

LV 704103, SS 2017

Seminar mit Bachelorarbeit: Experimentalphysik

Themenauswahl aus dem Forschungsgebiet

Ultrakalte Atome und Quantengase

Betreuung:

Francesca Ferlaino, Manfred Mark, Hanns-Christoph Nägerl,

Themenliste, Stand 27.01.2017

- ~~A.1 Ein atomares Gas als Quantensimulator für Festkörperphänomene: Die Beobachtung des Superfluid-Mott-Isolator-Übergangs (MJM+FF)~~
- ~~A.2 Rydbergatome: Giganten der Quantenwelt, die immer noch überraschen können (MJM+FF)~~
- ~~A.3 Dipolare Quantengase – Atome mit Fernbeziehungen (MJM+FF)~~
- ~~A.4 Das „Quantengasmikroskop“ – Ultrakalte Atome einzeln detektieren (MJM+FF)~~
- A.5 Stark-korrelierte Quantengase in einer Dimension (HCN)
- A.6 Nahezu perfekte Quantenkontrolle über Grundzustandsmoleküle (HCN)
- A.7 Efimov-Zustände: Exotische Quantenphysik am absoluten Nullpunkt (HCN)

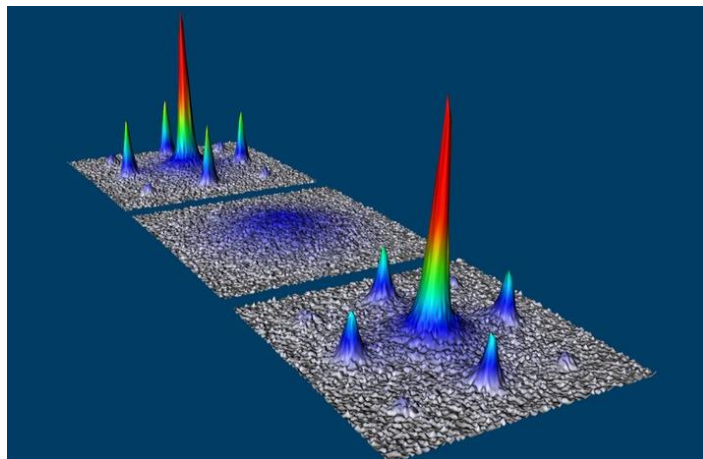
Bereits vergebene Themen sind durchgestrichen. Die weitere Themenvergabe findet laufend statt. Bitte kontaktieren Sie die genannten BetreuerInnen.

A.1 Ein atomares Gas als Quantensimulator für Festkörperphänomene: Die Beobachtung des Superfluid-Mott Isolator Übergangs

Ultrakalte Quantengase bieten sich aufgrund der hervorragenden Kontroll- und Manipulationsmöglichkeiten als ideales Testsystem zur Untersuchung und Simulation von Festkörpersystemen an. Während in Festkörpern die periodischen Kristallstrukturen aus Ionen aufgebaut sind und Elektronen als bewegliche Teilchen fungieren, werden in der Welt der Quantengase Kristalle aus Licht erzeugt, in denen sich die Atome selbst bewegen.

Viele theoretische Festkörpermodelle können somit auf das ultrakalte Quantengassystem übertragen werden wie z.B. der Superfluid-Mott Isolator Quantenphasenübergang, welcher 1998 für diese Systeme vorhergesagt und bereits 2002 experimentell beobachtet wurde. Dieser Übergang zwischen der suprafluiden Phase (SF) und dem Mott Isolator (MI) geht einher mit einem Verlust der langreichweitigen Phasenkorrelation des Systems. Die MI Phase besitzt einige faszinierende Eigenschaften wie z.B. eine unendlich große Kompressibilität und definierte Lücken im Anregungsspektrum.

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit den Eigenschaften von Quantengasen in optischen Gittern mit Fokus auf den SF-MI Phasenübergang unter verschiedenen Bedingungen.



Verlust der Kohärenz beim Quantenphasenübergang von der SF in die MI Phase und Wiederherstellung der Kohärenz beim inversen Vorgang. Abbildung entnommen von der Website der Arbeitsgruppe I. Bloch.

Literatur:

- *Cold Bosonic Atoms in Optical Lattices*, Jaksch, D., C. Bruder, J. I. Cirac, C. W. Gardiner, and P. Zoller, [Phys. Rev. Lett. 81, 3108 \(1998\)](#).
- *Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms*, Greiner, M., M. O. Mandel, T. Esslinger, T. Hänsch, and I. Bloch, [Nature 415, 39 \(2002\)](#).
- *Imaging the Mott Insulator Shells by Using Atomic Clock Shifts*, Campbell, G., J. Mun, M. Boyd, P. Medley, A. E. Leanhardt, L. G. Marcassa, D. E. Pritchard, and W. Ketterle, [Science 313, 5787 \(2006\)](#).
- *Formation of Spatial Shell Structure in the Superfluid to Mott Insulator Transition*, Fölling, S., A. Widera, T. Müller, F. Gerbier, and I. Bloch, 2006, [Phys. Rev. Lett. 97, 060403](#)

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Manfred Mark und Francesca Ferlino

A.2 Rydbergatome: Giganten der Quantenwelt, die immer noch überraschen können

Normalerweise sind Atome winzige Objekte im Bereich von Nanometern, wobei deren Größe und Eigenschaften von der Elektronenhülle bestimmt wird. Bringt man allerdings ein Elektron in einen hoch angeregten Zustand, erzeugt man Rydbergatome, deren Größe im Mikrometerbereich liegen kann. Diese Rydbergatome besitzen viele einzigartige Eigenschaften, z.B. eine immens lange Lebensdauer oder eine extrem starke Polarisierbarkeit. Diese Eigenschaften können für verschiedenste Anwendungen wie dem Erzeugen eines ultrakalten Plasmas, als sensitive Messproben oder zur Quanteninformationsverarbeitung genutzt werden.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden zunächst die allgemeinen Eigenschaften von Rydbergatomen sowie deren experimentelle Erzeugung beleuchtet. Zusätzlich werden die neuen Möglichkeiten, welche die Verwendung von ultrakalten Quantengasen als Anregungsgrundlage im Vergleich zu Gaszellen bei Raumtemperatur bieten, untersucht.

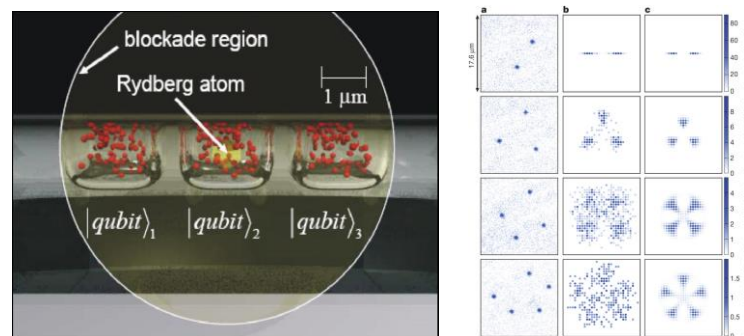


Illustration der Rydberg-Anregung einzelner kleiner Gaszellen, die durch den Blockaderadius miteinander verschränkt werden können (links) und direkte Abbildung geordneter Strukturen von Rydberganregungen (rechts). Abbildungen entnommen von der Website der Arbeitsgruppe T. Pfau (links) und aus P.Schauß et al., [Nature 491, 87-91 \(2012\)](#)

Literatur:

- *Observation of Rydberg blockade between two atoms*, E. Urban, T. A. Johnson, T. Henage, L. Isenhower, D. D. Yavuz, T. G. Walker & M. Saffman, [Nature Physics 5, 110 - 114 \(2009\)](#)
- *Quantum information with Rydberg atoms*, M. Saffman, T. G. Walker, and K. Mølmer, [Rev. Mod. Phys. 82, 2313 \(2010\)](#)
- *Observation of ultralong-range Rydberg molecules*, V. Bendkowsky, B. Butscher, J. Nipper, J. P. Shaffer, R. Löw & T. Pfau, *Nature* 458, 1005-1008 (2009)
- *Coherent excitation of Rydberg atoms in micrometre-sized atomic vapour cells*, H. Kübler, J. P. Shaffer, T. Baluktsian, R. Löw, and T. Pfau, [Nature Photonics 4, 112 \(2010\)](#)

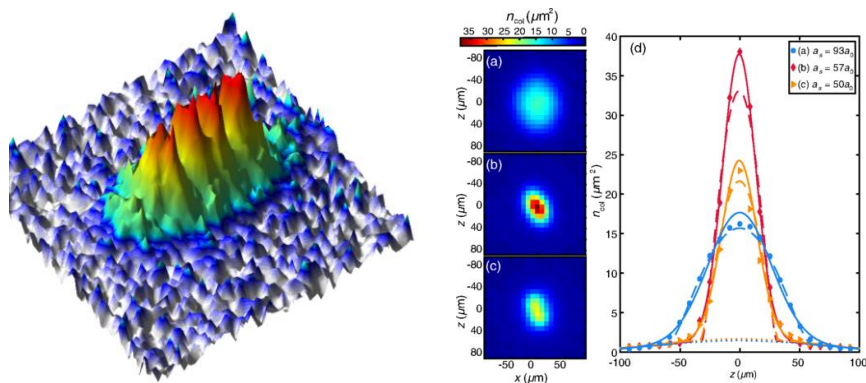
Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Manfred Mark und Francesca Ferlaino

A.3 Dipolare Quantengase – Atome mit Fernbeziehungen

Dipolare Quantengase besitzen faszinierende Eigenschaften aufgrund der speziellen Wechselwirkung zwischen den Teilchen. Diese Wechselwirkung, bekannt als Dipol-Dipol-Wechselwirkung (DDI), ist langreichweitig und anisotrop. Atome mit großem magnetischem Dipolmoment sowie heteronukleare Moleküle im Grundzustand in einem externen elektrischen Feld besitzen ausreichend starke DDI, um sichtbare Effekte in ultrakalten Quantengasen zu bewirken.

Hier betrachten wir primär ultrakalte Quantengase von stark magnetischen Atomen wie Erbium (Er) oder Dysprosium (Dy), welche seit kurzer Zeit in Experimenten erzeugt werden können. Diese Atome gehören zur Gruppe der Lanthanoide und weisen daher eine Reihe von interessanten Eigenschaften auf, die weit über das hinausgehen, was einfache Alkaliatome zu bieten haben. Zum einen besitzen sie eine reiche Struktur von optischen Übergängen, die flexibel z.B. zur Laserkühlung oder für Dipolfallen eingesetzt werden können. Zum anderen besitzen Er und Dy extrem starke magnetische Dipole, wodurch die Atome langreichweitig und anisotrop in Wechselwirkung treten können. Daraus ergeben sich neue Phänomene und Materiezustände wie z.B. magnetische Quantentropfen.

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit den Eigenschaften von dipolaren Quantengasen mit Fokus auf Experimenten mit stark magnetischen Atomen.



Interferenz einzelner dipolarer Quantentropfen aus Er-Atomen (links) und Entstehung eines einzelnen riesigen Quantentropfens (rechts). Abbildung rechts entnommen aus L. Chomaz et al., [Phys. Rev. X 6, 041039 \(2016\)](#)

Literatur:

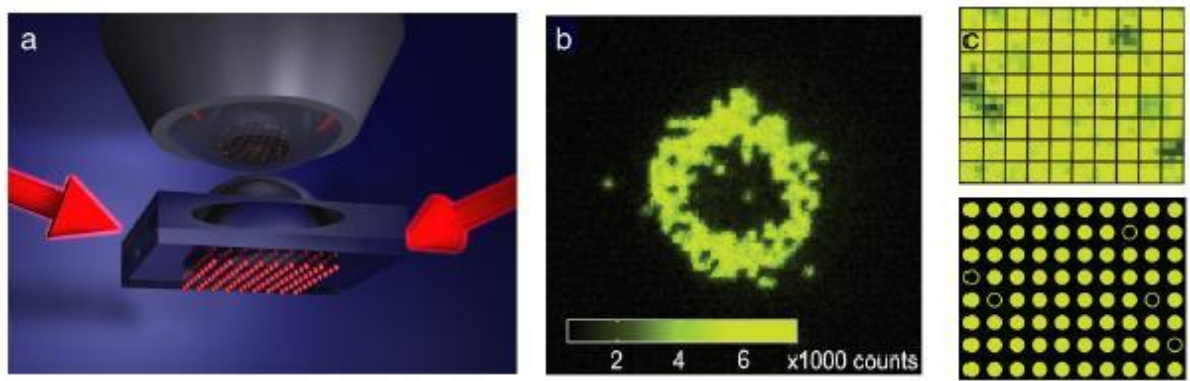
- *Theoretical progress in many-body physics with ultracold dipolar gases*, M. Baranov [Physics Reports 464, 71 \(2008\)](#).
- *The physics of dipolar bosonic quantum gases*, T. Lahaye, C. Menotti, L. Santos, M. Lewenstein, and T. Pfau, [Rep. Prog. Phys. 72, 126401 \(2009\)](#).
- *Bose-Einstein condensation of erbium*, K. Aikawa, et al., [Phys. Rev. Lett. 108, 210401 \(2012\)](#).
- *Strongly Dipolar Bose-Einstein Condensate of Dysprosium*, Mingwu Lu, Nathaniel Q. Burdick, Seo Ho Youn, and Benjamin L. Lev [Phys. Rev. Lett. 107, 190401 \(2011\)](#).
- *Quantum-Fluctuation-Driven Crossover from a Dilute Bose-Einstein Condensate to a Macrodroplet in a Dipolar Quantum Fluid*, L. Chomaz, et al., [Phys. Rev. X 6, 041039 \(2016\)](#)
- *Observing the Rosensweig instability of a quantum ferrofluid*, H. Kadau et al., [Nature 530, 194–197 \(2016\)](#)

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Manfred Mark und Francesca Ferlaino

A.4 Das „Quantengasmikroskop“ – Ultrakalte Atome einzeln detektieren

Im Jahr 2009 wurde die Beobachtung von Quantengasen in optischen Gittern durch zwei Forschergruppen in Harvard und München mithilfe sogenannter Quantengasmikroskope auf ein neues Niveau gehoben. Durch diese Technik ist es möglich, einzelne Atome in optischen Gitterstrukturen sichtbar zu machen, was einen spektakulären direkten Einblick in die physikalischen Vorgänge innerhalb solcher Strukturen ermöglicht. Seit der ersten Realisierung ist die Anzahl solcher Quantengasmikroskope stetig gewachsen und viele weitere Forschergruppen, darunter zwei aus Innsbruck, arbeiten derzeit ebenfalls an der Implementierung dieser Technik.

Diese Bachelorarbeit wird sich mit der zugrundeliegenden Funktionsweise dieser Abbildungsmethode befassen, die verschiedenen Konzepte abhängig von den verwendeten Atomen beleuchtet und die ersten mithilfe dieser Technik gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassen



Mott Isolator (MI) in einem Quantengasmikroskop. (a) Aufbau des Quantengasmikroskops. (b) Mott Isolator Schalenstruktur $n=1$ MI (heller Ring), $n=2$ MI Kern (dunkel). (c) nahezu perfekter $n=1$ Mott Isolator. Abbildung entnommen von Greiner Lab Webseite <http://greiner.physics.harvard.edu/>

Literatur:

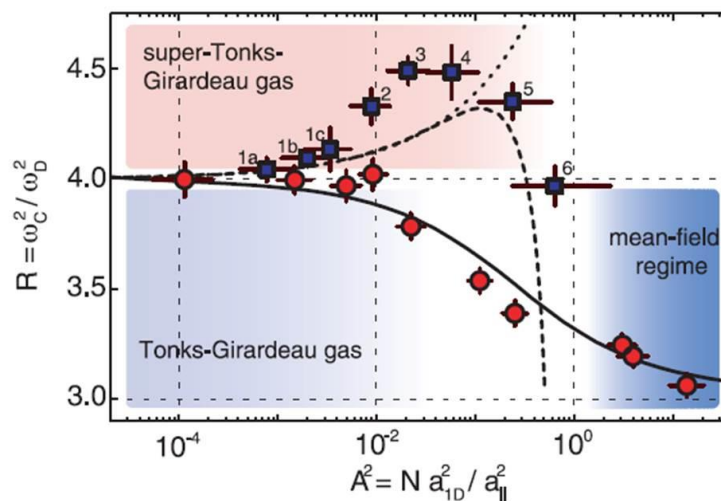
- *Quantum Gas Microscope detecting single atoms in a Hubbard regime optical lattice*, W. S. Bakr, J. I. Gillen, A. Peng, S. Foelling, M. Greiner, [Nature 462 74-77 \(2009\)](#)
- *Single-atom-resolved fluorescence imaging of an atomic Mott insulator*, Jacob F. Sherson et al. [Nature 467, 68–72 \(2010\)](#)
- *Site-Resolved Imaging of Fermionic 6Li in an Optical Lattice*, Maxwell F. Parsons et al. [Phys. Rev. Lett. 114, 213002 \(2015\)](#)
- *Microscopic Observation of Pauli Blocking in Degenerate Fermionic Lattice Gases*, Ahmed Omran, et al. [Phys. Rev. Lett. 115, 263001 \(2015\)](#)
- *Site-resolved imaging of ytterbium atoms in a two-dimensional optical lattice*, Martin Miranda, et al. [Phys. Rev. A 91, 063414 \(2015\)](#)

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Manfred Mark und Francesca Ferlaino

A.5 Stark-korrelierte Quantengase in einer Dimension

Vielteilchen-Quantensysteme in niedrigen Dimensionen zeigen oft ungewöhnliche Eigenschaften, da die Zustandsdichte stark modifiziert ist [1]. So können zum Beispiel Bosonen in einer Dimension „fermionisieren“, d.h. Eigenschaften aufweisen, die eigentlich Fermionen vorbehalten sind. Dieser nach Tonks und Girardeau benannte Zustand („Tonks-Girardeau-Gas“) wurde vor einigen Jahren im Kontext ultrakalter Quantengase für repulsiv wechselwirkende Bosonen nachgewiesen [2] und in Innsbruck für den Fall attraktiv wechselwirkender Bosonen als „super-Tonks-Girardeau-Gas“ verallgemeinert [3]. Vor kurzem konnte gezeigt werden, dass eindimensionale Quantengase ganz spezielle Transporteigenschaften aufweisen [4].

In dieser Bachelorarbeit wollen wir verstehen lernen, warum eindimensionale Quantengase speziell sind und welche interessanten Vielteilchenzustände nahe des absoluten Nullpunkts sich ausbilden können.



Frequenzverhältnis R von Kompressionsmode und Dipolmode (quadriert) als Funktion der normierten (inversen) Wechselwirkungsstärke A . Rot: Repulsive Wechselwirkung. Blau: Attraktive Wechselwirkung. Die blauen Datenpunkte zeigen, dass das System durch attraktive Wechselwirkung an Steifigkeit gewinnt. Die Abbildung ist Ref. [3] entnommen.

Literatur (die Arbeiten mit * sind aus Innsbruck):

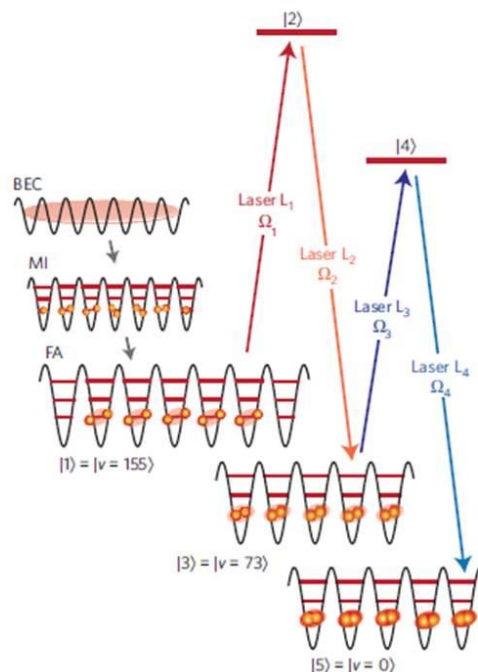
- [1] M. A. Cazalilla et al., One dimensional bosons: From condensed matter systems to ultracold gases, Rev. Mod. Phys. 83, 1405 (2011). (Übersichtsartikel)
- [2] T. Kinoshita, T. Wenger, D. S. Weiss: Observation of a One-Dimensional Tonks-Girardeau Gas, Science 305, 1125 (2004).
- [3] *E. Haller et al., Realization of an Excited, Strongly Correlated Quantum Gas Phase, Science 325, 1224 (2009).
- [4] *F. Meinert et al., Bloch Oscillations in the Absence of a Lattice, preprint at: arXiv:1608.08200 (2016).

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Hanns-Christoph Nägerl

A.6 Nahezu perfekte Quantenkontrolle über Grundzustandsmoleküle

Atomare Gase lassen sich bis in die Nähe des absoluten Temperaturnullpunkts herabkühlen und mit Einzelatomkontrolle in Gitterpotentiale einsperren. Kann man solch perfekte Kontrolle der internen und externen (quantenmechanischen) Freiheitsgrade auch für Moleküle erreichen, obwohl Techniken wie Laserkühlung nicht oder bestenfalls nur ansatzweise funktionieren? Die Antwort scheint „ja“ zu sein, wie experimentelle Arbeiten am JILA in Boulder [1] und in Innsbruck [2,3] zeigen. Der Trick besteht darin, die Konstituenten des Moleküls, die Atome, bis hin zu Quantenentartung zu kühlen und dann erst, bei nahezu vollständiger Kontrolle aller Parameter, die Moleküle mit kohärenten Methoden unter Beibehaltung der hohen Phasenraumdichte zu erzeugen.

In dieser Bachelorarbeit analysieren wir zuerst den „einfachen“ Fall, nämlich die Erzeugung von ultrakalten Ensembles homonuklearer Moleküle [2]. Dann wenden wir uns dem „schwierigen“ Fall zu, nämlich der Erzeugung von heteronuklearen Molekülensembles [1,3].



Schema zur Erzeugung eines Quantengases aus Grundzustandsmolekülen. Aus einem Bose-Einstein Kondensat (BEC) heraus werden mithilfe eines Mott Isolators (MI) zuerst Atompaare erzeugt. Diese werden dann an einer Feshbach-Resonanz (FA) in Moleküle überführt, welche wiederum in den Grundzustand transferiert werden.

Die Abbildung wurde aus Ref. [2] entnommen.

Literatur (die Arbeiten mit * sind aus Innsbruck):

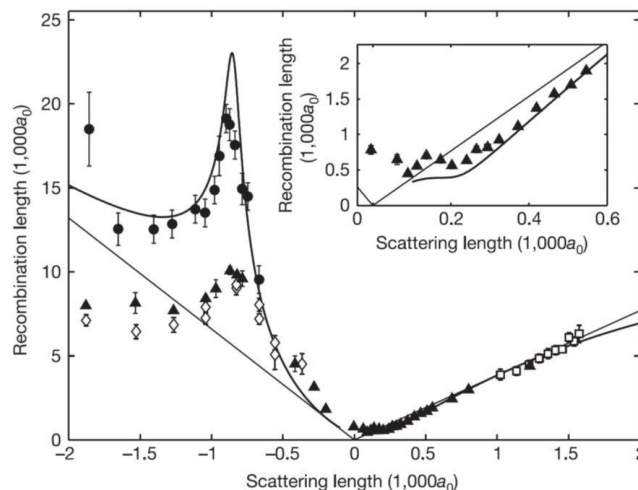
- [1] S. Moses et al., Creation of a low-entropy quantum gas of polar molecules in an optical lattice, *Science* **350**, 659 (2015).
- [2] *J.G. Danzl et al., An ultracold high-density sample of rovibronic ground-state molecules in an optical lattice, *Nature Physics* **6**, 265 (2010).
- [3] *L. Reichsöllner et al., Quantum engineering of a low-entropy gas of heteronuclear bosonic molecules in an optical lattice, preprint at: arXiv:1607.06536 (2016), to appear in *Physical Review Letters*.

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Hanns-Christoph Nägerl

A.7 Efimov-Zustände: Exotische Quantenphysik am absoluten Nullpunkt

Vor fast 40 Jahren machte Vitali Efimov eine erstaunliche Entdeckung, als er theoretisch das quantenmechanische Dreikörperproblem untersuchte [1]. Er fand eine analytisch beschreibbare Familie von Lösungen der Drei-Teilchen-Schrödinger-Gleichung mit universellen und sehr überraschenden Eigenschaften. Universell deshalb, weil die Lösungen nicht von der konkreten Form des Wechselwirkungspotentials abhängen – das Potential muss nur schnell genug abfallen. Überraschend, da schon in der klassischen Mechanik nur ganz spezielle Lösungen des Dreikörperproblems bekannt sind. Warum sollte es in der Quantenmechanik plötzlich allgemeingültige Lösungen geben? Nach einer langen Suche hat man die nach Efimov benannten Zustände im Jahr 2006 in Innsbruck in Kontext ultrakalter Atome gefunden [2]. In nachfolgenden Arbeiten konnten zentrale Aspekte der Efimov'schen Theorie bestätigt werden [3,5].

Die Bachelorarbeit soll in die (experimentelle) Wenig-Teilchen-Quantenphysik einführen und die zentralen Experimente zu den Efimov-Zuständen diskutieren [2-5].



Beobachtung einer Efimov-Resonanz für negative Werte der atomaren Streulänge. Die schwarzen Punkte sind Daten, die durch Messung der Dreikörper-Rekombinationsrate bei Temperaturen um die 10 nK gewonnen wurden. Die aufgetragene Rekombinationslänge ist proportional zur vierten Wurzel der Rekombinationsrate. Das Inset zeigt die Daten bei positiver Streulänge mit erhöhter Auflösung. Die durchgezogenen Kurven und Geraden sind Theoriekurven. Die Dreiecke und die Rauten repräsentieren Daten, die bei höheren Temperaturen gewonnen wurden. Die Abbildung wurde Ref. [2] entnommen.

Literatur (die Arbeiten mit * sind aus Innsbruck):

- [1] V. Efimov, Energy levels arising from resonant two-body forces in a three-body system, Phys. Lett. B 33, 563 (1970); Weakly-bound states of three resonantly-interacting particles, Sov. J. Nucl. Phys. 12, 589 (1971).
- [2] *T. Kraemer et al., Evidence for Efimov quantum states in an ultracold gas of caesium atoms, Nature 440, 315 (2006).
- [3] *S. Knoop et al., Observation of an Efimov-like trimer resonance in ultracold atom-dimer scattering, Nature Phys. 5, 227 (2009).
- [4] *M. Berninger et al., Universality of the Three-Body Parameter for Efimov States in Ultracold Cesium, Phys. Rev. Lett. 107, 120401 (2011).
- [5] *B. Huang et al., Observation of the Second Triatomic Resonance in Efimov's Scenario, Phys. Rev. Lett. 112, 190401 (2014).

Weitere Informationen zum Thema der Bachelorarbeit: Hanns-Christoph Nägerl