

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287069

研究課題名(和文)トポロジカル超伝導体の常磁性マイスナー現象

研究課題名(英文)Paramagnetic Meissner effect in topological superconductors

研究代表者

浅野 泰寛 (ASANO, Yasuhiro)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20271637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：完全反磁性(マイスナー効果)は超伝導体の最も基本的な性質である。ところが超伝導体を小さくすると、常磁性を示す超伝導物質群が存在する。この常磁性マイスナー効果は幾つかの実験があるにもかかわらず、その発現機構は謎のままであった。本研究で我々は、異方的超伝導体(トポロジカル超伝導体)の表面には奇周波数クーパー対と呼ばれる特殊なクーパー対が現れること、また奇周波数クーパー対のために小さな異方的超伝導体は低温において常磁性を示す事を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The diamagnetism is a essential property of all superconductors. However, the paramagnetic response has been observed in a number of small superconductors. The mechanism and basic physical picture of the paramagnetic response has been an open question. In this project, we make clear (1) odd-frequency Cooper pairs appear at a surface of a topological superconductor, (2) odd-frequency Cooper pairs are paramagnetic, (3) therefore odd-frequency Cooper pairs are responsible for the paramagnetic response of a small topological superconductor at low temperature.

研究分野：物性理論特に超伝導現象論

キーワード：超伝導

1. 研究開始当初の背景

マイスナー効果（完全反磁性現象）は超伝導体が示す最も基本的な性質である。ところが超伝導体を小さくすると、常磁性を示す物質群が存在する。この常磁性マイスナー効果は幾つかの実験があるにもかかわらず、その発現機構は謎のままであった。

2. 研究の目的

研究代表者は、これまでに異方的超伝導体（=トポロジカル超伝導体）の表面には奇周波数クーパー対が現れること、また奇周波数クーパー対が常磁性的な性質を持つことを理論的に明らかにしてきた。本研究の目的は、常磁性マイスナー効果は奇周波数クーパー対が原因で発生するトポロジカル超伝導体に普遍的な現象であることを理論的に明らかにし、実証する事である。

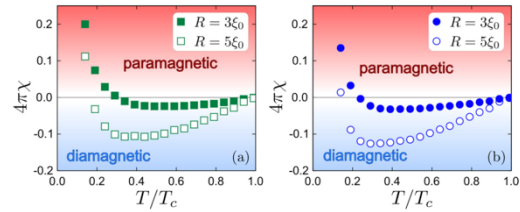
3. 研究の方法

(1) 円盤形の微小超伝導体において、準古典グリーン関数の満たす Eilenberger 方程式と、電磁場のみたす Maxwell 方程式を連立させて矛盾なく解き、微小超伝導体の磁気応答を理論的に明らかにする。超伝導の対称性は s 波、d 波、p 波を仮定し、円盤の大きさ、磁場侵入長の大きさをパラメータとして変化させ、円盤全体として常磁性マイスナー効果が起きる条件を明らかにする。第二臨界磁場の 1000 分の 1 程度の弱い外部磁場を導入して、円盤の局所的な磁化率と円盤全体の磁化率の温度変化を計算する。  
 (2) 奇周波数クーパー対は円盤の表面に現れる。実験では微小な超伝導試料を、微細加工技術を駆使することで作成している。その際、試料表面は決して滑らかな境界ではあり得ず、表面近傍におけるポテンシャルの乱れが奇周波数クーパー対に及ぼす影響を明らかにし、常磁性マイスナー効果にどのような修正を加えるのかを明らかにする。  
 (3) カイラル超伝導はルテニウム酸化物や遷移金属カルコゲナイドで発現すると考えられているが、その証拠であるカイラルエッジ電流はまだ観測されていない。2 次元円盤状のカイラル d 波、カイラル p 波、カイラル f 波超伝導体における、自発エッジ電流の典型的な大きさ、表面ラフネスの影響を、(1)-(2)で用いた方法を応用して調べる。またエッジ電流に対する奇周波数クーパー対の役割を明らかにする。

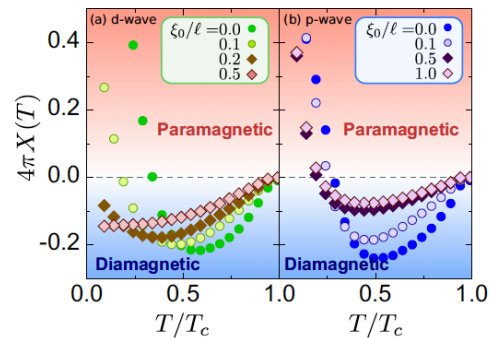
4. 研究成果

(1) 円盤の半径 (R) をコヒーレンス長 ( $\xi_0$ ) の数倍程度に設定し、円盤全体の磁化率を温度の関数と描いたのが下図である。左は d 波超伝導体、右は p 波超伝導体の結果である。共に転移温度直下では通常の反磁性を示すが、低温になると常磁性を示す。奇周波数クーパー対は空間的には円盤の表面に、またエネルギー的にはフェルミ準位直上に局在している

ために低温になると常磁性効果が顕著に表れる。円盤の半径を大きくすると低温常磁性相は消失し、超伝導体は通常のマイスナー効果を示すことになる。



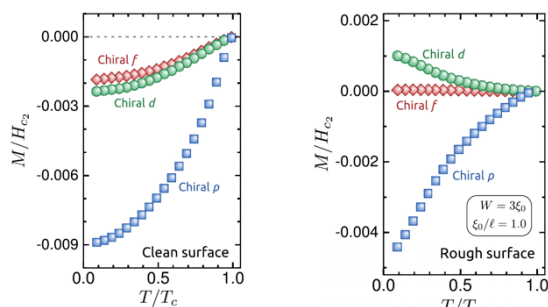
(2) 円盤の表面に乱れたポテンシャルを導入し、円盤全体の磁化率を温度の関数として計算したのが下図である。



円盤の半径をコヒーレンス長  $\xi_0$  の 10 倍にとり円盤表面から  $3\xi_0$  の範囲に乱れたポテンシャルを導入した。  $\xi_0/l$  は乱れの程度を表すパラメータであり、0 が乱れないばあい、  $\xi_0/l$  が増すに従って表面の乱れが強くなる。 d 波の場合、表面の乱れの増大に伴い常磁性マイスナー効果が消失する事が分かった。表面に現れる奇周波数クーパー対は主に p 波対称性を持っており、こうした異方的なクーパー対は乱れたポテンシャルの下では壊れてしまう事が原因である。その一方で p 波対称性の超伝導体は、乱れの程度によらず低温常磁性をしめす。この場合の奇周波数クーパー対は s 波対称性をもち、これがポテンシャルの乱れに対して安定に存在するからである。

(3) 円盤の半径をコヒーレンス長  $\xi_0$  の 10 倍にとり、外部磁場がゼロの場合にカイラルエッジ電流によって発生する磁化を温度の関数として示したのが下図左である。カイラル p 波超伝導体に比べ、カイラル d 波やカイラル f 波超伝導体の自発磁化は小さい。エッジ電流を流すチャンネルはカイラル p、カイラル d、カイラル f ではそれぞれ 1, 2, 3 であり、カイラル d、カイラル f では、2 つおよび 3 つのチャンネルが互いに反対向きの電流を運ぶ事が、その原因である。縦軸は第 2 臨界磁場で規格化してあるが、この程度の大きさの磁化を実験的に観測することは容易である。円盤表面から  $3\xi_0$  の範囲に乱れたポテンシャルを導入し、自発磁化を計算したのが下図右である。カイラル p 波の定性的な振る舞いは、表面ラフネスの有無に鈍感である。カイラル d 波の自発磁化は、表面ラフネスのためにその方向が逆転することが最大の特徴である。表

面ラフネスは2つのチャンネルのうち表面に近いチャンネルの寄与を抑制するためである。カイラルf波の自発磁化は、表面ラフネスのためにほぼ消えてしまうことが分かった。



偶周波数クーパ対と奇周波数クーパ対、あるいは偶パリティ・クーパ対と奇パリティ・クーパ対という2種類の異なる対称性のクーパ対の組がカイラルエッジ電流を流す事が分かった。この結論は準古典グリーン関数を用いた電流の表式を詳細に解析することによって得られた、重要な物理描像である。(4)時間反転対称性を保った異方的超伝導体の表面には高度に縮退した準粒子束縛状態(アンドレーエフ束縛状態)が現れる。アンドレーエフ束縛準粒子に伴って現れるのが奇周波数クーパ対である。(1)-(3)ではその磁気的性質を明らかにした。奇周波数クーパ対は電気伝導にも顕著な影響を及ぼすことが、我々の研究によって明らかになっており、それはむしろ準粒子の描像を用いて語られる。スピン3重項超伝導体の場合には、特にマヨラナ準粒子と呼ばれ極めて特殊な性質を示す束縛準粒子の存在が明らかになっている。その典型的な例が、常伝導体/超伝導体接合における完全伝導現象である。どれ程不純物ポテンシャルが強くても、ゼロバイアスにおける微分コンダクタンスはある量子化値(整数)をとる。この量子化値がアッティア・シンガーの指数で記述できることを我々は明らかにした。

## 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 28 件)

(1) S.-I. Suzuki and Y. Asano,

"Paramagnetic Instability of Small Topological Superconductors",

Physical Review B **89**, 184508(1)-(7) (2014).

DOI: 10.1103/PhysRevB.89.184508(査読有)

(2) Y. Asano, Ya. V. Fominov, and Y. Tanaka,

"Consequences of bulk odd-frequency superconducting states for classification of Cooper pairs"

Physical Review B **90**, 094512(1)-(8) (2014).

DOI: 10.1103/PhysRevB.90.094512(査読有)

(3) Ya. V. Fominov, Y. Tanaka, Y. Asano, M. Eschrig, "Odd-frequency superconducting states with different types of Meissner response: problem of coexistence "

Physical Review B **91**, 144514(1)-(14) (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevB.91.144514(査読有)

(4) S. Ikegaya, Y. Asano, and Y. Tanaka,

"Anomalous Proximity Effect and Theoretical Design for its Realization"

Physical Review B **91**, 174511(1)-(6) (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevB.91.174511(査読有)

(5) K. Katono, T. Taniguchi, K. Ichimura, Y. Kawashima, S. Tanda, and K. Yamamoto

"STM observation of charge stripe in metallic phase of  $\alpha$ -(BEDT-TTF)2I3"

Physical Review B **91**, 125110(1)-(10)

DOI: 10.1103/PhysRevB.91.125110 (査読有)

(6) S.-I. Suzuki and Y. Asano,

"Effects of Surface Roughness on Magnetic Property of Small Unconventional Superconductors"

Physical Review B **91**, 214510(1)-(10) (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevB.91.214510(査読有)

(7) K. Saito, 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  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ "

Physical Review B **92**, 100504R(1)-(6) (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevB.92.100504(査読有)

(8) H. Nobukane, T. Matsuyama, S. Tanda

"Topological electromagnetic response in the chiral superconductor  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ "

Physica B **460**, 168-170 (2015)

DOI:10.1016/j.physb.2014.11.062(査読有)

(9) Y. Asano, and A. Sasaki,

"Odd-frequency Cooper Pairs in Two-band Superconductors and their Magnetic Response"

Physical Review B **92**, 224508(1)-(11) (2015).

DOI: 10.1103/PhysRevB.92.224508(査読有)

(10) P. Bursat, B. Lu, H. Ebisu, Y. Asano, and Y. Tanaka,

"All-electrical generation and control of odd-frequency s-wave Cooper pairs in double quantum dots",

Physical Review B **93**, 201402R(1)-(6) (2016).

DOI: 10.1103/PhysRevB.93.201402(査読有)

(11) 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**, 375702(1)-(6) (2016).

DOI:10.1088/0953-8984/28/37/375702(査読有)

(12) S. Ikegaya, S.-I. Suzuki, Y. Tanaka, and Y. Asano,

"Quantization of conductance minimum and index theorem,

Physical Review B **94**, 054512(1)-(6) (2016),

DOI: 10.1103/PhysRevB.94.054512(査読有)

(13) S.-I. Suzuki and Y. Asano,

"Spontaneous Edge Current in a Small Chiral Superconductor with a Rough Surface",  
Physical Review B **94**, 155302(1)-(11) (2016).  
DOI: 10.1103/PhysRevB.94.155302(査読有)

〔学会発表〕(招待講演 計 8 件)

- (1) Y. Asano "Paramagnetic Meisner Effect in Small Unconventional Superconductors"  
"Physics and Applications of Superconducting Hybrid Nano-Engineered Devices",  
Grand Hotel Santamaria, Santa Maria di Castellabate, Italy,  
1 September, 2014 (31 August-4 September 2014).
- (2) Y. Asano, "Properties of Odd-frequency Pairs".  
日本物理学会秋の分科会, 領域 6 シンポジウム "Odd-frequency pairing -current status-"  
中部大学, 春日井  
2014 年 9 月 7 日 (2014 年 9 月 7 日-10 日).
- (3) Y. Asano, "Magnetic property of Odd-frequency Cooper Pairs",  
"International Conference on Topological Quantum Phenomena",  
Kyoto University, Kyoto, Japan,  
17 December, 2014 (16-20 December 2014).
- (4) Y. Asano, "Anomalous proximity effect and more than one Majorana fermion",  
"11th International Conference on Ceramic Materials Components for Energy and Environmental Applications".  
Hotel Hyatt Regency, Vancouver, Canada,  
16 June, 2015 (14-19 June, 2015).
- (5) Y. Asano "Paramagnetic response of small topological superconductors",  
A plenary talk in "International Conference on Interaction of Superconductivity and Magnetism in Nanosystems",  
Moscow State Institute of Steel and Alloys, Moscow, Russia,  
4 Sep, 2015 (2-4 Sep, 2015).
- (6) Y. Asano "Anomalous proximity effect and more than one Majorana fermion",  
"11th International Workshop on Nanomagnetism & Superconductivity at the Nanoscale,"  
Nuva Hotel Comarruga, Coma-Ruga, Spain,  
1 July, 2015 (29 Jun -3 July, 2015).
- (7) Y. Asano "Edge current in a small chiral superconductor",  
SPIE. photonics and spintronics 2016,  
San Diego Convention center, San Diego, U. S. A.,  
1 Sep, 2016 (28 Aug - 1 Sep, 2016).
- (8) Y. Asano "Anomalous magnetic response and electric transport due to odd-frequency Cooper pair",  
"International Conference on Superconducting hybrid nanostructures: physics and application",  
Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,  
23 Sep, 2016 (19-23 Sep, 2016).

〔その他〕

ホームページ等

<http://zvine->

[ap.eng.hokudai.ac.jp/~asano/index.html](http://zvine-ap.eng.hokudai.ac.jp/~asano/index.html)

## 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 工学研究院 准教授

研究者番号 : 20271637

### (2) 研究分担者

延兼 啓純 (NOBUKANR Hiroyoshi)

北海道大学 大学院 理学研究院 助教

研究者番号 : 60550663

丹田 聡 (TANDA Satoshi)

北海道大学 大学院 工学研究院 教授

研究者番号 : 80217215

### (3) 連携研究者

網塚 浩 (AMITSUKA Hiroshi)

北海道大学 大学院 理学研究院 教授

研究者番号 : 40212576