

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	ただ やすひろ 多田 靖啓
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 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 Noncentrosymmetric Systems (空間反転対称性のない系における超伝導に関する理論的研究)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 川上 則雄 教授 高橋 義朗 教授 藤本 聡 准教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士（理学）	氏名	多田 靖啓
論文題目	Theoretical Study on Superconductivity in Noncentrosymmetric Systems （空間反転対称性のない系における超伝導に関する理論的研究）		
(論文内容の要旨)			
空間反転対称性のない系における超伝導は、反転対称性の欠如に起因したスピン軌道相互作用のために、様々な新奇な性質を示すことが期待されている。本論文では、そのような系の代表的物質であるCe(Rh/Ir)Si₃とSr₂RuO₄の界面近傍に関して理論的研究を行っている。それぞれの系に関して、特に、超伝導の強結合性やトポロジカルな性質について解析がなされている。 Ce(Rh/Ir)Si₃においては、実験的に反強磁性（AF）量子臨界点（QCP）の存在が示唆されており、これと超伝導の関係や、そこにおける空間反転対称性の欠如の効果を理解することが重要である。本論文では現実的なフェルミ面をもつようなモデルを用いて、微視的・半現象論的な2つの立場からCe(Rh/Ir)Si₃の諸物性を研究している。まず、常伝導状態における電気抵抗の温度依存性を議論し、それが3次元AFスピン揺らぎで理解できることを確認している。次に、磁場中超伝導を考える準備として、スピン揺らぎの磁場依存性について解析を行い、スピン揺らぎが磁場に対して強固であることを明らかにしている。さらに弱結合近似の範囲で超伝導ギャップの対称性についても議論を行い、Ce(Rh/Ir)Si₃に対してab面内に水平なラインノードをもつ超伝導状態を提案している。 以上のことを踏まえた上で、本論文では、Ce(Rh/Ir)Si₃の超伝導の強結合性に関して議論を行っている。特に、実験で観測されている特徴的な上部臨界磁場H_{c2}が、AF QCPや空間反転対称性の欠如とどのように関連しているかに焦点を当てている。異方的超伝導のH_{c2}について、強結合性まで考慮して微視的な立場から計算したものは、おそらく本論文が初めてである。そのような計算のために本論文では、一般的な状況においてH_{c2}を計算するための定式化を行い、それを用いてCe(Rh/Ir)Si₃のH_{c2}の解析を行っている。まず縦磁場の場合に、H_{c2}が圧力に対して敏感でありその値が巨大であることや、H_{c2}曲線が強い上凸性を示すことなどの実験結果を半定量的に説明している。そして、そのような振る舞いが得られた物理的理由として、反転対称性の欠如によって系が軌道極限にあることと、強結合性が低温にゆくほど顕著になることの2つの要因があることを明らかにした。この意味において、Ce(Rh/Ir)Si₃の縦磁場H_{c2}は反転対称性の欠如と量子臨界性のinterplayであるということを強調している。このようにして本論文は、Ce(Rh/Ir)Si₃における超伝導がAFスピン揺らぎによって引き起こされているということを理論的に示している。また横磁場に関しても同様の解析を行い、実験結果を説明するとともにFulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov状態の実現可能性についても議論している。 Sr₂RuO₄の(001)界面近傍における超伝導に関しては、界面近傍における空間反転対称性の欠如がペアリング対称性にどのように影響するのかという問題とZ₂トポロジカル超伝導の実現可能性について議論している。本論文では、ペアリング相互作用を3次まで摂動計算することにより、様々な対称性について転移温度を見積もり、シングレットとトリプレットの強く混成したd+p波状態が安定化しうることを示している。この超伝導状態は反転対称性の欠如からくるスピン軌道相互作用によってdベクトルの向きが決まっているため時間反転対称性があり、Sr₂RuO₄バルクでの時間反転対称性の破れた状態とは異なる。前者はZ₂のトポロジカル数で特徴付けられるトポロジカル超伝導状態であり、スピン軌道相互作用の大きさや表面・界面の電子状態などの条件が合えば、そのような状態がSr₂RuO₄の(001)界面で実現しうることを指摘している。			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文で、多田氏は近年実験的にも理論的にも注目を集めている空間反転対称性のない系における超伝導の理論解析を行っている。特に、この代表的物質とされているCe(Rh/Ir)Si₃における非従来型超伝導とSr₂RuO₄の界面近傍で期待されるトポロジカル超伝導に関する研究を行っている。本研究で得られた理論的な結果は、量子臨界点近傍にある超伝導の基礎に関わる重要なものとして高く評価される。

多田氏は、まずCe(Rh/Ir)Si₃に注目し実験的に示唆されている反強磁性量子臨界点の存在と空間反転対称性の欠如がこの系の超伝導に本質的であることを明らかにしている。このことを示すため、常伝導状態における異常な抵抗の温度依存性が3次元反強磁性スピン揺らぎで理解できることをまず確かめ、さらに超伝導ギャップの対称性について弱結合近似に基づく解析によりラインノードを持つクーパーペアが可能であることを指摘している。これらの考察に基づき、Ce(Rh/Ir)Si₃の超伝導に対する強結合効果を明らかにしている。中でも、Ce(Rh/Ir)Si₃の実験で観測されている上部臨界磁場H_{c2}の異常な振る舞いが、反強磁性臨界ゆらぎと空間反転対称性の欠如に起因するものであることを明らかにしている。縦磁場の場合にはH_{c2}が圧力に対して敏感であること、さらにその値が巨大であることや、H_{c2}曲線が強い上凸依存性を示すことなどの実験結果を理論的に解明している。このような異常な臨界磁場H_{c2}の振る舞いには反転対称性の欠如と量子臨界性が本質的であることを明らかにしている。このように本論文において、Ce(Rh/Ir)Si₃における超伝導が反強磁性ゆらぎによって引き起こされているということを理論的に明確にした点は高く評価される。また横磁場に関しても同様の解析を行い、実験結果をうまく説明している。以上のように、強結合性を考慮して異方的超伝導の上部臨界磁場を微視的に計算したものはこれまでほとんどなく、多田氏のオリジナルな成果として高く評価される。

もう一つの主要テーマであるSr₂RuO₄の(001)界面での超伝導に関して得られた結果も面白い。特に、界面近傍では空間反転対称性が欠如することに注目し、この効果が生み出す超伝導の対称性について詳細な解析を行い、さらにこの系でのZ₂トポロジカル超伝導の実現可能性を指摘している。シングレットとトリップレットが混成したd+p波状態のZ₂トポロジカル超伝導状態が実現しうることを示している。この超伝導状態はバルクなSr₂RuO₄での超伝導状態とは異なる新奇なものであり、物質合成などの条件が合えば、そのような状態がSr₂RuO₄の(001)界面で実現しうることを指摘している。

このように、本論文は空間反転対称性の欠如した相関電子系の超伝導の性質を明らかにしたものである。この成果は空間反転対称性の欠如した電子系のみならず、量子臨界点近傍にある超伝導の基礎を与える研究として高く評価される。博士論文公聴会においても、多田氏は入念に準備された明快な発表を行い、基本的な質問や専門的な質問にも丁寧に答え、高い学識を有していることをアピールした。よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年12月24日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降