

氏名	たなかかずのり 田中 和 典
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2971号
学位授与の日付	平成18年3月23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	Theoretical Study on Superconductivity in Strongly-correlated Electron Systems (強相関電子系の超伝導に関する理論研究)
論文調査委員	(主査) 教授 山田耕作 教授 松田祐司 教授 前野悦輝

論文内容の要旨

銅酸化物高温超伝導の発見以来、電子相関の強い系における超伝導の研究が活発に行われている。本申請論文もこのような強相関電子系として CeMIn_5 ($M=\text{Co, Rh, Ir}$), PuCoGa_5 や有機超伝導体を例に挙げて、その超伝導機構とギャップの対称性、超伝導転移温度を理論的に解明したものである。

相関の強い電子系の超伝導は電子相関そのものによって生じると考えられる。相関の強い電子系では、同一格子点上の電子間のクーロン斥力が強く、等方的な s 波の超伝導は作ることができない。しかし、ギャップがフェルミ面上の場所によって符号を変える異方的な超伝導対は可能である。銅酸化物高温超伝導体、有機物超伝導体、 PuCoGa_5 , CeMIn_5 などはこのような超伝導であると考えられている。

まず、申請論文の前半部分に当たる CeMIn_5 の超伝導について述べる。このような重い電子系では超伝導転移に伴う比熱の跳びが電子の有効質量に比例し、重い電子そのものが超伝導に転移するとして考えることができる。この重い有効質量は電子間相互作用 U によって生じるものであり、 U に関する 4 次の摂動で導出できるであろう。この際、主たる役割を果たすのは相互作用の等方的な部分で、フェルミ面近くの電子の有効質量を一様に増大させる。この質量増大は繰り込み効果によって、フェルミ液体論で議論される準粒子のエネルギーを縮小する。この縮小によるエネルギー幅の減少がエネルギースケールを下げ、状態密度を上げ、比熱の増大に結びついているのである。この繰り込みは電子間相互作用に対しても準粒子のバンド幅と同じ縮小をもたらす。その結果、結合定数は状態密度と相互作用の積であるから繰り込みによらず一定である。

申請論文は 3 次元の繰り込まれた周期的 Anderson Hamiltonian を用いて CeMIn_5 の超伝導を理論的に議論したものである。具体的には繰り込み因子として $z=0.1$ の値を仮定し、繰り込まれたオンサイトクーロン相互作用を揺らぎ交換近似 (Fluctuation Exchange Approximation: FLEX) で取り扱い、超伝導のギャップの対称性と転移温度を決定したものである。d 波の $x^2=y^2$ の対称性を持つ電子対の状態が実現することが示された。これは磁場下の熱伝導率の磁場方向依存性の測定の結果とコンシステントな結果である。転移温度と有効質量に関して実験と一致する妥当な結果が得られた。

さらに申請論文は超伝導転移温度 T_c の圧力依存性を議論した。反強磁性揺らぎの強い低圧のところでは T_c がクーロン相互作用に関して弱く依存する。一方、繰り込み因子、 z は圧力で増大し、系のエネルギースケールを増大させ、 T_c をあげる。結局後者が支配的となる。さらに圧力をかけると電子相関が弱くなり、準粒子間の相互作用が弱くなり、 T_c の低下が急激となる。この結果、圧力とともに T_c は低下する。このように CeCoIn_5 では低圧の強結合の超伝導から、高圧の中間結合の超伝導に移行する。一方、 CeIrIn_5 では実験で超伝導ギャップと転移温度の比、 Δ/kT_c が一定であることが示され、圧力で z が増大するとともに、 T_c が増大する。

このように申請論文は等方的な繰り込み因子 z と異方的な準粒子間相互作用を導入することによって、重い電子系の超伝導の性質、さらに圧力変化を説明できる可能性があることを示した。

さらに申請論文では PuCoGa_5 の超伝導を 2 次元周期的 Anderson Hamiltonian に基づいて 3 次摂動を用いて議論した。

この系では有効質量の増大は小さく、3次摂動の計算で導出できるので、すべてを3次摂動の計算で行うことができる。バンド間にわたるf電子間のクーロン相互作用をも考慮することによって妥当な転移温度を得ることができた。結局、この系の転移温度が重い電子系に比べ一桁高いのは準粒子バンドのエネルギーが高いためである。

論文審査の結果の要旨

申請論文は重い電子系の超伝導の理論的取り扱いの一つの方法を提案したものと興味がある。通常、重い電子系の超伝導転移では従来の超伝導体に比べ100倍に近い比熱の跳びが観測される。それを説明するためには重い電子そのものが超伝導転移するとして記述しなければならない。申請論文は繰り込み因子 z を導入し、それを考慮した。その後、繰り込まれたオンサイトクーロン相互作用を持つ周期的 Anderson 模型を出発点として超伝導を導出した。こうすることによって、実験と比べて妥当な有効質量と転移温度を得ることができた。さらに申請論文は、超伝導転移温度 T_c の z と U に対する依存性を用いて T_c の圧力依存性を説明できることを示した。このことはこのような理論的取り扱いの有効性を示すものである。

さらに申請論文は PuCoGa_5 の超伝導も議論し、重い電子系と高温超伝導体の転移温度の違いが有効質量の違いに起因し、 PuCoGa_5 がちょうどそれらの系の間中に位置することを示している。以上の2編の論文では周期的 Anderson 模型が有効に利用されており、f電子間のクーロン相互作用が本質的な役割を果たすことを明瞭に示した点も興味ある結果である。

さらに有機超伝導体 $\kappa\text{BEDT-TTF}$ に対しては Hubbard 模型を用いて、d波の超伝導 (x^2-y^2 タイプ) を3次摂動で導き、磁場侵入長の圧力依存性を議論した。反強磁性に近い系では反強磁性揺らぎと超伝導揺らぎが強く、 T_c の直下では急速にギャップが発達するので磁場侵入長は急速に短くなる。一方、 $T=0$ 付近では反強磁性に近い系では有効質量が重く、磁場侵入長は短くなる。このとき、いわゆるバーテックス補正は大きな寄与をしないことがわかった。

以上の結果をまとめると、関連の強い電子系の超伝導を微視的なモデルで議論する時、申請論文は次の点が重要であることを示した。

1. 有効質量の繰り込み。これが低温の超伝導系のエネルギースケールを決定する。
2. オンサイトクーロン相互作用。これが超伝導の対称性を決め、結果として引力の大きさを決定する。

重い電子系では現象論に終始し、ミクロな理論がほとんどない現状において、その方向への1つの試みとして高く評価できる。理論を実験で具体的に検証することによって不一致点も明らかにされ、それはさらに理論の改良、発展に導くであろう。強相関電子系のミクロな超伝導の理論計算の出発点として、今後の理論の参考になると思われる。

論文内容に関する試問の結果から、申請者の学力および申請論文の内容は十分学位を授与するに相応しいものと判断した。