

令和 5 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01857

研究課題名(和文) 多自由度を持つ電子系の超伝導体における奇周波数電子対の物理

研究課題名(英文) Physics of odd-frequency Cooper pairs in multi-band/orbital superconductors.

研究代表者

浅野 泰寛 (Asano, Yasuhiro)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：20271637

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：奇周波数電子対が超伝導現象に果たす役割を明らかにすることを目的として研究を実施した結果、以下のような成果を得ることができた。トポロジカルに非自明な状態であるボゴリューボフ・フェルミ面場の準粒子は必ず奇周波数電子対を伴うこと、対称性の低いs波 $J=3/2$ 超伝導は磁化率に非対角要素を持つこと、2軌道超伝導や $J=3/2$ 超伝導を記述する理論模型の多くが熱力学的に不安定な超伝導相を記述しており、その不安定さは奇周波数電子対の存在に起因すること、などである。さらに、異常近接効果はスピン3重項超伝導特有の現象ではなく、ゼロでないアッティヤ・シンガーの指数をもって特徴づけられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象とした多自由度超伝導は、トポロジカルに非自明な絶縁相や半金属相を土台に発現していると考えられており、新しいクラスの超伝導だと認識され始めている。既存の超伝導と何が質的に違うのかを明らかにすることは、トポロジカル物質の物理学の重要課題の一つであると言える。最近多自由度超伝導を表現する理論模型が調べられ始めているが、その特徴は多くの物質パラメータを含むことである。我々は、それらの模型の多くが熱力学的に不安定な超伝導相を記述していることを明らかにした。逆に言えば、実際の伝導体で発現する安定な超伝導を記述する模型が満たすべき条件を明らかにし解析の出発点を定めたことになる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to make clear roles of odd-frequency Cooper pairs on characteristic physical phenomena of in superconductors. Our research findings are as follows. Quasiparticles on the Bogoliubov-Fermi surface always accompany odd-frequency Cooper pairs. The magnetic susceptibility has off-diagonal elements when pseudospin-quintet states of a $j=3/2$ superconductor is characterized by an s-wave pair potential. Many Hamiltonians for two-band/orbital superconductivity and $j=3/2$ superconductivity describe unstable superconducting phases. The instability is derived from the existence of odd-frequency pairs in the bulk. Moreover, the anomalous proximity effect is not a unique property to spin-triplet superconductors but a common property of superconductors characterized by nonzero Atiyah-Singer indices.

研究分野：物性物理学

キーワード：超伝導

1. 研究開始当初の背景

超伝導体は、低温においてマイスナー効果やジョセフソン効果と呼ばれる電磁気学的に特異な現象を示す物質群である。超伝導状態を特徴付けるクーパー対(電子対)の存在を仮定すると、これらの現象の発現理由が自然に説明される。これまでに発見された超伝導体において、超伝導状態の対称性は以下の二種類に大別される。金属超伝導体や銅酸化物高温超伝導体で発現するスピン一重項・偶パリティの超伝導と、一部の重い電子系の物質で発現するスピン三重項・奇パリティの超伝導である。電子対を表現する対相関関数は、電子対を形成する 2 電子の消滅演算子の積を平均した量として定義される。電子はフェルミ統計に従うので、2 電子の交換の下で対相関関数は反対称になる必要がある。電子の演算子は空間座標とスピンの関数なので、電子対の対称性は、上記二種類の分類で尽きていると思われる。ところが、これら以外の第三の道が可能なことが Berezinskii [JETP Lett. 20, 287 (1974)] によって指摘された。電子の演算子はハイゼンベルグの運動方程式に従うため、対相関関数は‘時間’の自由度をもち、2 電子の相対時間に関して対相関関数が奇関数になっていればスピン三重項・偶パリティの場合でもフェルミ統計に抵触することなく電子対を形成できる、と云うのがその内容である。相対時間を周波数にフーリエ変換したとき、このような電子対の相関関数が周波数の奇関数になる事から、奇周波数電子対と呼ばれている。ところが、これまで発見された超伝導の対称性は上記の二種類のどちらかに分類され、超伝導秩序を担う電子対は偶周波数対称性に属する事が知られている。このように記すと、あたかも奇周波数電子対が存在しないかのような印象を与えるが、奇周波数電子対は多くの超伝導体内部において副次的な対相関として存在し、超伝導秩序の対称性を反映した物理現象を担っている。金属超伝導体に磁化が不均一な磁性体を接合した系で、スピン三重項 s 波対称性の奇周波数電子対が現れる事が、21 世紀初めに議論された [S. Bergeret et. al., PRL (2001)]. これとは独立に、申請者らが集中的に議論してきたのが異方的超伝導体(トポロジカルに非自明な超伝導体)の表面にアンドレーエフ束縛準粒子(トポロジカル表面状態)を伴って現れる奇周波数電子対である。我々は、奇周波数電子対が接合の電気伝導率やジョセフソン効果などの低エネルギー輸送現象を劇的に支配し異常近接効果を起こす事 [Y. Tanaka et. al., PRB 70, 012507 (2004). Y. Asano, et. al., PRL 96, 097007 (2006).]、最近話題のマヨラナ粒子はこの特別な場合に当たる事を示してきた。さらに最近、2 軌道 s 波超伝導体において、軌道間混成が空間的に一様な奇周波数電子対を生成する事が指摘された。これらの系で現れる奇周波数電子対は、常に対相関関数としてのみ表現され、超伝導秩序変数にはならないが、基底状態の一部を構成しているのである。マイスナー効果のように全ての超伝導体に共通する普遍的な超伝導現象と、超伝導秩序の対称性や物質固有のパラメータに依存する現象がある。奇周波数電子対は後者に対応する多彩な超伝導現象を担っていると申請者は推論している。実際アンドレーエフ束縛状態と関連する奇周波数電子対に関しては、この推論が概ね正しい事を示してきた。その一方、多軌道超伝導体に一様に現れる奇周波数電子対がどのような物理現象を担っているかが不明なままである。奇周波数電子対の物理を理解するために、その解明が必要であった。

2. 研究の目的

奇周波数電子対の性質を明らかにするために、課題とその目的を以下のように設定した。多自由度の電子系で発現する超伝導において、奇周波数電子対が転移温度、軌道帯磁率、スピン帯磁率、電気伝導率などの物理量に及ぼす影響を理論的に解明する。スピン軌道相互作用を強めた薄膜状の銅酸化物高温超伝導体の表面束縛状態を伴う奇周波数電子対とトポロジカル数の関係を調べ、異常近接効果を引き起こす奇周波数電子対を表現する数理論を解明する。これらの課題を実施し、奇周波数電子対が引き起こす物理現象を明らかにする事によって、その存在を合理的に解釈する物理描像を結び、超伝導現象論を深化させる事が研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 多自由度電子系の奇周波数電子対

様々な 2 軌道模型のゴロコフ方程式を解析的に解き、空間的に一様な奇周波数電子対がジョセフソン電流、軌道帯磁率、スピン帯磁率などの物理量に及ぼす影響を明らかにする。

(2) $J=3/2$ 電子系の奇周波数電子対

YPtBi や LuPtBi のようなホイスラー半金属では、強いスピン軌道相互作用のために電子の軌道部とスピンの合成角運動量 J によって電子状態が記述される。 $J=3/2$ の電子が電子対を作ると、五重項や七重項といった角運動量の大きな電子対が現れる。特に時間反転対称性が破れた超伝導体内部では、準粒子がフェルミ面(ボゴリューボフ・フェルミ面:BFS)を形成する事が知られている。これまでの知見では、ギャップ以下のエネルギーを持つ準粒子は全て奇周波数電子対を伴っており、BFSを形成する準粒子も例外ではない。ゴロコフ方程式を解き線形応答係数を計算し、角運動量の大きな奇周波数電子対が支配する物理現象を解明する。

(3) スピン一重項超伝導体の異常近接効果

奇周波数電子対が起こす物理現象のハイライトは、スピン 3 重項 p 波超伝導体の接合で起きる異常近接効果であり、トポロジカル数やアッティアー-シンガーの指数といった数学の道具を用いて理解されている。電子のスピン自由度をうまく操ったときに起きる異常近接効果と指数定理の関係調べ、背景をなす数理構造を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 奇周波数電子対を副次的な相関として含むような 2 軌道超伝導状態はいくらでも考えることができる。しかしゴルコフ方程式が解析的に解けるようなモデルは極めて限られていることがわかった。鉄系超伝導を念頭に置いた 2 軌道モデルを用いて、二つの 2 軌道超伝導体の間に流れるジョセフソン電流を調べたところ、奇周波数電子対が担う電流は、超伝導秩序を形成する偶周波数電子対が流す電流と、常に逆向きに流れることがわかった。奇周波数電子対の割合を増すために軌道間混成を大きくすると、ギャップ方程式の解が BCS 理論から逸脱することを見出した。それが故に、軌道帯磁率やスピン帯磁率の計算を安定して行うことができなかった。しかし、この時点では事態の背景を把握できていなかった。大変重要な結論につながるこの知見の意味が分かり始めたのは 2023 年になってからである。

あるトポロジカル絶縁体は金属元素をドーピングすることによって金属化し、低温で超伝導を示すことが知られている。この物質に関しては常伝導状態の電子構造はよく解析され、s 波対称性の超伝導秩序パラメータの候補もいくつか絞られ、その中には奇周波数電子対を副次的な相関として含むペアポテンシャルがあった。これら現実の超伝導体の物質パラメータを用いたモデルにおいて、超伝導の不純物散乱に対する頑強性を調べた結果、単純な 2 軌道モデルで得られた主要な結論と完全に整合する結果を得ることができた。しかし、残った課題もある。クリーン極限で奇周波数電子対が副次的な相関として存在すると、s 波超伝導が不純物散乱に対して脆弱になるといふ理由が不明のままである。

(2) $J=3/2$ 電子系の超伝導状態を表現するツールが整備されている擬スピン 5 重項偶パリティ状態に焦点を当てて研究を行った。まず、トンネルハミルトニアンを用いた線形応答の範囲で、擬スピン 5 重項状態のジョセフソン電流公式を導いた。ゴルコフ方程式の解を公式に代入したところ以下のことがわかった。まず奇周波数電子対が存在しない場合は結果が単純で、スピン 3 重項超伝導体の場合とよく似通った電流の表式 $J \propto \eta_L \cdot \eta_R \sin \varphi$ を得た、ここで η は 5 重項超伝導秩序を表現する 5 次元のベクトルである。公式は、二つの超伝導体の秩序パラメータが擬スピン空間で直交すると電流が消失するという選択則を表している。次に奇周波数電子対が副次的に存在する場合、奇周波数電子対は支配的な偶周波数電子対が担う電流とは逆向きの電流を担うことがわかった。これは 2 軌道モデルの場合と同じ結論である。選択則が効いて支配的な電子対が電流に寄与しない場合には、しかし、奇周波数電子対は流れの方向を変えられることがわかった。ある代数的な関係式がこの事実を表現しているが、物理的な解釈がまだうまくできていない。

時間反転対称性を破る $J=3/2$ 超伝導状態は、いくつかの条件を満たすと、超伝導状態であるのにもかかわらず準粒子ボゴリューボフ・フェルミ面(BFS)を形成する。常伝導状態は擬スピン空間における 5 次元のベクトル ϵ を用いて表現される。 $\eta \parallel \epsilon$ が擬スピン空間と波数空間のいたるところで満たされると、奇周波数電子対は現れないことがわかっていて、逆にこの条件が満たされなければ奇周波数電子対は遍く現れる存在なのである。解析の結果、奇周波数電子対の存在条件に、時間反転対称性の破れなどの付加条件を課すと BFS が現れる条件に一致することが明らかになった。すなわち BFS 上の準粒子は奇周波数電子対の特別な場合に当たる。

我々は、奇周波数電子対が現れる場合（例えば η と ϵ が平行でない）に、ゴルコフ方程式の解である異常グリーン関数が極めて複雑な表式になることに気づいており、これが原因で物理量の計算が簡単ではないことに悩まされていた。特にギャップ方程式が複雑になったために、いつも安定な解があることを安易に仮定できない事が研究遂行の上で大きな障害になっていた。磁化率を調べる際には、まず奇周波数クーパ対の存在しない超伝導状態に焦点を絞り、電子対の角運動量が多い事 ($J=2$) が磁化率に及ぼす影響を調べることにした。その結果、対称性の高い 5 重項状態は、磁化率が等方的で温度の低下に伴って減少することがわかった。この性質は対称性の高いスピン 3 重項超流動 $^3\text{He-B}$ 相の磁化率に見られる性質と同様である。一方で、低い対称性の超伝導状態の中で、複数の η ベクトル成分が s 波対称性秩序を持つ場合、磁化率に非対角成分が現れることがわかった。スピン $1/2$ の s 波超伝導は必ずスピン 1 重項に属するので、電子対はスピンを持たない。これが磁化率に非対角成分が現れない理由であった。しかし 5 重項状態の電子対は $J=2$ を持っているのである。したがって、非対角成分が有限に残ることは $J=3/2$ 超伝導を特徴づける性質である。

(3) 我はこれまでに、スピン 3 重項超伝導体が異常近接効果を示すことを発見し、位相幾何学や解析学で議論されたアッティアー・シンガーの指数（以後 N_{ZES} と記す）がゼロでない有限の値になることを用いてその発現機構を説明してきた。逆にこの指数がゼロでない超伝導体を人工的に細工できれば、スピン 3 重項超伝導体がなくても異常近接効果を実証できるはずである。この推論に基づいて、銅酸化物薄膜にスピン軌道相互作用を導入したモデルを仮定し N_{ZES} が有限に残る原因を考察した。銅酸化物高温超伝導体はスピン 1 重項 d 波対称性に属する。スピン軌道相互作用が働いた結果、スピン 3 重項 p 波電子対が副次的な相

関としてバルクに生成するのである。こうした超伝導体の端では、スピン 1 重項 d 波電子対からスピン 1 重項 p 波電子対が生成し、スピン 3 重項 p 波電子対からスピン 3 重項 s 波電子対が生成する。生成した電子対はともに奇周波数対称性に属し、特に後者が異常近接効果を起こす。この結論は、直ちに数値シミュレーションによって裏付けられた。すなわち、汚れた NS 接合のゼロバイアス・コンダクタンスが N_{ZES} で特徴付けられる値に量子化する。したがって、ゼロでないアッティアー・シンガーの指数こそが異常近接効果の背景に潜む数理構造を表現していることがわかった。

(4) 当初の研究計画にはなかった課題であり本研究が計画通りに進まない理由でもあるのが、奇周波数電子対による超伝導状態の不安定化である。特に、高温領域でこの傾向が顕著であった。この理由を探るために、反磁性を保証するマイスナー核や自由エネルギーを温度の関数として調べることにした。その結果、奇周波数電子対の存在のため、高温領域でマイスナー核を大きく減少する一方、零度近傍ではマイスナー核はあまり変わらないために、転移点で秩序変数が不連続に変化する、すなわち 1 次転移的になることがわかった。2 軌道超伝導や $J=3/2$ 超伝導だけでなく、ゼーマン場中の超伝導体にも同様な性質があることが以前から知られていた。奇周波数電子対に焦点を当てると、異なる超伝導状態が不安定化する要因を統一的に理解することができた。この点に関して、現在論文を執筆中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 A. Sasaki, S. Ikegaya, T. Habe, A. A. Golubov, and Y. Asanp	4. 巻 101
2. 論文標題 Josephson effect in two-band superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 184601(1)-(8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.184501	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 Sakurai Keimei, Mercaldo Maria Teresa, Kobayashi Shingo, Yamakage Ai, Ikegaya Satoshi, Habe Tetsuro, Kotetes Panagiotis, Cuoco Mario, Asano Yasuhiro	4. 巻 101
2. 論文標題 Nodal Andreev spectra in multi-Majorana three-terminal Josephson junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 174506(1)-(19)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.174506	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 Ikegaya S., Yada K., Tanaka Y., Kashiwaya S., Asano Y., Manske D.	4. 巻 101
2. 論文標題 Identification of spin-triplet superconductivity through a helical-chiral phase transition in Sr ₂ RuO ₄ thin films	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 220501R(1)-(6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.220501	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 Sato Takumi, Asano Yasuhiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Superconductivity in Cu-doped Bi ₂ Se ₃ with potential disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 024516(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.024516	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 Mizushima Takeshi, Yasui Shigehiro, Nitta Muneto	4. 巻 2
2. 論文標題 Critical end point and universality class of neutron superfluids in neutron stars	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 013194(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013194	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 -

1. 著者名 Fukaya Yuri, Yada Keiji, Tanaka Yukio, Gentile Paola, Cuoco Mario	4. 巻 102
2. 論文標題 Orbital tunable 0- π transitions in Josephson junctions with noncentrosymmetric topological superconductors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 144512(1)-(12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.144512	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 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 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 ~ 104708
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 Lee Jaechul, Ikegaya Satoshi, Asano Yasuhiro	4. 巻 103
2. 論文標題 Odd-parity pairing correlations in a d-wave superconductor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104509(1)-(12)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.104509	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 Ikegaya Satoshi, Lee Jaechul, Schnyder Andreas P., Asano Yasuhiro	4. 巻 104
2. 論文標題 Strong anomalous proximity effect from spin-singlet superconductors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L020502(1)-(6)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.104.L020502	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 Suzuki Shu-ichiro, Sato Takumi, Asano Yasuhiro	4. 巻 106
2. 論文標題 Odd-frequency Cooper pair around a magnetic impurity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 104518(1)-(13)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.104518	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, 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 Maeno Koki, Kawaguchi Yuki, Asano Yasuhiro, Kobayashi Shingo	4. 巻 107
2. 論文標題 Nuclear spin relaxation rate of nonunitary Dirac and Weyl superconductors	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064511(1)-(17)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.064511	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 Mizushima Takeshi, Tamura Shun, Yada Keiji, Tanaka Yukio	4. 巻 107
2. 論文標題 Odd-frequency pairs and anomalous proximity effect in nematic and chiral states of superconducting topological insulators	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064504(1)-(10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.107.064504	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 Tanaka Yukio, Kokkeler Tim, Golubov Alexander	4. 巻 105
2. 論文標題 Theory of proximity effect in s+ p-wave superconductor junctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 214512(1)-(15)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.105.214512	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 Tanaka Yukio, Tamura Shun	4. 巻 34
2. 論文標題 Theory of Surface Andreev Bound States and Odd-Frequency Pairing in Superconductor Junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Superconductivity and Novel Magnetism	6. 最初と最後の頁 1677 ~ 1694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10948-020-05672-2	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 Matsushita Taiki、Fujimoto Satoshi、Schnyder Andreas P.	4. 巻 2
2. 論文標題 Topological piezoelectric effect and parity anomaly in nodal line semimetals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 043311(1)-(11)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.043311	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9件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Y. Asano
2. 発表標題 Josephson Effect of two-band/orbital superconductors
3. 学会等名 Topological Superconductivity in Quantum Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Dakyeong Kim, Shingo Kobayashi, and Yasuhiro Asano
2. 発表標題 Quasiparticle on Bogoliubov Fermi Surface and Odd-Frequency Cooper Pair
3. 学会等名 Dakyeong Kim, Shingo Kobayashi, and Yasuhiro Asano Oxide Superspin workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金多景, 小林伸吾, 浅野泰寛
2. 発表標題 高角運動量を有するクーパー対による超伝導体のジョセフソン効果
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 J. Lee, S. Ikegaya, and Y. Asano
2. 発表標題 Odd-parity pairing correlations in a d-wave superconductor
3. 学会等名 日本物理学会 2021年年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤匠、浅野泰寛
2. 発表標題 汚れた $Cu_xBi_2Se_3$ における超伝導
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020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 Takumi Sato and Yasuhiro Asano
2. 発表標題 Superconductivity in Cu-doped Bi_2Se_3 with potential disorder
3. 学会等名 JSPS-EPSC-CNR/SPIN-IBS Core-to-Core Workshop Oxide Superspin 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shu-Ichiro Suzuki, Takumi Sato, and Yasuhiro Asano
2. 発表標題 Odd-frequency Cooper pairing correlations around magnetic impurities
3. 学会等名 29th International Conference on Low Temperature Physics (LT29)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Sato, Shingo Kobayashi, and Yasuhiro Asano
2. 発表標題 Quasiparticle density of states in a superconductor with Bogoliubov Fermi Surfaces
3. 学会等名 JSPS-EPSC-CNR/SPIN-IBS Core-to-Core Workshop Oxide Superspin 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yasuhiro Asano	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 132
3. 書名 Andreev Reflection in Superconducting Junctions	

〔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
研究 分担者	田仲 由喜夫 (Tanaka Yukio) (40212039)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	水島 健 (Mizushima Takeshi) (50379707)	大阪大学・基礎工学研究科・准教授 (14401)	

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			
オランダ	University of Twente			
イタリア	University of Salerno			
ドイツ	Max Planck Institute			