

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400385

研究課題名(和文) 多成分超伝導における時間反転対称性の破れた状態の新奇物性

研究課題名(英文) Novel Properties of the Time-Reversal-Symmetry-Broken State in Multi-Component Superconductors

研究代表者

胡 暁 (Hu, Xiao)

国立研究開発法人物質・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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄系超伝導体は三つ以上のバンドから寄与されている。三つの超伝導成分間に斥力が働く場合、成分間に非自明な位相差が現れ、磁場の印加がなくても時間反転対称性が破れた(TRSB)状態が現れる。本研究は、(1)従来型の単成分超伝導体とTRSB超伝導体のジョセフソン接合において、超伝導臨界電流が電流方向によって異なる；(2)TRSB超伝導体のループの磁化曲線(B-H曲線)に、量子化されない磁束値を持つステップの対が現れ、それらの磁束値の和が磁束量子になる等の新規現象を解明した。

研究成果の概要(英文)：Iron-based superconductors are known to have multi components. Nontrivial phase differences among components appear in a three-component superconductor when the inter-component interactions are repulsive, and a time-reversal-symmetry-broken state is stabilized even without external magnetic field. We have revealed that, (1) the critical current is direction dependent in a Josephson junction between the TRSB superconductor and a single-component one; (2) steps with un-quantized flux appear in the magnetization curve (B-H curve) of a TRSB superconductor, and steps appear always in pair with the sum of fluxes equal to the flux quantization.

研究分野：超伝導

キーワード：multiband superconductor time-reversal symmetry flux quantum

1. 研究開始当初の背景

多成分超伝導とは、物質の結晶構造に起因する対称性の異なる電子バンドが同時に超伝導に寄与する現象である。鉄系超伝導の発見が火付け役となり、今多成分超伝導は大いに興味が持たれている [K. Ishida, Y. Nakai, H. Hosono, J. Phys. Soc. Jpn. 78 (2009) 062001]。多成分の故に現れる新しい現象として、超伝導成分間の位相反転が報告されている。このことは異なる超伝導成分のクーパ対の間に斥力が働いていることを示している。超伝導位相が逆(位相差が π) になっているため、成分間の斥力が実効的に引力として働き、相転移温度の向上に寄与する [J. Kondo, Prog. Theor. Phys. 29 (1963) 1; K. Kuroki et al. Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 087004]。

しかし、成分間に斥力が働く三つ以上の成分を持つ超伝導体はより豊富な物性が期待できる。結論の一般化は容易なので、ここでは三成分に限って、互いに斥力が働く場合について議論を進める。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。今までに、時間反転対称性の破れた超伝導状態が現れる一般的な条件が導かれ、発散する超伝導コヒーレンス長が複数あることが解明されている [X. Hu and Z. Wang, Phys. Rev. B 85 (2012) 064516]。

2. 研究の目的

鉄系超伝導体は三つ以上の超伝導ギャップを持ち、今までに知られていない新奇な物性を示す可能性がある。成分間に斥力が働く場合、超伝導ギャップ間にゼロと π 以外の非自明な位相差が現れ、ゲージ対称性と共に時間反転対称性も破られる。二重縮退を持つ時間反転対称性の破れた超伝導状態には、単成分や二成分超伝導に見られない新奇な磁場応答、ジョセフソン効果、Leggett モードに伴う超伝導波動現象が期待される。本研究はこれまでの研究成果をさらに発展させ、時間反転対称性の破れた超伝導状態の新奇物性を探索する。

3. 研究の方法

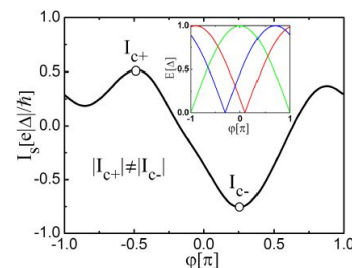
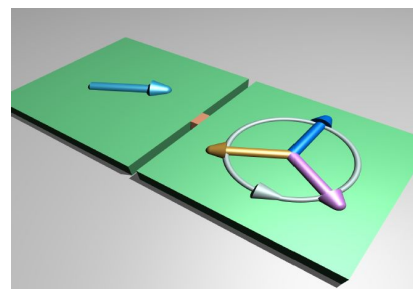
多成分超伝導における時間反転対称性の破れ及び新規な磁束量子状態とジョセフソン効果を解明するためには、理論解析と大規模な数値計算の両方を駆使することが大切である。多くの物質パラメータが寄与するため、やみくもに数値計算に頼っても全体像が解明されない。一方、時間反転対称性の破れた状態での磁束芯の構造や、磁束量子間の相互作用及び熱力学的に安定な配置、ジョセフソン接合での超伝導秩序変数の分布等については、秩序変数の振幅と位相が複雑に絡み合い、解析計算が届く範囲を超えている。こ

のため、解析理論が示した特性の異なるパラメータ領域ごとに、特に超伝導磁束量子や接合近傍のような空間的に非一様な状態について大規模かつ高精度な数値シミュレーションを駆使して、時間反転対称性の破れた状態のエキゾチックな物性を解明することが大切である。

4. 研究成果

(1) 特異なジョセフソン効果

時間反転対称性の破れた超伝導体と単一成分超伝導体のジョセフソン接合において、ボゴリューボフドジェンヌ解析を行った結果、超伝導臨界電流が2つの電流方向で異なることを解明した(文献6)。2つの電流方向は時間反転対称操作で結ばれているため、この結果は時間反転対称性が破られていることを明示するものである。

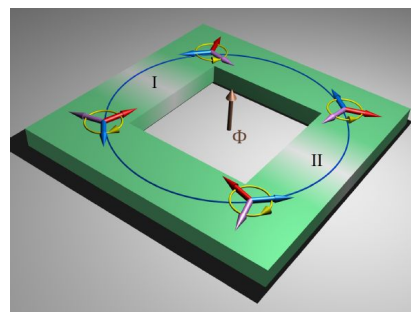


非常に興味深いことに、PbIn/BaFeCoAs のジョセフソン接合において、電流方向によって超伝導臨界電流が異なることがすでに実験的に観測されていた [S. Schmidt et al., Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 172504 (2010)]。

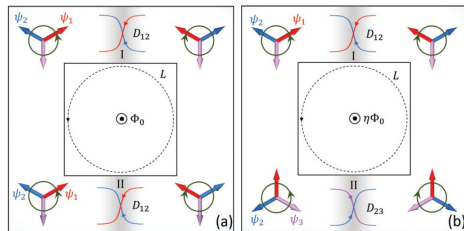
我々の理論結果と実験結果を照らし合わせれば、鉄系超伝導体において、自発的時間反転対称性の破れが証明されたことになる。

(2) 分数磁束ステップを持つ磁化曲線

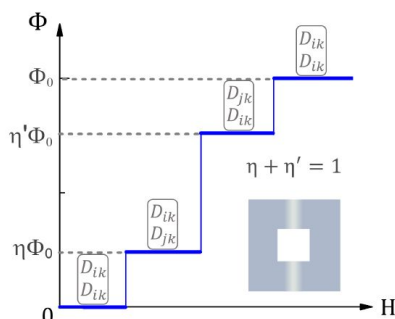
時間反転対称性の破れた超伝導体を作ったループの磁化曲線について調べた。



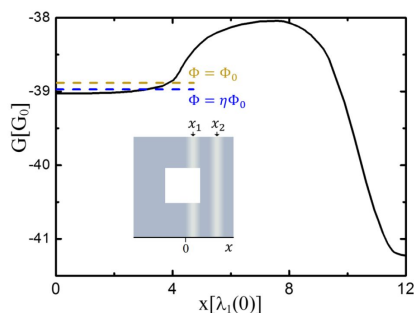
ループの右半分と左半分がそれぞれ異なるカイラリティを示す超伝導状態になっている状況を考える。2つの異なるカイラリティを持つ状態はそのままでは繋がることができず、超伝導ループに2つのドメインウォール(DW)が現れ、それぞれのDWにおいて、3つの超伝導成分の中の2つの成分間の位相差が逆転する。



我々は位相逆転を起こさせる超伝導成分が2つのDWで異なる場合、超伝導ループに囲まれる磁束値が磁束量子にならないを解明した(文献4)。このため、磁化曲線に量子化されない磁束ステップが現れる。磁束ステップは物質パラメータに依存し、温度によっても変わる。しかし、磁束ステップは必ず対で現れ、磁束値は磁束量子の整数倍結ばれている。



単一成分超伝導体、二成分超伝導や時間反転対称な三成分超伝導体では、DWが安定に存在できない。一方で、時間反転対称性の破れた超伝導状態は2つのカイラリティ状態を持ち、互いに位相の連続変形で繋がらないので、DWが安定に存在する。



このため、量子化されない磁束ステップを持つ磁化曲線は時間反転対称性の破れた超伝導状態の特有な性質であり、その検証に利用できる。今後の実験研究が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

- (1) T. Kawakami and X. Hu: "Helical spin texture and interference of Majorana bound states in one-dimensional topological superconductor", J. Phys. Soc. Jpn. vol. 85, 013701 (2016) [査読有り].
- (2) F. Liu and X. Hu: "Possible ways to synchronize the phase dynamics in intrinsic Josephson junctions for terahertz radiation", Int. J. Mod. Phys. B, vol. 29, 1542033 (2016) [査読有り].
- (3) Z. Wang, Q.-F. Liang, D.-X. Yao and X. Hu: "Viewing Majorana bound states by Rabi oscillations", Sci. Rep. vol. 5, 11686 (2015) [査読有り].
- (4) Z. Huang and X. Hu, "Fractional Flux Plateau in Magnetization Curve of Multi-Component Superconductor Loop", Phys. Rev. B vol. 92, 214516 (2015) [査読有り].
- (5) F. Liu and X. Hu: "Solution of Sine-Gordon Equations with Weak and Moderate Inductive Couplings under Bias Current and Dissipations", J. Phys. Soc. Jpn. Vol.84, 064719 (2015) [査読有り].
- (6) Z. Huang and X. Hu, "Josephson Effects in Three-Band Superconductors with Broken Time-Reversal Symmetry", Appl. Phys. Lett. vol. 104, 162602 (2014) [査読有り].
- (7) T. Kawakami, Y. Nagai, S. Yoshizawa, H. Kim, Y. Hasegawa, T. Nakayama, T. Uchihashi and X. Hu, "Excitation spectrum of Josephson vortices on surface superconductor", J. Phys. Conference Series vol. 568, 022022-1-6 (2014) [査読有り].
- (8) Q. F. Liang, Z. Wang and X. Hu: "Scheme for Topological Single Electron Pumping Assisted by Majorana Fermions", Phys. Rev. B vol. 89, 224514 (2014) [査読有り].
- (9) S. Yoshizawa, H. Kim, T. Kawakami, Y. Nagai, T. Nakayama, X. Hu, Y. Hasegawa, and T. Uchihashi, "Imaging Josephson vortices on the surface superconductor Si(111)-(√7×√3)-In using a scanning tunneling microscope", Phys. Rev. Lett. Vol. 113, 247004 (2014) [Editors' Suggestion] [査読有り].
- (10) L.-H. Wu, Q.-F. Liang and X. Hu, "New Scheme for Braiding Majorana Fermions", Sci. Technol. Adv. Mater. Vol. 15, 064402 (2014) [査読有り].
- (11) Y. Takahashi, Z. Huang and X. Hu, "H-T Phase Diagram of Multi-component Superconductors with Frustrated Inter-component Couplings", J. Phys. Soc. Jpn. Vol. 83, 034701 (2014) [査読有り].

〔国際会議等招待講演〕(計8件)

(1) X. Hu, “ Spin texture of the Majorana bound state ” , Hong Kong Forum, Jan. 10-12, 2016, U. of Hong Kong.

(2) X. Hu, “ Lecture I: Topological insulating states in honeycomb lattice; Lecture II: Questing for Majorana fermion in topological superconductor ” , ICAM Summer School, July 18-26,2015, Shun Yi, Beijing.

(3) X. Hu, “ Spin texture of Majorana bound states in vortex of topological superconductor ” , July 15-17, 2015, Tsinghua University, Beijing.

(4)X. Hu, “ Novel Vortex States and Josephson Effects in Multiband Superconductors, International Workshop on Vortex workshop, May 10-15, 2015, Madrid, Spain.

(5) X. Hu, “ Single electron pumping based on Majorana bound states in topological superconductor ” , EMN Conference, April 14-17, 2015, Beijing, China.

(6)X. Hu, “ Josephson Phenomena in Novel Superconducting States ” , The 9th International Symposium on Intrinsic Josephson Junctions and THz Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors ” , Dec. 1-3, 2014, Kyoto.

(7)X. Hu, “ Multi-Band Superconductivity with Broken Time Reversal Symmetry ” , 10th International Workshop on Nanomagnetism and Superconductivity, June 30-July 4, 2014, Barcelona, Spain.

(8) X. Hu, “ Vortex and novel excitations in superconductivity ” , Workshop on “ New Trends in Statistical Physics ” , March 26, 2014, Tokyo.

〔その他〕

ホームページ

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

胡曉 (HU, Xiao)

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