

計画研究 C02 「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」 2020 年度の活動報告

代表：堀越宗一（大阪市立大学）

分担：大橋洋士（慶應義塾大学）

分担：飯田圭、田島裕之（高知大学）

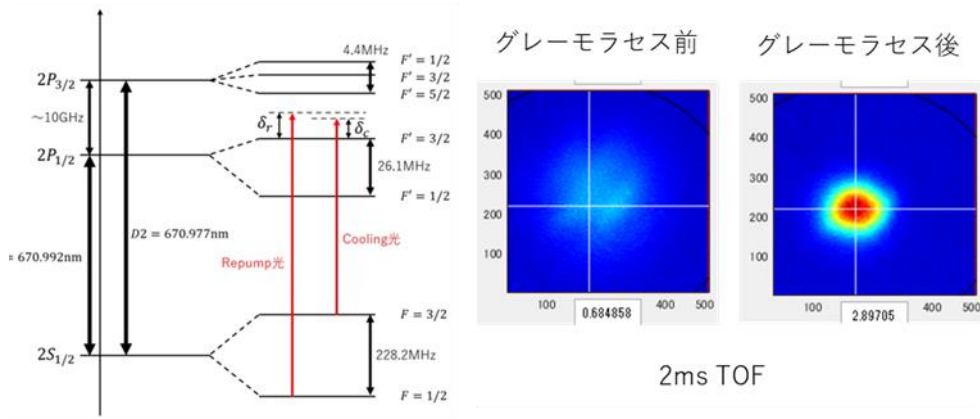
概要：極低温原子気体を用いた量子シミュレーション実験へ向け、30 秒で 1 億個の冷却リチウム 6 原子を $100 \mu\text{K}$ までレーザー冷却することに成功した。レーザー光を用いた原子間の相互作用制御へ向けヨウ素安定化レーザーシステムを開発し、可視光領域でレーザー光の絶対周波数を 1MHz 以内に安定化できることを確認した。2019 年度に得たフェルミ原子気体の BCS-BEC クロスオーバー領域における粘り率の振る舞いと、本新学術領域研究のキーワードである、「物質階層」との関連付けを行った。フェッシュバハ共鳴を有するボース-フェルミ混合原子気体に対する強結合 T 行列理論を完成させ、フェルミ原子を介したボソン間引力による系の不安定化と、ボソン間に直接はたらく斥力相互作用による安定化との競合現象を、弱結合から強結合領域まで明らかにした。新たな理論課題として、3 体引力で相互作用するフェルミ粒子系において発現が期待されるクーパートリプルの性質、冷たい低密度中性子物質中の α 粒子の性質変化がもたらす α 粒子の少数系への影響を調べるとともに、ポーラロン間の相互作用を抽出するための実験提案を行った。

以下主な成果の詳細

グレーモラセス冷却を用いたリチウム 6 原子の冷却(堀越)

一般的に用いられている原子気体の磁気光学トラップにはドップラー冷却限界と呼ばれる冷却温度の理論的下限值が存在する。本研究で用いているリチウム 6 原子の場合、ドップラー冷却限界温度は $140 \mu\text{K}$ である。実際の実験ではこの下限値まで冷却することは難しく、典型的に $500 \mu\text{K}$ 程度となる。磁気光学トラップ後冷却原子を保存場である光トラップ中に閉じ込める必要があるが、光トラップの深さが 1mK 程度であるため、高効率に冷却原子を光トラップ中に捕獲するためにはさらに原子の温度を下げる必要がある。

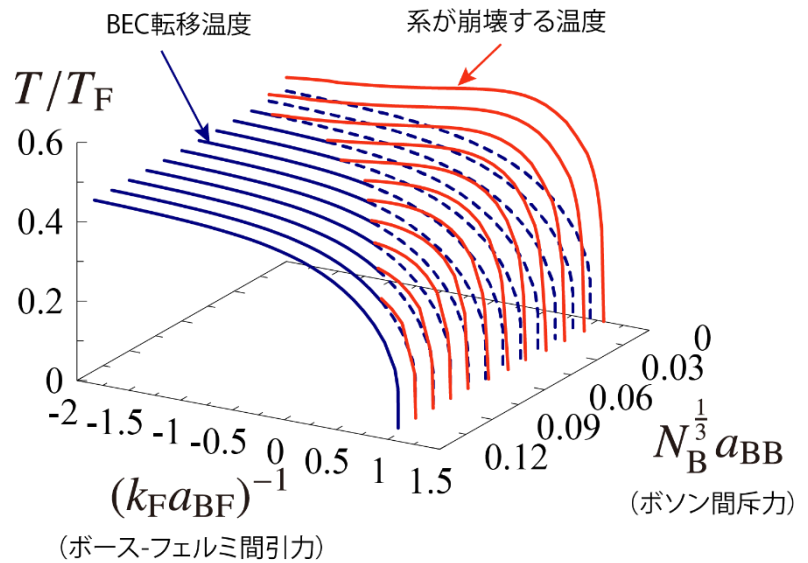
本研究ではリチウム原子気体をドップラー冷却限界温度以下にまで冷却可能なグレーモラセス冷却を磁気光学トラップ後に導入した。特にグレーモラセス冷却は光トラップ中でも働くことが見込まれ、これまでの実験手順に比べて最終的に得られる超流動状態のフェルミ原子の数を大きく改善できる可能性がある。この可能性は実験の S/N を向上できるだけでなく、より低温のフェルミ粒子系を実現できる点で極めて重要である。下左図にリチウム 6 原子のエネルギー準位図を示した。グレーモラセス冷却は電子基底状態の 2 つの超微細構造から、 $2P_{1/2}$ への 2 つの光学遷移を用いる。これら 2 つのレーザー光の周波数と強度を適切に選ぶことによりグレーモラセス冷却を実現する。下右図がグレーモラセス冷却前後の運動量分布であり、グレーモラセス冷却によって劇的に温度が下がり運動量分布の幅が狭くなっていることがわかる。今後光トラップへ冷却原子を移行する手順の最適化を進めフェルミ超流動状態を実現する。



(左図)リチウム6原子のエネルギー準位図
 (右図)グレーモラセス前後の運動量分布

強結合 Bose-Fermi 混合原子気体における分子間有効相互作用効果(大橋)

ボース-フェルミ混合原子気体を、フェッシュバツハ共鳴による可変なボース-フェルミ原子間引力と、直接相互作用によるボソン間斥力の両方を加味し、理論的に研究した。図に示すように、後者が存在しない場合 ($a_{BB}=0$)、この系はボース-アインシュタイン凝縮を起こす前にフェルミ原子を介したボソン間引力により崩壊するが、この不安定性はボース原子間に直接はたらく斥力相互作用 ($a_{BB}>0$) が存在すると次第に抑制され、弱結合領域から強結合領域に至るまで安定した状態で存在できるようになることを明らかにした。右図はボース-フェルミ混合原子気体の BEC 転移温度と系が崩壊する温度を示している。



不純物原子が媒質中の励起を伴って形成するポーラロンの物性(飯田・田島)

重い星の重力崩壊の結果生じる超新星コアや、それが冷えてできる中性子星の内部においては、多彩な物性を示す高密度フェルミ物質が存在する。特に対相関は重要であり、クーパ対の凝縮がもたらす超流動、粒子ホール対の凝縮がもたらす密度波状態はその典型例である。これらの相関を解明するにあたり、冷却フェルミ原子気体が類似した性質をもつことに着目することは有益である。これまでに、不純物を通して多彩な物性を示すフェルミ多体系の性質を探る研究と、BEC-BCS クロスオーバーに代表される状態変化を探る研究を系統的に行ってきた。

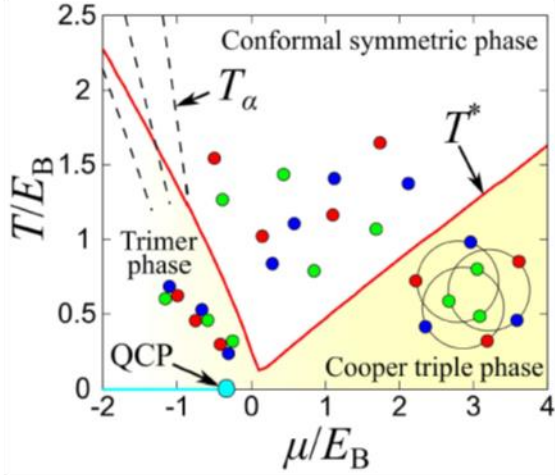


図1 3体引力を伴う1次元3成分フェルミ粒子系の相図 (E_B : 真空中のトライマーの束縛エネルギー) [1].

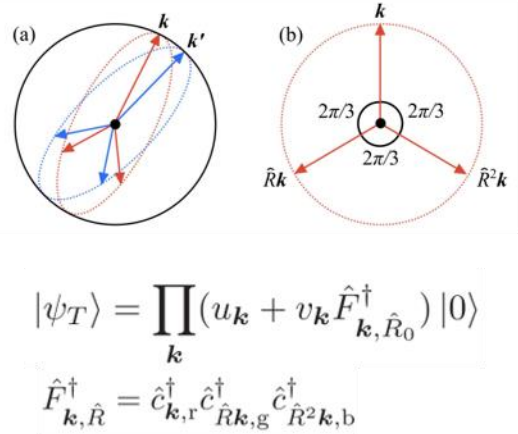


図2 3体引力を伴う3次元3成分フェルミ粒子系におけるクーパートリプルの運動量構造および対応する変分波動関数[2].

今年度は、新たな理論課題として、3体引力相互作用する3成分フェルミ粒子系において発現が期待されるクーパートリプルの性質[1, 2]、冷たい低密度中性子物質中の α 粒子の性質変化[3]がもたらす α 粒子の少数系への影響(投稿準備中)を調べるとともに、ポーラロン間相互作用の抽出[4]や光学スピン輸送[5]の実験提案、ボースフェルミ混合原子気体の超対称性の破れによるゴールドスティノの解析[6]を行った。クーパートリプル相については、系が1次元、3次元の場合に、トライマー相へのクロスオーバー(図1)、特異な凝縮状態(図2)がそれぞれ見出され、ポーラロン間相互作用抽出においては量子ポテンシャルが有用であることを明らかにした。

[1] Hiroyuki Tajima, Shoichiro Tsutsui, Takahiro M. Doi, and Kei Iida, “Cooper Triples in Attractive SU(3) Fermions with an Asymptotic Freedom,” arXiv:2012.03627.

[2] Sora Akagami, Hiroyuki Tajima, and Kei Iida, “Condensation of Cooper Triples,” arXiv:2102.03701.

[3] Eiji Nakano, Kei Iida, and Wataru Horiuchi, “Quasiparticle properties of a single α particle in cold neutron matter,” Physical Review C 102, 055802 (2020).

[4] Junichi Takahashi, Hiroyuki Tajima, Eiji Nakano, and Kei Iida, “Extracting non-local inter-polaron interactions from collisional dynamics,” arXiv: 2011.07911 (to be published in Physical Review A).

[5] Yuta Sekino, Hiroyuki Tajima, and Shun Uchino, “Optical Spin Transport in Ultracold Quantum Gases,” arXiv:2103.02418.

[6] Hiroyuki Tajima, Yoshimasa Hidaka, and Daisuke Satow, “Goldstino spectrum in an ultracold Bose-Fermi mixture with explicitly broken supersymmetry”, Physical Review Research, 3, 013035 (2021).