

絶対温度1億分の1度の領域における原子集団の振る舞い

- 光格子中の冷却フェルミ原子で見られる超流動・絶縁体転移 -

研究ノート

菅 誠 一 郎*

Superfluid-insulator transition of ultracold fermi gases in optical lattices

Key Words : cold fermionic atoms, laser cooling, optical lattice, superfluid, Mott insulator,

1. はじめに

物質の温度をどこまで下げることが出来るのかという問題は、古くからチャレンジングな問題として人々を魅了してきた。近年、レーザー冷却と蒸発冷却を組み合わせることで、数百ナノK~数ナノK(!)という途方もない極低温を実現することが可能になった。そして、 $10^4 \sim 10^6$ 個のボーズ原子(ボーズ統計に従う原子)の集団をこのような極低温にすると、量子統計的性質に起因したボーズ・アインシュタイン凝縮(超流動)を起こすことが実験によって確かめられた。さらに、フェッシュバハ共鳴と呼ばれる方法を用いることで、原子間の相互作用を引力から斥力まで制御できることも可能になってきた。フェッシュバハ共鳴を用いて冷却フェルミ原子(フェルミ統計に従う原子) ^{40}K の相互作用を弱い引力から強い引力まで変化させたところ、通常の金属で実現するタイプの超伝導状態から、2個のフェルミ原子で構成されるボーズ粒子がボーズ・アインシュタイン凝縮した状態へと移り変わる様子が観測され、注目を集めた。このように、冷却原子の研究は勢いを増しながら、実験・理論両面から活発に行われている。実際、ここ約10年間で関連する研究から3件のノーベル賞が出ているという事実からも、その勢いはうかがわれる。

レーザー冷却原子に関する研究で最近注目を集め

ている問題の一つに、引力相互作用をするフェルミ原子で見られる超流動・絶縁体転移がある。2006年、冷却フェルミ原子 ^6Li をレーザーで作られた光格子による周期ポテンシャル中に置き、ポテンシャルの強さや相互作用の強さを変化させることで、超流動状態から絶縁体状態への相転移が観測された。実験ではさらに、観測された絶縁体がモット絶縁体である可能性が示唆された。モット絶縁体とは遷移金属酸化物などで見られる絶縁体で、通常のバンド理論による絶縁体とは異なり、強い電子間斥力に起因して電子の有効質量が発散的に増大することで実現する。引力相互作用をする冷却フェルミ原子において、どのような条件で超流動からモット絶縁体への相転移が実現するかは未解決の問題であった。この分野の急速な進展状況から考えて、この問題を理論面から調べることは興味深い問題である。

2. 動的平均場近似による計算結果

そこで我々は、相互作用が強い電子系において金属状態からモット絶縁体への相転移を解析するのに成功した動的平均場近似を用いて、この問題を調べた[1]。実験が行われた系は核スピンと電子スピンによる2種類の状態の ^6Li 原子から構成されているので、これを擬スピンで表す。また、実験を解析した結果、トンネル効果により光格子のポテンシャル間を跳び移るフェルミ原子が作るバンドとして、2つ考慮する必要性が指摘されていた。同一バンド内の相互作用に加えてバンド間の相互作用も取り入れ定式化することで、1)超流動を特徴付ける秩序変数(Φ) 2)モット絶縁体を特徴づける繰り込み因子(Z)(フェルミ原子の有効質量の逆数に対応) 3)各バンドの占有数(n_1, n_2)を計算した。ここでは、各光格子点に平均して2個のフェルミ原子が詰まっている場合(ハーフフィリング)について考え



*Seiichiro SUGA

1959年4月生
大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻(1988年)
現在、大阪大学大学院工学研究科精密科学・応用物理学専攻 准教授 工学博士 物性理論
TEL : 06-6879-7874
FAX : 06-6879-7874
E-mail : suga@tp.ap.eng.osaka-u.ac.jp

る。その場合、超流動状態は $\Phi \neq 0$ 、モット絶縁体は $\Phi = 0$ 、 $Z = 0$ 、 $n_1 = n_2 = 1$ 、バンド絶縁体状態は $\Phi = 0$ 、 $Z = 1$ 、 $n_1 = 2$ 、 $n_2 = 0$ で、それぞれ特徴付けられる。

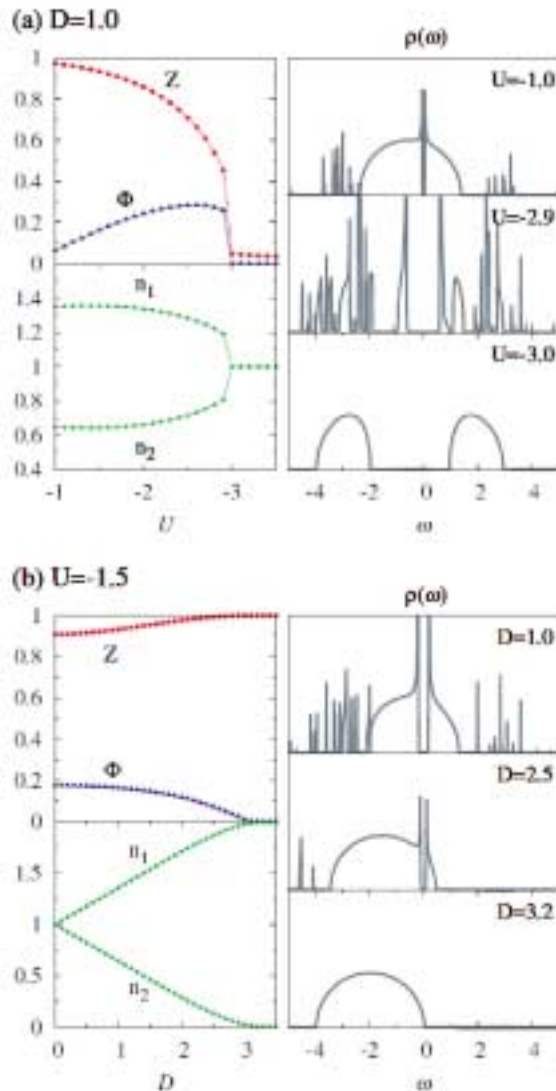


図1．超流動秩序変数(Φ)、繰り込み因子(Z)、各バンドの占有数(n_1 、 n_2)の計算結果。
(a) 超流動 - モット絶縁体転移。(b) 超流動 - バンド絶縁体転移。 ω はエネルギーを表す。

図1に系を記述するパラメータである、フェルミ原子間相互作用 U と2バンド間のエネルギー差 D を変化させた場合の計算結果を示す。エネルギーはフェルミ原子の跳び移り積分を単位にしている。図1(a)を見ると、引力 U が強くなるのに従い、有限の Φ 、すなわち超流動状態でありながら、 Z が著しく減少して行くのが分かる。そして $U = -3.0$ で $\Phi = 0$ 、 $Z = 0$ 、 $n_1 = n_2 = 1$ になり、超流動からモット絶縁体へ

の相転移が起こる。このことは、右側の図に示した状態密度 $\rho(\omega)$ から明らかである。：相互作用の効果が繰り込まれることにより超流動ギャップ近傍の状態密度はピークを示すが、 $U = -3.0$ ではモット絶縁体への相転移が起こることに対応してそのようなピーク構造は消え、モット絶縁体に特有な高エネルギー側と低エネルギー側のバンドによる状態密度が現れる。一方、図1(b)を見ると、バンド間隔 D が增大するのに従って、 Z は1に向かって増大し Φ は0に向かって減少している。そして、 $D = 3.2$ で $\Phi = 0$ 、 $Z = 1$ 、 $n_1 = 2$ 、 $n_2 = 0$ となり、超流動状態からバンド絶縁体への相転移が起こる。実際、 $D < 3.2$ の状態密度では超流動ギャップ近傍に繰り込まれたピークが見られるが、 $U = 3.2$ ではバンド絶縁体に特徴的な状態密度が現れている。

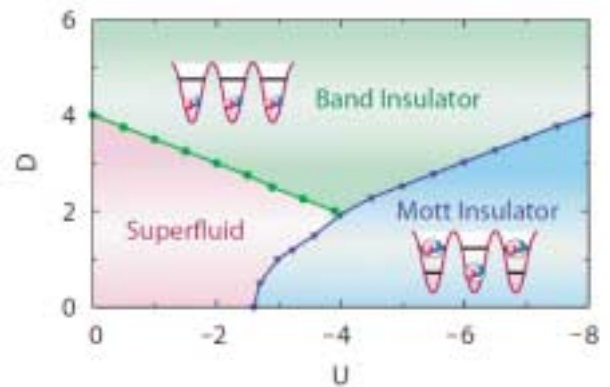


図2．ハーフフィリングでの相図。

フェルミ原子間相互作用 U と2バンド間のエネルギー差 D を系統的に変化させ、同様に計算した結果をまとめた相図を図2に示す。図2を見ると、 $D < 2$ では U を強くすると超流動状態からモット絶縁体への相転移が起こり、 $2 < D < 4$ では超流動 - バンド絶縁体 - モット絶縁体という相転移が起こる。 D が大きい領域では、予想される通りバンド絶縁体が安定になる。

モット絶縁体の具体的な描像を得るために、ここで用いたモデルを $|U| > D$ の条件の下で展開して、強い引力の場合に成立する有効モデルを導出した。その有効モデルは、2個のフェルミオンペアから形成されるボーズ粒子(ペアボゾン)が光格子間を跳び移り、同一格子点に来た2個のペアボゾン間に有

効的な斥力が働くという状況を表している。そして、この斥力によるエネルギーの増加を避けるため、ペアボソンは各光格子に1個ずつ局在してモット絶縁体を実現すると解釈される。図中に示したのは、モット絶縁体とバンド絶縁体の模式図である。モット絶縁体ではペアボソンが各光格子点の2つのエネルギー準位に平均1個存在するのに対して、バンド絶縁体ではペアボソンが低エネルギー側の準位だけを占有する。

なお、同様の計算を1バンドの系に対して行くと、引力が強くなってもモット絶縁体は現れず超流動状態のままである。すなわち、ここで得られたモット絶縁体は、2バンドの効果により現れたことを強調しておく。

3. 最後に

本稿では、冷却フェルミ原子で観測された超流動—絶縁体転移に関連して行った、我々の計算結果を

紹介した。ここで得られた結果は、この問題に対する理論的アプローチの第一歩であり、今後さらなる研究が必要である。例えば、実験では冷却原子を閉じ込めるためのポテンシャルが存在する。その効果を取り入れると、原子密度波状態と超流動状態が共存した超固体というエキゾチックな状態が現れるという結果を我々は得ている[2]。さらに、有限温度でどのような秩序状態が現れるのかという問題も興味深い。これからも理論・実験が緊密に協力しながら、この分野の研究は発展を続けると思われる。

参考文献

- [1] T. Higashiyama, K. Inaba, and S. Suga, Phys. Rev. A 77, 043624 (2008)
- [2] A. Koga, T. Higashiyama, K. Inaba, S. Suga, and N. Kawakami, J. Phys. Soc. Jpn. 77, 073602 (2008).

