

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287085

研究課題名(和文)量子秩序相の新展開

研究課題名(英文)New developments in quantum orders

研究代表者

佐藤 昌利 (Sato, Masatoshi)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：30313117

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、絶縁体や超伝導体、半金属で実現される新しい量子秩序相の研究を行った。具体的には、個々の系の持つ固有の対称性と波動関数のトポロジーなど量子論特有の性質を組み合わせることによって得られる「対称性で守られた量子秩序相」の理論を発展させた。とりわけ、位相幾何学の理論であるK理論を応用して、位数2の点群で守られたトポロジカル絶縁体・超伝導体を完全に分類し、当初予想していたよりも多くの物質系が対称性で守られた量子秩序を示すことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have studied novel quantum orders which are realized in insulators, superconductors, and semimetals. Special focus is made on theoretical studies of “symmetry-protected quantum orders” which are obtained by combining quantum properties like topology of wave functions with symmetry specific to individual systems. In particular, using a mathematical theory of topology called the K-theory, we have completed topological classification of topological crystalline insulators and superconductors in the presence of order-two point group symmetries. This result indicates that much more materials may host symmetry-protected quantum orders than we expected.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子秩序相 量子凝縮系 超伝導

1. 研究開始当初の背景

2008年にトポロジカル絶縁体が発見されて以来、量子秩序相の研究は、トポロジカル絶縁体・超伝導体を中心に理論・実験双方で活発に研究が行われている。とりわけ、トポロジカル絶縁体・超伝導体に存在するディラックフェルミオンやマヨラナフェルミオンのような新奇な励起状態を中心に新しい現象が予言され、新しい実験結果が報告されている。トポロジカル絶縁体の発見によって、量子秩序相の存在自体は広く知られるようになったが、問題は現実の系に即した方法で、その相の特徴が理解されていないことである。たとえば、トポロジカル絶縁体・超伝導体はランダム行列に基づくトポロジカル周期表によって分類されているが、実際の物質はランダム行列の理論には含まれない回転対称性や空間反転対称性などの固有の対称性をもつ。そのため、ランダム行列の理論ではトポロジカル絶縁体・超伝導体に分類されない場合でも、対称性と組み合わせることで、トポロジカルな性質をもつ相が発現しうる。このような相は、「対称性によって守られたトポロジカル相」と呼ばれ、ギャップレス表面状態の存在など通常のトポロジカル相と類似の現象を示す。現実の物質は必ず固有の対称性をもつことから明らかのように、どの物質がどの対称性に基いてどのような量子秩序相になるかを明らかにすることは、相構造という物性物理の基礎的問題を理解する上でも、実際の物質をつかい量子秩序相の原理に基づいた新規なデバイスを生み出す上でも、この分野における最先端の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ランダウ・ギンツブルグ理論では記述できない量子相構造(=量子秩序相)と個々の系の持つ固有の対称性というランダウ・ギンツブルグ理論の中心概念を組み合わせることで初めて得られる「対称性によって守られた量子秩序相」の理論を発展させることである。

3. 研究の方法

理論的手法として、位相幾何学的手法による数理的アプローチ、低エネルギー有効モデルに基づく解析的アプローチ、微視的モデルに基づく数値計算的アプローチを併用して、総合的に研究を進める。

4. 研究成果

(1) トポロジカル結晶超伝導体の理論
時間反転対称性や超伝導体特有の電子・正孔対称性が新しいトポロジカル相を導くことは知られていたが、最近、個々の物質の構造に特有な結晶群に由来するトポロジカル相-トポロジカル結晶絶縁体-を導くことが予言・実証され、新しいトポロジカル物質として注目を集めている。本研究では、この新しいトポロジカル相が超伝導体において実現される条件を明らかにし、新しいトポロジカル物質であるトポロジカル結晶超伝導体を提案した(文献[5])。特に、ギャップ関数の結晶群に関する表現によって、トポロジカル超

伝導体特有の励起である表面マヨラナ励起の有無が決まることを解明し、 Sr_2RuO_4 (文献[5])、 UPt_3 (文献[4])、 ^3He-B 相(文献[16])に応用した。

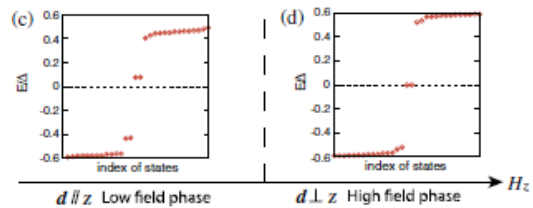


図 1: スピン三重項超伝導体 Sr_2RuO_4 のマヨラナゼロモード(右)とディラックモード(左)。図は文献[5]より転載。

(2) トポロジカル絶縁体・半導体の超伝導理論
トポロジカル絶縁体、ワイル半金属、ディラック半金属は、キャリアを注入することによりフェルミ面をもつ金属となり、物質によっては、低温で超伝導体となる。これらトポロジカル絶縁体・半導体の超伝導理論を展開した。トポロジカル絶縁体・半導体は大きく2つの特徴を持っている。第1の特徴は、表面に固有のギャップレス状態をもつことである。もう1つは、大きなスピン軌道相互作用をもつため、フェルミ面上に、スピンおよび軌道自由度のテクスチャー構造が現れることである。この2つの構造によって、従来型の超伝導状態とは異なり、次の性質が現れることが明らかになった。まず、バルクが最も簡単なs波超伝導状態であっても、トポロジカル物質固有の表面状態によって表面付近では大きな異方的超伝導ギャップが誘起される(文献[7])。また、スピンおよび軌道自由度のテクスチャー構造により、そもそもバルクが異方的超伝導ギャップをもつトポロジカル超伝導体となりやすい(文献[19])。とりわけ、ワイル半金属においては、トポロジーによる拘束条件から、その超伝導状態は必ず異方的超伝導状態となることが明らかとなった(文献[15])。

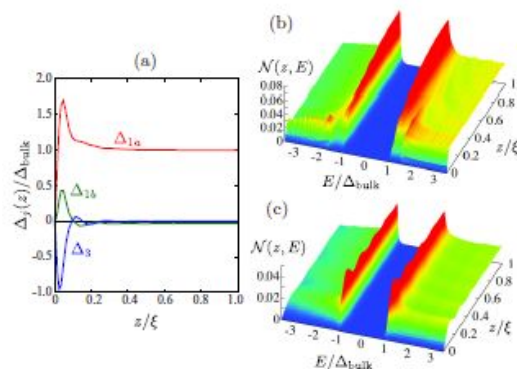


図 2: 表面ディラックフェルミオンにより、表面に誘起される異方的超伝導ギャップ。図は文献[7]より転載。

(3) トポロジカル結晶絶縁体・超伝導体の分類
様々な物質の解析を通じて、その存在が明らか

になった結晶対称性によって守られたトポロジカル相の統一的な理解を目指し、分類理論を構築した。特に、位相幾何学の理論である K 理論を用いて、鏡映、空間反転、2 回回転など位数 2 の点群によって守られたトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体をトポロジカル欠陥に局在するギャップレスモードも含め、完全に分類した(文献[14])。

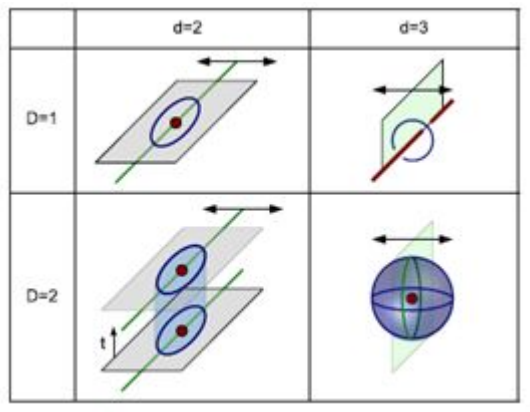


図 3: 鏡映対称性をもつトポロジカル結晶絶縁体・超伝導体中のトポロジカル欠陥の例。図は文献[14]より転載

(4)トポロジカル超流体と奇周波数ペア
異方的超流動・超伝導体に現れるアンドレーエフ束縛状態は、マヨラナ粒子や奇周波数クーパー対といった多面的な性質を伴う。奇周波数クーパー対は、常磁性磁気応答というバルク超伝導とは質的に異なる磁気応答を示す。本研究では、スピン三重項超流体におけるスピン帯磁率と奇周波数クーパー対との直接的な関係性を示した。次に、フェルミアークを持つ表面束縛状態の奇周波数クーパー対としての性質に注目し、磁気応答と対称性の密接な関わりを明らかにした(文献[8])。特に、系が対称性によって守られたトポロジカル相であるとき、奇周波数クーパー対は存在するが、その対称性のために磁気応答を示さないことがわかった。一方、なんらかの要因によって対称性が破られると奇周波数クーパー対は巨大な常磁性磁気応答を示すことがわかった。これらの理論は超流動 ^3He のみならず、重い電子系超伝導 UPt_3 やトポロジカル絶縁体を母体とした超伝導 $\text{Cu}_x\text{Bi}_2\text{Se}_3$ などに適用された(文献[6])。

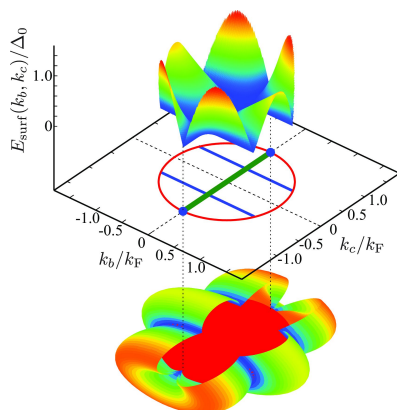


図 4: 重い電子系超伝導体 UPt_3 のギャップ関数と対称性によって守られた表面フェルミアーク。図は文献[8]より転載

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 22 件)

- [1] M. Takahashi, T. Mizushima, K. Machida, "Multiband effects on Fulde-Ferrell Larkin-Ovchinnikov states of Pauli-limited superconductors", Physical Review B 89, 064505-1-16 (Feb.2014) DOI:10.1103/PhysRevB.89.064505.
- [2] M. Sato, A. Yamakage, T. Mizushima, "Mirror Majorana zero modes in spinful superconductors/superfluids Non-Abelian anyons in integer quantum vortices", Physica E 55, 20-24-1-6 (Jan. 2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2013.07.011>.
- [3] A. Yamakage, M. Sato, "Interference of Majorana fermions in NS junctions", Physica E 55, 13-19-1-8 (Jan. 2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2013.08.030>.
- [4] Y. Tsutsumi, M. Ishikawa, T. Kawakami, T. Mizushima, M. Sato, M. Ichioka, K. Machida, " UPt_3 as a Topological Crystalline Superconductor", Journal of the Physical Society of Japan 82, 113707-1-5 (Oct. 2013) <http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.82.113707>.
- [5] Y. Ueno, A. Yamakage, Y. Tanaka, M. Sato, "Symmetry-Protected Majorana Fermions in Topological Crystalline Superconductors: Theory and Application to Sr_2RuO_4 ", Physical Review Letters 111, 087002-1-6 (Aug.2013) DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.087002.
- [6] T. Mizushima, Y. Tsutsumi, M. Sato, K. Machida, "Symmetry Protected Topological Superfluid $^3\text{He-B}$ ", Journal of Physics: Condensed Matter 27, 113203-1-56 (Mar. 2015) doi:10.1088/0953-8984/27/11/113203.
- [7] T. Mizushima, A. Yamakage, M. Sato, Y. Tanaka, "Dirac-fermion-induced parity mixing in superconducting topological insulators", Physical Review B 90, 184516-1-11 (Nov. 2014) DOI: 10.1103/PhysRevB.90.184516.
- [8] T. Mizushima, "Odd-frequency pairing and Ising spin susceptibility in time-reversal invariant superfluids and superconductors", Physical Review B 90, 184506-1-15 (Nov. 2014) DOI:10.1103/PhysRevB.90.184506.
- [9] S. Takami, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato, Y. Tanaka, "Quasi-Classical Theory of Tunneling Spectroscopy in Superconducting

- Topological Insulator", Journal of the Physical Society of Japan 83, 064705-1-10 (May. 2014)
<http://dx.doi.org/10.7566/JPSJ.83.064705>.
- [10] H. Ozawa, A. Yamakage, M. Sato, Y. Tanaka, "Topological phase transition in a topological crystalline insulator induced by finite-size effects", Physical Review B 90, 045309-1-17 (Jul. 2014)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.90.045309.
- [11] S. Kobayashi, K. Shiozaki, Y. Tanaka, M. Sato, "Topological Blount's theorem of odd-parity superconductors", Physical Review B 90, 024516-1-11 (Jul. 2014)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.90.024516.
- [12] T. Hashimoto, K. Yada, A. Yamakage, M. Sato, Y. Tanaka, "Effect of Fermi surface evolution on superconducting gap in superconducting topological insulator", Superconductor Science and Technology 27, 104002-1-10 (Aug. 2014)
 doi:10.1088/0953-2048/27/10/104002.
- [13] M. Koshino, T. Morimoto, M. Sato, "Topological zero modes and Dirac points protected by spatial symmetry and chiral symmetry", Physical Review B 90, 115207-1-11 (Sep. 2014)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.90.115207.
- [14] K. Shiozaki, M. Sato, "Topology of crystalline insulators and superconductors", Physical Review B 90, 165114-1-41 (Oct. 2014) DOI: 10.1103/PhysRevB.90.165114.
- [15] B. Lu, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, "Crossed Surface Flat Bands of Weyl Semimetal Superconductors", Physical Review Letters 114, 096804-1-5 (Mar. 2015)
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.096804.
- [16] Y. Tsutsumi, T. Kawakami, K. Shiozaki, M. Sato, K. Machida, "Symmetry-protected vortex bound state in superfluid $^3\text{He-B}$ phase", Physical Review B 91, 144504-1-12 (Apr. 2015)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.91.144504.
- [17] K. Shiozaki, M. Sato, K. Gomi, " Z_2 topology in nonsymmorphic crystalline insulators: Mobius twist in surface states", Physical Review B 91, 155120-1-9 (Apr. 2015) DOI: 10.1103/PhysRevB.91.155120.
- [18] C.S. Amorim, K.Ebihara, A. Yamakage, Y. Tanaka, M. Sato, "Majorana braiding dynamics in nanowires", Physical Review B 91, 174305-1-8 (May 2015)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.91.174305.
- [19] S. Kobayashi, M. Sato, "Superconductivity in Dirac Semimetals", Physical Review Letters 115, 187001-1-5 (Oct. 2015)
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.187001.
- [20] T. Hashimoto, K. Yada, M. Sato, Y. Tanaka, "Surface electronic state of superconducting topological crystalline insulator", Physical Review B 92, 174527-1-8 (Nov. 2015)
 DOI: 10.1103/PhysRevB.92.174527.
- [21] S. Kobayashi, Y. Tanaka, M. Sato, "Fragile surface zero-energy flat bands in three-dimensional chiral superconductors", Physical Review B 92, 214514-1-10 (Dec. 2015) DOI: 10.1103/PhysRevB.92.214514.
- [22] T. Mizushima, Y. Tsutsumi, T. Kawakami, M. Sato, M. Ichioka, K. Machida, "Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors—From the Basics to $^3\text{He-B}$ —", Journal of the Physical Society of Japan 85, 022001-1-74 (Jan. 2016)
<http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.022001>.
- 〔学会発表〕(計 32 件)
- [1] M. Sato, "Symmetry protected Majorana fermions in superconductors", CIFAR Quantum Materials Program Meeting, (Vancouver, Canada, 2013/May/5-11) (招待講演).
- [2] M. Sato, "Topological superconductors", 7th ISSP International Workshop and Symposium, Emergent quantum phases in condensed matter—from topological to first principles approaches (ISSP, University of Tokyo, Japan, 2013/Jun/2-21) (招待講演).
- [3] M. Sato, "Majorana fermions and Dirac fermions in superconductors", 固体におけるディラック電子系物理の新展開 (Kyoto, Japan, 2013/Jun/19-21) (招待講演).
- [4] M. Sato, "Topological superconductors", Summer School on Topological Materials: New Physics and Gateway to New Critical Technologies (ITAP, Turunc, Marmaris, Turkey, 2013/July/15-24) (招待講演).
- [5] T. Mizushima, "Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov states in two-band superconductors", Aspen Workshop: Multi-Component Many-Body Systems (Aspen, 2013/Aug/25-Sep/15).
- [6] T. Mizushima, "Topological Superfluidity of ^3He ", International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2013) (Matsue, Japan, 2013/Aug/1-6) (招待講演).
- [7] M. Sato, "対称性によって守られたトポロジカル相に関する最近の話題", 日本物理学会 2013 年秋季大会 (Tokushima, Japan, 2013/Sep/25-28) (招待講演).
- [8] T. Mizushima, "超流動 $^3\text{He-B}$ の磁場中トポロジカル量子相転移", 日本物理学会 2013 年秋季大会: シンポジウム「トポロジカル量子現象の新概念」(Tokushima, Japan, 2013/Sep/25-28) (招待講演).
- [9] M. Sato, "Majorana fermions in topological superconductor", Holography and String

- Correlation (Hanyang University, Korea, 2013/Nov/7-8) (招待講演).
- [10] M. Sato, "Symmetry protected Majorana fermions", NCTS Workshop on Quantum Condensation (QC13) (National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, 2013/Aug/26-Sep/6) (招待講演).
- [11] M. Sato, "Dirac fermion induced parity mixing of superconducting topological insulators", NCTS Workshop on Quantum Condensation (QC13) (National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, 2013/Aug/26-Sep/6) (招待講演).
- [12] M. Sato, "Majorana fermions in spinful crystalline superconductors", IAS Program on Topological Matter, Superconductivity and Majorana (Hong-Kong University of Science and Technology, Hong-Kong, China, 2014/Jan/6-30) (招待講演).
- [13] T. Mizushima, "Symmetry Protected Topological Superfluids and Superconductors", RIKEN-APW joint workshop "Highlights in Condensed Matter Physics" (Saitama, Japan, 2014/Jan/23-25) (招待講演).
- [14] T. Mizushima, "Topological phase transitions in superfluids and superconductors", International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014) (Kyoto, 2014/Dec/16-20) (招待講演).
- [15] T. Mizushima, "Dirac Fermion Induced Parity Mixing in Superconducting Topological Insulators", Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated System 2014 (Beijing, China, 2014/Oct/8-11) (招待講演).
- [16] T. Mizushima, J. Sauls, "Confinement effect on Anderson-Higgs modes in superfluid $^3\text{He-B}$ ", ULT2014 Frontiers of Low Temperature Physics (San Carlos de Bariloche, Argentina, 2014/Aug/14-19) (招待講演).
- [17] M. Sato, "カイラル p 波超伝導とマヨラナフェルミオン", カイラル対称性と基礎物理研究会 (The open university of Japan, Chiba, 2014/Apr/26) (招待講演).
- [18] M. Sato, "Topological superconductors superfluids", 2014 Weihai Summer School (Weihai, China, 2014/Aug/2) (招待講演).
- [19] M. Sato, "トポロジカル相の物理", Summer School 数理物理 2014 (University of Tokyo, Tokyo, 2014/Aug/30-31) (招待講演).
- [20] M. Sato, "Superconducting states in doped topological materials", Topological Aspects of Quantum Matters (National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan, 2014/12/11) (招待講演).
- [21] M. Sato, "Symmetry in topological insulators and superconductors", International Conference on Topological Quantum Phenomena (TQP2014) (Kyoto, 2014/Dec/16-20) (招待講演).
- [22] M. Sato, "Symmetry and Topology in insulators and superconductors", Mini-Workshop on Topological States and Non-Commutative Geometry (Tohoku University, Sendai, 2015/Mar/25-26) (招待講演).
- [23] T. Mizushima, "Surface Squashing Modes in Topological Superfluid $^3\text{He-B}$ " Grand Challenges in Quantum Fluids and Solids (Buffalo, NY, USA, 2015/Aug/7-9) (招待講演).
- [24] T. Mizushima, "Surface excitations in topological superfluid $^3\text{He-B}$ ", 2015 International Symposium on Quantum Fluids and Solids, (Niagara Falls Convention Center, Niagara Falls, NY, USA, 2015/Aug/9-15) (招待講演).
- [25] T. Mizushima, "Topological superconductivity of doped topological insulators", EMN Qiagdao Meeting 2015 (Qingdao, China, 2015/Jun/14-17) (招待講演).
- [26] T. Mizushima, "超流動 ^3He と冷却原子気体で広がるトポロジカル超流動の物理", 日本物理学会 2015 年秋季大会, (Osaka, 2015/Sep/16-19) (招待講演).
- [27] M. Sato, " Z_2 -Topology in nonsymmorphic crystalline insulators: Mobius twist in surface state", EMN Qiagdao Meeting 2015, (Qingdao, China, 2015/Jun/14-17) (招待講演).
- [28] M. Sato, "Topological Superconductivity in Topological Materials", 第 5 回半導体量子効果と量子情報の夏季研修会 (Nasu, Japan, 2015/Sep/10-12) (招待講演).
- [29] M. Sato, "真空の対称性とトポロジー: 物性物理と素粒子論の類似性から" 大阪市立大学特別荣誉教授 南部陽一郎先生追悼

シンポジウム「学部生・大学院生・研究者
が学ぶ南部先生の偉業」(Osaka City
University, Osaka, 2015/Sep/29) (招待講
演).

- [30] M. Sato, "Topology of crystalline insulators
and superconductors", IAS Program and
Croucher Conference on Topological Phases
in Condensed Matter and Cold Atomic
Systems (Hong-Kong University of Science
and Technology, Hong-Kong, China,
2015/Dec/11-15) (招待講演).
- [31] M. Sato, "対称性とトポロジカル相: トポロジ
カル物質", 第 17 回特異点研究会 (Keio
University, 2016/Jan/9-11) (招待講演).
- [32] M. Sato, "Exotic surface states in
topological crystalline materials",
Topological Phenomena in Novel Quantum
Matter: Laboratory Realization of
Relativistic Fermions and Spin Liquids
(Max Plank Institute, Dresden, Germany,
2016/Feb/29-Mar/04) (招待講演).

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 昌利 (SATO, Masatoshi)
京都大学・基礎物理学研究所・教授
研究者番号: 30313117

(2) 研究分担者

水島 健 (MIZUSHIMA, Takeshi)
大阪大学・基礎工学研究科・准教授
研究者番号: 50379707