

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 of properties in 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

研究代表者の専門分野：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. 研究計画の概要

(1) 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考察する。

(2) さらに、「空間反転対称性のない超伝導体」やルテニウム酸化物超伝導体など、スピン三重項超伝導成分も含め内部自由度を持つ超伝導にも理論研究を展開するとともに、これらの知見を生かし、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を追求する。

### 2. 研究の進捗状況

(1) 非従来型超伝導体における磁場中の物性を定量的理論評価することが可能となるよう、準古典アイレンバーガー理論により、超伝導渦糸状態の空間構造を電子状態の情報を考慮して正確に求め、これをもとに磁場中の物理量を定量的に評価する計算手法を開発した。この数値計算実行のためのコンピューターを導入し、これを活用していくつかの物質を対象に磁場中物性解明のための研究を進めた。この理論ではフェルミ面構造や超伝導異方性、パウリ常磁性対破壊効果などを考慮することが可能であり、低温比熱、磁化、NMR スペクトル、中性子小角散乱強度や磁束格子変形などの磁場・温度依存性を数値計算して、それぞれの実験結果が再現できるか検証した。特に、 $\text{TmNi}_2\text{B}_2\text{C}$  の中性子散乱、 $\text{URu}_2\text{Si}_2$  や  $\text{CeCoIn}_5$  の磁場中比熱については

実験グループと共同研究を行い、実験データの解析を行った。また、常磁性効果の強い重い電子系超伝導体として注目されている  $\text{CeCoIn}_5$  に関しては比熱・磁化・中性子小角散乱を総合的に解析し、常磁性効果の他、量子臨界点の効果なども重要であることを明らかにした。

(2) 準古典理論による渦糸状態の計算手法を拡張し、スピン 1 重項に加えてスピン三重項まで考慮して、内部自由度が多成分の超伝導体に適応できるよう計算手法の開発を行った。この多成分系の渦糸状態は構造が複雑であるため、具体的な物質に適用するため前に、理論解析の手法を確立する必要があることに気づいた。このため、まずは典型的なスピン三重項超伝導体であるヘリウム 3 超流動の等方的な系での渦状態を対象に、多成分の超伝導秩序が複雑に絡み合った特異な渦状態について定量的な理論評価の研究を進めている。また、カイラル p 波超伝導体のリトル・パークス振動や微小円筒での渦などナノ超伝導体の渦状態に関する理論計算も行っている。

### 3. 現在までの達成度

② おおむね順調に進展している

(理由)

研究計画達成のために必要な計算手法の開発については、ほぼ達成し、あとはこれを実際の系に適用して研究を展開する段階にある。いくつかの物質系においては実験グループとの共同研究として実績もできた。内部自由度のある超伝導に関する物質系についての具体的な解析が今後に残されている点と、論文発表に至っていない成果については、

今後、精力的に取り組む必要がある。

#### 4. 今後の研究の推進方策

引き続き、開発した理論計算手法を用いて実際の物質系についての解析を進める。また、新たに渦糸状態における不純物効果の寄与を考慮できるよう計算手法を開発する。特に、内部自由度のある物質系についての具体的な解析を中心に研究を展開していく予定である。なお、日本学術振興会の「優秀若手研究者海外派遣プログラム」に採択され平成22年5月末までの約3ヶ月間、米国ノースウエスタン大学に滞在する機会を得たので、受け入れ研究者の J.A.Sauls 教授との共同研究の機会も活かし、本研究の完成に向けて研究を推進していく。また、これまで研究を行った事項のうち、成果が未発表の事項も多く残されているので、これらについても論文発表に向けての作業を精力的に進めて行く。

#### 5. 代表的な研究成果

(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7件)

- ①. K. 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 CeCoIn<sub>5</sub> and d<sub>x<sub>2</sub>-y<sub>2</sub></sub> Pairing Symmetry", Phys. Rev. Lett. **104**, 037002, 1-4 (2010) 査読有
- ②. K.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**, 013702, 1-4 (2010) 査読有.
- ③. K. Machida and M. Ichioka, "Magnetic field dependence of low-temperature specific heat in Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>", Phys. Rev. B **77**, 184515, 1-7 (2008) 査読有.
- ④. K. 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 URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>", Phys. Rev. Lett. **100**, 017004, 1-4 (2008) 査読有.
- ⑤. K. 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**, 063617, 1-11 (2008) 査読有.
- ⑥. L. 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 TmNi<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C", Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 167001, 1-4 (2007), 査読有.

- ⑦. M. Ichioka and K. Machida, "Vortex states in superconductors with strong Pauli-paramagnetic effect", Phys. Rev. B **76**, 064502, 1-7 (2007) 査読有.

[学会発表] (計6件)

- ①. 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.
- ②. 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.
- ③. M. Ichioka, K. Machida, "Flux line lattice form factor and paramagnetic effects in type II superconductors", 25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25), RAI Conference Center (Amsterdam), 2008年8月6-13日.
- ④. 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.
- ⑤. 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.
- ⑥. 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]

報道関連

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

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、高校生を対象として、超伝導の理論に関する講義を担当

- ①. 2008年度 8月20日
- ②. 2009年度 8月18日