

Physik von Neutronensternen im Labor: Atomare Fermigase

Seminar über aktuelle Themen der angewandten Optik von kondensierter Materie Zusammenfassung des Vortrags von Juraphan Tummo

Fermigase sind Gase aus Fermionen. Ein Beispiel für Fermigase sind Neutronensterne. Sie bestehen aus einer großen Zahl von sehr dicht gepackten Neutronen. Aufgrund des Fermidrucks, der entgegen des Schweredrucks wirkt, sind Neutronensterne stabil und fallen nicht in sich zusammen.

Die Ursache des **Fermidrucks**[1] lässt sich folgendermaßen veranschaulichen. Man betrachtet dazu die Energieniveaus eines Kastenpotentials unter Kompression. Die Abstände der Energieniveaus und damit auch die Gesamtenergie werden bei einer Verkleinerung des Volumens größer, was in einem (positiven) Druck resultiert. Bei hohen Temperaturen und geringem Druck hingegen verhält sich ein Fermigas wie ein klassisches Gas, und die Auswirkungen des Fermidrucks sind nicht beobachtbar. Im Folgenden geht es darum, wie man ultrakalte atomare Fermigase im Labor erzeugt, um ihre quantenmechanischen Eigenschaften zu untersuchen.

In der Regel werden Experimente mit ultrakalten Fermigasen in einer Vakuumkammer durchgeführt, deren Druck im Bereich des Ultrahochvakuums liegt. Der niedrige Druck garantiert eine geringere Wechselwirkung des Fermigases mit seiner Umgebung, was zu einer länger verfügbaren Experimentierzeit führt.

Aus diesem Grund sind viele Kammer Systeme in eine Vor- und Hauptkammer aufgeteilt. Die Vorkammer, mit einem höheren Druck als die Hauptkammer, übernimmt die Funktion einer Atomquelle (2D-MOT bzw. Zeeman-Slower), die der Hauptkammer einen vorgekühlten Atomstrahl zur Verfügung stellt.

In der Hauptkammer werden die Atome aus dem Atomstrahl mittels einer magneto-optischen Falle (MOT) eingefangen und gekühlt [4]. Die MOT besteht aus einer Überlagerung eines Lichtfeldes, erzeugt durch Laserstrahlen, mit einem inhomogenen Magnetfeld. Die Laserstrahlen sind so angeordnet, dass jeweils zwei kollinear (entgegengesetzt) verlaufen und insgesamt ein rechtwinkiges Koordinatensystem ergeben. Das inhomogene Magnetfeld ist so mit den Laserstrahlen überlagert, dass der Nulldurchgang des Magnetfeldes mit dem Kreuzungspunkt aller sechs Strahlen zusammenfällt. Das Volumen um diesen Punkten bildet das Zentrum der MOT, in dem die Atome gefangen gehalten werden. Die Laserfrequenzen müssen so an die Atomübergänge angepaßt sein, dass erstens Atome, die einem Laserstrahl entgegenfliegen, wegen des Dopplereffekts die Resonanzbedingung erfüllen und durch die Absorption gebremst, also gekühlt, werden. Zweitens müssen die Atome im Zentrum der Falle gehalten werden. Dazu dient das inhomogene Magnetfeld. Es verschiebt die benutzten Atomniveaus so, dass sie der Laserfrequenz um so näher kommen, je weiter weg sie vom Zentrum der Falle sind. Mit anderen Worten, Atome, die weiter weg vom Zentrum dem Laser entgegenfliegen, absorbieren mit größerer Wahrscheinlichkeit und bekommen einen Impuls in Richtung zum Zentrum, sofern sie nicht schneller als die Einfanggeschwindigkeit der MOT sind.

In einer MOT können nicht beliebig tiefe Temperaturen erreicht werden. Daher werden die Atome aus der MOT in eine Magnetfalle oder optischen Dipolfalle umgeladen. Hier können durch evaporative Kühlung Temperaturen und Dichten erreicht werden, wie sie für die Erzeugung eines entarteten Fermigases notwendig sind. Im Folgenden soll auf die Evaporation in der optischen Dipolfalle eingegangen werden.

Hierbei erreicht man durch Reduzierung der Laserleistung, dass die schnellsten Atome die Falle verlassen können, während die verbliebenen Atome durch Stöße ein thermisches Gleichgewicht bei niedrigerer Temperatur herstellen.

Allerdings ist der **Stoßwirkungsquerschnitt** für Fermionen in der Regel sehr klein, denn:

Wenn 2 Atome aneinander stoßen, lässt sich die Ortswellenfunktion zur Relativkoordinate nach dem Stoß in Partialwellen zerlegen. Bei kalten Gasen dominiert hierbei die s-Wellenstreuung ($l=0$). In der Regel sind die Atome (wie z.B. in der MOT durch das Magnetfeld) polarisiert, d.h. die Spinwellenfunktion ist symmetrisch. Für Fermionen ist daher die symmetrische **s-Wellenfunktion** nach dem Stoß nicht möglich, was in einem kleinen Streuquerschnitt resultiert.

Mögliche Tricks, um dies zu umgehen:

1. Man kann Bosonen und Fermionen gemeinsam kühlen (Bosonen stoßen mit Fermionen), und hinterher die Bosonen wieder entfernen. (sympathetische Kühlung)
2. Man kühlt ein Gemisch mit entgegengesetztem Spin und trennt sie nach dem Kühlen wieder.

Leider kann man die gekühlten Atome nicht beobachten, während sie in der Falle gehalten werden, weil die Beobachtungsphotonen sie aus der Falle stoßen würden. Man muß so vorgehen: Mittels einer sogenannten Absorptionaufnahme der Atome in der optischen Dipolfalle, bei der sozusagen ein Schattenbild erzeugt wird, lassen sich Informationen über die Anzahl und Temperatur der Atome gewinnen, die in der Dipolfalle waren. Dazu wird die Dipolfalle ausgeschaltet und ein Schattenbild nach unterschiedlichen Fallzeiten erzeugt. Im Schattenbild ist die Information über die Temperatur der Atome enthalten, die durch die Gaußbreite der zugrunde liegenden

Gaußverteilung charakterisiert ist. Betrachtet man nun die Entwicklung der Gaußbreite über die Zeit hinweg, läßt sich daraus die Geschwindigkeitsverteilung ermitteln. Die Zahl der Atome läßt sich ebenfalls bestimmen. Dazu bedient man sich des Lambert-Beerschen-Gesetzes, auf die Details soll hier jedoch nicht weiter eingegangen werden.

Eine interessante Tatsache ist, dass die **Wechselwirkung** zwischen den Fermionen durch äußeres Magnetfeld beeinflussbar ist. Bei der sogenannten Feshbach-Resonanz, bei der die beobachtete Streulänge im Prinzip unendlich groß werden kann, sind für Magnetfelder in der Nähe der Resonanz bei einem ultrakalten Fermigas interessante Phänomene beobachtbar. Für kleinere Magnetfelder ist es energetisch günstiger, wenn zwei Fermionen ein sehr schwach gebundenes Molekül bilden, während für größere Magnetfelder je zwei Fermionen (in unterschiedlichen Quantenzustand) ein Cooper-Paar bilden. Im ersten Fall kann man Bose-Einstein Kondensation beobachten, der zweite Fall mit der Cooper-Paarbildung, wird durch die BCS-Theorie beschrieben. Daher kann man durch Variation des Magnetfeldes bei ultrakalten Fermionen einen Übergang von BEC zu BCS beobachten. Dies ist eine besonders wichtige **Anwendung** für ultrakalte Fermigase: Indem man in der Lage ist, ein quantenmechanisches Vielteilchen-System im Labor qualitativ zu verändern, kann man dessen quantenmechanische Eigenschaften besser verstehen. Da auch die Supraleiter mit der BCS-Theorie beschrieben werden, kann man hoffen, über diesen wichtigen Zustand der Materie neue Einsichten zu gewinnen [1].

Literaturangaben

- [1] Andrew G. Truscott, Kevin E. Strecker, William I. McAlexander, Guthrie B. Partridge, Randall G. Hulet ,
Science **291**, 2570, (2001)
- [2] Markus Greiner, Cindy A. Regal and Deborah S. Jin, „Measurement of positive and negative scattering lengths
in a Fermi gas of atoms“ Nature **426**, **537**, (2003)
- [3] Steven Chu, L. Hollberg, J.E. Bjorkholm, Alex Cable and A. Ashkin, „Three – Dimensional Viscous Confinement and Cooling of
Atoms by Resonance Radiation Dressure“, Phys. Rev. Lett. **55**, **48** (1958)