

平成 21 年 4 月 3 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007 ~ 2008

課題番号：19540352

研究課題名 (和文) エキゾチック超伝導接合における近接効果の理論

研究課題名 (英文) Proximity effect in unconventional superconductors

研究代表者

浅野 泰寛 (ASANO YASUHIRO)

北海道大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：20271637

研究成果の概要：

超伝導の対称性は、金属で発現するスピン 1 重項対称性と、ルテニウム酸化物や重い電子系で有力とされるスピン 3 重項対称性に大別される。特にスピン 3 重項超伝導の物理はきわめて興味深く、注目を集めている。我々は、理論的な手法にのっとり超伝導近接効果を調べ、この 2 種類を明確に区別する新しい実験方法を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度	0	0	0
年度	0	0	0
年度	0	0	0
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

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、メソスコピック物理

1. 研究開始当初の背景

超伝導体に普通の非超伝導金属 (常伝導体) を接合したとき、超伝導を担うクーパ対が超伝導体から常伝導体へ染み出す現象は近接効果と呼ばれている。1970 年代初頭から始まる超伝導近接効果の研究の歴史は長い。1990 年代半ば以降ヨーロッパを中心として急激に競争の激しい研究分野になっている。超伝導デバイスは量子ビットの有力候補になっていることがその原因である。研究競争の中で超伝導近接効果の多彩な側面が次々に明らかになり、そうした基礎物理の豊富さも近接効果が魅力的な理由である。その端的な例が強磁性体における近接効果であ

る。端緒となったのは 1982 年ロシアの理論であったが、長い間注目されていなかった。ところが 2001 年に極めて系統的な実験が行われた事、また量子ビットへの応用が指摘された事から強磁性体の近接効果が集中的に調べられ、2004-2005 年の間に 3 つの解説論文が *Review of Modern Physics* から出版されている。これらの研究では金属における超伝導 (スピン 1 重項 s 波超伝導) のクーパ対が、常伝導金属や強磁性金属に染み出す近接効果に焦点が絞られている。驚くべき事は、こうした単純な接合にもかかわらず近接効果は温度、常伝導金属の電気伝導率、強磁性体の交換エネルギーなどパラメータの変

化に伴い極めて多彩な性質を示すという事実である。強磁性金属やハーフメタルの他に、最近ではカーボンナノチューブ、グラフェン、マルチフェロイック物質（強磁性強誘電性が共存する物質）などに代表されるエキゾチックな伝導体や絶縁体の研究が盛んに行われている。そうした特異な性質を持つ物質における超伝導近接効果は今のところほとんど未解明のままであるが、チャルマース工科大、デルフト工科大、ケンブリッジ大、ヘルシンキ工科大などが戦略的な研究を始めている。これまでの成果の多くは直接超伝導体を流れる電流、[例えば、常伝導体/超伝導体(NS)接合、超伝導体/絶縁体/超伝導体(SIS)、超伝導体/常伝導体/超伝導体(SNS)接合、超伝導体/強磁性体/超伝導体(SFS)接合など（図1参照）]に対する知見である。その一方で超伝導体が電流経路から離れた接合においても、極めて奇妙かつ興味深い量子輸送現象が知られている。

2. 研究の目的

本研究の目的のひとつは異方的超伝導が非局所電流に及ぼす効果を明らかにする事である。最終的な狙いは電気伝導測定を用いてスピン1重項超伝導体とスピン3重項超伝導体を峻別する方法の確立にある。非局所電流を調べる別の動機として超伝導揺らぎの問題があり、本研究の成果を銅酸化物高温超伝導体の異常金属相における奇妙な近接効果の解明につなげたいと考えている。また本研究ではエキゾチックな伝導体における近接効果の多様性とその機能性を明らかにする事を第2の目的としている。

3. 研究の方法

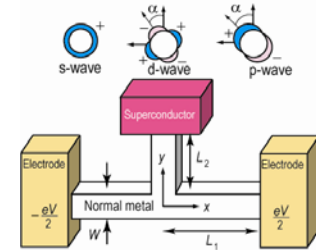
本研究は基本的に申請者が自ら遂行する計画である。超伝導近接効果を議論する有力な手法の一つに準古典グリーン関数法[G. Eilenberger, Z. Phys. **214**, 195 (1968), A. I. Larkin, et. al., JETP **26**, 1200 (1968), K. D. Usadel, Phys. Rev. Lett. **25**, 507 (1970)]が挙げられる。近接効果に関する理論的研究のほとんどはこの方法に拠っているとんでも決して過言ではない。実際「研究の目的」で説明した非局所電流もこの方法を用いて計算されている。申請者はまず金属超伝導で議論されたこの方法を異方的超伝導体に拡張し、既に得られた結果と比較するところから始める。準古典グリーン関数法を用いる上で問題となるのが、接合部におけるグリーン関数の接続条件である。この問題は未だに十分解決しているとはいえず、これまでに様々な境界条件が提案されている[A. V. Zaitev, JETP **59**, 863(1984), Yu. Kupriyanov, et. al., JETP **94**, 139(1988), Yu. V. Nazarov, Phys. Rev. Lett., **73**, 1420

(1994)]. 異方的超伝導体への拡張はNazarovの理論に対して分担者が行っている[Y. Takana, et. al, Phys. Rev. B **69**, 144519 (2004)]. まず初めに分担者の協力の下、これまで議論された端子の配置において異方的超伝導体が非局所電流に及ぼす影響をs波超伝導体の場合を手本としながら調べる予定である。これまでのs波超伝導の理論では「弱い近接効果」の仮定が十分成り立つため解析的な計算が可能であった。しかし申請者が目指す「異常な近接効果」においてこの仮定が成立せず、本質的に非線型な方程式を解く事が必要となるため、最終的には数値計算を実行しなければならない。こうした一連の数値的解法については、その技術を蓄積している。また以前からの共同研究者A. A. Golubov博士（オランダのトゥエンテ大学）もその技術に精通しており、彼からの適切な助言を期待できる。

4. 研究成果

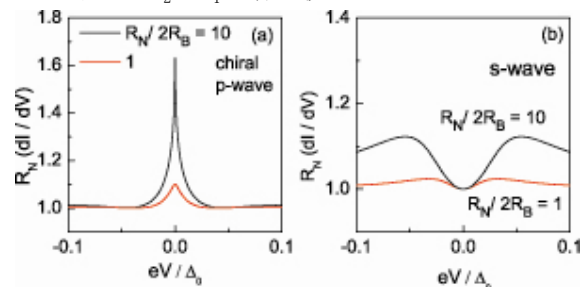
我々は下図のようなT字型の接合において、黄色で示した2電極間の微分コンダクタンスを理論的に計算した。T字の部分は金、銀などの通常金属で、第3の端子は超伝導体によって終端されている。超伝導体と常伝導体の接合には電流が流れないがこの測定の特徴である。微分

コンダクタンスはこの分野で伝統的に用いられている準古典グリーン関数の従うウサデル方程式を解くことによって得られる。



理論計算の結果をグラフに示す。縦軸は微分コンダクタンスを金属細線のノーマル抵抗

(R_N) を乗じて規格化したものであり、横軸は2電極間の印加電圧である。 R_B は超伝導体と金属の接合部のノーマル抵抗である。二つの抵抗の比($R_N/2R_B$)はパラメータであり、この比が大きいと近接効果がより顕著になる。左の図は Sr_2RuO_4 で有望視されているスピン3



重項カイラルp波超伝導を仮定した結果であり、右の図は通常金属で発現するスピン1重項s波超伝導を考慮した結果である。スピン3重項超伝導体の接合ではゼロバイアス近傍

でコンダクタンスがピークを持つことがその特徴で、一方スピン1重項超伝導体の接合ではゼロバイアス近傍でコンダクタンスはディップ構造を持つ。これらピーク幅やディップ幅などスペクトルの構造は、干渉効果に特有のエネルギースケールであるサウレスエネルギーによって記述される。ここではスピン3重項超伝導体としてカイラルp波対称性の場合の、スピン1重項超伝導体としてs波対称性の場合の結果を示したが、常伝導金属中で近接効果がある限り、軌道部の対称性を変えてもスペクトルの形は定性的に変更を受けないことを我々は確かめている。このように、接合した超伝導体がスピン3重項かスピン1重項かに依存して、コンダクタンススペクトルが定性的な違いを示すことにより、超伝導体の対称性の区別ができるだろうというのが我々の主張である。

こうした劇的なスペクトルの違いの背景をなすもの、それは金属中に染み出したクーパー対の周波数対称性である。電子は空間座標、スピン、時間の3個の自由度を持っている。これに対応してクーパー対の内部構造は、2電子の空間相対座標をフーリエ変換して偶パリティのs, d, g波、奇パリティのp, f波に分類され、スピン自由度はスピン1重項と3重項に分類される。さらに、これが本稿で重要なことだが、2電子の相対時間をフーリエ変換して偶周波数ペアと奇周波数ペアに分類される。3つの自由度がそれぞれ2つの選択肢を持つので全部で $2^3=8$ 通りの分類が可能に見えるが、対関数が2電子の入れ替えに関して反対称であることがフェルミ統計から要請されるので、ペアの対称性は表に示した4種類になる。上の2つが冒頭で述べた超伝導対称性の分類に相当する。

周波数部	軌道部	スピン部
偶	偶パリティ	1重項
偶	奇パリティ	3重項
奇	偶パリティ	3重項
奇	奇パリティ	1重項

これまで奇周波数超伝導は理論的に示唆されてきたが実験的な裏付けがはっきりせず、超伝導は偶周波数のものと暗黙のうちに了解してきた。奇周波数超伝導の実現が難しい理由の1つとして、ギャップがつぶれて凝縮エネルギーがうまく稼げないことが挙げられる。しかし近接効果によって金属中に染み出すペアの場合、そういったエネルギーの損得勘定の必要がなくなるのである。(偶周波数)スピン1重項s波超伝導体の接合の場合、ペアの染み出し先の金属中でもこの対称性が保存される。感覚的な言い方ではあるが、ペアの存在は状態密度のエネルギーギャップを連想させる。コンダクタンスの右の図に現れたディップ構造は、ペアが染み出してできたギャップを反映している。その一方(偶

周波数)スピン3重項奇パリティp波超伝導体の接合では、染み出し先の金属中でペアの軌道部の対称性が偶パリティs波に変更を受ける。これは金属中に存在する不純部によって準粒子が散乱されるために、軌道部の対称性は空間的に等方的なs波しか許されないことに起因する。フェルミ統計という量子力学の根本原理の帰結とペアを組むという事象を両立させるには、軌道部分が偶パリティに変わった事を補償するようクーパー対は金属中で奇周波数対称性を獲得するのである。奇周波数ペアの存在は、サウレスエネルギーよりも低いエネルギー領域の準粒子状態密度を増やすことが明らかになりつつある。フェルミエネルギー直上に状態密度のピークが現れることは超伝導の異方的対称性に起因するトポロジカルな理由があるのだがここでは省略する。グラフ左図のスペクトルのゼロバイアスピークは奇周波数ペアが染み出してできた状態密度のピークを反映している。このようにスピン1重項か3重項かを区別する問題は、近接効果を用いフェルミ統計性を利用すると、偶周波数か奇周波数かの問題に置き換えることが出来る。周波数対称性の違いは近接した金属中の準粒子状態密度に直接現れ、それを制度の良い測定が可能な微分コンダクタンスで調べることができるのである。

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 25 件)

- ① “Anomalous Transport through the p-wave Superconducting Channel in the 3-K Phase of Sr_2RuO_4 ”, H. Kambara, S. Kashiwaya, H. Yaguchi, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno, *Physical Review Letters* **101**, 267003 (1)-(4) (2008). 査読有
- ② “Electron Transport of a Ferromagnet-Superconductor junction on Graphene”, Y. Asano, T. Yoshida, Y. Tanaka, and A. A. Golubov, *Physical Review* **B78**, 014514(1) (2008). 査読有
- ③ “Quantum transport in a normal metal/odd-frequency superconductor junction”, J. Linder, T. Yokoyama, Y. Tanaka, Y. Asano and Asle Sudbo. *Physical Review* **B77**, 174505 (2008). 査読有
- ④ “Shape of Cooper pair in a Normal-metal/Superconductor Junction”, Y. Tanaka, Y. Asano, and A. A. Golubov, *Physical Review B* **77**, 220504R (2008). 査読有
- ⑤ “Conductance Spectroscopy of

Spin-triplet Superconductors”, Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, and S. Kashiwaya, Physical Review Letters **99**, 067005 (2007). 査読有

- ⑥ “Josephson Effect due to Odd Frequency Pairs in Diffusive Half-metals”, Y. Asano, Y. Tanaka, A. A. Golubov, Physical Review Letters **98**, 107002 (2007). 査読有
- ⑦ “Odd-frequency Pairs and Josephson Current through a Strong Ferromagnet”, Y. Asano, Y. Sawa, Y. Tanaka, A. A. Golubov, Physical Review B **76**, 224525 (2007). 査読有
- ⑧ “Theory of Tunneling Spectroscopy in the Larkin-Ovchinnikov State”, Y. Tanaka, Y. Asano, M. Ichioka, and S. Kashiwaya, Physical Review Letters **98**, 077001 (2007) 査読有.

[学会発表] (計 12 件)

- ① “Josephson Effect in Chiral p-wave Superconductors”, Y. Asano, Spin Helicity and Chirality in Superconductor and Semiconductor Nanostructures, Karlsruhe university, Karlsruhe, Germany (2008. 7. 15).
- ② “Conductance Spectroscopy of Spin-triplet Superconductors”, Y. Asano, Probing superconductivity at the nanoscale, Hesperia Lucentum Hotel, Alicante, Spain (2008. 6. 5).
- ③ “Odd-frequency Pairing State in Superconductor / Ferromagnet Junctions”, Y. Asano, 日本物理学会 63 回年次大会, 領域 3-6 シンポジウム「強磁性体・超伝導体接合の物理の新展開」近畿大学 東大阪市 (2008. 3. 23).
- ④ “Conductance Spectroscopy of Spin-triplet Superconductors”, 浅野泰寛, 超伝導が拓く物性科学の最前線 - 科研費 4 特定領域研究 合同研究会 -, 首都大学東京, 東京 (2007. 12. 14).
- ⑤ “Conductance Spectroscopy of Spin-triplet Superconductors”, Y. Asano, MTI International Argonne Fall Workshop on Nanophysics VII, 2007, National Center for Theoretical Sciences, Hsinchu, Taiwan (2007. 12. 6)
- ⑥ Josephson Current through a Strong Ferromagnet and Odd-frequency Pairs, Y. Asano, Physics of Nanoscale Superconducting Heterostructures, Lorentz Center in Leiden Univ., Leiden, The Netherlands (2007. 7. 4).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野泰寛 (ASANO YASUHIRO)
北海道大学大学院工学研究科 講師
研究者番号 : 20271637

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

田仲由喜夫 (TANAKA YUKIO)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 40212039
(2007 年度 : 研究分担者)