

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03651

研究課題名（和文）軽いゲージ粒子をとおして探るニュートリノ質量と暗黒物質の起源

研究課題名（英文）Study of the origin of neutrino mass and dark matter through light gauge boson

研究代表者

下村 崇（Shimomura, Takashi）

宮崎大学・教育学部・准教授

研究者番号：00447278

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：軽い不毛ニュートリノが暗黒物質である可能性について研究を行い、ニュートリノ観測実験で検証されうる事を明らかにした。また、不毛ニュートリノ暗黒物質の生成過程についても研究を行い、新たな生成過程の存在を明らかにした。さらにニュートリノ質量の生成に関連して生じ得るレプトンフレーバーの破れの検証可能性についても明らかにした。一方で非弾性的な相互作用によってのみ通常の物質と反応する暗黒物質を考え、将来実験での検証可能性を明らかにした。さらにモジュラーフレーバー対称性をもとにニュートリノの質量生成とレプトンフレーバーの破れの関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は暗黒物質とニュートリノの質量の起源について、これまでとは異なる軽い新粒子に関連する物理法則の現象論的可能性と将来実験による検証可能性を明らかにする研究の一環である。本研究の重要な成果の一つは、いくつかの解析はニュートリノ質量生成過程の代表的なモデルを基にしているが、より多くのモデルに適用できるよう一般化されたものであり、今後の実験で検証の足場となる研究であると考えられる。また別の重要な成果として将来の軽い粒子の探索実験として有望なFASER実験において感度領域を明示したことである。

研究成果の概要（英文）：We have studied possibility of light sterile neutrino dark matter. We showed that such a dark matter can be explored at neutrino oscillation experiments, and also found that new production processes can be important in the early Universe. Furthermore, we have studied the sensitivity of discovering lepton flavor violations through light bosons decays at the FASER experiment. On the other hand, we considered a dark matter candidate which only inelastically scatters with other particles, and showed the sensitivity region for such a dark matter in FASER experiment. We also studied the neutrino mass generation under modular flavor symmetry and lepton flavor violation.

研究分野：素粒子現象論

キーワード：暗黒物質 レプトンフレーバーの破れ 軽い新粒子

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地上実験と宇宙観測によりニュートリノが質量と混合を持つこと、および暗黒物質が存在することが事実となった。これらの事実を説明するために多くのモデルが提案され、現在進行中および計画中的の実験での検証へ向け研究が進んでいる。

精密測定で得られたニュートリノ質量と混合の値から、背後にそれを規定する新たなゲージ対称性があると考えられることができる。また暗黒物質は直接検出できていないことから、ゲージ対称性を導入して物質との反応を制限する研究も数多くある。これらの対称性は一般に数百GeV以上のスケールに存在すると仮定されており、付随するゲージ粒子とその質量の起源となるスカラー粒子も同等の質量を持つと想定されている。これらの重い新粒子はLHC実験等で探索が行われているが、未だに発見には至っていない。

この状況下で、近年、IceCubeによる宇宙ニュートリノフラックスのギャップとAtomki実験によるベリリウム原子核の電子-陽電子崩壊率の過剰が報告された。

先行研究によりこれらの異常は $\mu\text{eV}$ 程度の質量を持ち相互作用が非常に弱い新粒子を導入することで説明できることが分かっている。そこで申請者はニュートリノ質量と混合およびミュー粒子の異常磁気能率のズレを同時に説明し得る $L_{\mu} - L_{\tau}$ 対称性を考え、そのゲージ粒子がIceCubeの結果をも説明し得ることを明らかにした。

またニュートリノ質量と暗黒物質を同時に説明し得るB-L対称性を持つモデル[17]でAtomki実験の結果を説明し得ることを明らかにした。

これらの研究から軽いゲージ粒子とニュートリノ質量、暗黒物質が関連し得ることが明らかとなった。さらに今年から始まったBelle-II実験に着目し、ゲージ粒子を検証し得るパラメータ領域を明らかにした。この軽いゲージ粒子は国内外の理論家も徐々に興味を持ち始めており、実験方面でもBelle-IIやLHCだけでなくSHiPやNA62、原子時計の技術を利用した実験も計画されており、まさにいま行うべき研究であると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的はニュートリノと暗黒物質の性質を規定するゲージ対称性の検証と可能性の追求である。

具体的には

- (a) Belle-IIとLHC実験等での軽いゲージ粒子とスカラー粒子の検証可能性を明らかにする、
  - (b) 軽いゲージ粒子とスカラー粒子を含む完全なモデルを構築する、
- ことを目的とする。これにより最終的に背後にある対称性の情報を引き出す事を目指す。

### 3. 研究の方法

最初の1年半はこれまでの研究成果を基にニュートリノの質量と混合を説明し得る $L_{\mu} - L_{\tau}$ モデルをBelle-II実験で検証するための理論的解析に重心を置きつつ、暗黒物質も説明できるB-LモデルのLHC実験での検証可能なパラメータ領域を明らかにする。さらにその結果を一般化し多くの対称性に適用できるようにする。

2年目以降はゲージ粒子とニュートリノの質量生成機構を含めたより自然なモデルの構築を行い、どのような理論が実験と無矛盾になり得るかを明らかにする。

また、2年目後半には加速器実験から新しい結果が出ると考えられるので、前年度までの解析結果をもとに模型の検証またはパラメータ領域の制限を行う。

#### 4 . 研究成果

Belle-II 実験で  $L_{\mu}$ - $L_{\tau}$  ゲージ粒子がどこまで検証可能かを明らかにした。またニュートリノ三重生成過程を通した検証可能性を明らかにし、宇宙観測から示唆されるデータの不整合を説明する模型を構築した。さらに B-L 対称性を持つ模型でステライルニュートリノ暗黒物質を考え、ニュートリノ測定器での検証可能性を明らかにし、新たな生成過程を取り入れて許容領域を明らかにした。また FASER 実験での暗黒光子や軽いゲージ粒子の生成に関して、質量生成に関連するスカラー粒子の効果を取り入れた解析を行なった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Araki Takeshi, Asai Kento, Otono Hidetoshi, Shimomura Takashi, Takubo Yosuke	4. 巻 2023
2. 論文標題 Search for lepton flavor violating decay at FASER	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP01(2023)145	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 -
1. 著者名 Otsuka Hajime, Shimomura Takashi, Tsumura Koji, Uchida Yoshiki, Yamatsu Naoki	4. 巻 106
2. 論文標題 Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from non-Abelian gauge symmetry	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.115033	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 -
1. 著者名 Eijima Shintaro, Seto Osamu, Shimomura Takashi	4. 巻 106
2. 論文標題 Revisiting sterile neutrino dark matter in gauged $U(1)_{B-L}$ model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.106.103513	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 -
1. 著者名 Feng Jonathan L et al.	4. 巻 50
2. 論文標題 The Forward Physics Facility at the High-Luminosity LHC	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics	6. 最初と最後の頁 030501 ~ 030501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6471/ac865e	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 該当する

1. 著者名 Li Jinmian、Nomura Takaaki、Shimomura Takashi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Inelastic dark matter from dark Higgs boson decays at FASER	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2022)140	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 該当する

1. 著者名 Nomura Takaaki、Shimomura Takashi	4. 巻 81
2. 論文標題 Search for $Z'$ pair production from scalar boson decay in minimal $U(1)L_\mu - L_\tau$ model at the LHC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The European Physical Journal C	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09089-6	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 該当する

1. 著者名 Kobayashi Tatsuo、Shimomura Takashi、Tanimoto Morimitsu	4. 巻 819
2. 論文標題 Soft supersymmetry breaking terms and lepton flavor violations in modular flavor models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136452 ~ 136452
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136452	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 -

1. 著者名 Araki Takeshi、Asai Kento、Honda Kei、Kasuya Ryuta、Sato Joe、Shimomura Takashi、Yang Masaki J S	4. 巻 2021
2. 論文標題 Resolving the Hubble tension in a $U(1)L_\mu - L_\tau$ model with the Majoron	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab108	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 -

1. 著者名 Araki Takeshi, Asai Kento, Shimomura Takashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Electron beam dump constraints on light bosons with lepton flavor violating couplings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2021)082	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 -

1. 著者名 Kobayashi Tatsuo, Nomura Takaaki, Shimomura Takashi	4. 巻 102
2. 論文標題 Type II seesaw models with modular A4 symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.035019	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 該当する

1. 著者名 Seto Osamu, Shimomura Takashi	4. 巻 811
2. 論文標題 Signal from sterile neutrino dark matter in extra U(1) model at direct detection experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135880 ~ 135880
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135880	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 -

1. 著者名 Araki T., Asai K., Otono H., Shimomura T., Takubo Y.	4. 巻 2021
2. 論文標題 Dark photon from light scalar boson decays at FASER	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)072	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 -

1. 著者名 Shimomura Takashi、Uesaka Yuichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Kinematical distributions of coherent neutrino trident production in gauged $L\mu-L$ model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.035022	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 -

1. 著者名 Araki Takeshi、Asai Kento、Sato Joe、Shimomura Takashi	4. 巻 100
2. 論文標題 Low scale seesaw models for low scale $U(1)L\mu-L$ symmetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.095012	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25件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 永島伸多郎, 瀬戸治, 下村崇, 内田祥紀
2. 発表標題 Search for B-L gauge boson with sterile neutrino dark matter at FASER
3. 学会等名 日本物理学会2023年春大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Type-II seesaw models with modular $A_4$ symmetry
3. 学会等名 Recent development of modular flavor symmetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Search for lepton flavor violation at FASER
3. 学会等名 Kagohima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jinmian Li, 野村敬明, 下村崇
2. 発表標題 Fermion iDM from Dark Higgs Decays at FASER
3. 学会等名 第128回日本物理学会九州支部例会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Search for lepton flavor violating decays of light bosons at FASER
3. 学会等名 2022年度新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jinmian Li, 野村敬明, 下村崇
2. 発表標題 Inelastic Dark Matter from Dark Higgs Decays at FASER
3. 学会等名 日本物理学会2022年年次大会 (岡山理科大学)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Dark photon from scalar boson decays at FASER
3. 学会等名 Searching for long-lived particles at the LHC and beyond: Ninth workshop of the LLP Community (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Dark Photon from Light Scalar Boson Decays at FASER
3. 学会等名 Forward Physics Facility, kick off meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Lepton flavor violations from soft SUSY breaking terms in modular flavor models
3. 学会等名 KEK-PH Flavor workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Dark Photon from Light Scalar Boson Decays at FASER
3. 学会等名 Higgs as a Probe of New Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下村崇
2. 発表標題 Overview of C02
3. 学会等名 新学術「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」成果報告研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 下村崇
2. 発表標題 Signal from sterile neutrino dark matter in extra U(1) model at direct detection experiment
3. 学会等名 日本物理学会2021年 年次大会 素粒子論領域
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木威
2. 発表標題 FASER実験による軽いスカラーの崩壊由来のダークフォトン探索
3. 学会等名 日本物理学会2021年 年次大会 素粒子論領域
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅井健人
2. 発表標題 FASER実験におけるレプトン・フレーバー非保存過程の探索
3. 学会等名 日本物理学会2021年 年次大会 素粒子論領域
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Atomki anomaly in gauged U(1)R symmetric model with extended Higgs sector
3. 学会等名 The 27th Regular Meeting of the New Higgs Working Group (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Review of Dark Photon Phenomenology
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Distributions of neutrino trident production processes in minimal gauged $L_\mu - L_\tau$ model
3. 学会等名 The 26th Regular Meeting of the New Higgs Working Group (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Light gauge boson and anomalies
3. 学会等名 Miyazaki Workshop on Particle Physics and Cosmology in 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Dark Sector
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Feebly interacting light gauge boson at Belle-II
3. 学会等名 第 22 回 B ファクトリー物理勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Light Z' boson from scalar boson decay at collider experiments in $U(1)L_\mu-L_\tau$ model
3. 学会等名 New Higgs Working Group, 22th regular meeting (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Light Z' boson from scalar boson decay at collider experiments in $U(1)L_\mu-L_\tau$ model
3. 学会等名 Asian Linear Collider Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Shimomura
2. 発表標題 Search for light scalar boson in $L\mu - L$ model at ILC experiments
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下村崇
2. 発表標題 Light Z' boson search from scalar boson decays in $L\mu - L$ model at collider experiments
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下村崇
2. 発表標題 レプトンと弱結合するMeVスケールのゲージ粒子の物理とその検証可能性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2018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
---------	---------