

研究種目： 若手研究 (B)
研究期間： 2007 ~ 2011
課題番号： 19740220
研究課題名 (和文) 異方的超伝導ナノ構造接合系のジョセフソン効果に関する理論的研究

研究課題名 (英文) Theoretical study on Josephson effect of nanostructure systems in anisotropic superconductors

研究代表者

田沼 慶忠 (TANUMA YASUNARI)
秋田大学・工学資源学部・准教授
研究者番号： 90360213

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： 異方的超伝導、ジョセフソン効果、共鳴束縛状態、奇周波数ペア

1. 研究計画の概要

超伝導体間に挟まれた薄い絶縁体において、両側の超伝導体を持つペアポテンシャルの位相差により電流が流れる現象をジョセフソン効果といい、ペアポテンシャルを持つ位相が極めて重要な役割を果たす。今日、銅酸化物高温超伝導体のような強相関電子系物質は、電子間に働く強い斥力相互作用を避け、異方的超伝導体となる。異方的超伝導体は電子対が異方的な対称性であり、内的位相ペアポテンシャルで符号変化をするため、トンネル及びジョセフソン接合の輸送現象に影響を及ぼす。それらの主たる要因は接合面で散乱する準粒子がペアポテンシャルの符号変化を伴い形成する共鳴束縛状態である。トンネル分光において、この共鳴束縛状態はゼロバイアスピークとして反映されるため電子対対称性の有効な検証法となり、超伝導発現機構への解明と繋がる。しかしながら、共鳴束縛状態はナノスケールの構造や磁束量子渦による不均一系によって影響を受けやすい。さらに共鳴束縛状態の形成と同時に奇周波数を持った電子対が誘起される。

本研究では、異方的超伝導体で形成される共鳴束縛状態が、ナノスケールでの空間的構造や磁束量子渦などの並進対称性の破れた系でいかなる準粒子状態になるかを明確にする。ペアポテンシャルの位相が果たす機能から、異方的超伝導体における電子対対称性の実験的検証を理論的に構築し、デバイス作製への有益な指針を与えることを目標とする。

2. 研究の進捗状況

平成19年度は、量子ドット・s波超伝導体接合におけるジョセフソン効果の研究を行った。量子ドット・s波超伝導体接合間のジョセフソン電流を計算し、温度依存性と電流-位相特性を量子モンテカルロ計算法により調べた。相互作用のない量子ドットの場合、ジョセフソン電流の温度依存性は低温で飽和し、透過率に関して比例する。一方、相互作用のある場合には、弱斥力でかつ低透過率で、負のジョセフソン電流が流れる π 接合となる。また、強斥力でかつ低透過率のとき、0接合が復元する。各条件下でクーロン・ブロッキングと近藤効果が起こることを明確にし、連続的なジョセフソン電流の電流-位相特性を示すことを確認した。これらの研究成果は、Physica E (2007) 257にまとめた。

平成20及び21年度は、異方的超伝導接合における磁束量子渦の不純物効果に関する研究を行った。超伝導体内の磁束量子渦芯周りで、共鳴束縛状態の形成だけでなく奇周波数を持った電子対が誘起される。この奇周波数ペアの対称性は、電子対の軌道角運動量と磁束の巻き数との和における規律則に従う。カイラルp波超伝導体における平行渦状態と反平行渦状態における奇周波数ペア対称性の違いを準古典グリーン関数法によって調べた。平行渦と反平行渦状態では渦芯において、それぞれ奇周波数d波ペアとs波ペアが誘起される。トンネル分光から電子対対称性を判別するためには、不純物効果について調べる必要がある。奇周波数s波ペアは不純物に対し抑制されにくく、ゼロエネルギーピークが保たれる。一方、奇周波数d波ペアは不純物によって破壊されやすいため、ピークが

劇的に抑えられる。これらの結果より、異方的超伝導磁束量子渦状態における渦芯トンネル分光という新しい電子対検証法を理論的に構築した。なお、これらの研究成果は論文として Physical Review Letters 102 (2009) 117003 他にまとめた。

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)

本研究課題の研究期間は平成 19 年度から平成 22 年度であるが、平成 20 年度に研究代表者の所属研究機関が神奈川大学から秋田大学へ変更となった。申請時及び研究当初、旧所属研究機関にて研究実施計画を立案し遂行していたが、研究環境・設備や教育業務等の大幅な変更により実際の作業での遅延や、申請時の研究経費との不釣り合いを感じ、予定よりも早く遂行できたのではないかという感があることは否めない。しかしながら、平成 21 年には Physical Review Letters といった国際的論文にて成果をまとめ、NDSN 2009 にて招待講演を行うことができた。これまでの共同研究者や共著者の協力、また研究所属機関の教職員の支援なしには成し得なかった。このような理由から、本研究の達成度を、②と自己評価した。

4. 今後の研究の推進方策

昨年度までに、異方的超伝導体の磁束量子渦芯トンネル分光法による電子対対称性検証法とした理論的な構築を行った。現時点では、不純物効果を考慮し不純物散乱がボルン散乱に限って成立し、奇周波数ペア対称性を判別し異方的超伝導体の電子対を決定することができる。しかしながら、不純物散乱がユニタリー散乱の場合、適用可能かどうか分かっていない。今後として、磁束量子渦芯トンネル分光法をユニタリー散乱への不純物効果に拡張し研究を行っていく。具体的には、ペアポテンシャルとペア振幅の空間変化をリカッチ法により自己無撞着に決定し、不純物の自己エネルギーを計算する。ユニタリー散乱領域において自己エネルギーの実エネルギー表示における数値計算上の問題を改善し、自己エネルギーの実エネルギー表示でも計算可能なプログラム作成する。

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 4 件)

- ① Y. Tanaka, Y. Tanuma, A. A. Golubov, Odd-frequency pairing in normal-metal/superconductor junctions, Physical Review B, 76, 054522

(13 pages), 2007, 査読有

- ② Y. Tanuma, Y. Tanaka, K. Kusakabe, Josephson current through a nanoscale quantum dot contacted by conventional superconductors, Physica E, 40, 257-260, 2007, 査読有
- ③ Y. Tanaka, A. A. Golubov, Y. Tanuma, Odd-frequency pairing state in superconducting junctions, Journal of Physical Chemistry of Solids, 69, 3244-3266, 2008, 査読有
- ④ Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, A. A. Golubov, Model for vortex-core tunneling spectroscopy of chiral p-wave superconductors via odd-frequency pairing states, Physical Review Letters, 102, 117003, 2009, 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① Y. Tanuma, Y. Tanaka, A. A. Golubov, Hidden odd-frequency pairing states in non-uniform superconductors, Workshop 'Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures', 2007. 6. 23, Lorentz Center (Leiden University, Netherlands)
- ② 田沼慶忠, 林伸彦, 田仲由喜夫, A. A. Golubov, 異方的超伝導磁束量子状態における奇周波数ペアと不純物効果, 日本物理学会, 2008. 3. 23, 近畿大学
- ③ 田沼慶忠, 不純物のあるカイラル p 波超伝導ボルテックスと奇周波数ペア検証法, 京大基研研究会「不均一超伝導超流動状態と量子物理」, 2008. 8. 1, 京都大学基礎物理学研究所
- ④ Y. Tanuma, N. Hayashi, Y. Tanaka, A. A. Golubov, How to determine pairing symmetries of chiral p-wave superconductors from vortex-core tunneling spectroscopy via odd-frequency pairings, New directions of superconducting nanostructures 2009 (NDSN 2009), 2009. 9. 4, Nagoya University
- ⑤ 田沼慶忠, 林伸彦, 田仲由喜夫, A. A. Golubov, カイラル p 波超伝導体渦芯周りの奇周波数ペアと不純物散乱, 日本物理学会, 2009. 9. 27, 熊本大学

[その他]

該当なし。