

氏 名	にし ぎき しゅう じ 西 崎 修 司
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2153 号
学位授与の日付	平 成 12 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	Specific Heat of the Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 (スピン・トリプレット超伝導体 Sr_2RuO_4 の比熱)
論文調査委員	(主 査) 助教授 前野悦輝 教 授 石黒武彦 教 授 Sigrist, Manfred (シーグリスト, マンフレッド)

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は層状超伝導体 Sr_2RuO_4 の比熱を 50 mK までの低温および 2 テスラ程度までの磁場中で測定した結果をもとに、その非従来型の超伝導状態の熱力学的性質を明らかにしたものである。その結果、スピン・トリプレット（三重項）超伝導に対する「軌道依存型超伝導」のモデルを拡張することで、観測された準粒子励起の温度・磁場依存性を定性的に説明できることを示したものである。また、磁場中で新しい超伝導相が誘起されることを熱力学的に初めて明らかにしている。以下に申請論文内容の要旨を章に沿って述べる。

（第 1 章）銅酸化物高温超伝導体と同じ結晶構造の Sr_2RuO_4 の超伝導は、1994 年に申請者も含めた広島大学のグループによって発見された。発見当初から非従来型の超伝導が発現していることが議論されていたが、理論的に P 波超伝導状態が実現している可能性が提言されたことから、その超伝導対称性を特定するための研究に関心が高まっていた。その後、核磁気共鳴のナイトシフトから、超伝導がスピン・トリプレットのクーパー対によって担われていることが確実になった。またその他の実験から時間反転対称性の破れた超伝導状態であることも有力になっており、理論的にも可能な波動関数の候補が絞られてきていた。しかしながら、準粒子励起に関する熱力学的性質の測定なしにその解釈は確定できないため、比熱の詳しい測定が待望されていたものであると位置付けている。

（第 2 章）非従来型超伝導は、不純物や格子欠陥の影響を強く受けるため、本質的な性質を明らかにするには、高純度・高品質の単結晶試料を用いることがきわめて重要である。また Sr_2RuO_4 の超伝導はその層状結晶構造を反映して強い異方性を持つため、磁場中の性質の研究には単結晶を用いることが必須である。申請者は浮遊帯域法（フローティング・ゾーン法）によって、 Sr_2RuO_4 の超伝導にとって本質的と考えられる転移温度 1.50 K を示す単結晶試料を育成する技術確立した。

（第 3 章） Sr_2RuO_4 の超伝導の擬 2 次元的な強い異方性のため、磁場中の性質を明らかにするには、その導電面に 1 度より十分小さな角度誤差で磁場を印加する必要がある。申請者はそのような条件を満たしつつ、希釈冷凍器温度までの低温で比熱を測るためのカロリメーターを開発した。そして、低温・磁場中で測定比熱に十分な確度と精度が得られることを示した上で、 Sr_2RuO_4 単結晶に磁場をかけて試料回転させた比熱データから、目的の磁場配向が得られることを示している。

（第 4 章）これまで最も有力とされてきたスピン・トリプレット状態が実現しているとする、超伝導転移温度での比熱のとりは常伝導状態の比熱で規格化すると 1.43 になること、また、十分低温で比熱は指数関数的にゼロになることが予想されていた。ところが本研究で明らかになったことは、とりは 0.76 に過ぎず、また、低温領域で比熱が温度の 2 乗に比例することである。この振る舞いは Sr_2RuO_4 の超伝導状態での状態密度が、フェルミ面上に超伝導ギャップがゼロの状態が線状にできている場合に近いことを意味する。しかしこのような線状ノードの存在はミューオン・スピン緩和の実験結果と相容れない。そこで、申請論文では、理論的に提唱されている「軌道依存型超伝導状態」のモデルを拡張して、超伝導ギャップに面内異方性が大きく、またその大きさがバンドごとに異なると考えることにより、実験データが定性的に説明できることを示している。

(第5章) 非従来型を反映して、超伝導は微量の不純物の影響を大きく受ける。本研究では不純物濃度によって転移温度の異なる単結晶の比熱を系統的に調べることににより、それらの結果が上で述べたモデルで矛盾なく説明できることを明らかにしている。

(第6章) 磁場中での比熱測定結果から、次の2つの重要な結論を引き出している。まず、導電面に平行に磁場をかけて低温で磁場を掃印したデータから、上部臨界磁場(1.5 テスラ)に加えて、それよりずっと低い特性磁場(0.15 テスラ)があることを明らかにした。この振る舞いはバンドごとの準粒子分散関係の違いに基づく、面間方向の超伝導コヒーレンス長の違いによって自然に説明することができる。つまり軌道依存型超伝導状態のモデルを支持する結果が得られたことになる。

次に、面平行磁場の低温・高磁場領域で、超伝導状態が2段階で起こることを発見した点である。理論的には面平行磁場のもとで、2段階転移、すなわち新たな超伝導相が誘起されることが予想されていた。申請者らは交流磁化率の測定からもそのような異常を検出していたが、本研究の比熱によって、熱力学的な変化を伴っていること、すなわち新たな相転移が起こっていることを指摘している。

(第7・8章) 以上の実験結果をもとに、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態は、エネルギーギャップにノードをもたないスピン・トリプレット状態で、超伝導ギャップが面内異方性をもち、バンドに依存した大きさをもつことを考慮する必要があると結論している。

論文審査の結果の要旨

申請論文は層状超伝導体 Sr_2RuO_4 の比熱を低温および方位制御された磁場中で測定した結果をもとに、その非従来型の超伝導状態の熱力学的性質を明らかにしたものである。また、磁場中で新しい超伝導相が誘起されることを熱力学的に初めて明らかにした点でもその意義は大きい。

そもそも Sr_2RuO_4 の超伝導は、当時大学院に進学したばかりの申請者を含む広島大学のグループが1994年に発見したものである。銅酸化物高温超伝導体と同じ結晶構造ながら、銅を含まない初めての超伝導体として注目された物質である。しかしながら、この物質の超伝導の真に重要な意義は、クーパー対の波動関数の対称性がスピン・トリプレット(三重項)であることが理論的に予言され、そして核磁気共鳴のナイトシフトによって実験的に証明されたことにある。スピン・トリプレット超伝導では、その波動関数の内部自由度のために、さまざまな状態が可能であるが、実際にどの状態が安定化しているかは、いろいろな実験によって確定する作業が必要となる。そのなかで最も基本的な役割を果たすのが、比熱による熱力学的状態の特定である。申請論文ではまさにそれを研究目的にして、必要な条件での比熱測定を行い、理論モデルとの比較・検討を行って、 Sr_2RuO_4 の超伝導状態に対する新たな知見を得るのに成功している。

非従来型の超伝導体の基本的な性質を実験的に明らかにするには、高品質の単結晶試料の存在が最も重要といっても過言ではないだろう。 Sr_2RuO_4 の研究の進展にもまさにこの点が重要であったが、その純良単結晶育成技術の確立に申請者の果たした寄与はきわめて大きい。

また本研究で開発されたカロリメーターは、磁場中で試料を回転することにより、印加磁場を試料結晶軸に対して0.05度の角度精度で方位制御して、0.1Kまでの低温での比熱測定を可能にしたものである。このような独創的な装置は世界的にもあまり例をみないもので、技術的にも非常に高い価値を持っている。

そして比熱の測定結果から、スピン・トリプレット(三重項)超伝導に対する「軌道依存型超伝導」のモデルを基本に、それを申請者独自の解析・検討に基づき拡張することで、観測された準粒子励起の温度・磁場依存性を定性的に説明できると結論している。さらに低温・強磁場領域で第2の超伝導相が誘起され、超伝導転移が2段階になることを熱力学的に初めて明らかにしたことも大きな成果である。本研究で超伝導状態に対する熱力学的な必要条件が明らかにされたことにより、今後スピン・トリプレット状態の波動関数の最終的な確定に向けて、理論モデルに対しても強い制約を課すことになると思われる。

このような重要な研究成果を盛り込んだ申請論文は、学位論文として十分価値があることを確認した。また、主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について申請者に口頭試問した結果、十分な学識を有することを確認し、合格と認めた。