

令和 3 年 5 月 18 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2020

課題番号：15K05172

研究課題名(和文) 制限空間で実現する新奇超伝導

研究課題名(英文) Novel superconductivity realized in restricted geometry

研究代表者

東谷 誠二 (Higashitani, Seiji)

広島大学・先進理工系科学研究科(総)・教授

研究者番号：70304368

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)：超伝導状態は、一般に、偶周波数状態と奇周波数状態に大別される。後者の超伝導状態を担うクーパー対は、同時刻相関をもたないという特殊な性質をもつ。本研究は、偶周波数と奇周波数クーパー対が共存する超伝導系の物理に関する基礎研究である。本研究によって、超伝導薄膜等に見られる共存状態において安定化する、自発電流を伴う新奇超伝導状態に対する表面散乱の効果やフェルミ面の形状効果に関する新たな知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

薄膜や細線などの制限空間で実現する超伝導状態では、表面の存在が系全体の物性を決める重要な要素となる。しかしながら、超伝導体の表面効果を議論した従来の理論の多くは、数学的な複雑さを避けるため、鏡面的な(ラフネスのない完全に平坦な)表面を仮定している。本研究では、表面のラフネスによる散漫的な電子散乱が超伝導に及ぼす影響を詳しく調べた。このような基礎研究は、今後の超伝導デバイス等の研究開発に資するものであり、応用上も重要である。

研究成果の概要(英文)：Superconducting states are generally classified into even-frequency and odd-frequency states. Cooper pairs in the latter state have a special property that they do not have equal-time correlation. The present study is a fundamental research on the physics of superconducting systems in which even-frequency and odd-frequency Cooper pairs coexist. In this study, we have obtained new insights into the effect of surface scattering and the shape effect of Fermi surfaces on a novel superconducting state with spontaneous current, which is stabilized in the coexisting state, such as realized in superconducting thin films.

研究分野：物性理論

キーワード：奇周波数クーパー対 アンドレーエフ束縛状態 超伝導 超流動 表面効果 サイズ効果 時間反転対称性の破れ 自発表面電流

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

奇周波数超伝導の研究を遡ると、Berezinskii に行き着く[1]。1974年に彼は、超流動 ^3He の非従来型超流動に関連して、同時刻相関をもたない奇周波数クーパ対の凝縮状態という新しい概念を提案した。その後の研究から超流動 ^3He は偶周波数 p 波超流動であることが確立したが、Berezinskii が提案した奇周波数状態は、21 世紀に入って再び注目を集めることになる。2001 年に Bergeret らによって、強磁性体と超伝導体の接合系に奇周波数クーパ対が形成されることが指摘されたのである[2]。彼らの論文を契機にした奇周波数超伝導の研究は、超伝導スピントロニクス研究とも相俟って[3]、近年大きな広がりを見せている。

奇周波数状態は特異な磁気応答を示す。我が国の研究者によって、奇周波数秩序に起因する磁気応答異常に関する先駆的研究が行われた。田仲らは、近接効果によって接合系に誘起された奇周波数状態が常磁性マイスナー応答を示すことを指摘した[4]。横山らは、この常磁性マイスナー効果に関する詳細な理論解析を行った[5]。浅野らは、クーパ対の奇周波数対称性を反映した異常が表面インピーダンスにも現れることを示した[6]。本研究代表者は、奇周波数状態のスピンの磁性を調べ、奇周波数クーパ対の形成に伴い、パウリ・スピン帯磁率が增大することを見出した[7]。

これらの異常な磁気応答の背景には、奇周波数秩序が生み出す「負の超流動密度」という共通した物理がある[8]。本申請研究では、この「負の超流動密度」に起因する熱力学的不安定性に焦点を当てる。

[1] V. L. Berezinskii, JETP Lett. **20**, 287 (1974).

[2] F. S. Bergeret, A. F. Volkov, K. B. Efetov, Phys. Rev. Lett. **86**, 4096 (2001).

[3] M. Eschrig, Phys. Today **64**, 43 (2011).

[4] Y. Tanaka, Y. Asano, A. A. Golubov, S. Kashiwaya, Phys. Rev. B **72**, 140503(R) (2005).

[5] T. Yokoyama, Y. Tanaka, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **106**, 246601 (2011).

[6] Y. Asano, A. A. Golubov, Y. V. Fominov, Y. Tanaka, Phys. Rev. Lett. **107**, 087001 (2011).

[7] S. Higashitani, H. Takeuchi, S. Matsuo, Y. Nagato, K. Nagai, Phys. Rev. Lett. **110**, 175301 (2013).

[8] S. Higashitani, Phys. Rev. B **89**, 184505 (2014).

2. 研究の目的

銅酸化物高温超伝導体で実現する d 波超伝導では、表面電流が自発的に誘起され、時間反転対称性が表面付近で局所的に破れた状態が安定化する可能性が指摘されている[9,10]。この表面流状態の安定化のメカニズムは、上述の「負の超流動密度」による熱力学的不安定性という視点から理解できると考えられる。本研究では、従来の理論研究では考慮されていなかった、表面での散漫的電子散乱の効果を取り入れた理論を展開し、より現実に近い理論モデルに基づいて、表面流状態の安定性に対する表面効果を解析する。d 波超伝導だけでなく、他の対称性(例えば p 波対称性)をもつ超伝導についても表面効果の解析を行い、超伝導対称性に依存した表面流状態の安定性の違いを議論する。表面での散漫散乱は、定性的には、表面流状態の安定化を妨げると予想されるが、安定化を助ける機構として、フェルミ面のネスティングを検討する。

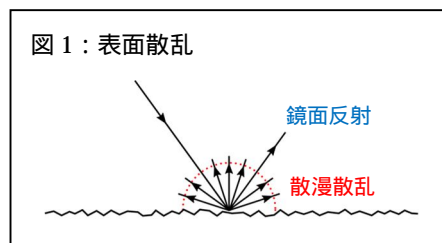
[9] S. Higashitani, J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 2556 (1997).

[10] A. B. Vorontsov, Phys. Rev. Lett. **102**, 177001 (2009).

3. 研究の方法

研究の全体を通じて、理論の定式化には準古典グリーン関数理論を用いる。この理論は、表面や境界面を有する不均一超伝導系で起こる種々の物理量の空間変化を低温まで定量的に数値計算することのできる理論手法を提供する。

超伝導体における表面効果は、準古典グリーン関数の境界条件として理論に組み込まれる。散漫散乱まで扱える準古典論の枠組みはいくつか提案されているが、本研究では、我々が独自に開発したランダム S 行列理論[11]を用いる。この理論では、常伝導状態における電子の鏡面反射率と定義される「鏡面度」を用いて境界条件をパラメタライズする(図 1)。この理論の利点は、鏡面反射極限(鏡面度 = 1)から散漫散乱極限(鏡面度 = 0)まで系統的に表面効果を解析できる点にある。



[11] Y. Nagato, S. Higashitani, K. Yamada, K. Nagai, J. Low Temp. Phys. **103**, 1 (1996).

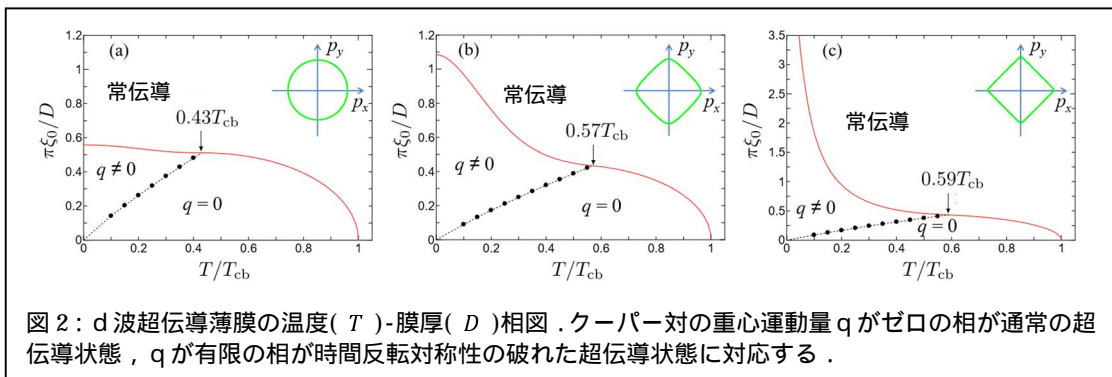
4. 研究成果

以下、本研究で得られた主な成果について述べる。下記(1)と(2)の成果は、当初計画に沿った研究により得られたものである。(3)は当初計画にはなかった研究テーマに関する成果である。これは、本研究計画の実施期間中にWangらによって報告された[12]、本研究課題と密接に関連する理論研究に刺激され新たに企画したものである。

(1) d波超伝導薄膜における自発表面流状態の研究

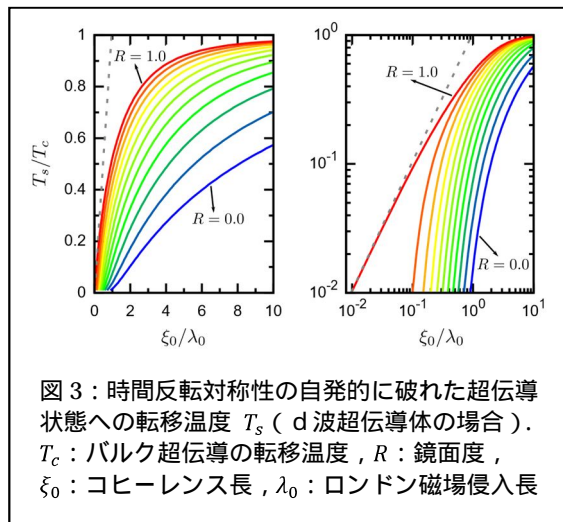
偶周波数秩序と奇周波数秩序が共存するd波超伝導薄膜において実現する新奇超伝導状態として提案されていた[10]、時間反転対称性の自発的に破れた超伝導状態に着目し、温度と膜厚をパラメータとした超伝導相図に対するフェルミ面の形状効果を解析した[13]。この研究から、以下のことを明らかにした。

時間反転対称性の破れた(自発電流を伴う)超伝導状態と通常の(自発電流を伴わない)超伝導状態との間の相境界は、フェルミ面の形状にあまり影響を受けないが、常伝導状態が時間反転対称性の破れた超伝導状態へと不安定化を起こす臨界膜厚は、フェルミ面がある種の異方性をもつとき顕著に減少し、その結果、相図上の広い範囲で時間反転対称性の破れた超伝導が安定化する(図2)。



(2) 自発表面流状態に対する散漫散乱効果の研究

上記(1)の研究結果は、鏡面的な表面を仮定する理論モデルに基づいて得られたものである。散漫的な表面散乱の効果を調べるために、膜厚が十分に大きい(実質的に半無限系と見なせる)場合を考え、アイレンベルガー方程式とマックスウェルの方程式を自己無撞着に解くことにより、時間反転対称性が表面付近で自発的に破れた超伝導状態への転移温度 T_s を計算した[14]。その結果、d波超伝導における T_s は、散漫散乱によって顕著に減少することがわかった(図3)。また、興味深いことに、p波超伝導における T_s は、散漫散乱の影響をほとんど受けないこともわかった。このような超伝導対称性に依存する顕著な違いは、表面付近に存在する奇周波数クーパー対の軌道対称性の違いを反映していることを明らかにした。



(3) カイラル超伝導体における表面効果の研究

カイラル超伝導を特徴づける秩序変数は二つの成分をもつ。これらの秩序変数成分は、鏡面表面に対して対照的な応答を示す。すなわち、一方の成分は、鏡面反射の影響により表面付近で顕著な減衰を示し(図4の Δ_0)、他方の成分は、逆に、表面付近で増加する(図4の Δ_1)。このような特徴的な秩序変数の空間変化が、カイラル超伝導体の表面に沿って流れる自発流に及ぼす影響を解析した[15]。

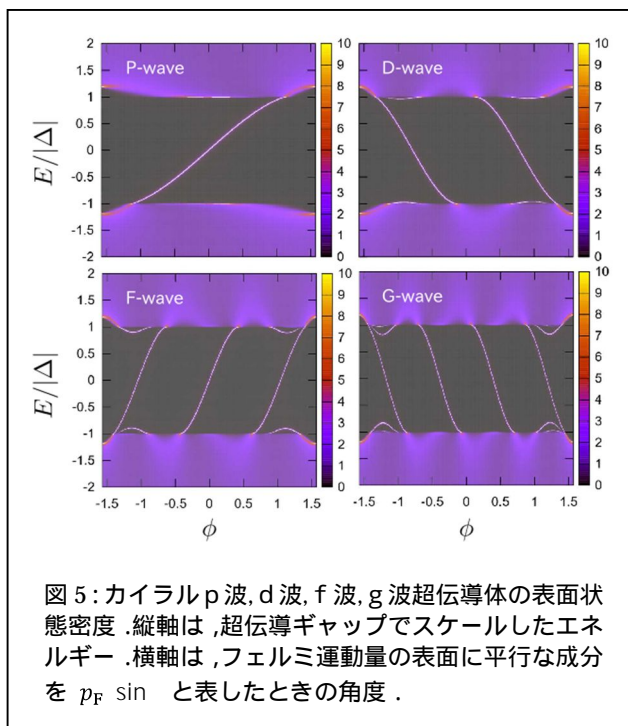
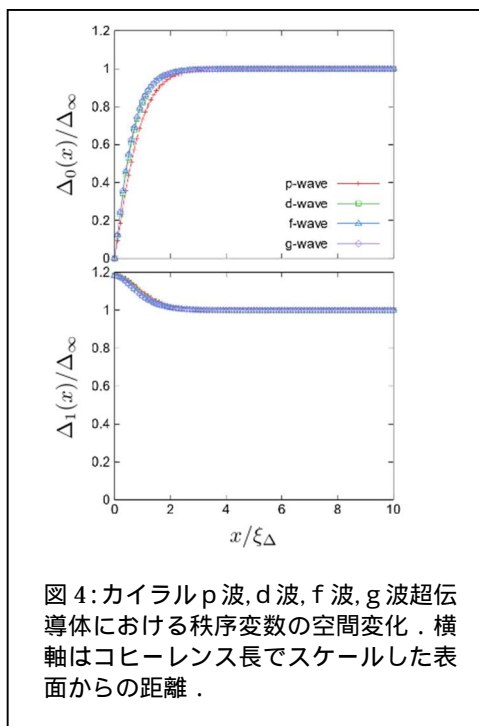
カイラル超伝導体の表面には、表面流を運ぶギャップレスモードと呼ばれる表面アンドレー

エフ束縛状態が現れる (図 5). この束縛状態モードは秩序変数の空間変化にあまり影響を受けないが,カイラル超伝導体の表面には,秩序変数の空間変化を敏感に感じる束縛状態も存在する.それは, $\Delta_0(x)$ の減衰に起因したポテンシャルの井戸が表面付近に形成されるため出現する束縛状態であり,超伝導ギャップと同程度のエネルギーをもつ,高エネルギー束縛状態モードである(図 5).本研究では,この高エネルギーモードと表面流の関係を詳しく調べた.その結果,次のような新たな知見が得られた.

高エネルギーモードはギャップレスモードと同程度の表面流密度を生み出す.

しかし,その表面流密度は空間振動を伴うため,表面流密度を空間積分した量として定義される全表面流には寄与しない.

また, $\Delta_1(x)$ の空間変化が,Wangら[12]によって指摘された全表面流の増加を引き起こす起源であることも明らかにした.



[12] X. Wang, Z. Wang, C. Kallin, Phys. Rev. B **98**, 094501 (2018).
 [13] N. Miyawaki, S. Higashitani, J Low Temp. Phys. **187**, 545 (2017).
 [14] N. Miyawaki, S. Higashitani, Phys. Rev. B **98**, 134516 (2018).
 [15] E. Sugiyama, S. Higashitani, J. Phys. Soc. Jpn. **89**, 034706 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Eri Sugiyama, Seiji Higashitani	4. 巻 89
2. 論文標題 Surface Bound States and Spontaneous Edge Currents in Chiral Superconductors: Effect of Spatially Varying Order Parameter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 034706-1--8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.89.034706	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 Nobumi Miyawaki, Seiji Higashitani	4. 巻 98
2. 論文標題 Influence of diffuse surface scattering on the stability of superconducting phases with spontaneous surface current generated by Andreev bound states	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134516
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.98.134516	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 Nobumi Miyawaki, Seiji Higashitani	4. 巻 187
2. 論文標題 Multiple Phase Transition in Unconventional Superconducting Films	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Low Temperature Physics	6. 最初と最後の頁 545 552
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-016-1685-7	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12件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 杉山絵理, 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 カイラル超伝導の表面電流と奇周波数クーパー対
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山絵理, 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 異方的超伝導体における表面对破壊とアンドレーエフ束縛状態
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobumi Miyawaki, Seiji Higashitani
2. 発表標題 Surface scattering effects on spontaneous edge current and relevant physical phenomena in d-wave superconductors
3. 学会等名 28th International Conference on Low Temperature Physics (LT28) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 乱れた表面をもつ異方的超伝導の自発エッジ電流状態への相転移
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Miyawaki, S. Higashitani
2. 発表標題 Phase diagram of a time-reversal symmetry-breaking state in d-wave superconducting films
3. 学会等名 International Conference on Quantum Fluids and Solids 2016 (QFS2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 超伝導薄膜のGL理論
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 長登康, 東谷誠二, 永井克彦
2. 発表標題 境界面に平行な磁場下における超流動ヘリウム3の横波音響インピーダンス
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Higashitani
2. 発表標題 Spontaneous time-reversal symmetry breaking and odd-frequency Cooper pairs in superconducting films
3. 学会等名 The 8th Intensive-Interactive Meeting “Physics of odd-frequency Cooper pairs” (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Miyawaki, S. Higashitani
2. 発表標題 Phase diagram of a time-reversal symmetry-breaking state in quasi-one-dimensional p-wave superconducting films
3. 学会等名 27th International Symposium on Superconductivity (ISS 2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 N. Miyawaki, S. Higashitani
2. 発表標題 Phase diagram of a time-reversal symmetry-breaking state in unconventional superconducting films
3. 学会等名 International symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS 2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 d波超伝導薄膜における時間反転対称性の破れた状態の安定化メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会2015年秋季大会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 宮脇信実, 東谷誠二
2. 発表標題 d波超伝導薄膜における時間反転対称性が破れた状態の相図
3. 学会等名 日本物理学会第71回年次大会
4. 発表年 2016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
---------	---------