Ultrakalte Quantenmaterie: Die Grimm Gruppe

Credit: Harald Ritsch

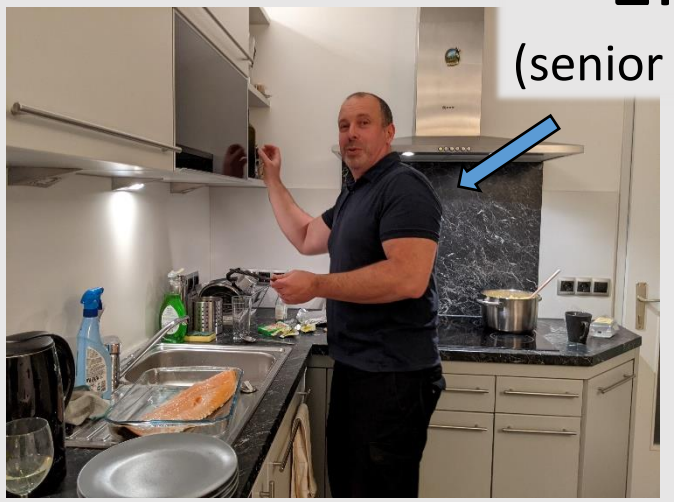
Rudi
(Prof.)

Cosetta
(PhD student)

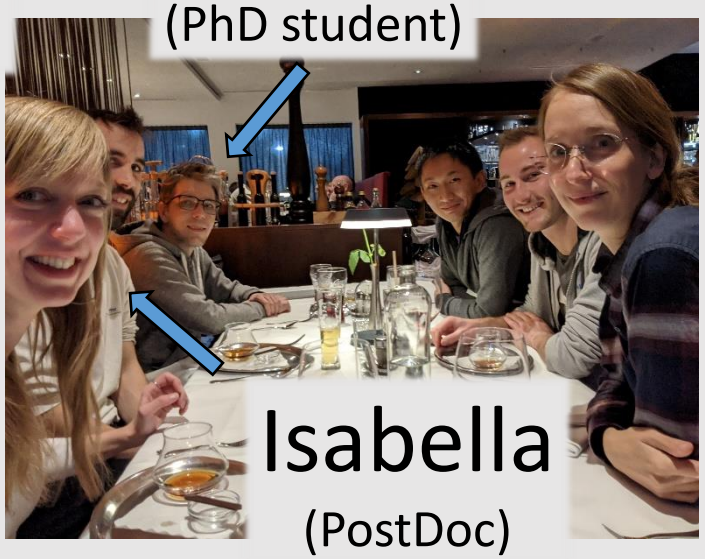
Bo
(PostDoc)

Erich
(PhD student)

Emil
(senior scientist)

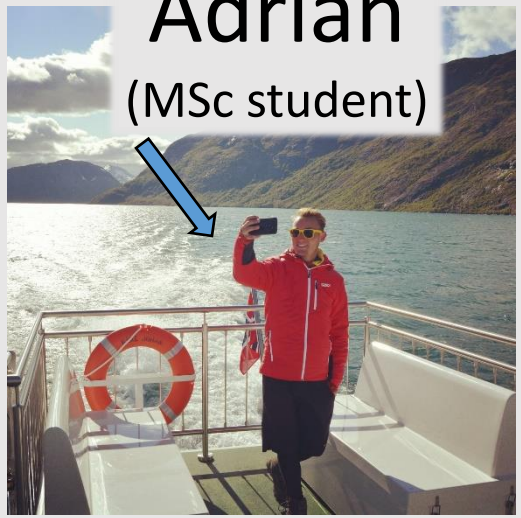


Gregor
(PhD student)



Isabella
(PostDoc)

Adrian
(MSc student)



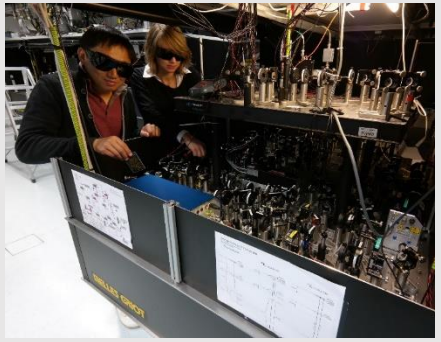
Hier arbeiten wir

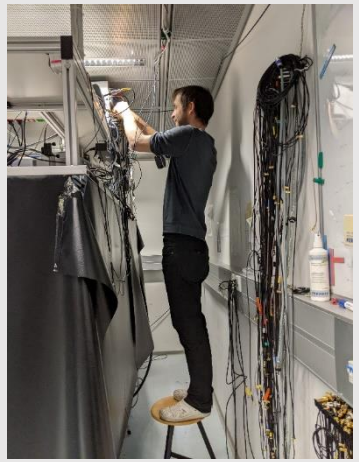
Experimental-physik

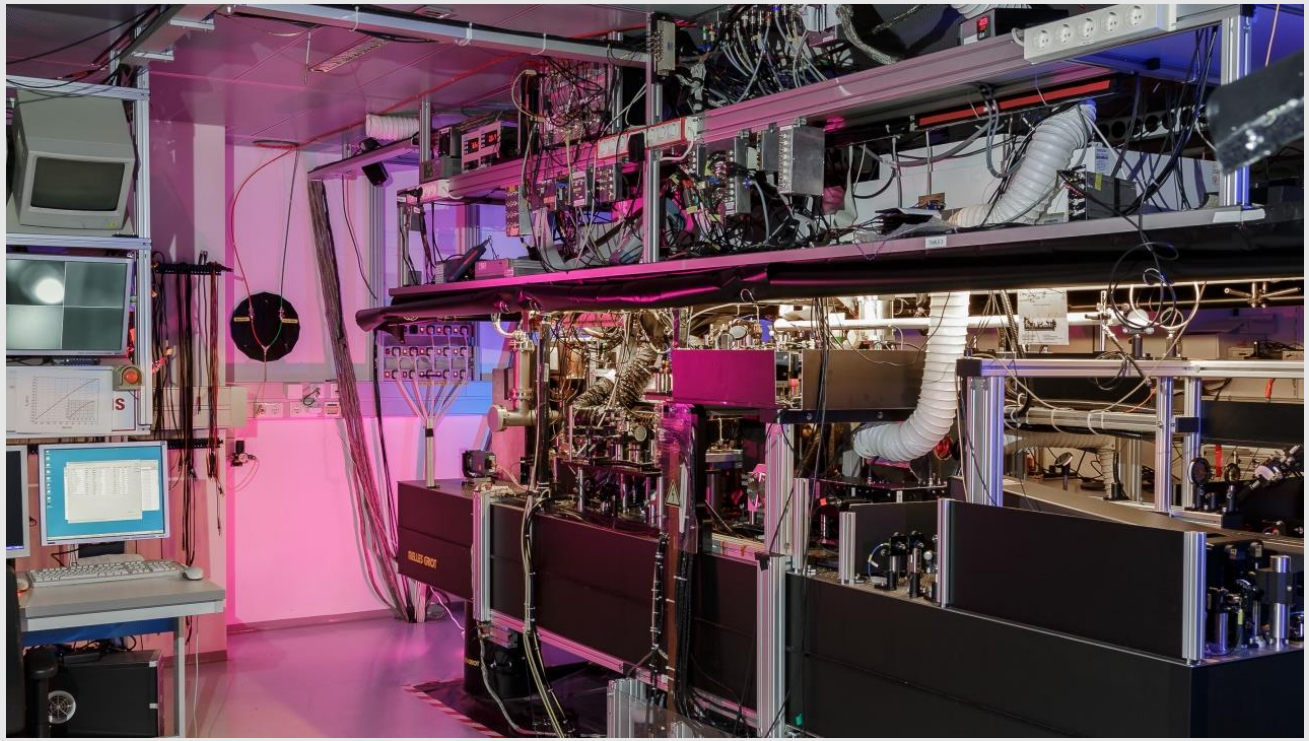
Theoretische Physik

Astro- und Teilchenphysik

Ionen- und Angewandte Physik







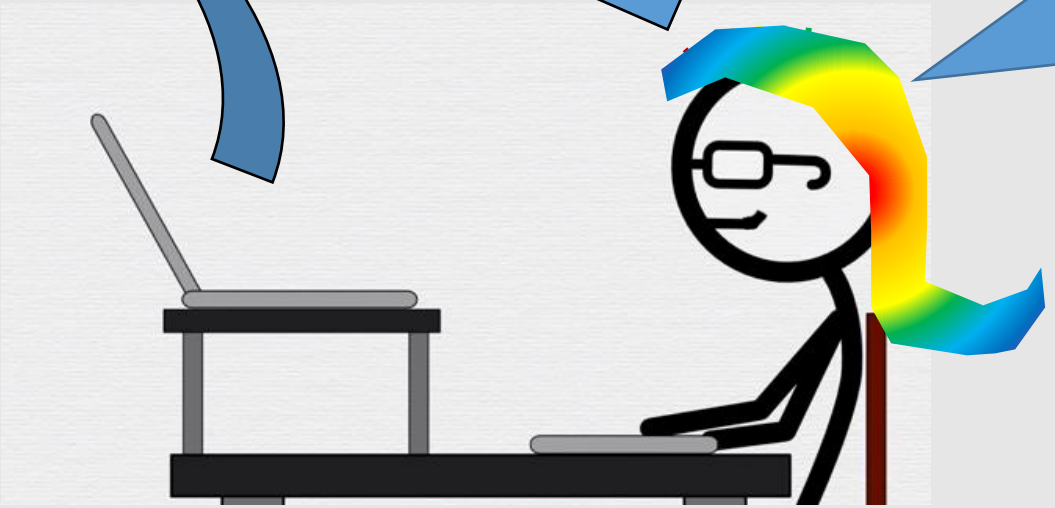
So sieht eine Bachelorarbeit bei uns aus

E-Mail an Prof. Grimm, oder Emil Kirilov

4

1 Du

(BSc Student)



2

Vorlesungsverzeichnis: 704710 SE Seminar mit Bachelorarbeit

3

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.

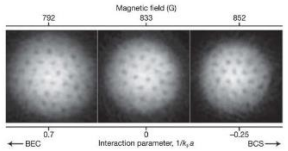
Die Bachelorarbeit soll Schlüsselexperimente diskutieren, durch die seit Mitte der 2000er-Jahre die zentralen Aspekte der Suprafluidität nachgewiesen werden konnte. Dazu gehören die Beobachtung eines Fermi-Kondensats (Boulder, 2004), die Detektion von Quantenwirbeln in einem rotierenden Gas (MIT, 2005), 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

So sieht eine Bachelorarbeit bei uns aus

- **!! Mitte Februar werden Themen vergeben !!**
- Vorbesprechung **(Februar)**
- Physik verstehen und diskutieren **(Februar/März)**
- Schreiben/lesen **(April++)**
- MidTerm Besprechung **(Mitte April)**
- Arbeit abgeben **(Mitte Juni)**
- Arbeit Verteidigen **(Ende Juni)**

LETTER

doi:10.1038/nature12136

Second sound and the superfluid fraction in a Fermi gas with resonant interactions

Leonid A. Sidorenkov[1,2], Meng Khoon Tey[1,2], Rudolf Grimm[1,2], Yan-Hua Hou[3], Lev Pitae

Vortices and superfluidity in a strongly interacting Fermi gas

M. W. Zwierlein[1], J. R. Abo-Shaeer[1]†, A. Schirotzek[1], C. H. Schunck[1] & W. Ketterle[1]

Observation of Resonance Condensation of Fermionic Atom Pairs

C. A. Regal, M. Greiner, and D. S. Jin*

JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado, and Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309-0440, USA

(Received 13 January 2004; published 28 January 2004)

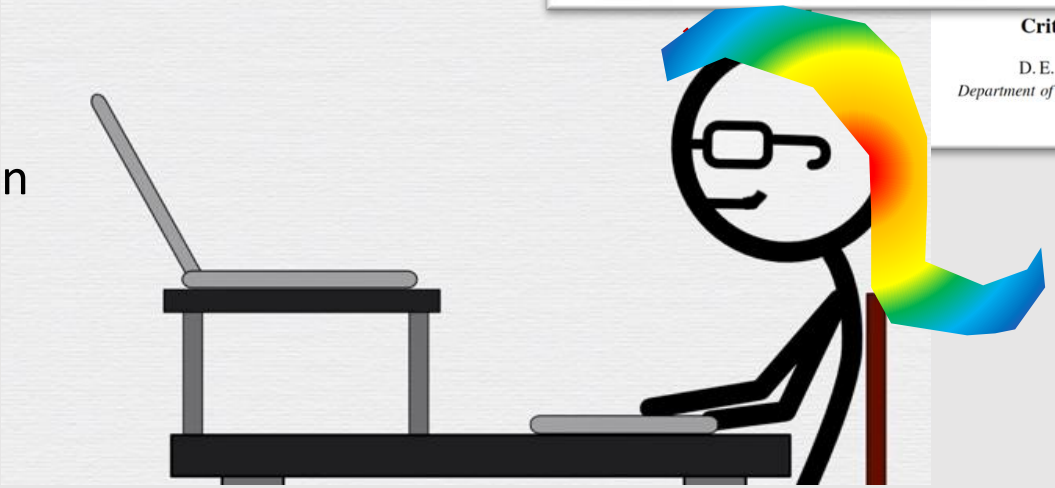
LETTERS week ending 17 AUGUST 2007

Critical Velocity for Superfluid Flow across the BEC-BCS Crossover

D. E. Miller, J. K. Chin, C. A. Stan,* Y. Liu, W. Setiawan, C. Sanner, and W. Ketterle†

Department of Physics, MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms, and Research Laboratory of Electronics, MIT, Cambridge, Massachusetts 02139, USA

(Received 11 July 2007; published 16 August 2007)



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.

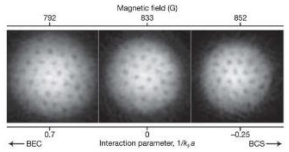
Die Bachelorarbeit soll Schlüsselexperimente diskutieren, durch die seit Mitte der 2000er-Jahre die zentralen Aspekte der Suprafluidität nachgewiesen werden konnte. Dazu gehören die Beobachtung eines Fermi-Kondensats (Boulder, 2004), die Detektion von Quantenwirbeln in einem rotierenden Gas (MIT, 2005), 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

Revealing the Superfluid Lambda Transition in the Universal Thermodynamics of a Unitary Fermi Gas

Mark J. H. Ku, Ariel T. Sommer, Lawrence W. Cheuk, Martin W. Zwierlein*

So sieht eine Bachelorarbeit bei uns aus

Observation of Resonance Condensation of Fermionic Atom Pairs

C. A. Regal, M. Greiner, and D. S. Jin*
JILA, National Institute of Standards and Technology and University of Colorado, and Department of Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309-0440, USA
(Received 13 January 2004; published 28 January 2004)

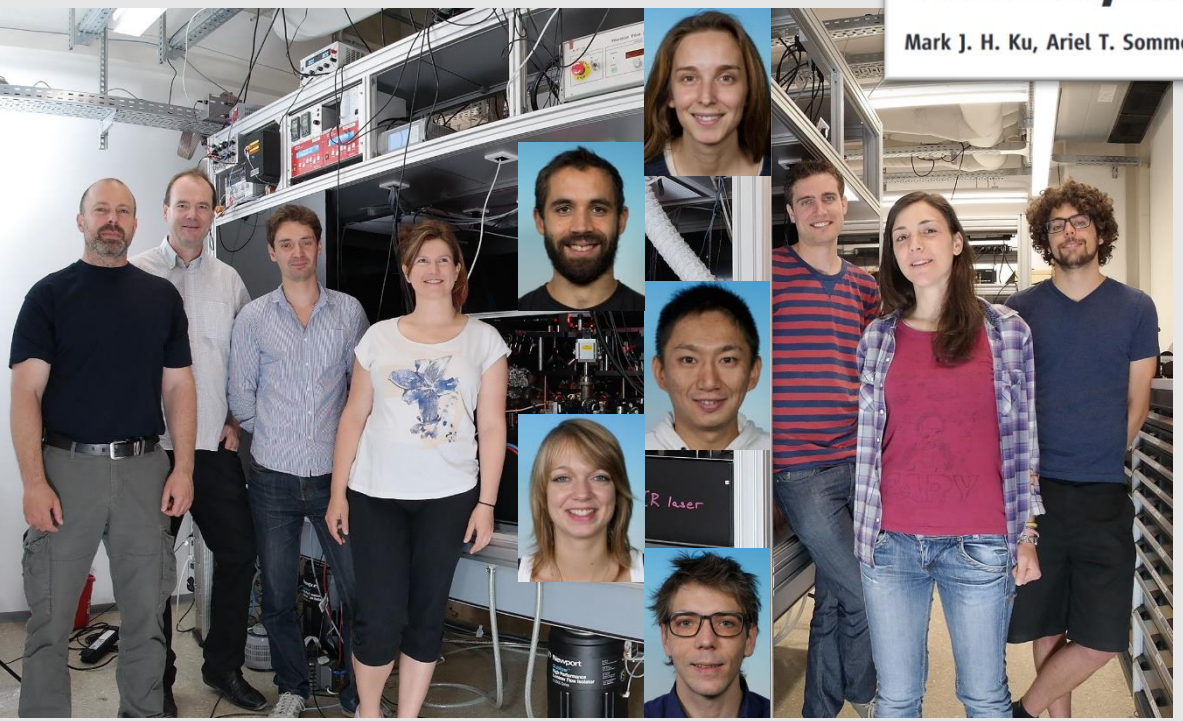
Revealing the Superfluid Lambda Transition in the Universal Thermodynamics of a Unitary Fermi Gas

Mark J. H. Ku, Ariel T. Sommer, Lawrence W. Cheuk, Martin W. Zwierlein*

007) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 17 AUGUST 2007

ritical Velocity for Superfluid Flow across the BEC-BCS Crossover

E. Miller, J. K. Chin, C. A. Stan,* Y. Liu, W. Setiawan, C. Sanner, and W. Ketterle†
of Physics, MIT-Harvard Center for Ultracold Atoms, and Research Laboratory of Electronics, MIT, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
(Received 11 July 2007; published 16 August 2007)



Vortices and superfluidity in a strongly interacting Fermi gas

M. W. Zwierlein[1], J. R. Abo-Shaeer[1]†, A. Schirotzek[1], C. H. Schunck[1] & W. Ketterle[1]

LETTER

doi:10.1038/nature12136

Second sound and the superfluid fraction in a Fermi gas with resonant interactions

Leonid A. Sidorenkov[1,2], Meng Khoon Tey[1,2], Rudolf Grimm[1,2], Yan-Hua Hou[3], Lev Pitaevskii[3,4] & Sandro Stringari[3]

So sieht eine Bachelorarbeit bei uns aus

universität innsbruck

Bachelorarbeit

Interferometrie an Quasiteilchen im Fermigas

Adrian König

Juni 2019

Betreut durch Univ.-Prof. Dr. Rudolf Grimm
und Rianne S. Lous PhD.
Institut für Experimentalphysik

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **4**

2 Konzept Quasiteilchen **5**

3 Grundlagen ultrakalter Fermigase **6**
3.1 Ultrakalte Fermigase . . . 6
3.2 Wechselwirkungen in Fermigasen . . . 7
3.2.1 Feshbach-Resonanzen . . . 7
3.2.2 BEC-BCS Crossover . . . 9
3.3 Polaron-Experimente der letzten Jahre . . . 10

4 Innsbrucker Aufbau **11**
4.1 Die Fermigas-Apparatur . . . 11
4.2 Experimenteller Zyklus . . . 12

5 Innsbrucker Experimente **14**
5.1 Interferometrische Methoden . . . 14
5.1.1 Prinzip der Atominterferometrie . . . 14
5.1.2 Spin-Echo Methode . . . 16
5.1.3 Ramsey Methode . . . 17
5.2 Messungen an Quasiteilchen . . . 17
5.2.1 Dekohärenz von Polaronen . . . 17
5.2.2 Ultraschnelle Quantenevolution . . . 19

6 Ausblick **22**

Literatur **23**

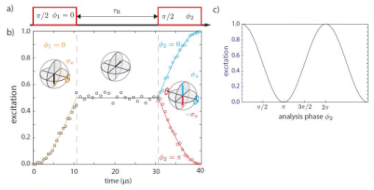


Abbildung 5.2: Schematische Idee der Ramsey-Pulse. In **a)** dargestellt die typische Pulssequenz der Ramsey Interferometrie mit Evolutionszeit τ_R. In **b)** die zeitliche Entwicklung der Populationen bei Anwendung der Sequenz aus **a)** und in **c)** die Population des angeregten Zustandes abhängig vom Phasenverschub ϕ bei kohärenter Evolution. Quelle: [Hem14].

Bei Verwendung resonanten Lichts ($\delta = 0$) wird das Atom gemäß Gleichung (5.1) bei einer Pulsdauer des Lasers von $t = \pi/\Omega$ mit einer Wahrscheinlichkeit von eins in den angeregten Zustand versetzt. Befindet sich das K-Atom zu Beginn im Grundzustand $|\psi\rangle = |1\rangle$, flippt es aufgrund des Lichtpulses um 180° nach oben in den angeregten Zustand $|0\rangle$, was die Nomenklatur des π–Pulses rechtfertigt. Ist der Puls dagegen nur $\Omega t = \pi/2$ lang, so beträgt die Wahrscheinlichkeit der Anregung nach $|0\rangle$ genau $|P_2(\pi/(2\Omega))|^2 = 1/2$. Die Anwendung eines $\pi/2$–Pulses bewirkt demnach das Flippen des Zustandsvektors in die Äquatorialebene der Bloch-Kugel. Folglich befindet sich die Wellenfunktion des Atoms unmittelbar nach dem Puls in einer Superposition der beiden Zustände mit jeweils gleicher Amplitude

$$|\psi\rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|1\rangle + |0\rangle\right). \tag{5.3}$$

Die beiden internen Zustände können nun miteinander interferieren, weswegen der Zustand (5.3) nicht statisch ist, sondern sich nach der Zeit τ folgend entwickelt hat [Hem14]

$$|\psi\rangle_\tau = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|1\rangle + ie^{-i\omega_0\tau}|0\rangle\right). \tag{5.4}$$

Diese zeitliche Entwicklung entspricht einer Rotation des Zustandsvektors in der Äquatorialebene der Bloch-Kugel. Um sich die Interferometrie während der zeitlichen Entwicklung zunutze zu machen, ist der nächste logische Gedanke die Anwendung eines zweiten Pulses. Erstmals herangezogen wurde diese Idee von Norman Ramsey, weswegen die Anwendung zweier zeitlich getrennter Pulse auch Ramsey-Sequenz genannt wird [Ram90].

Bei Anwendung eines zweiten $\pi/2$–Pulses auf den Zustand (5.4) hängt das Verhalten des Atoms von mehreren Faktoren ab. Für eine kohärente Evolution spielt für die Änderung des Wellenvektors, wenn wir für die Phase des ersten Pulses $\phi_1 = 0$ setzen, nach dem zweiten Puls dessen Phase ϕ_2 die entscheidende Rolle. Beträgt diese $\phi_2 = (2n+1)\pi,\ n \in \mathbb{N}$, so kommt es zur destruktiven Interferenz des angeregten Zustands und das Atom fällt gänzlich in den Grundzustand $|1\rangle$ zurück. Bei einem Phasenverschub von $\phi_2 = 2\pi n$ dagegen wird das Atom vollständig in den angeregten Zustand versetzt.

Literatur

[Bar57] J. Bardeen, L. N. Cooper und J. R. Schrieffer. „Theory of Superconductivity“. *Phys. Rev.* 108.5 (1957), S. 1175–1204.

[Bau09] D. M. Bauer, M. Lettner, C. Vo, G. Rempe und S. Dürr. „Control of a magnetic Feshbach resonance with laser light“. *Nature* 5 (2009), S. 339–342.

[Cet15] M. Cetina, M. Jag, R. S. Lous, J. T. M. Walraven, R. Grimm, R. S. Christensen und G. M. Bruun. „Decoherence of Impurities in a Fermi Sea of Ultracold Atoms“. *Phys. Rev. Lett.* 115.13 (2015), S. 135302.

[Cet16] M. Cetina, M. Jag, R. S. Lous, I. Fritsche, J. T. M. Walraven, R. Grimm, J. Levinsen, M. M. Parish, R. Schmidt, M. Knap und E. Demler. „Ultrafast many-body interferometry of impurities coupled to a Fermi sea“. *Science* 354.6308 (2016), S. 96–99.

[Che09] F. Chevy. „Swimming in the Fermi sea“. *Physics* 2 (2009).

[Chi10] C. Chin, R. Grimm, P. Julienne und E. Tiesinga. „Feshbach resonances in ultracold gases“. *Rev. Mod. Phys.* 82.2 (2010), S. 1225–1286.

[Chr15] R. S. Christensen und G. M. Bruun. „Quasiparticle scattering rate in a strongly polarized Fermi mixture“. *Phys. Rev. A* 91.4 (2015), S. 042702.

[Coh10] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, J. Streubel und J. Balla. *Quantenmechanik.* Berlin, New York: Walter De Gruyter Incorporated, 2010.

[Dem10] W. Demtröder. *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper.* Springer, 2010.

[Fer09] F. Ferlaino, S. Knoop und R. Grimm. „Ultracold Feshbach Molecules“. *Cold Molecules: Theory, Experiment, Applications.* Hrsg. von R. V. Krems, B. Friedrich und W. C. Stwalley. CRC Press, 2009.

[Foo11] C. J. Foot. *Atomic physics.* Oxford master series in atomic, optical and laser physics. New York: Oxford Univ. Press, 2011.

[Gri00] R. Grimm, M. Weidemüller und Y. B. Ovchinnikov. „Optical Dipole Traps for Neutral Atoms“. *Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics.* Hrsg. von B. Bederson und H. Walther. Bd. 42. Academic Press, 2000, S. 95–170.

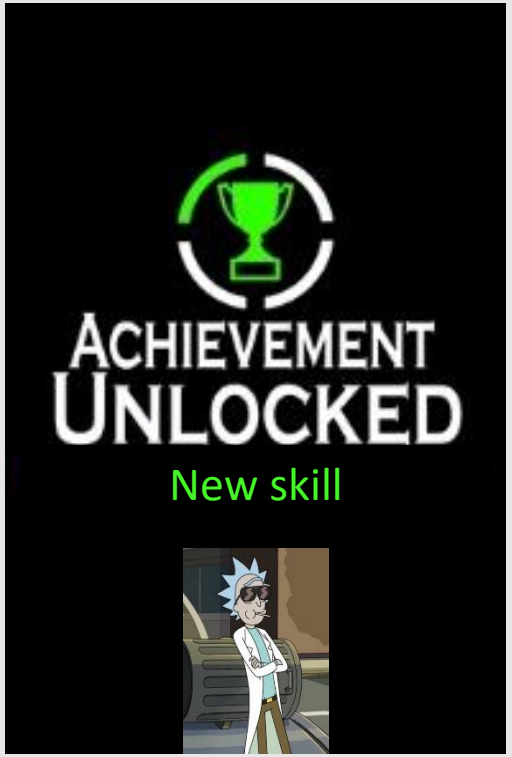
[Gri07] R. Grimm. „Ultracold Fermi gases in the BEC-BCS crossover: a review from the Innsbruck perspective“. *Proceedings of the International School of Physics „Enrico Fermi“* 164.Ultracold Fermi Gases (2007), S. 413–462.

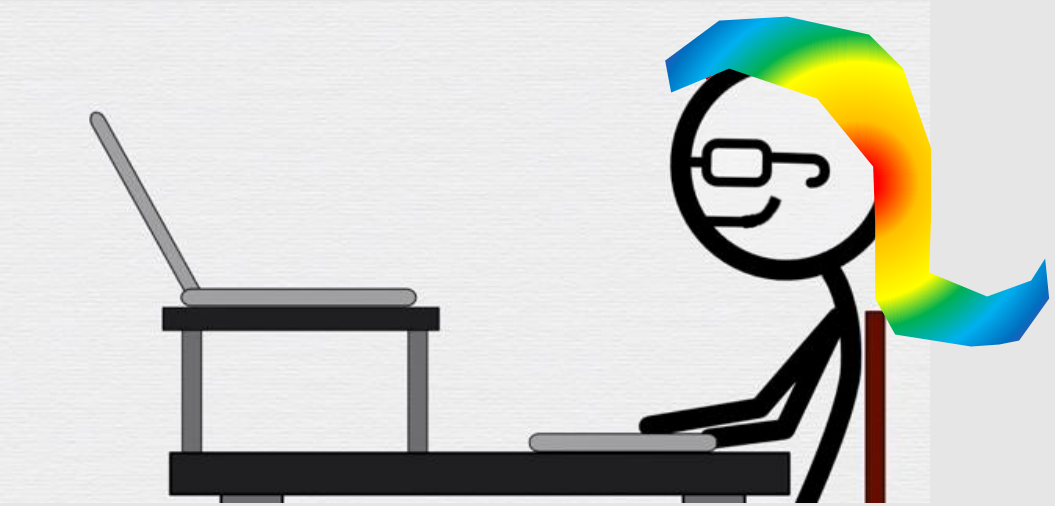
[Gri17] R. Grimm. „Zaubertrick in der Vielteilchenwelt“. *Physik in unserer Zeit* 48 (2017), S. 3.

[Han12] P. Hannaford. „Repulsive polarons found“. *Nature* 485 (2012), S. 588–589.

[Hec04] J. Hecker Denschlag, H.-C. Nägerl und R. Grimm. „Moleküle am absoluten Nullpunkt“. *Physik Journal* 3.3 (2004), S. 33–39.

… fin





www.ultracold.at/grimm