

LV 704161, SS 2022

Seminar mit Bachelorarbeit: Experimentalphysik

Themenauswahl der Forschungsgruppe

Ultrakalte Quantenmaterie

Betreuung:

Emil Kirilov, Rudolf Grimm

Themenliste, Stand 12.01.2022

- RG.1 Paulikristalle: Bizarre Muster mit wenigen Fermionen
- RG.2 Schlüsselexperimente zur Suprafluidität in ultrakalten Fermigasen
- EK.1 A Beat-Note Superlattice and Applications

Die Themenvergabe findet laufend statt (vergebene Themen durchgestrichen). Bitte kontaktieren Sie die genannten Betreuer.

RG.1 Paulikristalle: Bizarre Muster mit wenigen Fermionen

Dem Pauli-Prinzip gehorchend, gehen sich identische fermionische Teilchen aus dem Weg. Dies führt zu interessanten Korrelationen, selbst wenn die Teilchen untereinander nicht wechselwirken. Eine [Gruppe an der Universität Heidelberg](#) konnte nun erstmals derartige Korrelationen, die sich in kristallartigen Mustern („Pauli-Kristalle“) äußern, in kleinen Systemen aus bis zu sechs fermionischen Atomen beobachten. Der Startpunkt für die Experimente ist ein entartetes Fermi-Gas aus ${}^6\text{Li}$ -Atomen, durch Laser- und Verdampfungskühlung erzeugt. Mit einer „optischen Pinzette“ und einem sogenannten optischen Gitter werden die Atome dann in sehr kleinen optischen Fallen präpariert. Die faszinierenden Muster offenbaren sich in Korrelationen nach dem Loslassen der Atome aus der Falle.

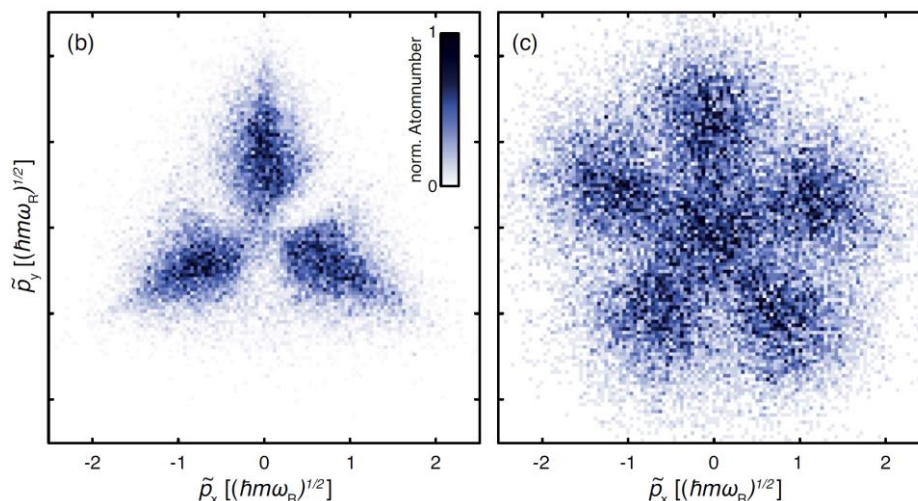
Die Bachelorarbeit soll zunächst einen Überblick über Effekte geben, die (insbesondere in ultrakalten Quantengasen) aus dem Pauli-Prinzip resultieren. Die in den letzten Jahren entwickelten experimentellen Methoden sollen diskutiert werden, die es ermöglichen, Systeme weniger fermionischer Atome in optischen Dipolfallen zu präparieren, die einzelnen Atome zu detektieren und ihre komplexen Korrelationen nachzuweisen. Die Ergebnisse der Heidelberger Gruppe sollen dann im Detail vorgestellt und diskutiert werden.

Literatur direkt zum Thema:

- *Observation of Pauli Crystals*, M. Holten et al., [Phys. Rev. Lett. 126, 020401 \(2021\)](#)
- *Physics Viewpoint: Revealing a Pauli Crystal*, C. Chiu, [Physics 14, 5 \(2021\)](#)

Einführung in optische Dipolfallen und ultrakalte Fermi-Gase:

- *Optical Dipole Traps for Neutral Atoms*, R. Grimm, M. Weidemüller, Yu.B. Ovchinnikov, *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* 42, 95 (2000); [arXiv:physics/9902072](#)
- *Making, probing, understanding ultracold Fermi gases*, *Procs. of the International School of Physics “Enrico Fermi”, Course CLXIV, Varenna, 20-30 June 2006*; [arXiv:0801.2500](#)



Gemessene Wahrscheinlichkeitsdichte für Pauli-Kristalle, gebildet aus $N=3$ oder 6 Fermionen.

Abb. aus M. Holten et al., [Phys. Rev. Lett. 126, 020401 \(2021\)](#).

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Rudolf Grimm

RG.2 Schlüsselexperimente zur Suprafluidität in ultrakalten Fermigasen

Ultrakalte Fermigase können bei Unterschreiten einer kritischen Temperatur einen Phasenübergang in einen suprafluiden Zustand vollziehen. Voraussetzung dafür ist eine starke interne Wechselwirkung, die man dadurch realisiert, dass man das System in einem Gemisch zweier Spinzustände präpariert und eine quantenmechanische Resonanz ausnutzt. Fermionische Atome können sich dann zu Paaren zusammenfügen, die analog zu Cooper-Paaren im Supraleiter bosonischen Charakter haben und ein Kondensat bilden können. Ein solches suprafluides Fermigas ist von großem Interesse als einzigartiges Modellsystem der Quantenvielteilchenphysik und wurde in vielen Laboratorien weltweit untersucht.

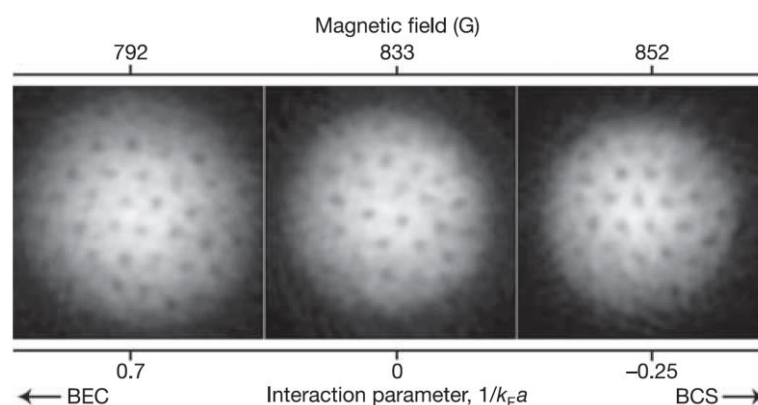
Die Bachelorarbeit soll Schlüsselexperimente diskutieren, durch die seit Mitte der 2000er-Jahre die zentralen Aspekte der Suprafluidität nachgewiesen werden konnte. Dazu gehören die Beobachtung eines Fermi-Kondensats (Boulder, 2004), die Detektion von Quantenwirbeln in einem rotierenden Gas (MIT, 2005), die Messung einer kritischen Geschwindigkeit (MIT, 2007), die Beobachtung des Lambda-Übergangs (MIT, 2011) und die Detektion des sogenannten zweiten Schalls (Innsbruck, 2013).

Literatur (Originalarbeiten):

- *Observation of Resonance Condensation of Fermionic Atom Pairs*, C. Regal et al., [Phys. Rev. Lett. 92, 040403 \(2004\)](#).
- *Vortices and superfluidity in a strongly interacting Fermi gas*, M. Zwierlein et al., [Nature 435, 1047 \(2005\)](#).
- *Critical Velocity for Superfluid Flow across the BEC-BCS Crossover*, D. Miller et al., [Phys. Rev. Lett. 99, 070402 \(2007\)](#).
- *Revealing the Superfluid Lambda Transition in the Universal Thermodynamics of a Unitary Fermi Gas*, M. Ku et al., [Science 335, 563 \(2012\)](#).
- *Second sound and the superfluid fraction in a Fermi gas with resonant interactions*, L. Sidorenkov et al. [Nature 498, 78 \(2013\)](#).

Lehrbuch:

- *Bose-Einstein Condensation and Superfluidity*, L. Pitaevskii and S. Stringari (Oxford University Press, 2016); [vorhanden in unserer Universitätsbibliothek](#).



Ausbildung von quantisierten Wirbeln (Vortices) in einem rotierenden Fermigas.
Abbildung entnommen aus Zwierlein et al., Nature 435, 1047 (2005).

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Rudolf Grimm

RB.1 A Beat-Note Superlattice and Applications

Optical lattices are powerful tools to study and manipulate ultracold gases. They are used to investigate superfluidity in quantum gases, to study nonlinear dynamics of matter waves, to perform quantum simulation of solid-state physics models and to operate atom interferometers for high precision measurements of forces and fundamental constants. The spatial periodicity of optical lattices based on counterpropagating beams is limited to the range of half of their wavelength. There is, however, a strong interest in creating periodic potentials with larger separations between the different sites for a variety of applications ranging from trapped-atom interferometry, atomtronics, quantum simulation of Hubbard-like models, studies on low dimensional systems and quantum computing.

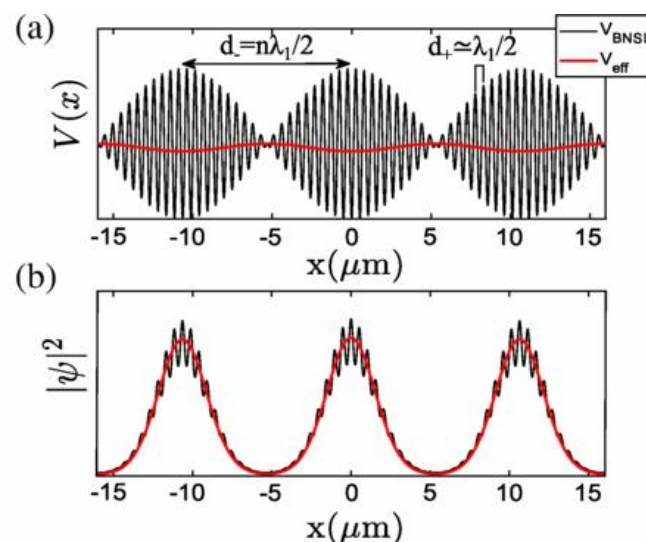
Here we will study an innovative, large-spacing optical superlattice based on the beating note between two Retro-reflected optical lattices with slightly different wavelengths. We will focus on yet another application of the above configuration, namely the possibility to adiabatically load an atomic sample in a 2D single slice of one of the primary lattices. Strong confinement in 2D is very important when physics in lower dimensions is targeted.

Over the course of this thesis we will learn major mathematical concepts pertinent to periodic systems. Such include Bloch's theorem, Wannier functions, band structure of a single particle in a lattice and some simple examples of an interacting many-body system in 1D governed by the Hubbard model.

Our ultimate focus will be on the loading of a trapped gas of interacting atoms in a beat-note lattice by evolving the system under the Gross-Pitaevskii equation. The purpose of the simulation is to navigate us to the suitable regime and time-scales for achieving the above 2D regime.

Literature:

- O. Morsch and M. Oberthaler, [Rev. Mod. Phys. 78, 179 \(2006\)](#)
- C. Gross and I. Bloch, [Science 357, 995 \(2017\)](#)
- Spatial Bloch Oscillations of a Quantum Gas in a “Beat-Note” Superlattice , [Phys. Rev. Lett. 127, 020601 \(2021\)](#)



Plot of the beat-note optical lattice (thin line) and the correspondent effective potential V_{eff} (thick line). (b) Profile of the ground-state atomic wave function in the presence of the beat-note-lattice in the shallow lattice regime. Figure taken from [Phys. Rev. Lett. 127, 020601 \(2021\)](#).

For further information please contact Emil Kirilov