

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21540266

研究課題名（和文） ユカワオンモデルの構築と TeV 領域物理での探求

研究課題名（英文） Yukawaon Model and Research in TeV Region Physics

研究代表者

小出 義夫 (KOIDE YOSHIO)

大阪大学・大学院理学研究科・招へい研究員

研究者番号：40046206

研究成果の概要（和文）：ユカワオンモデルに基づいて、クォーク混合とレプトン混合をその質量スペクトルと共に統一的に記述することを試みる。結果として、質量スペクトルおよび混合を少ないパラメーターで統一的に記述できるモデルの構築に成功した。このモデルでは、ファミリーゲージボソンが必然的に登場し、その質量は逆階層的である、この点は、従来行われてきたゲージボソンの実験的探査の盲点を突いたことになる。今後の物理に重要な課題を提供することができた。

研究成果の概要（英文）：According to the so-called “yukawaon” model, a unified description of mass spectra and mixings of quarks and leptons has been investigated. Such a model has finally be obtained successfully. In this model, U(3) family gauge bosons with an inverted mass hierarchy are inevitably brought into the theory. This offers an important subject to new physics experimentally and theoretically.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子論

1. 研究開始当初の背景

クォークとレプトンの標準模型においては、その質量スペクトルと混合を与える起源となるものは、「湯川結合定数」 Y_f と呼ばれる「定数」であり、その定数値は実験を通し

て現象論的に求めて行かざるを得ない。クォークとレプトンごとに個別の定数があるのではなく、それらの間には何らかの関連があるに違いないという考えが当然芽生えてくる。例えば、離散対称性を仮定して、理論が

その対称性のもとに不変であることを要求することによって、結合定数に制約を付ける試みが流行してきていた。この対称性を表す変換行列を U と書けば $U^y M_f U = M_f$ を満たす質量行列の形 M_f を求めることである。この方法は、あくまで質量行列への制約を求めることであり、 M_f そのものを理論的に求めることではない。

ユカワオンモデルは、湯川結合定数 Y_f の起源は、 3×3 行列表現で表せるスカラー粒子 Y_f (ユカワオン; Yukawaon) の真空期待値 (VEV) $\langle Y_f \rangle$ によって $Y_{\text{eff}} = \langle Y_f \rangle v_H / \Lambda$ (Λ は有効理論のエネルギースケール) として与えられると考える。この考えによって、クォークとレプトンの質量スペクトルと混合を与える起源は理論の「定数」ではなく、力学的に計算可能なものと考えられることになった。すなわち、系のポテンシャルを与えて、その極小値を計算することにより、VEV の値は求まる。しかも、従来はフレーバー (ファミリー) の自由度に対称性を考えるときにはそれを「離散対称性」と考えざるを得なかったのに、その対称性を「連続群」と考えることが可能となった。(今までは、 Y_f は定数であったが、今度はそれが fields であるので、 Y_f 自身がファミリー対称性の変換を受ける。) 従来は、質量行列モデルは所詮、質量と混合を論ずるだけのものであったのに対して、連続群を考えるので、それに伴って、南部・ゴールドストーン粒子あるいはファミリー・ゲージボゾンが登場することになる。質量行列モデルは、質量スペクトルとファミリー混合の問題だけでなく、豊富な物理をもたらす可能性が出てきた。従来は、連続群のファミリー対称性を考えることはあっても、それはとびきり高いエネルギースケールでの対称性であって、我々の観測できるエネルギースケールには登場できないと思われて

いたが、今や TeV スケールに顔を出せる可能性が出てきた。

2. 研究の目的

観測されるクォークとレプトンの質量スペクトルと混合を与えるユカワオンモデルの具体型を探っていくことを目的とする。すなわち、次のことを明らかにする。

(1) クォークとレプトンのファミリーの自由度を記述する対称性は何か？ それは、グローバル対称性なのか (南部・ゴールドストーン粒子が現れる)、または、ローカル対称性なのか (ファミリー・ゲージボゾンが登場する) を明らかにする。

(2) 質量スペクトルと混合 (小林・益川行列および牧・中川・坂田行列) を統一的に記述するユカワオン VEV 行列の関係はどのようなものか？ (それを与えるスーパーポテンシャルの構造はいかなるものか?)

(3) ユカワオンモデルに伴って登場する新しい粒子の TeV 領域物理における観測可能な現象を预言する。

3. 研究の方法

目的 (1) については、グローバル対称性のケースとローカル対称性のケースとを対比させてその長短を議論し、よりよいモデルの選択を探っていく。

目的 (2) については、とりあえず、観測されるクォークとレプトンの質量スペクトルと混合に見られる階層的構造は、単一の起源に基づくと仮定して、荷電レプトンの質量の階層性をインプットとして受け入れ、後はファミリー依存性を持つパラメータを一切導入することなく、クォークの質量スペクトル、ニュートリノの質量スペクトル、クォーク混合量列である小林・益川 (CKM) 行列およびレプトン混合行列である牧・中川・坂田 (MNS) 行列が統一的に説明できるようなモデルを

探求する。当面は、荷電レプトンの質量の起源はこれと切り離して、その起源は不問とする。

目的(3)については、可能な限り我々の観測可能なエネルギースケールにモデルが設定できるようにモデル構築に努め、多方面での現象に目を向けて行く。

4. 研究成果

(1) グローバル対称性については、質量ゼロの南部・ゴールドストーン粒子が現れるが、大きなエネルギースケールを考えることによりそれは無害となることを明らかにした [Y. Koide, IJMP A (2009)]. しかし、逆に言えば、そのようなモデルは、質量スペクトルと混合以外には何の新しい物理も持ち込まず、従来の研究と 50 歩 100 歩である。研究協力者である山下の強い勧めもあって、以後の研究方向は、ローカル対称性の場合に絞る。ファミリー対称性として、 $U(3)$ 耐暑性を考え、かつ、隅野メカニズムを採用するので、このモデルでは、9 個のファミリーゲージボソンが必然的に登場することとなり、 $e-\dots$ 対称性の破れやフレーバー対称性の破れなど、興味あるいろいろな現象をもたらす。(その成果は GUT2012 で報告されたと、論文としては、アメリカ物理学会誌 Phys. Rev. D (2013) に報告した.)

(2) 研究当初には、ニュートリノ質量行列をアップ・クォークの質量行列と荷電レプトンの質量行列で記述するというアイデアでスタートしたが、クォーク混合を表す CKM 行列の方は、まだ観測結果と一致は不十分であった。西浦の協力により、いくつかの試行錯誤の末、少ないパラメーターにもかかわらず、クォークとレプトン両方の質量スペクトルと混合を統一的に与えるモデルの構築に成功した。このモデルはとてもナチュラルに、ニュートリノの観測データが示す

tribimaximal mixing を与えてくれる。ところが、本研究最終年度 2011 年の後半になって、ニュートリノの新しい観測データが公表された。それによれば、ニュートリノ混合の 1-3 軸間の混合角が それまではほぼゼロと言われていたのに、予想以上に大きな値 $\sin^2 2 \cdot \theta_{13} = 0.09$ であるということが報告された。このような大きな値は素朴なユカワオンモデルでは説明できない。それまでのユカワオンモデルでは、荷電レプトンの質量行列は、フレーバー対称性が破れた系では対角型で与えられると仮定していた。この条件を放棄して、再び西浦の協力を得て、モデルの根本からの再検討を行い、モデルを再構築を試みた。そして最終的には、新しい実験値を含めて、全観測値にフィットするユカワオンモデルを見つけることができた。これにより、観測されているクォークとレプトンに見られる質量と混合の階層的構造は、単一の起源であるということがほぼ確からしいということになった。しかし、この研究は現在もまだ進行中であり、より少ないパラメーターでよりナチュラルに全ての質量スペクトルと混合をフィットできる改良版のユカワオンモデルを探求中である。

(3) 本研究の最大の成果は、従来は、質量スペクトル $m_e \ll m_\mu \ll m_\tau$ の類推から、ファミリー・ゲージボソンの質量も $M_{11} \ll M_{22} \ll M_{33}$ と考えられていたのを、改良型隅野メカニズムを提案することにより、逆階層の質量 $M_{11} \gg M_{22} \gg M_{33}$ を持つファミリー・ゲージボソンのアイデアを見つけたことである [Y. Koide and T. Yamashita, Phys. Lett. B (2012)]. すなわち、一番軽いゲージボソンは第3世代のクォークとレプトンのみと相互作用を行う。この点は従来のゲージボソンモデルにはない特徴であって、従来行われていた実験的探査の盲点とも言える。このことに

より、ファミリー・ゲージボソンの観測可能性はぐんと現実的なものになり、TeV 領域物理でのいろいろな現象に顔を出すことが可能となった。高エネルギー加速器による直接的プロダクションだけでなく、低エネルギーでの稀崩壊現象での $e-\mu-\tau$ 対称性の破れやフレーバー対称性の破れなど、豊富な新しい現象の観測が期待されることとなった。

(4) 今後の展望：研究成果(3)に関連して言えば、このモデルでの位相パラメータは、単にCPの破れを与えるだけでなく、質量と混合にも影響を与えるパラメータなので、このモデルが予言するCPの破れはフリーではなく、すでに予言されたものとなっている。今後のレプトンセクターでのCPの破れの測定や neutrinoless double beta decay の観測など、多方面でのニュートリノ関連の実験に期待したい。また、研究成果(2)に関連して、すでに述べたように、全く新しい新粒子の探索が期待される。LHC や ILC などによる直接的ファミリーゲージボソンの探索も無論のことであるが、そのような大型プロジェクトだけでなく、低エネルギーでの稀崩壊現象での $e-\mu-\tau$ 対称性の破れやフレーバー対称性の破れなどの精密観測実験にも大いに期待したい。これに備えて、もっと正確な予言値の算出が必要となる。理論的にも実験的にも新しい多くの課題が出てきたと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

(1) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “Neutrino mass matrix model with a bilinear form”, Journal of High Energy Physics, 04, 166 (2013), 査読有り.

(2) Yoshio Koide, “Can mass of the lightest family gauge boson be of the order of TeV?”, Physical Review D87, 016016 (2013), 査読有り.

(3) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “Large θ_{13}^{ν} and unified description of quark and lepton mixing matrices”, European Physical Journal C73, 2277 (2013), 査読有り.

(4) Yoshio Koide and Toshifumi Yamashita, “Family gauge bosons with an inverted mass hierarchy”, Physics Letters B 711, . 384 - 398 (2012), 査読有り.

(5) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “Yukawaon model with $U(3)\times S_3$ family symmetries”, Physics Letters B 712, 396 - 400 (2012), 査読有り.

(6) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “Neutrino mass matrix with no adjustable parameters”, European Physical Journal C 72:1933-1 - 1933-10, (2012), 査読有り.

(7) Yoshio Koide, “SU(5)-compatible Yukawaon model”, International Journal of Modern Physics A, 27, 1250028-1 -- 1250028-14 (2012), 査読有り.

(8) Yoshio Koide, “Yukawaon model with $U(3)\times O(3)$ family symmetries”, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 38, 085004 (2011), 査読有り.

(9) Yoshio Koide, Yukinari Sumino and Masato Yamanaka, “Tests of a family gauge symmetry model at 10^3 TeV scale”, Physics Letters B, 695, 279-284 (2011), 査読有り.

(10) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “Unified description of quark and lepton mixing matrices based on a yukawaon model”, Physical Review D 83,

035010-1 -- 8 (2010) , 査読有り.

(11) Yoshio Koide, “Charged lepton mass spectrum and a scalar potential model” , Physical Review D 81, 097901 (2010) , 査読有り.

(12) Yoshio Koide and Hiroyuki Nishiura, “How can CP violation in the neutrino sector be large in a $2 \leftarrow \rightarrow 3$ symmetric model?” , International Journal of Modern Physics A, 25, 3361-3673 (2010) , 査読有り.

(13) Yoshio Koide , “Can massless and light yukawaons be harmless?” , International Journal of Modern Physics A, Vol.25, 1725-1738 (2010) , 査読有り.

(14) Yoshio Koide, “Yukawaon approach to the Sumino relation for charged lepton masses” , Physics Letters B 687, 219-224 (2010) , 査読有り.

(15) Yoshio Koide, “Charged lepton mass spectrum and supersymmetric yukawaon model” , Physics Letters B 681, 68-73 (2009), 査読有り.

(16) Yoshio Koide, “Yukawaon model in the quark sector and nearly tribimaximal neutrino mixing” , Physics Letters B, 680, 76 - 80, (2009), 査読有り.

[学会発表] (計 11 件)

(1) Yoshio Koide, “Neutrino Mass Matrix Composed of Me and Mu Only” , Neutrino 2012, June 3 - 9, 2012, at Kyoto, Japan

(2) Yoshio Koide, “Family gauge bosons with an inverted mass hierarchy, International workshop on GUT2012, YITP, Kyoto University, March 15, 2012, 招待講演.

(3) 小出義夫 「USY 模型における隅野メカニズム」
日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 西宮市, 2012 年 3 月 24 日

(4) 小出義夫, 「SU(5) compatible yukawaon model」, 日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘

前大学), 2011 年 9 月 17 日.

(5) Yoshio Koide, “Charged Lepton Mass Relation and Related Topics” , Flavor Physics in the LHC Era, 8-12 November 2010, Singapore, 招待講演.

(6) Yoshio Koide, “Supersymmetric Yukawaon Model” , SUSY 2010, 22-29 August. 2010, at Bonn, Germany.

(7) Yoshio Koide, “A new idea to search for charged lepton flavor violation using a muonic atom” , The 1st workshop on Intensity Frontier of Muon Fundamental Science, KEK, Tsukuba, June 10-11, 2010.

(8) 小出義夫, 「Mass Matrix Model with Different Family Symmetries for Quarks and Leptons」, 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 2011 年 3 月 21 日.

(9) 小出義夫, 「新しい U(3) ファミリーゲージ相互作用の現象論」, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学, 北九州市, 2010 年 9 月 11 日~14 日.

(10) Yoshio Koide, “Quark Mass Matrix Model for Neutrino Mixing” , International Conference of Neutrino Physics in the LHC Era, BUE, CTP, 15-19 Nov. 2009, Luxor, Egypt.

(11) Yoshio Koide, “Yukawaon Model and Unified Description of Quark and Lepton Mass Matrices” , Lepton-Photon 2009, August 17-22, 2009, Hamburg, Germany.

[その他]

ホームページ: <http://koide-phys.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小出 義夫 (KOIDE YOSHIO)

大阪大学・大学院理学研究科・招へい研究員

研究者番号: 40046206

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: