

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03820

研究課題名(和文)場の理論における創発する対称性の研究

研究課題名(英文) Emergent Symmetries in Quantum Field Theories

研究代表者

山崎 雅人 (Yamazaki, Masahito)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：00726599

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)：伝統的な物理学では対称性はエネルギーが低くなるについて破れていくが、逆に対称性が創発していく場合もあることが知られている。本研究では、数理的な手法を駆使して、超対称性と呼ばれる時空の対称性の創発のよりよい理解を目指した。具体的には筆者らにより構成された超対称性が低次元で創発する例が知られているが、これらの理論から位相的場の理論を構成することを示した。一方、理論自体に対称性がなくても、超対称場の理論のBPSセクターを考えることでヤンギアンと呼ばれる無限次元の対称性が創発する現象についても系統的に調べ、その可積分構造と場の理論の対応が通常の意味では成り立たない例の存在を世界で初めて示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対称性が創発する現象自体は我々の世界の理解の根源に関わる極めて基礎的な問題である。本研究ではこの問いに対して、具体的な超対称場の理論を考え、さらに超対称局所化や可積分などの数理的手法を併用して迫り、結果として数理的構造である位相的場の理論のデータ(モジュラーテンソル圏)や可積分系(ヤンギアン)などを同定するに至った。さらにホログラフィーのアンサンブル平均において対称性が創発する現象も議論した。これらの成果は、物理学そのものについての根源的な問いと最先端のテクニックや数理を関係づける可能性を明示してみせたものであり、将来におけるさらなる研究のための雛形になるものであると考えている。

研究成果の概要(英文)：While more symmetries are broken as we lower the energy scale of the theory in most of the examples we know, it is known that there are some exceptional cases where symmetries emerge. In this research, we aimed for better understanding of emergence of symmetries by combination of physical and mathematical methods. More concretely, we started with examples of theories with emergent supersymmetries in the low energies (originally discovered by author and collaborators), and constructed topological quantum field theories by taking appropriate limits of the supersymmetric partition functions. We also discussed emergence of Yangian-type infinite-dimensional symmetries in the BPS sectors of supersymmetric field theories, and constructed for the first time examples where the proposed correspondence between integrable models and quantum field theories break down. We moreover discussed examples of emergent global symmetries in the discussion of ensemble averages in holography.

研究分野：素粒子理論

キーワード：対称性の創発 超対称場の理論 位相的場の理論 頂点作用素代数 可積分系 ホログラフィー アンサンブル平均

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

伝統的な物理学において、エネルギースケールが低くなるにつれ、対称性はどんどん破れていくのが一般的である。しかし、これとは逆に対称性が低エネルギーで創発する可能性があることが知られている。それでは、対称性の創発は、単に偶然に起こる現象なのだろうか、それとも何か理由があって、あるパターンを持ちより普遍的に起こる現象なのだろうか？この根源的な問題に数理的な手法を駆使して迫りたいというのが本研究開始時の動機である。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問いに対する一定の手がかりを見つけることを目指す。特に場の理論において対称性(例えば超対称性)が創発する現象を、具体例の構成および一般論の探究により系統的に研究し、そのパターンを探る。この際、著者自身が長年研究してきた解析的・数値的なツール(例えば超対称局所化、共形ブートストラップ、超弦理論からの実現、ホログラフィーなど)を組み合わせて場の理論に応用することで定量的かつ精緻な議論が可能になる。

3. 研究の方法

筆者と共同研究者である Dongmin Gang 氏が 2018 年のプレプリントで見つけた超対称性(時空の対称性)が創発する例を研究の出発点とする。この理論は時空の 3 次元の理論であり、高エネルギーつまりラグランジアンで二つの超対称性のみを持つが、筆者らの議論により低エネルギーでは実は四つの超対称性を持つことの証拠が複数得られている。一方、仮に四つの超対称性が存在するのならば、対応して位相的ツイストという操作を考え、超対称場の理論から位相的場の理論を得ることができると考えられる(一般に四つの超対称性がある場合は A ツイストと B ツイストが考えられるが、両者はミラー対称性で関連しているので、一般のゲージ理論全てを考えるのならば片方だけ考えれば良い。ここでは A ツイストを考える)。つまり、超対称性が創発する理論から出発して何らかの操作で位相的場の理論のデータが取り出せると期待できる。

4. 研究成果

本研究の成果は多岐にわたるが、本報告書の便宜上、そのうち特に重要と考えられるもののいくつかを以下では紹介する。

(1) 上記「研究の方法」で述べた筆者らにより構成された超対称性が創発する場の理論の例は、3次元の $N=4$ 超対称性を持つのみならず、その真空のモジュライ空間が(クーロン枝、ヒッグズ枝ともに)0次元である(つまり「ランク0」である)という性質を持つ。これらの理論に対して、筆者と韓国のグループとの国際共同研究である 2021 年の論文 JHEP 2021, 158 (2021)において、筆者らは理論の超対称分配関数に極限操作を施すことで位相的場の理論のデータを復元できることを発見した。また具体的を調べることでこうして得られた位相的場の理論の定義データはユニタリーではないが、ユニタリーなデータから数論的な操作であるガロア共役をとることにより得られることを示した。これは超対称性の創発と超対称局所化、位相的場の理論などを巻き込んだ興味深い成果であり既に関連論文も世界の複数のグループでなされるに至っている。

(2) (1) に述べた研究においては、3次元 $N=4$ の超対称性を持つ場の理論のうち、特にランクが 0 である理論から出発すれば、ユニタリーではない位相的場の理論が得られるという成果を JHEP に発表した。しかし、「そもそもなぜ位相的場の理論が得られるか」の詳細については謎なところも多かった。一般に超対称場の理論から位相的場の理論が得られるときにはしばしば位相的なツイストという操作を経ることが多いので、我々の昨年度の成果を超対称場の理論のツイストそのものとして理解できないかと問うことは自然である。そこで本研究の終盤では 3 次元 $N=4$ 理論のツイストから得られる位相的場の理論について系統的に調べた。特に非可換ゲージ群の場合に、位相的場の理論の境界に現れる頂点作用素代数を構成し、それらと真空のモジュライ空間(籐多様体)との関連や自由場表示について調べた(博士研究員の Ioana Coman, Myungo Shim, Yehao Zhou 氏とのプレプリント arXiv:2312.13363 [hep-th] を発表済み、現在査読中。)これらの成果は筆者により 2023 年度より開始した基盤 B の研究ともつながっていくものである。

(3) 上記(2)に関連して、我々が議論したランク 0 の場の理論は 4 次元 $N=4$ の超対称性をもつ場の理論の境界に現れる理論であることが筆者らの 2011 年の論文によって示されているので、4 次元 $N=4$ 理論のツイスト、またその境界を考えることは自然である。近年、4 次元 $N=4$ 理論の境界の境界から無限次元代数が現れることが示されており、2019 年の筆者と Wei Li 氏の論文で

は対応する代数(籐ヤングアン)が同定された.従って,籐ヤングアンそのものについて研究することは本研究の文脈でも重要である.そこで筆者は籐ヤングアンの研究を更に進め,その一環として超対称場の理論と位相的場の理論の関係として昔から知られているゲージ・ベータ対応が籐ゲージ理論の場合に成り立つかどうかを系統的に調べた.まず,カイラルではない籐(矢印とその逆向きがある籐)の場合にはゲージ・ベータ対応が成り立つことを示した.次に,カイラルな籐の場合には(ある仮定のもとで)ゲージ・ベータ対応が成り立たないことを示した(JHEP 11, 119 (2022)).

ゲージ・ベータ対応は Nekrasov と Shatashvili による 2008 年以来盛んに研究されてきており,関連論文は 500 を超えるが,これまでの論文はゲージ・ベータ対応を確認・導出するにとどまっております,ゲージ・ベータ対応が成り立たないことを具体的な代数を用い正確な証明により示したのは世界でも初である.特に,後者の否定的結果はこれまで多くの研究者が予想していなかったことであり,ゲージ・ベータ対応の歴史に残る成果になったと自負している.

(4)本研究の進展は目覚ましく,その問題意識は単に超対称性の創発という問題を越え,より一般の対称性の創発を議論する方向へと拡大をみせた.例として,上記(1)-(3)で議論したような位相的場の理論のもっとも簡単な例であるアーベリアンのチャーン=サイモンズ理論がバルク理論である設定において最新のホログラフィーの成果を取り入れた論文をカブリ IPMU のポストクラと共に発表しており(JHEP 2021, 44 (2021)),更にはこの設定においてホログラフィーのアンサンブル平均における創発する対称性について研究を行った(博士研究員 Meer Ashwinkumar および Jacob Leedom 氏とのプレプリント arXiv:2305.10224 [hep-th]を発表,現在査読中).このように,当初計画を大きく越えた成果が得られたことは特筆に値する.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Dmitry Galakhov, Wei Li, Masahito Yamazaki	4. 巻 110
2. 論文標題 Gauge/Bethe correspondence from quiver BPS algebras	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 119
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP11(2022)119	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 Masahito Yamazaki	4. 巻 64
2. 論文標題 Quiver Yangians and Crystal Melting: A Concise Summary	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 J. Math. Phys.	6. 最初と最後の頁 11101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0089785	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 Dmitry Galakhov, Wei Li, Masahito Yamazaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Toroidal and Elliptic Quiver BPS Algebras and Beyond	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2022)024	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 Dmitry Galakhov, Wei Li, Masahito Yamazaki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Toroidal and Elliptic Quiver BPS Algebras and Beyond	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2022)024	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 Dmitry Galakhov, Wei Li, Masahito Yamazaki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Shifted Quiver Yangians and Representations from BPS Crystals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)146	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 Meer Ashwinkumar, Matthew Dodelson, Abhiram Kidambi, Jacob M. Leedom, Masahito Yamazaki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Chern-Simons Invariants from Ensemble Averages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JHEP JHEP2021, 44 (2021)	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)044	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 Dongmin Gang, Sungjoon Kim, Kimyeong Lee, Myungbo Shim, Masahito Yamazaki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Non-unitary TQFTs from 3D $N = 4$ rank 0 SCFTs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP08(2021)158	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 Gang, D., Yamazaki, M	4. 巻 2020
2. 論文標題 Expanding 3d $N = 2$ theories around the round sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)102	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 Wei Li, Masahito Yamazaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Quiver Yangian from Crystal Melting	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2020)035	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 Dongmin Gang, Masahito Yamazaki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Expanding 3d N=2 Theories around the Round Sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2020)102	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 該当する

1. 著者名 Masahito Yamazaki, Kazuya Yonekura	4. 巻 2
2. 論文標題 Confinement as Analytic Continuation Beyond Infinity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 13383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.2.013383	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 Masahito Yamazaki	4. 巻 2019
2. 論文標題 New T-duality for Chern-Simons Theory	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2019)090	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 -

[学会発表] 計15件(うち招待講演 15件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Elliptic Hypergeometric Integrals in Mathematics and Physics
3. 学会等名 SCGP weekly week (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Quiver Yangians and Crystal Melting
3. 学会等名 Enumerative Invariants, Quantum Fields and String Theory Correspondences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Gauge/Bethe Correspondence Revisited
3. 学会等名 Strings and Fields 2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Crystal Meltings Revisited
3. 学会等名 Hirosifest @ Kavli IPMU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 BPS Algebras for Toric Calabi-Yau Manifolds
3. 学会等名 Geometry and Automorphicity of Supersymmetric Partitions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 M5-branes and topological phases
3. 学会等名 CREST tutorial workshop (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Quiver Yangians
3. 学会等名 International Congress on Mathematical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Quiver Yangians and Donaldson-Thomas Invariants
3. 学会等名 幾何学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 場の理論の最近の発展から
3. 学会等名 原子核三者若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Quiver Yangians
3. 学会等名 Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Integrability and Perturbative Quantum Field Theory
3. 学会等名 Algebraic structures in quantum field theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 A New Class of Integrable Field Theories
3. 学会等名 Exact computations in AdS/CFT (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Integrable Field Theories from Four-dimensional Chern-Simons Theory
3. 学会等名 Pollica Summer Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 Four-Dimensional Origin of Integrability
3. 学会等名 New Trends in Integrable Systems 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahito Yamazaki
2. 発表標題 A New Class of Integrable Field Theories
3. 学会等名 KIAS-YITP workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Masahito Yamazaki, a physicist/mathematician
<http://member.ipmu.jp/masahito.yamazaki/>
 Masahito Yamazaki 【山崎雅人(物理学者・数学者)】
<https://www.youtube.com/channel/UCz7Jg2ZzDxYwcBU4tDakAlg>

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
---------	---------