

# 極低温フェルミ原子気体リチウムにおける p波相互作用制御

向山研究室 中筋 拓也

## 1. 背景と目的

極低温原子系は温度や密度、系の次元、粒子の統計性などの実験条件を容易に変えられるという高い自由度を持った系である。さらに、外部磁場により原子間相互作用を共鳴的に変調できるフェッシュバツハ共鳴の導入により、原子間相互作用さえもその自由度の1つとなった。これにより、近年では強相関物理の新たな研究対象として注目を集めている。

本研究は、極低温フェルミオン原子<sup>6</sup>Liにおけるp波超流動状態の実現を目的としている。フェルミオン原子系における超流動は、同じくフェルミオンである電子系の超伝導と対応付けられることから、高温超伝導体を説明するモデルの基礎を与える研究に繋がることが期待できる。

p波超流動状態を得るためには、強いp波相互作用が必要である。これ得るにはp波フェッシュバツハ共鳴を用いればよい。しかし、p波フェッシュバツハ共鳴の存在は確認されているものの、p波フェッシュバツハ共鳴の特性を記述するパラメータが不明であるのが現状である。具体的には散乱理論によりp波フェッシュバツハ共鳴でのp波相互作用は、散乱振幅

$$f(k) = \frac{k^2}{-\frac{1}{V(B)} + \frac{k^2}{2r_0} - ik^3} \quad (1)$$

で表現される。 $k$ は運動量であり、 $V(B)$ と $r_0$ はそれぞれ散乱体積、有効距離と呼ばれるパラメータである。実験で用いる<sup>6</sup>Liの最低エネルギー準位においてこれらのパラメータは決定されていない。p波超流動を得るためにも、共鳴での相互作用を特徴付けるこれらのパラメータを知ることは重要である。我々は本研究において実験的にこれらのパラメータを決定した。以降はその詳細について述べる。

## 2. 磁場の安定化

本研究で使用する<sup>6</sup>Liのp波フェッシュバツハ共鳴は160G付近に存在し、その線幅は約10mGと非常に狭いことで知られる。p波フェッシュバツハ共鳴を用いて実験をするにあたり、高精度な磁場が要求されるため磁場の安定化を行った。図1に安定化の模式図を示す。図1のコイルに流す電流を安定することで磁場の安定化を行っている。その概略について説明する。まず、図1のようにコイルに並列にMOSFETを接続し、そのゲート電圧を制御することによりコイルの電流を減らすことができるようにした。ホールプローブで得られた電圧値（電流値と比例）に対して、別に用意した制御電圧との差電圧を取り、それをMOSFETのゲートに返すことにより、電流の安定化を行った。安定化の結果を図2に示す。図2(a)の赤線は安定化を行う前の電流ノイズである。50 HzのACノイズが乗っており、この振幅は電流の0.2%程度である。p波フェッシュバツハ共鳴のある160Gの磁場に換算すると300G程度

のノイズとなり、共鳴幅に比べ非常に大きいことがわかる。

図2(a)の青線は安定化後の結果である。図2(b)はそれを拡大したものであり、図2(a)の赤線に対して明らかに電流ノイズが取り除かれていることが分かる。この結果、電流に対して0.005%程度までノイズを落とすことができた。また、300mGでの磁場に換算すると8mG程度になり、非常に高精度の磁場を実現することができた。磁場ノイズの要素はコイルに流れる電流のノイズ以外にも、磁場を発生させたことによる定盤の磁化による影響が大きいことが分かっていたので、実験に使用する常盤は磁化しないものを使用している。

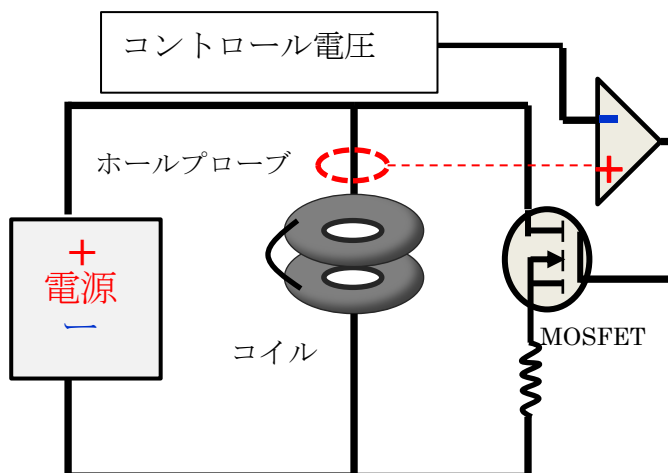


図1. 安定化の模式図

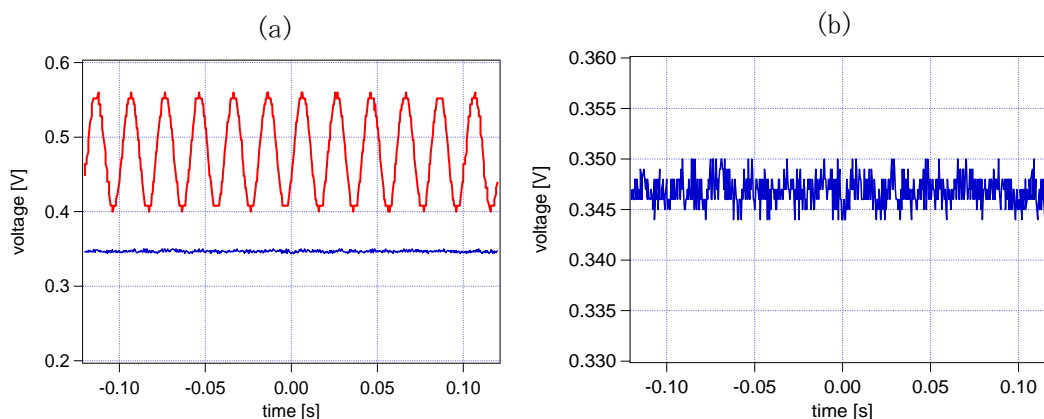


図2. 安定化前後の結果

### 3. エネルギー交換レートの測定

#### 実験系

本実験では極高真空装置中( $\sim 10^{-11}$ torr)で $^6\text{Li}$ 原子の冷却、トラップを行った。まず、オープンによって加熱され気体となった $^6\text{Li}$ をゼーマン減速器で減速させ、磁気光学トラップを用いて捕獲、冷却を行った。極低温まで原子を冷却するために、磁気光学トラップから光トラップに原子を移行し、蒸発冷却を行う必要がある。しかし、磁気光学トラップから十分な数の原子を直接光トラップに移行するには100W級のレーザーが必要なため難しい。そこで、本実験では移行の中間状態として共振器トラップを使用している。共振器トラップとは光強度を稼ぐためにレーザーに対して共振器を組んだ光トラップである。本実験では共振器トラップによって入射光7Wに対し、ビームウエスト260 $\mu\text{m}$ 、深さ約2mKの巨大なポテンシャルを用意し磁気光学トラップから原子を移行した。共振器トラップ内の原子集団は定在波によって分断されているため、共振器トラップで蒸発冷却を行うのは効率が悪い。

よって、共振器トラップからさらに光トラップに原子を移行し蒸発冷却を行った。最終的に、原子数約  $10^6$  個、温度  $500\text{nK}$ 、 $T/T_f=0.2$  の原子集団を準備することに成功した。

## エネルギー交換レート

p 波散乱において弾性散乱断面積  $\sigma$  は式(1)の散乱振幅を用いて  $\sigma = 12\pi|f|^2$  と記述できる。このことから、本研究では散乱振幅における不明パラメータを実験的に求めるために、p波フェッシュバッハ共鳴における弾性散乱に注目し研究を行った。

ここでまず、トラップ中の原子集団に対してある方向のみに運動エネルギーを与えた場合について考える。相互作用のある領域では、原子は衝突によってエネルギーを交換し熱平衡に至る。熱平衡に至るまでの時間の逆を熱平衡レート  $\Gamma$  といい次式で記述できる。

$$\Gamma = \alpha \times n \sigma v$$

$n$  は密度、 $v$  は速度である。また、係数  $\alpha$  は  ${}^6\text{Li}$  の p 波散乱において  $\alpha = 1/2.05$  である [1]。原子の熱平均を考えた場合、熱平衡レート  $\Gamma$  は

$$\langle \Gamma \rangle = \frac{1}{2.05} \times n v \frac{1}{(k_B T)^2} \int_0^\infty \sigma(E) E e^{-\frac{E}{k_B T}} dE \quad (2)$$

となる [1]。  $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は温度、 $E$  はエネルギーである。式(2)は原子が一定のエネルギーを交換し合い平衡状態に至った場合に成り立つ。実際の実験において原子が衝突によって交換するエネルギーは一定ではないので、それを考慮した場合のレートは

$$\gamma = \frac{2}{2.05} \times n \sqrt{\frac{2}{\mu\pi}} (k_B T)^{-5/2} \int_0^\infty 12\pi|\sigma(E)|^2 E^2 e^{-E/k_B T} dE \quad (3)$$

となる [2]。  $\mu$  は換算質量である。このレートをエネルギー交換レートという。ここで、式(2)、式(3)はガウス分布を用いていることに注意する。実際の実験においてもフェルミ分布が利いてこない温度領域に限定して実験を行い、ガウス分布を用いている。

## 実験詳細

本実験ではエネルギー交換レートの磁場依存性を測定し、式(3)を用いてフィッティングすることで不明なパラメータ ( $V(B), r_0$ ) を決定した。

実験の詳細について説明する。まず、光トラップによって原子を捕獲し、蒸発冷却を用いて冷却を行う。この時、フェルミオンである  ${}^6\text{Li}$  は同種粒子のみで蒸発冷却ができないため、2つの状態(状態  $|1\rangle$ 、状態  $|2\rangle$ )を用いている。しかし、実験では基底状態である状態  $|1\rangle$  のみを扱うので、選択的に状態  $|2\rangle$  をトラップから排除する必要がある。

そこで、本実験では p 波フェッシュバッハ共鳴における原子ロスを利用して選択的に状態  $|2\rangle$  の原子を取り除いた。具体的には  $|2\rangle \rightarrow |2\rangle$  の p 波フェッシュバッハ共鳴に磁場を持っていき 1 秒程度保持することで状態  $|2\rangle$  の原子を排除した。

次にエネルギー交換レートの測定方法について説明する。図 3 は光トラップの軸方向からイメージ

ングを行った図で、原子集団の運動量分布を示している。ここで図に対して横方向を X、縦方向を Y とする。まず、図 3(a)のように予め X 軸と Y 軸のトラップ周波数に差をつけておく。そして、Y 軸のトラップ周波数の 2 倍の周波数でレーザー強度を変調し、Y 軸のみに運動エネルギーを与える。図 3(b)は強度変調を与えた直後にイメージングを行った図である。Y 軸のみに運動エネルギーが与えられ、僅かに楕円になっていることがわかる。図 3(c)は強度変調を与えたあと、しばらくトラップ内で保持してからイメージングを行った図である。衝突によってエネルギーを交換し平衡状態に至ったため円形に戻っていることがわかる。強度変調を与えてから平衡状態に至るまでの時間スケールを測定することでエネルギー交換レートを求めることができる。

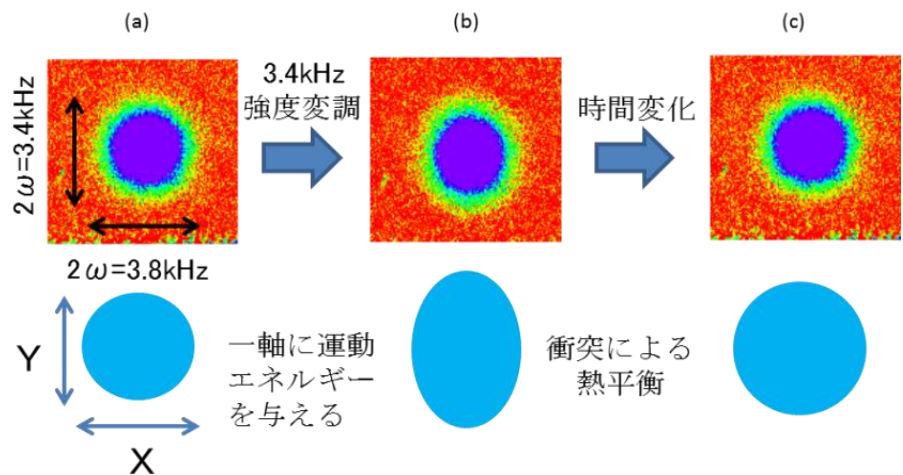


図 3. 強度変調による励起

図 4 は強度変調を与えてから平衡状態に至るまでを測定した結果である。縦軸が Y/X、横軸が保持時間である。これを指数関数でフィッティングしエネルギー交換レートを求めた。

図 5 は 4 種類の温度についてエネルギー交換レートを p 波フェッシュバハ共鳴近傍の様々な磁場で測定した結果である。縦軸がエネルギー交換レート、横軸が磁場になっており 0 を共鳴としている。実験パラメータは図 5 上の表にまとめた。図 5 の実線は式(3)を用いてフィッティングした結果である。

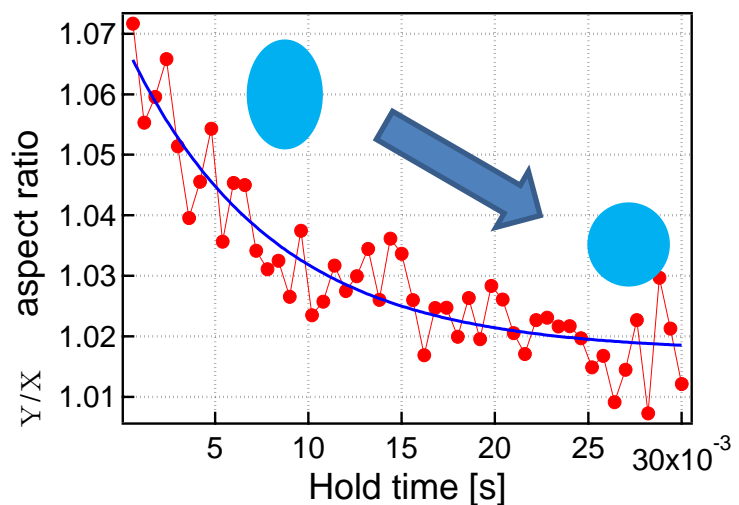


図 4. 平衡状態に至るまでの時間変化

散乱振幅(式(1))における  $V(B)$  は磁場の関数として以下のように記述できる[3]。

$$\frac{1}{V(B)} = a(B - B_0) + b(B - B_0)^2 + \dots \quad (3)$$

式(3)は多項式となっているため、本実験では 2 次の項まででフィッティングを行った。フィッティングパラメータは式(1)の  $r_0$  と式(3)の  $a$ 、 $b$  となっている。この結果、各パラメータの値は

$$r_0 = (-3.25 \pm 0.83)a_0, \quad a = (-5.48 \pm 0.76) \times 10^{-7}a_0^3, \quad b = (-2.97 \pm 5.14) \times 10^{-7}a_0^3$$

と決定した。係数**b**のバラつきが大きいのが、これは式(3)において2次の項がほとんど効いておらず、1次の項までで十分であることを示している。

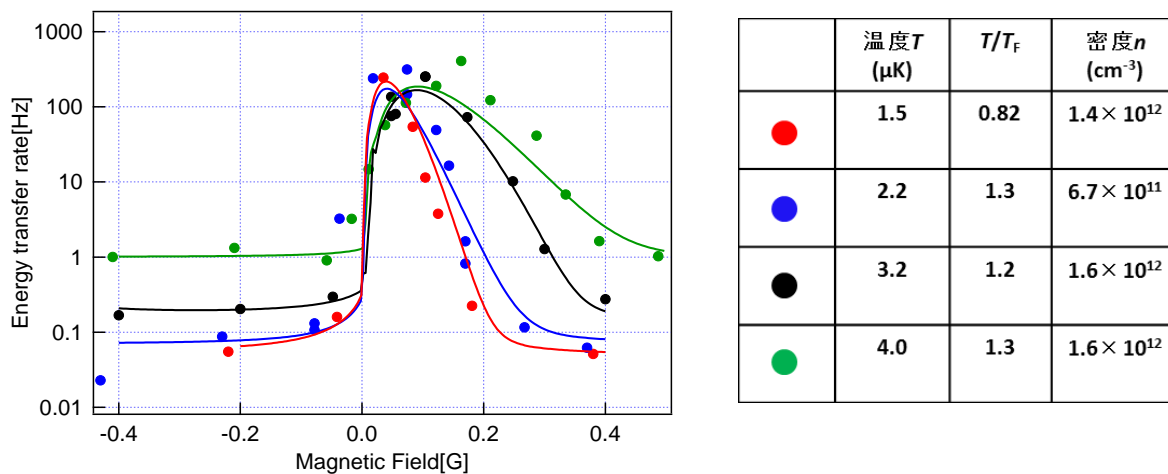


図 5. エネルギー交換レートの磁場、温度依存性

#### 4. 解放エネルギー測定

s波フェッシュバツハ共鳴において散乱長が正のとき斥力相互作用、散乱長が負のとき引力相互作用が働いていることが知られている。p波フェッシュバツハ共鳴においても同様に斥力・引力相互作用が働いているはずであるが、それを観測した例は無く、相互作用エネルギーの大きさ等も知られていない。

そこで、本実験ではその足掛かりとしてp波フェッシュバツハ共鳴における相互作用エネルギーの観測を試みた。実験詳細について説明する。光トラップ中の原子集団を解放しTOFイメージングを行うことで解放エネルギーを測定した。解放エネルギーは

$$E_{\text{release}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{int}}$$

と書け、運動エネルギーと相互作用エネルギーの和で表される。

原子集団に対して斥力相互作用が働いていた場合、相互作用の無い状態と比べ斥力のエネルギー分原子集団の広がり大きくなる。その反対に、引力相互作用が働いていた場合、引力を引きちぎり拡散するため、引力のエネルギー分原子集団の広がり小さくなる。実験において、p波フェッシュバツハ共鳴近傍での原子集団の広がりの変化を観測した。

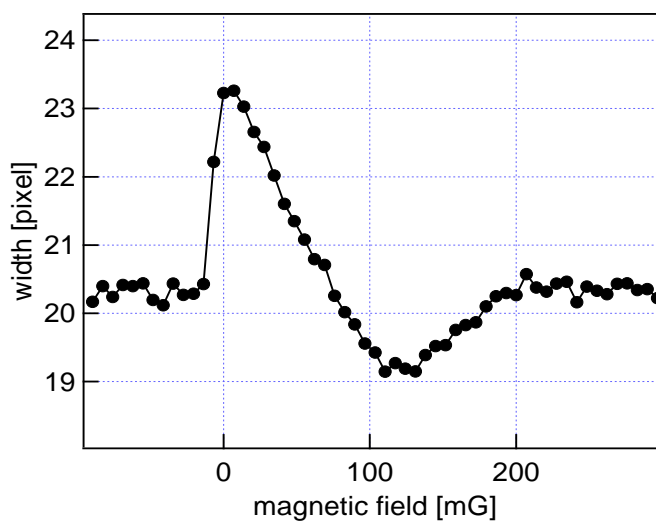


図 6. 共鳴近傍における原子集団の広がり

図7は原子集団の広がり（原子集団の広がりを示しており、横軸は0を共鳴とした磁場である。結果から原子集団の広がりの変化を観測することができた。図8は温度の違う原子で同様な測定を行った結果である。縦軸は相互作用が小さい領域での運動エネルギーを0として求めたエネルギーの変化である。また、横軸は0を共鳴とした磁場である。

これらの結果は一見相互作用エネルギーを示しているように見えるが、検討すべき点が残っているため相互作用エネルギーと断定するまでには至っていない。検討すべき点

とは、図7に見られる原子集団の広がりの変化が原子ロスの影響によって現れた可能性である。例えば、図7において原子集団広がりが大きくなっている所では、温度の低い原子が選択的にロスしたために見かけ上広がりが大きく見えてしまう可能性がある。同様に、原子集団の広がりが小さくなっている所では、温度の高い原子が選択的にロスし見かけ上広がりが小さく見えてしまう可能性がある。この問題を確かめるには運動量分布を解析し、原子ロスによるガウス分布からのずれを確認すれば良いはずである。しかし、現状の装置では問題を確かめるに十分な分解能ではないため、正確に解析はできていない。これらのことを考慮したうえで、再度慎重に測定を行う必要がある。

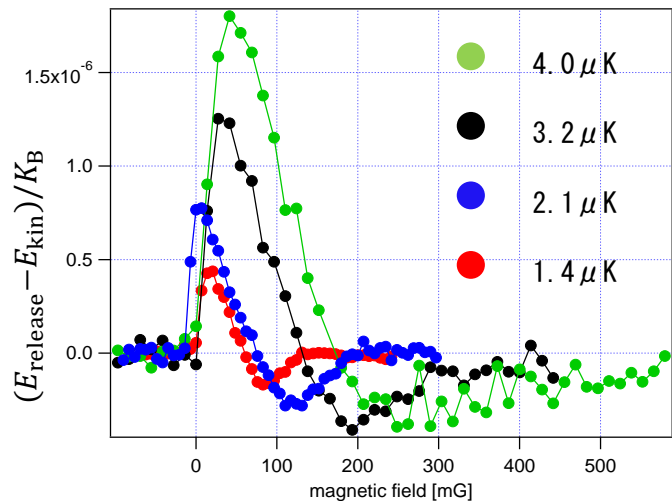


図 7. 共鳴近傍における  $E_{\text{release}} - E_{\text{kin}}$  の変化

## 5. まとめと今後の課題

本研究ではp波フェッシュバッハ共鳴での散乱特性を探るために共鳴近傍でのエネルギー交換レートの測定を行った。その結果、エネルギー交換レートの磁場依存性、温度依存性を散乱振幅を含む関数でフィッティングすることで不明なパラメータを決定したとともに、エネルギー交換レートが散乱振幅でよく表現できることを実証した。

また、共鳴近傍でTOFによる原子集団の広がりを観測することで、p波フェッシュバッハ共鳴での相互作用エネルギーの観測を試みた。その結果、共鳴近傍で原子の広がりの変化を観測することができたが、原子ロスの影響を考慮していなかったため、相互作用エネルギーの影響による変化とは断定できなかった。

今後の課題として、まず、解放エネルギー測定での結果が原子ロスの影響によるものなのかを確かめる必要がある。そのために、より高分解能なイメージング装置を構築し、また、三次元的にイメージングを行い解析することが課題となる。

[1] C. A. Regal, C. Ticknor, J. L. Bohn, and D. S. Jin, Phys. Rev. Lett **90**, 053201 (2003).

[2] James Patrick Burke, Jr, PHD. thesis (1999).

[3] Zbigniew Idziaszek, Phys. Lev. A **79**, 062701 (2009).