

博士論文概要

論文題目

強相関電子系における多軌道超伝導の理論
Theory of multi-orbital superconductivity in
strongly correlated electron systems

申請者

増田	啓介
Keisuke	MASUDA

物理学及応用物理学専攻 低温量子物性研究

2013年7月

(受理申請する部科主任会開催年月を記入)

2008年2月、鉄とニクトゲンを含む新たな高温超伝導体（以下、鉄系超伝導体）が発見された。磁性と超伝導はしばしば水と油に例えられる関係にあるため、磁性物質の典型である鉄の化合物が比較的高温で超伝導転移を示したという事実に多くの物理学者が驚嘆した、また、1986年の銅酸化物高温超伝導体以来約20年ぶりの大発見に、我々物性物理学に携わる多くの者が室温超伝導への期待をより一層強くしたことも言うまでもない。発見から今日まで約5年半の月日が経過したが、これまでに理論、実験両側面からこの系に対する様々な研究がなされ、多くの事実が明らかにされてきた。

鉄系超伝導体の特徴としてまず第一に挙げられるのは、本論文のタイトルにもある通り、この超伝導体が「多軌道性を有している」ということである。“多軌道性を有する”とは、この系を記述する際、“複数の原子軌道を考慮に入れる必要がある”ということの意味している。鉄系超伝導体に特有の“多バンド構造”や“非連結 Fermi 面”は、この「多軌道性」に由来している。通常、単元素金属で発現する単純な超伝導では、このような多軌道性が重要となることは少ない。というのも、このような単純な超伝導体では、結晶場の効果によって各軌道のエネルギー準位が分裂しており、Fermi 準位近傍の電子状態は主に1つの原子軌道のみによって決定されることが多いからである。一方の鉄系超伝導体では、鉄原子を取り囲むニクトゲンが特殊な正四面体構造を取っているため、先の結晶場分裂の大きさが極めて小さい。そしてその結果、鉄の3d軌道全てがFermi準位近傍の電子状態に寄与を及ぼしているのである。

しかし、このような多軌道性が重要となるのは鉄系超伝導体だけではない。鉄系超伝導体と同じく強相関電子系に属する「重い電子系」もまた、多軌道性が重要となる物質群である。重い電子系は、伝導軌道に属し遍歴性が高い電子（伝導電子）とf軌道に属し局在性が高い電子（f電子）の混成によって特徴付けられる。これら2種類の電子が相互作用することで、この系では、近藤効果や磁気秩序をはじめとして非常に多彩な物理現象が発現する。多種多様な超伝導もその1つであり、1979年のCeCu₂Si₂を皮切りに、これまでに30種類を超える物質において超伝導転移が観測されてきた。これらの重い電子系超伝導体に対して理解を深めることは、多軌道性と超伝導の関係を明らかにする上で非常に重要なプロセスであると言える。

本博士論文では、上に述べたような強相関電子系の多軌道超伝導について理論的考察を行う。我々は本論文を通じて、超伝導発現機構と関係の深いペアリング対称性に着目し議論を進めていく。

まず本論文の第2章では、超伝導の基礎理論であるBCS理論について概説を行う。本論文の対象は多軌道系の超伝導であるが、最初に1軌道系の超伝導について述べておく方がその後の議論が円滑に進むものと思われる。そこでこの章では1軌道超伝導の基礎理論であるBCS理論の要点を簡潔に説明する。その際、後の

議論で重要となる「超伝導ギャップ」や「ペアリング対称性」といった概念についても説明を行う。また BCS 理論の応用として、我々は「コヒーレンス効果」と呼ばれる現象についても議論を行う。これは後の第 3 章で、このような 1 軌道の場合のコヒーレンス効果を多軌道の場合に拡張するためである。

第 3 章では、鉄系超伝導体の“ペアリング対称性を決定する実験”について議論する。先に「非連結 Fermi 面」という形で述べたように、この系の Fermi 面は、多軌道性のために、ホール面と電子面という 2 つの Fermi 面によって構成されている。そして超伝導転移した際には、これらの Fermi 面それぞれに超伝導ギャップが開く。この系に関して発見当初から議論となっている点は、このような複数の超伝導ギャップが波数空間でどのような対称性（ペアリング対称性）を持っているかという問題である。特に、ホール面に開く超伝導ギャップと電子面に開く超伝導ギャップの位相差がその争点とされてきた。鉄系超伝導体の発見当初、Mazin 及び Kuroki らによって発表された理論では、“ホール面に開くギャップと電子面に開くギャップの符号が反転している”いわゆる s_{+-} 波対称性が有望視された。このようにして提案された s_{+-} 波対称性は、「核磁気緩和実験でコヒーレンスピークが観測されないこと」、また「非弾性中性子散乱実験で共鳴的ピークが観測されること」とコンシステントであったため、一躍、この物質のペアリング対称性の最有力候補となった。しかし、この系が発見されてから 1 年後の 2009 年、Onari と Kontani によって s_{+-} 波対称性とは異なるペアリング対称性が提唱された。それが、“ホール面と電子面のギャップが符号反転していない”いわゆる s_{++} 波対称性と呼ばれる対称性である。ギャップに符号反転がある s_{+-} 波対称性に比べると、この s_{++} 波対称性は極めて不純物に強い。鉄系超伝導体のいくつかの系では超伝導が不純物に対して強いことが確認されており、このような性質が s_{++} 波対称性と符合していると彼らは主張した。また上に述べた核磁気緩和及び中性子散乱の実験結果も、 s_{++} 波対称性に準粒子寿命の延長効果を取り入れることで説明可能であることが示された。理論研究がこのように発展してきた一方で、超伝導ギャップの位相を実験的に決定することは極めて難しく、発見から 5 年半が経った現在でもこの系のペアリング対称性は同定されていない。我々はこのような経緯を踏まえ、鉄系超伝導体のペアリング対称性を同定する実験を理論の立場から提案する。我々は BCS 理論において知られるコヒーレンス効果に着目し、両ペアリング対称性に関し応答関数の計算を行う。その結果、 s_{+-} 波対称性と s_{++} 波対称性では応答関数が定性的に異なる温度依存性を持つことが明らかとなった。我々はこのことを逆に利用し、応答関数を中性子散乱実験で測定することによって鉄系超伝導体のペアリング対称性が決定されうることを提案する。

続く第 4 章では、重い電子系における非従来型 s 波超伝導について議論を行う。従来、重い電子系では、f 電子間に強い Coulomb 斥力が働くため、電子が隣り合うサイト間で Cooper 対を組む d 波超伝導が発現しやすいものと考えられてきた。

実際,多くの重い電子系物質で d 波超伝導を示唆する実験結果が見出されている. その一方重い電子系には,1つのサイト内で電子が Cooper 対を組む s 波超伝導を示す物質も存在する. CeRu_2 や CeCo_2 はそのような物質であり,核磁気緩和および光電子分光の実験結果は s 波超伝導の発現を明確に示唆している. 通常このような s 波超伝導は,BCS 理論において用いられる電子格子相互作用を用いて説明される. しかしこれらの物質では電子格子相互作用の存在を示唆する明確な実験結果は存在しない. このような経緯を受け,我々は「f 電子間の Coulomb 斥力のみから s 波超伝導が発現しうるか」という問いに焦点を当てた. 我々のアイデアは,これまでほとんどの先行研究で考慮されてこなかった伝導電子と f 電子によって形成される軌道間 Cooper 対 (c-f Cooper 対) を考慮する点にある. 周期 Anderson 模型に基づく計算の結果,我々は重い電子系の広いパラメタ領域で s 波超伝導が発現しうることを明らかにした. 我々が提唱するこのような s 波超伝導は,従来の電子格子相互作用ではなく,重い電子系の多軌道性と f 電子間斥力によって誘起されているという意味で「非従来型の s 波超伝導」であると結論付けられる.

最終章である第 5 章にて,本論文全体のまとめを行い,今後の展開,展望について述べる.

早稲田大学 博士 (理学) 学位申請 研究業績書

氏名 増田 啓介 印

(2013 年 6 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者 (申請者含む)
論文	○ 「Coherence effect in a two-band superconductor: Application to iron pnictides」 , 『Journal of the Physical Society of Japan』 , The Physical Society of Japan, Vol. 79, 074710 (2010). 2010 年 5 月発行、 <u>Keisuke Masuda</u> and Susumu Kurihara
論文	「多バンド超伝導体におけるコヒーレンス効果」 『物性研究』、物性研究刊行会、96-6 号、pp.716-752 (2011). 2011 年 9 月発行、 <u>増田啓介</u>
論文	○ 「Cooper Pairing of Fermions with Unequal Masses in Heavy-Fermion Systems」 , 『Physical Review B』 , American Physical Society, Vol. 87, 014516 (2013). 2013 年 1 月発行、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
論文 (国際会議 プロシー ディング ス)	「Coherence effect in multiband superconductors: A suggestion of an experiment to determine the correct symmetry of the order parameter」 , 『Journal of Physics: Conference Series』 , IOP Publishing Ltd, Vol. 273, 012099 (2011). 2011 年 2 月発行、 <u>Keisuke Masuda</u> and Susumu Kurihara
論文 (国際会議 プロシー ディング ス)	「Cooper Pairing of Fermions with Unequal Masses in Heavy-Fermion Systems」 , 『Journal of the Physical Society of Japan』 , The Physical Society of Japan, Vol. 81, SB010 (2012). 2012 年 12 月発行、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
論文 (国際会議 プロシー ディング ス)	「Cooper pairing between conduction and localized electrons in heavy-fermion systems」 , 『The Journal of the Korean Physical Society』 , The Korean Physical Society 2013 年発行決定済み、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
講演 (国際会 議)	「Coherence Effect in Multiband Systems」 , 『Ultracold Fermi gas: Superfluidity and Strong Correlation (USS-2010)』 , P3, Tokyo, Japan 2010 年 5 月発表、 <u>Keisuke Masuda</u> and Susumu Kurihara

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 （国際会議）	「Coherence effect in multiband superconductors: A suggestion of an experiment to determine the correct symmetry of the order parameter」, 『The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2010)』, M036, Santa Fe, USA 2010年6月発表、 <u>Keisuke Masuda</u> and Susumu Kurihara
講演 （国際会議）	「Cooper Pairing of Fermions with Unequal Masses in Heavy-Fermion Systems」, 『International workshop on heavy fermions TOKIMEKI 2011』, 24-SO-4, Osaka University 2011年11月発表、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
講演 （国際会議）	「Cooper pairing between conduction and localized electrons in heavy-fermion systems」, 『The 19 th International Conference on Magnetism (ICM2012)』, SB23, Busan, Korea 2012年7月発表、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
講演 （国際会議）	「Interorbital Cooper pairing with s-wave symmetry in heavy-fermion systems」, 『The International Conference on Strongly Correlated Electron Systems (SCES 2013)』, A_407, Tokyo, Japan 2013年8月発表決定済み、 <u>Keisuke Masuda</u> and Daisuke Yamamoto
講演 （国内会議）	「マルチバンド超伝導体のコヒーレンス効果：超伝導ギャップの対称性を決定する実験の提案」 『日本物理学会 第65回年次大会』、21pGH-7、岡山大学 2010年3月発表、 <u>増田啓介</u> , 栗原進
講演 （国内会議）	「f電子系における軌道間ペアリング超伝導」 『日本物理学会 2011年秋季大会』、22pGB-6、富山大学 2011年9月発表、 <u>増田啓介</u> , 栗原進
講演 （国内会議）	「重い電子系におけるs波超伝導」 『日本物理学会 2012年秋季大会』、20pGB-2、横浜国立大学 2012年9月発表、 <u>増田啓介</u> , 山本大輔
講演 （国内会議）	「周期アンダーソン模型における軌道間ペアリング超伝導と反強磁性」 『日本物理学会 第68回年次大会』、28pXZE-6、広島大学 2013年3月発表、 <u>増田啓介</u> , 山本大輔

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）