

LV 704161, SS 2023

Seminar mit Bachelorarbeit: Experimentalphysik

Themenauswahl der Forschungsgruppe

Ultrakalte Quantenmaterie

Betreuung:

Emil Kirilov, Rudolf Grimm

Themenliste, Stand 13.02.2023

RG.1 Pauli-Kristalle: Bizarre Muster mit wenigen Fermionen

Literaturstudie

~~RG.2 Der „Atomlaser“ — Durchbruch zur kontinuierlichen Emission~~

Literaturstudie

RG.3 Fermi-Fermi-Moleküle in Quantengasgemischen

Literaturstudie mit experimenteller Komponente

EK.1 Interlayer Superfluidity in Bilayer Systems of Fermionic Polar Molecules

Literaturstudie

~~EK.2 Fast production of a Dy quantum degenerate gas~~

Experimentelle Arbeit

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

RG.1 Pauli-Kristalle: 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.

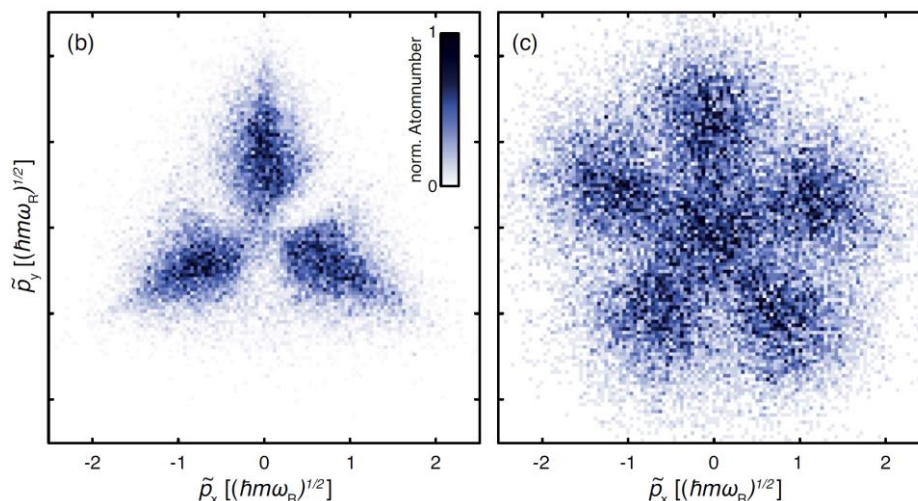
Die Bachelorarbeit soll zunächst einen Überblick über Effekte geben, die (insbesondere in ultrakalten Quantengasen) aus dem Pauli-Prinzip resultieren. Die in den letzten Jahren entwickelten experimentellen Methoden sollen diskutiert werden, die es ermöglichen, Systeme weniger fermionischer Atome in optischen 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 Der „Atomlaser“ – Durchbruch zur kontinuierlichen Emission

Ein Bose-Einstein-Kondensat, wie es üblicherweise in einer Teilchenfalle erzeugt wird, stellt eine *kohärente Materiewelle* dar. Dies verhält sich völlig analog zu einer *kohärenten Lichtwelle*, wie sie in dem optischen Resonator eines Lasers entsteht. Wird das Kondensat aus der Falle ausgekoppelt und breitet sich im Vakuum aus, lässt sich das als gepulste Quelle einer kohärenten Materiewelle betrachten. Ein solcher gepulster „Atomlaser“ wurde bereits vor mehr als 25 Jahren demonstriert. Seitdem haben sich viele Forscher intensiv bemüht, kohärente Materiewellen auch kontinuierlich zu erzeugen, doch dies hat sich als überaus schwierig erwiesen. Einer Forschungsgruppe an der Universität Amsterdam ist dieses Kunststück, einen kontinuierlichen Atomlaser zu realisieren, nun endlich gelungen. Der Schlüssel zu diesem großen Durchbruch war eine Kombination von Tricks, welche zum Teil an der Universität Innsbruck entwickelt wurden.

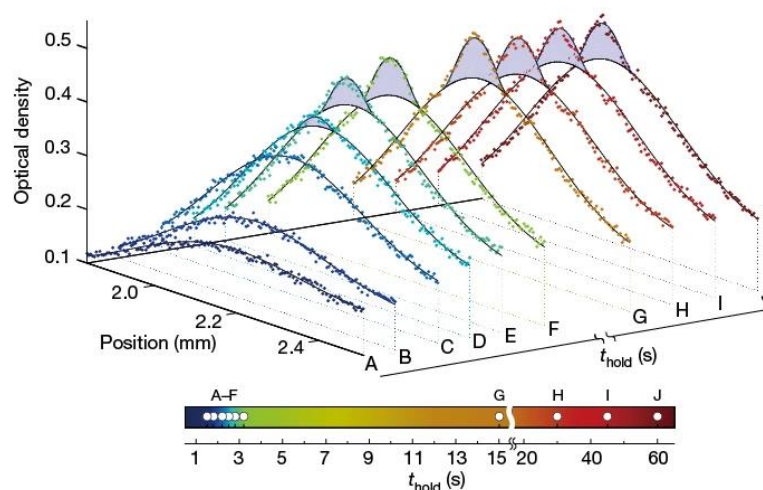
Die Bachelorarbeit soll zunächst kurz auf die Geschichte des Atomlasers eingehen, indem frühere Arbeiten zu gepulsten Quellen kohärenter Materiewellen diskutiert werden. Der Fokus soll dann auf dem Experiment der Amsterdamer Arbeitsgruppe liegen. Es soll diskutiert werden, welche Hindernisse überwunden werden müssen und wie dies schließlich gelang. Auch ein kleiner Ausblick auf Anwendungen (z.B. für Atominterferometer) soll gegeben werden.

Literatur (Originalarbeiten):

- *Continuous Bose-Einstein condensation*, C.-C. Chen et al., [Nature 606, 683 \(2022\)](#).
- *Output coupler for Bose-Einstein condensed atoms*, M.-O. Mewes et al., [Phys. Rev. Lett. 78, 582 \(1997\)](#).
- *Laser cooling to quantum degeneracy*, S. Stellmer et al., [Phys. Rev. Lett. 110, 263003 \(2013\)](#).

Kurze Zusammenfassung der Amsterdamer Arbeit:

- *A step closer to atom lasers that stay on*, S. Bennetts and C.-C. Chen, [Nature Research Briefing](#), 08 June 2022



Dichteprofile zeigen, wie der Atomlaser einen kontinuierlichen Zustand erreicht.

Abbildung entnommen aus C.-C. Chen et al., [Nature 606, 683 \(2022\)](#).

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Rudolf Grimm

RG.3 Fermi-Fermi-Moleküle in Quantengasgemischen

In Gemischen atomarer Quantengase lassen sich unterschiedliche Atome zu heteronuklearen Molekülen zusammensetzen. Dies ist dann der Ausgangspunkt für eine Vielzahl von weiteren Experimenten auf dem Arbeitsgebiet, z.B. zur Erzeugung von polaren Molekülen im Grundzustand. Unser spezielles Interesse besteht in „Fermi-Fermi-Molekülen“, die mit zwei verschiedenen fermionischen Atomsorten gebildet werden. Solche Moleküle sind Bosonen und können damit im Prinzip auch ein Bose-Einstein-Kondensat bilden. Die fermionische Natur der Atome hilft dabei unter Ausnutzung des Pauli-Prinzips Verlustprozesse zu unterdrücken. In jüngsten Arbeiten wurde über große Fortschritte bei der Erzeugung von Fermi-Fermi-Molekülen berichtet, und die experimentellen Bedingungen sind bereits sehr nah an der Kondensation.

Die Bachelorarbeit soll die Grundlagen der Erzeugung von Molekülen in Quantengasen zunächst allgemein zusammenfassen. Der Fokus soll dann auf heteronuklearen Molekülen in fermionischen Quantengas-Gemischen liegen. Insbesondere soll über aktuelle Ergebnisse berichtet werden, die in unserem Labor an Gemischen aus Dysprosium und Kalium erzielt wurden.

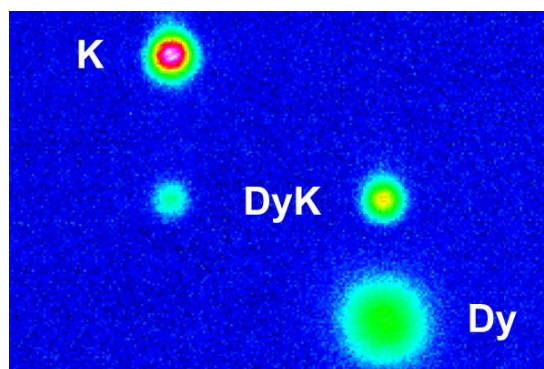
Im Rahmen der Arbeit wird auch die Möglichkeit geboten, selbst einige Messungen an ultrakalten DyK-Molekülen durchzuführen und zu analysieren.

Literatur (Originalarbeiten):

- *High phase-space density gas of NaCs Feshbach molecules*, A. Z. Lam et al., [Phys. Rev. Res. 4, L022019 \(2022\)](#).
- *Vortices and superfluidity in a strongly interacting Fermi gas*, Z. Ye et al., [Phys. Rev. A 106, 043314 \(2022\)](#).
- *Double-degenerate Fermi mixtures of ^6Li and ^{53}Cr atoms*, A. Ciamei et al., [Phys. Rev. A 106, 053318 \(2022\)](#).

Review-Artikel mit Kapitel über Feshbach-Moleküle

- *Feshbach resonances in ultracold gases*, C. Chin et al., [Rev. Mod. Phys. 82, 1225 \(2010\)](#).



Nachweis von DyK Feshbach-Molekülen durch Stern-Gerlach-Aufspaltung im inhomogenen Magnetfeld. Abbildung entnommen aus Ye et al., PRA **106**, 043314 (2022) und modifiziert.

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Rudolf Grimm

EK.1 Interlayer Superfluidity in Bilayer Systems of Fermionic Polar Molecules

Ultracold gases with dipole-dipole interactions (DDI) exhibit a drastically different behavior in the degenerate regime relative to ordinary gases with short-range interactions. A new prospect of observing new quantum phases, without analog even in conventional condensed matter systems is presented by utilizing experimental platforms of ultracold molecules, highly magnetic atoms or Rydberg atoms possessing a significant DDI.

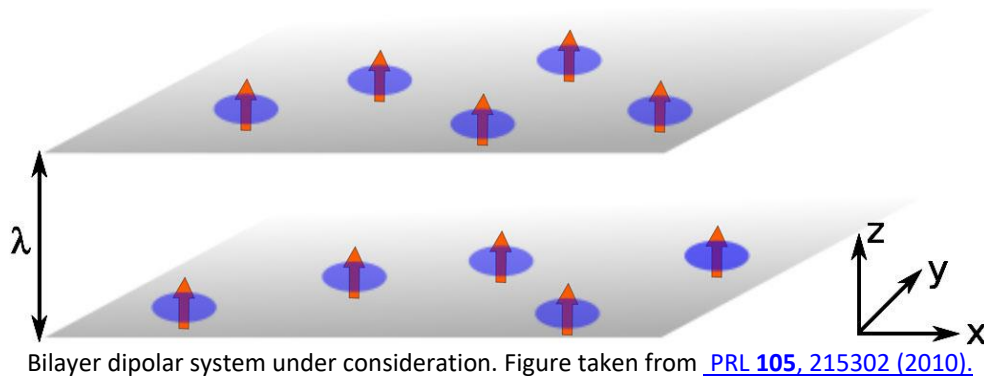
In a bilayer system of particles with a DDI, Cooper pairs are formed by dipoles in different layers, leading to the emergence of an interlayer superfluid. In such geometry one can explore a peculiar BCS-BEC crossover, exhibited by a quasi-BEC of interlayer dimers transitioning to Cooper pairs forming a BCS-like superfluidity.

In the above scenario one may study Imbalanced Fermi mixtures by preparing layers with different chemical potentials (effective magnetic field) or with different densities, opening possibilities for creating the FFLO (Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov) phase in which Cooper pairs have finite momenta and the order parameter shows a lattice structure.

In this thesis we will study the conventional BCS superconductivity in depth, focusing on phenomenology, Bogoliubov transformation, BCS state and gap equation. Eventually we will converge onto the specific implementation with the above bilayer system with DDI, find the BCS critical temperature and discuss the BCS–Bose-Einstein condensation crossover.

Literature:

- A. Pikovski, M. Klawunn, G.V. Shlyapnikov and L. Santos, PRL **105**, 215302 (2010)
- Hao Lee, S. I. Matveenko, Daw-Wei Wang and G. V. Shlyapnikov, PRA **96**, 061602(R) (2017)
- Bo Liu, Peng Zhang, Ren Zhang, Hong Gao and Fuli Li, PRA **98**, 063610 (2018)



For further information please contact Emil Kirilov

EK.2 Fast production of a Dy quantum degenerate gas. An experimental thesis.

Narrow-line magneto-optic traps are very powerful to reach low sample temperatures. The typical method to reach quantum degeneracy following a initial laser cooling step is evaporative cooling which stretches sometimes to a large fraction of a minute. This is a major hindrance for ultracold experiments. There are ways to speed up the experimental cycle by dynamical trap shaping or all optical cooling to degeneracy but both suffer from either large atom loss or a large thermal fraction remaining, plaguing the sample quality.

We will perform a hybrid approach of narrow-line laser cooling in a dipole trap utilizing the narrow line at 741nm of Dysprosium, followed by evaporation cooling step.

The applicant will be able to electronically stabilize a laser to an ultra-stable cavity and reduce its frequency noise to levels lower than the transition width (2kHz). Eventually a narrow line laser cooling will be applied on the Dy atoms in an existing setup (NewLand lab) and the performance of the laser cooling will be characterized by the applicant. If one reaches a sub-microkelvin temperatures without significant atom loss after this new cooling step the cycle time should be down to a fraction of a second. If the polarizability of the excited state in Dy, populated by the 741nm light, does not match the cooling requirements a strobing technique will be applied where the cooling and trapping steps are iterated.

Literature:

- Andrew J. Berglund, James L. Hanssen and Jabez J. McClelland PRL **100**, 113002 (2008)
- A. Frisch, K. Aikawa, M. Mark, A. Rietzler, J. Schindler, E. Zupanic, R. Grimm, and F. Ferlaino PRA **85**, 051401(R) (2012)
- Gregory A. Phelps, Anne Hebert, Aaron Krahn, Susannah Dickerson, Furkan Ozturk, Sepehr Ebadi, Lin Su, and Markus Greiner <https://arxiv.org/abs/2007.10807>



Illustration of an Erbium Bose-Einstein condensate (BEC) produced with the above hybrid technique in 800 ms (left image). A similar sequence produces a degenerate Fermi gas (DFG) in 4 seconds (right image). Images taken from <https://arxiv.org/abs/2007.10807>

For further information please contact Emil Kirilov