

令和元年6月24日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05164

研究課題名(和文) 局所的な空間反転対称性が欠如した結晶における磁性・多極子秩序と超伝導

研究課題名(英文) Magnetism, multipole order, and superconductivity in locally noncentrosymmetric crystals

研究代表者

柳瀬 陽一 (Yanase, Youichi)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：70332575

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：空間反転対称性=パリティは物理学における基本的な対称性の一つである。近年の物性物理学分野では、空間反転対称性の破れに起因する諸現象が注目を集めてきた。それらの発展である本研究課題では、大局的には空間反転対称性を保存しているけれど原子サイトの局所対称性が欠如した物質、即ち局所的に空間反転対称性が欠如した物質における様々な新現象を示した。奇パリティ多極子秩序とその創発電磁応答、反強磁性スピントロニクス、多極子秩序と密接に関連したエキゾチック超伝導などである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

空間反転対称性は物理学における基本的な対称性である。高エネルギー物理学においても空間反転対称性は破れているが、物性物理学が対象とする固体電子系においてはより普遍的な現象として空間反転対称性が自発的に破れる。局所的な空間反転対称性が欠如した結晶はその代表的な舞台である。本研究では、古典電磁気学における基礎概念である多極子モーメントを用いて、統一かつ普遍的に空間反転対称性の自発的破れた物質相を記述する理論を構築した。その結果により、特異な電磁応答や超伝導現象も発見された。

研究成果の概要(英文)：Space inversion symmetry, namely parity, is a fundamental symmetry in physics. In the modern condensed matter physics, various phenomena arising from inversion symmetry breaking have attracted attention. In this research project we aimed further developments in this field. We revealed various phenomena in locally noncentrosymmetric materials where the global inversion symmetry is preserved while local inversion symmetry on atomic sites is violated. Examples are odd-parity multipole order and emergent electromagnetic responses, antiferromagnetic spintronics, and exotic superconductivity related to multipole order.

研究分野：物性理論

キーワード：空間反転対称性 スピン軌道相互作用 奇パリティ多極子秩序 エキゾチック超伝導 スピントロニクス マルチフェロイクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スピン軌道相互作用に由来するエキゾチックな量子現象が次々と発見され、21世紀における物性物理学の新たな潮流となっていた。トポロジカル絶縁体・超伝導、スピントロニクス、マルチフェロイクスもその例である。そして、超伝導分野では「空間反転対称性が欠如した系の超伝導」が、多極子分野では「奇パリティ多極子秩序」が重要課題となっていた。

### 2. 研究の目的

空間反転対称性が欠如した系に特有の反対称スピン軌道が、それまで考えられてきたよりもはるかに幅広い物質において存在することが分かってきた。すなわち、巨視的な空間反転対称性が保存していても局所的に空間反転対称性が欠如した結晶には「隠れた」反対称スピン軌道相互作用が存在する。そのような「隠れた」反対称スピン軌道相互作用が産み出す新しい量子現象を解明することが、本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

スピン軌道相互作用を含むミニマルモデルを平均場理論等により微視的に解析した。また、より一般的な理論的帰結を得るために群論的分類学を併用した。これらの手法により、局所的な空間反転対称性が欠如した系に特有の「隠れた」反対称スピン軌道相互作用が誘起する新奇量子相と創発電磁応答について、普遍的かつ包括的な知見を得た。

### 4. 研究成果

研究期間を通じて以下のような研究成果を得た。

#### (1) 磁気十六極子秩序の発見と特異な電磁応答の解明

群論的な分類に基づいて  $\text{BaMn}_2\text{As}_2$  の磁気16極子秩序を同定した。その特徴的な応答として、電気磁気効果、反強磁性エーデルシュタイン効果、磁気圧電効果を予言した。なかでも、磁気圧電効果はこの研究により発見された応答であり、新しい圧電デバイスへの応用も期待される。のちに行われた実験により磁気圧電効果が実際に観測された。

#### (2) 多極子秩序相の分類学

多極子秩序相の群論的分類学を完成した。その結果から、電気磁気効果、エーデルシュタイン効果、磁気圧電効果、非相反電気伝導が起こる多極子相を分類した。また、120を超える物質の多極子秩序変数を同定し、実験研究へ道を開いた。

#### (3) 反強磁性スピントロニクス

現在のスピントロニクスデバイスは強磁性体を用いているが、反強磁性スピントロニクスの将来性に注目が集まっている。私達は電氣的な書き込みと読み出しが可能な反強磁性体を持つべき対称性を特定し、それが奇パリティ多極子秩序相に他ならないことを示した。さらに、50を超える候補物質を提案した。

#### (4) 多極子超伝導

多極子秩序と密接な相関があるエキゾチック超伝導を示した。(i)磁気多極子秩序によるFFLO超伝導、(ii)  $\text{SrTiO}_3$  における強誘電超伝導、(iii)磁気多極子揺らぎによるトポロジカルスピン三重項超伝導、などが挙げられる。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計36件)

T. Yoshida, M. Sigrist and Y. Yanase, Topological Crystalline Superconductivity in Locally Non-centrosymmetric Multilayer Superconductors, Phys. Rev. Lett. 115, 027001-1-5 (2015).  
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. 84, 074702-1-8 (2015).  
10.7566/JPSJ.84.074702

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  $\text{MoS}_2$ , Nature Physics 12, 144-149 (2016).  
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 92, 174502-1-14 (2015).  
10.1103/PhysRevB.92.174502
- T. Yoshida and Y. Yanase, Topological D+p-wave superconductivity in Rashba systems, Phys. Rev. B 93, 054504-1-5 (2016).  
10.1103/PhysRevB.93.054504
- 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 93, 104529-1-10 (2016).  
10.1103/PhysRevB.93.104529
- Youichi Yanase, Nonsymmorphic Weyl superconductivity in  $U\text{Pt}_3$  based on  $E_{2u}$  representation, Phys. Rev. B 94, 174502-1-6 (2016).  
10.1103/PhysRevB.94.174502
- Shuntaro Sumita and Youichi Yanase, Superconductivity in magnetic multipole states, Phys. Rev. B 93, 224507-1-12 (2016).  
10.1103/PhysRevB.93.224507
- Akito Daido and Youichi Yanase, Paramagnetically-induced gapful topological superconductors, Phys. Rev. B 94, 054519-1-20 (2016).  
10.1103/PhysRevB.94.054519
- Shingo Kobayashi, Youichi Yanase, and Masatoshi Sato, Topologically stable gapless phases in nonsymmorphic superconductors, Phys. Rev. B 94, 134512-1-11 (2016).  
10.1103/PhysRevB.94.134512
- Takanori Hitomi and Youichi Yanase, Electric octupole order in bilayer Rashba system, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 124702-1-12 (2016).  
10.7566/JPSJ.85.124702
- Akito Daido and Youichi Yanase, Majorana flat bands, chiral Majorana edge states, and unidirectional Majorana edge states in noncentrosymmetric superconductors, Phys. Rev. B 95, 134507-1-11 (2017).  
10.1103/PhysRevB.95.134507
- Kazuaki Takasan, Akito Daido, Norio Kawakami, Youichi Yanase, Laser-induced topological superconductivity in cuprate thin films, Phys. Rev. B 95, 134508-1-8 (2017).  
10.1103/PhysRevB.95.134508
- Q. Niu, W. C. Yu, K. Y. Yip, Z. L. Lim, H. Kotegawa, E. Matsuoka, H. Sugawara, H. Tou, Y. Yanase, Swee K. Goh, Quasilinear quantum magnetoresistance in pressure-induced nonsymmorphic superconductor CrAs, Nature communications 8, 15358-1-6 (2017).  
10.1038/ncomms15358
- Tsuneya Yoshida, Akito Daido, Youichi Yanase, and Norio Kawakami, Fate of Majorana modes in  $\text{CeCoIn}_5/\text{YbCoIn}_5$  superlattices: a test bed for reduction of topological classification, Phys. Rev. Lett. 118, 147001-1-6 (2017).  
10.1103/PhysRevLett.118.147001
- Shuntaro Sumita, Takuya Nomoto, Youichi Yanase, Multipole superconductivity in nonsymmorphic  $\text{Sr}_2\text{IrO}_4$ , Phys. Rev. Lett. 119, 027001-1-6 (2017).  
10.1103/PhysRevLett.119.027001
- Youichi Yanase and Ken Shiozaki, Mobius topological superconductivity in  $U\text{Pt}_3$ , Phys. Rev. B 95, 224514-1-19 (2017).  
10.1103/PhysRevB.95.224514

- Yasuharu Nakamura and Youichi Yanase, Odd-parity superconductivity in bilayer transition metal dichalcogenides, Phys. Rev. B 96, 054501-1-11 (2017).  
10.1103/PhysRevB.96.054501
- Hikaru Watanabe and Youichi Yanase, Magnetic hexadecapole order and magnetopiezoelectric metal in  $\text{Ba}_{1-x}\text{K}_x\text{Mn}_2\text{As}_2$ , Phys. Rev. B. 96, 064432-1-18 (2017) (Editors' Suggestion).  
10.1103/PhysRevB.96.064432
- Rina Takashima, Yasuyuki Kato, Youichi Yanase, and Yukitoshi Motome, Generation and control of noncollinear magnetism by supercurrent, Phys. Rev. B 97, 081107(R)-1-5 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.081107
- 21 Y. C. Chan, K. Y. Yip, Y. W. Cheung, Y. T. Chan, Q. Niu, J. Kajitani, R. Higashinaka, T. D. Matsuda, Y. Yanase, Y. Aoki, K. T. Lai, Swee K. Goh, Anisotropic two-gap superconductivity and the absence of Pauli paramagnetic limit in single crystalline  $\text{LaO}_{0.5}\text{F}_{0.5}\text{BiS}_2$ , Phys. Rev. B 97, 104509/1-6 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.104509
- 22 Robert Peters and Youichi Yanase, Strong enhancement of the Edelstein effect in f-electron systems, Phys. Rev. B 97, 115128/1-8 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.115128
- 23 Shingo Kobayashi, Shuntaro Sumita, Youichi Yanase, Masatoshi Sato, Symmetry-protected line nodes and Majorana flat bands in nodal crystalline superconductors, Phys. Rev. B 97, 180504(R)/1-5 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.180504
- 24 Shuntaro Sumita, Youichi Yanase, Unconventional superconducting gap structure protected by space group symmetry, Phys. Rev. B 97, 134512/1-16 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.134512
- 25 David Moeckli, Youichi Yanase, Manfred Sigrist, Orbitaly limited pair-density wave phase of multilayer superconductors, Phys. Rev. B 97, 144508/1-11 (2018).  
10.1103/PhysRevB.97.144508
- 26 Hiroaki Shishido, Shogo Yamada, Kaori Sugii, Masaaki Shimozaawa, Youichi Yanase, and Minoru Yamashita, Anomalous change in the de Haas-van Alphen oscillations of  $\text{CeCoIn}_5$  at ultra-low temperatures, Phys. Rev. Lett. 120, 177201/1-6 (2018).  
10.1103/PhysRevLett.120.177201
- 27 Atsuo Shitade, Hikaru Watanabe, and Youichi Yanase, Theory of Orbital Magnetic Quadrupole Moment and Magnetoelectric Susceptibility, Phys. Rev. B 98, 020407(R)/1-6 (2018).  
10.1103/PhysRevB.98.020407
- 28 Shota Kanasugi, Youichi Yanase, Spin-orbit-coupled ferroelectric superconductivity, Phys. Rev. B 98, 024521/1-11 (2018).  
10.1103/PhysRevB.98.024521
- 29 Hikaru Watanabe and Youichi Yanase, Group-theoretical classification of multipole order: emergent responses and candidate materials, Phys. Rev. B 98, 245129/1-24 (2018).  
10.1103/PhysRevB.98.245129
- 30 Jun Ishizuka and Youichi Yanase, Odd-parity multipole fluctuation and unconventional superconductivity in locally noncentrosymmetric crystal, Phys. Rev. B 98, 224510/1-13 (2018).  
10.1103/PhysRevB.98.224510
- 31 Hikaru Watanabe and Youichi Yanase, Symmetry analysis of current-induced switching of antiferromagnets, Phys. Rev. B 98, 220412(R)/1-7 (2018). (Editors' Suggestion)

10.1103/PhysRevB.98.220412

- 32 Atsuo Shitade, Akito Daido, Youichi Yanase, Theory of spin magnetic quadrupole moment and temperature-gradient-induced magnetization, Phys. Rev. B 99, 024404/1-12 (2019).  
10.1103/PhysRevB.99.024404
- 33 Q. Niu, W. C. Yu, E. I. Paredes Aulestia, Y. J. Hu, Kwing To Lai, H. Kotegawa, E. Matsuoka, H. Sugawara, H. Tou, D. Sun, F. F. Balakirev, Y. Yanase, Swee K. Goh, Nonsaturating large magnetoresistance in the high carrier density nonsymmorphic metal CrP, Phys. Rev. B. 99, 125126/1-6 (2019).  
10.1103/PhysRevB.99.125126
- 34 Y. Shiomi, H. Watanabe, H. Masuda, H. Takahashi, Y. Yanase, S. Ishiwata, Observation of Magnetopiezoelectric Effect in Antiferromagnetic Metal EuMnBi<sub>2</sub>, Phys. Rev. Lett. 122, 127207/1-5 (2019).  
10.1103/PhysRevLett.122.127207
- 35 Shuntaro Sumita, Takuya Nomoto, Ken Shiozaki, Youichi Yanase, Classification of topological crystalline superconducting nodes on high-symmetry line: point nodes, line nodes, and Bogoliubov Fermi surfaces, Phys. Rev. B 99, 134513/1-19 (2019).  
10.1103/PhysRevB.99.134513
- 36 Takanori Hitomi and Youichi Yanase, Magnetoelectric response in electric octupole state: Possible hidden order in cuprate superconductors, J. Phys. Soc. Jpn. 88, 054712/1-15 (2019).  
10.7566/JPSJ.88.054712

〔学会発表〕(計 99 件)

柳瀬陽一、奇パリティ多極子相の分類学と電磁応答・超伝導、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 9 日、同志社大学、招待講演

柳瀬陽一、重い電子系における非共型トポロジカル超伝導、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 16 日、九州大学、招待講演

Youichi Yanase, Topological superconductivity by unconventional Cooper pairs in locally and globally noncentrosymmetric systems, International workshop TOP-SPIN3: "Spin and Topological Phenomena in Nanostructures - Towards Topological Materials Science", 2017 年 4 月 27 日, IFW Dresden, Germany、基調講演

Youichi Yanase, Mobius Topological Superconductivity in UPt<sub>3</sub> and UCoGe, 21st International conference on magnetism (ICM2018), San Francisco, USA, July 15-20, 2018, 招待講演

その他 95 件。うち招待講演が 28 件。

〔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〕

ホームページ等

<http://cond.scphys.kyoto-u.ac.jp/~yanase/>

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：Robert Peters

ローマ字氏名：Robert Peters

研究協力者氏名：高島梨菜

ローマ字氏名：Takashima Rina

研究協力者氏名：塩崎謙

ローマ字氏名：Shiozaki Ken

研究協力者氏名：下出敦夫

ローマ字氏名：Shitade Astuo

研究協力者氏名：石塚淳

ローマ字氏名：Ishizuka Jun

研究協力者氏名：高三和晃

ローマ字氏名：Takasan Kazuaki

研究協力者氏名：大同暁人

ローマ字氏名：Daido Akito

研究協力者氏名：角田峻太郎

ローマ字氏名：Sumita Shuntaro

研究協力者氏名：渡邊光

ローマ字氏名：Watanabe Hikaru

研究協力者氏名：金杉翔太

ローマ字氏名：Kanasugi Shota

研究協力者氏名：人見尚典

ローマ字氏名：Hitomi Takanori

研究協力者氏名：中村康晴

ローマ字氏名：Nakamura Yasuharu

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、研究者個人に帰属されます。