

計画研究 B03「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」  
H24 年度の活動報告

研究計画の概要

本計画研究は、相互作用している冷却原子気体の状態方程式(EOS)を実験的に決定し、低密度中性子物質の EOS を構築する。具体的には、図1に示した、s 波相互作用している二成分フェルミ粒子系の EOS を実験的に決定する。中性子星の inner

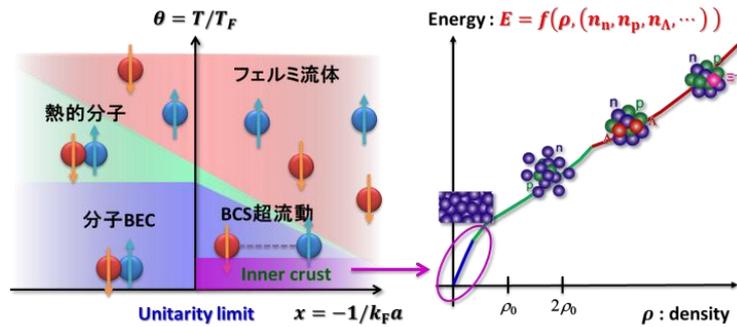


図 1.冷却原子の EOS と核物質の EOS

crust に存在する希薄な中性子物質は、図1のゼロ温度極限( $\theta = 0$ )の、ユニタリー極限( $x = 0$ )から BCS 領域( $x > 0$ )に相当する。中性子物質と同じ温度や相互作用パラメータを冷却原子系に与える事により、中性子物質の EOS が実現される。さらに冷却原子系は、相互作用の軌道の次数も選べる自由度を有する。中性子星の密度が高い領域に存在している中性子物質は、s 波相互作用よりも p 波相互作用の寄与が顕著になる。よって、本計画研究は、s 波相互作用と p 波相互作用しているフェルミ粒子系の研究を二グループで手分けしそれぞれ行い、EOS の決定やフェルミ超流動の物性探査を行う。

・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

H24 年度の主な活動は、①高分解能撮像システムの構築、②6Li 原子と 7Li 原子の同時レーザー冷却である。

s 波相互作用している二成分フェルミ粒子系の EOS は、 $\Omega/V = P(T, \mu, a^{-1})$  で与えられる。故に、圧力  $P$  を温度  $T$ 、化学ポテンシャル  $\mu$  と s 波散乱長  $a$  の関数で測定する必要がある。ただし、冷却原子系は不均一なトラップポテンシャルに閉じ込められているため、粒子の密度分布も不均一に分布している。この場合、各位置での局所的な EOS は、粒子の密度分布とトラップポテンシャルの形状を考慮し、局所密度近似(LDA)により決定する必要がある。つまり冷却原子の観測分解能が EOS の決定精度に制限を与えるため、高分解能な撮像システムが要求される。

構築した撮像システムを図 2 に示した。主な

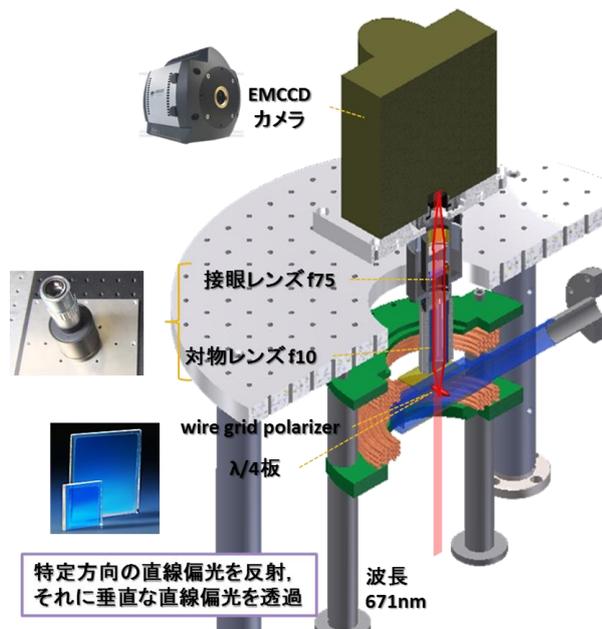


図 2.高分解能撮像システム

特徴としては、①真空ガラスセル中の冷却原子を高分解能で撮影する為、ガラスセルの厚みを補正した対物レンズをガラスセル直上に配置、②上下方向にレーザー冷却光を対向して照射する必要がため、 $\lambda/4$  波長板とワイヤーグリッド偏光子をガラスセルと対物レンズの間に設置し、レーザー冷却光は反射させ、一方撮像レーザーは透過させた。このシステムにより、レーザー冷却と高分解能撮像が共存できた。設計分解能は約  $1 \mu\text{m}$  であり高精度な EOS の決定が期待される。

EOS 決定のためには、温度  $T$  も精度良く決定される必要がある。相互作用している粒子系の温度評価は、ゼロ温度近傍の極低温領域では確立されていない。先行研究において、原子の密度分布と温度計原子の混合による温度評価の二つの手法が試されているが、両者の実験結果は一致していない。我々は両者の手法を同時に行えるよう、高分解能撮像システムに加え、温度計原子の準備を進めている。本研究では  $7\text{Li}$  原子を温度計原子として用いる。これまで  $6\text{Li}$  のレーザー冷却光源に、 $7\text{Li}$  のレーザー冷却光源をオーバーラップさせることにより同時にレーザー冷却する事に成功している。

### • 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

H24 年度の主な活動は、① p 波フェッシュバツハ共鳴のパラメータ測定である。

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。

p 波相互作用による散乱振幅は  $f_p(k) = k^2(-1/V + k_e k^2/2 - ik^3)^{-1}$  と表現される。 $k$  は衝突する二原子間の相対波数、 $k_e$  は相互作用ポテンシャルの有効距離の逆数、 $V$  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  $V(B) = V_{\text{bg}}\{1 + \Delta B(B - B_{\text{res}})^{-1}\}$  と書くことができる。ここで  $V_{\text{bg}}$  は背景散乱体積、 $\Delta B$  は共鳴幅である。散乱振幅中に含まれる  $V_{\text{bg}}$ 、 $\Delta B$ 、 $k_e$  が未確定なパラメータである。我々は弾性散乱断面積の測定を、p 波フェッシュバツハ磁場近傍で行い、これらのパラメータの決定を行った[1]。

図 3 に実験的に決定された  $^6\text{Li}$  原子の p 波散乱体積の磁場依存を示した。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三体衝突の普遍的性質についても研究を進める。

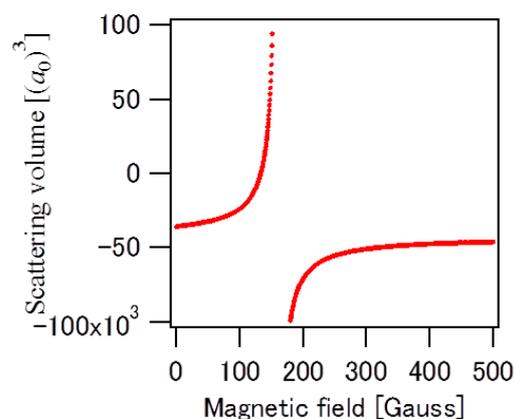


図 3. p 波フェッシュバツハ共鳴

[1] T. Nakasuji, J. Yoshida, and T. Mukaiyama, Physical Review A 88, 012710 (2013)]