

平成21年 5月29日 現在

研究種目： 基盤研究(C)  
 研究期間： 2006 ～ 2008  
 課題番号： 18540284  
 研究課題名（和文） 荷電レプトンの質量公式を手がかりとする物質基本粒子の質量の起源の探求  
 研究課題名（英文） Investigation of the origin of masses of the fundamental particles with the help of the charged lepton mass formula  
 研究代表者  
 小出 義夫 (KOIDE YOSHIO)  
 大阪大学・大学教育実践センター・招聘教授  
 研究者番号： 40046206

## 研究成果の概要：

物質の基本構成粒子であるクォークとレプトンの統一理論を構築のヒントとすべく、知られている荷電レプトンについての質量公式を手がかりとして、クォークとレプトンの質量スペクトルとフレーバー混合の統一的記述の可能性を探究した。その結果、クォーク・レプトンの質量スペクトルと混合の起源を従来のように湯川結合定数に求めるのではなく、ユカワオンなるスカラー粒子の真空期待値に起源を求めるという「ユカワオン模型」に到達した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000円	0円	700,000円
2007年度	700,000円	210,000円	910,000円
2008年度	700,000円	210,000円	910,000円
年度			
年度			
総計	2,100,000円	420,000円	2,520,000円

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

物質の基本構成粒子であるクォークとレプトンの統一理論を構築するためには、観測されている質量スペクトルとフレーバー混合の問題が重要な手がかりとなる。1982年に提唱された荷電レプトンについての質量公式（いわゆる Koide formula）は、その公式の形の美しさだけでなく、実験値を驚くべき精度で満たす（新しい実験値が報告され、公式の見事な実験との一致が確立されたのは、その10年後の1992年）ことから、多くの人々の注目を集めた。しかし、そ

の公式の提唱後、1/4世紀を経てもまだその公式の理論的基礎は明らかにはなっていなかった。近年、海外でその公式が再度注目を集め始め、また、質量と混合についての理論の進展およびニュートリノ物理の実験的進展もあって、クォークとレプトンの統一モデルという観点からの再検討の機運が高まってきていた。特に、2007年に発表された E. Ma による、超対称性理論に基づくスーパーポテンシャルへの真空条件を用いた Koide formula の再誘導は、本研究にとって重要な刺激となった。

## 2. 研究の目的

荷電レプトンについての質量公式を手がかりとして、クォークとレプトンの統一モデルの構築という観点から、質量スペクトルとフレーバー混合の統一的記述のモデルを探っていくことを目的とする。それにより、物質基本粒子の統一像を明らかにして行くことに役立つ。

## 3. 研究の方法

(1) 現実の自然にこそ、統一法則へのヒントがあるという観点から、質量スペクトルと混合の現象論的研究に重点を置く。

(2) 理論的フレームワークとしては、クォークとレプトンを場の理論で記述可能な実体として捉え、いたづらに物理に基礎を置かない数学的オブジェクトとしての扱いはしない。

(3) クォークとレプトンの質量スペクトルとフレーバー混合の観測値を、対称性（連続群や離散群）とその破れの規則性という観点から分析を行なう。初期段階の研究においては、離散対称性  $S_3, S_4, A_4$  などについて、その可能性が探究された。

(4) 特に、ニュートリノ質量スペクトルと混合の問題に着目し、第一近似として、いわゆるトリ・パイ・マキシマル混合を導くモデルの考察に力を注いだ。それは、観測されたニュートリノ混合においては、観測されたクォーク混合に比べて、格段に際立った特徴的な混合パターンを示している、統一理論へのより重要なヒントとなると思われたからである。むしろ、本研究の課題でもある荷電レプトンの質量スペクトルとも密接な関連があることが期待されたことは言うまでもない。

(5) 多くの試行錯誤のモデル考察を経た後に、「ユカワオン」なる  $3 \times 3$  成分を持つスカラーの真空期待値が「湯川結合定数」の起源であるという「ユカワオン模型」に到達した。従って、研究の後半期は、その手法に基づいた研究を行った。すなわち、超対称性理論の枠内で、真空条件を調べることにより、各質量行列間の関係を調べた ( $E.Ma$  は、荷電レプトンの質量スペクトルの問題にのみ、この手法を適用した)。これにより、研究は全く新しい段階に入ることとなった。

## 4. 研究成果

(1) 荷電レプトンの質量公式については、2つの問題を解く必要がある。1つは、質量のある変数の2次形式で記述するメカニズムを見出すこと、もう1つは、公式に登場する  $2/3$  とい

うファクターを導き出すということである。前者については、これまで、シーソーメカニズムや輻射質量起源などが考えられてきたが、本研究によって、超対称性理論の枠内で、スーパーポテンシャルに対する真空条件から、自然な形で2次形式が得られることが分かった。また、後者については、当初、離散対称性である交換群  $S_3$  の適用が検討されたが、その後、 $3 \times 3$  成分を持ったユカワオンとそのトレース成分との相互作用の項を考えることにより、 $2/3$  の因子が導かれるということを見つけ出した。

(2) 観測されているニュートリノ混合の行列型（トリ・パイ・マキシマル混合）は、通常、ニュートリノ質量行列に離散対称性を課すことにより説明されるが、そのような対称性の条件を課さなくとも、ニュートリノ質量行列をクォークの質量行列と関係させることにより、クォークセクターでの実験値を用いるだけで、見事なトリ・パイ・マキシマル混合が得られることを見いだした。このことは、ニュートリノの質量と混合を考える上で、全く新しい視点ももたらすこととなった。

(3) このユカワオンやクォーク・レプトン場の従う対称性として、 $S_3, S_4, A_4$  などについてその可能性が探究されたが、理論に登場するフリーパラメーターの数が多く、興味ある結論を引き出すには至らなかった。むしろ、連続群  $U(3)$  や  $O(3)$  の適用が興味ある強い制限をもたらすことが分かった。しかし、ニュートリノを含む理論に拡張するときには、 $U(3)$ モデルでは困難があり、 $O(3)$ モデルが有力な候補となることが分かった。

(4) 前述 (1), (2)の2つの成果はいずれも「ユカワオン」なる  $3 \times 3$  成分を持つスカラーの真空期待値が「湯川結合定数」の起源であるという「ユカワオン模型」を採用することによって、自然な形で導くことができる。従来の、湯川結合定数に質量スペクトルと混合の起源を求める立場では、対称性を課すことによって、各々の湯川結合定数に共通性や関連性を持たせることは出来るが、基本的にはそれらは独立なものであった。結果として、質量と混合の予言には、残されたフリーパラメーターを動かしての数値合わせとなった。これに対して、ユカワオン模型では、各ユカワオンの真空期待値は互いに他のそれらとのコンビネーションで表すことができ、結果として、あるセクターの質量スペクトルと混合を予言するのに、他のセクターの質量と混合の観測値を用いればよいこととなる。このことは、従来の質量行列手法の質量と混合へのアプローチと全く異なる点である。この新しい質量と混合の記述手法の確立は、本研究での最大の成果と言えよう。ただし、質量スペクトルと混合を「定数」に起源を持たせるのではな

く、新しい物質「ユカワオン」の真空期待値に起源を持たせたので、このユカワオンの物理での振る舞い(実験的な観測可能性)が新たな問題となる。この問題は新たな科研費の研究テーマとして、次年度から引き続き研究されて行く予定である。

#### 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 17 件)

- (1) Yoshio Koide, “Charged lepton mass relations in a supersymmetric Yukawaon model”, *Physical Review D*, Vol.79, (2009), p.037302-01--037302-03. (査読有り)
- (2) Yoshio Koide, “Phenomenological meaning of a neutrino mass matrix related to up-quark masses”, *Physical Review D*, Vol.78, (2008), p.093006-1--093006-8. (査読有り)
- (3) Yoshio Koide, “An empirical neutrino mass matrix related to up-quark masses”, *Journal of Physics G*, Vol.35, (2008), p. 125004-1 - 125004-11. (査読有り)
- (4) Yoshio Koide and H. Nishiura, “Testable deviations from exact tribimaximal mixing”, *Physics Letters B* Vol.669, (2008), p.24-27. (査読有り)
- (5) Yoshio Koide, “Neutrino mass hierarchies in a mass matrix form versus its inverse form”, *Physical Review D*, Vol.78, (2008), p.037302-01 -- 037302-03. (査読有り)
- (6) Yoshio Koide, “O(3) flavor symmetry and an empirical neutrino mass matrix” *Physics Letters B*, Vol.665, (2008), 227 - 230. (査読有り)
- (7) Yoshio Koide, “U(3)-flavor nonet scalar as an origin of the flavor mass spectra, *Physics Letters B*, Vol.662, (2008), p.43 - 48. (査読有り)
- (8) Yoshio Koide, “How to evade a no-go theorem in flavor symmetries”, *American Institute of Physics Conference Proceedings*, Vol.1015, (2008), p.80 - 86. (査読なし)
- (9) Naoyuki Haba and Yoshio Koide, “F-term induced flavor mass spectrum”, *Journal of High Energy Physics*, Vol.06, (2008), p.023-1 - 023-12. (査読有り)
- (10) Naoyuki Haba and Yoshio Koide, “New origin of a bilinear mass matrix form”, *Physics Letters B*, Vol.659, (2008), p.260-274. (査読有り)
- (11) Yoshio Koide and Eiichi Takasugi, “Neutrino mixing based on mass matrices with a 2-3 symmetry”, *Physical Review D*, Vol.77, (2008), p.016006-1 -- 016006-7. (査読有り)
- (12) Yoshio Koide, “Charged Lepton Mass Formula - Development and Prospect -”, *International Journal of Modern Physics Letters E*, Vol.16, (2007), p.1417 - 1426. (査読なし)
- (13) Yoshio Koide, “ $S_4$  Flavor Symmetry Embedded into SU(3) and Lepton Masses and Mixing”, *Journal of High Energy Physics*, Vol. 08, (2007), p. 086-1 -- 086-13. (査読有り)
- (14) Yoshio Koide, “A4 symmetry and lepton masses and mixing”, *THE European Physical Journal C*, Vol.152 (2007), p. 617-623. (査読有り)
- (15) Yoshio Koide, “Tribimaximal neutrino mixing and a relation between neutrino- and charged lepton-mass spectra”, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, Vol.34, (2007), p. 1653-1664. (査読有り)
- (16) Yoshio Koide, “ $S_3$  symmetry and neutrino masses and mixings”, *European Physical Journal C*, Vol.50, (2007), p.809 - 816. (査読有り)
- (17) Yoshio Koide, “Seesaw mass matrix model of quarks and leptons with flavor-triplet Higgs scalars”, *European Physical Journal C*, Vol. 48, (2006), 223 -228. (査読有り)

[学会発表] (計 11 件)

- (1) 小出義夫, “ユカワオン模型の最近の進展”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月28日, 立教大学, 東京都.
- (2) Yoshio Koide, “Neutrino Mass Matrix Related to Up-Quark Masses and Nearly Tribimaximal Mixing - Based on a Yukawaon Model”, *Particle Physics, Astrophysics and Quantum Field Theory: 75 Years since Solvay*, 29 Nov. 2008, Nanyang Executive Centre, Singapore.
- (3) 小出義夫, “O(3) flavor symmetry

and VEVs of Scalars  $Y_f$ ”, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日, 山形大学, 山形市.

- (4) Yoshio Koide, “Empirical neutrino mass matrix related to up-quark masses”, The XXIII International Conference of Neutrino Physics and Astrophysics, 27 May, 2008, Christchurch, New Zealand.
- (5) 小出義夫, “フレーバー対称性 NO-GO 定理の示唆する方向”, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 24 日, 近畿大学, 東大阪市.
- (6) Yoshio Koide, “How to Evade a No-Go Theorem in Flavor Symmetries”, International Workshop on Grand Unified Theories: Current Status and Future Prospects, December 17, 2007, Kusatsu, Japan.
- (7) Yoshio Koide, “Lepton Masses based on a Broken  $U(3)$ ”, Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors 2007, October 4, 2007, Hamamatsu, Japan.
- (8) 小出義夫, “ $S_4$  フレーバー対称性とレプトンの質量と混合”, 日本物理学会第 62 回年次大会, 2007 年 9 月 4 日, 北海道大学, 札幌市.
- (9) Yoshio Koide, “Broken  $SU(3)$  Flavor Symmetry and Tribimaximal Neutrino Mixing”, XXII International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energy, August 17, 2007, Daegu, Korea.
- (10) Yoshio Koide, “Neutrino Masses and Mixing Suggested by the Charged Lepton Mass Formula”, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities November 1, 2006, Honolulu, Hawaii, USA.
- (11) 小出義夫, “荷電レプトンの質量公式とニュートリノの質量と混合”, 素粒子物理学の進展, 2006 年 7 月 31 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小出 義夫 (KOIDE YOSHIO)  
大阪大学・大学教育実践センター・招聘教授  
研究者番号: 40046206

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし