

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 濱田晃一

### 序

本論文は6章からなり、第1章は、銅酸化物超伝導体についての概説、第2章は銅酸化物超伝導体の理論の解説、第3章は問題の概説に当てられている。第4、5章では論文提出者の研究成果、すなわち第4章では交替磁束状態とd波超伝導状態の競合に関する理論、第5章では交替磁束状態における光電子分光の理論について詳しく述べられている。そして、第6章では結論が述べられ、それに関する論考がなされている。

### 本論

1986年に発見された銅酸化物超伝導体は、転移温度が高いことから研究者だけでなく広く社会の関心を集めることになった。しかし物理的な観点から眺めると転移温度の高さはこの物質の異常な性質のひとつに過ぎない。高温超伝導現象は反強磁性秩序を持つモット絶縁体にキャリアをドーブすると起こる現象である。ドーブ量と温度を軸に採り相図を描くと、銅酸化物超伝導体は超伝導相以外にフェルミ流体相、異常金属相、擬ギャップ相、反強磁性相などさまざまな相を含んでいる。超伝導相を取り巻くこれらの相に見られる異常な性質の理解が、銅酸化物に特有の超伝導発現機構の解明のための重要な鍵となる。

高ドーブ領域における金属相は、フェルミ流体論という従来の理論的枠組で記述される状態になっていると考えられている。ドーブ量をそこから減らしていくと異常な金属相に変化する。さらにドーブ量を減らしていくと、磁気励起のスペクトルにエネルギーギャップが生じる。このギャップを擬ギャップと呼び、この相を擬ギャップ相と呼ぶ。擬ギャップ相が存在する低ドーブ領域で十分高温から温度を下げていったとすると、まずエネルギーギャップが開き、さらに低温になってはじめて超伝導転移が起こるわけであるから、擬ギャップ現象が異常な現象であることは明らかである。そのために擬ギャップ現象は超伝導の発現機構と深く関わる現象として理論的にも実験的にも長らく研究されてきた。そのような研究のひとつとして行われた角度分解光電子分光の実験結果は、この擬ギャップ相のさらなる異常さを端的に表している。銅酸化物のような2次元的な電子構造をもっている物質の場合、金属相におけるフェルミ面はブリリュアンゾーン内で閉曲線をなすかゾーンの境界まで広がった開いた軌道をなすのが普通であるが、擬ギャップ相では大変奇妙な結果、すなわちフェルミ面がゾーン内で開いた弧 (Fermi arc) になっているという結果が得られていた。

擬ギャップに関して先行する理論研究は大きく二つに分けることができる。ひとつは高ドーブ側を出発点にするフェルミ流体論であり、もうひとつはドーブされたモット絶縁体であることを強調したスレイブボゾン法に基づくものである。濱田氏の研究は後者に属する。スレイブボゾン法とは、ひとつの電子をスピンだけ持つ中性の粒子 (スピノン) と電荷は持つがスピンを持たない

粒子（ホロン）からなる複合粒子として記述する理論形式のことであり、強相関電子系に対して用いられるものである。スレイブボゾン法では擬ギャップを交替磁束秩序に起因するギャップと解釈する。交替磁束秩序とは電子の軌道運動によって作られる磁束が反強磁性の磁化のように交互に並んだ秩序を指す。

さて、擬ギャップ相を交替磁束状態を解釈するシナリオには以下に述べるような未解決の問題がある。第一に、スレイブボゾン法では直接扱うのはスピノンやホロンなどの仮想粒子であり、交替磁束とはいうものの、スピノンの運動からくる磁束だけに注目している。そのため電子の軌道運動からくる磁束が果たして交替秩序を持つのかどうか自明ではない。第二に、交替磁束状態とd波超伝導状態の関係は共存できるのかどうかわかっていない。第三にスレイブボゾン法の交替磁束状態が擬ギャップ相におけるFermi arcを説明できるかどうか、わかっていない。本論文の主な目的はこれらの点を解決することにある。

濱田氏は銅酸化物超伝導体に対する微視的なモデルである2次元 $t$ - $J$ モデルに対して $U(1)$ スレイブボゾン平均場近似を適用した。その際にホロンのボーズ凝縮を仮定せず、またホロンが交替磁束秩序を持つ場合も含むように従来の平均場理論を拡張した。その結果、電子の交替磁束とスピノンの交替磁束の対応関係を与えることに成功した。さらに、スピノンは交替磁束秩序を持つ一方、電子の交替磁束秩序が存在しない相がハーフフィリング近傍の有限温度領域において安定相として存在することを示し、その相と電子の交替磁束状態との間で2次転移が起こることを導いた。

また、d波超伝導状態と電子の交替磁束状態の関係について、平均場近似の範囲内ではこれらの2相は共存しないこと、基底状態は常にd波超伝導状態であることを示した。さらに平均場解として得られた各相について線形揺らぎの範囲内での安定性を示した。

さらに電子の交替磁束状態におけるグリーン関数を計算し、フェルミ面は、ゾーン内の小さな閉曲線であること、しかし、スペクトル強度の強い部分は閉曲線の一部であるために実験的には弧状のフェルミ面に見えることを示し、Fermi arcという見かけ上の謎に自然な解釈を与えた。さらにFermi arcのドーピング依存性、温度依存性について詳細な解析を行った。

本研究において用いたスレイブボゾン法では、電子が複合粒子として記述されるために相関効果を取り入れやすい一方で、ややもすると物性論から離れて抽象論に終止してしまう恐れがある。それに対して、本研究の特徴は、観測可能な物理量を具体的に計算して交替磁束状態というひとつのシナリオの妥当性を主張している点にある。さらにこのことは強相関電子系におけるスレイブボゾン法という理論形式の有効性を示していることにもなっている。この2点に本研究の意義がある。

これらの成果に関しては、Physica C 1報、Physical Review B 本論文 1報がすでに出版されており、またPhysical Review B 誌に現在投稿中のものが1報ある。

## 結び

本論文中の第4, 5章の一部は、吉岡大二郎氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって分析を行ったもので、論文提出者の寄与は十分であると判断する。よって本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。