

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2014

課題番号：21340103

研究課題名(和文)フェルミ並びにボーズ粒子超流動体の新しい秩序相の探求

研究課題名(英文)Theoretical investigations for novel ordered states in Fermion and Boson superfluids

研究代表者

町田 一成 (Machida, Kazushige)

岡山大学・自然科学研究科・名誉教授

研究者番号：50025491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：フェルミ並びにボーズ粒子超流動体に対しての新しい秩序相を探る理論的な研究を遂行した。フェルミ粒子系については超伝導体の磁場下で研究を中心にして、重い電子系物質CeCu₂Si₂、UPt₃、UBe₁₃の対関数の対称性の同定を実験グループとの共同研究を行い遂行した。これらの超伝導体についてこの課題の下で対関数の絞り込みに成功した。特にCeCu₂Si₂については従来のd波対称性説を否定することが出来、新たな対称性として多バンドフルギャップ状態であることを明らかにした。ボーズ粒子系については中性原子気体において人工ゲージ場を導入することによってスカーミオン状態が安定に存在できる可能性を見出した。

研究成果の概要(英文)：We have theoretically investigated novel superfluid states in Fermion and Boson systems. As for the fermions, we study superconducting states under applied magnetic fields and identify the pairing functions for the three heavy fermion materials: CeCu₂Si₂, UPt₃ and UBe₁₃ in collaboration with experimental groups. We have succeeded in determining the pairing symmetries for each material and new identification of full gapped multi bands for CeCu₂Si₂. As for the bosons, we find the stable skyrmion states by introducing an artificial gauge potential.

研究分野：物理学

キーワード：超伝導体 超流動 中性原子気体

1. 研究開始当初の背景

強相関電子系の示す超伝導状態はしばしば非従来型のクーパ対の対称性を有することが知られている。U、Ce 原子を含む重い電子系超伝導体はその典型例となっている。1980 年前後に CeCu₂Si₂ を筆頭に UBe₁₃、UPt₃ の 3 つの物質が相次いで発見され盛んに理論実験の両面から研究が重ねられて来た。当該課題の申請時においてはそれらの研究は飽和してこれ以上の新しい知見は得られないのではないかと危惧される面もあった。しかし一方で CeCoIn₅ を始めとして MgB₂ や鉄系超伝導体等の新物質の発見が相次ぎ、そこでの知見がフィードバックされて重い電子系超伝導体の分野の新たな展開が予感された。実際 1986 年に発見されて銅酸化物高温超伝導体研究の影響は大きく強相関電子系研究を現在に至まで牽引している。こうした研究の潮流の中でこの 30 年間に蓄積され発展した理論的実験的な研究手法をいま一度根底から見直し精密化された分光学的な手段を駆使して古くからの重い電子系超伝導体 CeCu₂Si₂、UBe₁₃、UPt₃ を捉え返してみようというのが当該研究課題の基本的な視点である。

2. 研究の目的

以上のような背景の下で重い電子系超伝導体の典型物質である CeCu₂Si₂、UBe₁₃、UPt₃ の超伝導対称性を改めて見直して最終的に各物質の対称性を決定することを目標とした。(1) CeCu₂Si₂ はラインノードをもった d 波対称性が定説となっていたが、その可否を再検討することを目的とした。(2) UPt₃ については数少ないスピン三重項超伝導体であるがそのギャップ構造については未確定である。新たな実験を提案する中でその詳細を突き止めることを目標とした。(3) UBe₁₃ についてはスピン三重項か一重項かということを含めてギャップの対称性を決める中で総合的な理解を追求する。それらの物質に加えて Sr₂RuO₄ も視野に入れた。この物質はカイラル p 波と目された系であるが、基本に立ち返ってその対称性を実証することを目的とした。各々の超伝導体の対称性の決定を通して対形成機構の解明を終局の目標とした。

3. 研究の方法

研究方法は準古典近似に基づく Eilenberger 方程式を数値解法を用いて解きギャップ構造を決定するものである。この理論形式は少数の物質パラメーターを含む微視的理論であり、その適応範囲の中では定量的な議論が

可能である。従ってこの理論的な枠組みを出来るだけ現実の即した状況に適応できるように拡張し、その効果を取り込んだ数値解法のためのプログラミングを行う。その結果を実験データと照合し、適否を検討する。その結果を再び理論に持ち帰り分光学的なデータの検証に耐えられるように理論形式を整備するという方式を用いた。

4. 研究成果

(1) CeCu₂Si₂

前述したようにこの最初に発見された重い電子系超伝導体である CeCu₂Si₂ の対称性は d 波であることが定説となっている。これを検証するために実験グループの協力を得て低温比熱 C(T)測定を遂行した。その結果極低温域に C/T に指数関数の振舞いが観測された。これは線状ノードを有する d 波説と矛盾する結果である。更に面内比熱回転実験を行い d 波説で期待される 4 回対称振動の観測を試みたがそれも存在しなかった。また磁場中 C/T の磁場変化はノード特有の磁場 H の 1/2 乗ではなく、線形であることも観測された。これら 3 つの実験事実は d 波説を否定するものである。C/T の温度変化の解析により多バンドフルギャップの可能性を結論した。これらの実験を踏まえてさらに詳しい微視的な理論計算を実行した。2 バンドモデルにパウリ効果を取り込んだ Eilenberger 方程式を解き系の磁場下での様々な物理量を算出したその結果ごく一般的な性質として以下のことが判明した。(1) 通常パウリ効果が大きくなると上部臨界磁場 H_{c2} は二次転移から一次転移に移行するが、多バンド系では一次転移線は H_{c2} 相図の内側に隠れ、クロスオーバー線になり得る。同時に H_{c2} での一次転移は回避され二次転移のまま残る。(2) クロスオーバー線を磁場方向に横切ると低温比熱係数や磁化が大きく変化し、一次転移的な様相を呈する。(3) この隠れた一次転移的な現象は CeCu₂Si₂ や次に述べる UBe₁₃ で観測されている。以上、CeCu₂Si₂ の超伝導対称性は d 波対称ではなく多バンドフルギャップのギャップ構造であることを明らかにした。これはスピンの揺らぎによって媒介された d 波対称超伝導形成機構説に根本から再考を迫る結果である。強い斥力相互作用の下では s 波クーパ対は形成されないという通念は慎重に検証されねばならない。

(2) UBe₁₃

重い電子系超伝導体の二番目に発見された UBe₁₃ は点状ノードが存在するクーパ対の対称性が有力視されてきた。その根拠の一つは比熱の温度冪則である。この通説に挑戦したのが当該課題である。実験グループとの共同研究の下で純良試料を用いて低温比熱測定を実行した。C/T は従来の結果を再現したが、試料の純良性を反映して残留比熱が極

めて少ない結果であった。続いて磁場方位を回転して比熱振動測定を行い、ラインノードの存否を調べた。比熱振動はなくラインノードは存在しないという結論を得た。更には磁場中比熱係数の測定よりラインノードに特徴的なポロビック効果は観測されずにフルギャップに起因するH線形が見られた。比熱の温度変化を説明する多バンドフルギャップモデルが以上の現象を統一的に説明する。従ってUBe13もCeCu2Si2と同様に多バンドフルギャップの対称性を有すると結論した。

(3) UPt3

重い電子系超伝導体の三番目の物質としてUPt3を研究した。この系は磁場と温度の空間で多重相図を示す興味深い超伝導体である。従前からの研究によってスピン三重項状態にあることは確立している。そのギャップ構造は諸説があり、確立していない。当該研究課題の下でこの問題に取り組んだ。実験グループとの共同研究の下で熱伝導率と比熱測定を磁場方位を制御しながら遂行した。その結果前者の測定から高磁場低温相C相においてc軸回りに二回対称性が観測された。この系は六方晶なのでこれは超伝導状態において自発的に回転対称性の破れが見出されたことになる。即ち非自明なギャップ対称性が直接観測されたということである。この二回対称性を示すギャップ関数を群論を用いて分類し、同定することに成功した。即ち2次元表現E1uでf波対称である。このギャップ関数によれば低温低磁場のB相のギャップ構造はフェルミ球上の2本の水平ラインノードと北極南極のポイントノードからなる。この同定は上記の実験と整合するものである。以上からA,B,C相のそれぞれのギャップ構造が確定し、この系のスピン三重項対関数のスピン部分と軌道部分が判明した。即ちdベクトルはB相においては結晶のb軸とc軸に向いている。c軸磁場において2kGにdベクトルのc成分が回転すると筆者は以前主張していたが、これは今回の実験を踏まえると誤りでHc2(//c)までc成分は回転せずに存在し、パウリ常磁性効果によってHc2が抑制されると考える方が正しい。筆者の以前の主張の根拠となったナイトシフト実験はそこまでの精度がないということである。

(4) Sr2RuO4

カイラルp波対称性がこの系で実現しているか否かの検証を理論実験の双方から進め、それに代わるクーパ対の対称性を提案した。解析の際に念頭に置いた実験事実は以下の通りである。(A)中性子小角散乱実験より渦格子の面内異方性が60となっていてHc2の異方性20と大きく異なる。(B)トルク実験でも系の固有の異方性は60となっていてHc2の異方性20は見かけの値である。(C)中性子構造因子の角度依存性が2重分布構造をしている。(D)比熱、磁化測定においてHc2(//ab)において一次相転移が観測された。

これらの新事実を踏まえ、従前からの実験事実を併せて考えて2バンド空間3次元モデルを構築しその系の渦格子構造をab面からの角度の関数としてEilenberger方程式を解き、上の事実を統一的に理解する試みを実行した。その結果、次の結論を得た。(1)この系はベータバンドに大きなギャップがガンマバンドに小さなギャップが乗った多バンド系である。(2)従ってベータバンドの異方性60が種々の物理量に現れ、ガンマバンドの異方性180は表に出ない。(3)Hc2での一次転移はパウリ常磁性効果に依るもので対関数はスピン一重項である。(4)実際一次転移に伴う磁化の飛びは常磁性成分が大部分で反磁化成分は無視出来る程度である。(5)これはスピン帯磁率が超伝導状態で減少していることを示している。(6)ナイトシフト実験とこれは矛盾するが、今後これを再検証する必要がある。(7)以上の2バンドパウリの描像はH//abのみならずH//cの観測事実を矛盾なく説明する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

1. Y. Amano, M. Ishihara, M. Ichioka, N. Nakai, and K. Machida: Eilenberger and London theories for transverse components of flux line lattice form factors in uniaxial superconductors

Phys. Rev. B **90**, 144514 (2014)
[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.90.144514>].

2. K.K. Tanaka, M. Ichioka, N. Nakai, and K. Machida: Knight shift spectrum in vortex states in s- and d-wave superconductors on the basis of Eilenberger theory

Phys. Rev. B **89**, 174504 (2014)
[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.174504>].

3. C. Rastovski, C. D. Dewhurst, W. J. Gannon, D. C. Peets, H. Takatsu, Y. Maeno, M. Ichioka, K. Machida, and M. R. Eskildsen: Anisotropy of the Superconducting State in Sr₂RuO₄

Phys. Rev. Lett. **111** (2013) 087003
[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.087003>]

4. M. Ishihara, Y. Amano, M. Ichioka, and K. Machida: Transverse magnetic field and chiral-nonchiral transition in vortex states for nearly B//ab in chiral p-wave superconductors

Phys. Rev. B **87** (2013) 224509
[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.224509>]

5. Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, and K. Machida: UPt₃ as a Topological Crystalline Superconductor

J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 113707
[<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.113707>]

6. S. Kittaka, K. An, T. Sakakibara, Y. Haga, E. Yamamoto, N. Kimura, Y. Ōnuki, and K. Machida: Anomalous Field-Angle Dependence of the Specific Heat of Heavy-Fermion Superconductor UPt₃

J. Phys. Soc. Jpn. **82** (2013) 024707
[<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.024707>]

7. K.M. Suzuki, M. Ichioka, and K. Machida: Theory of an inherent spin-density-wave instability due to vortices in superconductors with strong Pauli effects

Phys. Rev. B **83** (2011) 140503(R), 1-4
[<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.140503>]

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 天野雄次郎, 石原将裕, 市岡優典, 町田一成: 一軸異方性超伝導体における面内から磁場を傾けた時の渦糸状態 2

日本物理学会2014年秋季大会

中部大学(春日井)2014年9月7-10日

2. 田中健太, 市岡優典, 中井宣之, 町田一成: 準古典Eilenberger理論を用いた超伝導渦糸内部での核磁気緩和率に関する解析

日本物理学会2014年秋季大会

中部大学(春日井)2014年9月7-10日

3. 市岡優典, 石原将裕, 天野雄次郎, 町田一成: 渦糸格子構造因子横磁場成分の準古典理論評価

日本物理学会第68回年次大会

広島大学(東広島)2013年3月26-29日

4. 町田一成: 磁束渦から見た重い電子系超伝導体UPt₃の最近の発展(招待講演)

日本物理学会2013年秋季大会

徳島大学(徳島)2013年9月25-28日

5. 町田一成, 高橋雅裕, 水島健: FFLO states in two band superconductors

第20回渦糸物理国内会議

鷺羽山(倉敷)2012年12月8-10日

6. 研究組織

(1)研究代表者

町田一成 (MACHIDA, KAZUSHIGE)

岡山大学大学院自然科学研究科名誉教授

研究者番号: 50025491