

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03821

研究課題名(和文) 格子カイラルゲージ理論を用いたゲージ対称性・フレーバー対称性実現の研究

研究課題名(英文) Study on the realization of gauge and flavor symmetries in chiral lattice gauge theory

研究代表者

菊川 芳夫 (Kikukawa, Yoshio)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：20252421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、標準模型や統一模型におけるゲージ対称性・フレーバー対称性の自発的破れのメカニズムを、格子カイラルゲージ理論、Banks-Casher 関係式、カイラル-ランダム行列理論、ゴールドストーン-ボソンの有効理論の手法を用いて解析した。解析の結果によれば、 $SO(10)$ カイラルゲージ理論における $SU(3)$ フレーバー対称性は $SO(3)$ 対称性に破れる可能性が強く示唆されている。一方、Eichten-Preiskill 模型(一般化ウィルソン項による格子カイラルゲージ理論の構成法)において、Block Spin変換による解析が進展し、模型の相構造と臨界点について新たな知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回得られた成果、すなわち、 $SO(10)$ カイラルゲージ理論における $SU(3)$ フレーバー対称性の $SO(3)$ への自発的な破れの可能性は、標準模型や統一模型におけるゲージ対称性・フレーバー対称性の理解、引いては、素粒子の質量スペクトルを理解する上で、最も単純化して設定における基礎的なデータを提供するものであり、学術的な意義があると言える。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have investigated the realizations of gauge and flavor symmetries in chiral gauge theories of the standard model and the grand unification models using chiral lattice gauge theory, Banks-Casher relation, chiral random matrix theory, NG boson effective field theory. As to the $SU(3)$ flavor symmetry in $SO(10)$ chiral gauge theory with three generation of chiral fermions in the 16 dim. reps., we found an evidence that the $SU(3)$ flavor symmetry should break down into $SO(3)$ symmetry.

研究分野：素粒子理論, 場の量子論

キーワード：カイラルゲージ理論 格子ゲージ理論 ゲージ対称性 フレーバー対称性 カイラルアノマリー Lefschetz Thimble

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

素粒子標準模型は、ゲージ群 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ に基づくカイラルゲージ理論であり、その $SU(2) \times U(1)$ 部分群に対応するゲージ対称性はヒッグス機構によって自発的に破れていると考えられている。この機構を担うヒッグス場の励起状態、すなわちヒッグス粒子は LHC 実験によってついに発見された。しかし、ヒッグス機構の背後にあるダイナミクスや対称性の解明は未だなされていない。また、右巻きニュートリノを含むクォーク・レプトンの世代、混合、CP 対称性の破れの構造といったフレーバー問題についても原理的な理解は未だ得られていない。さらに、宇宙初期のバリオン数・レプトン数生成、ダークマターといった宇宙論の課題にも、素粒子論の立場からの明解な説明が求められている。

このような標準模型とそれを越える統一模型の力学的な性質を調べるためには、カイラルゲージ対称性を明白に保つような、場の量子論の非摂動的な枠組みが必要になる。格子ゲージ理論は量子色力学を記述する非可換ゲージ理論 (QCD) の構成的な定義を与え、クォークの閉じ込めの一つの理論的理解を与えることができる。さらに、ハドロンの質量や電弱相互作用の理論的計算を数値的に実行するための非摂動的な枠組みを提供する。QCD の低エネルギー物理を理解する上で重要なカイラル対称性については、粒子重複 (species doubling) の理論的困難のあることが知られていた (Nielsen-Ninomiya 1981 [1, 2]) が、近年、Ginsparg-Wilson 関係式 (Ginsparg-Wilson 1982 [3]) を満足するゲージ共変で局所的な格子 Dirac 演算子が構成され (Neuberger 1998; Neuberger-Kikukawa 1998 [4, 5])、これによって格子ゲージ理論の枠組でもカイラル対称性をもつフェルミオンの摂動的及び非摂動的な性質を記述することが可能になった (Luscher 1999 [6])。

申請者は、近年、このカイラル対称性を厳密に保つ格子ゲージ理論の枠組みを用いて、Glashow-Weinberg-Salam 模型 (ゲージ群 $SU(2) \times U(1)$ に基づく電弱統一理論) の構成的な定式化を与えた (Kadoh-Kikukawa 2008 [7])。さらに、申請者は、2019 年までの研究によって、 $S_0(10)$ カイラルゲージ理論の格子定式化の方法を提案した (Kikukawa 2017 [8, 9])。この構成法では、ゲージ不変性が厳密かつ明白に保たれ、CP 不変性も成立し、カイラルアノマリーによるフェルミオン数の破れが正しく記述されている。このためカイラルアノマリーによるフェルミオン数非保存過程の記述が可能で定式化になっている。これによって、 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ に基づく標準模型や、 $S_0(10)$ 、 $SU(5)$ 、 $SU(4) \times SU(2) \times SU(2)$ に基づく統一模型を格子ゲージ理論として非摂動的に定式化することができている。

参考文献

- [1] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nucl. Phys. B 185, 20 (1981) [Erratum-ibid. B 195, 541 (1982)].
- [2] H. B. Nielsen and M. Ninomiya, Nucl. Phys. B 193, 173 (1981).
- [3] P. H. Ginsparg and K. G. Wilson, Phys. Rev. D 25, 2649 (1982).
- [4] H. Neuberger, Phys. Lett. B 417, 141 (1998); B 427, 353 (1998).
- [5] Y. Kikukawa and H. Neuberger, Nucl. Phys. B 513, 735 (1998).
- [6] M. Luscher, Phys. Lett. B 428, 342 (1998).
- [7] D. Kadoh and Y. Kikukawa, JHEP 0805:095 (2008) [arXiv:0709.3658 [hep-lat]].
- [8] Y. Kikukawa, PTEP 2019 11, 113B03 (2019) [arXiv:1710.11618 [hep-lat]].
- [9] Y. Kikukawa, PTEP 2019 7, 073B02 (2019) [arXiv:1710.11101 [hep-lat]].

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の格子カイラルゲージ理論を応用して、標準模型や統一模型におけるゲージ対称性・フレーバー対称性の自発的破れの構造・メカニズムを解析する。特に、世代・フレーバー混合を引き起こす湯川結合とヒッグス場を一旦無視して、純粋なカイラルゲージ理論の極限を考え、その極限で現れる 3 世代・ $SU(3)$ フレーバー対称性の実現を解析する。さらに、低エネルギースペクトルを解析して、ゲージ対称性の実現について考察する。このような基礎的なダイナミクスの研究を通して、標準模型におけるゲージ対称性・フレーバー対称性の実現の仕方に対する、より深い理解を得ることを目指す。

3. 研究の方法

この解析には、次の手法を用いる：

- 1) 格子カイラルゲージ理論の数値シミュレーション: 一般化された Lefschetz thimble 法の適用。
- 2) フェルミオン 4 体以上の秩序パラメータに対する、Banks-Casher 関係式の一般化、および、カイラル-ランダム行列理論の拡張
- 3) 3 世代・ $SU(3)$ フレーバー対称性の自発的破れに伴うゴールドストーン-ボソンの有効理論とのマッチング

4. 研究成果

研究期間 (3 年) における研究課題 (1) 格子カイラルゲージ理論の数値シミュレーション法の開発, (2) フェルミオン 4 体以上の秩序パラメータに対する Banks- Casher 関係式の一般化およびカイラル-ランダム行列理論の拡張, (3) 格子カイラルゲージ理論におけるゲージ対称性・フレーバー対称性の自発的破れの解析のうち,

課題(1)に関して, 格子カイラルゲージ理論の符号問題の解析, 経路積分の複素数拡張, Lefschetz thimble 構造の解析, Lefschetz thimble 上のハイブリッド・モンテカルロ法の改良, 実装に取り組んだ.

また, フェルミオン数生成などの非平衡過程の記述に必要な実時間相関関数を与える Schwinger-Keldysh 形式を格子ゲージ理論に拡張する研究 [8]に進展がした. 格子 Schwinger-Keldysh 形式に Lefschetz thimble 法を適用するために, Lefschetz thimble structure の解析を進めた. また, 一般化 Lefschetz thimble, 及び, 焼き戻し Lefschetz thimble 法のアルゴリズムの検証・拡張・応用に取り組んだ.

[10] H. Fujii, H. Hoshina, Y. Kikukawa, in preparation.

[11] H. Fujii, H. Hoshina, Y. Kikukawa, "Schwinger-Keldysh formalism for Lattice Gauge Theories", ; *PoS LATTICE2019* (2020) 190.

一方, 摂動的なゲージアノマリー相殺条件を満たす一般的な Non-Abelian 理論に対するゲージ不変な格子構成法について研究の進展があった[12,13]. この成果は論文にまとめている段階である.

[12] J. W. Pedersen and Y. Kikukawa, in preparation.

[13] J. W. Pedersen and Y. Kikukawa, "Reformulation of anomaly inflow on the lattice and construction of lattice chiral gauge theories", *PoS LATTICE2022* (2023) 381.

また, Eichten-Preskill 模型(一般化ウィルソン項による格子カイラルゲージ理論の構成法)における相構造と臨界点について, Block Spin 変換による解析が進展した[14]. この成果は論文にまとめている段階である. この結果により, 格子カイラルゲージ理論の数値解析法としてテンソルネットワーク繰り込み群を適用できる可能性が広がった.

[14] Y. Kikukawa, in preparation.

課題(2), (3)に関しては, フェルミオン 4 体以上の秩序パラメータによってフレーバー対称性の自発的破れが生じる場合の低エネルギー有効模型の構成, および, カイラル-ランダム行列理論の構成を行った. 解析の結果によれば, $SU(3)$ フレーバー対称性は $SO(3)$ 対称性に破れる可能性が強く示唆されている. 他のチャンネルの効果の有無も含め, さらに解析を進めた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshio Kikukawa	4. 巻 no. 7
2. 論文標題 Why is the mission impossible? Decoupling the mirror Ginsparg-Wilson fermions in the lattice models for two-dimensional Abelian chiral gauge theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073B02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz055	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 Yoshio Kikukawa	4. 巻 no. 11
2. 論文標題 On the gauge invariant path-integral measure for the overlap Weyl fermions in 16 of $S_0(10)$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113B03
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptz115	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2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 菊川 芳夫
2. 発表標題 格子ゲージ理論における符号問題とLefschetz Thimble 法の一般化
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会（九州大学 伊都キャンパス 2019.3.14~17）（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshio Kikukawa
2. 発表標題 Gauge-invariant path-integral measure for the Overlap Weyl fermions in 16 of $S_0(10)$ and the Standard Model
3. 学会等名 The 37th annual International symposium on lattice field theory (Wuhan, China, June 16-22, 2019)（国際学会）
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
---------	---------