



量子シミュレータ

田島裕之

東京大学大学院理学系研究科

リチウムなどの希薄な原子集団を極低温まで冷却することで実現される冷却原子気体は、その操作性の高さから他の量子系に対するシミュレータとして注目を集めてきました。本稿では、冷却原子気体を用いた核物質の量子シミュレーションについて解説します。

1. 冷却原子気体とは

冷却原子気体による量子シミュレーションは日進月歩で多岐に進展しており、全てを本紙面で網羅することは困難です。全般的な話題はレビュー[1-7]に譲り、本稿では、希薄中性子物質と密接な関係にある冷却フェルミ原子気体を用いた量子シミュレーションについてご紹介します。

冷却原子気体とは、その名の通り極低温($nK \sim \mu K$ 程度)まで冷却された希薄な原子気体を指します。実験技術の急速な発展により、様々な量子現象が冷却原子気体で実現され、その性質が明らかにされてきました。Bose-Einstein 凝縮(BEC)はまさにその代表例です。BEC が提唱されたのは冷却原子気体で実現されるよりもおよそ1世紀遡ることの1924年ですが、今日 BEC といえれば冷却原子気体をイメージされる方は多いのではないのでしょうか。これは様々な技術の集大成であり、冷却原子気体による量子シミュレーションを世界に強く印象づけた重要な成果といえます。

その後も、Bardeen-Cooper-Schrieffer-Bose-Einstein-condensation (BCS-BEC) クロスオーバー(図 1(a))やユニタリーフェルミ気体[1,2]、Efimov 効果[3] (図 1(b))、ポーラロン[2]といった多彩な量子現象が実験で実現されました。興味深いことに、上記のいずれも冷却原子気体ではなく物性・原子核物理といった異なった分野で提唱された概念です。冷却原子気体の持つ他の系にない高い制御性がこうした様々な現象

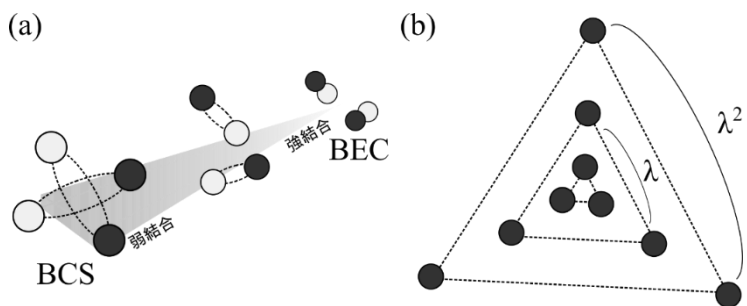


図 1:(a) BCS-BEC クロスオーバー、及び、(b)Efimov 効果の模式図を示します。BCS-BEC クロスオーバーでは、原子間引力相互作用を変化させることで弱結合 Fermi 超流動から束縛 2 分子の Bose 超流動へ連続的に変化します。また、Efimov 状態では s 波散乱長が発散するユニタリー極限において離散対称性(図中ではスケール λ に対応)をもつ無限個の 3 体束縛状態が現れます。

の実現・観測を可能にしました。加えて、光格子や人工ゲージ場を組み合わせることで、結晶中の電子系の量子シミュレーション[4]も可能です。一方、冷却原子気体の研究の中で見出されたものとして Tan の関係式[2]や人工次元[5]等が挙げられます。特に、Tan の関係式は原子核分野でも核子間の短距離相関との関連で近年注目を集めています。実験と理論、異分野との連携を通じて得られる従来概念に対する理解の深化、及び、理想的な環境下での新奇現象の発見は、量子シミュレータとしての冷却原子気体研究の醍醐味といえます。

2. 冷却フェルミ原子気体を用いた量子シミュレーション

冷却原子系における原子引力相互作用は Feshbach 共鳴により人為的に制御され、非常に弱い引力から 2 体束縛分子を形成するほどの強い引力にまで s 波相互作用を変えることができます。2 成分フェルミ原子気体では前述の BCS-BEC クロスオーバーが実現されます(ここでの「2 成分」は異なる 2 種の超微細構造状態を指し、擬スピンとも呼ばれます)。原子数はおおよそ $10^4 \sim 10^6$ 個程度であり、フェルミ温度の数%程度の温度まで冷却可能です。気体を閉じ込めるトラップポテンシャルの形状は通常調和振動子型でよく記述されますが、実験技術の発達によりボックス型と呼ばれるものが実現し、測定領域においてトラップによる非一様性が現れないような状況も実現されました。観測可能な物理量も多岐に渡り、代表的なものとして数密度分布、radio-frequency スペクトル、Bragg スペクトル等が挙げられます。これらの観測量から状態方程式や 1 粒子励起スペクトル、超流動ギャップ等が高い精度で決定されています。

さらに、特筆すべき点として 2 成分フェルミ原子気体と希薄な中性子物質との類似性が挙げられます[6]。その違いは、 1S_0 チャンネルの有効距離 $r_{\text{eff}}=2.7 \text{ fm}$ とフェルミ運動量 k_F の積で与えられる $r_{\text{eff}}k_F$ という無次元量で特徴づけられますが、標準核密度以下の低密度領域ではこの値は小さく、両者の直接的比較が可能です。「希薄中性子物質」という限定下においてはまさに冷却原子気体による量子シミュレーションが忠実に実現されているといっても過言ではありません。

これまで冷却原子気体の高い制御性について述べてきましたが、核物質やクォーク物質の量子シミュレーションに関しては多くの課題が残されています。高密度クォーク物質のカラー超伝導をシミュレーションする系として注目される 3 成分 ^6Li フェルミ原子気体実験では[7]、激しい 3 体ロスの影響で多体効果の検証には至っていません。今後の理論・実験の進展が期待されます。

参考文献

- [1] I. Bloch, J. Dalibard, and W. Zwerger, *Rev. Mod. Phys.* **80**, 885 (2008).
- [2] *The BCS-BEC Crossover and the Unitary Fermi Gas*, edited by W. Zwerger, *Lecture Notes in Physics* Vol. 836 (Springer, Berlin, 2012).
- [3] P. Naidon and S. Endo, *Rep. Prog. Phys.* **80**, 056001 (2017).
- [4] F. Schäfer, T. Fukuhara, S. Sugawa, Y. Takasu, and Y. Takahashi, *Nat. Rev. Phys.* **2**, 411 (2020).
- [5] N. R. Cooper, J. Dalibard, and I. B. Spielman, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 015005 (2019).
- [6] M. Horikoshi and M. Kuwata-Gonokami, *J. Mod. Phys. E* **28**, 1930001 (2019).
- [7] K. O'Hara, *New J. Phys.* **13**, 065011 (2011).