

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 4 月 29 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03525

研究課題名(和文)トポロジカル絶縁体/超伝導体接合におけるスピン流を用いた熱制御デバイスの理論

研究課題名(英文)Theory of spin and heat transport in topological insulator/superconductor junctions

研究代表者

川畑 史郎 (KAWABATA, SHIRO)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・研究グループ長

研究者番号：30356852

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：トポロジカル物質と超伝導体が接合した系における量子及び熱輸送理論の構築を行った。具体的にはワイル半金属/超伝導体接合の熱輸送シミュレーションを行い、スピン-運動量ロッキングによってAndreev反射が抑制され、熱流が従来の固体冷凍機に比べて増大することを明らかにした。また、超伝導単一電子素子の電子輸送に対する非平衡熱準粒子の影響についても研究を行った。さらに、トポロジカル超伝導体等の様々なトポロジカル性についても理論的に研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the thermal and quantum transport in superconductor/topological material hybrid systems theoretically and numerically. Due to the suppression of the Andreev reflection by the topological spin-momentum locking induced by the spin-orbit interaction, the cooling power of the system is found to be higher than that for conventional coolers. Therefore we can extract large amount of heat from normal metals. We also have investigated the electron transport in superconducting single-electron devices and found that the heating by thermal quasiparticles gives large influences on electron transport. In addition, we have theoretically investigated several properties of chiral topological superconductors, Josephson effect through anomalous hall insulator, and impurity effect in carrier doped topological insulators.

研究分野：超伝導量子レレクトロニクス

キーワード：トポロジカル絶縁体 超伝導接合 熱輸送 トポロジカル超伝導体 マヨラナ粒子 ワイル半金属 スピントロニクス 電子冷却

1. 研究開始当初の背景

近年、ナノ量子デバイスを冷却するための技術として、金属/絶縁体/超伝導体(N/I/S) 接合を用いた固体電子冷却に世界的に大きな注目が集められている。固体電子冷却とは、超伝導ギャップを利用して金属N中のエネルギー $E >$ を持つ熱い電子のみを選択的に引き抜き、Nの温度を1K以下に冷却する技術である。この画期的技術によって、冷却装置の大幅な小型化・低価格化・省エネ化が可能となる。また、放射線検出器やナノ量子機械に対する冷却デモも行われている。さらに、スイッチを押すだけで誰でも使える極低温冷却が可能になると期待されている。しかし熱い電子をより多く引き抜くために1層の透過率を増やすと、 $E <$ を持つ冷たい電子に対するアンドレーエフ反射が支配的となる。アンドレーエフ反射とは、上向きスピンの電子を下向きスピンのホールとして反射することでクーパ対を生み出す過程である。その結果N中でアンドレーエフジュール熱が発生し冷却性能が低下する。そして、このことは実用化のための深刻な障害となっていた。

2. 研究の目的

本研究においては、トポロジカル物質の持つ得意なスピン物性を積極的に利用して高効率な固体電子冷却機が実現することを理論的に示す。また、微小超伝導体、トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、トポロジカル超伝導体接合系の熱輸送及び量子輸送理論を構築し、トポロジカル性が微小デバイスの熱及び量子輸送に与える影響を明らかにする。

3. 研究の方法

微視的ハミルトニアン及び散乱状態を記述する Bogoliubov-de Gennes 方程式に基づく、金属/トポロジカル絶縁体/超伝導接合等の微小トポロジカル物質や微小超伝導接合における熱輸送理論を構築する。その結果を基に、現実的モデルに基づいた熱シミュレーションを行う。また、トポロジカル超伝導体のジョセフソン効果や、奇周波周長伝導体のマイスナー効果等についても場の理論や準古典グリーン関数法を用いて計算を行う。

4. 研究成果

(1) ワイル半金属/超伝導体接合を利用した固体電子冷却機の理論

トポロジカル物質と超伝導体が接合した系における量子及び熱輸送理論の構築を行った。具体的には、トポロジカル絶縁体/超伝導体接合やワイル半金属/超伝導体接合のモデリングを行い、それら接合系についての Bogoliubov-de Gennes 方程式を数値的に解くことによって熱流を計算した。3次元トポロジカル絶縁体/超伝導体接合についての熱流の計算結果より、冷却効果が発生することが

明らかになった。また、近接効果によって誘起されるワイル半金属/超伝導接合モデルについても冷却効果が現れ、2つのワイル点の波数空間での相対位置によって熱流の振る舞いが異なることが明らかになった。その結果 Andreev 反射が抑えられるような相対位置にワイル点があるときに熱流は最大となり、ワイル点の相対位置によっては効率的な冷却が可能となることも明らかになった。また、ワイル半金属/絶縁体/超伝導体からなる接合において、輸送方向が2つのワイル点を結ぶ線分と平行方向である場合についても調べた。その結果熱流の透過率依存性は従来のNIS接合のものと定性的に同じになることが明らかになった。また、スピン軌道相互作用の強さによっても熱流が変化することが明らかになった。ワイル半金属中のスピン軌道相互作用が大きくなると Andreev 反射が抑えられていることが既に示されているが、熱流に関してはスピン軌道相互作用が小さいときに熱流の値が大きくなることが明らかになった。

(2) カイラル超伝導体の量子輸送理論

カイラル超伝導体/金属/カイラル超伝導体接合における量子輸送理論を構築し、マヨラナ束縛状態が界面に形成されることによって異常ジョセフソン電流が流れることを明らかにした。また表面ランダムネスが存在する微小カイラル超伝導体における自発的エッジ電流について理論的に研究を行い、端電流の振る舞いはオーダーパラメータの性質に強く依存することを明らかにした。また、カイラルp波超伝導体及びカイラルd波超伝導体の場合は、表面ラフネスに対して端電流はロバストであることを明らかにした。また超伝導と量子ドットが接合した系における奇周波数クーパ対を制御、検出する方法を提案した。準古典グリーン関数法を用いて、乱れた異方的超伝導体/金属接合におけるトンネルコンダクタンスをセルフコンシステントに計算し、乱れの効果でゼロバイアスコンダクタンスピークが大きな影響を受けることを明らかにした。そしてこの結果は、界面における奇周波数クーパ対の生成と関連があることを明らかにした。

(3) 微小超伝導素子の量子輸送理論

超伝導単一電子素子の電子輸送に対する非平衡熱準粒子の影響について研究を行い、熱準粒子による過剰発熱が量子輸送に大きな影響を与えることを明らかにした。さらに磁場を印加することにより、近接効果が変調を受け、熱準粒子の数が減ることを明らかにした。それにより、超伝導単一電子素子が高精度な電流標準器として機能することを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 20 件)

A. S. Vasenko, S. Kawabata, A. Ozaeta, A. A. Golubov, V. S. Stolyarov, F. S. Bergeret, F. W. J. Hekkin, Detection of small exchange fields in S/F structures, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 383 (2015) 175-179, DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.11.009

S. Kawabata, A. S. Vasenko, A. Ozaeta, F. S. Bergeret, F. W. J. Hekking, Heat transport and electron cooling in ballistic normal-metal/spinfilter/superconductor junctions, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 383(2015) 157-161, DOI: 10.1016/j.jmmm.2014.10.032

Ya.V. Fominov, Y. Tanaka, Y. Asano, M. Eschrig, Odd-frequency superconducting states with different types of Meissner response: problem of coexistence, *Phys. Rev. B* 91(2015) 144514(1)-(14), DOI:10.1103/PhysRevB.91.144514

S. Ikegaya, Y. Asano, Y. Tanaka, Anomalous proximity effect and theoretical design for its realization, *Phys. Rev. B* 91(2015) 174511(1)-(6), DOI: 10.1103/PhysRevB.91.174511

M. Snelder, A. A. Golubov, Y. Asano, A. Brinkman, Observability of surface Andreev bound states in a topological insulator in proximity to an s-wave superconductor, *Journal of physics: Condensed Matter* 27 (2015) 315701(1)-(9), DOI:10.1088/0953-8984/27/31/31570

S. S. Mou, H. Irie, Y. Asano, K. Akahane, H. Nakajima, H. Kumano M. Sasaki , A. Murayama, I. Suemune, Time-resolved measurements of Cooper-pair radiative recombination in InAs quantum Dots, *Journal of Applied Physics* 118(2015) 073102(1)-(7), DOI: 10.1063/1.4928621

S. S. Mou, H. Irie, Y. Asano, K. Akahane, H. Nakajima, H. Kumano M. Sasaki , A. Murayama, I. Suemune, Optical Observation of Superconducting Density of States in Luminescence Spectra of InAs Quantum Dots, *Phys. Rev. B* 92(2015) 035308(1)-(9), DOI: 10.1103/PhysRevB.92.035308

K. Saitoh, S. Kashiwaya, H. Kashiwaya, Y. Mawatari, Y. Asano, Y. Tanaka, Y. Maeno, Inversion symmetry of Josephson current as test of chiral domain wall motion in Sr₂RuO₄, *Phys. Rev. B* 92(2015)100504R(1)-(6), DOI:10.1103/PhysRevB.92.100504

Y. Asano, A. Sasaki, Inversion

symmetry of Josephson current as test of chiral domain wall motion in Sr₂RuO₄, *Phys. Rev. B* 92 (2015) 224508 (1)-(11), DOI:10.1103/PhysRevB.92.224508

P. Burset, B. Lu, H. Ebisu, Y. Asano, Y. Tanaka, All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots, *Physical Review B* 93(2016) 201402R(1)-(6), DOI:10.1103/PhysRevB.93.201402

S. Ikegaya and Y. Asano, Degeneracy of Majorana bound states and fractional Josephson effect in a dirty SNS junction, *Journal of Physics: Condensed Matter* 28(2016) 375702(1)-(6), DOI:10.1088/0953-8984/28/37/375702

B. Lu P. Burset, Y. Tanuma, A. A. Golubov, Y. Asano, Y. Tanaka, Influence of the impurity scattering on charge transport in unconventional superconductor junctions, *Physical Review B* 94(2016) 014504(1)-(9), DOI:10.1103/PhysRevB.94.014504

S. Ikegaya, S.-I. Suzuki, Y. Tanaka, Y. Asano, Quantization of conductance minimum and index theorem, *Physical Review B* 94(2016) 54512(1)-(6), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.054512

S.-I. Suzuki, Y. Asano, Spontaneous Edge Current in a Small Chiral Superconductor with a Rough Surface, *Physical Review B* 94(2016) 155302(1)-(11), DOI: 10.1103/PhysRevB.94.155302

S. Konabe, S. Kawabata, T. Yamamoto, Thermoelectric properties of bilayer phosphorene under tensile strain, *Surface and Interface Analysis* 48(2016)1231-1234, DOI: 10.1002/sia.6094

K. Kawai, K. Yada, Y. Tanaka, Y. Asano, A. Golubov, S. Kashiwaya, Josephson effect in a multiorbital model for Sr₂RuO₄, *Physical Review B* 95(2017) 174518(1) ~ (11), DOI:10.1103/PhysRevB.95.174518

S. Ikegaya, Y. Asano, Stability of flat zero-energy states at the dirty surface of a nodal superconductor, *Physical Review B* 95(2017) 214503(1) ~ (11), DOI: 10.1103/PhysRevB.95.214503

K. Sakurai , S. Ikegaya , Y. Asano, Tunable- Josephson junction with a quantum anomalous Hall insulator, *Physical Review B* 96(2017) 224514(1) ~ (9), DOI:

10.1103/PhysRevB.96.224514
Y. Asano, A. Sasaki, A. Golubov, Dirty two-band superconductivity with interband pairing order, New Journal of Physics 20(2018) 043020 ~ 043020, DOI: 10.1088/1367-2630/aab954
Shuji Nakamura, Yuri A. Pashkin, Mathieu Taupin, Ville F. Maisi, Ivan M. Khaymovich, Alexander S. Mel'nikov, Joonas T. Peltonen, Jukka P. Pekola, Yuma Okazaki, Satoshi Kashiwaya, Shiro Kawabata, Andrey S. Vasenko, Jaw-Shen Tsai, Nobu-Hisa Kaneko, Interplay of the Inverse Proximity Effect and Magnetic Field in Out-of-Equilibrium Single-Electron Devices, Physical Review Applied 7(2017) 054021(1) ~ (10), DOI:10.1103/PhysRevApplied.7.054021

〔学会発表〕(計 11 件)

Y. Asano, Anomalous proximity effect and more than one Majorana fermion, 11th International Conference on Ceramic Materials Components for Energy and Environmental Applications (招待講演) (2015)

Y. Asano, Anomalous proximity effect and more than one Majorana fermion, 11th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity at the Nanoscale (招待講演) (2015)

Y. Asano, Paramagnetic response of small topological superconductors, International Conference on Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems (招待講演) (2015)

Y. Asano, Edge current in a small chiral superconductor, SPIE. photonics and spintronics 2016 (招待講演) (2016)

Y. Asano, Anomalous magnetic response and electric transport due to odd-frequency Cooper Pair International Conference on Superconducting hybrid nanostructures: physics and application (招待講演) (2016)

S. Kawabata, Superconducting spintronics, The 12th International School on Theoretical Physics Symmetry and Structural Properties of Condensed Matter, SSPCM 2016 (招待講演) (2016)
T. Tamaya, S. Konabe, S. Kawabata, Theory of higher-order harmonic generation in transition metal dichalcogenides and topological insulators, The 6th International

Conference on Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications (招待講演) (2017)

川畑史郎, 超伝導スピントロニクスデバイスの物理と応, 2017 年日本物理学会秋季大会 (招待講演)

Y. Asano, Dirty two-band superconductivity, The 6th International Conference on Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications(2017) (招待講演)

Y. Asano, Flat-band Andreev bound states and odd-frequency Cooper pairs Novel Quantum States in Condensed Matter 2017(2017) (招待講演)

Y. Asano, Dirty two-band superconductivity, International Conference on Oxide Superconducting spintronics 2017 (2017) (招待講演)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<https://staff.aist.go.jp/s-kawabata/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

川畑 史郎 (KAWABATA SHIRO)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・研究グループ長

研究者番号 : 30356852

(2)研究分担者

浅野 泰寛 (ASANO YASUHIRO)

北海道大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 20271637

(3)連携研究者

富永 淳二 (TOMINAGA JYUNJI)

産業技術総合研究所・ナノエレクトロニクス研究部門・首席研究員

研究者番号 : 10357577