

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14612

研究課題名（和文）異方的超伝導体におけるトポロジカル量子現象の研究

研究課題名（英文）Topological phenomena in unconventional superconductors

研究代表者

小林 伸吾 (Kobayashi, Shingo)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・研究員

研究者番号：40779675

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：異方的超伝導体は非s波クーパー対を持つ超伝導体であり、内部自由度により多様なクーパー対を実現する。多様なクーパー対は異方的超伝導体の物理を豊富にする一方で、実験的なクーパー対の決定は容易ではなく、多くの超伝導体のクーパー対が未解決である。本研究ではトポロジーの観点からクーパー対の検出法を提案した。トポロジーの解析は非s波クーパー対が表面において固有の外場応答を持つことを予言する。この性質を様々な結晶対称性を持つ超伝導体に対して証明し、外場応答と非s波クーパー対との間の対応表を作成した。また、 $j=3/2$ 超伝導：YPtBiや非共型超伝導：UCoGeにおいて本理論が有用であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果は、クーパー対の対称性が未解明であった物質において、物質表面の磁気応答を測るという新しい決定方法を与える。本手法は表面での電子状態のみが重要となるため、多軌道系などバルクで複雑な電子状態を持った系へも適用できる。例えば、YPtBiなど $j=3/2$ スピンを持つ電子によるクーパー対の決定法はまだ確立していないが、本手法はこのような系でも威力を発揮し $j=3/2$ スピンの効果を抽出することも可能である。また、本研究の別の視点からみるとマヨラナ粒子の制御法や操作法も確立でき、スピントロニクスや量子コンピュータへの応用にも貢献すると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Unconventional superconductors are those with non-s-wave Cooper pairs. While these pairs enhance the physics of unconventional superconductors, their experimental identification poses challenges. Despite extensive effort, determining the exact symmetry of Cooper pairs remains elusive in many unconventional superconductors. In this study, we propose a method for detecting Cooper pair symmetry through surface magnetic response. By using topological analysis, we found that unconventional superconductors possess topologically protected surface states, which display an anisotropic magnetic response. We established a direct connection between types of the magnetic responses and Cooper pair symmetry. We illustrated a distinct magnetic response in the case of $j=3/2$ superconductor YPtBi and nonsymmorphic superconductor UCoGe.

研究分野：物性理論

キーワード：異方的超伝導 マヨラナ準粒子 電磁気応答

1. 研究開始当初の背景

トポロジーとは、異なる2つの物が連続変形の下でつながるかを研究する数学である。トポロジカル不変量は物体のトポロジーを計る指標であり、トポロジカル不変量が異なる2つの物体は互いに連続変形でつながらないことを意味する。トポロジーの概念は超伝導研究へ波及し、トポロジカル不変量による超伝導体の特徴付けが行われている。非自明なトポロジカル不変量を持つ超伝導体はトポロジカル超伝導体と呼ばれ、その表面にはマヨラナ粒子と呼ばれる新奇粒子が現れる。マヨラナ粒子には、表面を流れる「マヨラナ粒子流」が現れる場合と表面に局在した「局在マヨラナ粒子」が現れる場合がある。

近年、多くの異方的超伝導体の表面に局在マヨラナ粒子が現れることが明らかになっている。ここで、異方的超伝導体は非s波クーパー対(p波やd波など)を持つ超伝導体(図1)である。例えば、高温超伝導体として知られる銅酸化物系やセリウム(Ce)やウラン(U)を含む金属化合物(重い電子系)などが異方的超伝導であることが知られている。異方的超伝導体の研究は、高温超伝導体のメカニズム解明だけでなくスピントロニクスや量子コンピュータなどの量子技術への応用も提案され重要性が高まっている。



図1 s波、p波、d波クーパー対を持つ超伝導体。

2. 研究の目的

重い電子系などで実現される異方的超伝導体はスピンや軌道自由度により多様なクーパー対を実現することが知られている。しかしながら、クーパー対の種類を実験的に決定することは容易ではなく、現在に至るまで多くの異方的超伝導体のクーパー対が未解決である。

本研究の目的はトポロジカル不変量から決まる局在マヨラナ粒子の物性を利用したクーパー対の対称性の決定法を提案することである。先行研究において、我々は局在マヨラナ粒子が磁場に対して異方的な応答を示すことを明らかにした。さらには、トポロジカル不変量がクーパー対の対称性の情報を持っていることを利用して、磁場応答からクーパー対の対称性を読み取れることを明らかにした。本研究では局在マヨラナ粒子の電磁気応答の理論を構築し、トポロジーの観点からクーパー対の対称性を検出する方法を提案する。

3. 研究の方法

局在マヨラナ粒子に関する研究手法は、Bogoliubov-de Gennes (BdG) 方程式による解析とトポロジカル不変量による解析がある。ここで、BdG方程式は表面を持つ超伝導体を記述する方程式であり、トポロジカル不変量は電子の波動関数の位相の情報である。前者は具体的な超伝導体で表面物性を予言するのに適し、後者はクーパー対の対称性の観点から物質パラメータに依らない普遍的な表面物性を予言するのに適している。本研究では、両方の手法を用いて局在マヨラナ粒子の電磁気応答を解析する。

また、超伝導物質はそれぞれの固有の結晶対称性を持っており、可能なクーパー対の種類は結晶対称性により決定される。本研究では可能な結晶対称性を全て考え局在マヨラナ粒子の電磁気応答とクーパー対の種類の間に対応表を構築する。

4. 研究成果

(1) 時間反転対称性を持つ異方的超伝導体における磁気応答の解明

時間反転対称性を持つ異方的超伝導体における局在マヨラナ粒子は対として現れる。この対はマヨラナクラマース対と呼ばれ、時間反転対称性に保護されている。我々はマヨラナクラマース対における磁気応答を調べ、以下のことを明らかにした。

- マヨラナクラマース対が1つ存在するとき、磁気双極子応答と磁気八極子応答が存在する（図2）。磁気八極子応答は物質中の電子の有効スピンの $j=3/2$ 、あるいは、系が非共型対称性と呼ばれる空間群を持つときにのみ現れる。
- マヨラナクラマース対が1つ存在するとき、磁気応答の種類と超伝導中のクーパー対の種類は一対一対応する。すなわち、局在マヨラナ粒子の磁気応答を検出すれば、超伝導内部のクーパー対の種類を決定することができる。

以上のことを示すためにマヨラナ粒子に関する多極子理論も構築した。本理論を利点は、具体的な理論模型を用いることなしに、結晶対称性とマヨラナ粒子の波動関数の情報のみから磁気応答の種類を決定できることである。本理論より導かれたマヨラナクラマース対の磁気応答種類とクーパー対の種類の間の一対一対応関係は本研究計画の主要な研究成果の一つである。

また、磁気応答の結果を $j=3/2$ トポロジカル超伝導: YPtBiへ適用し、磁気八極子応答の発現を理論的に実証した。

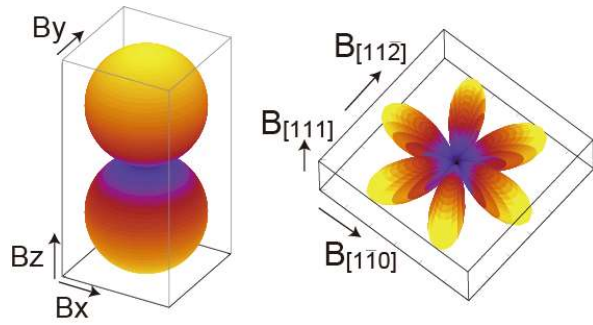


図2 磁場に対するマヨラナクラマース対の応答：磁気双極子応答（左）と磁気八極子応答（右）。色は磁場の効果の大きさを示している。

(2) 時間反転対称性を持つ異方的超伝導体における電氣的（歪み）応答の解明

(1)の研究では磁気応答を主に扱ってきた。これはマヨラナクラマース対が1つのとき、マヨラナ粒子が持つ自己共役性（粒子と反粒子が同値）より電氣的な応答が禁止されているためである。一方で、マヨラナクラマース対が2つ以上存在するとき、この制約は外れ、電氣的な応答が発現する可能性がある。また、電氣的な応答は例えば歪み応答として検出することが可能であり、磁場をかけることが困難な物質（臨界磁場の小さい超伝導体など）においても使える可能性がある。これらの理由から、我々はマヨラナクラマース対に対する歪み応答を調べた。以下に結果をまとめる。

- 空間群の下でマヨラナクラマース対が2対以上存在する条件を明らかにした。高い結晶対称性あるいは大きいトポロジカル数の下で2つ以上のマヨラナクラマース対が現れる。
- マヨラナクラマース対が2つ以上存在するとき、電氣的な応答が存在する。電氣的な応答の場合はクーパー対の種類と多対一の関係にあり、一つに絞ることはできないが、部分的なクーパー対の情報を得ることができる。

本理論をアンチペロブスカイトディラック金属のトポロジカル超伝導体へ適用した。この物質は高いトポロジカル数を持っており、2つのマヨラナクラマース対が現れる。我々は理論模型を用いて実際にマヨラナクラマース対と歪みが結合することを実証した。

(3) 時間反転対称性を破る異方的超伝導体における電磁気応答の解明

ここまで時間反転対称性を持つ超伝導体に焦点を当ててきた。最後に近年研究を行っている時間反転対称性を破る超伝導へ拡張した場合について述べる。時間反転対称性を破る場合は、マヨラナクラマース対は存在せず、通常単体のマヨラナ粒子が現れる。しかし、結晶対称性の下では、マヨラナ粒子が2つ以上存在する場合がある。このとき時間反転対称性がある場合と同様に電磁気応答が現れることが期待される。以下に結果をまとめる。

- 磁気点群の下でマヨラナ粒子が2つ以上存在する条件を明らかにした。高い磁気点群対称性あるいは大きいトポロジカル数の下で2つ以上のマヨラナ粒子が現れる。
- マヨラナ粒子が2つ以上存在するとき、磁気的と電気的な応答の両方が可能である。高い磁気点群対称性により2つ現れる場合はクーパー対の種類と一体一対関係が成り立つ。一方で、大きいトポロジカル数で2つ現れる場合はクーパー対の種類と対応しないが、ユニークな電気的な応答を示す。これは時間反転対称性を持った系にはなかった現象であり、時間反転対称性の自発的破れを特徴づけている。

本理論を強磁性超伝導体:UCoGeとカイラル超伝導体候補:UTe₂へ適用し、理論模型を用いて磁気四極子応答が現れることを実証した。ここで、磁気四極子応答は時間反転対称性が破れた系に固有の現象である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kim Dakyeong, Sato Takumi, Kobayashi Shingo, Asano Yasuhiro	4. 巻 92
2. 論文標題 Spin Susceptibility of a $J=3/2$ Superconductor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 054703(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.054703	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 Kim Dakyeong, Kobayashi Shingo, Asano Yasuhiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Josephson effect of superconductors with $J=3/2$ electrons	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184516(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.184516	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 Kobayashi Shingo, Yamazaki Yuki, Yamakage Ai, Sato Masatoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Majorana multipole response: General theory and application to wallpaper groups	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224504(1-23)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.224504	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 Yamazaki Yuki, Kobayashi Shingo, Yamakage Ai	4. 巻 90
2. 論文標題 Electric Multipoles of Double Majorana Kramers Pairs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 073701(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.073701	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 Kim Dakyeong, Kobayashi Shingo, Asano Yasuhiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Quasiparticle on Bogoliubov Fermi Surface and Odd-Frequency Cooper Pair	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 104708(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.104708	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 Ohashi Ryoji, Kobayashi Shingo, Tanaka Yukio	4. 巻 104
2. 論文標題 Possible topological phases in quantum anomalous Hall insulator/unconventional superconductor hybrid systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134518(1-12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.134518	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 Kobayashi Shingo, Furusaki Akira	4. 巻 102
2. 論文標題 Double Majorana vortex zero modes in superconducting topological crystalline insulators with surface rotation anomaly	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 180505(R)(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.180505	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 Yamazaki Yuki, Kobayashi Shingo, Yamakage Ai	4. 巻 103
2. 論文標題 Magnetic response of Majorana Kramers pairs with an order-two symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 094508(1-23)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.094508	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 角田峻太郎、小林伸吾	4. 巻 55
2. 論文標題 超伝導ギャップ構造の現代的分類理論	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 463-478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 山崎勇樹, 小林伸吾, 山影相	4. 巻 56
2. 論文標題 物質中のマヨラナ粒子の磁気異方性 映進対称性と四極子型の磁気応答	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 49-58
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kobayashi Shingo, Yamakage Ai, Tanaka Yukio, Sato Masatoshi	4. 巻 123
2. 論文標題 Majorana Multipole Response of Topological Superconductors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 097002(1-6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.123.097002	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 Yamazaki Yuki, Kobayashi Shingo, Yamakage Ai	4. 巻 89
2. 論文標題 Magnetic Response of Majorana Kramers Pairs Protected by Z2 Invariants	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 043703(1-5)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.89.043703	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 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 8件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ankita Bhattacharya, Carsten Timm, P. M. R. Brydon
2. 発表標題 Bogoliubov Fermi surfaces from pairing of $j=3/2$ fermions on the pyrochlore lattice
3. 学会等名 29th International Conference on Low temperature physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi
2. 発表標題 Theoretical study of Majorana particles in topological superconductors
3. 学会等名 100th CEMS Colloquium -The 9th CEMS Award Lectures - (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎勇樹, 小林伸吾, 山影相
2. 発表標題 時間反転対称性が破れたトポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準粒子の磁気応答
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤匠, 小林伸吾, 浅野泰寛
2. 発表標題 ボゴリューボフ・フェルミ面をもつ超伝導体における準粒子状態密度
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 トポロジカル超伝導におけるマヨラナ多極子応答
3. 学会等名 大阪大学藤本・水島研究室セミナー（オンライン）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎勇樹、小林伸吾、山影相
2. 発表標題 トポロジカル結晶超伝導におけるマヨラナクラマース対の歪みに対する応答
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会（オンライン大会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林伸吾、A. Bhattacharya、C. Timm、P. M. R. Brydon
2. 発表標題 パイロクロア格子中の $j=3/2$ 電子ペアによるボゴリューボフフェルミ面
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（オンライン大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金多景、小林伸吾、浅野泰寛
2. 発表標題 ボゴリューボフ・フェルミ面上の準粒子と奇周波数クーパー対
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会（オンライン大会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi and Akira Furusaki
2. 発表標題 Double Majorana vortex zero modes in superconducting topological crystalline insulators with surface rotation anomaly
3. 学会等名 APS March Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi and Akira Furusaki
2. 発表標題 Majorana vortex zero modes in superconducting topological crystalline insulators
3. 学会等名 Topological Superconductivity in Quantum Materials On-line Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Yamazaki, Shingo Kobayashi, and Ai Yamakage
2. 発表標題 Majorana Electric Quadrupole Response in Topological Crystalline Superconductors
3. 学会等名 Topological Superconductivity in Quantum Materials On-line Workshop (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 トポロジカル超伝導におけるマヨラナ多極子応答
3. 学会等名 物質・材料機構 WPI-MANAワークショップ(4)「超伝導物質、トポロジカル物質」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林伸吾、古崎昭
2. 発表標題 結晶対称性に保護された超伝導渦中のマヨラナ状態
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 マヨラナフラットバンドを有るトポロジカル超伝導体の理論研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会 領域4 若手奨励賞記念講演(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 Oxide Superspin workshop 2019 (OSS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 Swiss Japan bilateral workshop: Trends in Theory of Correlated Materials (TTCM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shingo Kobayashi, Ai Yamakage, Yukio Tanaka, and Masatoshi Sato
2. 発表標題 Majorana multipole response of topological superconductors
3. 学会等名 International Conference on Topological Materials Science 2019(TopoMat2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 ディラック半金属におけるトポロジカル超伝導
3. 学会等名 第11回トポロジー連携研究会「トポロジカル半金属」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 トポロジカル超伝導体におけるマヨラナ準粒子の多極子理論
3. 学会等名 京都大学基礎物理学研究所研究会「電子相関が生み出す超伝導現象の未解決問題と新しい潮流」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林伸吾、山崎勇樹、山影相、佐藤昌利
2. 発表標題 結晶対称性により保護されたマヨラナ準粒子の多極子応答
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林伸吾
2. 発表標題 マヨラナフラットバンドを有るトポロジカル超伝導体の理論研究
3. 学会等名 本物理学会 第75回年次大会 領域4 若手奨励賞記念講演（招待講演）
4. 発表年 2020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
---------	---------