

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月3日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540377

研究課題名（和文）多成分超伝導体の新奇な磁束量子状態と相図

研究課題名（英文）

Novel Vortex States and Phase Diagram in Multi-Component Superconductors

研究代表者

胡 曉 (HU XIAO)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・主任研究者

研究者番号：90238428

研究成果の概要（和文）：

三つ以上の成分を持つ超伝導体で、成分間に斥力が働く場合超伝導秩序変数の間にゼロと π 以外の非自明な位相差が現れ、時間反転対称性が破れる。この状態では、臨界点近傍で発散する超伝導コヒーレンス長が二つ以上現れ、ギンツブルグ・ランダウ (GL) パラメータによる超伝導の分類が不十分である。このため、新奇な量子渦糸状態が可能になる。また、成分間の超伝導位相差の振動 (Leggett モード) エネルギーが小さく、安定に存在する。

研究成果の概要（英文）：

In multi-component superconductors, phase differences among order parameters can take nontrivial values other than 0 and π , which breaks time reversal symmetry, when inter-component interactions are repulsive. In this novel state, more than two coherence lengths diverge at the critical temperature, making the dichroism classification of superconductors based on the Ginzburg-Landau (GL) parameter invalid. As such, novel vortex states are expected. Moreover, a mutual phase oscillation among components (known as Leggett mode) takes a small energy and thus can exist stably as a collective mode.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：超伝導・密度波、鉄系と MgB2 等の多成分超伝導、量子渦糸、GL 理論

1. 研究開始当初の背景

今から 50 年前にアブリコソフ博士が磁場中の超伝導現象を記述する GL 理論から出発し、磁場侵入長が超伝導コヒーレンス長より小さい第 1 種超伝導体とより大きい第 2 種超伝導体では磁場応答が異なることを発見

した。二つの磁束が超伝導体に入り込んだ場合、超伝導凝縮エネルギーを稼ぐため、コヒーレンス長程度の大きさをもつ磁束コア同士は引き合う傾向にある。一方、それぞれの磁場が誘起する超伝導渦電流は磁場進入長程度の空間に分布し、その向きが逆であるの

で磁束同士に斥力が生じる。第1種超伝導体では、コヒーレンス長が大きいため、磁束コア間の引力が勝り、磁束同士が重なってラメラ状態が現れる。第2種超伝導体では磁場進入長が大きいため超伝導渦電流による斥力が勝り、量子化された磁束が規則格子を組む。20数年前に発見された銅酸化物高温超伝導体では、温度揺らぎの効果で高温において磁束格子は磁束液体に融解すること、ランダムな点欠陥により磁束格子は準長距離相関しか持たないことが新たに判明したが、アプリコソフによる超伝導体の分類、第2種超伝導体の磁束格子状態の理論的枠組みはそのままになっている。

一方、最近発見された MgB_2 や鉄系超伝導体ではいくつかの電子軌道が超伝導に寄与し、数個の超伝導ギャップが存在することが判明している。それぞれの電子軌道のフェルミ面の形状が異なるので状況が複雑である。特に最近 MgB_2 において超伝導体渦糸格子や渦糸ガラスと異なる渦糸配置が実験的に報告された。その理解が急がれる。

2. 研究の目的

多成分超伝導磁束状態の真の姿を理解するためには、より詳しい理論研究が必要である。理論解析の結果と実験観測との精査・比較を経て始めて多成分超伝導体の新しい磁束状態が確立される。現状では多成分超伝導磁束状態の理論解析が不十分であり、この状況を打開し、多成分によって本質的に新しい超伝導現象を解明することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

多成分超伝導の物性を解明するために、成分間の相互作用を取り入れたBCS理論やGL理論による解析を行う。まず、欠陥等のランダムなピン止めセンターが存在しない、一様系での熱力学諸量の解析計算を進める予定である。これらの解析によって、可能な熱力学状態を解明する。その上で、渦糸状態等空間的に非一様な超伝導状態の解析を行う。必要に応じて、計算機シミュレーションを用いて数値的な研究を進める。

4. 研究成果

成分間に斥力が働く三つ以上の成分を持つ超伝導体で今までに知られていなかった豊富な物性が期待できる。三成分の強さが拮抗していれば、秩序変数の間にゼロと π 以外の非自明な位相差が現れ、位相フラストレーション状態になる。共通の位相因子を除いても秩序変数が複素数になるため、時間反転対称性が破られ、正と負のカイラリティを持つ二重縮退した状態が現れる。時間反転対称性の破れた三成分超伝導は本

質的に単成分、二成分超伝導と異なる。この状態では、秩序変数位相の揺らぎと振幅の揺らぎは密接に絡むため、臨界点近傍で発散する超伝導コヒーレンス長が二つ以上現れることが判明した。その結果、GLパラメータによる第一種、第二種超伝導の分類が不十分になり、正の超伝導・正常状態界面エネルギーをもつ磁束状態や分数磁束量子等、新奇な混合状態が期待される。

一方、単一成分超伝導と異なり、二成分や三成分超伝導体の成分間の超伝導位相差に新たな振動が生まれる。その空間での伝搬様式がLeggettモードと呼ばれている。一般的に、Leggett振動は高いエネルギーを伴い、減衰しやすい。しかし、三成分超伝導の位相フラストレーション状態は完璧な安定状態ではないので、位相の振動が起きやすい。その結果、Leggettモードが非常に柔らかく、超伝導体の中で減衰することなく安定に存在する。

今までに鉄系超伝導体の低温電子比熱の温度・磁場依存性について、既存の理論では互いに矛盾に見える実験結果が報告されていたが、ゼロ質量Leggettモードが存在していれば、実験事実が統一的に説明できることが判明した。

超伝導位相の振動に伴う南部・ゴールドストーンモードは、位相と電磁場との結合により、質量を持つプラズマ振動になることがBCS理論の誕生から間もなく理解された。それに対して、Leggettモードは超伝導成分間位相差の振動であり、電磁場と直接的に結合しないので、質量が生まれることがない。フラストレーション状態を伴うLeggettモードは超伝導の初めてのゼロエネルギー集団励起であり、その解明は超伝導現象の本質を理解する上で重要な意味を持つ。

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 22 件)

- 1) Y. Takahashi, Z. Huang, X. Hu, “Unconventional Vortex State in Multicomponent Superconductors with Time-Reversal Symmetry Breaking”, *Physica C*, in press (2013) [10.1016/j.physc.2013.03.033] (査読有)
- 2) F. Liu, S. -Z. Lin and X. Hu, “Cavity phenomenon and terahertz radiation of a tall stack of intrinsic Josephson junctions wrapped by a dielectric material”, *Supercond. Sci. Technol.* vol. 26, 025003 (2012) (査読有)
- 3) L. -H. Wu, Q. -F. Liang, Z. Wang and X. Hu, “Chiral Majorana fermion edge states in a heterostructure of superconductor and semiconductor with spin-orbit coupling”, *J. Phys.*

Conf. Series vol. 393, 012018 (2012) (査読有)

4) S. -Z. Lin and X. Hu, "Massless Leggett Mode in Multi-band Superconductors with Time-Reversal-Symmetry Breaking", **Phys. Rev. Lett.** vol. 108, 177005 (2012) (査読有)

5) X. Hu, "Half Metallic Antiferromagnet as a Prospective Material for Spintronics", **Adv. Mater.** vol. 24, 294 (2012) (査読有)

6) X. Hu and Z. Wang, "Stability and Josephson Effect of Time-Reversal Symmetry Broken Multi-Component Superconductivity induced by Frustrated Inter-Component Couplings", **Phys. Rev B** vol. 85, 064516 (2012) (査読有)

7) W.-P. Cao, M.-B. Luo and X. Hu, "Scaling Behaviors and Novel Creep Motions of Flux Lines under AC Driving with Point-like Pins", **New J. Phys.** vol.14, 013006 (2012) (査読有)

8) Q.-F. Liang, Z. Wang, and X. Hu, "Manipulation of Majorana fermions by point-like gate voltage in the vortex state of a topological superconductor", **Europhys. Lett.** [Editors' choice], 99, 50004 (2012) (査読有)

9) S. -Z. Lin and X. Hu, "In-plane dissipation as a possible synchronization mechanism for terahertz radiation from intrinsic Josephson junctions of layered superconductors", **Phys. Rev. B** vol. 86, 054506 (2012) (査読有)

10) S. -Z. Lin and X. Hu, "Phase solitons in multi-band superconductors with and without time-reversal symmetry", **New J. Phys.** vol. 14, 063021 (2012) (査読有)

11) S.-Z. Lin, X. Hu and L. Bulaevskii: "Synchronization in a one-dimensional array of point Josephson junctions coupled to a common load", **Phys. Rev. B** vol. 84, 104501 (2011) (査読有)

12) Z. Wang and X. Hu, "Interference and Switching of Josephson Current Carried by Nonlocal Spin-Entangled Electrons in a SQUID-like System with Quantum Dots", **Phys. Rev. Lett.** Vol. 106, 037002 (2011). (cover story) (査読有)

13) S.-Z. Lin and X. Hu: "Radiation of Terahertz Electromagnetic Waves from Build-in Nano Josephson Junctions of Cuprate High-Tc Superconductors", **J. Nanosci. Nanotechno.** vol. 11, 2916 (2011) (査読有)

14) S.-Z. Lin and X. Hu: "Vortex States and Phase Diagram of Multi-component Superconductors with Competing Repulsive and Attractive Vortex Interactions", **Phys. Rev. B** vol. 84, 214505 (2011) (査読有)

15) B. Liu and X. Hu: "Impurity induced states on the superconducting interface LaAlO₃/SrTiO₃", **Phys. Rev. B** vol.81, 144504 (2010) (査読有)

16) S.-J. Hu and X. Hu: "Half-Metallic

Antiferromagnet BaCrFeAs₂", **J. Phys. Chem. C** vol. 114, 11614 (2010) (査読有)

17) X. Hu and S.-Z. Lin: "Phase dynamics in a stack of inductively coupled intrinsic Josephson junctions and terahertz electromagnetic radiation", **Supercond. Sci. Technol.** Vol.23, 253001 (2010) (invited review article) (査読有)

18) S.-Z. Lin and X. Hu: "Response and amplification of terahertz electromagnetic waves in intrinsic Josephson junctions of layered high-Tc superconductor", **Phys. Rev. B** vol 82, 020504(R) (2010) (査読有)

19) M.-B. Luo and X. Hu, "Dynamics of Bragg glass in high-Tc superconductors near depinning transition", **Physica C**, 470, S890 (2010) (査読有)

20) B. Liu and X. Hu, "Local electronic structures in electron-doped cuprates with coexisting orders", **Physica C**, 470, S197 (2010) (査読有)

21) S.-Z. Lin and X. Hu, "Stability of the kink state in a stack of intrinsic Josephson junctions", **Physica C**, 470, S201 (2010) (査読有)

22) M.-B. Luo and X. Hu, "Creep of driven flux lines in type-II superconductors", **J. Supercond. Novel Magn.** Vol.23, 1055 (2010) (査読有)

[学会発表] (計 17 件)

1) X. Hu: "Topological Nanoarchitectonics", at "10th Intensive-Interactive Meeting 'Topological Superconductivity/Superfluidity'", Dec. 13-14, 2012, Osaka University, Osaka, Japan.

2) X. Hu: "Manipulation of Majorana Fermions in Topological Superconductor", at "The 2012 Hong Kong Forum of Physics: Novel Quantum Phenomena (HKFP-2011)", Dec. 12-13, 2012, University of Hong Kong, Hong Kong

3) X. Hu: "Time-Reversal-Symmetry Broken Superconductivity in Multi-Band Superconductors", **plenary talk** at the "Ninth International Conference on New Theories, Discoveries, and Applications of Superconductors and Related Materials (New³SC-9)", Sept. 16~20, 2012, Rome, Italy.

4) X. Hu: "Majorana Fermion in Topological Superconductor", at "The 11th International Conference on Condensed Matter Theory and Computational Materials Science", Aug 12~15, 2012, Shandong University, Jinan, China

5) X. Hu: "Majorana States in Spin-Orbit Coupling Topological Superconductor and their Novel Applications", at "Worldwide Universities Network 4th International Conference on Spintronics", July 23-25, 2012, University of Sydney, Australia.

6) X. Hu, "Majorana fermions in heterostructure of spin-orbit coupled semiconductor and s-wave

superconductor”, **invited talk** at “Dubna NANO-2012”, July 9-14, Dubna, Russia

7) X. Hu, “Theory for Josephson Plasma and THz Radiation of Intrinsic Josephson Junctions”, **invited talk** at “The 8th International Symposium on Intrinsic Josephson Effects and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (PLASMA 2012)”, June 10-13, Izmir, Turkey,

8) X. Hu: “Non-Abelian Majorana Fermions in Vortex State of Topological Superconductor”, at “East Asia Joint Seminars on Statistical Physics 2012”, March 18-20, Suzhou, China

9) X. Hu: “Majorana Fermions in Vortex State of Topological Superconductor”, at the International Workshop on Path-breaking Phase Science in Superconductivity, Jan. 13~15, 2012, Osaka

10) X. Hu: “Nonlocal Quantum Entanglement in Electron Systems”, at “The 2011 Hong Kong Forum of Physics: Novel Quantum Phenomena (HKFP-2011)”, Dec. 14-16, 2011, University of Hong Kong, Hong Kong

11) X. Hu: “Exploring Novel Functional Materials for Spintronics based on First Principles Calculations”, at the International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology, Oct. 21~23, 2011, Kathmandu, Nepal.

12) X. Hu: “Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions of Cuprate High-Tc Superconductors and THz Radiation”, at the 2nd JST-DFG Workshop on Terahertz Superconductor Electronics, Oct. 16~19, 2011, Blaubeuren, Germany

13) X. Hu: “Phase Dynamics in Intrinsic Josephson Junctions and THz Radiation”, at the 13th International Workshop on Vortex Matter in Superconductors, Aug. 1~5, 2011, Chicago, China

14) X. Hu: “Nonlocal Quantum Entanglement of Electron Pairs in a SQUID-like Structure”, at The 10th International Conference on Condensed Matter Theory and Computational Materials Science, July 13~17, 2011, Jinhua, China

15) X. Hu, “Multi-Component Superconductor with Frustrated Couplings”, **invited talk** at the First International Workshop on Superconducting Vortex Matter, May 27~31, 2011, Jinhua, China

16) X. Hu: “Theoretical design of half-metallic antiferromagnet based on perovskite cuprate”, at Pacificchem 2010, Dec. 15~20, 2010, Hawaii, USA

17) X. Hu: “Theory on THz radiation of intrinsic Josephson junctions of cuprate superconductors”, at “The 6th International Conference on Science and Engineering of Novel Superconductors”, June 13-18, 2010, Montecatini Terme, Tuscany, Italy

[その他]

ホームページ等

<http://www.nims.go.jp/mana/lab/theorphys/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

胡 曉 (HU XIAO)

独立行政法人物質・材料研究機構・WPI

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・

主任研究者

研究者番号：90238428

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し