ETH zürich

ETH Library

Critical behavior of a trapped interacting Bose gas

Doctoral Thesis

Author(s):
Donner, Tobias Ulrik

Publication date:
2008

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-005626637

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH No. 17793

Critical Behavior of a Trapped Interacting Bose Gas

A dissertation submitted to the
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

ULRIK TOBIAS DONNER

Dipl.-Phys., University of Tübingen, Germany
born 13.10.1977 in Uppsala, Sweden
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Tilman Esslinger, examiner
Prof. Dr. Frédéric Merkt, co-examiner

2008

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurde erstmals experimentell das kritische Regime eines gefangenen, schwach wechselwirkenden Bosegases studiert. Charakteristisch für dieses Regime, das in unmittelbarer Nähe um den Phasenübergang zum Bose-Einstein Kondensat liegt, sind starke Fluktuationen des Ordnungsparameters. Bei Annäherung an die kritische Temperatur divergiert die Korrelationslänge dieser Fluktuationen. Um diese Divergenz zu untersuchen, nutzen wir die Interferenz von Materiewellen und messen die räumliche Korrelationsfunktion erster Ordnung in Abhängigkeit von der Temperatur. Zwei Atomstrahlen werden aus unterschiedlichen Regionen eines Gases von ^{87}Rb Atomen ausgekoppelt und überlagert. Der Kontrast des resultierenden Interferenzmusters ist ein Maß für die Kohärenz der beiden Regionen. Um den Kontrast mit höchster Empfindlichkeit bestimmen zu können, setzen wir einen Resonator exzellenter Güte im stark koppelnden Regime ein, mit dem einzelne Atome im Interferenzmuster nachgewiesen werden können. Wir beobachten die Divergenz der Korrelationslänge und bestimmen den zugehörigen kritischen Exponenten der Korrelationslänge zu $\nu = 0.67 \pm 0.13$.

Wir präparieren ein Bosegas in einem Nichtgleichgewichtszustand, um das Wachstum langreichweitiger Ordnung am Phasenübergang zum Bose-Einstein Kondensat zu erforschen. Während das Gas thermalisiert und den Phasenübergang überquert, bestimmen wir Kohärenz und Dichte des Gases in Echtzeit. Dabei zeigt sich, dass das Wachstum der Kohärenz später einsetzt und früher endet als das Wachstum der Dichte.

Der Nachweis einzelner Atome in unserem Resonator stellt eine quantenmechanische Messung dar, bei der eine Materiewelle auf einen Zustand mit entweder einem oder keinem Atom im Resonator projiziert wird. Wir analysieren diesen Detektionsprozess, der auf der starken Kopplung einzelner Atome an das Lichtfeld des Resonators beruht. Die Transmission eines Lasers, der resonant mit dem leeren Resonator ist, wird stark reduziert, wenn bereits ein einzelnes Atom an das Lichtfeld koppelt. Mit dieser Methode

demonstrieren wir ein Lehrbuchbeispiel des Welle-Teilchen-Dualismus: In Analogie zum Doppelspaltversuch nach Young lassen wir einzelne Atome mit sich selbst interferieren und weisen sie dann mit Hilfe des Resonators nach.

Erstmals führen wir Experimente aus, in denen ein Bose-Einstein Kondensat kohärent mit dem Lichtfeld eines Resonators wechselwirkt. Mit Hilfe eines optischen Transportes können wir mehrere hunderttausend ultrakalte Atome in den Resonator transferieren, wo die Teilchen dann bis ins quantenentartete Regime gekühlt werden. Die neuartige Kombination von Bose-Einstein Kondensat und Resonator im stark koppelnden Regime eröffnet ein neues Gebiet der Hohlraum-Quantenelektrodynamik, in dem alle Atome identisch an das Lichtfeld koppeln. Mit einer Messung des Anregungsspektrums charakterisieren wir das System.

Abstract

The critical regime of the phase transition of Bose-Einstein condensation is studied for the first time in a trapped, weakly interacting Bose gas. In this regime, fluctuations on all length scales dominate the behavior of the gas, and the correlation length of these fluctuations diverges as the temperature approaches the critical temperature. To observe this divergence we apply a matter-wave interference technique and map out the first-order correlation function of a gas of ^{87}Rb atoms as a function of temperature. We extract two atomic beams from different regions in the sample and let them overlap. The visibility of the resulting interference pattern is a measure for the coherence of the two probed regions. An ultra-high finesse optical cavity in the strong coupling regime is used to detect single atoms in the interference pattern and to measure the visibility with ultimate sensitivity. We observe the diverging behavior of the correlation length and determine the critical exponent of the correlation length to be $\nu = 0.67 \pm 0.13$.

We apply the same interference technique to investigate in real-time the formation of long-range order in a gas crossing the phase transition to Bose-Einstein condensation, starting from a non-equilibrium situation. We find that the coherence growth starts later and ends earlier than the growth of the density of the gas. Furthermore we analyze the momentum distribution of the gas during the phase transition.

The detection of single atoms in our cavity realizes a quantum measurement of the presence of an atom, in which the matter wave is projected to a state with either one or zero atoms in the resonator. We analyze this detection process, which bases on the strong coupling of a single atom to the light field in the cavity mode. The transmission of a probe beam resonant with the empty cavity shows a significant drop if an atom couples to the cavity field. We exploit this method to demonstrate a prime example of the particle-wave duality: In a type of Young's double slit experiment we let individual atoms interfere with themselves and detect them with our cavity.

For the first time, experiments were carried out where a Bose-Einstein

condensate is coherently interacting with the light field of a resonator. Using an optical transport, we transfer several hundred thousand ultracold atoms into the cavity where we cool them to quantum degeneracy. A Bose-Einstein condensate strongly coupled to the light field of a resonator opens a new regime of cavity QED where all atoms identically couple to the cavity mode. We characterize the system by mapping out its low-excitation energy spectrum.