

博士論文審査報告書

論文題目： 重い電子系超伝導体 CePt_3Si 、及び同一構造の LaPt_3Si における空間反転対称性の破れの効果の研究

申請者： 青木 義弘

1. 論文内容の要旨

近年超伝導が発見された重い電子系物質の CePt_3Si は、空間反転対称性を欠いた結晶構造を持つ上、常圧下で反強磁性と超伝導が共存するなど、その多彩な物性から注目を集めている。また、様々な実験から、フェルミ面上の一部でのエネルギーギャップの消失、及びスピン三重項電子対の存在が示唆されており、従来型の BCS 超伝導体ではないと考えられている。一方、空間反転対称性のない超伝導体ではスピン一重項と三重項の電子対の共存が可能であるが、そのような共存状態が実現しているかについては分かっていない。

この CePt_3Si では転移温度の異なる二段の超伝導転移がしばしば観察されるが、その原因が試料の不均一性によることは分かっているものの、より高い転移温度の相が現れるメカニズムについては明らかではなかった。申請者は、修士課程における研究で、試料内部に存在する圧力分布を仮定すればその振舞いを説明できることを提案していたが、最近、空間反転対称性を欠く結晶構造に乱れが生じた際に起きると予想される反強磁性の弱化、空間反転対称性の回復、及びスピン三重項超伝導の抑制に結びつけた説明が提案された。そこで、本研究ではその検証を目指し、高温側で転移する相を多く含む単結晶試料を用いた圧力下での交流/直流帯磁率の測定により、低圧では低温側と高温側で転移幅の広い超伝導転移を示しているにも拘わらず、反強磁性の消失する圧力付近では急峻な 1 つの転移となり、さらに加圧すると再び 2 つの転移を示すことを見出した。この振舞いは、高い転移温度の出現を空間反転対称性を欠く結晶構造の乱れに結びつける上記の 3 種の解釈では説明できないが、試料内部に存在する圧力分布を仮定すれば説明が可能であり、 CePt_3Si に見られる二段の超伝導転移は空間反転対称性の欠如と直接的な関連はないことが明らかになった。

一方、この CePt_3Si と BCS 超伝導体の間のジョセフソン効果において、ジョセフソン臨界電流の磁場依存性に特徴的な異方性が見られることが既に報告されていたが、その原因については、スピン一重項と三重項の電子対の共存の他、反強磁性やスピン三重項超伝導状態の影響などの可能性があった。そこで、空間反転対称性の欠如のみの影響を調べるため、 CePt_3Si と同じ結晶構造を持ち、反強磁性を示さず、従来型の BCS 超伝導体と考えられている LaPt_3Si を用いてジョセフソン効果を測定し、 LaPt_3Si でも CePt_3Si と同様の異方性が見られることを明らかにした。従って、両者が共通して示すジョセフソン効果の異方性は空間反転対称性の欠如を反映しているが、スピン一重項と三重項の電子対の共存に基づく理論では異方性を定性的には説明できるものの、外部磁場の正負の反転でジョセフソン効果の振舞いが大きく異なるという、空間反転対称性の破れを示唆する実験結果は

説明できない。この実験結果は、 LaPt_3Si の表面上で電子対の波動関数の位相が一様でないことを意味するので、位相の変動状況の情報を得るため、外部磁場の方向を変えて測定を行い、シミュレーションを通じて、その解釈を行った。また、 LaPt_3Si が BCS 超伝導体であった場合でも見かけ上の時間反転対称性の破れを引き起こす、磁束のトラップの影響を排除するため、微小な接合を作成して測定を行い、その特性に変化がないこと、即ち、時間反転対称性の破れを示唆する磁場特性が本質的なものであることを示した。現在ジョセフソン効果を総括的に説明する理論はないが、少なくとも LaPt_3Si を従来考えられていたような BCS 超伝導体と見なすことはできないことが明らかになった。

2. 論文審査結果

本論文は、空間反転対称性の欠如した結晶構造を持つ重い電子系超伝導体として注目を集めている CePt_3Si と同一構造の LaPt_3Si の示す特異な超伝導性を詳細に調べ、それが空間反転対称性の欠如によるものかを解明したものである。

まず、申請者は CePt_3Si でしばしば現れる 2 つの転移温度の相について、圧力下での振舞いを調べ、共存する反強磁性が消失する圧力付近で、2 つの転移が一致し 1 つの急峻な転移となることを見出した。また、2 つの転移温度が現れる現象を空間反転対称性の欠如に結びつける説明では、この結果を説明することはできないことを指摘し、2 段で生ずる超伝導転移は空間反転対称性の欠如と直接の関係はないことを示した。

また、 CePt_3Si で観察されていたジョセフソン効果の異方性が、これまで従来型の BCS 超伝導体と考えられていた LaPt_3Si でも同様に現れることを明らかにし、異方性の原因が空間反転対称性の欠如にあることを示した。また、時間反転対称性の破れを示唆する磁場特性が、本質的な性質であることを示した。

これらの成果は、結晶構造における空間反転対称性の欠如と超伝導性の関係を解明する上で、基本的な情報を与えている。特にジョセフソン効果の研究は、空間反転対称性の欠如した超伝導体特有の現象を検出可能なことを示した点で、同様の超伝導体への展開が期待できる有益な成果といえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。

また、平成 23 年 1 月 25 日、論文内容およびこれに関連する事項について試問を行った結果、合格と判定した。

主査： 住山 昭彦 印

副査： 小原 孝夫 印

小林 寿夫 印

稲田 佳彦 印

（岡山大学大学院教育学研究科、教授）