

## Gepaart und doch nicht suprafluid

11-05-2007

### Gepaart und doch nicht suprafluid

*Im Fermigas hindert eine unausgeglichene Spinmischung die Cooper-Paare an der Kondensation.*

Während Bosonen bei sehr tiefen Temperaturen bestenfalls ein Bose-Einstein-Kondensat (BEC) bilden, besitzen Fermionen ein wesentlich reichhaltigeres Repertoire, wie man an ultrakalten Gasen aus fermionischen Atomen beobachtet hat. So können sich die Atome paarweise zu bosonischen Molekülen verbinden, aus denen dann ein suprafluides BEC entsteht. Sie können sich aber auch locker zu Cooper-Paaren zusammenschließen, die ein suprafluides Kondensat bilden, wie man es aus der BCS-Theorie der Supraleitung kennt. Doch jetzt berichtet die Ketterle-Gruppe vom MIT, dass atomare Cooper-Paare u. U. selbst bei beliebig tiefer Temperatur nicht kondensieren. Die fermionischen Atome sind dann gepaart und dennoch nicht suprafluid.

Wie Wolfgang Ketterle und seine Mitarbeiter dies nachweisen, lässt die enormen Fortschritte erkennen, die es bei den Experimenten mit ultrakalten Gasen in den letzten Jahren gegeben hat. Zunächst wurde eine Wolke von etwa 20 Millionen fermionischen Lithium-6-Atomen auf eine Temperatur von 50 Nanokelvin abgekühlt (in 40 s!) und in einer optischen Falle festgehalten. Mit Hochfrequenzfeldern wurden die Atome dann in zwei verschiedene Hyperfeinzustände („Spin auf“ bzw. „Spin ab“) gebracht. Dabei konnten die Forscher das Zahlenverhältnis der Atome in den beiden Zuständen nach Belieben variieren: von einer ausgeglichenen Spinmischung bis zu einer Mischung, in der „Spin auf“ neunmal häufiger war als „Spin ab“.

Die Wechselwirkung zwischen den Lithiumatomen ließ sich dank einer so genannten Feshbach-Resonanz mit Hilfe eines starken Magnetfeldes maßschneidern. Bei einer Feldstärke von 833 Gauß hatten nämlich zwei zu einem Molekül verbundene Atome mit unterschiedlichem Spin nahezu dieselbe Energie wie zwei ungebundene Atome mit gleichem Spin. Durch die Hyperfeinwechselwirkung werden diese beiden Paarzustände hybridisiert, sodass sich der ungebundene Zustand in einen schwach gebundenen verwandelte. Erhöhte man die Stärke des Magnetfeldes in einem Intervall um die Feshbach-Resonanz, so wandelten sich die Lithiummoleküle kontinuierlich in locker gebundene Atompaare und schließlich in Cooper-Paare um, die räumlich getrennt waren aber abgestimmte Impulse hatten. Dieser Übergang war schon früher beobachtet worden.

Beim aktuellen Experiment wollten die Forscher die Kondensation von locker gebundenen Atompaaren untersuchen. Deshalb stellten sie das Magnetfeld auf einen Wert an oder oberhalb der Feshbach-Resonanz ein. War die Spinmischung in der Atomwolke ausgeglichen, so fand jedes Atom einen Partner mit entgegengesetztem Spin, mit dem es sich verbinden konnte. Bei hinreichend tiefer Temperatur kondensierten diese Paare und bildeten eine Supraflüssigkeit. Das belegten die quantisierten Flusswirbel, die im Kondensat auftraten, wenn es in Drehung versetzt wurde. War die Spinmischung jedoch unausgeglichene, so blieben ungepaarte Atome übrig, die den anderen Atomen die Paarung und die anschließende Kondensation erschwerten. Bildete sich schließlich bei weiterem Absenken der Temperatur doch noch ein suprafluides Kondensat, so drängte es die ungepaarten Atome aus sich heraus und an den Rand der Wolke.

In stark unausgegliehenen Spinmischungen (etwa 3:1 und darüber) kam überhaupt kein Kondensat mehr zustande, selbst bei noch so tiefer Temperatur. Lag es daran, dass sich die Atome nicht mehr paarten, oder daran, dass die Paare nicht mehr kondensierten? Wenn sich Paare bildeten, so mussten sie eine Bindungsenergie besitzen, die ihr Auseinanderbrechen verhinderte. Um diese Energie zu messen, regten die Forscher die „Spin auf“-Atome mit einem Hochfrequenzfeld an, dessen Frequenz sie variierten. Bei einer bestimmten Frequenz gab es eine Resonanz und die Atome machten einen Übergang zu einem weiteren Hyperfeinzustand. Wurde die Temperatur der Atomwolke verringert, so trat plötzlich eine zweite Resonanz bei einer höheren Frequenz auf. Das lag daran, dass sich ein Teil der Atome jeweils mit einem anderen Atom zu einem Paar verbunden hatte. Die zu diesen Atomen gehörende Resonanzfrequenz war um die Bindungsenergie erhöht. Daran konnte man erkennen, dass sich die Atome bei hinreichend tiefer Temperatur auch in solchen Spinmischungen paarten, die so unausgegliehen waren, dass es nicht zur Bildung eines suprafluiden Kondensats kommen konnte.

Die Forscher schließen daraus, dass man die Paarung der Atome und das Auftreten der Suprafluidität streng voneinander trennen muss. Offenbar hängt der Übergang von der normal-flüssigen zur suprafluiden fermionischen

Atomwolke nicht nur von der Paarungsenergie ab. Wovon er noch abhängen könnte, soll in weiteren Experimenten untersucht werden.

Rainer Scharf

#### Weitere Infos:

- Originalveröffentlichung:  
*C. H. Schunck et al.*: Pairing Without Superfluidity: The Ground State of an Imbalanced Fermi Mixture. *Science* **316**, 867 (2007).  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1140749>  
<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0702066>
- Gruppe von Wolfgang Ketterle:  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/](http://cua.mit.edu/ketterle_group/)  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/experimental\\_setup/BEC\\_I.htm](http://cua.mit.edu/ketterle_group/experimental_setup/BEC_I.htm)
- Weitere Gruppen:  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/experimental\\_setup/BEC\\_I/links.html](http://cua.mit.edu/ketterle_group/experimental_setup/BEC_I/links.html)

#### Weitere Literatur:

- *Martin W. Zwierlein et al.*: Fermionic Superfluidity with Imbalanced Spin Populations. *Science* **311**, 492 (2006).  
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1122318>  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/...\(2006\).pdf](http://cua.mit.edu/ketterle_group/...(2006).pdf) (frei!)
- *Y. Shin et al.*: Observation of Phase Separation in a Strongly-Interacting Imbalanced Fermi Gas. *Phys. Rev. Lett.* **97**, 030401 (2006).  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.030401>  
[http://cua.mit.edu/ketterle\\_group/.../shin06\\_Phase\\_sep.pdf](http://cua.mit.edu/ketterle_group/.../shin06_Phase_sep.pdf) (frei!)
- *R. Grimm*: Ultracold Fermi gases in the BEC-BCS crossover: a review from the Innsbruck perspective.  
<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0703091>

copyright pro-physik.de  
www.pro-physik.de