

•s 波相互作用しているフェルミ粒子系の相互作用効果の研究(東京大学・堀越宗一)

我々は冷却フェルミ原子を用いて中性子物質の状態方程式決定を目指している。中性子星地殻領域の中性子物質の温度はフェルミ温度に比べて十分低いため、冷却原子で $T < 0.1T_F$ の極低温を実現する必要がある。本研究ではフェルミ原子である6Li原子を用いており、6Li原子の2つの内部状態をトラップ中に用意する事で二成分フェルミ粒子系を実現している。二成分間のs波相互作用はs波フェッシュバハ共鳴を用い、832Gaussで異なる粒子間のs波散乱長が発散する。

今年度の研究成果は主に、①s波散乱長が発散しているユニタリー極限において $T < 0.1T_F$ の極低温状態の実現と超流動転移の兆候の捕捉、②分子BECの観測、③相互作用しているフェルミ粒子系の温度評価のため温度計原子の導入である。詳細を以下に記す。

これまで我々は相互作用が弱い300Gauss付近で、 $T \sim 0.2T_F$ 程度までのフェルミ縮退を実現していたが、832Gaussでの冷却に成功していなかった。我々はトラップポテンシャルの形状を詳細に測定した結果、フェッシュバハ共鳴を引き起こす磁場の空間分布に問題がある事が判明し、磁場を発生させるコイルの間隔を補正する事によりこの問題を解決した。その結果s波散乱長が発散しているユニタリー極限(832Gauss)での蒸発冷却がうまく働き $T < 0.1T_F$ の極低温状態を実現した。ラフな温度見積もりとして、ユニタリーフェルミ気体の温度を理想フェルミ気体の密度分布でフィットし評価したものを図1に示した。ユニタリーフェルミ気体は転移温度でクーパー対が超流動転移を示す。それにより密度分布に多少の変化が現れ、理想フェルミ気体の密度分布を仮定してフィットを行うと、温度の評価エラーが起きる。図1の矢印の領域で温度が上昇しているように系統誤差が生じているが、これが超流動転移の一つの兆候であることがわかっている。トラップ中のフェルミ気体が相転移温度以下に達していることを確認する為、蒸発冷却後磁場をBEC領域に掃引し、運動量分布を測定した。図2に示したように、熱的分子とボース凝縮した分子のバイモーダル構造が確認され、確かに相互作用している極低温なフェルミ粒子系がされていることが確認された。

さらに我々は定量的に相互作用しているフェルミ粒子系の温度を評価する為、温度計原子の導入を行った。温度計原子として7Li原子を選んだ。これまで300Gauss付近で温度計原子の予備実験を行い、6Li原子と7Li原子が熱平衡状態に達し、両者とも同じ温度を示すことを確認している。今後は832Gauss付近のBCS-BECクロスオーバー領域で定量定期的な温度評価を行う。

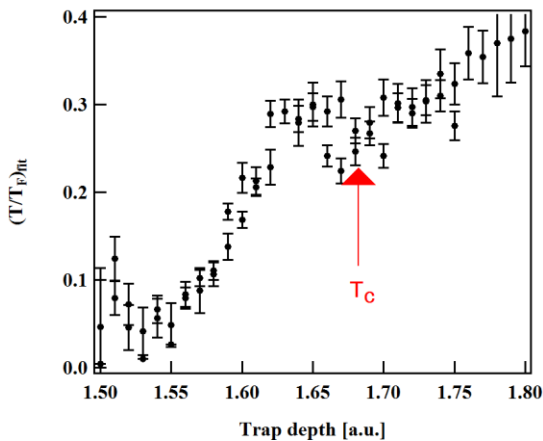


図1. ユニタリー極限での蒸発冷却。

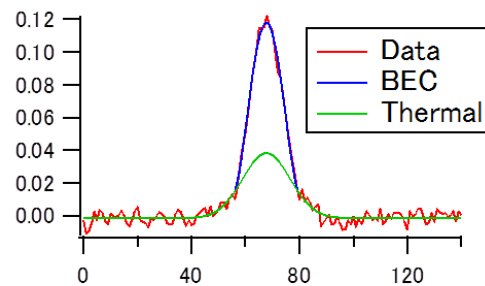


図2. 熱的分子と分子BEC。

• p 波相互作用しているフェルミ粒子系の相互作用効果の研究(電気通信大学・向山敬)

冷却原子気体系で p 波超流動を実現するには、p 波フェッシュバツハ近傍における原子のロス(非弾性散乱)をできるだけ抑えつつ、原子間の弾性散乱を増大させることが必須である。そのような理想的な状況を実現するためには、p 波フェッシュバツハ共鳴近傍において原子間の p 波相互作用強度の磁場依存性を正確に把握しておく必要がある。我々は p 波フェッシュバツハ共鳴近傍における相互作用パラメータを実験的に決定するために、原子集団が p 波相互作用を通して熱平衡に至る時間を測定した。p 波相互作用による弾性散乱断面積は散乱振幅 $f_p(k)$ を用いて

$$\sigma = 12\pi |f_p(k)|^2 \text{ と書かれ、散乱振幅は } f_p(k) = \frac{k^2}{-1/V(B) + k_e k^2 / 2 - ik^3} \text{ と表現される。}$$

k は衝突する 2 原子間の相対波数、 k_e は相互作用ポテンシャルの有効距離の逆数、 $V(B)$ は散乱体積と呼ばれるパラメータで、この散乱体積が磁場によって変化し、フェッシュバツハ共鳴による

共鳴構造を持っている。フェッシュバツハ共鳴近傍での散乱体積は $V(B) = V_{bg} \left(1 + \right.$

$$\left. \frac{\Delta B}{B - B_{res}} \right)$$

と書くことができる。ここで V_{bg} は背景散乱体積、 ΔB は共鳴幅である。散乱振幅中に

含まれる V_{bg} 、 ΔB 、 k_e が未確定なパラメータであり、これらを実験的に決定する必要がある。

我々は弾性散乱断面積の測定からこれらのパラメータの決定を行った。具体的には特定の

方向のトラップ周波数に共鳴するような周波数で光トラップ強度を変調することで、1 軸

方向だけ原子の運動エネルギーを増大させ、その運動エネルギーが他の軸方向に移る時間

を測定した。運動エネルギーが他の軸に移るのは原子間の散乱が起源であるために、この

エネルギーが変換される時間によって弾性散乱断面積が測定できる。この実験から測定し

たエネルギー変換レートの磁場依存性を図 3 に示す。図中の実線は理論曲線を用いてフィ

ッティングした結果である。理論曲線は調和ポテンシャル中での原子集団の運動量広がり

を考慮したものであり、上述の未確定のパラメータをフィッティングパラメータとして理論

と実験結果を比較することでパラメータを決定することに成功した。これは ${}^6\text{Li}$ 原子 p 波フ

ェッシュバツハ共鳴について実験的にパラメータを決定した初めての成果である [T.

Nakasuji, J. Yoshida, and T. Mukaiyama, Phys. Rev. A 88, 012710 (2013)]。今後、決定

された相互作用パラメータをもとに最適な蒸発冷却の条件を検討し、p 波超流動の実現を目

指す。また p 波フェッシュバツハ近傍における 3 体衝突の普遍的性質についても研究を進

める。

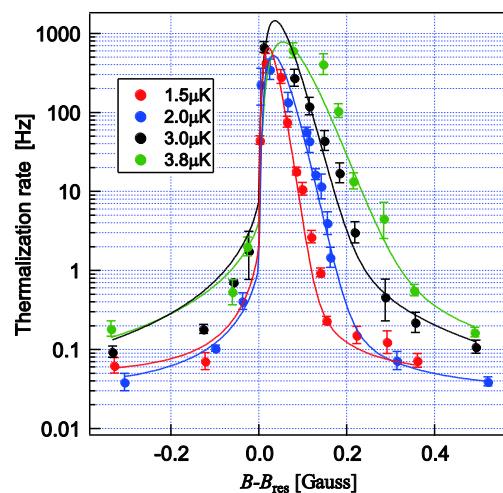


図 3 : エネルギー変換レートの磁場依存性。