

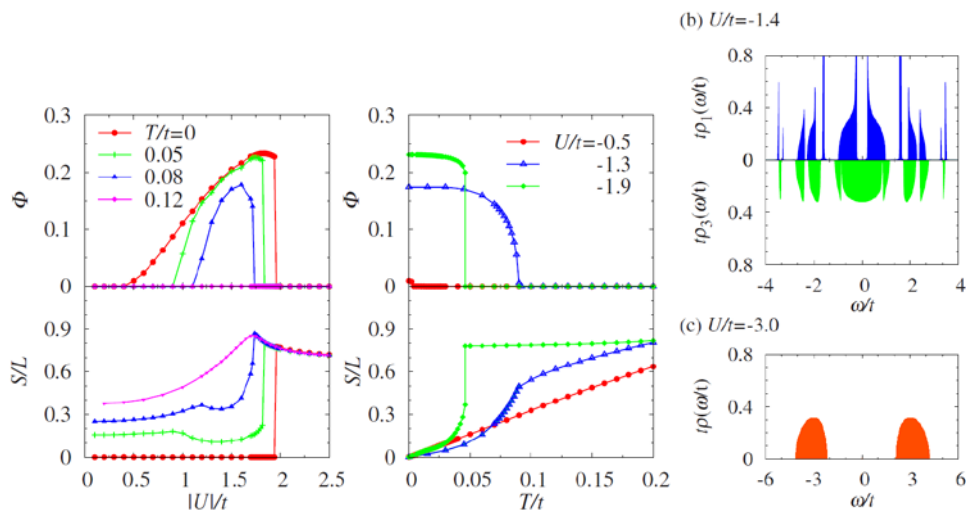
多成分内部自由度を持つ冷却フェルミ原子の秩序状態とダイナミクス

菅 誠一郎 (兵庫県立大学大学院工学研究科)

連携研究者: 山下 眞 (NTT 物性科学基礎研究所)

近年、冷却フェルミ原子の研究が目覚ましい勢いで発展している。実験においては、a) フェッシーバツハ共鳴を用いて原子間相互作用の制御が可能になったこと、b) レーザーで作られた定在波による光格子中に冷却原子を置き、光格子の周期や次元、ポテンシャルの深さを制御することが可能になったこと、などを背景として、従来実験が困難であったBCS-BECクロスオーバーなどが観測されている。冷却フェルミ原子系の研究はさらに、多成分内部自由度を持つフェルミ原子系など、通常の物性物理では現れなかった新奇な系にも広がりを見せ始めている。

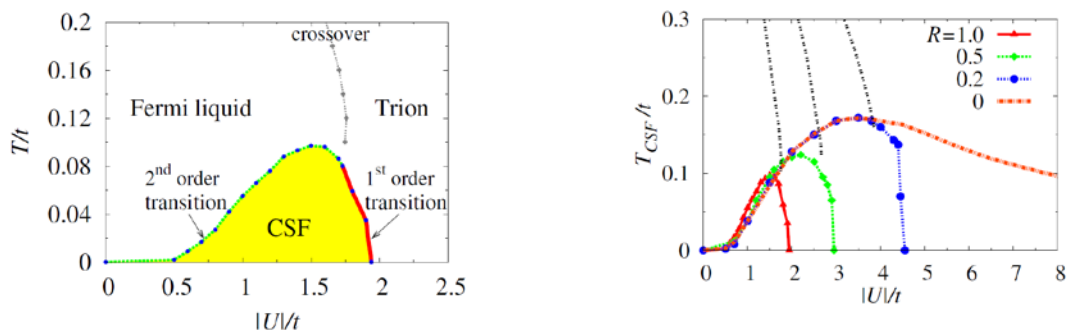
ごく最近、3成分内部自由度(カラー自由度)を持つ引力⁶Liフェルミ原子系が作成され[1]、その性質に興味が集まっている。光格子中の3成分引力フェルミ原子系は、原子間引力が等方的で弱い場合、2種類のカラーの原子がクーパーペアを作り残りのカラーの原子はフェルミ流体を形成する、カラー超流動が基底状態であることが理論的に示されていた[2]。そして引力が強くなると、カラー超流動状態は、3種類のカラーの原子が一重項束縛状態を形成したトリオン状態へと2次転移をする[2]。しかし、現実の系では各カラー間の引力に異方性があるうえ、温度の影響も重要である。そこで本研究では、光格子中の異方的引力相互作用をする3成分冷却フェルミ原子系の絶対零度から有限温度における性質を、自己エネルギー汎関数法を用いて調べた[3]。この方法は、強相関電子系の絶対零度から有限温度にわたる熱力学的性質、および(量子)相転移を精度良く調べることが出来る強力な非摂動論的方法として知られている[4]。



等方的引力相互作用(U)の場合のハーフフィリングにおける超流動オーダーパラメータ(Φ)、エントロピー(S)、1粒子励起スペクトル($\rho_\alpha(\omega)$, $\alpha=1, 2, 3$ はカラーを表す)を計算した結果を上図に示す。ここで t は同一カラー原子の跳び移り積分である。 $T=0$ の場合、 $U_c=-1.94t$ において Φ はゼロに跳び、 S もゼロから $\approx \log 2$ に跳ぶ。また、 $|U| < |U_c|$ の $\rho_1(=\rho_2)$ には超流動ギャップが現れる

が、 ρ_3 はフェルミ流体の特徴を示している。一方、 $|U| > |U_c|$ の $\rho_1 (= \rho_2 = \rho_3)$ はモット絶縁体の特徴を示しており、今の場合それはトリオン状態に対応する。すなわち、 $T=0$ におけるカラー超流動→トリオン転移は1次転移であり、Rapp et al. の結果[2]と異なる。

$T=0.05t, 0.08t$ での Φ はゼロから立ち上がり、その U/t で S にはカuspを生じている。これはフェルミ流体からカラー超流動への2次転移を表している。さらに $|U|/t$ を増加させると、 Φ はゼロに跳び、 S は $\approx \log 2$ へ跳んでいる。この結果は、カラー超流動からトリオン状態への1次転移を表している。 $T=0.12t$ では $\Phi=0$ で、 S にはピークが見られる。これは、フェルミ流体からトリオン状態へのクロスオーバーを表している。次に、 Φ と S の温度依存性を見ると、弱相関の場合 ($U=-0.5t$)、 $\Phi=0, S \propto T/t$ であることから $T \neq 0$ を除いてフェルミ流体であることが分る。 $U=-1.3t$ において Φ は連続的にゼロになる。 $\Phi \neq 0$ の温度領域で S は「線形+熱活性型」の温度依存性を示し、 $\Phi=0$ の温度領域では T/t に比例する。これはカラー超流動からフェルミ流体への2次転移を表している。 $U=-1.9t$ では、 Φ は有限値からゼロに跳び、 S は $\log 2$ に跳ぶ。すなわち、カラー超流動からトリオン状態への1次転移をしていることが分る。結果をまとめた相図を下図の左に示す。結果は[2]においてナイーブに予想された相図と定性的に異なっている。



右図は、引力が異方的な場合について同様に計算した結果をまとめた相図である。3種類の引力のうち2種類を U' 、他の引力を U として、相互作用の異方性を $R=U'/U$ と定義している。 $|U|/t > 1.5$ では与えられた U に対して、 R が減少（異方性が増加）するにつれ、カラー超流動転移温度は上昇している。これは、異方性によって転移点近傍のトリオン揺らぎが抑制されるため、カラー超流動相が広がることによると考えられる。ここで、 $R=0$ は2成分系に対応する。 $0 < R < 1$ のカラー超流動転移温度の最大値は、 $R=0$ の超流動転移温度の最大値の $1/2$ より大きい。光格子中の2成分引カフェルミ原子 ${}^6\text{Li}$ において超流動が観測されている[5]ことから、光格子中の3成分引カフェルミ原子系が実現した場合、カラー超流動転移は観測される温度領域にある可能性が考えられる。

[1] T. B. Ottenstein, et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 203202 (2008).
 [2] A. Rapp, et al., Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 160405; Phys. Rev. B **77**, 144520 (2008)
 [3] K. Inaba and S. Suga, Phys. Rev A **80**, 041602(R) (2009).
 [4] 稲葉謙介 等、物性研究 **91**, 335 (2009).
 [5] J. K. Chin et al., Nature, **443**, 961 (2006).