

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03625

研究課題名（和文）レプトン数は非保存量か？

研究課題名（英文）Is the Lepton Number a conserved quantity?

研究代表者

杉山 弘晃 (Sugiyama, Hiroaki)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：50548724

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノの微小質量の生成機構について新物理模型の詳細になるべく依らないように分類した先行研究を活用し、ニュートリノがマヨラナ型と呼ばれる質量を持たないような新物理模型を構築した。ある粒子崩壊過程は、ニュートリノがマヨラナ型質量を持つ新物理模型の場合には基本的に観測が期待できないほどに抑制されているが、本研究で構築した模型ではその抑制を免れ得ることを具体的に示した。また、先行研究における新物理模型の分類の方針を踏襲しつつ、より幅広く活用できるようにクォークの寄与も含めた模型を分類する方法を探索した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノがマヨラナ型質量を持つ場合には、レプトン数という物理量が非保存量になる。レプトン数が非保存量であることは、レプトン数を変化させる「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」の探索によって確認が目指されている。本研究では逆に、ニュートリノがマヨラナ型質量を持たない場合にのみ観測が期待できるような反応過程を提示したため、レプトン数が保存量であることの確認可能性を示したことになる。また、「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」以外のレプトン数を変化させる反応過程を探索・活用するため、クォークが寄与するニュートリノ質量生成機構の分類を推し進めることは重要である。

研究成果の概要（英文）：Utilizing previous studies that classified mechanisms of generating neutrino masses in a way that is as independent of details of new physics models as possible, we constructed a new physics model in which neutrinos do not have the so-called Majorana mass. Although a certain particle decay process that is so suppressed that cannot be expected to be observed if neutrinos have Majorana masses, we showed that the process can evade the suppression in this model. In addition, while following the way of classification in the previous studies, we explored a method of classifying models including the contribution of quarks so that the classification can be applied more extensively.

研究分野：素粒子物理学理論

キーワード：ニュートリノ質量

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学理論において『標準模型』と呼ばれているものは、ほとんど全ての素粒子実験結果を高精度で説明できる優れた理論であるが、『標準模型』では説明できない事象もいくつか存在する。その一つが、ニュートリノ振動観測によって明らかにされたニュートリノの微小質量の存在である。『標準模型』ではニュートリノは質量を持たない素粒子として扱われており、その質量を導入して理論を拡張する必要がある。

ニュートリノ質量を理論に導入する際にはマヨラナ型質量という特別な可能性があり、そのような質量を持つ素粒子が実在するかどうかは素粒子物理学理論における本質的な謎である。ニュートリノがマヨラナ型質量を持つ場合はレプトン数が非保存量となり、始状態と終状態でレプトン数を2だけ変化させるような反応が原理的に可能となる。逆に、そのような反応が観測されれば、ニュートリノがマヨラナ型質量を持つことが確定される。レプトン数を2だけ変化させる反応として「ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊」($0\nu\beta\beta$)の探索が精力的に行なわれているが、崩壊の観測には至っていない。 $0\nu\beta\beta$ が観測されない場合は、「レプトン数が保存量」である可能性だけでなく「レプトン数は非保存量であるが、 $0\nu\beta\beta$ への影響が運悪く非常に小さい」という可能性も残されてしまい、レプトン数が非保存量であるかどうか(そして、ニュートリノがマヨラナ型質量を持つかどうか)は謎のままとなる。後者の可能性を避けるためにも、 $0\nu\beta\beta$ 以外の反応の活用可能性を探求する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ニュートリノがマヨラナ粒子(マヨラナ型質量を持ち、粒子・反粒子の区別が無い粒子)であるかどうか、すなわちレプトン数が非保存量であるかどうかの新たな検証方法の提示である。始状態と終状態でレプトン数が2だけ変化するような反応過程は、マヨラナ型ニュートリノ質量 m_ν によって引き起こされ得る。そのような過程の反応率は、素朴には m_ν/E (E は当該反応過程に特徴的なエネルギースケール) という無次元量に支配され、核崩壊のような低エネルギーでの反応が有利になる。そのため、通常は $0\nu\beta\beta$ が起こるのを待つことによりレプトン数が非保存量である証拠の探求がされている。本研究では $0\nu\beta\beta$ が将来実験においても観測されない場合を想定し、別の方法(特にコライダー実験)においてレプトン数が非保存量であるかどうかを検証する可能性を探求する。

3. 研究の方法

本研究では、『標準模型』にニュートリノ質量生成機構を導入した新物理模型を扱う。ニュートリノ質量が輻射補正によって生成されるような場合には輻射補正であること自体がニュートリノ質量を抑制するため、ニュートリノ質量の小ささは必ずしも新相互作用の弱さを意味しなくなる。そのような場合には、レプトン数を変化させるマヨラナ型ニュートリノ質量は非常に小さくとも、レプトン数を変化させる過程(レプトン数を変化させる根源的な新相互作用によるもの)の反応率は原理的にはニュートリノの微小質量による抑制から逃れて大きくなりえる。そこで、輻射補正によるニュートリノ質量生成機構を主に扱っていく。既存の新物理模型を扱うだけでなく新たな模型の構築も行ない、それらの新物理模型を用いて、LHCやILC等のコライダー実験においてレプトン数を変化させるような反応が観測される可能性を探求する。一般には反応の始状態と終状態のレプトン数の変化量は様々なものを考えることが可能であるが、ニュートリノ質量生成機構との関連を念頭におき、レプトン数を2だけ変化させる反応に絞る。クォークがニュートリノ質量生成機構に関与するような場合は、陽子崩壊探索実験からの強い制限を逃れるために、バリオン数は保存量であるとする。

4. 研究成果

ニュートリノ質量生成機構の分類を活用した先行研究[1]では、ヒッグス粒子についてレプトンフレーバーを保存しないような崩壊 $h \rightarrow \ell\ell'$ が観測された場合には、基本的にニュートリノがディラック型の質量を持つような新物理模型のみが許され得るということが示されていた。これは、ニュートリノがマヨラナ粒子ではないことを実験的に確認し得ることを意味しており、それが確認できればレプトン数が保存量であることを強く示唆できる(ニュートリノ質量と無関係にレプトン数が非保存量になっている可能性は残る)。先行研究[1]では、質量生成機構の分類を活用して模型の詳細に依らない解析であることが利点であったが、逆に、ヒッグス粒子の崩

壊分岐比等の具体的な数値は出せていなかった。そこで本研究では、先行研究[1]の結果を踏まえて、ディラック型のニュートリノ質量を2ループの輻射補正として生成する新物理模型を具体的に構築し、その模型において $h \rightarrow \ell\ell'$ の崩壊分岐比を計算した。その結果、 $h \rightarrow \ell\ell'$ (特に $h \rightarrow \mu\tau$) の崩壊分岐比は実験的制限の強い $\ell \rightarrow \ell'\gamma$ の崩壊分岐比に比べて格段に大きな値となり得ることを具体的に示すことができた。

ニュートリノ質量の生成機構を分類した先行研究[2,3]では、解析の単純化のために、『標準模型』のフェルミオンのうちでレプトン(ニュートリノが含まれる)のみがニュートリノ質量生成機構に関与するという仮定をおいていた。その仮定を取り去り、クォークが関与するようなニュートリノ質量生成機構も分類することができれば、ハドロンの(クォークから作られる)の衝突実験等におけるニュートリノ質量(特に、レプトン数を非保存量にするマヨラナ型質量)の生成機構の探求可能性を検討する際に非常に有用だと期待される。しかしながら、実際にそのような分類を試みてみたところ、関与するクォークを1種類に限定した場合においてすら非常に多くの質量生成機構を列挙することになり、そこから等価なもの(例えば他のものの高次補正に対応するもの)を除去していく作業が想定以上の困難さであることが分かってきた。そのため、分類作業自体の効率化を考える必要に迫られたが、あらかじめ等価なものをある程度除外しつつ質量生成機構を列挙していけるような方法を見出すことができた。

<参考文献>

- [1] M. Aoki, S. Kanemura, K. Sakurai and H. Sugiyama, “Testing neutrino mass generation mechanisms from the lepton flavor violating decay of the Higgs boson,” Physics Letters B 763, 352 ~ 357 (2016)
- [2] S. Kanemura, K. Sakurai and H. Sugiyama, “Probing Models of Dirac Neutrino Masses via the Flavor Structure of the Mass Matrix,” Physics Letters B 758, 465 ~ 472 (2016)
- [3] S. Kanemura and H. Sugiyama, “Probing Models of Neutrino Masses via the Flavor Structure of the Mass Matrix,” Physics Letters B 753, 161 ~ 165 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Enomoto Kazuki, Kanemura Shinya, Sakurai Kodai, Sugiyama Hiroaki	4. 巻 100
2. 論文標題 New model for radiatively generated Dirac neutrino masses and lepton flavor violating decays of the Higgs boson	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.100.015044	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9件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 杉山弘晃
2. 発表標題 Neutrino
3. 学会等名 新ヒッグス勉強会 第29回定例会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本一輝
2. 発表標題 ヒッグスLFV崩壊と暗黒物質を伴うニュートリノ質量の新モデル
3. 学会等名 素粒子物理学の進展 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Enomoto
2. 発表標題 Higgs LFV decays in the model for Dirac neutrino masses and dark matter
3. 学会等名 Scalars 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Enomoto
2. 発表標題 Higgs LFV decays in the model for Dirac neutrino masses and dark matter
3. 学会等名 Intensity Frontier in Particle Physics: Flavor, CP Violation and Dark Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Enomoto
2. 発表標題 Higgs LFV decays in the model for Dirac neutrino masses and dark matter
3. 学会等名 The 2019 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroaki Sugiyama
2. 発表標題 Neutrino Mass Generation with Multi-Higgs
3. 学会等名 Workshop on Multi-Higgs models (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山弘晃
2. 発表標題 ニュートリノ質量生成機構
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroaki Sugiyama
2. 発表標題 Introduction to Neutrino Physics
3. 学会等名 Physics at the Cosmic Frontier (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榎本一輝, 兼村晋哉, 桜井巨大, 杉山弘晃
2. 発表標題 ヒッグスLFV崩壊と暗黒物質を伴うディラックニュートリノの質量の新模型
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019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
---------	---------