

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03860

研究課題名（和文）重力波による右巻きニュートリノ質量の解明

研究課題名（英文）Study of right-handed neutrino masses using gravitational waves

研究代表者

瀬戸 治 (Seto, Osamu)

北海道大学・理学研究院・准教授

研究者番号：40547741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：最も有望な素粒子模型でゲージ相互作用による輻射補正の効果のみで大振幅の重力波を生成するのに必要な強い一次相転移が実現できる場合の条件を同定し、右巻きニュートリノ質量生成する湯川結合定数による輻射補正も考慮した有効ポテンシャルに基づいて、右巻きニュートリノ質量を生成する湯川結合の効果はスペクトルに現れることを見出した。関連する宇宙論的帰結として、宇宙の物質反物質非対称生成と暗黒物質についても研究を行った。数百 GeV 程度の質量の右巻きニュートリノによって宇宙の物質反物質非対称性が説明できる素粒子模型の提唱、B-Lゲージ相互作用をする暗黒物質の模型を提唱した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ニュートリノの質量の起源を探る研究の一環として加速器では発見しにくい重い右巻きニュートリノを質量起源と相互作用を宇宙論的考察と重力波を使って探ろう、というものである。素粒子の質量起源の問題だけに留まらず、宇宙の物質生成の機構にも関連しており、世界の物質の起源の解明が進むという点でその社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We considered a promising particle model. We identified the conditions under which a strong first-order phase transition can be realized, and based on the effective potential that also takes into account the radiative correction by the Yukawa coupling constant that generates right-handed neutrino masses. We found that the effect of Yukawa coupling, which produces right-handed neutrino masses, are implemented in the spectrum. As related cosmological subjects, we also studied the matter-antimatter asymmetric generation and dark matter in the universe. We proposed an elementary particle model that explains the matter-antimatter asymmetry of the universe using right-handed neutrinos with masses of several hundred GeV, and derived constraints on dark matter candidates.

研究分野：宇宙論

キーワード：右巻きニュートリノ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動現象の観測によりニュートリノがゼロでない質量を持っていることが確立して久しい。ニュートリノ質量の小ささに対する説明として最も広く受け入れられている理論に、非常に重いマヨラナ右巻きニュートリノを導入したシーソー機構がある。各種実験により軽いニュートリノ間の質量差と混合角は精度良く測られるようになってきたが、質量の根源である重い右巻きニュートリノを実験的には未だ発見されず、右巻きニュートリノの質量の大きさがいくらであり、またどのように質量を獲得したのかも明らかでない。

2. 研究の目的

その極端な小ささから、ニュートリノの質量獲得には他の素粒子とは異なる機構が働いていると考えられており、それを確立するには右巻きニュートリノの質量生成機構を解明することが不可欠である。我々は準備研究においてニュートリノに質量を与える B-L ゲージ対称性の破れに伴う相転移が一次相転移であるなら誘起される宇宙背景重力波が将来実験によって検出可能であることを明らかにした。本研究ではこれをさらに発展させて、初期宇宙で起こった右巻きニュートリノに質量を生成する真空の相転移により生成される重力波観測を通じて、重い右巻きニュートリノの質量を推定すると共に、右巻きニュートリノの質量生成機構を解明する。また、その枠組みの中で、宇宙の物質反物質非対称性生成の機構に与える影響や制限、整合性条件などを検討する。

3. 研究の方法

U(1)B-L 相互作用をする素粒子モデルのパラメーター空間全体における物理特性の理解を目的とし、真空構造と安定性の解析、および安定粒子が存在する場合の現象論的・宇宙論的制限の導出、一次相転移可能領域の同定を行う。これらの結果に基づいて、右巻きニュートリノ質量推定に向け右巻きニュートリノと B-L ヒッグス場との湯川相互作用の効果を完全に取り入れた相転移ダイナミクスと重力波スペクトルの計算、およびバリオン数非対称性の評価を行う。

4. 研究成果

準備研究では、最も有望な素粒子モデルであるバリオン数とレプトン数の差 (B-L) をゲージ化したモデルのスカラーポテンシャルにおける偽真空と真の真空との間にポテンシャル障壁を形成するためにヒッグス場を 2 種類導入していた。最小拡張での実現可能性を検討するため、1 種類のヒッグス場のみからなる系でゲージ相互作用による輻射補正の効果のみで大振幅の重力波を生成するのに必要な強い一次相転移が実現できる場合について、これが実現できるヒッグス場の結合定数の範囲を同定した。それに続いて、右巻きニュートリノ質量生成する湯川結合定数による輻射補正も考慮した有効ポテンシャルに基づいて、一次相転移によって誘起される宇宙背景重力波が DECIGO や Cosmic Explorer 等の将来実験によって検出可能であることを示した。右巻きニュートリノ質量生成を引き起こす相転移により生成される重力波が観測できるような相転移のスケールは、電弱スケールからペタ電子ボルトであり、質量を生成する湯川結合の効果はスペクトルに現れることを見出した。原理的には重力波スペクトルから右巻きニュートリノの質量の情報を抽出することが可能である。

これら重い右巻きニュートリノが重要な役割と果す物理過程に、宇宙の物質反物質非対称性の起源のレプトジェネシス機構による説明がある。テラ電子ボルトやペタ電子ボルトの質量の右巻きニュートリノでは、レプトジェネシスを機能させるのは困難である。例として Krauss らによって提唱されたモデルを検討し、右巻きニュートリノの世代数を 4 つに増やすというわずかな拡張によって、高々数百 GeV 程度の質量の右巻きニュートリノによって宇宙の物質反物質非対称性が説明できることを示した。右巻きニュートリノの質量が数百 GeV と軽いので、将来の加速器実験において検証可能である。

関連して、暗黒物質に関する研究を行った。B-L モデルでヒッグス場が 2 種類あるモデルにおいて真空期待値を展開しないヒッグス粒子は暗黒物質候補となる。暗黒物質の残存量、検出実験からの全ての制限を満たすパラメーター領域を明らかにしたが、実際には LHC 実験による制限が厳しく、非常に限られた場合しか整合的でないことが分かった。

ニュートリノ質量生成機構として右巻きニュートリノは有望であるが、対抗理論として電弱三重項のヒッグス場を導入するモデルがある。我々はバリオン数とレプトン数の差 (B-L) をゲージ理論に電弱三重項のヒッグス場を導入したモデルの最小モデルを構築した。B-L 荷の取り方は、3 世代全ての右巻きニュートリノ共通にとるスタンダードと、世代毎に異なるオルタナティブがある。オルタナティブの場合、従来の右巻きニュートリノによるシーソー機構が機能しないため、

三重項ヒッグスの存在が必然となる。さらに、このモデルでは暗黒物質を付加的な離散対称性を課すことなしに説明出来るという魅力を持つ。

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 7件 / うちオープンアクセス 14件）

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 103513
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 Asai Kento, Das Arindam, Li Jinmian, Nomura Takaaki, Seto Osamu	4. 巻 106
2. 論文標題 Chiral Z' in FASER, FASER2, DUNE, and ILC beam dump experiments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 95033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.095033	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, Shindou Tetsuo, Tsuyuki Takanao	4. 巻 105
2. 論文標題 Lower bounds on lepton flavor violating branching ratios in a radiative seesaw model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 95018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.095018	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 Seto Osamu, Toda Yo	4. 巻 104
2. 論文標題 Hubble tension in lepton asymmetric cosmology with an extra radiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 63019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.063019	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 Irie Yoko, Seto Osamu, Shindou Tetsuo	4. 巻 820
2. 論文標題 Lepton flavour violation in a radiative neutrino mass model with the asymmetric Yukawa structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136486 ~ 136486
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136486	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 Cho Wonsub, Choi Ki-Young, Seto Osamu	4. 巻 105
2. 論文標題 Sterile neutrino dark matter with dipole interaction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15016
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.015016	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 Okada Nobuchika, Seto Osamu, Uchida Hikaru	4. 巻 2021
2. 論文標題 Gravitational waves from breaking of an extra U(1) in SO(10) grand unification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033B01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab003	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 Seto Osamu, Shimomura Takashi	4. 巻 2021
2. 論文標題 Atomki anomaly in gauged U(1)R symmetric model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics volume	6. 最初と最後の頁 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2021)025	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 Okada Nobuchika, Seto Osamu	4. 巻 101
2. 論文標題 Inelastic extra U(1) charged scalar dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.023522	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 Hasegawa Taiki, Okada Nobuchika, Seto Osamu	4. 巻 99
2. 論文標題 Gravitational waves from the minimal gauged U(1)B?L model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 95039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.095039	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

[学会発表] 計17件(うち招待講演 6件/うち国際学会 13件)

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 Lepton flavor violation and DM constraints in a radiative seesaw model
3. 学会等名 Kagoshima Workshop on Particles, Fields and Strings 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 The type-II seesaw mechanism in alternative gauged $U(1)_X$ and dark sector
3. 学会等名 2023 Winter-II NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 尾形優仁、柿崎充、瀬戸 治
2. 発表標題 Dark radiation constraints on hidden gauge-axion system
3. 学会等名 16th International Workshop on the Dark Side of the Universe/2nd Gordon Godfrey Workshop on Astroparticle Physics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永島伸多郎、瀬戸 治、下村 崇
2. 発表標題 Gauged B-L interacting sterile neutrino dark matter revisited
3. 学会等名 7th IBS-ICTP-MultiDark Workshop (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 永島伸多郎、瀬戸 治、下村 崇
2. 発表標題 Gauged B-L interacting sterile neutrino dark matter revisited
3. 学会等名 COSMO 22 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田宣親、瀬戸 治
2. 発表標題 The type-II seesaw mechanism in alternative gauged U(1)X and dark sector
3. 学会等名 18th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田宣親、瀬戸 治
2. 発表標題 The type-II seesaw mechanism in alternative gauged U(1)X and cosmology
3. 学会等名 International Conference on Neutrinos and Dark Matter (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡田宣親、瀬戸 治
2. 発表標題 The type-II seesaw mechanism in alternative gauged U(1)X and cosmology
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬戸 治、戸田 陽
2. 発表標題 CMB and BBN constraints on the variation of the electron mass
3. 学会等名 2022 Summer NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Osamu Seto
2. 発表標題 Gravitational waves from neutrino mass generating phase transitions
3. 学会等名 Sixteenth Marcel Grossmann Meeting - MG16 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osamu Seto
2. 発表標題 Dark radiation constraints on hidden gauge-axion system
3. 学会等名 2022 winter NRF-JSPS Workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 Gravitational waves from a phase transition of an extra U(1) in SO(10) GUT
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 Gravitational waves from a phase transition of an extra U(1) in SO(10) GUT
3. 学会等名 「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 Probing for ALPino dark matter at beam dump experiments
3. 学会等名 16th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 瀬戸 治
2. 発表標題 Indirect detection for gauged sterile neutrino dark matter
3. 学会等名 KASHIWA DARK MATTER SYMPOSIUM 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Osamu Seto
2. 発表標題 Gravitational waves from minimal and nonminimal gauged U(1) phase transition
3. 学会等名 A topical conference on elementary particles, astrophysics, and cosmology (Miami 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Osamu Seto
2. 発表標題 Gravitational waves from minimal and nonminimal gauged U(1) phase transition
3. 学会等名 PACIFIC 2019 (招待講演) (国際学会)
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1件

国際研究集会	開催年
Miyazaki International Workshop on New Physics at Low Scale 2020	2020年～2020年

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			
米国	University of Alabama			
中国	Sichuan University			
韓国	Sungkyunkwan University	IBS	KAIST	