

Abstract

Many-body quantum systems with strong interactions give rise to some of the most intriguing phenomena in physics. This is especially true when the system's dimensionality is reduced and when quantum correlations dominate the system's behavior. Ultracold atoms in optical lattices present a model system to study many-body physics. They offer control over almost all system parameters, they provide clean external potentials and they allow for a direct detection process. In particular, ultracold atoms in optical lattice potentials permit the study of quantum physics in low-dimensional geometry.

This thesis presents a series of experiments that study a quantum gas of strongly interacting cesium atoms in one-dimensional (1D) geometry. We employ optical lattice potentials to confine a Bose-Einstein condensate to an array of 1D tubes. Within each tube the confining potential "freezes out" any transversal motion of the particles, and thus creates a quasi 1D system. Furthermore, the confinement strongly affects the atomic scattering process along the tubes, giving rise to a new type of scattering resonance, called confinement induced resonance (CIR). We observe CIRs by an increase in particle loss and heating. They allow us to tune interparticle interactions in 1D geometry and to access regimes with strong particle correlations.

For increasing interactions we access the regimes of a non-interacting gas, the 1D Thomas Fermi regime and we approach the limit of a Tonks-Girardeau (TG) gas, i.e. a gas of impenetrable bosons. Quickly crossing a CIR preserves and even strengthens the correlations of the many-body state from one side of the resonance to the other. As a result an excited, strongly-correlated phase is formed, called the super Tonks-Girardeau (STG) gas, which is metastable despite strong attractive interactions. The interaction regimes and the existence of the STG phase are verified by observing characteristic changes in hydrodynamic properties of the gas.

We add a shallow lattice potential along the axis of the 1D systems and drive a phase transition from a TG gas to a Mott insulator. For commensurate density, i.e. for an average density of one atom per lattice site, and for sufficiently large repulsive interactions an arbitrarily small periodic perturbation "pins" the atoms immediately. This so-called "pinning transition" is driven by tuning interactions. We observe the appearance of an energy gap in the excitation spectrum and a change in the transport properties of the gas. The complete phase diagram of the Mott insulator transition is determined all the way from vanishingly small lattice depth to the tight binding regime. As a result, we connect the physics of two important models of condensed-matter physics, the Bose-Hubbard model and the sine-Gordon model.

Zusammenfassung

Quantenmechanische Vielteilchensysteme mit starker Teilchenwechselwirkung zeigen erstaunliche Effekte. Besonders deutlich wird dies in Systemen mit reduzierter räumlicher Dimensionalität und in Systemen deren Eigenschaften stark von Teilchenkorrelationen dominiert werden. Ultrakalte Atome in optischen Gittern bilden ein ideales Testsystem, um diese Effekte der Vielteilchenphysik zu untersuchen. Fast jeder Parameter kann hier frei gewählt werden. Sie ermöglichen komplexe, externe Potentiale, und sie erlauben einen direkten Detektionsprozess der Atome. Insbesondere ermöglichen sie es, quantenmechanische Effekte in niedrigen Dimensionen zu untersuchen.

Diese Arbeit diskutiert eine Reihe von Experimenten zu eindimensionalen (1D) Quantengasen aus stark wechselwirkenden Cäsium Atomen. Die eindimensionalen Systeme werden dabei mit Hilfe eines optischen Gitters erzeugt, das die Atome entlang eines röhrenförmigen Potentials einschließt und die transversale Bewegung der Teilchen komplett "ausfriert". Wir transferieren ein Bose-Einstein Kondensat in diese Anordnung aus 1D Fallen und untersuchen die atomaren Streuprozesse innerhalb der 1D Systeme. Der starke Einschluss modifiziert dabei die Wechselwirkung zwischen den Atomen und ermöglicht uns über die Beobachtung von Teilchenverlusten und Heizeffekten den Nachweis einer sogenannten Einschlussresonanz. Diese Resonanz kann dazu verwendet werden, die Wechselwirkung der Teilchen zu kontrollieren und stark korrelierte Systeme zu erzeugen.

Wir untersuchen die hydrodynamischen Eigenschaften eindimensionaler Quantengase mit unterschiedlich starker Wechselwirkung. Für repulsive Wechselwirkung werde drei Regime beobachtet: nicht wechselwirkende Teilchen, das von Wechselwirkungen dominierte Thomas-Fermi Regime und im Grenzfall starker Wechselwirkung das sogenannte Tonks-Girardeau Gas. Ein schneller Wechsel von repulsiver zu attraktiver Wechselwirkung mit Hilfe der Einschlussresonanz erzeugt einen angeregten, stark korrelierten Zustand. Dieser sogenannte super Tonks-Girardeau Zustand ist trotz starker attraktiver Wechselwirkung zwischen den Teilchen metastabil.

Ein zusätzliches schwaches optisches Gitter ermöglicht uns, einen Phasenübergang vom Tonks-Girardeau Gas zu einem Mott Isolator zu untersuchen. Stimmt der mittlere Abstand der Atome mit dem Gitterabstand überein, reicht ein beliebig schwaches Gitterpotential, um die Atome zu lokalisieren. Wir treiben diesen sogenannten „Pinning-Übergang“ mit Hilfe der Wechselwirkung und weisen den Mott Isolator Zustand über eine Energielücke im Anregungsspektrum und über das Transportverhalten der Atome nach. Wir bestimmen das komplette Phasendiagramm des Mott Isolator Übergangs von schwachen zu tiefen Gitterpotentialen und verbinden somit zwei wichtige Modelle der Physik der kondensierten Materie, das Bose-Hubbard Model und das sine-Gordon Model.