

P波相互作用を用いた蒸発冷却効果の観測

電気通信大学 新世代レーザー研究センター 向山研究室 B4 齋藤勇仁

平成 28 年 3 月 10 日

1 背景と目的

ボーズアインシュタイン凝縮は 1920 年代にアインシュタインによって予言された現象であり、超流動や超伝導といった現象を引き起こす。この現象は量子力学的効果がマクロスケールに表れる現象であり多くの物理学者の興味を引いた。我々の研究室では冷却原子系での p 超流動のメカニズムの解明を目的としている。 p 波超流動に関しては二粒子間相互作用を強くすると三体ロスが誘発されることがわかっていて、これが p 波超流動の研究を阻む大きな壁となっている。 p 波には相互作用ポテンシャルに遠心力ポテンシャルがあるため s 波に比べて二粒子間距離が小さくなる。また s 波ではパウリの排他律より同種粒子が近づく確率も低い。このため p 波では s 波よりも三体ロスが誘起されやすい。本研究では p 波超流動の敵となるこの三体ロスについて定量的な測定を行った。

2 原理

2.1 フェッシュバツハ共鳴

粒子間相互作用を強める方法としてフェッシュバツハ共鳴を用いた。フェッシュバツハ共鳴とは散乱する二粒子間の相互作用ポテンシャルを内部状態が異なるポテンシャルの束縛状態と共鳴させる現象である。図 1 のような原子の相互作用ポテンシャルについて考える。原子間の相互作用ポテンシャルは二原子の価電子の相対的なスピンの向きによって決まる。スピンがお互いに平行な状態になっている場合トリ

プレットポテンシャル、スピンがお互いに打ち消しあっている向きである場合シングレットポテンシャルとなる。原子の散乱はトリプレットポテンシャルによって散乱が行われるためこのトリプレットポテンシャルが散乱の始状態終状態となる。(open channel) それに対してスピン状態の違うシングレットポテンシャル (closed channel) が存在する。磁場を印加するとゼーマンシフトによって open channel がより大きく動き closed channel の束縛状態と open channel の自由粒子のエネルギーと一致させることができる。このとき原子の散乱がおきると散乱の中間状態で束縛状態を経験する確立が増大する。この共鳴により散乱長が変調され、二粒子間の相互作用を操ることができる。

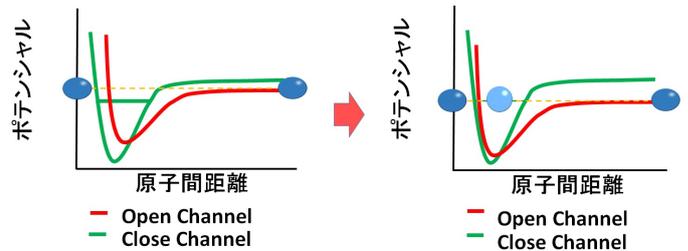


図 1: フェッシュバツハ共鳴

2.2 p 波相互作用の三体ロス

三体の原子が集まると非弾性散乱が誘起されトラップからこぼれることがある。フェッシュバツハ共鳴によって二粒子間相互作用が強くなると非弾性散乱が誘起されやすくなりトラップからロスする原子の数

が多くなる。このロスは p 波フェッシュバツハ共鳴の研究の障壁となる。二粒子間の相互作用ポテンシャルカーブには束縛状態が多数隠されていて、この二つの粒子以外にもうひとつの粒子が集まると、二粒子が下の低い振動準位に落ちることができる。その差分のエネルギーが運動エネルギーとなり、エネルギー保存と運動量保存を満たすように原子は運動しトラップから外れてしまう。二体の場合、二粒子が束縛状態に落ちて差分のエネルギーが生まれても束縛状態の二体だけでは運動量保存を満たすことができない。運動量保存則とエネルギー保存則を満たさないような現象はありえないためこのような現象は三体でしか起きない。

3 実験

$|1\rangle - |1\rangle$ p 波相互作用を増大させると三体ロスも増大する。本実験では印加する磁場と原子集団の温度の二つのパラメータを変えて三体ロス係数 L_3 を測定し、 L_3 についての定量的な測定を行った。

3.1 三体ロスの導出方法

三体ロスのレート方程式を式 (1) に示す。 n は局所密度を表し、左辺は局所密度 n の変化率を表現していて、ひとつの粒子が二つの粒子と出会うことによって三体ロスがおきるため密度の二乗に比例した式となる。三体ロス係数 L_3 の磁場温度依存性について測定する。

$$\frac{\dot{n}}{n} = -L_3 n^2 \quad (1)$$

今回の実験では $0.3 \sim 7.0 \mu\text{K}$ ほどの範囲の温度の原子集団について測定していて常にマクスウェルボルツマン分布によって分布していると仮定する。式 (1) にマクスウェルボルツマン分布による密度を代入して両辺トラップ空間積分することにより得られた式からトラップの全体の原子数の時間依存性の式を導出できる。なお、このとき原子集団の温度 T は一定であること、マクスウェルボルツマン分布に則した

分布をしているという近似を用いている。また、このフィッティング関数は先ほど述べたようにマクスウェルボルツマン分布に則した分布をしていると仮定をしている。

$$N = \frac{1}{\sqrt{2L_3 \left(\frac{m}{2\sqrt{3}\pi k_B T}\right)^3 (\omega_x \omega_y \omega_z)^2 t + \frac{1}{N_0^2}}} \quad (2)$$

3.2 L_3 の測定

MOT、CMOT によりトラップされた原子集団をキャビティトラップに移した後、光トラップに移し蒸発冷却を行う。蒸発冷却を行った後ブラスト光を入れて $|2\rangle$ の準位の原子を飛ばした。その後フェッシュバツハ共鳴近傍に磁場を掃引し光トラップの中に保持してからトラップを開放し、TOF のあとイメージング光を照射してカメラで観測することでその保持時間での原子数を測定した。保持時間を変えて原子数の測定を行い、保持時間による原子数のロスの様子を測定しフィッティングをかけることで三体ロス係数 L_3 を測定した。典型的な原子数の減少データとフィッティングの様子を図 2 に示す。この測定をさまざまな磁場、 $0.3 \sim 7.0 \mu\text{K}$ ほどの範囲の温度の原子集団について測定を行った。

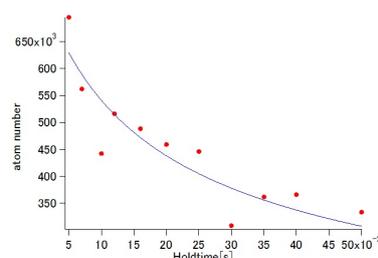


図 2: 三体ロス係数のフィッティングの様子

この測定結果をカラープロットしたグラフを図 3 に示す。図 3 の横軸はフェッシュバツハ共鳴からの離調、縦軸は原子集団の温度を表す。三体ロス係数 L_3 は磁場がフェッシュバツハ共鳴に一致しているとき高くなっていること、温度磁場依存性は逆三角形のような形を描いていることがわかった。逆三角形の

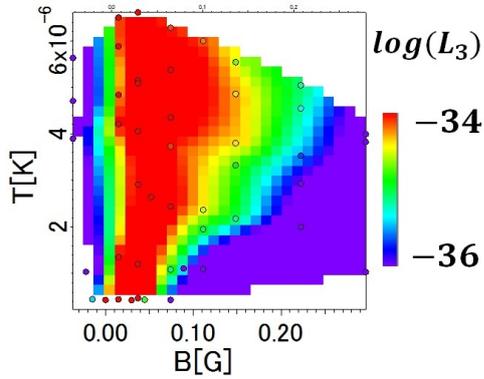


図 3: 三体ロス係数 L_3 の磁場依存性と温度依存性

形が見えたことは原子集団のエネルギー広がりにも寄与しているといえる。フェッシュバハ共鳴は磁場を印加して open channel と close channel の束縛状態をカップリングさせることで相互作用を変調させる。高いエネルギーを持つ原子はそのエネルギー分フェッシュバハ共鳴の磁場の共鳴位置がずれる。温度が高くなるほど原子集団のエネルギー広がりが大きくなるため、逆三角形のようなカラープロットが見られる。

3.3 弾性散乱と非弾性散乱のレートの比較

弾性散乱係数 K_2 においては理論計算することができる [1][2]。その結果を図 4 に表す。

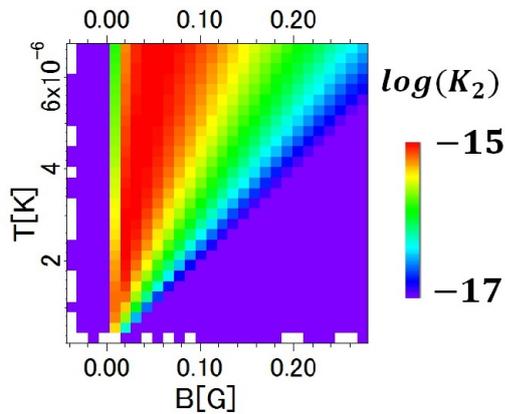


図 4: 弾性散乱係数 K_2 の磁場依存性と温度依存性

図 3 と図 4 を比較すると同様な広がり方であることがわかる。弾性散乱と非弾性散乱はどちらもフェッシュバハ共鳴時に最も誘起されエネルギー広がりによって逆三角形のような形になる。次に弾性散乱と非弾性散乱のレート比をとる。弾性散乱レートは密度に比例、非弾性散乱レートは密度の二乗に比例するため、各測定点での初期密度を入れてレート比を比べる。図 5 から蒸発冷却効率について考察でき

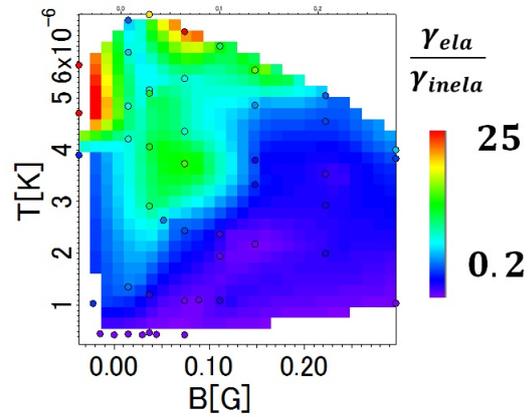


図 5: 弾性散乱非弾性散乱レート比の磁場温度依存性

る。蒸発冷却効率を上げるためには熱平衡に至るスピードを早くすることが重要となり、そのため高い弾性散乱レートが必要となる。熱平衡に至るまでに非弾性散乱によるロスが起きると蒸発冷却効率が落ちる。よって図 5 の緑色の条件下での蒸発冷却は効率良く冷却できることが示唆できる。

3.4 p 波相互作用による蒸発冷却効果

本実験を行う際、ある条件下では保持時間を長くしていくと原子集団の温度が冷えていく現象が見られた。その現象についての考察を行う。冷却効果の評価は原子集団の温度だけでは決定することができない。BEC 生成には高密度、極低温を満たす系を実現するため位相空間密度 ρ の変化を見ることで冷却効果の観測を行った。

$$\rho = n\lambda_{dB}^3 \propto (NT^{-3/2})(T^{-3/2}) = (NT^{-3}) \quad (3)$$

磁場 B0.2964G 時の NT^{-3} の時間変化を図 6 に表す。よってある条件化での位相空間密度の上昇が見

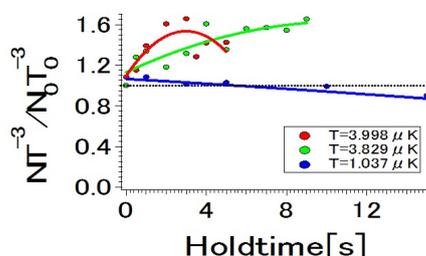


図 6: 離調 0.2964G 時の位相空間密度の変化

られ、冷却効果の観測ができた。

冷却効果が観測された原因を考察する。p 波フェッシュバツハ共鳴幅は狭いためフェッシュバツハ共鳴からの離調を行うと高いエネルギーを持つ原子集団が優先的にフェッシュバツハ共鳴に至り、三体ロスによってトラップからロスさせることができる。エネルギーが高い原子を優先的に捨てる効果は蒸発冷却の機構の一部でありこの効果によって冷却効果が現れたと考えられる。

冷却効果が現れた点を図 7 に示す。この赤丸で囲ま

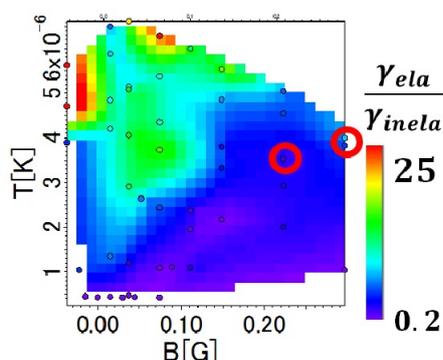


図 7: p 波相互作用による蒸発冷却効果が観測された条件

れた点のみ冷却効果が現れたのは弾性散乱と非弾性散乱のレート比、トラップ周期と非弾性散乱のレー

ト比、磁場の離調位置という三つの条件をクリアしていた点であったからだと考えられる。熱平衡状態に至るまでの時間にロスする量が多いと蒸発冷却効率は悪くなってしまいうため弾性散乱と非弾性散乱のレート比が条件のひとつとなる。グローバルな熱平衡状態に至るにはトラップ周期ほどの時間スケールが必要であるため、その時間スケールでのロス量が多いと蒸発冷却効率が悪くなる。また高い運動エネルギーを持つ原子を飛ばすためには、印加する磁場の離調位置を考慮しなくてはならない。この三つの条件を満たしたため、赤丸での点で冷却効果が見られたと考えられる。

4 まとめと今後の展望

p 波超流動の実現の障害となる三体ロスの磁場依存性温度依存性について定量的に測定を行った。弾性散乱係数と非弾性散乱係数と初期平均密度を考慮することによって弾性散乱と非弾性散乱のレート比を割り出し、蒸発冷却効率への評価を行った。p 波相互作用による蒸発冷却の観測を位相空間密度の変化によって評価した。三体ロス係数はある条件下では温度の二乗に比例すると予言されており Wigner threshold law と呼ばれる。今後は今回の実験の精度を高めて細かいパラメータでの三体ロス係数を測定することで Wigner threshold law の観測を目標とする。また、測定する磁場を細かく刻んで三体ロス係数の測定を行うことで、三体ロス係数の散乱長への依存性の測定を行っていく。

参考文献

- [1] Takuya Nakasuji, Jun Yoshida, Takashi Mukaiyama, Physical Review A 88, 012710(2013)
- [2] James Patrick Burke, Jr., Theoretical Investigation of Cold Alkali Atom Collisions, B.S., Georgia Institute of Technology (1989), M.S., Georgia Institute of Technology (1991)