

極低温⁶Li 原子気体による

*p*波フェッシュバッハ共鳴を用いた蒸発冷却

電気通信大学, レーザー新世代研究センター 向山研究室 B4 吉田 純

1. 目的

本研究室では、極低温フェルミ原子⁶Li における *p*波超流動状態の実現を目標としている。超流動のようなマクロな量子現象は、それを引き起こす粒子間相互作用の対称性がその物性の発現に決定的な役割を果たす。*p*波超流動は角運動量 $l=1$ フェルミオンの対によって引き起こされる現象であり、³He の超流動現象や、一部の超伝導現象に見られる現象である。そのため、*p*波超流動の物理を解明することは高温超伝導物質の発見などにも繋がり、物理学の発展はもちろん、工学的にも大きく貢献すると予想されている。しかし、それらの系はスピンが均一でなかったり、相互作用の対称性が単一でなかったりするので、複雑であり、未だに超流動の詳細な物理は明らかになっていない。

冷却原子系は不純物がなく、粒子の統計性、密度、温度、相互作用等を自由に制御できる系である。特に、本来原子由来である原子間相互作用を、フェッシュバッハ共鳴を用いることで、外部から自由に制御できることは非常に有用である。また、*p*波フェッシュバッハ共鳴を用いることで *p*波相互作用だけを増大させた原子集団を作ることが可能である。フェルミ粒子であれば、1つの状態の原子集団を使うことで *s*波相互作用のない *p*波相互作用のみが起こる系が実現できる。よって、*p*波散乱のフェッシュバッハ共鳴を用いて超流動が観測されれば、フェルミオンペアが *p*波の対称性を持つことは疑う余地がない。そのため、冷却原子系において *p*波超流動を実現することは *p*波超流動現象の詳細な解明に繋がると予想されている。さらに、

原子間相互作用が自在に操れるという自由度を生かすことで超流動³He 系では調べられなかった、*p*波超流動の未踏のパラメータ領域の物性が開拓できる。

2. 原理

原子気体が超流動転移を起こすには、①原子間相互作用を強くすること、②原子を冷却すること、が必要である。①はフェッシュバッハ共鳴を用いることによって、②は蒸発冷却することによって実現する。ここではそれぞれの原理について説明する。

2.1 原子間相互作用制御

異なる二つの相互作用ポテンシャルの共鳴現象のことをフェッシュバッハ共鳴と言う。(それぞれ、散乱の始状態・終状態である open channel, 散乱の中間状態に存在する closed channel) 二原子間の散乱を考える。(図1参照)

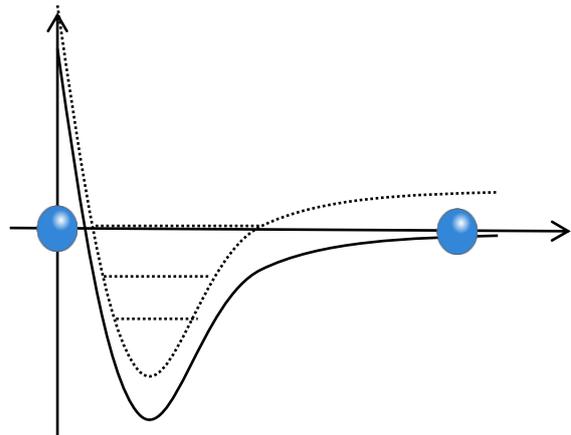


図1 フェッシュバッハ共鳴模式図

図1 実線の open channel の原子が点線の closed channel の束縛エネルギーに近づくと、二原子の状態が open channel と closed channel の重ね合わせで書けるようになり、波動関数が

変化する。すると、状態の重なり具合によって原子間相互作用が変化する。このように「closed channel の束縛エネルギー」＝「open channel から入射した原子のエネルギー」となることをフェッシュバッハ共鳴という。open channel のエネルギー準位は外部磁場に応答して変化するので、我々は外部磁場を掃引することにより、open channel と closed channel 状態の重なり具合を変化させることで原子間相互作用を変調している。よって結合する状態を選ぶことによって相互作用を対称性について選択的に制御することができる。

2.2 原子気体の冷却

我々は光双極子トラップ（以下、光トラップ）を用いて原子を捕獲している。光トラップのトラップ中心では近似的に調和振動ポテンシャルを形成されており、原子気体はトラップ中心を振動中心とした調和振動をしている。よって調和振動トラップ周波数を下げることによって、トラップ中の原子気体の温度を下げるができる。しかし、単純にトラップ周波数を下げただけでは密度が下がってしまうため、位相空間密度が上がらず、「超流動を起こすための冷却」にはなっていない。よってトラップ周波数や密度などを反映したパラメータである、 T_F を用いて規格化した、 T/T_F が冷却の指針となる。 T/T_F を下げるためには蒸発冷却を行う。蒸発冷却とは、運動エネルギーの高い原子を選択的に除去することによって系の平均運動エネルギーを下げ、その系を熱平衡化させることによって位相空間密度を上げる (T/T_F を下げる) 行為である。我々は光トラップの深さを系の熱平衡レートに比べて十分ゆっくりと下げることによって、蒸発冷却を行なっている。

3. 実験

我々は p 波超流動を実現するために、① T/T_F を下げる、② 相互作用を強くした領域での三体ロスレート（後述）の測定、という二つの実験を

行った。以下ではその詳細について示す。

3.1 実験的な加熱の抑制

上述の通り蒸発冷却を行うには系が熱平衡に至らなくてはならない。しかし、極低温下の原子の衝突は s 波衝突のみに収束する一方、スピンの揃ったフェルミオンは p 波、 f 波のような奇数次の衝突しかしないので、同種のフェルミオンは極低温下で衝突しなくなる。このままでは蒸発冷却が出来ないので、我々はスピンの違う二状態の原子を使って相互作用を増大させ、蒸発冷却を行なっている。最終的に p 波超流動を実現するためには、単一種類のフェルミオン系が必要（こちらの原子を $|1\rangle$ とする）であるため、蒸発冷却後に、もう一方の原子（こちらの原子を $|2\rangle$ とする）を除去している。この際に加熱が生じてしまう。我々はこの加熱を極力抑える工夫をした。以前は、三体ロスを利用した方法で $|2\rangle$ を除去していた。三体ロスとは3個の原子が衝突することにより、二個の原子が分子状態になり、衝突した原子と分子が分子の束縛エネルギー分の運動エネルギーを持ってトラップからロスする現象である。 $|2\rangle$ ・ $|2\rangle$ の p 波フェッシュバッハ共鳴を用いることにより、 $|2\rangle$ と $|2\rangle$ の原子の相互作用のみを増大させ、 $|2\rangle$ の原子が選択的に三体ロスを起こすようにしていた。しかし、この方法では①磁場の掃引のため $|2\rangle$ を除去するのに $1s$ 近くかかってしまうこと、②原子の吹き飛ぶ方向が等方的であること（光トラップの形状は軸方向に長い形状をしているため軸方向に吹き飛ぶと加熱が大きくなる）、などの問題があった。そこで我々は $|2\rangle$ の共鳴光を光トラップの軸に対して十分に角度をつけて照射することにした。この方法では、 $|2\rangle$ を除去するのに 0.5ms 程しかかからず、原子は共鳴光の光軸に沿って吹き飛ぶため、加熱が抑えられた。

3.2 T/T_F の測定

3.1 によって得られた、十分に冷却された $|1\rangle$

のみの原子の T/T_F を測定した。測定方法は、原子のトラップを切り、一定時間解放させ、 $|1\rangle$ の共鳴光を照射し、CCD カメラにて吸収イメージングを撮影する。すると観測した吸収イメージング画像は原子の運動量分布となるので、その運動量分布をフェルミ分布関数を使ってフィッティングし、 T/T_F を得る。(フィッティング関数は(1))

$$n_\sigma(\mathbf{r}) = \frac{-6N_\sigma}{\pi^{3/2} R_x R_y R_z} (T/T_F)^{3/2} \text{PolyLog} \left[3/2, -\xi \exp\left(-\frac{x^2/R_x^2 + y^2/R_y^2 + z^2/R_z^2}{T/T_F}\right) \right] \dots (1)$$

$n_\sigma(\mathbf{r})$ は空間における密度分布関数であり、 R_i はトーマス・フェルミ半径、 N_σ はスピンの σ である原子の数、 $\xi = e^{\mu/k_B T}$ 、 μ は化学ポテンシャル、 k_B はボルツマン定数である。蒸発冷却は冷却手法であるが、原子をロスする行為なので、トラップの深さを小さくすればするほど T/T_F が下がるというわけではない。そこで、トラップの深さをどこまで下げた時に一番 T/T_F が下がるかを調べた。その実験の結果を図 2 に示す。

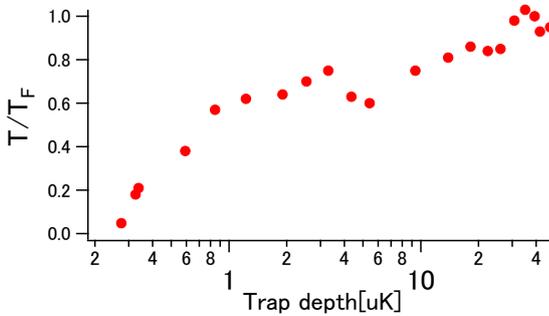


図 2 蒸発冷却効率

図 2 の横軸は蒸発冷却終了時のトラップの深さで、縦軸は蒸発冷却終了時の T/T_F である。最低で $T/T_F=0.048$ を記録した。 $T/T_F=0.048$ という値は、古典粒子の分布関数であるガウス分布ではフィッティングがかからないような、量子統計性が顕著に現れる領域である。

3.3 三体ロスレートの測定

$T/T_F=0.048$ まで原子を冷却することに成功したので、この状態で相互作用を強くすれば ($1/k_F^3 a_p \cong 80$ 程度)[1] 超流動転移する可能性

がある。ここで k_F はフェルミ波数、 a_p は p 波散乱長である。しかし、相互作用を強くすると同時に三体ロスレートが上昇し、 T/T_F が上がってしまう。そこで、三体ロスレートの相互作用依存性を調べた。測定方法は、ある磁場 (相互作用) における寿命を測定し、(2) 式から L_{3p} (三体ロス係数) を求め、 $T/T_F=0.048$ の時のトラップ中心の密度から三体ロスレートを算出した。その結果を図 3 に示す。

$$\dot{n} = -\frac{1}{\tau} n - L_{3p} n^3 \dots (2)$$

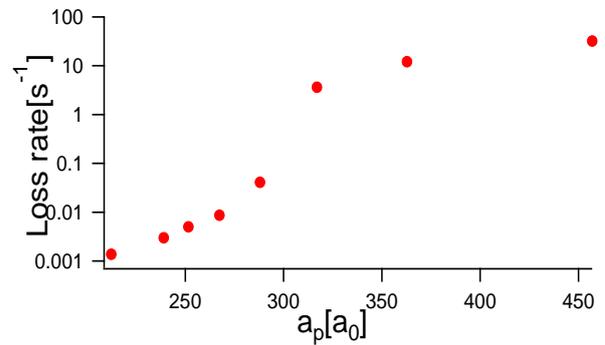


図 3 三体ロスレートの p 波散乱長依存性

図 3 横軸は p 波散乱長で、縦軸は三体ロスレートである。 $1/k_F^3 a_p \cong 80$ 程度を実現するならば、 $a_p \cong 450 a_0$ 程度が必要であるが、その領域では三体ロスレートが $30 s^{-1}$ 程度である。これは超流動実現において問題である。何故なら安定的に超流動を実現するためには系が熱平衡状態にある必要があり、そのためには寿命が $100 ms$ 以上 (三体ロスレートが $10 s^{-1}$ 以下) でなくてはならないからである。また上記の議論は寿命のみを考えた話であり、そもそも三体ロスが起きると加熱が引き起こされ T/T_F 自体が上がってしまう。よって、 $T/T_F=0.048$ の状態で相互作用を強くして超流動を実現することは困難である。

3.4 p 波相互作用による蒸発冷却

3.3 で述べた通り、 $T/T_F=0.048$ で超流動を実現することは難しい。よって、さらに冷却することが必要である。3.1 で述べたように $|2\rangle$ を除去する際にどうしても加熱が起きてしまう。そ

ここで $|2\rangle$ を除去した後の $|1\rangle$ のみの原子集団をもう一度蒸発冷却をすることを試みた。本来 $|1\rangle$ のみの原子集団は極低温下では衝突が起きないので蒸発冷却が出来ないのだが、 $|1\rangle$ ・ $|1\rangle$ の p 波フェッシュバッハ共鳴を用いることで相互作用を増大させ、蒸発冷却を行った。しかし、相互作用が増大すると三体ロスが発生し、加熱に繋がる。その加熱レートが冷却レートを下回るような磁場（相互作用）を探索した。測定方法はある磁場で蒸発冷却を行い、トラップから解放した後の原子集団のサイズから平均運動エネルギーを見積もった。その結果を図4、図5に示す。

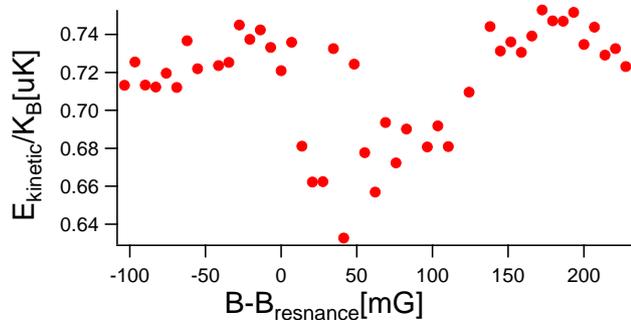


図4 平均運動エネルギーの磁場依存性

図4 横軸は p 波フェッシュバッハ共鳴からの離調で、縦軸は平均運動エネルギーを k_B で規格化したものである。横軸30~100mG付近で蒸発冷却した時に、相互作用がないような場所で蒸発冷却した時よりも平均運動エネルギーが下がったことがわかった。

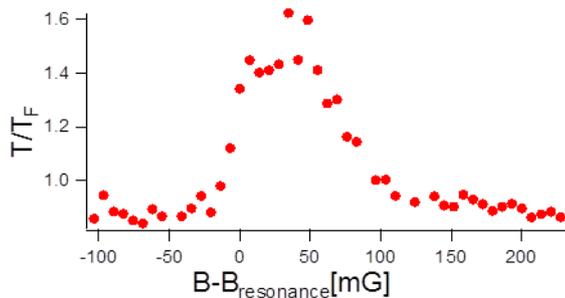


図5 T/T_F の磁場依存性

図5 横軸は p 波フェッシュバッハ共鳴からの離調で、縦軸は T/T_F である。平均運動エネルギーが下がっている横軸30~100mG付近では三体

ロスにより、原子数が減った効果で T/T_F は上がってしまった。よって、 p 波相互作用による蒸発冷却は平均運動エネルギーを下げることに成功したが「超流動を起こすための冷却」には失敗したと言える。

4 まとめと今後の展望

我々は実験手法の改善などにより、 $T/T_F=0.048$ という量子統計性が顕著に現れる領域まで冷却することが出来た。さらに、 p 波散乱長の磁場依存性・三体ロス係数の磁場依存性からこのままのパラメータでは超流動転移を起こすのは難しいとわかった。今後はさらなる冷却を目指し、蒸発冷却の最適化を進めていく。(最適な Trap depth 掃引速度を見つけるなど) また、 p 波超流動の観測方法が未だわかっていないので、合わせて検討していく。

参考文献

- [1] M. Iskin et al., PHYS. REV. LETT. **96**, 040402(2006)
- [2] J. Zhang et al., PHYS. REV. A **70**, 030702(2004)
- [3] 博士論文 稲田安寿 「極低温フェルミオン原子 6 Li における s 波及び p 波対形成」(2009)