

氏名	にし かわ ゆう のり 西 川 裕 規
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2580 号
学位授与の日付	平成 15 年 3 月 24 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	重い電子系の超伝導の理論

論文調査委員 (主査) 教授 山田耕作 教授 大見哲巨 教授 藪崎 努

### 論 文 内 容 の 要 旨

セリウム (Ce) やウラン (U) を含む化合物は重い電子系と呼ばれる金属状態になることで注目されている。重い電子系というのはその金属状態の電子の有効質量が大きいからである。それは電子比熱係数や電気抵抗の温度  $T$  の 2 乗項の係数が夫々大きいことから確認される。フェルミ液体論で言う準粒子の質量が陽子ほどにも大きくなったものが重い電子である。このような系の超伝導は 1970 年代に発見され、スピンの揺らぎで起こるとする説が提案されたがマイクロに導出することは難しく、現象論以上に研究は発展しなかった。

一方、銅酸化物は転移温度が 100K 近くにも達し、反強磁性揺らぎを起源とする現象論によってそのメカニズムが研究されてきた。それと平行して、マイクロにハバード・ハミルトニアンのカールン斥力から、異方的超伝導と呼ばれる対称性に属する d-波の超伝導を導出し、転移温度を求める理論が発展してきた。

本申請論文は銅酸化物で使用され、発展してきた揺らぎ交換近似 (FLEX) や電子間相互作用  $U$  に関する 3 次までの摂動理論を適用して、重い電子系の超伝導機構をマイクロに導き、転移温度を計算したものである。

対象とされた系は  $UPd_2Al_3$ ,  $UNi_2Al_3$ ,  $CeCoIn_5$ ,  $CeIr_{1-x}Co_xIn_5$  などの重い電子系の超伝導である。研究の進め方は有効質量が重く、電子相関の強い 2 次元的なフェルミ面を選別し、超伝導機構を Dyson-Gor'kov 方程式に基づいて計算するものである。その超伝導ギャップを定める準粒子間相互作用はカールン斥力から由来する相互作用を摂動展開し、3 次までの結果を用いるものである。申請論文では夫々の系で実験に一致する対称性の電子対とギャップ構造が得られた。転移温度も妥当な値が得られた。その際、2 次元性は重要な役割を果たしている。同時に有効質量が重い、電子相関の強いフェルミ面を取り出したことが計算を可能にし、機構を明らかにする上で重要であることを示している。

個々の系の計算結果について説明すると次のようになる。

$UPd_2Al_3$  に関しては反強磁性秩序が  $T_N=14K$  で起きることから、そのスピン波を介して引力が働くとする説が提案されていた。申請者はむしろ、銅酸化物高温超伝導体の超伝導機構である電子相関によるものとして、オンサイトカールン相互作用  $U$  の 3 次摂動理論に基づいて  $UPd_2Al_3$  の超伝導機構を研究した。六方晶形であるが、反強磁性秩序のため対称性が低下していることを考慮すると d-波の対称性をもつスピン一重項の超伝導であることが導かれる。これは核磁気共鳴のナイト・シフトの実験でスピン一重項であることが確認されているので、よく対応している結果である。

一方、同じ結晶構造を持つ  $UNi_2Al_3$  は反強磁性秩序ではなく小さな磁気モーメントを持つ不整合の秩序状態である。この場合、結晶構造は六方晶に近いとして良いと思われる。この場合に対しては p-波のスピン三重項の超伝導状態が導かれた。この系は石田憲二らの実験でスピン三重項の可能性が高いことが指摘されており、対応が良い。こうしてウラニウムを含む二つの系についてスピン一重項と三重項の超伝導が導かれる機構が明らかにされた。極めて興味ある結果である。

$CeCoIn_5$  など 2 次元的なセリウム系に関しては、同じ 3 次摂動で d-波の超伝導が導かれた。この系においては転移温度  $T_c$  で比熱の飛びが通常の超伝導体に比べて大きい、揺らぎ交換近似 (FLEX) を用いて反強磁性的な揺らぎが強い結果

として説明された。

以上の計算を通じて、重い電子はそもそもフェルミ液体論の準粒子であるので、フェルミ液体論から、如何にして Eliashberg 方程式を導くかが議論されている。f-電子系は局所的なクーロン相互作用が強いので、運動量に依存せず、周波数に依存した自己エネルギーのシフトを取り込み有効質量の重い電子系を導出する。超伝導は運動量依存性を通じて起きるのでそれを摂動計算によって取り扱うという戦略である。これは現実性のある有効な方法であり、上記のような重い電子系の超伝導理論が発展させられた背景として申請論文の重要な内容である。

### 論文審査の結果の要旨

重い電子系はフェルミ液体としての繰り込みが強く働いているため、エネルギースケールが2桁程度小さくなる。超伝導転移温度も低く 1K 程度である。このような系の超伝導をミクロに議論するという事は不可能に思われてきた。そのため、現象論で対称性を議論することが行われてきた。申請論文は、そのような現象論とは異なり、ミクロにハミルトニアンから超伝導転移温度を計算したところが画期的である。その際、転移温度はもとより、ギャップの対称性も決まり、超伝導の機構がミクロに決定できる点の本質的に重要である。それを可能にするためには有効質量の重い、異方的超伝導の引力の起源となる電子相関の強いフェルミ面を取り上げ、超伝導に有利なフェルミ面を考察した点が成功の鍵であった。そのため、2次元的なフェルミ面に着目した点も重要である。このようにして申請論文はこれまで不可能と思われた重い電子系の超伝導のミクロな理論の手本を示した点で重要な論文である。

さらに具体的に  $UPd_2Al_3$ ,  $UNi_2Al_3$ ,  $CeCoIn_5$ ,  $CeRhIn_5$ ,  $CeIrIn_5$  などスピン三重項、スピン一重項、d-波や p-波の対称性にわたって夫々の超伝導状態を摂動計算という普遍的な手法で導出した点で計算自体の信頼性が高いと考えられる。

さらに  $CeCoIn_5$  で謎とされてきた転移温度  $T_c$  の大きな比熱の飛びも反強磁性揺らぎの効果を考えれば説明できることが定量的に示された。

このように申請論文は超伝導理論の発展にとって大変重要な寄与をしたと考えられる。とりわけ、強相関電子系の超伝導理論の重い電子系への拡張、発展に寄与し、超伝導理論の発展を促すことになろう。

申請論文などをもとに学識等についても試問したが良好な結果であり、十分な知識と解析能力があると判断された。

以上の結果から、十分学位論文としての価値があると判断し、合格とした。