

強相関量子多体系現象を定量的に解析・予言できる量子場理論の開発研究

大橋洋士 (KiPAS 主任研究員)
猪谷太輔 (KiPAS 研究員)

○ 研究全体の概要

現代社会を支える半導体技術は 20 世紀初頭に完成した 1 粒子描像に基づく量子力学に支えられているが、この基盤技術が微細化・高集積化の限界に近づきつつある今、これを質的に超える基盤科学を準備することは、基礎科学に課された大きな使命である。本研究は、1 粒子描像の対極にある強相関量子多体系をポスト半導体の有力候補と捉え、強相関効果で発現する多彩な量子現象を微視的、かつ定量的レベルで解析でき、更には、新奇量子多体系現象をも予言できる量子場理論の構築を目指す。

この目的のため、近年実現した次の強相関人工量子多体系に着目し、定量性の検証に用いる：

1. **冷却フェルミ原子気体**：不純物を全く含まず、粒子間相互作用など様々な物質パラメータの精密かつ自在な制御が実験的に可能。超流動も実現する。
2. **励起子ポラリトン凝縮**：非平衡状態、および、物質と光の連続的な移り変わりの実験的制御が可能。長距離クーロン力も扱える。

更に、理論の普遍性を検証するターゲットとして、超高密度物質である中性子星を取り上げ、解析計算と数値計算を併用し研究を推進する (図 1)。

○ 2017 年度の研究活動・研究成果

1. 非平衡定常状態にある励起子凝縮の BCS-BEC クロスオーバー領域での安定性

これまで構築してきた熱平衡状態にあるフェルミ原子ガスに対する強結合理論を非平衡状態に拡張、非平衡性が本質的に重要となる励起子凝縮系に適用した。半導体の価電子帯から伝導体への励起による電子・正孔の生成、および、再結合によるそれらの対消滅を、「熱浴 (bath) からの粒子供給と真空への粒子流出」でモデル化、非平衡定常状態に拡張した BCS-Leggett 理論と非平衡 Green 関

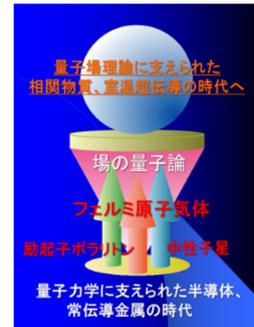


図 1：本 KiPAS プロジェクトの方向性の概略図。

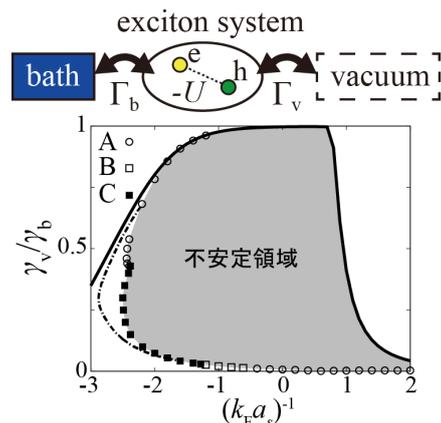


図 2：非平衡定常状態にある励起子凝縮の相図。横軸は電子ホール間相互作用強度 (a_s : s 波散乱長、 k_F : フェルミ波数)。 γ_v は系から真空への粒子の流出 (Γ_v) に起因する減衰強度 (γ_b は粒子供給源との結合による減衰強度)。非平衡効果による動的不安定性により、BCS-Leggett 理論で得られた凝縮相 (実線以下の領域) の広い領域が不安定化する。

数で定式化した GRPA を組み合わせることで、非平衡効果による凝縮相の安定性を BCS-BEC クロスオーバー全域で明らかにした。BCS-Leggett 理論で得られる励起子凝縮相が、実際には幅広い領域で dynamical instability を起こし不安定化すること (図 2)、そして、それが非平衡効果に因る励起子ボソン間の引力相互作用に因ることを見出した。この成果は、励起子 BEC を目指す実験研究に対し、今後の指針を与えるものである。

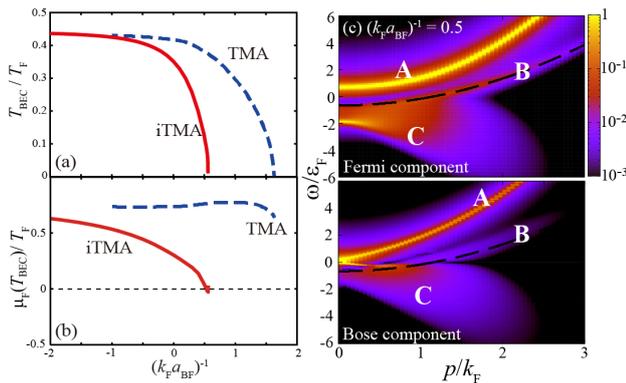


図 3: iTMA で得られた、(a) ボース・フェルミ (B-F) 混合原子ガスの BEC 転移温度 T_{BEC} と、(b) フェルミ原子の化学ポテンシャル μ_F の相互作用依存性 (a_{BF} : B-F 相互作用の s 波散乱長)。点線は従来の TMA の結果。iTMA では $T_{\text{BEC}}=0$ となるあたりでフェルミ面が消失 ($\mu_F=0$) するが、TMA ではこの現象が記述できない。(c) 1 粒子励起スペクトル (iTMA)。

2. ボース・フェルミ混合原子気体に対する強結合理論 (iTMA) の構築

近年、double condensate の実現等で注目されているボース・フェルミ (B-F) 混合原子気体に対し、従来の強結合理論 (TMA) が抱える欠点を克服した。TMA では、強結合側で期待されるフェルミ原子のフェルミ面の消失 (\Leftrightarrow フェルミ原子化学ポテンシャル $\mu_F=0$) が得られないが、Hugenholtz-Pines の定理を満たすよう理論を改良することで、 $T_{\text{BEC}}=0$ となる相互作用強度近傍において、この期待される振る舞いを得ることに成功した (図 3 (a)、(b))。

この improved TMA (iTMA) を用い、1 粒子励起スペクトルを研究、中間結合領域で、スペクトル中に粒子励起 (図 3(c) の A)、ホール励起 (C)、および、分子励起 (B) が現れることを予言した。フェルミ原子ガスでは、(A) と (C) は現れるものの分子励起は現れず、(B) の出現は B-F 系特有の現象である。

3. 2 次元フェルミ原子気体における擬ギャップ領域の特定

2 次元フェルミ原子気体の擬ギャップ現象を自己無撞着 T 行列近似 (SCTMA) で研究、理論的に予想されている超流動転移温度近傍でも弱結合側では“完全なギャップ”は開かないことを示した (図 4(a))。また、擬ギャップが現れる領域を温度-相互作用相図上で特定した (図 4(b))。2 次元超流動は BKT 転移と呼ばれる準長距離秩序により生じるが、現在、フェルミ原子ガスに対する BKT 理論は完全なギャップを仮定しており、本研究の成果は、この系の BKT 理論の再考を迫るものである。

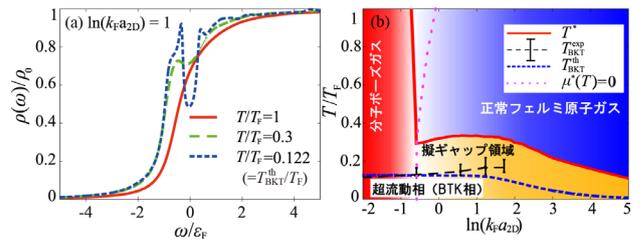


図 4: (a) SCTMA で得られた 2 次元フェルミ原子気体の弱結合側での擬ギャップの温度依存性 (BKT 転移温度以上)。(b) 擬ギャップの温度依存性から決定された 2 次元フェルミ原子ガスの温度-相互作用相図。

また、2 次元系に対する SCTMA の妥当性を検証、多体効果を強く反映する物理量である Contact C を計算し、2 次元 ${}^6\text{Li}$ フェルミ原子気体での実験結果 ($C=0.223$) を良く再現する値 $C=0.238$ を得た。

○ 2018 年度の研究計画

非平衡励起子凝縮に対し、ポラリトン効果や対形成揺らぎの効果をも考慮できるよう理論を拡張する。熱平衡状態の問題について、BCS-BEC クロスオーバー領域における圧縮率や軌道 Feshbach 共鳴による非アルカリ金属フェルミ原子ガスの超流動化の可能性など、残された問題に挑む。併せて KIPAS の期間中の成果をまとめる。

○ 業績 (詳細は KRIS 参照)

○ 学術論文 (査読付)

- [1] P. van Wyk, H. Tajima, D. Inotani, A. Ohnishi, Y. Ohashi: Phys. Rev. A **97** (2018) 013601(1-13).
 - [2] R. Hanai, P. Littlewood, Y. Ohashi: Phys. Rev. B **96** (2017) 125206(1-19).
 - [3] M. Horikoshi, M. Koashi, H. Tajima, Y. Ohashi, M. Kuwata-Gonokami: Phys. Rev. X **7** (2017) 041004(1-15).
- 他 7 編、投稿中 1 編 (計 11 編)。

○ 国際会議論文 (査読付)

- [1] D. Inotani, P. van Wyk, Y. Ohashi, J. Low Temp. Phys. **187** (2017) 685-691. 他 8 編 (in press 4 編) (計 9 編)。

○ 研究発表 (上記「国際会議論文」以外)

- [1] Y. Ohashi, “Strong-coupling properties of an ultracold Fermi gas in the BCS-BEC crossover region and application to neutron-star equation of state,” International Workshop on Bose-Einstein Condensation and related phenomena, 3/26-28 (2018), Bose-Center for Basic Sciences, India. (Invited)
 - [2] 大橋洋士, “冷却原子気体と原子核で探る中性子星の謎,” AMO 討論会, 2017 年 6 月 30 日, 電気通信大学. (DL, invited)
- 他、国際会議 9 件 (計 10 件)、国内会議 18 件 (計 19 件)。
○ 大学院生: 博士 (理学) 取得 3 名 (うち留学生 2 名)。