

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2020

課題番号：15K05054

研究課題名(和文) 曲がった時空、境界のある時空の物理から見る、超弦理論の特異な性質

研究課題名(英文) Exotic properties of superstring theory from curved space-time and space-time with boundary

研究代表者

山口 哲 (Yamaguchi, Satoshi)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：90570672

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)：曲がった背景や境界、defectの入った場の理論に関して研究を行い、そのような場の理論に関する性質を理解した。defectの入った共形場理論に最近開発された新しい手法を適用し、その手法がdefectがある場合においても有用だということを示した。境界のある空間に関する数学であるAPS指数定理の研究も行い、数学としても意味がある新たな定理を証明した。さらに、それらから得た知見を応用し、強結合のゲージ理論の解析を行い、これまで知られていなかった新しいエキゾチックな相を発見した。また、最近のホット・トピックであるフラク톤の研究も行い、様々な成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の世界は、どのような法則で記述されるのか、というのが物理学が問いかけてきた疑問です。素粒子の理論を記述するための「場の理論」や重力を含む「超弦理論」は、そのような理論であると考えられています。しかし、これらの理論はその大部分が完全には解けません。したがって、これらが本当に我々の世界を記述しているか確かめるためには、解けないものの性質をなんとかして調べる必要があるわけです。我々の研究は、その手法として曲がった時空や境界、defectなどを考えるという手段を用いて調べました。成果として、解析に必要な数学の定理を発見したり、従来の方法では分からなかったような場の理論の性質が分かったりしました。

研究成果の概要(英文)：I studied quantum field theories on curved backgrounds, space-time with boundaries, or defects to understand the properties of such field theories. I applied a new method recently developed for conformal field theories with defects, and showed that the method is useful even in the presence of defects. We also studied the APS index theorem, which is a mathematical theorem on spaces with boundaries, and proved a new theorem that makes sense as mathematics. I also applied these results to the analysis of strongly coupled gauge theories, and discovered new exotic phases that were not known before. We also studied fracton phases, a recent hot topic, and obtained various results.

研究分野：素粒子理論

キーワード：場の理論 対称性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

曲がった時空で弦理論を考えることの重要性は、古くから多くの研究者に認識されていて、盛んに研究されてきていた。一方で曲がった時空で場の理論を考えることの重要性は、やっと近年において特にトポロジカル物質の研究などを通じて認識され始めた。ただ、まだまだ研究は始まったばかりであり、多くのことが(その後明らかになることも含めて)未解決であった。

同様に、境界や defect のある場の理論を考える重要性は、古くから物性の研究者の間では認識されていたが、素粒子論の研究者の間では、やっとその重要性が認識され始めた。素粒子論的な立場からの defect の研究は、この当時まだまだ未開拓であった。

2. 研究の目的

曲がった時空での弦理論や場の理論、そして境界や defect の入った弦理論や場の理論の研究を通じて、弦理論や場の理論の理解を深めることである。

重力を含まないような素粒子物理には、曲がった時空も境界や defect も現れない。しかし、そのような物理の理解も、曲がった時空や境界や defect を考えることによって、それ以外の方法では理解が難しい性質がある。そのような性質についての理解を深める。

3. 研究の方法

場の理論や弦理論を曲がった時空や、境界や defect の入った時空の上で考える。このような場の理論での分配関数などの物理量を考えることによって、その整合性などの条件から物理量を求める、あるいは物理量の定性的な性質に対して制限が得られる。これらの結果から、(平らで境界も defect もない時空も含めて)弦理論や場の理論に対する理解を深める。

4. 研究成果

4.1 Defect の入った共形場理論。

我々は、近年開発された共形場理論の解析の新しい手法について defect の観点から研究した。特に 4 - 次元の $O(N)$ モデルにおける twist defect について Rychkov-Tan による展開の手法を適用し、defect 上のある種の局所演算子の共形次元を得た。ここで得た共形次元は、Feynman 図による従来の手法で得たものと一致し、新しい手法の妥当性と有用性を示せた。

4.2 ドメインウォールによる APS 指数定理の理解。

Atiyah-Patodi-Singer (APS) 指数定理は、トポロジカル相における物質の表面上の物理を理解するために注目を集めている。また、素粒子論で用いられる場の理論でのアノマリーの新しい見

方でも重要な役割を果たしている。しかし、この定理の数学的セットアップは、フェルミン場に「APS 境界条件」として知られている非局所境界条件を課しているため、トポロジカル物質の境界とは直接関係しない。そこで我々は大阪大学の深谷氏と大野木氏とともに APS 指数の再定式化を行った。この最定式化においては defect の一種であるドメインウォールが重要な役割を果たす。我々は APS 指数と同じ指数が、局所境界条件を有するドメインウォールのフェルミオン Dirac 演算子から藤川の方法を用いて得られることを見出した。

最初にこの研究をやったときには、数学的には厳密ではなかった。後で東大の古田氏、山下氏、名古屋大の松尾氏の 3 名の数学者が共同研究に加わり、一般に偶数次元 APS 指数はドメインウォール Dirac 演算子の 不変量で書き直せることを数学的に厳密に証明した。さらに Mod 2 パージョンの APS 指数についても同様の定理を発見し、証明した。

さらに我々は共同研究者とともに APS 指数の格子ゲージ理論における定式化に成功した。この定式化には、上で述べたドメインウォールによる APS 指数の見方を用いるのが本質的である。

関連して、我々は大野木氏、深谷氏、Wu 氏とともに、奇数次元におけるギャップをもつフェルミオン系のトポロジカルな特徴づけに対する研究を行った。具体的には $U(1)$ ゲージ場に結合し、フェルミオンについて双一次形式の一般的なハミルトニアンをもつ系に対して、Chern-Simons 有効作用の係数 (Chern-Simons level) と負エネルギー固有状態の波動関数によるベリー接続のチャーン指標が等価であることを示した。その際、等価性には一般化された Ward-高橋恒等式が重要であることを指摘した。

4.3 高次形式対称性も含む 't Hooft アノマリー整合条件と強結合ゲージ理論の相構造

我々は、近年発展している高次形式対称性を含む 't Hooft アノマリー整合条件を用いた強結合ゲージ理論の相構造の解析を行った。特にゲージ群が $SU(N)$ で (擬) 実表現の Weyl フェルミオンを 1 つ含む場合に、中心対称性とカイラル対称性の混合アノマリーを考えることにより、あり得るカイラル対称性のパターンを調べた。例として、 $SU(6)$ で 3 階反対称テンソル表現の Weyl フェルミオンが一つある場合には、フェルミオン双線形式が凝縮しないにもかかわらず、カイラル対称性が破れるという、エキゾチックな現象が起こることを発見した。

また、我々は、ある種のゲージ理論において、カイラル対称性の自発的破れとドメインウォールを、1 形式対称性を含むような 't Hooft アノマリー整合条件を用いて調べた。この理論では離散的なカイラル対称性が破れ、そのために動的なドメインウォールが存在できる。このドメインウォールの低エネルギー有効理論が満たすべき拘束条件を 1 形式対称性の 't Hooft アノマリー整合条件から導いた。

4.4 超対称性を持つフラクトン相

フラクトン相は量子情報、物性などで最近注目されている物質の相である。特にエントロピーが示量性でないことや、粒子的な励起で動きが制限されたものがあること「部分系対称性」と呼ばれる新奇な対称性など、興味深い性質を示す。

我々は、このフラクトン相の研究を場の理論の立場から行った。特に超対称性を持つフラクトン相を構築した。

また、この結果を利用し、自然なフェルミオンのなフラクトン相のモデルを提唱した。この我々が作った超対称模型、およびフェルミオン模型では、フェルミオンのな部分系対称性のために大きな基底状態の縮退があり、しかも残留エントロピーが体積ではなく面積に比例することが分かった。

また、超対称性のあるテンソルゲージ理論と、その中の欠陥としてのフラクトンについて超対称性の方からの研究を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 H. Fukaya, M. Furuta, S. Matsuo, T. Onogi, S. Yamaguchi, M. Yamashita	4. 巻 -
2. 論文標題 The Atiyah-Patodi-Singer index and domain-wall fermion Dirac operators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Fukaya Hidenori, Onogi Tetsuya, Yamaguchi Satoshi, Wu Xi	4. 巻 101
2. 論文標題 Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs formula for a general Hamiltonian	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.101.074507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Hidenori Fukaya, Naoki Kawai, Yoshiyuki Matsuki, Makito Mori, Katsumasa Nakayama	4. 巻 -
2. 論文標題 Atiyah-Patodi-Singer index on a lattice	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Yamaguchi Satoshi	4. 巻 2019
2. 論文標題 't Hooft anomaly matching condition and chiral symmetry breaking without bilinear condensate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 014, 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2019)014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Numasawa Tokiro, Yamaguchi Satoshi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Mixed global anomalies and boundary conformal field theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 202, 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2018)202	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fukaya Hidenori, Onogi Tetsuya, Yamaguchi Satoshi	4. 巻 96
2. 論文標題 Atiyah-Patodi-Singer index from the domain-wall fermion Dirac operator	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.125004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Satoshi Yamaguchi	4. 巻 2016, 091B01
2. 論文標題 The ϵ -expansion of the codimension two twist defect from conformal field theory	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Prog. Theor. Exp. Phys.	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptw115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 5件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 山口哲
2. 発表標題 ゲージ理論におけるフェルミオン4次の演算子の凝縮について
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Atiyah-Patodi-Singer index from the domain-wall Dirac operator
3. 学会等名 Mini-workshop on Symmetry and Interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Atiyah-Patodi-Singer index from the domain-wall fermion Dirac operator
3. 学会等名 Strings 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Defects in Conformal Field Theory
3. 学会等名 Quantum Math (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山口 哲
2. 発表標題 't Hooft アノマリー整合条件とフェルミオン双線形凝縮のないカイラル対称性の破れ
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Mixed global anomalies and boundary conformal field theories
3. 学会等名 Bootstrap Approach to Conformal Field Theories and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Codimension 2 twist defects in Wilson-Fisher theories
3. 学会等名 Holography, Quantum Entanglement and Higher Spin Gravity (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Codimension two twist defects in Wilson-Fisher theories
3. 学会等名 Progress in Quantum Field Theory and String Theory II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Two dimensional superconformal field theories from Riemann surfaces with Boundary
3. 学会等名 Strings 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Satoshi Yamaguchi
2. 発表標題 Two dimensional superconformal field theories from Riemann surfaces with Boundary
3. 学会等名 KIAS-YITP Joint Workshp, Geometry in Gauge Theories and String Theory (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------