

Diss. ETH No. 19943

Experimental Realization of the Dicke Quantum Phase Transition

A dissertation submitted to the
ETH ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
KRISTIAN GOTTHOLD BAUMANN
Dipl.-Phys.,
Technische Universität München, Germany
born 7.4.1983 in Leipzig, Germany
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Tilman Esslinger, examiner
Prof. Dr. Johann Blatter, co-examiner

2011

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die erste experimentelle Realisierung des Quantenphasenüberganges im Dicke Modell vorgestellt. Wir betrachten die Quantenbewegung eines Bose-Einstein Kondensates die an einen optischen Resonator gekoppelt ist. Konzeptionell ist der Phasenübergang durch langreichweite Wechselwirkungen induziert, die zum Entstehen eines selbstorganisierten suprasoliden Zustandes führen.

Der Quantenphasenübergang im Dicke Modell wurde bereits 1973 vorhergesagt. Vor dieser Arbeit konnte dieser aber wegen grundlegenden und technologischen Gründen experimentell nicht nachgewiesen werden. Durch die Verwendung von atomaren Impulszuständen konnten wir diese Herausforderung nun bewältigen. Die Impulszustände werden durch Zweiphotonen-Übergänge miteinander gekoppelt, wobei je ein Photon aus dem Resonator und ein Photon aus einer transversalen Lichtwelle gebraucht werden. Diese offene Implementierung des Dicke Modells erlaubt es alle relevanten Parameter einzustellen und bietet eine einzigartige Detektionsmethode in Echtzeit.

Wir zeigen in dieser Doktorarbeit, dass der Phasenübergang von einem makroskopisch besetzten Feld im Resonator und einer starken Veränderung der atomaren Impulsverteilung begleitet ist. Diese Impulsveränderung wird durch spontane Selbstorganisation der atomaren Dichte auf einem Schachbrettmuster hervorgerufen. Wir haben die Grenze des Phasenübergangs durch Variieren von zwei Parametern im Dicke Modells abgetastet und das gemessene Phasendiagramm stimmt mit der Modellbeschreibung überein.

Die superradiante Phase erlaubt zwei verschiedene geometrische Konfigurationen was unausweichlich zu dem Konzept der spontanen Symmetriebrechung am Phasenübergang führt. Wir können die beiden Zustände experimentell unterscheiden und haben die Ursache für den Symmetriebrechung untersucht. Die endliche räumliche Ausdehnung unseres Systems induziert außerdem eine kleine symmetriebrechendes Feld, welches sich zufällig zwischen jeder experimentellen Realisierung ändert.

Abstract

We report on the first experimental realization of the Dicke quantum phase transition realized in the quantum motion of a Bose–Einstein condensate coupled to an optical cavity. Conceptually, the transition is driven by cavity-mediated long-range interactions, giving rise to the emergence of a self-organized supersolid phase.

The Dicke phase transition, predicted in 1973, has not been demonstrated experimentally before this work, both due to fundamental and technological reasons. These challenges have been overcome in the present thesis by employing atomic momentum states of a Bose-Einstein condensate, which are coupled via two-photon Raman transitions involving a cavity photon and a free-space pump photon. This open-system implementation of the Dicke model allows to tune all relevant parameters and offers a unique detection scheme to monitor the many-body system in real time.

We demonstrate that the phase transition is accompanied by a macroscopically occupied cavity field and a striking change in the atomic momentum distribution, due to spontaneous self-organization of the atomic density on a checkerboard lattice. The boundary of the transition is mapped out by scanning two parameters of the Dicke model, to reveal a phase diagram in close agreement with the model description.

Two different ordered configurations are allowed in the superradiant phase, giving rise to the concept of spontaneous symmetry breaking at the phase transition. We experimentally distinguish the symmetry-broken states and study the origin of the symmetry-breaking process. The finite spatial extension of our system induces a small symmetry-breaking field which changes randomly on each experimental realization. The influence of this field is studied and shown to diminish upon dynamically crossing the transition point with increasing transition rates.