



Doctoral Thesis

Microscopic probing and manipulation of ultracold fermions

Author(s):

Müller, Torben

Publication Date:

2011

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006492339> →

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. 19606

Microscopic Probing and Manipulation of Ultracold Fermions

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

TORBEN MÜLLER

Dipl.-Phys.,
Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Germany

born 18.06.1980 in Weilburg, Germany
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Tilman Esslinger, examiner
Prof. Dr. Jonathan Home, co-examiner

2011

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt Experimente, die erstmals einen lokalen Zugang zur mikroskopischen Quanten-Vielteilchen-Physik ultrakalter atomarer Fermionen erlauben. Ein Quantengas aus ${}^6\text{Li}$ Atomen wird *in-situ* mit zuvor nie erreichter Auflösung untersucht, wodurch ein direkter Einblick in die charakteristischen Fluktuations- und Korrelationseigenschaften des Systems gegeben ist. Auf derselben Längenskala von einem Mikrometer wird mit flexibel formbaren optischen Dipolfallen zudem eine lokale Manipulation erreicht. Wichtigstes Instrument für die gezeigten Experimente bilden zwei identische hochauflösende Mikroskopobjektive, die das Kernstück der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Apparatur darstellen.

Eines der beiden Mikroskopobjektive dient zur hochauflösenden Abbildung. Mit dessen Hilfe werden räumlich aufgelöste Dichte- und Dichtefluktationsprofile eines gefangenen, schwach wechselwirkenden Fermi-Gases gemessen und analysiert. Für Quantenentartung zeigt das Fermi-Gas unterdrückte Dichtefluktationen unterhalb des Niveaus für thermisches Schrotrauschen. Dahingegen wird im nicht entarteten Fall thermisches, atomares Schrotrauschen beobachtet. Die gemessenen sub-Poisson'schen Fluktuationen sind eine direkte Folge des Pauli-Prinzips und manifestieren damit fermionisches Antibunching im Ortsraum. Zudem liefern die ortsaufgelösten Messungen lokale Informationen über thermodynamische Eigenschaften des Systems, wie zum Beispiel den Grad der Quantenentartung und die Kompressibilität. Gestützt auf die Aussagen des Fluktuations-Dissipations-Theorems wird eine neue fluktuationsbasierte Methode zur Temperaturmessung in atomaren Fermi-Gasen realisiert.

Darüber hinaus stellen wir eine neuartige, quanten-limitierte Interferometrie-Methode vor, die es ermöglicht Spinfluktationen in einem gefangenen, zweikomponentigen Fermi-Gas mit Mikrometerauflösung zu detektieren. Im Vergleich zu einem thermischen Gas beobachten wir aufgrund des Pauli Prinzips eine Unterdrückung der Spinfluktationen um 4.5dB für ein schwach wechselwirkendes, quantenentartetes Gas. Für ein stark wechselwirkendes Gas aus Feshbach-Molekülen messen wir bedingt durch die Paarbildung von Atomen mit entgegengesetztem Spin eine Reduktion der Fluktuationen um 9.2dB.

Mit Hilfe eines zweiachsigen akusto-optischen Deflektors und der neuen hochauflösenden Optik werden mikroskopisch formbare optische Dipolpotentiale generiert. Diese umfassen sowohl statische als auch zeitgemittelte Fallenpotentiale in vielfältigen

Geometrien. Wir präsentieren die Charakterisierung einer einzelnen, stark fokussierten Dipolfalle und zeigen die Realisierung eines zweidimensionalen optischen Gitters mit 4×4 Gitterplätzen und einer Ringgitterkonfiguration aus 8 Potentialtöpfen. Zudem demonstrieren wir das orts aufgelöste Abbilden von kalten Atomen, die in diesen projizierten optischen Potentiallandschaften eingeladen und gefangen werden.

Abstract

This thesis reports on experiments that provide for the first time a local access to the microscopic quantum many-body physics of ultracold atomic fermions. A quantum gas of ${}^6\text{Li}$ atoms is optically probed *in-situ* with unprecedented spatial resolution, giving direct insight into the distinctive fluctuation and correlation properties of the system. Likewise on the same length scale of one micrometer, local manipulation is achieved by means of flexible confinement in optical dipole traps. The essential tool for the presented experiments is a pair of identical, high-resolution microscope objectives that constitute the key feature of the new apparatus which has been set up in the scope of this PhD project.

Employing one of the two microscope objectives for high-resolution imaging, spatially resolved density and density fluctuation profiles of a trapped, weakly interacting Fermi gas are measured and analyzed. In the quantum degenerate regime, the Fermi gas shows a suppression of the density fluctuations below the atomic shot noise limit, whereas in the non-degenerate case thermal atomic shot noise is observed. The measured sub-poissonian fluctuations are a direct result of the Pauli exclusion principle and represent an explicit manifestation of antibunching in real space. Moreover, the spatially resolved measurements reveal local information about thermodynamic quantities such as the level of quantum degeneracy and the compressibility. Using the predictions of the fluctuation-dissipation theorem, a novel fluctuation-based method for thermometry in atomic Fermi gases is realized.

A novel shot-noise limited interferometer is introduced enabling us to measure the spin fluctuations in a trapped, two-component Fermi gas with a micrometer resolution. Compared to a thermal gas, we observe a reduction of the spin fluctuations of up to 4.5dB for a weakly interacting quantum degenerate gas due to the Pauli principle, and 9.2dB for a strongly interacting gas of Feshbach molecules due to pairing.

Using a two-axis acousto-optical deflector in combination with the microscope setup, we demonstrate the generation of microscopically tailored optical dipole potentials. Covering static as well as time-averaged potentials, versatile trapping geometries are achieved, including a tightly focussed single optical dipole trap, a 4x4-site two-dimensional optical lattice and a 8-site ring lattice configuration. Moreover, we present the spatially resolved imaging of cold atoms residing in these optically projected potential patterns.