

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 14 日現在

機関番号：34304

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23740210

研究課題名(和文)ニュートリノ質量とレプトン混合を記述する新物理模型の現象論

研究課題名(英文)Phenomenology in new physics models of the neutrino mass and the lepton mixing

研究代表者

杉山 弘晃(SUGIYAMA, Hiroaki)

京都産業大学・益川塾・博士研究員

研究者番号：50548724

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円、(間接経費) 570,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノが素粒子物理学理論の発展の鍵であるとの観点により、ニュートリノ質量の生成機構を与える様々な新物理模型(理論)を提案した。それらの新物理模型を用いたときにLHC実験等で期待されるシグナルを調べ、実際に「ニュートリノ質量やレプトン混合はどのように生成されているか」および「なぜ他の素粒子に比べてこれほどニュートリノ質量が小さいのか」という謎が近未来に解明されることを目指した。

研究成果の概要(英文)：From the viewpoint that the neutrino is a key for development of the elementary particle theory, several new physics models for generating the neutrino mass were proposed. Expected signals at the LHC in these models were investigated so that reasons how the neutrino mass and the lepton flavor mixing are generated and why the neutrino mass is much smaller than those of the other elementary particles can be evident in near future.

研究分野：物理学

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：ニュートリノ ニュートリノ質量 ヒッグス粒子 レプトンフレーバー 素粒子論

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学において「標準模型」と呼ばれているものは、様々な実験結果を非常に良く説明できる強力な理論である。しかしながら不満足な点も残されており、そのうちの一つはニュートリノ質量をゼロとしている点である。ニュートリノ質量がゼロでないことは様々なニュートリノ振動観測実験の成功によって確定しており、この事実を理論に取り込まなければならぬ。長らくゼロとみなされるほどにニュートリノ質量が極端な小ささであることは、何らかの特別な機構が働いていることを期待させる。また、ニュートリノ振動はニュートリノ質量の存在だけでなく、レプトン混合の様子を明らかにしているが、そのレプトン混合構造はクォーク混合構造とは非常に異なる特徴的なものである。このような事実から、ニュートリノは標準模型を発展させた新物理模型を構築するための重要な手がかりと考えられる。

また、LHC実験が稼働を開始したことにより、新物理模型における新粒子の発見への期待が高まっていた。そのため、新物理模型を用いた場合にLHCで期待される結果についての整備は急務であった。

2. 研究の目的

ニュートリノが標準模型の発展への鍵であるとの観点から、ニュートリノ質量生成機構を与える模型を扱いその現象論を行なうことで、近未来の実験によってニュートリノ質量生成機構の解明が成されることを目指す。その際、ニュートリノ振動実験から得られているレプトン混合構造との関連に特に注意を払う。

3. 研究の方法

LHC実験等でニュートリノ質量生成機構が解明されることを期待するために、テラ電子ボルト領域よりも軽い質量を持った新粒子を用いた新物理模型を主に扱っていく。また、予言能力を高めるために、可能な限りシンプルな模型や対称性の縛りの強い模型を扱う。すでに知られている新物理模型を扱うだけでなく、レプトン混合構造等に対する実験的制限を満たせる新物理模型を自ら考案することも行なっていく。軽い新粒子によってニュートリノ質量を抑制するためには、ループダイアグラムを活用したタイプの模型が有用となりえる。そのような模型には暗黒物質の導入が比較的自然に行なえ、その場合は暗黒物質に対する制限を満たせるかどうかとも重要になる。

ニュートリノ質量を生成するほとんどの新物理模型では、レプトンと湯川相互作用を持つ新スカラー粒子が導入される。その新スカラー粒子のレプトンへの崩壊パターンは、ニュートリノ質量行列の構造を反映していると期待される。このような崩壊パターンについて、ニュートリノ振動実験等の知見を活

用した予言を整備する。そのような予言を比較することにより、模型の識別可能性も考えていく。

4. 研究成果

(1) 電子等はディラック型の質量を持つが、ニュートリノは電的に中性であるため、マヨラナ型の質量を持つことも許されるという特徴がある。ニュートリノ質量を導入した新物理模型のほとんどは、このマヨラナ質量を活用している。しかしながら、マヨラナ質量の存在が実験的に確認されていない。そこで、ニュートリノがディラック型質量だけを持っている場合を考え、そのディラック型のニュートリノ質量を与える湯川結合が1ループの輻射補正で現れる新物理模型の解析を行なった。単純な模型はレプトンフレーバー混合構造を再現できないと思われていたが、慎重な解析により実は十分に再現可能であることを明らかにした。

(2) ニュートリノがマヨラナ型の質量を持つ場合、ニュートリノと反ニュートリノの区別がなくなり、レプトン数の変化が起こりえる。そのためレプトン数の変化を実験的に探索することは非常に重要であり、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の探索が広く行なわれている。それとは別の可能性を、レプトクォークとダイクォークという新粒子を導入した新物理模型について探究した。この模型はニュートリノ質量を2ループで生成するものである。この模型を用いて、レプトン混合構造等を満たしつつ、LHC実験においてレプトン数の変化を観測する可能性を示すことができた。

(3) ニュートリノ質量の小ささの原因として、その質量を与えるヒッグス場の真空期待値が小さいと考える新物理模型がある。その真空期待値を小さく抑えるために、それが1ループの輻射補正によって生成されるような拡張模型を考案した。輻射補正を活用したニュートリノ質量の模型では、湯川結合を輻射的に生成する模型がほとんどであり、真空期待値を輻射的に生成するものは他にほとんど例を見ない。これは、ツリーレベルでの真空期待値を禁止する対称性を自発的に破ることへの抵抗感のためであったと思われる。しかしながら、自発的破れに伴う南部-ゴールドストーン粒子がほとんど問題を生じさせない状況の存在を知り、克服できた。

(4) ニュートリノ質量の小ささがニュートリノ質量専用の真空期待値の小ささを原因とするような新物理模型の場合、ニュートリノの湯川結合に関わる荷電ヒッグス粒子について、その崩壊パターンはレプトン混合構造と直接的に関連する。そこで、最新のニュートリノ振動実験結果によるレプトン混合構造の新しい知見が、その崩壊パターンにどの

ような影響を与えているかを詳細に調べた。結果、電子への崩壊分岐比が極端に小さい可能性は排除されたことが明らかになった。

(5)ヒッグス三重項模型はニュートリノ質量生成機構を与えるシンプルで魅力的な新物理模型である。特徴的な新粒子は、電子の2倍の電気を帯びた二重荷電ヒッグス粒子であるが、このような粒子はニュートリノ質量を生成する他の新物理模型にも存在する。そこで二重荷電ヒッグス粒子の性質を判別する手法として、その崩壊で作られるタウ粒子の崩壊パターンの観測が有効であることを示した。二重荷電ヒッグス粒子が発見されて性質が明らかになれば、ニュートリノ質量の生成機構解明に大きく近づくこと期待できる。

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 11 件)

A.G. Akeroyd, S. Moretti, H. Sugiyama,
“Dependence of the leptonic decays of H^{\pm} on the neutrino mixing angles θ_{13} and θ_{23} in models with neutrinophilic charged scalars,”
Physcs Letters B728, p.157 - 164 (2014),
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.11.032
査読有

S. Kanemura, T. Matsui, H. Sugiyama,
“Loop Suppression of Dirac Neutrino Mass in the Neutrinophilic Two Higgs Doublet Model,”
Physics Letters B727, p.151-156 (2013),
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.09.061
査読有

M. Kohda, H. Sugiyama, K. Tsumura,
“Lepton number violation at the LHC with leptoquark and diquark,”
Physics Letters B718, p.1436 - 1440 (2013),
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.12.048
査読有

S. Kanemura, T. Nabeshima, H. Sugiyama,
“Radiative type-I seesaw model with dark matter via U(1)B-L gauge symmetry breaking at future linear colliders,”
Physical Review D87, 015009-1 - 7, (2013),
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.015009
査読有

H. Sugiyama, K. Tsumura, H. Yokoya,
“Discrimination of models including doubly charged scalar bosons by using tau lepton decay distributions,”

Physics Letters B717, p.229 - 234 (2012),
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.09.044
査読有

S. Kanemura, H. Sugiyama,
“Dark matter and a suppression mechanism for neutrino masses in the Higgs triplet model,”
Physical Review D8, 073006-1 - 8 (2012),
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.073006
査読有

M. Asano, S. Matsumoto, M. Senami, H. Sugiyama,
“Comprehensive analysis on the light Higgs boson scenario,”
Physical Review D86, 01502-1 - 10 (2012),
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.015020
査読有

A.G. Akeroyd, S. Moretti, H. Sugiyama,
“Five-lepton and six-lepton signatures from production of neutral triplet scalars in the Higgs triplet model,”
Physical Review D85, 055026-1 - 13 (2012),
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.055026
査読有

S. Kanemura, T. Nabeshima, H. Sugiyama,
“TeV-scale seesaw model with a loop-induced Dirac mass term and dark matter from U(1)B-L gauge symmetry breaking,”
Physical Review D85, 033004-1 - 9 (2011),
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.033004
査読有

S. Kanemura, T. Nabeshima, H. Sugiyama,
“Neutrino masses from loop-induced Dirac Yukawa couplings,”
Physics Letters B703, p.66 - 70 (2011),
DOI: 10.1016/j.physletb.2011.07.047
査読有

A.G. Akeroyd, H. Sugiyama,
“Production of doubly charged scalars from the decay of singly charged scalars in the Higgs triplet model,”
Physical Review D84, 035010-1 - 9 (2011),
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.035010
査読有

[学会発表](計 26 件)

杉山弘晃,
“Dependence of the leptonic decays of H^{\pm} on the neutrino mixing angles θ_{13} and θ_{23} in models with neutrinophilic charged scalars,”
日本物理学会第 69 回年次大会,

2014年3月30日, 東海大学, 神奈川県

H. Sugiyama,
“Discrimination of Models Including Doubly Charged Scalar Bosons by Using Tau Lepton Decay Distributions,”
CST-MISC Joint International Symposium on Particle Physics - from spacetime dynamics to phenomenology -,
16 Mar. 2014, Nihon University, Tokyo, Japan

H. Sugiyama,
“Knowledge About Neutrino-masses and Branching-ratios Using Relevant yukawa-Interactions,”
Basis of the Universe with Revolutionary Ideas 2014 (BURI 2014),
13 Feb. 2014, University of Toyama, Toyama, Japan

杉山弘晃,
“Dependence of the leptonic decays of H on the neutrino mixing angles θ_{13} and θ_{23} in models with neutrinophilic charged scalars,”
松江現象論研究会 2014,
2014年2月9日, くにびきメッセ, 島根県

H. Sugiyama,
“Dependence of the leptonic decays of H on the neutrino mixing angles θ_{13} and θ_{23} in models with neutrinophilic charged scalars,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2013 FALL),
30 Sep. 2013, KEK, Tsukuba, Japan

杉山弘晃,
“Lepton number violation at the LHC with leptoquark and diquark,” (ポスター)
素粒子物理学の進展 2013,
2013年8月7日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都府

杉山弘晃,
“ニュートリノフィリックなヒッグス模型に基づくディラックニュートリノ質量の1ループ抑制機構,”
日本物理学会第68回年次大会,
2013年3月29日, 広島大学, 広島県

H. Sugiyama,
“Lepton number violation at the LHC with leptoquark and diquark,”
KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2013),
5 Mar. 2013, KEK, Tsukuba, Japan

H. Sugiyama,

“Neutrino Mass in TeV-Scale New Physics Models,”
Toyama International Workshop on Higgs as a Probe of New Physics 2013 (HPNP2013),
13 Feb. 2013, University of Toyama, Toyama, Japan

H. Sugiyama,
“Lepton number violation at the LHC via leptoquarks and diquarks,” (poster)
Hadron Collider Physics Symposium 2012 (HCP2012),
15 Nov. 2012, Kyoto University, Kyoto, Japan

H. Sugiyama,
“Lepton number violation at the LHC via leptoquark and diquark,”
3rd Joint Retreat on Cosmology and LHC Physics,
4 Nov. 2012, Hsinchu, Taiwan

H. Sugiyama,
“Radiative type-I seesaw model with dark matter via U(1)B-L gauge symmetry breaking at the ILC,”
The 2012 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS12),
25 Oct. 2012, Texas, USA

H. Sugiyama,
“Radiative type-I seesaw model with dark matter via U(1)B-L gauge symmetry breaking and its phenomenology,”
Japanese-German Symposium on Neutrino, Dark Matter, Higgs and beyond the Standard Model,
2 Oct. 2012, Shiinoki Cultural Complex, Kanazawa, Japan

杉山弘晃,
“Neutrino Masses with Leptoquarks and Diquarks,”
日本物理学会秋季大会,
2012年9月11日, 京都産業大学, 京都府

杉山弘晃,
“Dark matter and a suppression mechanism for neutrino masses in the Higgs triplet model,”
Summer Institute 2012: Phenomenology of Elementary Particles and Cosmology,
23 Aug. 2012, Sun Moon Lake, Taiwan

杉山弘晃,
“Dark matter and a suppression mechanism for neutrino masses in the Higgs triplet model,”
素粒子物理学の進展 2012,
2012年7月19日, 京都大学基礎物理学研究

所，京都府

H. Sugiyama,

“Dark matter and a suppression mechanism for neutrino masses in the Higgs triplet model,” (poster)

The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2012),
4,5,8 Jun. 2012, Kyoto TERRSA, Kyoto, Japan

杉山弘晃,

“Dark matter and a suppression mechanism for neutrino masses in the Higgs triplet model,”

第40回北信越地区素粒子論グループ研究会,
2012年5月19日, 新潟県妙高市国立妙高青少年自然の家, 新潟県

杉山弘晃,

“What can we hope on neutrino physics at the LHC?,”

第25回宇宙ニュートリノ研究会,
2012年3月29日, 宇宙線研究所, 千葉県

杉山弘晃,

“A Suppression Mechanism for Neutrino Masses in the Higgs Triplet Model with Dark Matter,”

日本物理学会第67回年次大会,
2012年3月24日, 関西学院大学, 兵庫県

⑲ H. Sugiyama,

“A Suppression Mechanism for Neutrino Masses in the Higgs Triplet Model with Dark Matter,”

KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2012),
1 Mar. 2012, KEK, Tsukuba, Japan

⑳ 杉山弘晃,

“A Suppression Mechanism for Neutrino Masses in the Higgs Triplet Model with Dark Matter,”

2011年冬の富山、素粒子宇宙論研究会,
2012年2月21日, 富山大学, 富山県

㉑ 杉山弘晃,

“Production of doubly charged scalars from the decay of singly charged scalars in the Higgs Triplet Model,”

日本物理学会秋季大会,
2011年9月18日, 弘前大学, 青森県

㉒ 杉山弘晃,

“Surely You're Joking, Mr. Majorana!,”
Summer Institute 2011 -Phenomenology of Elementary Particles and Cosmology-,

2011年8月17日, 人材開発センター富士研修所, 山梨県

㉓ H. Sugiyama,

“Production of doubly charged scalars from the decay of singly charged scalars in the Higgs Triplet Model,”

APCTP 2011 LHC Physics Workshop at Korea,
11 Aug. 2011, Seoul, Korea

㉔ H. Sugiyama,

“Phenomenology in the Higgs Triplet Model with the A4 Symmetry,”

1st Workshop on Flavor Symmetries and Consequences in Accelerators and Cosmology (FLASY2011),
13 Jul. 2011, Valencia, Spain

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 弘晃 (SUGIYAMA, Hiroaki)

京都産業大学・益川塾・博士研究員

研究者番号：50548724