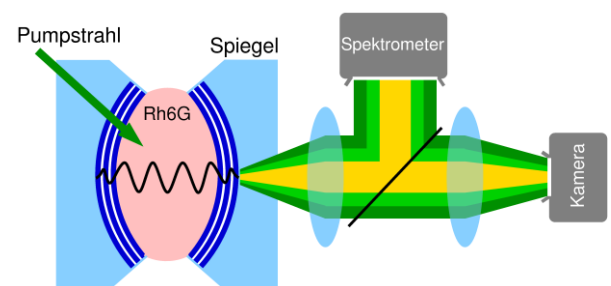


ABB. 1 EXPERIMENT

In den mit Farbstoff (Rh6G) gefüllten Raum zwischen zwei hoch reflektierenden Spiegeln werden über einen Pumplaser Photonen eingebracht, die durch Stöße mit dem Farbstoff thermalisieren. Ein Spektrometer misst das Photonenpektrum, die Kamera bildet die räumliche Verteilung der Photonen im Resonator ab.

Um ein BEC zu erzeugen, muss also die Teilchenzahl der Photonen während der Thermalisierung konstant gehalten werden. In unserem Experiment verhindern wir die Verschiebung des Spektrums zu niedrigen Energien, indem wir das Licht zwischen zwei gekrümmten Spiegeln einschließen, deren Abstand im Mikrometerbereich liegt (Abbildung 1). Licht mit einer Wellenlänge, die größer ist als der Abstand der Spiegel, darf sich nicht mehr zwischen den Spiegeln aufhalten. Nur Licht mit Wellenlängen kleiner als diese maximale Wellenlänge kann sich zwischen den Spiegeln ausbreiten. Anders gesagt: Nur Photonen mit einer Energie größer als eine Minimalenergie werden gespeichert. Damit verhindern wir, dass das Photonengas bei Abkühlung immer „röter“ wird und sorgen für eine Erhaltung der Teilchenzahl. Außerdem wirken die gekrümmten Spiegel wie eine Falle für Photonen: Energiearme (gelbe) Photonen halten sich nahe der Verbindungsachse zwischen den Spiegeln auf, energiereiche (grüne)

Photonen sind auch in den Randbereichen zu finden.

Als nächste Zutat brauchen wir einen Mechanismus, der die Photonen in ein thermisches Gleichgewicht mit der Umgebung bringt. Dazu bringen wir als Wärmebad Farbstoffmoleküle in Lösung zwischen die Spiegel. Das Photonengas tritt durch Streuung an den Farbstoffmolekülen in thermischen Kontakt mit der Lösung, und es ergibt sich eine thermische Verteilung der Photonenenergien oberhalb der Minimalenergie, deren Breite durch die Temperatur der Farbstofflösung gegeben ist. Da die Minimalenergie (etwa 2,1 eV in unserem Fall) deutlich größer als die thermische Energie ist (etwa 1/40 eV bei Raumtemperatur) tritt im Gegensatz zur Schwarzkörperstrahlung keine spontane (thermische) Erzeugung (oder Vernichtung) von Photonen auf. Die Thermalisierung, durch die das Gas der Photonen die Farbstofftemperatur annimmt, erhält folglich die Teilchenzahl [3].

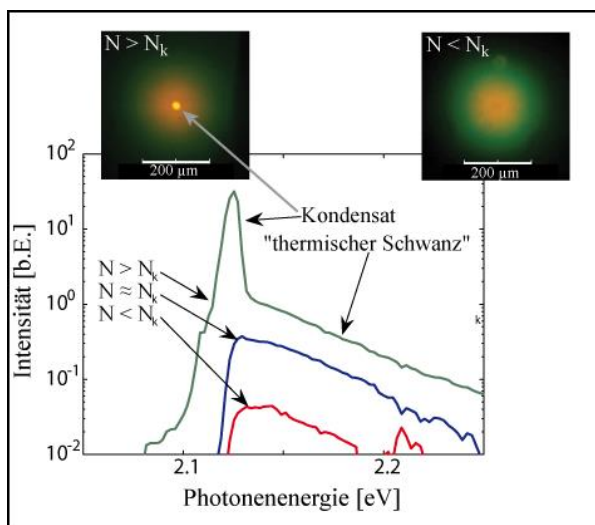


ABB. 2 DAS ENERGIESPEKTRUM

Das Energiespektrum der Photonen zeigt unterschiedliches Verhalten, abhängig von der Photonenzahl im Resonator. Für kleine Photonenzahlen ergibt sich eine breite thermische Verteilung, für große Teilchenzahlen bildet sich zusätzlich ein charakteristischer Peak bei der Energie der Grundmode: das Bose-Einstein-Kondensat. Es erscheint in der räumlichen Verteilung der Photonen als helles Maximum.

Analog zu atomaren Gasen wird bei Photonen eine Bose-Einstein-Kondensation erwartet, wenn die thermische DeBroglie-Wellenlänge der Teilchen vergleichbar mit ihrem Abstand ist. Dies wird bei atomaren Gasen durch Abkühlen des Gases erreicht, da eine Erhöhung der Dichte zu Drei-Körper-Stößen und damit zu Verlusten führen würde. Da dies bei Photonen nicht auftritt, kann in unserem Aufbau der einfacher zugängliche Weg über die Teilchendichte gewählt werden, um die Kondensation zu erreichen. Erhöht man bei gegebener Temperatur die Zahl der Photonen zwischen den Spiegeln und verringert damit ihren mittleren Abstand, so erhält man das erwartete Verhalten: Ab einer kritischen Teilchenzahl N_k von etwa 70 000 ist in Abbildung 2 neben einem breiten thermischen Schwanz ein spektral scharfer Peak zu beobachten, eine Signatur für die makroskopische Besetzung des energetisch tiefsten Zustands. Das Bose-Einstein-Kondensat zeigt sich auch in der räumlichen Verteilung als helles Maximum auf einem breiten thermischen Untergrund.

Mit dem Photonen-BEC steht ein Modellsystem zur Untersuchung eines extrem schwach wechselwirkenden Quantengases zur Verfügung. Neben zahlreichen interessanten Aspekten für die Grundlagenforschung hat unser Verfahren auch praktische Anwendungen: Unter anderem sollte es möglich sein, neuartige kohärente Lichtquellen im kurzwelligen Ultraviolettbereich zu konstruieren.

- [1] A. Einstein, Sitz.ber. Preuss. Akad. Wiss. **1925**, *I*, 3.
- [2] J. Klaers et al., Nature **2010**, 468, 545.
- [3] J. Klaers et al., Nature Phys. **2010**, 6, 512.