

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23540437

研究課題名(和文)凝縮系におけるトポロジカルな状態のゲージ理論

研究課題名(英文)Topological states in condensed matter systems and gauge theories

研究代表者

御領 潤 (GORYO, Jun)

弘前大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70365013

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)：本研究課題では、スピン軌道相互作用を起源とするトポロジカルな電子状態に関する広範な研究を行った。このような系を記述する標準的なモデルとして、蜂の巣格子上で定義されるKane-Meleモデルがある。このモデルに置ける斥力電子相関の効果を補助場として取り込み、基底状態に現われ得る非自明な電磁気応答を議論した。また、Kane-Meleモデルに強い引力相互作用を取り込んだ場合に生じ得るクーペロン凝縮状態の性質を議論した。さらには、超伝導体SrPtAsはKane-Meleモデルをドーブした場合の超伝導と看做すことが出来ることを示し、この系で現われるカイラルd-波超伝導の表面状態による輸送現象を議論した。

研究成果の概要(英文)：We investigated the topological states in condensed matter systems. We focused on the Kane-Mele model defined on the honeycomb lattice system. We took into account the electron-electron correlation in this model by using the Stratonovich-Hubbard method, in which we introduced an auxiliary field behaving like a gauge field. We obtained the effective action to integrate out the auxiliary field and found a non-trivial electromagnetic response. We also discussed Cooperon condensation in the Kane-Mele model and classified the pairing symmetry of Cooperon wave function by using the point group. We pointed out that the recently discovered superconductor SrPtAs can be regarded as the superconducting state of doped Kane-Mele model. The most plausible pairing symmetry is chiral d-wave which supports the chiral surface state, and we investigated the transport phenomena at the surface of the system. Due to the spin-orbit coupling, the surface state carries not only charge but also spin.

研究分野：理論凝縮系物理学

キーワード：トポロジー 超伝導 Kane-Meleモデル スピン軌道相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

凝縮系物理学に対するゲージ理論の概念やトポロジ的手法の応用が、また新たな展開を見せつつある状況にあった。特に、トポロジカル絶縁体・超伝導体に関する知見が急速に進展していた。これらの議論の根本にあるのはスピン軌道相互作用である。スピン軌道相互作用が電子状態に与える影響に対する興味も、また新たな視点から注目され始めていた状況にあった。

### 2. 研究の目的

本研究代表者は、スピン軌道相互作用と超伝導波動関数の対称性の組み合わせで起こり得る特異現象の探索に注力し、研究を行った。特に、カイラル超伝導状態と呼ばれるトポロジカルな超伝導状態と、局所的に反転対称性を破る構造、そこから誘起されるスピン軌道相互作用の働きにより、新奇現象が現れる可能性を探ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

(i)群論をベースとした超伝導(クーパー対)波動関数の対称性の分類、(ii)波数空間におけるゲージ場によって表される、ブロッホ状態のトポロジをベースとした輸送現象の解析、および (iii)超伝導体の基本方程式であるボゴリウボフ-ドジャン方程式の数値的解析などをもとにした。

### 4. 研究成果

本研究機関では特に、蜂の巣格子上のトポロジカル絶縁体の標準的モデルである Kane-Mele モデルをベースとして、スピン軌道相互作用とペアリング状態の関係に関する解析を理論的・数値的両方の面より行った。主な研究成果として、局所反転対称性を破る結晶構造を持つ、SrPtAs の超伝導に関する研究成果を報告する。

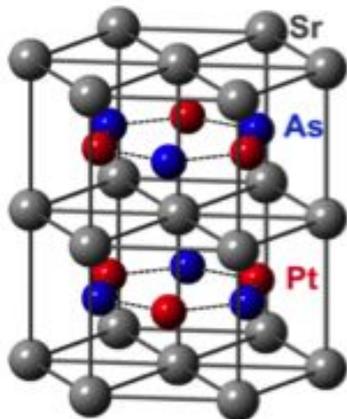


図1. SrPtAs の単位胞。銀が Sr、赤が Pt、青が As サイトを表す。2 枚の PtAs 面が含まれていることと、それぞれの面はチェッカーボード上の三角格子構造をとるため、それぞれの面内には反転対称点が存在しないことが解る S.J. Youn, et al, Phys. Rev. B 85, 220505(R) (2012)より抜粋。

この超伝導体は 2011 年に岡山大学の野原教授のグループにより発見され、転移温度が 2.4 ケルビンであることが電気抵抗及び磁化率の測定から示されている(Y. Nishikubo et al J. Phys. Soc. Jpn. 80, 055002(2011))。SrPtAs の単位胞には図 1 のように PtAs 面が 2 枚存在しており、これらが電気伝導を担っている。一面だけ取り出してみるとチェッカーボード形の三角格子構造を持っていることから、反転対称性が存在しないことが解る。しかし上面と下面の関係をみてみるとちょうど Pt と As を入れ換えた関係になっているため、単位胞の中心が反転対称点となっていることが解る。すなわち、大局的な意味では反転対称であるが、伝導面に限ってみると局所的に反転対称性が破れている。大局的に反転対称性が破れた系ではそれに応じて反対称なスピン軌道相互作用が電子系に誘起されることが知られている。ラシュバ項やドレッセルハウス項と呼ばれるものがその典型例である。その類推として局所的に反転対称性が破れた場合は、局所反対称なスピン軌道相互作用があらわれることが解る。実際に CePt<sub>3</sub>Si の人工格子系において、交替ラシュバスピン軌道相互作用項が現れることが指摘された(D. Maruyama, M. Sigrist, and Y. Yanase, J. Phys. Soc. Jpn.81, 034702 (2012))。SrPtAs に関しても第一原理計算によりいち早くこの可能性が調べられ、やはり局所反対称な、しかし交替ラシュバ型とは異なるタイプのスピン軌道相互作用が誘起されることが示された(S.J. Youn, et al, Phys. Rev. B 85, 220505(R) (2012))。強束縛近似、すなわち電子が結晶格子上を飛び移るといった場合、このスピン軌道相互作用の大きさは面内の最近接格子点間ホッピングの強さ  $t$  の約 10% 程度と、大きな値をとることが解っている( $t$  との比較で相互作用項の大小を比較するのは強束縛モデルの慣例である)。注目すべき点は、このスピン軌道相互作用は前節で議論した Kane-Mele モデルのトポロジカルなスピン軌道相互作用と一致する、という点である。Kane-Mele モデルとは異なり SrPtAs は金属であるため、量子化は起こらないもののスピンホール効果が発生することが示される。そしてこのスピンホール金属に磁場をかけると、異常ホール効果、すなわちホール伝導度に対しサイクロトロン運動のみならずゼーマン分裂も寄与する、ということが解る。超伝導状態におけるクーパー対の波動関数の対称性については、群論的な考察及び一般的な電子間引力を用いた線形化ギャップ方程式の解析[主な発表論文欄 6]、さらに精密化を試みた汎関数繰り込み群による解析[同 4]を行った。その結果、 $d_{x^2-y^2}+id_{xy}$ -波あるいは chiral  $d$ -波状態と呼ばれる時間反転対称性を破るトポロジカルな超伝導状態が現れることを理論的に示した。さらに正確に述べると、局所的空間反転対称性の破れの効

果により、chiral  $d$ -波に対して chiral  $p$ -波状態と呼ばれる別の時間反転対称性を破るトポロジカルな超伝導状態が混ざること、先に述べた群論的考察から結論される。しかし混合の割合はいろいろなパラメタに依存し、大きな混合を得るには最適化されたパラメタの組み合わせが必要となってくる。これらの理論的指摘に対し、 $\mu$ SR の実験によって超伝導状態における内部自発磁場が観測され[同5]、chiral  $d$ -波状態は非常に強く支持されている。ただし、核スピン-格子緩和時間の温度依存性の測定や(K. Matano, et. al. Phys. Rev. B.89.140504 (2014))、磁場侵入長の温度依存性 (J. F. Landaeta et. al. Phys. Rev. B. 93 064504 (2016)) は、chiral  $d$ -波と完全には矛盾しないものの  $s$ -波タイプのペアリングを示唆しているようにも見え、今後さらなる検討が必要とされる。

ともあれ本研究の方針として、chiral  $d$ -波状態の発現のもと、どういった新奇現象が現れ得るかを調べた。SrPtAs と同様の興味深い結晶構造を持つ物質開発・超伝導研究は現在も精力的に行われており、そこで chiral  $d$ -波状態がより明確なかたちで見出される可能性も高いからである。そこで我々は、Bogoliubov - de - Gennes 方程式を用いて slab 系(表面の形状として zigzag および armchair 型の2通りを考える)の超伝導状態を解析した。対形成相互作用およびフェルミ面の形状として適当なタイプを仮定し、カイラル  $d$ -波対を安定化させる。するとカイラルな表面状態が導かれる。特筆すべきは、表面状態から電流のみならず、スピン軌道相互作用のためにスピン流も同時に自発発生する点である。電流とスピン流が共存することから、表面近傍で自発スピン分極が生じることも示される。SrPtAs でカイラル  $d$ -波状態が実現していれば、この現象が見出されることが期待される。また、スピン軌道相互作用を持つカイラル  $p$ -波モデルでも同様の結果が得られている(Y. Imai, K. Wakabayashi, M. Sigrist, PRB85,174532(2012))。よってこの現象は、スピン・ホール金属においてカイラル超伝導が発生した場合の普遍的な現象であると考えられる。

##### 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 9 件)

1. M. H. Fischer and J. Goryo, J. Phys. Soc. Jpn. **84**054705 (2015) "Symmetry and gap classification of the non-symmorphic SrPtAs" 査読有, DOI: 10.7566/JPSJ.84.054705
2. J. Goryo, J. Phys. Soc. Jpn. Conf. Proc. **3** 016017 (2014) "Superconducting state of SrPtAs with broken time-reversal symmetry" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJP.3.016017>
3. M. Sigrist et al (著者 9 名中 4 番目), J. Phys. Soc. Jpn. **83**061014 (2014) "Superconductors with staggered non-centrosymmetry" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.061014>
4. M. Fischer et al (著者 8 名中 6 番目), Phys. Rev. B **89** 020509(R) (2014) "Chiral d-wave superconductivity in SrPtAs" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.020509>
5. P. K. Bisbas et al (著者 15 名中 9 番目), Phys. Rev. B **87** (2013) 180503(R) "Evidence for superconductivity with broken time-reversal-symmetry in locally noncentrosymmetric SrPtAs" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.180503>
6. J. Goryo, M. H. Fischer, and M. Sigrist, Phys. Rev. B **86** (2012) 100507(R) "Possible pairing symmetries in SrPtAs with a local lack of inversion center" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.100507>
7. J. Goryo and N. Maeda, J. Phys. Conference Series **302** (2011) 012024(1)-012024(4) "Meissner effect in the layered Kane-Mele model with Hubbard interaction" 査読有
8. J. Goryo and N. Maeda, J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 044707(1)-044707(8) "Magnetic Response in Quantized Spin Hall Phase of Correlated Electrons" 査読有,

DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.044707>

9. J. Goryo J. Phys. Soc. Jpn. **80** (2011) 043704(1)-043704(4) "Valley Spin Sum Rule for Dirac Fermions: Topological Argument" 査読有, DOI: <http://dx.doi.org/10.1143/JPSJ.80.043704>

[学会発表](計 14 件)

1. 御領潤 “SrPtAs の超伝導とトポロジ” 神戸大学理学部物理学科コロキウム, 2015 年 12 月 15 日(招待)
2. Jun Goryo “Phenomenology of hexagonal superconductor SrPtAs” Physics of bulk-edge correspondence and its universality, Tsukuba University, Myogadani, Tokyo, Sep. 27, 2015
3. 御領潤 “SrPtAs の超伝導とトポロジ” 埼玉大学理学部物理学科コロキウム, 2015 年 9 月 24 日(招待)
4. 御領潤 “Superconductivity in SrPtAs”, 北東北若手研究会, 岩手大学, 盛岡市, 2015 年 3 月 7 日(招待)
5. Jun Goryo “Superconductivity in SrPtAs” Novel Quantum Systems 2014, Yukawa Institute, Kyoto University, Kyoto, Nov. 20, 2014.
6. 御領潤 “新奇超伝導体の特異現象” 山田財団長期派遣者研究交歓会, 葉業年金会館, 大阪市, 2014 年 11 月 1 日(招待)
7. 御領潤, M.H. Fischer, M. Sigrist “Pairing states in Kane-Mele based systems”, 渦糸物理国内会議, ハイランド富良野, 北海道富良野市, 2014 年 7 月 11 日
8. Jun Goryo, “Pairing states in Kane-Mele based systems” 東京大学物性研究所滞在型研究会 “New Horizon in condensed matter systems” 千葉県柏市, 2014 年 6 月 24 日
9. 御領潤, “局所反対称系 SrPtAs のトポロジカルなスピン軌道相互作用とカイラル超伝導” 東京大学物性研究所短期研究会, 千葉県柏市, 2014 年 4 月 18 日
10. 御領潤, M.H. Fischer, M. Sigrist “SrPtAs の超伝導対称性”, 渦糸物理国内会議, 東北大学金属材料研究所, 2013 年 12 月 13 日
11. 御領潤, M.H. Fischer, M. Sigrist “SrPtAs の超伝導対称性”, 物性理論研究会, 徳島県徳島市, 2013 年 9 月 28 日(招待)
12. Jun Goryo and Manfred Sigrist, “Unconventional pairings in Kane-Mele model”, Novel Quantum States in Condensed Matter: Correlation, Frustration,

and Topology, Kyoto, Nov. 28, 2012.

13. Jun Goryo, Mark H. Fischer, and Manfred Sigrist “Possible pairing symmetries in SrPtAs” Swiss-Japan Workshop 2012, Current Topics in Theory of Correlated Materials, Wako, Japan, Sep. 12, 2012 (invited)
14. Jun Goryo and Manfred Sigrist, “Cooperon pairing channels in the honeycomb lattice system with spin-orbit coupling” 2011 Japan Swiss workshop on New Electronic Properties through Structure and Correlation, Zurich, Sep. 16, 2012 (invited)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]  
出願状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

御領潤 (Goryo, Jun)

弘前大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 23540437

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: