

令和 6 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18683

研究課題名（和文）マイクロ波円偏光空洞共振器を用いたカイラル超伝導体の自発磁化の検出

研究課題名（英文）Detection of spontaneous magnetization in chiral superconductors using a circularly polarized microwave cavity

研究代表者

橋本 顕一郎（Hashimoto, Kenichiro）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00634982

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、カイラル超伝導体の新たな検証方法を確認するために、誘電体であるルチルを用いた高いQ値をもつ円偏波空洞共振器を開発した。この共振器を用いれば、カイラル超伝導体が見せる微小な自発磁化を高感度に検出可能である。本研究では、テスト測定として、磁場下でビスマス微小単結晶試料のホール伝導度測定を行い、円偏波共振器によって、伝導度テンソルの非対角成分を検出できることを実証した。今後は、希釈冷凍機温度で動作する円偏波共振器を構築し、カイラル超伝導実現の是非を徹底的に検証する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カイラル超伝導体はトポロジカル超伝導体の代表的な候補物質であり、試料表面にマヨラナ粒子が現れることが理論的に指摘されており、その理解はトポロジカル量子計算への応用の観点からも極めて重要である。しかしながら、カイラル超伝導体の検証は実験的に極めて困難であり、候補物質はいくつも報告されているものの、実験的検証には至っていない。したがって、本研究により、カイラル超伝導体の理解が進めば、基礎物理学だけでなく、応用上の観点からも大きな進展が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a high-Q circularly polarized cavity using rutile, a dielectric material, to establish a new verification method for chiral superconductors. With this resonator, one can detect the tiny spontaneous magnetization expected in a chiral superconductor with high sensitivity. As a test measurement, we conducted Hall conductivity measurements on small single crystals of Bi under a magnetic field, demonstrating the ability of the circularly polarized resonator to detect the off-diagonal components of the conductivity tensor. We plan to construct a circularly polarized cavity operating at dilution refrigerator temperatures to thoroughly verify the feasibility of chiral superconductivity.

研究分野：超伝導

キーワード：カイラル超伝導 円偏波 共振器 マイクロ波 円二色性 自発磁化

1. 研究開始当初の背景

通常の s 波超伝導とは異なる対称性をもった非従来型超伝導体の研究は 30 年余りの長い歴史を持つが、近年、グラフェンやトポロジカル絶縁体の発見を契機に、これら非従来型超伝導体がトポロジーの観点から見直され、一部の非従来型超伝導体において、トポロジカル超伝導が実現する可能性が指摘されている。そのなかでも、超伝導秩序変数が実部と虚部からなり、時間反転対称性を破る形で縮退したカイラル超伝導体はトポロジカル超伝導体の代表的な候補物質であり、実験・理論の両面から大きな注目を集めている。カイラル超伝導体では、試料表面にマヨラナ粒子が現れることが理論的に指摘されており、カイラル超伝導体の理解は基礎物理学だけでなく、トポロジカル量子計算への応用の観点からも極めて重要である。

一般的にカイラル超伝導体の検証実験では、超伝導転移温度以下で生じる時間反転対称性の破れに伴う自発電流によって生じる微小な自発磁化を測定する手法が用いられる。これらの手法として、ミュオンスピン回転緩和法(μ SR)や極 Kerr 効果などが挙げられるが、大型試料が必要であったり、十分な測定感度を得ることが難しいことなどから、時間反転対称性の破れに伴う自発磁化の正確な検出は一般的に極めて困難である。実際、カイラル超伝導体の候補物質であるウラン系超伝導体 UPt_3 や UTe_2 では、時間反転対称性の破れに伴う自発磁化を検出したという実験結果が報告されているものの、互いに相容れない結果も報告されており、カイラル超伝導実現の是非は未解決のままである。そのため、これらの問題点を克服したカイラル超伝導体の新たな検証方法の確立が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、最近急速に進展している空洞共振器を用いたマイクロ波領域の円偏波技術に着目する。この手法では、円筒状の空洞をもった金属製の共振器内部に微小試料を挿入したうえで、右回りもしくは左回りのマイクロ波円偏波を入れることで、物質が持つ自発磁化を高感度に検出できる。そこで、本研究の目的を、マイクロ波円偏波空洞共振器を開発し、カイラル超伝導体の候補物質において期待される微小な自発磁化を高感度に検出し、カイラル超伝導実現の是非を徹底的に検証することとする。

3. 研究の方法

本研究では、低温で動作するマイクロ波円偏波空洞共振器を開発し、カイラル超伝導体の自発磁化を円二色性(右円偏波と左円偏波に対する応答の差)を通じて観測し、カイラル超伝導体を検証する方法を確立する。また、カイラル超伝導体で期待される微小な自発磁化の検出には共振周波数の測定分解能が重要となるため、マイクロ波共振器の Q 値を向上させることが必要不可欠となる。マイクロ波円偏波を用いた現在の研究では、 10^4 程度の Q 値を持つ銅製の共振器が用いられているが、本研究では、我々がこれまでに用いてきた誘電体ルチルによる共振器を用いて、 10^5 - 10^6 程度の Q 値を達成する。

4. 研究成果

本研究では、図 1(a)のように、透過型の円筒空洞共振器に位相遅れを導入できるハイブリッド・カップラーを組み合わせ、マイクロ波の出入口を入れ替えることで右回り円偏波と左回り円偏波を選択的に生成できるように設計し、さらに、PPMS(最低温度 2 K、最大磁場 7 T)に搭載できるようにした。入射波・透過波の切り替えは、ベクトルネットワーク・アナライザー上で操作可能であるため、試料を空洞共振器に挿入したまま、in situ での測定が可能となる。テストサンプルとして、磁場中でビスマスのマイクロ波領域のホール伝導度測定を行い、マイクロ波領域において、ビスマスのホール伝導度を高精度に測定できることを実証し(図 1(b))、その結果を論文投稿(arXiv:2404.09662)した。

今後は、希釈冷凍機温度で動作する円偏波共

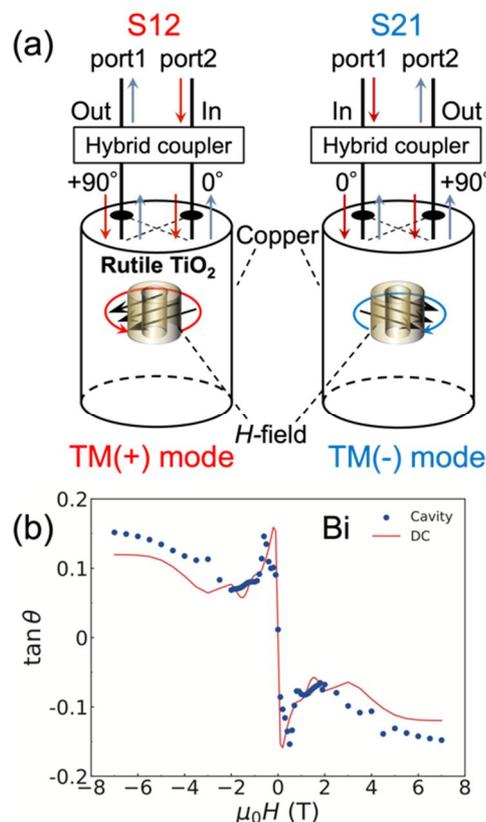


図 1: (a) 誘電体ルチルを用いたマイクロ波円偏波空洞共振器の概念図。試料はルチルの中央に円筒状にくりぬかれた空間の中央に配置する。(b) マイクロ波領域(4.2 GHz)における Bi のホール角($\tan\theta$)の磁場依存性。DC 測定の結果と良い一致を示している。

振器を構築し、カイラル超伝導実現の是非を検証する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ishida Kousuke, Onishi Yugo, Tsujii Masaya, Mukasa Kiyotaka, Qiu Mingwei, Saito Mikihiro, Sugimura Yuichi, Matsuura Kohei, Mizukami Yuta, Hashimoto Kenichiro, Shibauchi Takasada	4. 巻 119
2. 論文標題 Pure nematic quantum critical point accompanied by a superconducting dome	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2110501119-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2110501119	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Thomas Tatjana, Thyzel Tim, Sun Hungwei, Muller Jens, Hashimoto Kenichiro, Sasaki Takahiko, Yamamoto Hiroshi M.	4. 巻 105
2. 論文標題 Comparison of the charge-crystal and charge-glass state in geometrically frustrated organic conductors studied by fluctuation spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205111-1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.205111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hashimoto Kenichiro, Kobayashi Ryota, Ohkura Satoshi, Sasaki Satoru, Yoneyama Naoki, Suda Masayuki, Yamamoto Hiroshi M., Sasaki Takahiko	4. 巻 12
2. 論文標題 Optical Conductivity Spectra of Charge-Crystal and Charge-Glass States in a Series of -Type BEDT-TTF Compounds	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 831-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/cryst12060831	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Roppongi M., Ishihara K., Tanaka Y., Ogawa K., Okada K., Liu S., Mukasa K., Mizukami Y., Uwatoko Y., Grasset R., Konczykowski M., Ortiz B. R., Wilson S. D., Hashimoto K., Shibauchi T.	4. 巻 14
2. 論文標題 Bulk evidence of anisotropic s-wave pairing with no sign change in the kagome superconductor CsV3Sb5	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 667-1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-023-36273-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Watanabe Yoshito, Miyake Atsushi, Gen Masaki, Mizukami Yuta, Hashimoto Kenichiro, Shibauchi Takasada, Ikeda Akihiko, Tokunaga Masashi, Kurumaji Takashi, Tokunaga Yusuke, Arima Taka-hisa	4. 巻 14
2. 論文標題 Double dome structure of the Bose-Einstein condensation in diluted S=3/2 quantum magnets	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1260-1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-36725-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 K. Hashimoto
2. 発表標題 Randomness effect on charge glass formation in -type BEDT-TTF compounds
3. 学会等名 SPICE Workshop “New Spin on Molecular Quantum Materials” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本顕一郎
2. 発表標題 新規カゴメ格子超伝導体CsV ₃ Sb ₅ における符号反転のないs波超伝導
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本顕一郎
2. 発表標題 Superconductivity in copper-based MOFs
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	エコール・ポリテクニーク			
米国	UCサンタバーバラ大学			