

平成24年 3月 31日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2010

課題番号：19540369

研究課題名(和文) 磁束渦糸状態の定量的物性評価理論の確立と内部自由度をもつ超伝導への展開

研究課題名(英文) Theoretical study for quantitative estimate for properties of vortex states, and extension to multi-component superconductors

研究代表者

市岡 優典 (ICHIOKA MASANORI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：90304295

研究成果の概要(和文)：

超伝導体の磁束渦糸状態の空間構造を正確に理論計算し、比熱や帯磁率、中性子散乱強度や核磁気共鳴スペクトルなどの物理量の磁場依存性・温度依存性を定量的に正しく評価する計算手法を開発した。これより、非従来型超伝導体の磁場中での物性を解析し、実験データに隠れている超伝導機構についての重要な情報を考察する手法を確立した。また、スピン三重項超伝導も含め内部自由度を持つ超伝導にも適用できる理論計算手法の開発を行なった。

研究成果の概要(英文)：

Spatial structure of vortex states in unconventional superconductors was theoretically studied, in order to establish theoretical methods to quantitatively estimate the temperature and magnetic field dependence of physical quantities, such as specific heat, magnetization, small angle neutron scattering intensity, and NMR spectrum. Using these, we extract information about mechanisms of unconventional superconductivity. The numerical methods to calculate vortex states in multi-component superconductors, including spin-triplet pairing, were also developed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2008年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2009年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 総計 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

研究分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：非従来型超伝導、渦糸状態、中性子小角散乱、パウリ常磁性、重い電子系超伝導

1. 研究開始当初の背景

重い電子系超伝導体や有機超伝導体、ルテニウム酸化物 Sr_2RuO_4 など非従来型超伝導体の機構解明の研究は、物性物理学の重要課題の一つである。さらに、最近では、

CeCoIn_5 などの115系、空間反転対称性のない超伝導体(CePt_3Si など)など、新奇な超伝導体が次々と発見され、その超伝導機構の解明が重要課題である。 CeCoIn_5 においては FFLO (Fulde Ferrell Larkin

Ovchinnikov)状態と見られる新たな超伝導相が発見され注目されている。これら非従来型超伝導の機構解明のためには、超伝導秩序変数の構造の特定が必要である。この結果は電子相関に関連した超伝導引力の起源解明の研究とも関連して重要である。

超伝導秩序変数の構造を知るために有効な方法の一つは、超伝導を局所的に破壊して、そこにできる低エネルギー電子状態やその周辺での超伝導の回復状況を知ることである。その手段の一つとして磁束渦糸が効果的である。同様の目的の表面・界面や不純物の研究と比べ、磁束渦糸は超伝導が自発的に破壊される構造であり、表面や不純物などの付加的な構造を考慮することなく、超伝導構造を議論できる点が優れている。また、外部磁場により、磁束渦糸の本数を自在に変えることができ、これが系全体の物理量に反映するので、低温比熱を始め各種の物理量の磁場依存性より、磁束渦糸による超伝導破壊の効果を定量的に知ることができ、比較的容易に実験可能である。また、異方的超伝導の場合には、外部磁場をかける方向と超伝導異方性のノード方向との相対角度に依存して物理量に変化があり、外部磁場方向を変えて物理量を測定することで異方的超伝導秩序変数の構造についての情報を得ることができる。この指針のもと、超伝導異方性特定のため、面内磁場回転による比熱や磁化・熱伝導などの測定が試みられている。ただし、上記の実験データだけで超伝導秩序変数の構造を断定することについては、その信頼性がまだ確立していない。そこでしっかりとした理論計算によるサポートが必要とされており、本研究はこの期待に応えるため計画された。

2. 研究の目的

超伝導磁束渦糸状態の空間構造を微視的理論により正確に計算し、比熱や帯磁率の他、熱伝導や中性子散乱強度、NMR スペクトルなど各種物理量の磁場依存性・温度依存性を定量的に正しく評価する計算手法を開発する。この理論計算の結果により、非従来型超伝導体の磁束渦糸状態での物理量の振舞いの実験データについてのフィッティングを試み、実験データに隠れている超伝導機構についての重要な情報を考察する。そして、実験データを再現する理論計算の条件・パラメータを探り、それぞれの超伝導体固有の超伝導異方性やフェルミ面形状効果・常磁性効果の定量性を明らかにして、超伝導秩序変数の構造など非従来型超伝導体の機構の解明をめざす。

本研究では、まず、常磁性効果の強いCeCoIn₅における物理量の異常な磁場依存性について、超伝導対称性の確定も考慮に

入れ、定量的な理論評価を行う。また、最近注目されている「空間反転対称性のない超伝導体」やSr₂RuO₄などの超伝導構造の解明も視野に入れている。これらの超伝導体は、内部自由度としてスピン三重項超伝導成分のベクトル超伝導秩序変数を持つ系であると見なされているので、スピン三重項成分の内部自由度をもつ超伝導の場合の磁束渦糸状態やドメイン構造について定量的物性評価が出来るよう理論を発展させる。これにより、系の超伝導秩序変数の構造を解明し、磁束渦糸状態での物理量の振る舞いを微視的理論より解明することをめざす。また、ナノ構造体における非従来型超伝導体の渦糸状態の特性に注目し、超伝導の内部自由度や磁束渦糸の特性を生かしたナノ超伝導体の新しい機能の可能性も追求する。

3. 研究の方法

微視的理論から超伝導渦糸状態の空間構造を計算する手法として準古典 Eilenberger 理論を用いる。これは原子スケールの空間変化は疎視化で略し、超伝導相関長スケールの空間変化に着目した準古典グリーン関数を計算する理論である。この Eilenberger 理論により、磁束格子を組んだ渦糸状態での超伝導秩序変数や内部磁場分布を局所電子状態とセルフコンシステントに計算する手法をこれまで開発してきた。この方法では、異方的な超伝導対関数やフェルミ面構造を考慮することが可能である。また、磁束格子状態の計算であるので、磁場の大きさの関数として、物理量を定量的に計算することが可能である。本研究では、新たに、電子と磁場のゼーマン効果による寄与として常磁性効果を考慮できるよう計算手法を開発した。さらには、こうして得られた準古典グリーン関数の情報より、比熱や磁化、安定な磁束格子の形状などの磁場・温度依存性を定量的に計算した。また、内部磁場分布や常磁性磁化の空間構造の情報をもとに、中性子小角散乱実験のピーク強度から得られる磁束格子構造因子の大きさや、NMR (核磁気共鳴)のスペクトル形状なども計算できる。これらの理論計算結果を、実際の実験データと比較し、超伝導対称性や常磁性効果の寄与などを評価する。

また、スピン三重項 p 波超伝導体のベクトル型秩序変数の場合での渦糸構造へも適用可能となるよう計算手法の開発、微小円筒形状や穴のあいた微小形状の p 波超伝導体での渦状態についての理論計算も進めた。

4. 研究成果

前節の「研究方法」で説明した通り、超伝導磁束渦糸状態の空間構造を微視的理論により正確に計算し、比熱や帯磁率の他、中性子散乱強度、NMR スペクトル、下部臨界磁場

など各種物理量の磁場依存性・温度依存性を定量的に正しく評価する計算手法を完成させることができた。これにより、非従来型超伝導体の物理量の振舞を解析し、実験データに隠れている超伝導機構についての重要な情報を見つけるための研究手法の確立を目指し研究を進めてきた。

常磁性効果の強い重い電子系超伝導体 CeCoIn₅ に関しては、常磁性効果が強い場合の比熱・磁化・中性子小角散乱強度の磁場依存性を定量的評価することができた。この結果、実験で観測されるこれらの量の異常な磁場依存性は、定性的には強い常磁性効果で説明できるが、定量的な考察まで行くと、常磁性効果の他に、量子臨界点近傍の質量増強効果のような効果も考慮する必要があることが明らかとなった[論文⑬, 発表③④]。

また、磁場方向を変えた場合の物性評価から異方的超伝導体のフェルミ面上での対関数のノード位置を特定するため、d 波超伝導体での面内磁場回転下での渦糸状態の変化や比熱振動の温度依存性の評価を行った。磁場方向の面内回転に伴う比熱振動に関しては、振動の位相が低温で逆転するという実験結果に関する理論解析をして、 $d_{x^2-y^2}$ 波の超伝導対称性で説明できることを示した。この第一報は CeCoIn₅ についての実験グループとの共同研究である[論文⑥]。この結論は、強い常磁性効果やフェルミ面異方性によっても変わらないことも確かめ、磁束格子形状の寄与や局所電子状態の様子についても詳細に調べた[論文③, 発表②]。CeCoIn₅ で FFL0 状態と考えられている高磁場相に関しても、FFL0 渦糸状態、渦糸線と FFL0 節面の共存する場合の超伝導抑制や常磁性効果、局所電子状態の特徴を明らかにし、NMR スペクトルなどの解析を行った[論文④, 発表⑥]。

この他、URu₂Si₂ における比熱の磁場の大きさ・方向依存性に関して、実験グループとの共同研究により、実験データから超伝導対称性と常磁性効果の強さの理論解析を行った[論文⑧]。また、中性子実験グループとの共同研究として TmNi₂B₂C での中性子小角散乱強度の磁場・温度依存性における常磁性効果の理論評価計算を行った[論文⑫]。Sr₂RuO₄ の比熱の磁場の大きさ・方向依存性に関しても理論解析を行った[論文⑦]。

また理論計算手法開発の展開として、磁束渦糸状態の空間構造や物性について不純物効果の影響を考慮に入れた理論計算を可能とした[発表①]。また、下部臨界磁場の計算も可能とし、その温度依存性と超伝導対称性の関係を解明した[論文①]。超伝導異方性と磁束格子変形における一次転移の普遍性についても理論評価した[論文⑤]。

内部自由度を持つ超伝導体における特異な渦糸状態の研究に関しては、特にカイラル

p 波超伝導体における多重巻き数の渦糸状態の可能性など、内部自由度のため可能となる特異な渦糸状態の空間構造やその実現可能性について準古典理論より定量的評価を行っている。また、多成分超伝導体についての計算手法の確立と妥当性の評価のため、これまで実験および現象論的理論により研究が深く行われてきた超流動ヘリウム 3 の特異な渦糸状態についての準古典理論による計算も実施した。特にマーミン・ホー渦と呼ばれる芯なし渦の渦格子状態について、準粒子状態を考慮した理論計算を可能とし、この系に特異な芯なし渦においても回転下では低エネルギー準粒子状態が渦芯に現れることなど、この系の特性の解明を行った[論文②, 発表⑤]。

微小超伝導体に関する研究としては、微小円筒型の超伝導体の中心に渦が存在する場合の準粒子状態について研究を行った。これにより、渦の巻き数と常磁性効果の強弱による準粒子状態の変化を解明した[論文⑨]。カイラル p 波超伝導の場合には、渦中心にゼロエネルギーのマヨラナ状態が現れる。このマヨラナ状態の様子が弱結合から強結合へ引力の大きさの変化により変わる過程を解明した[論文⑩]。また、微小円筒内のヘリウム 3 超流動において渦芯のマヨラナ状態が実現する可能性を理論評価した他[論文⑪]。穴のあいた微小超伝導体のカイラル p 波超伝導におけるリトル・パークス振動についての研究も行った[発表⑦]。

今後の展開としては、最近発見された物も含め、未解明の非従来型超伝導体が多く残されており、これらに関して、本研究で開発した理論評価方法を適用し、磁場中物性の解析から超伝導機構の解明が進展することを期待する。この解析は複数の測定手段の実験データを総合的に考察するので、より信頼できる研究手段となるだろう。また、スピン三重項超伝導のベクトル秩序変数の自由度による特異な磁束渦糸状態の理論計算手法も開発しており、これを利用してスピン三重項超伝導体特有のクーパ対のスピン自由度の空間構造にも着目し、その磁束渦糸状態の特徴と物性の解明も進展する見込みである。

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 13 件)

① T. Akiyama, M. Ichioka, and K. Machida, “Lower Critical Field $H_{c1}(T)$ and Pairing Symmetry Based on Eilenberger Theory”, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 015001, 1-2 査読有。

② M. Ichioka, T. Mizushima, and K. Machida, “Skyrmion lattice and intrinsic angular momentum effect in the superfluid ³He A-phase

under rotation”, Phys. Rev. B **81** (2010) 094516, 1-6 査読有.

③M. Hiragi, K.M. Suzuki, M. Ichioka, and K. Machida, “Vortex State and Field-Angle Resolved Specific Heat Oscillation for H//ab in d-Wave Superconductors”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 094709, 1-9 査読有.

④T. Yokoyama, M. Ichioka, and Y. Tanaka, “Theory of Pairing Symmetry in Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov Vortex State and Vortex Lattice”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 034702, 1-10 査読有.

⑤K.M. Suzuki, K. Inoue, P. Miranović, M. Ichioka, and K. Machida, “Generic First-Order Orientation Transition of Vortex Lattices in Type II Superconductors”, J. Phys. Soc. Jpn. **79** (2010) 013702, 1-4 査読有.

⑥K. An, T. Sakakibara, R. Settai, Y. Onuki, M. Hiragi, M. Ichioka, and K. Machida, “Sign Reversal of Field-Angle Resolved Heat Capacity Oscillations in a Heavy Fermion Superconductor CeCoIn₅ and d_{x₂-y₂} Pairing Symmetry”, Phys. Rev. Lett. **104**, (2010) 037002, 1-4 査読有.

⑦K. Machida and M. Ichioka, “Magnetic field dependence of low-temperature specific heat in Sr₂RuO₄”, Phys. Rev. B **77**, (2008) 184515, 1-7 査読有.

⑧K. Yano, T. Sakakibara, T. Tayama, M. Yokoyama, H. Amitsuka, Y. Homma, P. Miranovic, M. Ichioka, Y. Tsutsumi, and K. Machida, “Field-Angle-Dependent Specific Heat Measurements and Gap Determination of a Heavy Fermion Superconductor URu₂Si₂”, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 017004, 1-4 査読有.

⑨K. M. Suzuki, T. Mizushima, M. Ichioka, and K. Machida, “Magnetization profile and core-level spectroscopy in a multiply quantized vortex of imbalanced Fermi superfluids”, Phys. Rev. A **77** (2008) 063617, 1-11 査読有.

⑩T. Mizushima, M. Ichioka, and K. Machida, “Role of the Majorana Fermion and the Edge Mode in Chiral Superfluidity near a p-Wave Feshbach Resonance”, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 150409, 1-4 査読有

⑪Y. Tsutsumi, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Ichioka, and K. Machida, “Majorana Bound State in Rotating Superfluid ³He-A between Parallel Plates”, Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 135302, 1-4 査読有

⑫L. DeBeer-Schmitt, M.R. Eskildsen, M. Ichioka, K. Machida, N. Jenkins, C.D. Dewhurst, A.B. Abrahamsen, S.L. Bud’ko, and P.C. Canfield, “Pauli Paramagnetic Effects on Vortices in Superconducting TmNi₂B₂C”, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 167001, 1-4 査読有.

⑬ M. Ichioka and K. Machida, “Vortex states in superconductors with strong Pauli- paramagnetic

effect”, Phys. Rev. B **76** (2007) 064502, 1-7 査読有.

〔学会発表〕(計7件)

①市岡優典, 町田一成, J.A. Sauls, “d波超伝導の渦糸状態における不純物効果の準古典理論評価”, 日本物理学会 2010年秋季大会, 大阪府立大学(堺) 2010年9月23-26日

②市岡優典, 鈴木健太, 町田一成, “d波超伝導体の面内磁場での磁束格子構造”, 日本物理学会第64回年次大会, 立教大学(東京) 2009年3月27-30日.

③市岡優典, 鈴木健太, 町田一成, “磁束状態の中性子散乱強度と常磁性効果”, 日本物理学会 2008年秋季大会, 岩手大学(盛岡) 2008年9月20-23日.

④M. Ichioka, K. Machida, “Flux line lattice form factor and paramagnetic effects in type II superconductors”, 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), アムステルダム(オランダ), 2008年8月6-13日.

⑤市岡優典, 堤康雅, 水島健, 町田一成, “Mermin-Ho 渦格子状態についての準古典理論計算”, 日本物理学会第63回年次大会, 近畿大学(東大阪) 2008年3月23-16日.

⑥市岡優典, “テクスチャー構造の秩序変数の超伝導状態(理論)”, 日本物理学会 第62回年次大会, 北海道大学(札幌) 2007年9月21-24日.

⑦市岡優典, 町田一成, 石綿元, 瀧川光明, 浅野泰寛, カイラル p 波超伝導でのリトル・パークス振動, 日本物理学会 第62回年次大会, 北海道大学(札幌) 2007年9月21-24日.

〔その他〕

(1) 報道関連

「第2種超伝導体における渦糸格子のモルフオロジー」科学新聞 2010年1月22日掲載.

(2) アウトリーチ活動

日本科学技術振興財団サイエンスキャンプ「量子世界の探検～超伝導を体験しよう～」(岡山大学自然科学研究科)にて、高校生を対象に超伝導の理論に関する講義を担当)

2010年度(8月18日), 2009年度(8月18日), 2008年度(8月20日)の3回実施

(3) ホームページ等

<http://mp.okayama-u.ac.jp/~oka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市岡 優典 (ICHIOKA MASANORI)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 90304295