

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K23440

研究課題名（和文）対称性の正則および特殊部分群への力学的破れの解明

研究課題名（英文）Dynamical Symmetry Breaking to Special and Regular Subgroups

研究代表者

山津 直樹（Yamatsu, Naoki）

九州大学・理学研究院・学術研究員

研究者番号：10774094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子物理現象の背後にある物理法則を解明する手段として対称性と対称性の破れの機構の理解は重要である。本研究では素粒子現象を記述する基本言語である場の量子論における対称性の破れを従来までよく議論されていた正則部分群への破れだけでなく特殊（正則でない）部分群への破れの構造も含めて検討した。特に場の量子論における取扱いが非常に良く調べられている南部-ヨナ=ラシニオ有効模型を用いた解析により対称性の破れの構造に対して新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はこれまでのほとんどの対称性の破れの研究において暗黙のうちに仮定されていた正則部分群への破れと同様に特殊部分群（正則ではない部分群）への破れも含めた構造を理解することの必要性を再認識させるものである。本研究で行った南部-ヨナ=ラシニオ有効模型における力学的対称性の破れの機構だけでなく今後他の対称性の破れの機構においても対称性の正則および特殊部分群への破れの一般的な構造の理解が必要であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Symmetries and their breaking play a crucial role in particle physics. The purpose of this research is to investigate symmetry breaking patterns in quantum field theory including not only regular subgroup but also special (irregular) subgroup breaking. We found several new results about symmetry breaking by using Nambu-Jona-Lasinio type models.

研究分野：素粒子理論

キーワード：自発的対称性の破れ 力学的対称性の破れ 大統一理論 南部-ヨナ=ラシニオ模型 複合スカラー場

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。

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学において、対称性とその破れは標準理論だけでなく、その背後に隠れた統一理論を考える上でも重要な概念である。標準理論は強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用に付随する三つのゲージ対称性に基づくゲージ理論として構成されている。電弱対称性はヒッグス場の自明でない真空状態による対称性の破れ(通常自発的対称性の破れ、または、ヒッグス機構と呼ばれる)により低エネルギー領域で観測される通常の電磁対称性が実現される。その三つのゲージ対称性を統一する試みとして大統一理論が提唱された。この理論では標準理論のゲージ場(グルーオン、ウィークボソン、光子)が単一のゲージ場に統一される。さらに、クォークやレプトンも一つのフェルミオンに統一される可能性がある。そのため、大統一の概念が提唱されて以来、多くの研究者が様々な方法から取り組んでいる研究課題である。一般論として、標準理論を越える統一理論を考える際には、実験的にすくなくとも低エネルギー有効理論として確立した標準理論が実現される必要がある。そのため、大統一理論を考える際には、大統一ゲージ対称性が標準理論ゲージ対称性にどのように破れるのか、が理解されなければならない。

大統一ゲージ群の特殊部分群への破れを用いた新しいタイプの大統一理論特殊大統一理論を提唱した。従来の大統一理論では対称性の正則部分群への破れにより標準理論のゲージ対称性を実現する。そのため、対称性の特殊部分群への破れは起こり得ない極めて特別なことであると認識されていた。しかし、ヒッグス機構や力学的対称性の破れなどで特殊部分群への破れが起こり得ることが少数の文献ではあるが報告されていた。具体的には、ヒッグス機構によるユニタリー群の対称性の特殊部分群としての直行群やシンプレクティック群への自発的破れや、南部-ヨナ=ラシニオ(NJL)有効模型を用いた例外群の大統一理論における例外群の対称性の特殊部分群への力学的対称性の破れなどが知られていた。

先行研究において四次元 NJL 有効模型を用いてユニタリー群 $SU(N)$ のゲージ対称性の力学的破れの構造を調べた。結果として、フェルミオンの属するユニタリー群の表現により対称性の破れのパターンは異なるが、ほとんど全ての場合においてユニタリー群の対称性はその特殊部分群に破れることを判明した。このことからすくなくともユニタリー群の場合には対称性の特殊部分群への破れは特別なことではないと言える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、場の量子論における対称性の正則及び特殊(正則でない)部分群への破れの構造を明らかにすることである。特に、その試みの第一歩として場の量子論における取扱いが非常に良く調べられている四次元での NJL 有効模型を用いて、対称性の破れの一般的な構造を明らかにすることである。今後より複雑な四次元でのヒッグス機構や高次元理論での対称性の破れの機構を理解につなげ、標準理論を越える統一理論構築のための足がかりとすることである。

3. 研究の方法

上記で述べた背景をもとに、本研究では四次元 NJL 有効模型を用いて代表的な表現について対称性の破れの構造を調べる。具体的には四次のフェルミオン相互作用を含む作用での対称性の破れを解析するためにフェルミオン対凝縮から構成される複合スカラーの補助場を導入しその有効ポテンシャルを計算する。さらにその真空状態(ポテンシャルのエネルギー最小状態)においてどのような対称性が実現されているかを調べる。先行研究ではユニタリー群の定義表現や二階反対称表現などについて調べたため、まず直行群 $SO(N)$ のベクトルとスピノル表現の場合を調べる。ベクトル表現は全ての次元の値に対して実表現であり、直行群の次元に依らずに一般的な解析が可能である。一方、スピノル表現は次元の値より実表現、擬実表現、複素数表現となる。シンプレクティック群の定義表現、二階反対称テンソル表現を調べる。定義表現は擬実表現であり、一方二階反対称テンソル表現は実表現であり質的に異なる。準備研究から対称性の破れの構造が、群の表現の性質(実、擬実、複素表現)により大きく異なることが示唆されていた。つまり準備研究で行った複素表現の場合以外も調べることにより、これまでの研究成果と合わせてその背後にある一般的な対称性の破れの構造を明らかにする。

4. 研究成果

四次元 NJL 有効模型を用いた直行群 $SO(N)$ のスピノル表現のフェルミオン対凝縮による力学的対称性の破れの構造を調べた。直行群のスピノル表現を調べた理由は、スピノル表現が次元の

値により表現の複素、実、擬実性が変化すること、また、標準理論を越える大統一理論として典型的に議論される群の一つである 10 次元の直群 $SO(10)$ での対称性の破れの構造を調べるためである。解析結果からリー群の正則または特殊部分群への破れは表現の複素、実、擬実性と相関が見られることが判明した。具体的には、複素表現の場合は特殊部分群への対称性の破れが実現され、一方、自己共役表現(実・擬実表現)の場合は主に正則部分群への破れが実現される。また、直群のスピンルフェルミオン対凝縮による対称性の破れを分類するために直群の部分群、特に小群を『加算型』、『積型』、『埋め込み型』の三つに分類した。この分類方法は直群の部分群以外にも適用可能な概念である。

四次元 NJL 有効模型を用いたシンプレクティック群での実と擬実表現のフェルミオン対凝縮による力学的対称性の破れの構造を調べ、これまで得られたリー群の正則または特殊部分群への破れとユニタリー群と直群での表現の性質との相関が残りの古典リー群であるシンプレクティック群についても成り立つか確認した。シンプレクティック群においてもユニタリー群や直群での実と擬実表現での対称性の破れと同様に対称性の正則部分群への破れが起こり易いことが確認された。

本研究までの解析結果からリー群の正則または特殊部分群への破れは表現の複素、実、擬実性と相関が見られることが判明した。具体的には、複素表現の場合は特殊部分群への対称性の破れが実現され、一方、自己共役表現(実・擬実表現)の場合は主に正則部分群への破れが実現される。

また、本研究課題にあたり対称性の破れの解析に必要とされるリー群と表現論、特にリー群の部分群への表現分解について以前作成し公開していたデータだけでは不十分であったため追加のデータ作成を行った。作成したデータの一部を以前の公開データを更新する形で公開した。

本研究の当初の目的であった場の量子論における対称性の正則及び特殊(正則でない)部分群への破れの構造を明らかにするための試みの第一歩として四次元 NJL 有効模型を用いた対称性の破れの一般的な構造が明らかとなった。本研究成果はこれまでのほとんどの対称性の破れにおいて暗黙のうちに仮定されていた正則部分群への破れと同様に特殊部分群への破れも含めた構造を理解することの必要性を再認識させるものである。今後本研究で行った四次元 NJL 有効模型における力学的対称性の破れだけでなくより複雑な四次元でのヒッグス機構や高次元理論での対称性の破れの機構の一般的な構造を明らかにすることが重要であると考え。さらに、対称性の破れの構造の理解と同時にその応用として素粒子標準理論を越える統一理論構築の可能性を探求していくことは重要であると考え。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 102
2. 論文標題 Fermion Pair Production at $e^- - e^+$ Linear Collider Experiments in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15029
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.015029	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 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu	4. 巻 102
2. 論文標題 Effective Potential and Universality in GUT-Inspired Gauge-Higgs Unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.102.015005	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 Funatsu Schuichiro, Hatanaka Hisaki, Hosotani Yutaka, Orikasa Yuta, Yamatsu Naoki	4. 巻 101
2. 論文標題 CKM matrix and FCNC suppression in $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 55016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.101.055016	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 Kugo Taichiro, Yamatsu Naoki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Dynamical breaking to special or regular subgroups in the $SO(N)$ Nambu--Jona-Lasinio model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023B09
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa001	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16件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 S. Funatsu, H. Hatanaka, Y. Hosotani, Y. Orikasa, and N. Yamatsu
2. 発表標題 Linear Collider Signals of Z' bosons in GUT inspired Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 International Workshop on Future Linear Colliders, LCWS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 Second Version of "Finite-Dimensional Lie Algebras and Their Representations for Unified Model Building"
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 幡中久樹, 細谷裕, 船津周一郎, 折笠雄太, 山津直樹
2. 発表標題 Bhabha Scattering in Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 細谷裕, 船津周一郎, 幡中久樹, 折笠雄太, 山津直樹
2. 発表標題 Left-right Phase Transition in Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕, 折笠雄太, 山津直樹
2. 発表標題 Electroweak Phase Transition in Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会第 75 回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 Dynamical Breaking to Special or Regular Subgroups in Nambu--Jona-Lasinio Models
3. 学会等名 理研 iTHEMS- 九大ジョイントワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki Yamatsu
2. 発表標題 Baryon, Lepton, and Fermion Number Symmetries as parts of SU(16) GUT Gauge Symmetry
3. 学会等名 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?
3. 学会等名 素粒子現象論研究会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 USp(32) Special Grand Unification
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 幡中久樹, 細谷裕, 船津周一郎, 折笠雄太, 山津直樹
2. 発表標題 Fermion Pair Production at $e^- - e^+$ Linear Collider Experiments in GUT-Inspired Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細谷裕, 船津周一郎, 幡中久樹, 折笠雄太, 山津直樹
2. 発表標題 The Effective Potential and Universality in GUT Inspired Gauge-Higgs Unification
3. 学会等名 日本物理学会 2020 年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山津直樹, 折笠雄太, 船津周一郎, 幡中久樹, 細谷裕
2. 発表標題 CKM Matrix and FCNC in $SU(5) \times U(1) \times SU(3)$ Gauge-Higgs Unification
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 九後汰一郎, 山津直樹
2. 発表標題 Dynamical Breaking to Special or Regular Subgroups in $SO(N)$ NJL Model
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 細谷裕, 折笠雄太, 船津周一郎, 山津直樹, 幡中久樹
2. 発表標題 Dynamical gauge symmetry breaking and universality relations in the GUT inspired $SO(5) \times U(1) \times SU(3)$ gauge-Higgs unification
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 Updated and Expanded Version of "Finite-Dimensional Lie Algebras and Their Representations for Unified Model Building"
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山津直樹
2. 発表標題 Is Symmetry Breaking into Special Subgroup Special?
3. 学会等名 理研iTHEMS-九大ジョイントワークショップ
4. 発表年 2019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			
中国	華中師範大学			
チェコ	チェコ工科大学			