

# 極低温フェルミ原子 ${}^6\text{Li}$ における $p$ 波フェッシュバツハ共鳴を用いた原子間相互作用の制御

量子・物質工学科 向山研究室 瀧本 晃久

## 1. 序論

1980年代にレーザー冷却と蒸発冷却によって、アルカリ原子のボース・アインシュタイン凝縮が実現されて以降、冷却原子系は世界中で活発に研究が行われている。また、特に「強く相互作用する系」については、理論的記述が困難であり、最近になり実験的手法が確立された事もあり、研究され始めている。

本研究室では、極低温フェルミ原子  ${}^6\text{Li}$  における  $p$  波超流動状態の実現を目標としている。 $p$  波超流動は、 ${}^3\text{He}$  の超流動相でみられるような回転の自由度を持ったフェルミ原子のペアの超流動状態である。しかし、現在実現されている固体の電子系や液体ヘリウム系での  $p$  波超流動状態では、可変なパラメータが限られており  $p$  波超流動を理解するのに十分な情報を得る事が出来ない。原子系ではパラメーター自由度が多くある事から、超流動の詳細なメカニズムを探る事が出来る。

これらを解明するには、 $p$  波相互作用だけを起こすような系を作る事が重要になってくる。この場合において極低温原子系は優れていると言える。具体的には、吸収イメージングで密度分布を直接観測する事が出来る点や、光、磁場を用いる事で、原子集団に対して様々な操作を行う事が出来る。特に原子間相互作用を共鳴的に変調することが出来るフェッシュバツハ共鳴を用いる事で、原子間に働く相互作用を自由に変調する事を可能としている。つまり、 $p$  波フェッシュバツハ共鳴を用いる事で、 $p$  波相互作用だけを増大させた原子集団を作る事が可能となる。またこれは、フェッシュバツハ共鳴付近の  $p$  波超流動状態は、BCS 状態と BEC 状態の相転移を起こすと領域であると理論

予測されているので、この領域の研究が進むことによって、 $p$  波超流動現象の理解や崩壊の過程を理解する事が出来ると期待される。

## 2. フェッシュバツハ共鳴の原理

フェッシュバツハ共鳴とはスピン状態の違うポテンシャルの束縛状態と共鳴する現象である。二つの粒子間に働く相互作用ポテンシャルは通常、粒子の状態によって異なっている。これは、衝突する二原子の内部状態に依存するからである。二原子の相対的な磁気モーメントの向きが、異なるために超微細構造準位にエネルギー差が生まれている。

今、図1のように異なる相互作用ポテンシャル A (実線)、B (破線) がある。外部磁場を与えることで、エネルギー準位は変化させることが出来る。ポテンシャル A, B のエネルギー差が変化することで、入射してくる粒子のエネルギーとポテンシャルの束縛状態が一致する事で、共鳴現象が起こる。これを利用する事で、外部からの磁場の変化によって、自在に粒子に働く相互作用を変化させることが出来る。

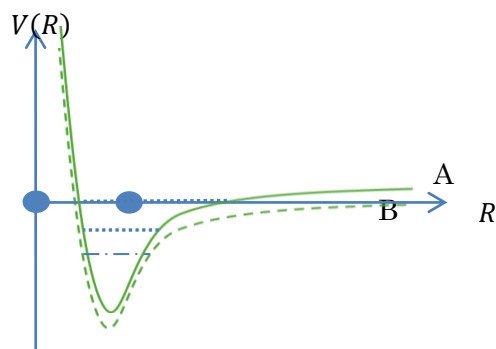


図1.  $s$  波フェッシュバツハ共鳴の模式図

$p$ 波フェッシュバッハ共鳴の場合、角運動量 ( $I=1$ )をもつ散乱であるので、原子同士が近づくとつれて二乗の勾配で遠心力が働くので、 $s$ 波と異なり、遠心力ポテンシャルが出来る (図 2 参照)。これをトンネルして原子同士が共鳴するため、 $p$ 波フェッシュバッハ共鳴点は  $s$ 波より線幅が非常に狭いとされている。

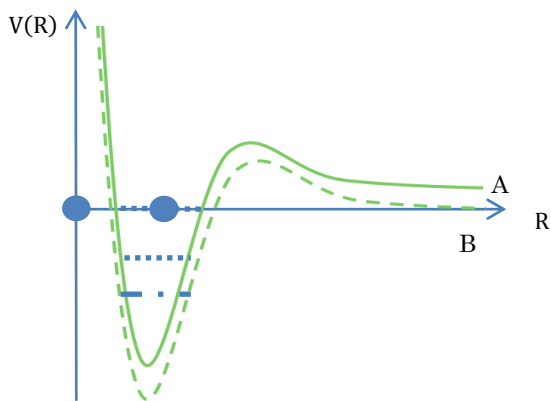


図 2.  $p$ 波フェッシュバッハ共鳴の模式図

### 3. 実験と結果

#### 3.1 縮退原子の生成過程

本研究では、 $p$ 波フェッシュバッハ共鳴の観測を目標とした。そのためには、 ${}^6\text{Li}$  原子を極低温領域まで冷却する必要がある。今回は光トラップを用いて  ${}^6\text{Li}$  原子を冷却していった。図 3 は装置の配置を表している。

具体的には、 ${}^6\text{Li}$  原子をまず磁気光学トラップ (MOT) した。MOT ではドップラー極限 ( $140\mu\text{K}$ ) 以下の温度に冷却するのは困難である。更に冷却するために、原子を光共振器トラップに移行した。原子集団のサイズが  $200\sim 300\mu\text{m}$  からビームウエストは、 $200\sim 300\mu\text{m}$  程度必要になってくる。MOT 中の原子の温度は  $400\mu\text{K}$  程度であり、サイズを考慮すると一般的な光トラップがつくるポテンシャル深さに対して温度が高く、共振器を用いずにトラップしようとする、 $600\text{W}$  程度の光強度が必要になってくる。そこで、トラップ光を共

振器で増幅することで十分深く、空間的に大きなトラップを作成した。実際に実現されたトラップはビームウエスト  $260\mu\text{m}$  で、深さ  $1.1\text{mK}$  程度であり、十分と思われる。しかし、共振器トラップでは、蒸発冷却の効率が悪い。そこで、共振器トラップの光強度を下げながら、1本のフォーカスしたビームによるシングルビーム光トラップ (FORT) に移行していった。さらに、FORT の強度を下げることにより、蒸発冷却を行い、フェルミ縮退まで持っていくことが出来た。観測には、吸収イメージング法を用いた。原子集団に共鳴光を照射し、その透過光を CCD カメラで観測する事により、原子数を見積もっている。全体の光学アクセスに関しては、図 4 参照。

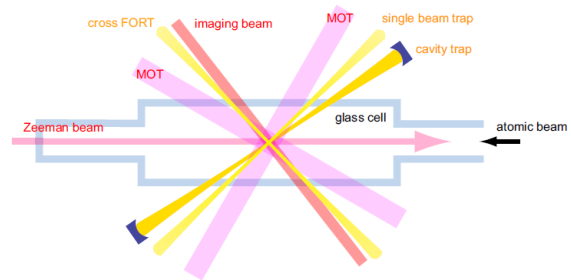


図 4. 光学アクセスの模式図

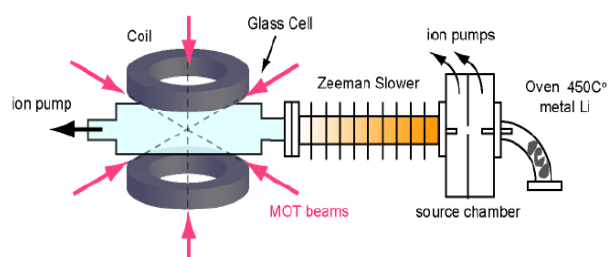


図 3. チャンバー概略図

#### 3.2 縮退原子の評価

FORT 後の原子を蒸発冷却することで冷却していった。最も温度が下がった条件で  $T/T_f=0.35$  のフェルミ縮退した原子を得た (図 5 参照)。図 5 は縦軸がフェルミ温度で規格化した温度、横軸は FORT のトラップの深さを温度で表したものであ

る。FORTの強度を下げる事によりトラップの深さを変え、高い温度の原子を捨てる行為をしている。トラップ深さ  $5 \times 10^{-5} \text{K}$  を境に原子数の減少と反して温度が上がったのは、熱平衡化が不十分になった結果、冷却区効率が下がったために、温度が上がってしまったと考えられる。よって今後は捕まえる原子数の増加を試み、さらなる原子の冷却を目指す。

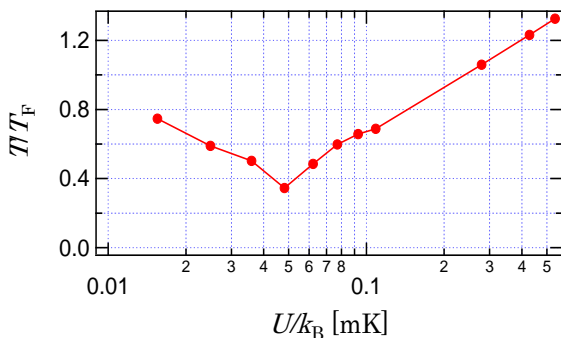


図 5. 蒸発冷却での原子数と  $T/T_F$  の推移

### 3.3 磁場測定

磁場測定は、原子の磁気副準位間の遷移周波数を測定する事で行った。 $|2\rangle$ と $|3\rangle$ のエネルギー準位の差が磁場の強さによって変化することから、 $|2\rangle$ - $|3\rangle$ 間のRF遷移の周波数を図ることで磁場強度を計測することができる。このとき、 $|2\rangle$ または $|3\rangle$ の原子数を数える必要がある。この研究では各状態の原子を空間的に分離する方法として、Stern-Gerlach測定法を用いた。

Stern-Gerlach測定法について説明する。磁気副準位の異なる原子は、外部からの磁場に対するエネルギーが異なる(図6参照)。この性質を利用する。まず、原子集団には蒸発冷却の効率を上げるために、均一磁場がかかっている。次に、吸収イメージングで観測を行う数ms前にコイル磁場をアンチヘルムホルツの配置にする事で、原子集団に磁場勾配を印加する。すると、各状態の原子は磁場から受ける力の大きさが異なるために、空

間的に分離することが可能となる。

図7について説明する。これは、磁場勾配を与えて原子集団を状態によって分離した吸収イメージング画像である。図7は観測時の吸収イメージである。図7(A)は、遷移周波数を与えていない時である。上にある原子が状態 $|1\rangle$ で下にあるのが状態 $|2\rangle$ である。図7(B)は、遷移周波数を与えた時の吸収イメージである。図7(A)と同じ場所に状態 $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ があるが、新たに状態 $|3\rangle$ を観測する事が出来た。これは、遷移周波数を与えた事によって、状態 $|2\rangle$ が状態 $|3\rangle$ に遷移したことにより、状態 $|2\rangle$ が減少して、新たに状態 $|3\rangle$ が現れた事による。状態 $|1\rangle$ も減少している理由としては、粒子の種類が3つ出来ることにより、3体衝突の可能性が出てきてしまう事で、すべての原子状態において数が減少してしまう現象が起きてしまったと考えられる。また、状態 $|1\rangle$ が広がっている理由としてアンチヘルムホルツコイルの性質上、磁場が大きくなる方向に広がっているために、状態 $|1\rangle$ は磁場が大きい方に行こうとして、空間的に大きく広がっている。一方、状態 $|2\rangle$ では、外部磁場の弱いところ(0~90G付近)で、磁場が小さい方に行こうとするので、コイルの配置上、磁場のゼロ点が空間的に小さくなっているために、原子集団もあまり広がりを見せない画像になっている。

今回測定されたコイルに流れる電流  $I(\text{A})$ と磁場  $B(\text{G})$ の関係式は  $B=1.10+2.68 \times I$  であった(図8参照)。オフセット磁場が1.10G程度であるという事が判明した。

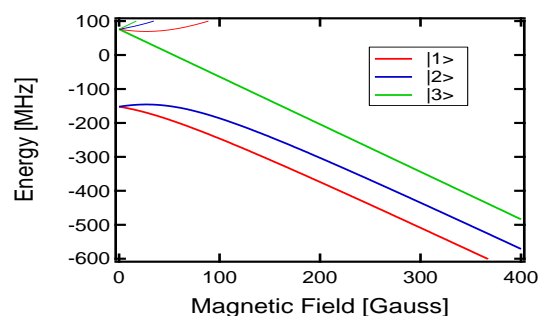


図 6. エネルギー準位の磁場依存性

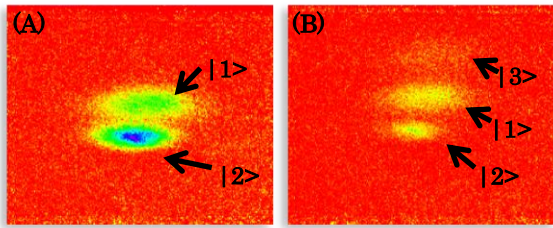


図 7. Stern-Gerlach 測定での観測

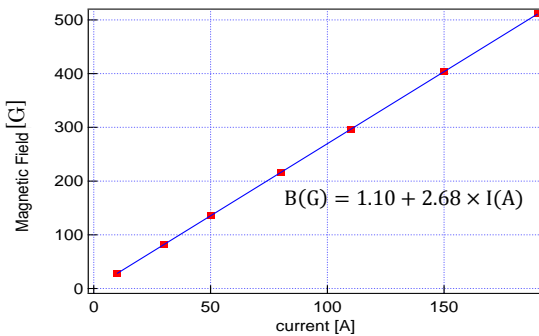


図 8. 磁場と電流の関係

### 3.4 *p* 波フェッシュバツハ共鳴の観測

今回、磁場曲線を参考にして *p* 波フェッシュバツハ共鳴点の観測を行った。状態  $|1\rangle$  と状態  $|2\rangle$  に選択した縮退原子気体を *p* フェッシュバツハ共鳴を起こすと考えられている磁場付近を掃引する事により、状態のロスを観測する事で確認を行った(図 9 参照)。

図 9 の見方を説明する。図(A)が磁場を掃引していない状態での状態の分布である。状態  $|1\rangle$  より状態  $|2\rangle$  が少し多い分布となっている。また、図(B)は  $|1\rangle \rightarrow |1\rangle$ 、図(C)は  $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ 、図(D)は  $|2\rangle \rightarrow |2\rangle$  の *p* 波フェッシュバツハ共鳴付近の磁場を掃引した画像である。 $|1\rangle \rightarrow |1\rangle$  の *p* 波フェッシュバツハ共鳴点を通過した時、状態  $|1\rangle$  だけの衝突が著しく増える事により数の減少が起こった事で確認できた。 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$  の時は、状態  $|1\rangle, |2\rangle$  の衝突が増える事により、両方の状態の減少が起こった事で確認できた。同様に  $|2\rangle \rightarrow |2\rangle$  の時は、状態  $|2\rangle$  だけの衝突が著しく増える事により、数の減少が起こった事で確認できた。観測された *p* 波フェッシュバツ

ハ共鳴点は、 $|1\rangle \rightarrow |1\rangle$  が 158.8(3)G、 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$  が 184.8(3)G、 $|2\rangle \rightarrow |2\rangle$  が 215.1(3)G であった。また、先行研究で得られている *p* 波フェッシュバツハ共鳴点と測定した結果は良く一致していた。

今回、共鳴磁場の測定精度を 0.3G としている。これは、コイルの電流ノイズが 70kHz 帯で 0.3G 程度ある事が判明しているからである。この測定精度では、*p* 波フェッシュバツハ共鳴付近で実験を行うことは困難である。先行研究において、*p* 波フェッシュバツハ共鳴の線幅  $\Delta B$  は、50mG 以下という結果が出ているためである[1][2][3]。

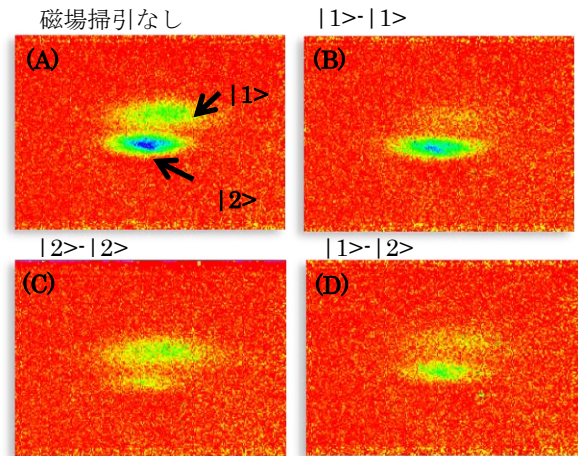


図 9. *p* 波フェッシュバツハ共鳴

## 4. 今後の展開

目標としている *p* 波超流動現象の解明を行うには、まだ測定精度が伴っていない。今の磁場揺らぎがあると、我々が行いたい研究に対して揺らぎが大きすぎ、測定結果を判断する事が出来ない。次に行う事として電流安定化を考えている。これは、電流ノイズのさらに低い装置を用いる方法か、市販のバッテリーを用いる方法の 2 種類を考えている。これで良い結果を得られるようであれば、*p* 波の原子ペアの生成に着手する予定である。

### 参考文献

- [1] J. Zhang et al, Phys. Rev. A **70**, 030702 (2004)
- [2] C. H. Schunck et al, Phys. Rev. A **71**, 045601 (2005)
- [3] 博士論文 稲田安寿 「極低温フェルミオン原子  ${}^6\text{Li}$  における *s* 波及び *p* 波対形成」 (2009)