

氏 名	じゅう じょう たか のぶ 重 城 貴 信
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2427 号
学位授与の日付	平 成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Fermi Liquid Theory on Response Properties in the Superconducting State (超伝導状態における応答の性質に関するフェルミ液体論)
論文調査委員	(主 査) 教 授 山 田 耕 作 教 授 大 見 哲 巨 教 授 石 黒 武 彦

論 文 内 容 の 要 旨

この論文は、磁場侵入長、熱伝導度など超伝導状態における応答関数をフェルミ液体論に基づいて正確に計算し、実験結果を正しく説明した論文である。従来、高温超伝導体などの相関の強い電子系において単純なフェルミ液体論では記述できない現象が多く見られた。それらの量は線形応答理論の範囲においては、久保公式から正確に準粒子間相互作用を考慮して導出する必要がある。等方的な系に対しては従来のフェルミ液体論で Leggett や Larkin の理論があるが、現実の等方的でない系の超伝導状態に対するフェルミ液体論とその有効性が十分理解されていなかった。そのため、多体効果を見逃した理論として、磁場侵入長の逆数の2乗がキャリア密度に比例し、有効質量に反比例するとする公式が用いられてきた。その結果、磁場侵入長が T_c の下で $T=0$ に近づくとき長くなることから、キャリア数がドーピング量 δ に比例して減少して行くものと考えられてきた。

一方、ホール係数が δ の逆数で増大する事からも、多体効果を見逃すると、キャリア数が δ で減少すると言う考え方に一致するため、低ドーピング領域ではドーピングしたホールがキャリアであるとする考え方が国際的にも支配的であった。高ドーピング側ではフェルミ液体としてキャリア数は $1-\delta$ で実験に合うので、最適ドーピング付近で不連続を持つことになる。このような理解が10年以上にわたって、 T_c とキャリア数の関係として、植村プロットと呼ばれて解析に用いられてきた。しかし、正しくはキャリア数はハーフフィルド(各格子点当たり1個)からホールを δ 個入れたものであり $1-\delta$ でなければならない。そうすると磁場侵入長に対するこれまでの説明を再検討しなければならないことになる。実際に最近、ホール係数が低ドーピング領域においてもキャリア数を $1-\delta$ として、フェルミ液体論に基づいて、反強磁性揺らぎを考慮した準粒子間相互作用の寄与を取り入れると説明できることが紺谷、神吉らによって示された。

申請論文の成果の一つは、磁場侵入長のドーピング依存性をフェルミ液体論に基づいて、大きいフェルミ面を仮定したままで説明したことである。従来、無視されてきた格子系特有の反転過程の散乱を考慮する一般論を Ward - 高橋恒等式を用いて導出し、磁場侵入長が多体効果で長くなることを示した。そのみならず、従来の理論では低温での磁場侵入長の温度変化が説明できなかったが、フェルミ面の各点における反強磁性揺らぎによる寄与の温度依存性を正しく計算することによって説明できた。これは磁場侵入長に関する謎を解決した重要な成果である。同時にフェルミ液体論の正しさと有効性を示すものである。

その他、申請論文は超伝導状態の熱伝導度の理論を導き、バーテックス補正は効かないことを示した。一般に外場に対するコヒーレントな応答が、正常相から超伝導状態に移るときに連続であるが、コヒーレントでない部分は、外場に対する応答によって補正がある場合と無い場合があるということを示した。熱伝導度で補正がない理由は、バーテックスの符号がフェルミ面の上下で変わり、その乱雑さのためマクロな応答としてのフェルミ液体パラメータが現れない事によると考えられる。

さらにマイスナー効果の磁場依存性の高次の非線形項を検討し、Yip-Sauls の理論が間違っていることを示した。Yip-Sauls の理論は異方的超伝導の対称性を実験的に決める方法として提案された理論であり、実験と理論の不一致が検討され

ていた問題である。申請者の計算によれば異常項はなく収束することが示された。こうして、実験結果とも矛盾しない非線形マイスナー効果の正しい理論が導出されたことになる。

このように本申請論文は、超伝導状態におけるフェルミ液体論を発展させ、磁場侵入長や熱伝導度を説明する理論を導出し、実験を説明したものである。特に現実の一般的に等方的でない格子系で重要になる反転過程を考慮し、準粒子間相互作用を取り入れた理論を完成したものである。このようなフェルミ液体論に基づく考察無しには関連の強い電子系は説明できないことを示している。

論文審査の結果の要旨

従来 T_c とキャリア数の関係を示すものとして用いられて来た植村氏の磁場侵入長の現象論的な解析が誤りであること、とその原因が示されたことの意義は大きい。この植村プロットから、キャリア数を誤って評価すると、圧力変化や温度変化によってキャリアが変化し、 T_c が変化するように見えるかもしれない。しかし、正しくは $1-\delta$ (δ : ドーピング量) なので大きな変化はないはずである。

従来のこのような誤りを正し、フェルミ液体論に基づく描像が高温超伝導体に適用できることが示された。特に低ドーブ側では植村プロットが誤りであることが示されたことは、今後の超伝導の研究にとって植村プロットの影響が大きいだけに重要である。

磁場侵入長自体の説明としても、申請論文は重要である。Leggett の等方的なフェルミ液体論を用いたとしても、多体効果のパラメーターが制限され、磁場侵入長の温度変化と磁場侵入長の大きさを同時に合わせる事ができない。申請者は格子系であること、一般に反強磁性揺らぎの強い高温超伝導体ではコールドスポットと呼ばれる準粒子の寿命の長いフェルミ面上の点とホットスポットと呼ばれる準粒子の寿命の短い点があり、それぞれの点での散乱の強さが異なるという効果をバーテックス補正の実部として考慮し、磁場侵入長の絶対値と温度変化へのそれぞれの寄与を計算すると自然に実験に一致する結果が得られることを示した。こうして結晶格子系と言う電子系に一般的なフェルミ液体論に忠実に多体効果を考慮して物理量の計算を行なうと謎や矛盾が解決することが示された。

このように申請者はフェルミ液体の立場で関連の強い電子系が正確に理解できること、現実に計算が多体効果のため複雑になることが多いが、正しい一般的な計算の方法を明らかにしたことになる。

さらに計算方法においてもウムクラップ散乱を取り入れ、積分方程式を解く上でも巧みな工夫がなされている。Ward - 高橋恒等式を超伝導状態に拡張し、有限温度における応答関数に必要な相関関数の表式を導出している。

このように申請論文はフェルミ液体理論を従来の理論から、等方性を仮定しない格子系に一般化し、ウムクラップ散乱を取り入れ、バーテックス補正と呼ばれる多体効果を取り入れた統一的な理論に発展させたものであり、大変高く評価される。

非線形マイスナー効果に関しても正しい定式化を提出し、理論の混乱を解決し、実験結果を矛盾なく説明できることを示した。

口頭発表において、関連する学識についても質問したが十分な能力があることが確認された。

以上の結果から、申請論文は学位論文に十分値するものと判断した。