

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740230

研究課題名(和文) 微視的理論と現象論の融合によるエキゾチック超伝導の研究

研究課題名(英文) Study of exotic superconductivity by combining microscopic theory and phenomenological theory

研究代表者

柳瀬 陽一 (Yanase, Youichi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70332575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 3軌道ハバード模型に基づく微視的理論を用いてSr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>の磁場中超伝導相図を決定した。特に、c軸磁場中で多彩な超伝導相が現れることを示し、カイラルII相では半整数量子渦が現れ超伝導スカーミオン格子になることを示した。(2) 局所的な空間反転対称性が欠如した物質における磁気電気効果とエキゾチック超伝導を発見した。(3) URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>におけるネマティックカイラル超伝導相を調べ、量子渦格子の構造相転移を予言した。(4) 局所的な空間反転対称性が欠如した超伝導相がミラー対称性に守られたトポロジカル超伝導相になることを示した。

研究成果の概要(英文)：(1) We determined the superconducting phase diagram of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> in the magnetic field with the use of the microscopic theory based on the three-orbital Hubbard model. We showed a variety of superconducting phases in the c-axis magnetic field. In particular, the chiral-II phase is a skyrmion lattice phase consisting of the fractional quantum vortices. (2) We showed the magnetoelectric effects and exotic superconducting phases in locally noncentrosymmetric systems. (3) We investigated the nematic-chiral superconducting state in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> and predicted structural transitions in vortex lattice. (4) We showed that the superconducting phase in locally noncentrosymmetric system is a topological superconducting phase protected by mirror symmetry.

研究分野：物性理論

キーワード：スピン軌道相互作用 エキゾチック超伝導 奇パリティ多極子 自発的対称性の破れ 強相関電子系

## 1. 研究開始当初の背景

強相関電子系における異方的超伝導の研究が発展を続けてきた。その要因は、これまでにない新しい対称性を持つ超伝導相が実験・理論の両面から発見されていることにある。その契機となったのは UPt3 と Sr2RuO4 におけるスピン三重項超伝導の発見である。その後 UGe2 等において実現された強磁性超伝導はそれまでの常識を覆す発見であったし、CePt3Si や Li2Pt3B において空間反転対称性がない超伝導が発見されたことは今後も未知の超伝導相が発見されることを予感させた。さらに CeCoIn5 や有機超伝導体で発見された FFLO 超伝導は 40 年以上前の理論的予想に対する初めての実験的検証であり、超伝導研究に強烈なインパクトを与えた。これらは総称としてエキゾチック超伝導と呼ばれており、トポロジカル超伝導体の候補としても注目を集めている。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、これまで推進してきたエキゾチック超伝導の微視的理論研究の成果に基づいて、高精度の現象論的理論を構成し、スピン三重項超伝導および空間反転対称性がない超伝導を舞台とした新奇な量子凝縮相を発見・解明することを目的とする。この研究により、多成分秩序変数を持つエキゾチック超伝導に対して、物質に即した立場から高精度かつ曖昧さなしに理論研究を進めることを可能にする。

## 3. 研究の方法

これまでの研究成果により、反対称スピン軌道相互作用の微視的な導出が可能になった。この先駆的な研究成果を生かし、共同研究者から提供される第一原理バンド計算のデータに基づいて精密な多軌道モデルを構成する。また、これまでの経験を生かして微視的理論と現象論を組み合わせた解析を行い、個性的な超伝導体を示す特異な超伝導状態を解明する。

## 4. 研究成果

(1) スピン三重項超伝導体ではクーパー対がスピン 1 の内部自由度を持つ。それは d ベクトルと呼ばれるベクトル型秩序変数で記述される。d ベクトルの構造に対してスピン軌道相互作用が決定的な役割を果たすことはほぼ自明とされているが、その具体的な役割についてはほとんど理解されていなかった。つまり、電子系のスピン軌道相互作用がどのようにしてクーパー対のスピン軌道相互作用に化けるのか、という問題である。UPt3 におけるスピン三重項超伝導の発見以来、この問題を解明する必要性が叫ばれて来

たが、理論研究の進展はより簡単な電子構造を持つスピン三重項超伝導体 Sr2RuO4 の登場を待たねばならなかった。以前 Sr2RuO4 に対して我々が行った研究により、d ベクトルの構造を決定する微視的メカニズムがある程度分かってきた。このような微視的理論に基づいて Sr2RuO4 の磁場中超伝導相図を決定した。特に、c 軸磁場中ではヘリカル相、カイラル II 相、非ユニタリー相といった多彩な超伝導相が現れることを示した。また、カイラル II 相では半整数量子渦が現れることを発見した。半整数量子渦は非アーベル統計に従うマヨラナ準粒子を伴うことから、最近の注目を集めるトポロジカル欠陥である。スピン軌道相互作用は半整数量子渦を不安定にするとするのがこれまでの常識であるが、カイラル II 相では逆にスピン軌道相互作用が半整数量子渦を生み出すことを示した。

(2) Sr2RuO4[001]界面近傍のスピン三重項超伝導状態について研究を行った。Sr2RuO4 では軌道縮退によって(広い意味での)ラッシュバースピン軌道相互作用が特殊な構造を持ち、それが通常とは異なるスピン三重項超伝導状態を生み出すことを示した。

(3) 現在の物性物理学ではパリティ(空間反転対称性)が欠如した系におけるエキゾチックな量子現象が注目を集めている。一方、大局的にみると空間反転対称性が保存しているも、ある部分に注目するとそれが破れているような物質、つまり局所的な空間反転対称性が欠如した物質が数多く存在する。このような系では、空間的に非一様な反対称スピン軌道相互作用が現れる。我々はこのスピン軌道相互作用により新種のエキゾチック超伝導相が実現することを明らかにし、複素ストライプ相と名付けた。そして、CeCoIn5 と YbCoIn5 を積層した人工超格子においてこの相を実現することが可能であることを提案した。これまでの超伝導研究は大局的な対称性によって分類されてきたが、この研究成果により、局所的な対称性の破れが誘起する超伝導相の存在が明らかになった。

(4) 局所的な空間反転対称性が欠如した物質における電気磁気効果を調べた。本研究ではそのような結晶構造の代表的な例である 3 次元ジグザグ格子を考え、電流により反強磁性モーメントが誘起されることを示した。久保公式を用いた計算により、大局的な空間反転対称性が欠如した系の電流誘起スピン分極と比べて遥かに大きな電気磁気効果が起こる、という結果を得た。電気磁気効果に対する一つの直観的な理解として、その逆効果についても議論した。特定の反強磁性秩序(磁気 4 極子秩序)が自発的に起こるとき、バンド構造が非対称に歪む。このとき自発電流は流れないが、逆に散逸的な電流が流れる時には反強磁性が誘起されるということを示した。

示した。

(5) カイラル超伝導体では時間反転対称性が自発的に破れた超伝導状態が実現されており、トポロジカルに非自明な数理構造を持つことから近年大きな注目を集めている。一方、強相関電子系におけるネマティック秩序が様々な物質で発見されたことにより、その物性の解明に向けた多くの研究が行われている。そして、興味深いことにカイラル超伝導体の候補である URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>, UPt<sub>3</sub>, Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> ではネマティック秩序と超伝導が共存することが報告されている。

本研究ではネマティック秩序の下で起こるカイラル超伝導、即ちネマティック-カイラル超伝導に対する理論研究を行った。特に、ネマティック秩序とカイラル超伝導が共存することによる新現象が磁場中で起こることを発見した。それは、量子渦状態における渦格子の構造相転移である。

我々はまずネマティック-カイラル超伝導を記述するギンツブルグ-ランダウモデルを構成した。そして、その広いパラメータ領域において渦格子の構造相転移が起こることを示した。さらに、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> に対する第一原理バンド計算の結果に基づいてギンツブルグ-ランダウモデルのパラメータを全て第一原理的に決定し、予想される構造相転移の特徴と温度磁場相図を示した。

(6) 近年、スピン軌道相互作用が誘起する量子現象が注目を集めている。我々は、スピン軌道相互作用に由来するエキゾチックな超伝導状態の研究を進めてきた。これまでの成果に基づいて、局所的な空間反転対称性の破れに起因するスピン軌道相互作用と電子系の内部自由度の協奏による非従来型超伝導について調べた。

局所的な空間反転対称性が欠如した結晶構造は広範に存在し、銅酸化物高温超伝導体や鉄系超伝導体など我々がよく知る超伝導体もその例に含まれる。そのような結晶では一般に、電子系が副格子自由度を持つ。しかし、その場合でもクーパー対は副格子自由度を持たないのが通常である。ところが、本研究では多層系超伝導体を例にとり、スピン軌道相互作用によりクーパー対の副格子自由度が活性化する例を発見した。その結果として、ペア密度波相や複素ストライプ相などのエキゾチックな超伝導状態が安定になることを示した。このような非従来型超伝導相は CeCoIn<sub>5</sub> 人工超格子において実現されることが期待されている。

次に、我々はペア密度波相のトポロジカルな性質を解明し、トポロジカル結晶超伝導相となることを示した。C 軸磁場中ではミラーチャーン数が非自明なトポロジカル不変量となり、面内磁場中ではミラー対称性に守られた巻きつき数が非自明なトポロジカル不変量となる。これら新種のトポロジカル超伝導

を用いたマヨラナ粒子探索の新しい方向性を提案した。また、ペア密度波相の顕著な特徴が渦糸束縛状態に現れることを示し、実験的な検証法を提案した。

#### 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11件)

Yoichi Higashi, Yuki Nagai, Tomohiro Yoshida, Yusuke Masaki, and Youichi Yanase, Robust zero-energy bound states around a pair-density-wave vortex core in locally noncentrosymmetric superconductors, Phys. Rev. B, 査読有, 93 巻, 2016, 104529-1-10  
10.1103/PhysRevB.93.104529

T. Yoshida and Y. Yanase, Topological D+p-wave superconductivity in Rashba systems, Phys. Rev. B, 査読有, 93 巻, 2016, 054504-1-5  
10.1103/PhysRevB.93.054504

Yu Saito, Yasuharu Nakamura, Mohammad Saeed Bahramy, Yoshimitsu Kohama, Yuichi Kasahara, Yuji Nakagawa, Masaru Onga, Masashi Tokunaga, Tsutomu Nojima, Youichi Yanase, Yoshihiro Iwasa, Superconductivity protected by spin-valley locking in ion-gated MoS<sub>2</sub>, Nature Physics, 査読有, 12 巻, 2016, 144-149  
10.1038/nphys3580

T. Watanabe, T. Yoshida and Y. Yanase, Odd-parity superconductivity by competing spin-orbit coupling and orbital effect in artificial heterostructures, Phys. Rev. B, 査読有, 92 巻, 2015, 174502-1-14  
10.1103/PhysRevB.92.174502

T. Yoshida, M. Sigrist and Y. Yanase, Topological Crystalline Superconductivity in Locally Non-centrosymmetric Multilayer Superconductors, Phys. Rev. Lett., 査読有, 115 巻, 2015, 027001-1-5  
10.1103/PhysRevLett.115.027001

D. Maruyama and Y. Yanase, Electron Correlation Effects in Non-centrosymmetric Metals in the Weak Coupling Regime, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 84 巻, 2015, 074702 -1-8

10.7566/JPSJ.84.074702

Shuhei Takamatsu and Youichi Yanase, Chiral superconductivity in nematic states, Phys. Rev. B, 査読有, 91 巻, 2015, 054504/1-11  
10.1103/PhysRevB.91.054504

Y. Yanase, S. Takamatsu, and M. Udagawa, Spin-orbit Coupling and Multiple phases in Spin-triplet Superconductor Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 巻, 2014, 061019/1-9  
10.7566/JPSJ.83.061019

Y. Yanase, Magneto-Electric Effect in Three-dimensional Coupled Zigzag Chains, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 83 巻, 2014, 014703/1-8  
10.7566/JPSJ.83.014703

T. Yoshida, M. Sigrist, and Y. Yanase, Complex-stripe phases induced by staggered Rashba spin-orbit coupling, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 82 巻, 2013, 074714/1-6  
10.7566/JPSJ.82.074714

Y. Yanase, Electronic Structure and Non-centrosymmetric Superconductivity in Three Orbital t<sub>2g</sub> Model with Spin-orbit Coupling: Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> near [001] Surface/Interface, J. Phys. Soc. Jpn., 査読有, 82 巻, 2013, 44711  
10.7566/JPSJ.82.044711

[学会発表](計 3 1 件)

柳瀬陽一、非共型ワイル超伝導体 UPt<sub>3</sub> におけるトポロジカル表面状態、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス(仙台市)

大同暁人、柳瀬陽一、常磁性に誘起された異方的トポロジカル超伝導、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 03 月 22 日、東北学院大学泉キャンパス(仙台市)

角田峻太郎、柳瀬陽一、磁気多極子状態における超伝導、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 03 月 21 日、東北学院大学泉キャンパス(仙台市)

柳瀬陽一、スピン軌道相互作用が誘起するエキゾチック超伝導、Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC 第 17 回「強相関電子系の凝縮状態」、2016

年 01 月 19 日、CROSS 東海(東海村)

柳瀬陽一、Topological d-wave superconductivity、新学術領域 TMS 領域研究会、2015 年 12 月 13 日、京都大学(京都市)

柳瀬陽一、Exotic superconductivity in 2D systems by spin-orbit coupling、CEMS Topical meeting on “Emergent 2D Materials”、2015 年 12 月 12 日、理化学研究所(和光市)

柳瀬陽一、スピン三重項超伝導体 UPt<sub>3</sub> におけるグライド対称性とワイル超伝導、新学術領域「トポ物質科学」研究会「ワイル半金属・超伝導」、2015 年 11 月 07 日、東北大学(仙台市)

柳瀬陽一、Exotic superconductivity in artificial heterostructures、CEMS Topical meeting on “Oxide interfaces”、2015 年 11 月 06 日、理化学研究所(和光市)

柳瀬陽一、強相関電子系におけるトポロジカル超伝導、Workshop: CROSSroads of Users and J-PARC 第 16 回「電子物性研究とその将来」、2015 年 10 月 15 日、CROSS 東海(東海村)

斎藤優、中村康晴、モハマド・サイド・バラミー、小濱芳光、笠原裕一、叶劍挺、徳永将史、柳瀬陽一、野島勉、岩佐義宏、2 次元物質における電界誘起超伝導のエキゾチック物性、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 19 日、関西大学(吹田市)

柳瀬陽一、UPt<sub>3</sub> における Non-symmorphic 超伝導: スピン軌道相互作用が誘起するラインノードとワイル超伝導、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 18 日、関西大学(吹田市)

高松周平、播磨尚朝、青木大、柳瀬陽一、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> における多重超伝導相図と上部臨界磁場の面内異方性、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 18 日、関西大学(吹田市)

人見尚典、柳瀬陽一、二層系電子ネマチック秩序相における局所的なパリティの破れが誘起する電気八極子状態、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 18 日、関西大学(吹田市)

吉田智大、Manfred Sigrist、柳瀬陽一、多層系超伝導体におけるトポロジカル

結晶超伝導、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 18 日、関西大学(吹田市)

中村康晴, 柳瀬陽一、多層 MoS<sub>2</sub> における Non-symmorphic 超伝導、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 17 日、関西大学(吹田市)

柳瀬陽一、スピン軌道相互作用がある系の奇パリティ多極子と奇パリティ超伝導、新学術領域 Jphysics キックオフミーティング、2015 年 09 月 15 日、神戸大学(神戸市)

柳瀬陽一、Topological superconductivity in heavy fermion superlattices、M2S2015、2015 年 08 月 24 日、Geneva, Switzerland

柳瀬陽一、URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> におけるネマティックカイラル超伝導、基礎物理学研究所短期研究会「多自由度と相関効果が生み出す超伝導の新潮流 ~ BCS から BEC まで ~」、2015 年 06 月 10 日、京都大学基礎物理学研究所(京都市)

S. Takamatsu, H. Harima, D. Aoki, Y. Yanase、Chiral superconductivity in nematic states、International conference on topological quantum phenomena、2014 年 12 月 18 日、Kyoto, Japan

Y. Yanase、Vortex state in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> and UPt<sub>3</sub>: Chiral superconductivity in the nematic state、Reimei-ICC-IMR workshop、2014 年 12 月 05 日、Sendai, Japan

21 高松周平, 播磨尚朝, 青木大, 柳瀬陽一、バンド計算に基づく URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> における磁場中超伝導状態の解析、日本物理学会 2014 年秋季大会、2014 年 09 月 08 日、中部大学(愛知県春日井市)

22 S. Takamatsu, H. Harima, D. Aoki, Y. Yanase、Multiple superconducting phases and vortex lattice structures in URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>、International Conference on Strongly Correlated Electron Systems、2014 年 07 月 10 日、Grenoble, France

23 Y. Yanase、Chiral superconducting state of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> and URu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub> in the magnetic field、The ISSP International Workshop, "New Horizon of Strongly Correlated Physics"、2014 年 06 月 27 日、Kashiwa, Japan

24 渡辺達也, 柳瀬陽一, 吉田智大、多層系人工超格子における複素ストライプ相の理論研究、日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 03 月 28 日、東海大学湘南キャンパス(平塚市)

25 柳瀬陽一、3 次元ジグザグ格子系における電気磁気効果と電流誘起反強磁性、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 09 月 25 日、徳島大学(徳島市)

26 川辺俊介, 吉田智大, 柳瀬陽一、Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>[001]界面近傍での空間反転対称性がない超伝導状態、第 68 回年次大会、2013 年 03 月 29 日、広島大学(東広島市)

27 高松周平, 柳瀬陽一、多成分 GL モデルに基づく Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> における半整数量子渦格子の理論、日本物理学会 第 68 回年次大会、2013 年 03 月 27 日、広島大学(東広島市)

28 柳瀬陽一, 高松周平、スピン三重項超伝導体のスピン軌道相互作用と d ベクトル、物性研共同利用・CCMS・元素戦略合同研究会「計算物性物理学の新展開」、2013 年 01 月 11 日、東京大学物性研究所(千葉県柏市)

29 高松周平, 柳瀬陽一、弱いスピン軌道相互作用を含む GL モデルに基づく Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub> の c 軸磁場中超伝導相図の解析、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 09 月 18 日、横浜国立大学(横浜市)

30 Y. Yanase, D. Maruyama, T. Yoshida, and M. Sigrist、Exotic superconductivity in locally non-centrosymmetric systems、International conference on topological quantum phenomena、2012 年 05 月 19 日、Nagoya, Japan

31 S. Takamatsu and Y. Yanase、Multicomponent Ginzburg-Landau theory for spin triplet superconducting states of Sr<sub>2</sub>RuO<sub>4</sub>、International conference on topological quantum phenomena、2012 年 05 月 17 日、Nagoya, Japan

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]  
<http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/~yanase/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

柳瀬 陽一(Yanase Youichi)

京都大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：7 0 3 3 2 5 7 5