

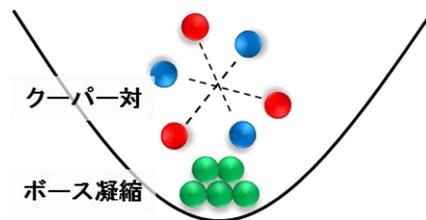
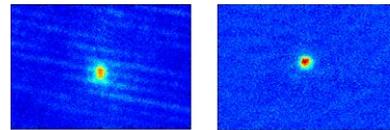
平成 26 年度 B03 班成果報告

● ボース・フェルミ混合超流動状態の実現

中性子物質は二成分フェルミ粒子系であり、特に希薄な領域で粒子間の相互作用は s 波散乱長で特徴付けられる。よって希薄中性子物質の状態方程式 (EOS) は $f(P, \mu, T, a^{-1}) = 0$ を満たす関数系で与えられる。本研究では中性子物質と同じ温度領域と相互作用領域を同時に満たす、極低温フェルミ原子気体を用いてこの EOS の決定を目指している。中性子星に存在する中性子物質はゼロ温度極限に相当する為、 $f(P, \mu, a^{-1}) = 0$ を満たす状態方程式を決定すれば良いが、有限温度には未解決の物理が豊富に含まれているため、本研究で温度を含めた EOS の決定を目指している。

平成 25 年度までの研究活動において、我々はフェルミ粒子である 6Li 原子で超流動状態を実現し、小さな中性子星を得た。今年度は、このフェルミ多体系の温度を測定する為、同位体である 7Li 原子を温度計としてトラップに混ぜ、フェルミ多体系の温度測定の準備を進めた。ボソンとフェルミオンの同時トラップと、その混合系の冷却手順の最適化を行う過程で、我々はフェルミ超流動とボース凝縮が同時にトラップ中に存在する、ボース・フェルミ混合超流動の実現に成功した。1938 年に ^4He (boson) の超流動が、1972 年に ^3He (fermion) の超流動が発見されて以来、それらの超流動を混合した系は実現されていない。この新規な量子多体系はパリのグループとほぼ同時期に実現し、混合超流動体は安定に存在する事が確認された。今後ボソンとフェルミオン間の相互作用を制御する事により、磁気不純物の量子効果等の進展が期待される。

6Li(フェルミ粒子) 7Li(ボース粒子)



● トラップ中局所圧力の測定と原子数校正

初めに空間的に非一様に分布しているトラップ系から局所的な圧力を導出する手順を簡単に説明する。まず吸収撮像法により、ランベルト・ベールの法則に従って以下の面密度が得られる。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} n(x, y, z) dy \equiv \bar{n}(x, z) = \frac{1}{\sigma_{abs}^*} \left[-\log \left(\frac{I_{out}(x, z)}{I_{in}(x, z)} \right) + \frac{I_{in}(x, z) - I_{out}(x, z)}{I_{sat}^*} \right]$$

ここで、 I_{in} 、 I_{out} はそれぞれプローブ光の入射光強度と透過光強度、 I_{sat}^* と σ_{abs}^* は実効的な飽和強度と吸収断面積である。面密度 $\bar{n}(x, z)$ から局所的な密度 $n(\rho, z)$ は逆アーベル変換により求まる。局所的な圧力は、Gibbs-Duham の式: $dP = sdT + nd\mu + Ida^{-1}$ と、局所密度近似 (LDA): $\mu = \mu_0 - V_{Trap}$ を用いて、温度、散乱長一定の下で以下の式で求まる。

$$P(\rho, z) = \int_{-\infty}^{\mu} n(\mu', T) d\mu' = \int_{\rho}^{\infty} n(\rho', z) \frac{\partial V_{\text{Trap}}(\rho', z)}{\partial \rho} d\rho'$$

このように一度、トラップ中の密度分布が得られると、各点の局所密度が求まる。密度分布がゼロになるポテンシャルの大きさを評価する事により μ_0 が決定され、局所的な化学ポテンシャル $\mu(\rho, z)$ が得られる。散乱長の大きさは Feshbach 共鳴により外部磁場で制御されるため、空間的に一様である。このようにして各局所点での状態量が決定され、ゼロ温度極限の EOS: $f(P, \mu, a^{-1})$ が決定される。

実験での観測量は、プローブ光の入射光強度と透過光強度のみである為、その他の全てのパラメータを精度良く決定しておく必要がある。実効的な飽和強度 I_{sat}^* はプローブ光強度を変化させても $\bar{n}(x, z)\sigma_{\text{abs}}^*$ の積が変化しないように決定すればよいので容易である。また、トラップポテンシャル V_{Trap} は、光トラップに使っているレーザー光のスポットサイズとパワーを決定すればよいのでこちらも容易である。決定が困難なのは、実効的な吸収断面積 σ_{abs}^* であり、この値の決定精度が EOS の決定精度と直結する。我々は実効的な吸収断面積の決定を、スピンインバランス系を用いて行った。下図に示すように、二成分フェルミ粒子に個数差を与え、Majority が Minority と重なっていない領域が、理想フェルミ気体の状態方程式に従うように吸収断面積を決定した。下右図は上記の手続きで導出した局所圧力を示しており、青が Minority、赤が Majority、緑の縦線が Minority の半径に相当している。このようにして局所圧力が定量的に高い S/N で決定できるようになり、いよいよ希薄中性子物質の EOS の決定と、原子核物理研究との比較が行われる。

