

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654062

研究課題名(和文)ステライルニュートリノの質量・混合の生成機構とその現象論的解明

研究課題名(英文)The mass and mixing of the sterile neutrino and those phenomenological studies

## 研究代表者

谷本 盛光 (TANIMOTO, Morimitsu)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：90108366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ステライルニュートリノの質量と混合に焦点をあて、ニュートリノモデルの現象論的研究に成果をあげた。まず、ステライルニュートリノが存在する条件下で、通常のアクティブニュートリノの質量と大きなニュートリノ混合角を最小限のパラメータで説明できるモデルを構築した。そこでは混合角  $\theta_{12}$  が精密に予言できるため、将来ニュートリノ実験でテスト可能である。さらに、ニュートリノのCP対称性の破れはフレーバー対称性の破れで予言できることを発見した。その成果は、1編の著書と20編の論文として発表するとともに、著名な国際会議ニュートリノ2014(2014年6月：ボストン)において招待講演として発表した。

研究成果の概要(英文)：In this work, we have studied the neutrino model phenomenologically by focusing on the mass and the mixing angle of the sterile neutrino.

The first result: we have built the neutrino model which can explain the active neutrino masses and the large mixing angles with the minimal number of parameters under the assumption of the existence of the sterile neutrino. This model gives us the accurate prediction of the mixing angle  $\theta_{12}$ , and so it is testable in the future neutrino experiments. The second result: we have found that the CP violation of the neutrinos can be predicted in terms of the violating pattern of the flavor symmetry. These results have been published in the one textbook and 20 papers.

In addition, we have presented our results as the invited talk at the neutrino conference 2014(Boston, June, 2014).

研究分野：素粒子論

キーワード：ステライルニュートリノ フレーバー対称性 CP対称性の破れ

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの研究は、神岡での大気ニュートリノ観測データによるニュートリノ振動の確立によって大きな進展をとげた。その後、神岡等での太陽ニュートリノ観測とカムランド実験によって、もう一つのニュートリノ振動も確立した。2012年当初は最後のニュートリノ振動の発見をめざして、いくつかの実験が競っている状況であったが、日本のT2K実験は、その兆候を見いだしていた。一方、Mini-BOONE実験や長基線ニュートリノ実験MINOSは反ニュートリノの異常な振る舞いを報告している。これらのニュートリノ振動実験は、標準理論におけるアクティブニュートリノとよばれる左巻ニュートリノに関するものである。標準理論を越えるモデルでは、SU(2)ゲージ対称性の一重項のニュートリノの存在が期待される。現象論的に興味深いものは、質量がKeVからMeVのステライルニュートリノと呼ばれるものであり、宇宙論的に重要である。現在、ステライルニュートリノの小さな質量の起源とアクティブニュートリノとの関わりは理論的に未解明である。

## 2. 研究の目的

素粒子の標準理論では、三種類の左巻のニュートリノが存在するが、これらは荷電レプトンと対をなし、SU(2)ゲージ対称性の二重項を構成している。しかしながら、理論的には荷電レプトンと対をなさないゲージ重項の存在が許される。その典型は、質量の巨大な右巻ニュートリノであるが、質量がKeVからMeVにある軽い右巻ニュートリノの存在も考えられている。これは荷電レプトン等と直接相互作用しないためステライルニュートリノと呼ばれる。ステライルニュートリノの質量・混合の生成機構を理論的に解明し、加速器ニュートリノと宇宙ニュートリノの物理にかかわる新しい現象論を展開することが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

SU(2)ゲージ対称性の一重項であるニュートリノ、すなわち、ステライルニュートリノが大統一理論のスケール $10^{16}\text{GeV}$ に比べて、はるかに小さなKeVからMeVのオーダーの質量を持つ機構を明らかにし、ステライルニュートリノとアクティブニュートリノ混合の理論的予測を行う。それにもとづいて、加速器ニュートリノ、宇宙ニュートリノ、ダークマター等に関わる現象的研究をすすめる。

そのため、以下の二つの理論的可能性を研究する。

(1) 右巻ニュートリノが、対称性によって巨大質量を持つことが禁止されている。

私たちの研究グループは2010年、フレーバーの非可換離散対称性をレビュー論文として発表し、それらの対称性のノウハウを確立した。その成果を基に、フレーバー対称性によってゲージ重項のニュートリノは大きな質量が禁止されていると考える。また、その場合、質量がKeVからMeVとなる条件もあわせて求める。研究の出発点では、ニュートリノに適したA4, S4等の非可換離散対称性を用いる。

(2) 右巻ニュートリノが、新機構によって、巨大な質量を持つ仲間から分離した結果、非常に小さな質量が実現している。

右巻ニュートリノが、余剰次元のシーソー機構によって、巨大な質量を持つ仲間から分離した結果、非常に小さな質量が実現しているというモデルがある。これは、2010年A. Kusenko, F. Takahashi, T.T. Yanagidaによって提案された余剰次元を活用したモデルである。余剰次元モデルの多様性を考慮した理論的検討をすすめることによって、この原型を大きく発展させ、あわせて精密な現象論的研究を行う。

これらの実現のため、Manfred Lindner教授(Max Planck Institute, Heidelberg, Germany)の研究グループと共同研究を行う。

#### 4. 研究成果

本研究では、ステライルニュートリノの質量と混合に焦点をあて、ニュートリノの現象論的研究に成果をあげた。その成果は、1編の著書と20編の論文として発表された。

主な成果の概要は以下の通りである。

(1) これまで提案されているニュートリノのモデルを吟味し、その特徴をあきらかにすることを試みた。その成果を、発表論文として発表した。この論文は、研究誌 *New Journal of Physics* のおける2014年度の“Highlights of 2014”に選定され、注目を浴びている。

<http://iopscience.iop.org/1367-2630/page/highlights-of-2014>

(2) ステライルニュートリノが存在する条件下で、通常のアクティブニュートリノの質量と大きなニュートリノ混合角を最小限の未知パラメータで説明できるモデルを構築した。そこでは混合角  $\theta_{12}$  が精密に予言できると同時に、ニュートリノのCP対称性の破れの大きさも予言でき将来ニュートリノ実験でテスト可能であることを示した(発表論文)。

(3) 日本におけるT2K実験などの精密実験の結果を踏まえ、ニュートリノのCP対称性の破れをフレーバー対称性の破れから導くことができた。また、大統一理論を用いてクォークのCP対称性の破れとニュートリノのCP対称性の破れの関係をつけることに成功した(発表論文, , )。

(4) ハイデルベルクのマックスプランク研究所(MPK)のディレクターであるリンドナー教授率いる研究グループと共同研究をすすめ現在も継続している。この間、ニュートリノのモデルの研究に関して実績をあげ、その成果を論文として発表している(発表論文)。

(5) 2013年7月に、ヨーロッパを中心として海外のフレーバーの研究者50名を招聘して、参加者100名のワークショップ(FLASY13)を新潟大学において開催した。フレーバー研究最前線の研究者が参加し今後、国際的な研究連携がすすめられることとなった。

(6) ニュートリノに関するフレーバー対称性の研究成果が評価され、ニュートリノ2014(2014年6月:ボストン)とフレーバー対称性ワークショップ(FLASY2014)(2014年6月:サセックス)において招待講演を行った。

#### 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 20件)

Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto,  
 $K_L^0$  decay correlating with  
 $\kappa$  in high scale SUSY, 査読有,  
PTEP(2015) 053B07  
DOI: 10.1093/ptep/ptv066

Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto,  
Linking Leptonic CP violation to Quark  
Unitarity Triangle, 査読有,  
JHEP 1504 (2015) 037  
DOI: 10.1007/JHEP04 (2015) 037

Sin Kyu Kang, Morimitsu Tanimoto,  
Prediction of Leptonic CP Phase in A4  
symmetric model, 査読有,  
Phys. Rev. D 91 (2015) 7, 073010  
DOI: 10.1103/PhysRevD.91.073010

T. Asaka, S. Eijima, K. Takeda,  
Lepton Universality in the MSM,  
査読有, Phys. Lett. B742 (2015) 303-309  
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.01.049

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto, 査読有,  
Predicting CP violation in Deviation  
from Tri-bimaximal mixing of Neutrinos  
Mod. Phys. Lett. A30 (2015) 1550002  
DOI: 10.1142/S0217732315500029

Hajime Ishimori, Stephen F.King,  
Hiroshi Okada, Morimitau Tanimoto,  
Quark mixing from  $(6N^2)$  family  
symmetry, 査読有,  
Phys. Lett. B743 (2015) 172-179  
DOI: 10.1016/j.physletb.2015.02.027

Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto,  
Probing the high scale SUSY in CP  
violations of K,  $B^0$  and  $B_s$  mesons ,  
査読有, Phys. Lett. B 735 (2014) 426-437  
DOI: 10.1016/j.physletb.2014.06.067

Stephen F. King, Alexander Merle,  
Stefano Morisi, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto  
Neutrino Mass and Mixing: from Theory to  
Experiment, 査読有, New J. Physics 16  
(2014) 045018  
DOI:10.1088/1367-2630/16/4/045018

Atsushi Hayakawa, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto  
Searching for the squark flavor mixing  
in CP violations of  $B_s \rightarrow K^+ K^-$  and  $K_0 \text{bar}$   
 $K_0$  decays, 査読有, PTEP, 2014(2), 2014  
DOI: 10.1093/ptep/ptt006

T. Asaka, S. Eijima  
Direc Search for Right-handed Neutrinos  
and Neutrinoless Double Beta Decay  
査読有, PTEP 2013 (2013) 11, 113B02  
DOI: 10.1093/ptep/ptt094

H.Ishimori, T. Kobayashi, Y. Shimizu,  
H. Ohki, H. Okada, M. Tanimoto,  
Non-Abelian discrete symmetry for  
flavors, 査読有,  
Fortsch.Phys. 61 (2013) 441-465  
DOI: 10.1002/prop.201200124

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto  
Sensitivity of the squark flavor mixing  
to the CP violation of K,  $B_0$  and  $B_s$  mesons,  
査読有, Phys.Lett. B726 (2013) 747-757  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.09.051

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto,  
Supersymmetry contributions to CP  
violations in  $b \rightarrow s$  and  $b \rightarrow d$  transitions  
taking account of new data, 査読有,  
Phys.Rev. D87 (2013) 5, 056004  
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.056004

T. Asaka, S. Eijima, A. Watanabe  
Heavy neutrino search in  
accelerator-based experiments,  
査読有, JHEP 1303 (2013) 125  
DOI: 10.1007/JHEP03(2013)125

Yusuke Shimizu, Ryo Takahashi,  
Morimitsu Tanimoto,  
Minimal Neutrino Texture with Neutrino  
Mass Ratio and Cabibbo Angle, 査読有,  
PTEP 2013 (2013) 6, 063B02  
DOI: 10.1093/ptep/ptt026

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto,  
Direct CP Violation of  $b \rightarrow s$  and CP  
Asymmetries of Non-Leptonic B Decays in  
Squark Flavor Mixing, 査読有,

Prog. Theor. Phys. 128 (2012) 273-283  
DOI: 10.1143/PTP.128.273

Masataka Fukugita, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto, Tsutomu T. Yanagida,  
13 in Neutrino Mass Matrix with the  
Minimal Texture, 査読有,  
Phys.Lett. B716 (2012) 294-297  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.06.049

Atsushi Hayakawa, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto  
Squark flavor mixing and CP asymmetry of  
neutral B mesons at LHCb, 査読有,  
Phys.Lett. B710 (2012) 446-453  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.020

Werner Rodejohann, Morimitsu Tanimoto,  
Atsushi Watanabe  
Relating large  $Ue3$  to the ratio of  
neutrino mass-squared differences,  
査読有, Phys.Lett. B710 (2012)636-640  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.037

T. Asaka, A. Watanabe,  
Atmospheric Sterile Neutrinos,  
査読有, JHEP1207 (2012) 112  
DOI: 10.1007/JHEP07(2012)112

[学会発表](計6件)  
海外国際会議

Morimitsu Tanimoto,  
“Neutrino mass textures”,  
Fourth workshop on flavor symmetries  
and consequences in accelerators and  
cosmology, 2014年6月20日, Brighton  
(UK), 招待講演  
Morimitsu Tanimoto,  
“Neutrinos and Flavor Symmetries”,  
XXVI International Conference on

Neutrino Physics and Astrophysics  
(Neutrino 2014), 2014年6月4日,  
Boston (USA), 招待講演

Morimitsu Tanimoto,  
“Sensitivity of High Scale SUSY in CP  
violations of B and K mesons”,  
Flavor Physics and Mass generation,  
2014年2月14日, Singapore, 招待講演

Morimitsu Tanimoto,  
“Probing SUSY in B meson decays  
facing recent LHC data”, The Tenth  
Particle Physics Phenomenology,  
2013年6月1日, Chung-Li (Taiwan),  
招待講演

Morimitsu Tanimoto,  
“Flavor Symmetry relating neutrino  
mixing angles to neutrino masses”,  
International Workshop on Models of  
Neutrino Mass (BeNe2012), 2012年9  
月18日, Trieste (Italy), 招待講演

Morimitsu Tanimoto,  
“Relating neutrino mixing angles to  
neutrino masses”, Second workshop on  
flavor symmetries and consequences in  
accelerators and cosmology, 2012年6  
月30日, Dortmund (Germany), 招待講演

[図書](計1件)

Hajime Ishimori, Tatsuo Kobayashi,  
Hiroshi Ohki, Hiroshi Okada,  
Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto  
Springer 出版,  
An introduction to non-Abelian discrete  
symmetries for particle physicists,  
Lect.Notes, Phys. 858 (2012) 1-227  
DOI: 10.1007/978-3-642-30805-5

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

谷本 盛光 (Tanimoto Morimitsu)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：90108366

### (2) 研究分担者

浅賀 岳彦 (Asaka Takehiko)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70419993