ETH zürich

ETH Library

Phase transitions in quantum condensed matter

Doctoral Thesis

Author(s):
Büchler, Hans Peter

Publication date:
2003

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004583896

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. 15104

Phase Transitions in Quantum Condensed Matter

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
(ETH Zürich)

for the degree of
Doctor of Natural Science

presented by

HANS PETER BÜCHLER

Dipl. Phys. ETH
born December 5, 1973
Swiss citizien

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J. W. Blatter, examiner
Prof. Dr. W. Zwerger, co-examiner
PD. Dr. V. B. Geshkenbein, co-examiner

2003

Abstract

In this thesis, phase transitions in superconducting metals and ultra-cold atomic gases (Bose-Einstein condensates) are studied. Both systems are examples of quantum condensed matter, where quantum effects operate on a macroscopic level. Their main characteristics are the condensation of a macroscopic number of particles into the same quantum state and their ability to sustain a particle current at a constant velocity without any driving force. Pushing these materials to extreme conditions, such as reducing their dimensionality or enhancing the interactions between the particles, thermal and quantum fluctuations start to play a crucial role and entail a rich phase diagram. It is the subject of this thesis to study some of the most intriguing phase transitions in these systems.

Reducing the dimensionality of a superconductor one finds that fluctuations and disorder strongly influence the superconducting transition temperature and eventually drive a superconductor to insulator quantum phase transition. In one-dimensional wires, the fluctuations of Cooper pairs appearing below the mean-field critical temperature T_{c0} define a finite resistance via the nucleation of thermally activated phase slips, removing the finite temperature phase transition. Superconductivity possibly survives only at zero temperature. The focus then is shifted on the quantum nucleation of phase slips which may trigger a superconductor to insulator transition. The transition present in infinite wires disappears in realistic wires of finite length. Here, we analyze the bosonic Cooper pair fluctuations in such realistic wires which are naturally coupled to their environment through the boundaries. We find, that the coupling to the environment provides the resurrection of a transition in the environmental parameters. The insulating state is characterized via the opening of an excitation gap. We discuss the phase diagram with different regimes exhibiting insulating and strong/weak superconducting behavior and identify distinctive features in the current-voltage characteristic pointing to these phases.

Strong quantum fluctuations are present in atomic gases confined to one dimension as well. The absence of an environment allowing for dissipative processes modifies the phase diagram. Probing the superfluid response in an atomic gas, we find that the perturbation itself acts as nucleation point for quantum phase

slips. We study the response in two geometries: while in a ring the quantum nucleation of phase slips is quenched, they proliferate in a finite tube with Bloch oscillations appearing at low driving velocities.

In a recent experiment, it has been shown that subjecting a Bose-Einstein condensate to an optical lattice allows to increase the effect of interactions and drive the system through a superfluid to Mott insulator transition. Here, we study this transition in one dimension. In this geometry, the strongly interacting limit with large phase fluctuations is achieved by either increasing the strength of the optical lattice or by increasing the transverse confinement. We map the problem in the weak- and strong confinement limit to two classical problems, the Bose-Hubbard model and the sine-Gordon model, respectively. Using this mapping we derive the complete phase diagram. The superfluid to Mott insulator transition is closely related to the superconductor to insulator transition in long superconducting wires. In both systems, the insulating phase is characterized by the opening of an excitation gap and the disappearance of phase coherence.

The recent progress in sympathetic cooling of bosons and fermions allows for the realization of degenerate Fermi gases. These Bose-Fermi mixtures represent a highly tunable laboratory system allowing for the realization of complex quantum phases. Subjecting such a two-dimensional Bose-Fermi mixture to an optical lattice, we demonstrate the emergence of a supersolid phase within the weak coupling description. A supersolid combines the main characteristics of superfluids, the presence of a condensate and superfluid stiffness, with crystalline order usually present in solids. Within this system the supersolid phase appears via a fermionic density wave instability, which in turn imprints a bosonic density modulation. We study the phase diagram in the weak coupling limit, where the supersolid instability competes with an instability towards phase separation.

The continuing miniaturization of devices has reached system sizes of ten nanometers, where quantum effects start to play a crucial role. The phase transitions studied in this dissertation provide fundamental insight into the behavior of quantum condensed matter under such extreme conditions. The deeper understanding gained in these model systems is important for the development of future technologies and further progress in miniaturization.

Kurzfassung

In der vorliegenden Dissertation werden Phasenübergänge in supraleitenden Metallen und in ultrakalten atomaren Gasen (Bose-Einstein Kondensate) untersucht. Beide Systeme sind Beispiele quantenkondensierter Materie, in der Quanteneffekte auf einem makroskopischen Niveau erscheinen. Ihre herausragendsten Eigenschaften sind die Kondensation einer makroskopischen Anzahl von Teilchen in denselben Quantenzustand und die Fähigkeit zum Transport eines verlustfreien Teilchenstromes. Setzt man diese Materialien extremen Bedingungen aus, wie zum Beispiel einer dimensionellen Reduktion oder einer starken Wechselwirkung zwischen den Teilchen, so spielen thermische und quantenmechanische Fluktuationen eine wichtige Rolle und bringen ein reichhaltiges Phasendiagramm hervor. In dieser Dissertation werden ausgewählte Phasenübergänge in diesen Systemen untersucht.

In niedrigdimensionalen Supraleitern unterdrücken Fluktuationen und Unordnung die kritische Temperatur des Supraleiters und können gar einen Phasenübergang zwischen dem Supraleiter und einem Isolator hervorrufen. Die starken Fluktuationen von Cooperpaaren, welche unterhalb der Paarungstemperatur T_{c0} erscheinen, führen via Nukleation von thermischen Phasensprüngen zu einem endlichen Widerstand in eindimensionalen Drähten. Der thermodynamische Phasenübergang bei endlichen Temperaturen verschwindet und Supraleitung kann nur noch beim absoluten Nullpunkt überleben. Das Interesse richtet sich dann auf die Nukleation von quantenmechanischen Phasensprüngen, welche einen Phasenübergang vom Supraleiter zum Isolator treiben können. Die Fluktuationen der bosonischen Cooperpaare in realistischen Drähten mit endlicher Länge koppeln mit der Umgebung. Der Übergang, welcher in unendlich langen Drähten vorhanden ist, verschwindet in endlichen Drähten. Andererseits erzeugt die Kopplung des Drahtes mit der Umgebung einen neuen Phasenübergang im Umgebungsparameter. Der isolierende Grundzustand ist durch eine Energielücke im Anregungspektrum ausgezeichnet. In der vorliegenden Arbeit untersuchen wir das Phasendiagramm und beschreiben die Strom-Spannungscharakteristik der einzelnen Phasen.

Ein ähnlicher Vorgang ist in eindimensionalen Bose-Einstein Kondensaten zubeobachten. Da keine dämpfenden Prozesse durch die Umgebung vorhanden

sind, wird das Phasendiagramm verändert. Die Untersuchung der superfluiden Antwort verlangt eine Störung im Medium, welche selber als Nukleationskeim quantenmechanischer Phasensprünge wirkt. Wir untersuchen zwei Geometrien mit endlicher Länge: in einem Ring ist die quantenmechanische Nukleation von Phasensprüngen verboten was eine superfluide Antwort hervorruft, während Phasensprünge in einem Tubus von endlicher Länge massenweise entstehen und eine nicht-superfluide Antwort bei kleinen Treibergeschwindigkeiten verursachen.

In einem kürzlich durchgeführten Experiment in atomaren Gasen, wurde ein Phasenübergang von einem Superfluidum zum Mottisolator beobachtet. Dieser Übergang ist getrieben durch die Präsenz eines optischen Gitters, welches es erlaubt den Einfluss von Wechselwirkungen zu verstärken. In dieser Arbeit wird dieser Übergang in eindimensionalen Systemen untersucht. Der stark wechselwirkende Grenzfall mit ausgeprägten quantenmechanischen Fluktuationen wird entweder durch ein starkes optisches Gitterpotential oder durch extremes Einsperren in einer Dimension erreicht. Dieser Übergang kann durch die Abbildung auf zwei klassische Modelle, das Bose-Hubbard Modell und das Sine-Gordon Modell beschrieben werden. Der Übergang ist eng verbunden mit dem Übergang vom Supraleiter zum Isolator in metallischen Systemen.

Der kürzlich erzielte Fortschritt beim Kühlen von Bose-Fermi Mischungen ermöglicht das Erreichen der fermionischen Quantenentartung. Diese Systeme von Bose-Fermi Mischungen erlauben die Analyse von komplexen Quantenphasen. In dieser Arbeit wird das Erscheinen eines Superkristalles in zweidimensionalen Bose-Fermi Mischungen unter dem Einfluss eines optischen Gitters demonstriert. Ein Superkristall kombiniert die superfluide Antwort mit der kristallinen Struktur eines Festkörpers. Der Superkristall entsteht durch eine Dichtewelleninstabilität der Fermionen, welche auch eine Dichtemodulation der Bosonen nach sich zieht. Wir untersuchen das Phasendiagramm im Grenzfall schwacher Wechselwirkung und analysieren das kompetitive Verhalten zwischen der Superkristallinstabilität und der Phasenseparation.

Elektronische Schaltkreise haben dank fortschreitender Miniaturisierung Grössen im Nanometerbereich erreicht wo Quanteneffekte ein wichtige Rolle spielen. Die Phasenübergänge, die in dieser Dissertation untersucht werden, ermöglichen eine tiefere Einsicht in das Verhalten von quantenkondensierter Materie unter solch extremen Bedingungen. Das in diesen Systemen gewonnene Wissen ermöglicht die Entwickelung von neuen Bauteilen und weitere Fortschritte in der Miniaturisierung technologisch relevanter Systeme.