

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05413

研究課題名（和文）ILC実験を見据えたヒッグス粒子の背後にある物理法則の探求

研究課題名（英文）Study on physical laws behind Higgs boson looking forward ILC experiment

研究代表者

川村 嘉春（Kawamura, Yoshiharu）

信州大学・学術研究院理学系・教授

研究者番号：10224859

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）：5次元パチ・サラム模型を出発点にして、オービフォールドによる対称性の破れとコールマン・ワインバーグ機構を用いて、標準模型に到達できることを示した。6次元SU(N)ゲージ理論を出発点にして、1個のディラックフェルミオンからオービフォールドによる対称性の破れを通して、3世代の物質粒子が導出されることを確認した。物質粒子の質量階層性や世代間混合が非正準型の運動項に起因する可能性があり、フレーバー対称性が非ユニタリー基底の形で潜んでいる可能性があることを見出した。また、物質粒子の質量の小ささは標準模型を超える理論におけるパラメータの特徴により自然に理解されることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子の標準模型の構成要素であるヒッグス粒子や3世代の物質粒子（クォーク、レプトン）がより基本的な理論から導出され、また、物質粒子の構造（質量階層性、フレーバー混合）も理解される可能性が見出されたことにより、我々を含むこの宇宙の万物の存在が偶然ではなく必然として捉えることが可能になる。必然性を支持する存在理由が明らかになると、基本的な物理法則が我々の行う様々な知的活動における哲学的な基盤になる可能性が生まれる。

研究成果の概要（英文）：We have derived the standard model from Pati-Salam type model on a five-dimensional space-time, using an orbifold breaking and Coleman-Weinberg mechanism. We have derived enormous numbers of models with three families of the standard model matter multiplets from a massless Dirac fermion in a vectorlike representation of SU(N) gauge theory on a six-dimensional space-time. We have found that there is a possibility that the hierarchical flavor structure of quarks and charged leptons originates from non-canonical types of fermion kinetic terms in the presence of flavor-symmetric Yukawa interactions and a flavor symmetry can be hidden in the form of non-unitary bases in the standard model. We have clarified how a mechanism works to realize the hierarchy without severe fine tuning and a smallness of fermion masses is understood naturally.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ヒッグス粒子 質量階層性 フレーバー混合 フレーバー対称性 余剰次元 オービフォールド

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を用いた実験により、ヒッグス粒子が発見され、標準模型を構成する素粒子がすべて出揃ったが、標準模型はいくつもの謎に包まれている。具体的には、「ヒッグス粒子および電弱対称性の破れの起源は何か?」、「物質粒子および世代の起源は何か?」、「物質粒子の質量階層性および世代間混合の起源は何か?」などである。これらの謎を解明することにより、標準理論を超える基礎理論の構築につながる可能性が高い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、時空および素粒子に関する既存の概念に基づく研究と新しい概念の導入に基づく研究を行うことにより、ヒッグス粒子や物質粒子に関する謎の解明を通して標準模型を超える基礎理論の手掛かりを探ることである。

3. 研究の方法

(1) 余剰次元に基づいて、標準模型を超える素粒子模型を構築することにより、ヒッグス粒子や電弱対称性の起源に迫る。

(2) 余剰次元に基づいて、「世代の統合」を実現する模型を構築することにより、物質粒子や世代の起源に迫る。

(3) フレーバー対称性に基づいて、物質粒子の質量階層性および世代間混合の起源に迫る。

(4) 余剰次元に基づいて、ゲージ理論の境界条件に関する表現行列の同値類の特徴を探究する。

4. 研究成果

(1) 「ヒッグス粒子および電弱対称性の破れの起源は何か?」に対する答えを求めて、オービフォールド^{*}を余剰次元として含む5次元時空上で定義されたパチ・サラム(Pati-Salam)模型を探究した。その結果、 $SU(4)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ ゲージ対称性をオービフォールド^{*}による対称性の破れにより制限したのち、 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_R \times U(1)_{B-L}$ ゲージ対称性を有する4次元模型が得られ、さらにコールマン・ワインバーグ(Coleman-Weinberg)機構を用いて $SU(2)_L \times U(1)_R \times U(1)_{B-L}$ ゲージ対称性が $U(1)_{EM}$ ゲージ対称性に自然に破れることを見つけた。この模型により、ヒッグス粒子は $SU(2)_L \times SU(2)_R$ 双方のゲージ量子数に関する2重項である粒子の一部であること、電弱対称性は量子補正により壊れることがわかった。

(2) 「物質粒子および世代の起源は何か?」に対する答えを求めて、オービフォールド^{*}を余剰次元として含む6次元時空上で定義された $SU(N)$ ゲージ理論を探究した。その結果、ベクター的な表現を有する1個のディラックフェルミオンからオービフォールド^{*}によるゲージ対称性の破れを通して、3世代の物質粒子が漏れなく実在する模型が多数存在することを見つけた。その中には、 $SU(8)$ ゲージ理論の $(56+56^*)$ 表現に従うディラックフェルミオンからニュートリノ1重項が3個以上存在し、余分なゲージ対称性がすべて $U(1)$ のみであるような現象論的に興味深い模型が含まれていることがわかった。

(3) 「物質粒子の質量階層性および世代間混合の起源は何か?」に対する答えを求めて、フレーバー対称性とフェルミオンの運動項に注目して、標準模型とそれをを超える理論を探究した。

標準模型を超える理論に対して、3つの仮定「場の変数は標準模型のものと必ずしも同一ではない。フレーバー対称性は存在するが、フラボンとよばれるスカラー粒子が真空期待値をもつことによりその対称性が壊れる。フラボンは、フェルミオンの運動項の中にも存在しフレーバー対称性の破れの後、フェルミオンの運動項は非正準型になる。」に基づいて、物質粒子の質量階層性とフレーバー混合(世代間混合)の起源を探究した。その結果、クォークや荷電レプトンの質量階層性およびフレーバー混合が非正準型の運動項に起因する可能性があること、フレーバー対称性が非ユニタリー基底の形で標準模型に潜んでいる可能性があること、すなわち、標準模型のフェルミオン場が標準模型を超える理論のものとユニタリー変換で関係付くとは限らないこと、ケーラーポテンシャルの形態が標準模型を超える物理の試金石になる可能性があることを見出した。また、「ディラックの自然さ」という概念を採用することにより、湯川結合行列のフレーバー対称性を有する部分がランク1の行列で与えられること、民主型の行列が有望であることを確認した。

「標準模型や標準模型の拡張版に基づいて、自然な仮定のもとで様々な禁止定理などを導出し、それらを蓄積することにより標準模型を超える基礎理論の構造に迫る」というボトムア

トップ型のアプローチを採用して、湯川結合の起源について探究した。具体的には、標準模型を超える理論として、余分なベクトル的な表現に属するフェルミオンを含む標準模型の拡張版において、「クォークの湯川結合行列の 0 でない成分の大きさが $O(1)$ であるという仮定から、クォークの質量階層性が自然に生じるか?」、「湯川結合行列の統一という仮定から、クォークの質量階層性が自然に生じるか?」という問いの答えを求めた。その結果、ミラークォークと（標準模型の）クォークの間で有意な混合が存在する場合、「クォークの湯川結合行列の 0 でない成分の大きさが $O(1)$ であるという仮定から、クォークの質量階層性が生じ得ること」、「湯川結合行列の統一という仮定から、クォークの質量階層性が自然に生じ得ること」がわかった。ベクトル的な表現に属するフェルミオンはテラスケールの質量 (TeV/c^2) をもつ可能性があり、将来、ILC 等の実験での発見が期待される。

質量階層性を含む物理的なパラメータ間の大きさの較差の生成の際に微調整が存在しないような機構に関して、その特徴を一般的に論じた。その結果、標準模型の物質粒子の質量の小ささは標準模型を超える理論における基本的なパラメータが有する特徴を用いて、自然に理解されることがわかった。

(4) 余剰次元に基づくゲージ・ヒッグス統一模型（ゲージ粒子の余剰次元成分は 4 次元時空からみるとスカラー粒子とみなされ、そのような粒子にヒッグス粒子の役割、すなわち、対称性の破れの発現機構を担わせる模型）や世代の統一模型（標準模型の 3 世代の物質粒子をより大きなゲージ群の多重項に統合させるような模型）の探究に必要となる余剰次元に関する境界条件の分類と設定について探究した。その結果、群の指数関数表示を用いて「1 次元のオービフォルドを余剰次元として含むような模型において、余剰次元に関する境界条件の同値類には必ず対角型の表現行列が存在する」という特徴に関する別証明を与えた。

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 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yoshiharu Kawamura	4. 巻 35
2. 論文標題 On a mechanism realizing quark mass hierarchy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	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） 10.1142/S0217732320502740	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 Yoshiharu Kawamura and Noriyasu Nishikawa	4. 巻 35
2. 論文標題 On diagonal representatives in boundary condition matrices on orbifolds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics A	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） 10.1142/S0217751X20502061	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 Yoshiharu Kawamura	4. 巻 2019
2. 論文標題 Chasing after flavor symmetries of quarks from the bottom up	5. 発行年 2019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） 10.1093/ptep/ptz069	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 Goto Yuhei, Kawamura Yoshiharu	4. 巻 98
2. 論文標題 Orbifold family unification using vectorlike representation on six dimensions	5. 発行年 2018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.98.035039	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 Abe Yugo, Goto Yuhei, Kawamura Yoshiharu	4. 巻 2018
2. 論文標題 Left-right symmetry, orbifold S^1/Z_2 , and radiative breaking of $U(1)_R \times U(1)_{B-L}$	5. 発行年 2018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) 10.1093/ptep/pty095	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 Kawamura Yoshiharu	4. 巻 2019
2. 論文標題 Yukawa interactions, flavor symmetry, and non-canonical Kaehler potential	5. 発行年 2019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) 10.1093/ptep/ptz018	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 Kawamura Yoshiharu	4. 巻 2020
2. 論文標題 A bottom-up approach to fermion mass hierarchy: a case with vector-like fermions	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) 10.1093/ptep/ptaa046	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 3件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 オービフォルド上の境界条件に関する表現行列における対角型表示について
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 Study on quark mass hierarchy from the bottom up
3. 学会等名 中部夏の学校
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 湯川相互作用，フレーバー対称性と非正準型ケーラーポテンシャル
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 川村嘉春
2. 発表標題 Yukawa interactions, flavor symmetry, and democratic Kaehler structure
3. 学会等名 中部夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部裕悟，後藤裕平，川村嘉春
2. 発表標題 Left-right symmetry, orbifold S^1/Z_2 , and radiative breaking of $U(1)_R \times U(1)_{B-L}$
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 標準模型のフレーバー構造の起源の探究
3. 学会等名 質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部裕悟, 後藤裕平, 川村嘉春, 西川侃成
2. 発表標題 5-dimensional left-right symmetric model
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 素粒子模型と例外群
3. 学会等名 Exceptional Groups as Symmetries of Nature '17 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 川村嘉春
2. 発表標題 素粒子物理 Overview
3. 学会等名 ILC 夏の学校 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤裕平, 川村嘉春
2. 発表標題 Orbifold family unification using vectorlike representation
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------