

Diss. ETH No. 19085

Microscopy of Ultra-Cold Fermionic Lithium

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
BRUNO ZIMMERMANN
Dipl.-Phys., ETH Zürich, Switzerland
born 22.01.1980
citizen of
Vilters-Wangs, Wangs SG
Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Tilman Esslinger
Prof. Dr. Andreas Wallraff

2010

Kurzfassung

Eine einzigartige Eigenschaft von ultrakaltem, fermionischem Lithium ist, dass Streueigenschaften bei Zwei-Körper-Stössen durch eine präzise kontrollierbare Streulänge bestimmt sind. Diese kann in der Nähe einer Feshbach Resonanz über einen weiten Bereich durchgestimmt werden. So können nichtwechselwirkende und wechselwirkende Fermigase erzeugt werden. Unterhalb einer kritischen Temperatur wird das wechselwirkende Fermigas supraflüssig. Dies erlaubt es uns dann, Suprafluidität in Bereichen verschieden starker Wechselwirkung zu untersuchen. Die relevante Längenskala in diesen Fermigasen ist die Fermiwellenlänge von typischerweise $1\mu\text{m}$.

In dieser Arbeit wird ein experimenteller Aufbau präsentiert, der Mikroskopie von ultrakalten Fermigasen mit einer optischen Auflösung von 700nm ermöglicht. Innerhalb von 15s werden Lithium Atome ausschliesslich mithilfe von optischen Kühltechniken auf Temperaturen unterhalb der Fermitemperatur gekühlt. Dies erfolgt in mehreren Schritten: Zuerst werden die Atome mit einem Zeeman Abbremsler zum Stillstand gebracht und danach in einer magneto-optischen Falle gefangen. Anschliessend werden sie zur evaporativen Kühlung in eine Resonatordipolfalle umgeladen. In einem weiteren Schritt werden die Atome, gefangen im Fokus eines Laserstrahls, 27cm weit in eine Glasszelle transportiert, die optischen Zugang für zwei Mikroskopobjektive bietet. Das zwischen den axial ausgerichteten Mikroskopobjektiven platzierte Fermigas wird in einem letzten Schritt evaporativ gekühlt, um schlussendlich ein entartetes Fermigas zu erhalten. In dieser Anordnung können Mikrodipolpotentiale durch das eine Mikroskopobjektiv erzeugt werden. Mit dem zweiten werden die Mikropotentiale, Absorptions-, Fluoreszenz- und Phasensignale von darin gefangenen Atomen lokal ausgelesen und charakterisiert.

Der Zustand eines atomaren Gases kann lokal durch Grössen wie der Dichte und der Dichtefluktuationen bestimmt werden. Wir haben die Dichteprofile von Nichtwechselwirkenden entarteten Fermigasen und molekularen Bose-Einstein Kondensaten nachgewiesen und zudem die lokale Dichte wie auch Dichtefluktuationen eines gefangenen nichtwechselwirkenden Fermigases mit hoher optischer Auflösung gemessen. Im Falle eines entarteten Fermigases wurden reduzierte Dichtefluktuationen beobachtet, die eine direkte Konsequenz des Pauli-Prinzips sind und somit die fermionische Natur der

Atome zum Vorschein bringen. Weil das Fermigas während der Abbildung im thermischen Gleichgewicht ist, kann das Fluktuations-Dissipations Theorem angewendet werden. Dieses besagt, dass die Dichte und ihre Fluktuationen zueinander proportional sind, wobei die Temperatur die Proportionalitätskonstante ist. Wir haben gezeigt, dass mit dieser auf Fluktuationsmessungen basierenden Methode die Temperatur eines Fermigases bestimmen werden kann.

Abstract

A unique feature of ultra-cold lithium atoms is that their scattering properties are determined by a precisely controllable two-body scattering length, which can be tuned over a wide range by accessing a Feshbach resonance. Non-interacting and interacting Fermi gases can be created. At a critical temperature, the latter can undergo a phase transition to a superfluid, which allows one to study fermionic superfluidity in different interaction regimes with a single system. Its relevant length scale is the Fermi wavelength, which is typically $1\mu\text{m}$.

In this thesis, we present an experimental apparatus that enables microscopy of a trapped ultra-cold gas of fermionic lithium with an optical resolution of 700nm . In a time sequence of 15s , lithium atoms are cooled to degeneracy by applying optical cooling technics only. The cooling procedure occurs in several steps: First, atoms are Zeeman slowed and magneto-optically trapped. Then, they are transferred to a high finesse resonator dipole trap for a first evaporative cooling step. In order to do microscopy, atoms are transported in a running wave dipole trap over a distance of 27cm to a region of high optical access and cooled below the Fermi temperature. In the final position, atoms are placed between two microscope objectives, which are aligned along their common optical axis. In this configuration, optical micro dipole potentials can be formed by means of the first microscope objective. With the second objective, the created potentials as well as atomic absorption, fluorescence and phase signals of atoms which are trapped in these potentials, can be locally detected and quantitatively characterized.

The state of the atomic ensemble is locally revealed by observable quantities such as the density and density fluctuations. Density profiles of non-interacting degenerate Fermi gases and Bose-Einstein condensates of tightly bound pairs will be shown. High resolution microscopy has allowed us to observe the local density and its fluctuations of a trapped non-interacting Fermi gas in-situ. In the case of a degenerate Fermi gas, a suppression of fluctuations has been observed, which is a direct manifestation of the Pauli exclusion principle and hence of the fermionic nature of the atoms. Because the atomic ensembles are in thermal equilibrium when being imaged, the fluctuation-

dissipation theorem can be used to relate the mean density to its fluctuations, with a proportionality constant, the temperature. With the obtained data, a fluctuation based-temperature measurement has been demonstrated.