

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400360

研究課題名(和文)多成分、多バンド超伝導、超流動体における新奇物質相の理論的探求

研究課題名(英文)Theoretical investigation for exotic phases in superconductors and superfluids with multiple components and multiple bands

研究代表者

町田 一成 (Machida, Kazushige)

立命館大学・理工学部・非常勤講師

研究者番号：50025491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：幾つかの興味深い超伝導体を取り上げて新奇物質相の探求を理論的に遂行した。重い電子系超伝導体の中からCeCu₂Si₂, UPd₂Al₃, (U,Th)Be₁₃を、また2次元性の高いカイラル超伝導体の候補物質として知られるSr₂RuO₄を実験グループとの共同作業の中で考察した。更には鉄系超伝導体FeSeやトポロジカル超伝導体の候補物質であるSrBi₂Se₃についても研究を拡大した。これらの超伝導体を実現している対関数の対称性についての可能性の絞り込みに取り組み幾つかの物質ではその同定に成功した。各物質に対して行われた角度分解比熱測定の実験データの解析法の確立に努めた。

研究成果の概要(英文)：Several exotic superconductors, including CeCu₂Si₂, UPd₂Al₃, (U,Th)Be₁₃ for typical heavy Fermion superconducting materials and highly two-dimensional Sr₂RuO₄ known for chiral triplet superconductor candidate are investigated theoretically in collaboration with experimental groups. In addition to it, we also studies FeSe among iron pnictide superconductors and SrBi₂Se₃ for topological material candidates. We have succeeded in identifying possible pairing symmetries realized in some of those materials, which are fully consistent with the experimental data of angle-resolved specific heat measurements done by collaborating experimental groups.

研究分野：物性理論

キーワード：重い電子系 超伝導 対関数

1. 研究開始当初の背景

1980年代に相次いで発見された第一世代の重い電子系超伝導体 $CeCu_2Si_2$, UBe_{13} , UPt_3 , URu_2Si_2 は当初からその超伝導の性質がそれまで知られていた従来型の超伝導体とは全く異なった様相を呈していた。その故に注目を集め多くの研究が以来積み重ねられてきた。同時期に発見された有機超伝導体やその後の銅酸化物高温超伝導体と共に強相関電子系に発現する非従来型の超伝導体として大きな研究の潮流をここ30年以上にもわたって形成してきた。しかしながらそのクーパ対の対称性やギャップ構造の同定には未だ決定的な定説の確立には至っていない。況や対形成機構の解明も不十分な状況である。一方で実験手段の改良は確実に進歩しており、それに呼応した微視的な立場からの超伝導理論も発展した。こうした状況に鑑み、ここで改めて第一世代の物質群を取り上げ対の対称性とギャップ構造の決定に取り組んだ。

2. 研究の目的

第一世代の重い電子系超伝導体の中で $CeCu_2Si_2$ については既に筆者等の最近の研究によってフルギャップ構造の超伝導であることが確定した。これは強相関電子系であるからといってギャップノードの存在が保証されているわけではないことを明確にしたものである。従ってその他の上記の超伝導体にあっても個々に詳しく実験、理論を推進していく必要がある。この具体例の一つとして UBe_{13} とその Th ドープ系を取り上げてその対称性と超伝導2段転移の解明を研究目標とした。併せて Sr_2RuO_4 の対称性についても2段転移の可能性を含めて実験グループとの緊密な連携の下で研究を進めた。

3. 研究の方法

上述の目標を達成するにはしっかりとした基礎に立脚した理論展開が必須である。筆者等の進めてきた準古典 Eilenberger 方程式の解析的、数値的な解法に基づく理論的な枠組みはこれにとって最適である。この方法はフェルミ波数と相関長の積が十分に大きな場合に有効な理論形式である。上の物質群はいずれもこの条件を満足しているので得られた計算結果は実験データの解釈に適用することができる。またこの理論形式を補うために現象論的な Ginzburg-Landau 理論や群論による対称性の分類等を用いた。

4. 研究成果

(1) UBe_{13}

上述のように重い電子系超伝導体 $CeCu_2Si_2$ がフルギャップ構造であることが判明し、強相関電子系に出現する超伝導にノードの存在が保証されなくなった。これは s 波的なオ

ンサイト対が強相関系では許されないという「通念」を打ち破るものである。対形成機構を考える上で大きなインパクトを与えた。この考えを更に進めるために、もう一つの代表物質である UBe_{13} を取り上げた。これは共同研究者である実験グループが純良単結晶の作成に成功したことが大きな動機づけとなっている。この単結晶試料を用いて結晶軸方位を選択しながら角度分解比熱測定実験を行い、その理論解析を遂行した。その結果磁場中比熱に Volovik 効果が見られずゼロエネルギー状態密度は磁場線形であった。これは系にノードが存在せずフルギャップであることを直接的に証拠立てている。上部臨界磁場 H_{c2} に方位依存性は少なく等方的な超伝導である。低温において H_{c2} は強く抑制されていてパウリ常磁性効果が見られるが、一方で期待される一次転移は起きていないことがわかった。これは電子バンド構造の多バンド性に起因していると理解することができた。

(2) $(U_{0.97}Th_{0.03})Be_{13}$

Th3%ドープ系は超伝導2段転移を示す特異な系として UPt_3 と並んで以前から知られている。しかし従来の実験のほとんどが多結晶試料を用いて行われてきたので詳しい性質は未解明であった。単結晶育成に共同研究者が成功し、それを用いた角度分解比熱測定並びに磁化測定を遂行しその理論的な解析に従事した。その結果以下のことが判明した。2段転移の原因は2つの超伝導状態間の相転移現象である。低温相はノードレスである。磁場下で2つの転移線は交差しない。H-T 相図は磁場方位にほとんど依らない。角度分解比熱実験によると高温相と低温相は異なる磁場方位依存性を示し、両者のギャップ構造は異なる。これらの新たな実験的な知見と従来から知られている実験事実を基にして可能な対の対称性の絞り込みを実行した。最も可能性の高い状態として立方結晶下での2次元既約表現 E_u に属するスピン3重項状態を指摘した。この縮退した状態が Th ドープ系下での対称性の低下に伴って分裂して2段転移が生じたと考えられることができる。高温相は二軸性の nematic 状態、低温相はサイクリック p 波状態である。同時に UBe_{13} は一軸性の nematic 状態であることも同定できた。これはフルギャップ構造をしている。同定した状態は既存の実験と無矛盾であるが、これらは改めて検証する必要がある将来の課題である。

(3) Sr_2RuO_4

カイラル p 波状態の実現している系と目されているこの物質の対称性の検証を行った。一連の実験とその解析からこの系はスピン一重項状態で理解可能であることを立証した。その根拠は以下の通りである。 H_{c2} の異方性20は見かけの値で中性子実験からこの系の真の異方性は60である。これは転移点近傍の H_{c2} のスロープ比と一致している。従って

面内の H_{c2} はパウリ効果によって強く抑制されている。実際低温において H_{c2} での一次転移が比熱測定並びに磁化測定において観測された。両者共々ノーマル状態の約 10% 程度の準粒子状態密度が転移点でジャンプする。即ち超伝導状態ではパウリ磁化率は減少している。これは広く信じられている核磁気実験によるナイトシフト実験と矛盾する。どちらが正しいかは今後の重要な検討課題である。このシングレット説を更に発展させる研究を行った。新たに育成した純良単結晶を用いて角度分解比熱測定を遂行した。従前より更に低温での測定を行い振動パターンの符号反転の存否を検証した。60mK に至るまで反転は存在せず、従って縦ノードの可能性は否定された。その実験事実に基づいて、理論計算を様々なギャップ構造を考えながら実行して最も矛盾のないノード構造は水平ラインノードであることを突き止めた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 12 件)

1. K. Machida,

Spin triplet nematic pairing symmetry and superconducting double transition in $U_{1-x}Th_xBe_{13}$

J. Phys. Soc. Jpn. 87, 2018, 033703 1-4. 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ87.033703

2. Y. Sun, S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, K. Irie, T. Nomoto, K. Machida, J. Chen, and T. Tamegai,

Gap structure of FeSe determined by angle-resolved specific heat measurements in applied rotating magnetic field,

Phys. Rev. B 96, 2017, 220505 1-5, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB96.220505

3. Y. Shimizu, S. Kittaka, S. Nakamura, T. Sakakibara, D. Aoki, Y. Homma, A. Nakamura, and K. Machida,

Quasiparticle excitations and evidence for superconducting double transitions in monocrystalline $U_{0.97}Th_{0.03}Be_{13}$

Phys. Rev. B 96, 2017, 100505 1-5, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB96.100505

4. T. Sakakibara, S. Kittaka, and K. Machida,

Angle-resolved heat capacity of heavy Fermion superconductors,

Report Prog. Phys. 79, 2016 094002 1-19 査読有

DOI: 10.1088/0034-4885/79/9/094002

5. Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida,

Nodal gap detection through polar angle-resolved density of states

measurements in uniaxial superconductors,

Phys. Rev. B 94, 2016, 224503 1-9, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB94.224503

6. S. Kittaka, Y. Aoki, Y. Shimura, T. Sakakibara, S. Seiro, C. Geibel, F. Steglich, Y. Tsutsumi, H. Ikeda, and K. Machida,

Thermodynamic study of gap structure and pair-breaking effect by magnetic field in the heavy-fermion superconductor $CeCu_2Si_2$

Phys. Rev. B 94, 2016, 054514 1-9, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevB94.054514

7. Y. Shimizu, S. Kittaka, T. Sakakibara, Y. Tsutsumi, H. Ikeda, K. Machida, Y. Homma, and D. Aoki,

Omnidirectional measurements of angle-resolved heat capacity for complete detection of superconducting gap structure in the heavy-Fermion antiferromagnet UPd_2Al_3

Phys. Rev. Lett. 117, 2016, 037001 1-5, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.037001

8. S. Kittaka, Y. Shimizu, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, Y. Onuki, Y. Tsutsumi, T. Nomoto, H. Ikeda, and K. Machida,

Evidence for chiral d-wave superconductivity in URu_2Si_2 from the field-angle variation of its specific heat

J. Phys. Soc. Jpn. 85, 2016, 033704 1-4. 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ85.033704

9. T. Mizushima, Y. Tsutsumi, T. Kawakami, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida,

Symmetry-protected topological superfluids and superconductors-From the basics to 3He -

J. Phys. Soc. Jpn. 85, 2016, 022001 1-74. 査読有

DOI: 10.7566/JPSJ85.022001

10. N. Nakai and K. Machida,

Interplay between effective mass anisotropy and Pauli paramagnetic effects in a multiband superconductor: Application to Sr_2RuO_4

Phys. Rev. B 92, 2015, 054505 1-12, 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevB92.054505

11. Y. Shimizu, S. Kittaka, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, H. Amitsuka, Y. Tsutsumi, and K. Machida,

Field-orientation dependence of low-energy quasiparticle excitations in the heavy-electron superconductor UBe_{13}

Phys. Rev. Lett. 114, 2015, 147002 1-6, 査読有

DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.147002

12. Y. Tsutsumi, K. Machida, and M. Ichioka,

Hidden crossover phenomena in strongly
Pauli-limited multiband superconductors:
Application to CeCu₂Si₂
Phys. Rev. B 92, 2015, 020502(R) 1-5, 査読
有
DOI: 10.1103/PhysRevB92.020502

6 . 研究組織

(1)研究代表者

町田 一成 (MACHIDA, Kazushige)

立命館大学・理工学部・非常勤講師

研究者番号 : 50025491