

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 12 月 2 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2011～2015
課題番号：23540406
研究課題名(和文) 超伝導、磁性体、モット絶縁体におけるトポロジカル秩序とそれに由来する新奇物性

研究課題名(英文) Novel phenomena of topological phases in superconductors, magnets, and Mott insulators

研究代表者
藤本 聡 (Fujimoto, Satoshi)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：10263063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、電子の量子状態が位相幾何学的な非自明構造を有する物質において、新規物性が発現する可能性を理論的に探求するものであり、以下の新現象を予言し、その一部を実験グループとの共同研究によって実現することに成功した。(1)カイラル超伝導体におけるBerry位相揺らぎに由来する巨大熱電効果。この機構で発現する熱電効果の効率は従来知られているいかなる超伝導体をも越える画期的なものであり、URu₂Si₂で実現することが明らかになった。(2)カイラル磁性体におけるスカーミオンとモノポール磁気構造による創発的電磁気現象を解明した。(3)ワイル半金属における格子欠陥の生み出す新規輸送現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have investigated theoretically novel quantum phenomena in solids with topologically nontrivial electronic structures. We have predicted the following phenomena, and confirmed a part of them via the collaboration with experimental groups. (1) Giant thermoelectric effect due to Berry phase fluctuation in chiral superconductors. It is noted that the figure of merit of this effect is largest among all previously known superconductors, and thus this finding is important for future applications to thermoelectric devices. We have confirmed this effect experimentally for the heavy fermion superconductor URu₂Si₂ via the collaboration with the experimental group conducted by Prof. Matsuda in Kyoto University. (2) Emergent electromagnetic phenomena induced by skyrmion-monopole textures in chiral magnets. (3) A novel transport phenomenon in Weyl semimetals with topological defects, which is referred to as torsional chiral magnetic effect.

研究分野：物性物理学

キーワード：トポロジカル絶縁体 トポロジカル超伝導 Berry位相 電子相関

1. 研究開始当初の背景

固体電子系において実現するトポロジカル秩序とそれが引き起こす新奇物性は、超伝導、半導体、磁性の基礎分野からスピントロニクス、量子情報といった応用分野に亘る幅広い範囲で注目される重要テーマである。トポロジカル秩序とは量子多体系のヒルベルト空間におけるトポロジカルに非自明な構造を指し、従来の長距離秩序における局所秩序変数とは異なる新しい量子凝縮相を特徴づける概念である。研究開始当初では、このテーマの中心的な研究対象は電子間相互作用が無視できるような系であり、電子相関効果の役割についてはよく理解されていなかった。それゆえ電子相関効果がトポロジカル相に及ぼす影響、また、電子相関効果によって初めて発現する新しいタイプのトポロジカル量子現象を探索することは重要な研究課題であり、これが本研究課題の目的であった。

2. 研究の目的

空間反転対称性の無い超伝導や、フラストレート磁性体、スピン軌道相互作用の強いモット絶縁体において実現するトポロジカル秩序とそれに起因する新奇物性の理論研究を目的とする。特にこれまで十分研究されていなかった電子間相互作用の効果にスポットを当てた研究を行う。トポロジカル超伝導で実現可能なマヨラナ・フェルミオンがもたらす非アーベル統計、トポロジカル絶縁体のギャップレス表面状態に由来する輸送特性、磁気電気効果等の新奇現象への電子相関の影響、および、トポロジカル・モット絶縁体の可能性を探索し、さらに強相関の極限である量子スピン系におけるトポロジカル秩序の実現可能性を明らかにする。また、強相関電子系で実現するワイル半金属、およびワイル超伝導状態において特徴的なカイラル異常に起因する新規物性を探索し、実験的な発見の指針となる結果を得ることを目指す。

3. 研究の方法

平成23年度は、超伝導体と磁性体との接合系において、マヨラナ・フェルミオンが実現され、かつ乱れ等に対して安定化される機構、一般的条件を明らかにする。さらに、それに由来する、実験で検出可能な新奇物性の理論予言ができるように研究を行う。また、平行して、トポロジカル絶縁体に対する電子相関効果を調べる。特にモット転移近傍に強相関領域におけるギャップレス表面状態への電子相関効果の影響を明らかにする。さらに、また、電子相関によるトポロジカル秩序間の相転移の可能性も追求する。平成24年度以降は、上述の研究をさらに遂行するとともに、量子スピンにおけるトポロジカル秩序の可能性を、いくつかのモデルに対して調べる。さらに強相関電子系で実現するワイル半金属、およびワイル超伝導状態における新規物

性の研究を行う。また、適宜、実験グループと共同研究を進めることによって、理論の検証も行っていく。

4. 研究成果

以下の研究成果を挙げた。

- (1) ワイル半金属状態におけるトポロジカル欠陥に起因するカイラル磁気効果の研究...ワイル・フェルミオン型のバンドを有するワイル半金属は、トポロジカル絶縁体、あるいはそれに近いバンド構造において、電子相関効果による磁気秩序によってバルクギャップが閉じると発現することが知られている。そのバンド構造に非自明な Berry 曲率を伴うため、種々の特異な輸送現象が発現することがこれまで理論的に予言され、また、その一部が実験的に確認されている。中でも平衡電流が誘起されるカイラル磁気効果は、場の理論モデルで予言されながらも、現実の固体物質では実現しないことがこれまで指摘されていた。この問題に関連して、我々は転位などの格子欠陥が存在する場合について詳細に調べた。その結果、線状欠陥において局在した準粒子モードが平衡電流を運ぶカイラル磁気効果が、現実の固体物質でも発現可能であることを理論的に発見した。これはワイル半金属の最も特徴的な性質を実験的に確認できる可能性を開く重要な結果である。
- (2) Berry 位相ゆらぎによる巨大 Nernst 効果の理論...2014年に実験的に観測された重い電子系超伝導体 URu₂Si₂ の超伝導転移温度直上における巨大な Nernst 効果は、従来の理論では説明できない極めて不可思議な振る舞いをするが、この現象の起源を説明するため、トポロジカルな Berry 位相の揺らぎによる新規熱電現象の理論を展開した。我々の理論は、実験の定量的な説明に成功するとともに、URu₂Si₂ で実現している超伝導状態が、時間反転対称性を自発的に破るカイラル d 波超伝導であり、またトポロジカルな Weyl 超伝導状態であることを確立するものである。
- (3) モット絶縁体におけるトポロジカル相...電子相関が強い極限である1次元モット絶縁体におけるトポロジカルな量子相転移では、従来の弱相関系におけるトポロジカルバンド絶縁体や超伝導体の場合とは異なり、相転移がギャップレス集団励起の出現によって特徴付けられることを明らかにした。また、他方、1電子描像が破綻したモット絶縁相であるにも関わらず、自由電子系におけるトポロジカル不変量が、トポロジカル・モット相を特徴づけることが明らかになった。
- (4) カイラル対称性によって守られたトポ

ロジカル相の物性の研究.....トポロジカル絶縁体・超伝導体では、そのトポロジカルな性質は系に固有のトポロジカル不変量で特徴づけられる。多くの場合、このトポロジカル不変量は、輸送現象や電磁気応答等を通して、実験で観測できる物理量として現れることが知られている。ところが、ある種のトポロジカル絶縁体・超伝導体では、そのトポロジカル不変量がいかなる物理量として実験で観測可能なかが、これまで分かっていなかった。我々はこの問題に対する答えを与えることに成功した。具体的には、ある種の接合系を考えると、ホール効果等の電磁気応答や熱応答にその系を特徴づけるトポロジカル不変量が現れることが明らかになった。また、我々は接合系ではなく、バルクな系に対しても、このトポロジカル不変量が現れる物理量を探索し、ある種の電気磁気効果で誘起されるカイラル分極に、そのトポロジカルな特徴が現れることを明らかにした。

- (5) 接合系におけるマヨラナ粒子出現条件の研究.....トポロジカル絶縁体と超伝導体との接合系に現れるマヨラナ・フェルミオンの存在条件と安定性について研究を行った。その結果、ある種の接合系では乱れ等に対してトポロジカルに安定ではないマヨラナ・フェルミオンが現れることが可能であることを示した。これはマヨラナ・フェルミオンを用いたトポロジカル量子計算への応用上、重要な結果である。
- (6) カイラル磁性体におけるスキルミオンとモノポールのダイナミクスが生み出す創発的電磁気現象.....カイラル磁性体における磁気スキルミオンテクスチャのモノポールを伴う消失過程において発現する創発的な電磁気現象を理論的に調べた。磁気モノポールが、遍歴電子に働く創発的な電場を生み出すことがわかり、磁荷と電荷を併せ持つ、Dyonのように振る舞うことが明らかになった。
- (7) トポロジカル絶縁体に対する電子相関効果の研究.....トポロジカル絶縁体において、強相関効果によって引き起こされる磁気転移、モット転移の性質を明らかにした。電子相関効果に対するトポロジカル相の安定性と不安定性についての知見が得られた。

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 17件)

Masatoshi Sato and Satoshi Fujimoto, “Majorana Fermions and Topology in

Superconductors (Invited Review Papers)”, Journal of the Physical Society of Japan (2016)掲載決定

H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, “Torsional chiral magnetic effect in a Weyl Semimetal with a Topological Defect”, Physical Review Letters 116, 166601-1—6 (2016), 10.1103/PhysRevLett.116.166601

T. Yamashita, Y. Shimoyama, Y. Haga, T. D. Matsuda, E. Yamamoto, Y. Onuki, H. Sumiyoshi, S. Fujimoto, A. Levchenko, T. Shibauchi, and Y. Matsuda, “Colossal thermomagnetic response in the exotic superconductor URu₂Si₂”, Nature Physics 11, 17--20 (2015), 10.1038/NPHYS3170

H. Sumiyoshi and S. Fujimoto, “Giant Nernst and Hall effects due to chiral superconducting fluctuations”, Physical Review B 90, 184518-1--20 (2014), 10.1103/PhysRevB.90.184518

Tsuneya Yoshida, Robert Peters, Satoshi Fujimoto, and Norio Kawakami, “Characterization of a Topological Mott Insulator in One Dimension” Physical Review Letters 112, 196404-1--5 (2014), 10.1103/PhysRevLett.112.196404

R. Takashima and S. Fujimoto, “Electrodynamics in Skyrmions Merging”, Journal of the Physical Society of Japan 83, 054717-1—11 (2014), 10.7566/JPSJ.83.054717

Ken Shiozaki and Satoshi Fujimoto, “Dynamical axion in topological superconductors and superfluids” Physical Review B 89, 054506-1--12 (2014), 10.1103/PhysRevB.89.054506

Tsuneya Yoshida, Robert Peters, Satoshi Fujimoto, and Norio Kawakami, “Topological phase in a two-dimensional metallic heavy-fermion system”, Physical Review B 87, 165109-1--6 (2013), 10.1103/PhysRevB.87.165109

Tsuneya Yoshida, Robert Peters, Satoshi Fujimoto, and Norio Kawakami, “Topological antiferromagnetic phase in a correlated Bernevig-Hughes-Zhang model”, Physical Review B 87, 085134-1—5 (2013) 10.1103/PhysRevB.87.085134

Ken Shiozaki and Satoshi Fujimoto, “Electromagnetic and Thermal Responses of Z Topological Insulators and Superconductors in Odd Spatial Dimensions”, Physical Review Letters

110, 076804-1—5 (2013)
 10.1103/PhysRevLett.110.076804
 Hiroaki Sumiyoshi and Satoshi Fujimoto, “Quantum Thermal Hall Effect in a Time-Reversal-Symmetry-Broken Topological Superconductor in Two Dimensions : Approach From Bulk Calculations”, Journal of the Physical Society of Japan 82, 023602-1—5 (2013) 10.7566/JPSJ.82.023602
 Takahiro Fukui, Ken Shiozaki, Takanori Fujiwara, and Satoshi Fujimoto, “Bulk-Edge Correspondence for Chern Topological Phases: A Viewpoint from a Generalized Index Theorem”, Journal of the Physical Society of Japan 81, 114602-1—7 (2012), 10.1143/JPSJ.81.114602
 Ken Shiozaki, Takahiro Fukui, and Satoshi Fujimoto, “Index theorem for topological heterostructure systems”, Physical Review B 86 125405-1—7 (2012), 10.1103/PhysRevB.86.125405
 Y. Tada, R. Peters, M. Oshikawa, A. Koga, N. Kawakami and S. Fujimoto, “A study on correlation effects in two dimensional topological insulators”, Phys. Rev. B 85, 165138-1-18 (2012), 10.1103/PhysRevB.85.165138
 Ken Shiozaki and Satoshi Fujimoto, “Green's function method for line defects and gapless modes in topological insulators: Beyond the semiclassical approach”, Physical Review B 85, 085409 (2012), 10.1103/PhysRevB.85.085409
 T. Hattori, Y. Ihara, Y. Nakai, K. Ishida, Y. Tada, S. Fujimoto, N. Kawakami, E. Osaki, K. Deguchi, N. K. Sato and I. Satoh, “Superconductivity induced by longitudinal ferromagnetic fluctuations in UCoGe”, Physical Review Letters 108, 066403-1-4 (2012), 10.1103/PhysRevLett.108.066403
 Tsuneya Yoshida, Satoshi Fujimoto and Norio Kawakami, “Correlation effects on a topological insulator at finite temperatures”, Physical Review B 85, 125113 (2012), 10.1103/PhysRevB.85.125113

[学会発表](計 11件)

藤本 聡, “Skyrmion dynamics in chiral-magnet-superconductor heterostructures”, 国際ワークショップ SUPERSPIN2015 (招待講演) 2015年4月30日, Trondheim, Norway
 藤本 聡, “Giant Nernst effects due to

Berry phase fluctuation in chiral superconductor URu₂Si₂”, 国際会議 Materials and Mechanisms of Superconductivity 2015, Geneva, Switzerland, 2015年8月25日
 藤本 聡, “Colossal thermoelectric effect due to Berry phase fluctuation in chiral superconductor URu₂Si₂”, International Conference on Magnetism 2015, Barcelona, Spain, 2015年7月10日
 藤本 聡, “Giant Nernst effects due to Berry phase fluctuation in chiral superconductors”, 国際会議 Novel Quantum States in Condensed Matter 2014 YITP Long-Term workshop, Panasonic International Auditorium of Yukawa Institute for Theoretical Physics (招待講演), 2014年11月21日, 京都大学基礎物理学研究所
 藤本 聡, “Dynamical axion in noncentrosymmetric topological superconductors”, 国際会議 SCES2014, 2014年7月7日~11日, Grenoble, France
 藤本 聡, “超伝導体におけるマヨラナ粒子”, 日本物理学会 2014年第69回年次大会(招待講演)2014年3月28日, 東海大学湘南キャンパス
 藤本 聡, “Thermal responses of topological superconductors”, 国際ワークショップ IMR workshop “Superconductivity Research advanced by new materials and spectroscopies” (招待講演), 2013年7月25日, 東北大学金属材料研究所
 藤本 聡, “Electromagnetic and thermal responses of Z topological insulators and superconductors in three dimensions”, Shanghai Center for Complex Physics International Workshop (招待講演), 2013年01月11日~2013年01月11日, 上海交通大学、中国
 藤本 聡, “トポロジカル超伝導体”, 日本物理学会 2012年秋季大会(招待講演), 2012年09月18日, 浜国立大学常盤台キャンパス
 藤本 聡, “Topics on topological insulators: Correlation effects and electromagnetism of chiral-symmetric classes in odd dimensions”, 国際ワークショップ 12th Japanese-German Symposium "Emergent Phenomena in Novel Quantum Phases of Condensed Matter"((招待講演), 2012年07月15日, 伊豆, 静岡
 藤本 聡, “Topological Phases in Noncentrosymmetric Materials” and “Tutorial Lectures on Noncentrosymmetric Superconductors”, 国際ワークショップ 2012 Hangzhou Workshop on Quantum

Matter(招待講演), 2012年04月04日, 浙江大学、中国

〔図書〕(計 3 件)

Y. Yanase and S. Fujimoto, "Microscopic Theory of Pairing Mechanisms, in *Non-Centrosymmetric Superconductors Introduction and Overview*" eds. E. Bauer and M. Sigrist (Springer) Chapter 6

S. Fujimoto and S. K. Yip, "Aspects of Spintronics, in *Non-Centrosymmetric Superconductors Introduction and Overview*" eds. E. Bauer and M. Sigrist (Springer) Chapter 8

藤本聡, 川上則雄, 「量子多体系の物理」
数理科学SGCライブラリ(サイエンス社)

〔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

藤本聡 (FUJIMOTO, Satoshi)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授
研究者番号：10263063