



Doctoral Thesis

Exploring atomic quantum gases in optical lattices

Author(s):

Stöferle, Thilo

Publication Date:

2005

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005068694> →

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. 16109

Exploring Atomic Quantum Gases in Optical Lattices

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by
THILO STÖFERLE
Dipl.-Phys., University of Heidelberg, Germany
born 14.11.1974
citizen of Germany

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

2005

Kurzfassung

In dieser Dissertation werden Experimente vorgestellt, mit denen ein neuartiger Zugang zu stark korrelierten Systemen mit atomaren Quantengasen realisiert wurde. Quantenentartete bosonische und fermionische Atome werden im periodischen Potential eines optischen Gitters untersucht. Mit der in dieser Doktorarbeit aufgebauten Apparatur ist es erstmals möglich, Effekte von Dimensionalität und Wechselwirkung sowohl in bosonischen als auch fermionischen Systemen zu studieren.

Durch den starken Einschluss des optischen Gitters werden kinematisch eindimensionale bosonische Atomgase erzeugt. Wird zusätzlich ein periodisches Potential entlang der Achse der 1D-Röhren angelegt, beobachten wir einen Übergang von einer eindimensionalen Supraflüssigkeit zu einem stark korrelierten Mott-Isolator. Beide Regimes werden durch ihr verschiedenartiges Anregungsspektrum charakterisiert. Messungen der Kohärenzeigenschaften zeigen, dass aus der Verminderung des Anteils an kohärenten Atomen nicht direkt auf das Auftreten einer Mott-isolierenden Phase geschlossen werden kann. Hingegen finden sich im Verhalten der Kohärenzlänge Hinweise, dass die Entstehung eines 1D Mott-Isolators bei einem signifikant kleineren Verhältnis zwischen Wechselwirkungs- und kinetischer Energie stattfindet als im dreidimensionalen System. Dies ist ein experimentelles Indiz für verstärkt auftretende Fluktuationen, die charakteristisch für 1D Systeme sind.

Wechselwirkende fermionische Quantengase sind fundamental für das Verständnis von Festkörpern. Wir eröffnen durch unsere Experimente mit quantenentarteten Fermi-Gasen in einem dreidimensionalen optischen Gitter einen neuen Blickwinkel auf diese Systeme. Die Fermi-Oberfläche der Atome in der Gitterstruktur kann direkt abgebildet werden und durch Änderung des Gitterpotentials lässt sich ein dynamischer Übergang von einem stark korrelierten Bandisolator zu einem "normalleitenden" Zustand hervorrufen. Durch die Benutzung einer Feshbach-Resonanz ist es möglich, die Wechselwirkung zwischen den Atomen beliebig einzustellen, sowohl abstossend als auch anziehend. Bei starker Wechselwirkung koppeln die niedrigsten Energiebänder des Gitters miteinander. Des weiteren erzeugen wir unter Ausnutzung des starken Einschlusses durch das optische Gitter ein 1D Fermi-Gas mit einstellbarer Wechselwirkung. Damit gelingt es uns, Moleküle in einem Regime zu erzeugen, in dem es in 3D Fermi-Gasen

keine gebundenen Zustände gibt.

Diese Experimente demonstrieren die einzigartigen Möglichkeiten, die sich mit atomaren Quantengasen in optischen Gittern bieten. So entstehen durch die sehr gut kontrollierbaren Parameter und den Zugang zu niederdimensionalen Systemen neue Perspektiven im Hinblick auf Fragestellungen der modernen Vielteilchenphysik.

Abstract

In this thesis I present experiments which demonstrate a novel avenue to strongly correlated physics with atomic quantum gases. Quantum degenerate bosonic and fermionic atoms are investigated in the periodic potential of an optical lattice. The apparatus we have built during this thesis enables us to uniquely access the effects of dimensionality and interactions in both bosonic and fermionic systems.

Exploiting the tight confinement provided by the optical lattice, we create the first kinematically one-dimensional atomic Bose gas. By applying an additional longitudinal periodic potential, we observe a transition from a 1D superfluid to a strongly correlated Mott insulator. Both phases are characterized by their distinct excitation spectrum. Measurements of the coherence properties reveal that the decrease of the coherent fraction in the system does not provide a direct indication when the Mott insulating phase is entered. However, in the coherence length we observe signatures for the emergence of a 1D Mott insulator at significantly smaller ratios of the interaction to the kinetic energy than the ones obtained for a three-dimensional system. This is an experimental indication of the increased fluctuations which are characteristic for 1D systems.

Interacting fermionic quantum gases are essential for the understanding of solid state materials. We open a new window to these systems by creating a quantum degenerate Fermi gas in a three-dimensional optical lattice. We can directly image the Fermi surface of the atoms in the lattice and induce a dynamical transition from a strongly correlated band insulator to a "conductive" state. By exploiting a Feshbach resonance, we are able to tune the interactions in the gas to arbitrary values, repulsive and attractive, and thereby generate a coupling between the lowest energy bands of the lattice. Furthermore, using the tight confinement of the optical lattice, we create a tunable 1D Fermi gas. We observe confinement induced molecules which exist in a regime where bound states are absent in a 3D Fermi gas.

These unique experiments demonstrate the unprecedented versatility of atomic quantum gases in optical lattices. The very controlled study of strongly correlated phases and the unparalleled direct access to low-dimensional systems opens up new perspectives onto fundamental questions of modern quantum many-body physics.