

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2014～2018

課題番号：26104009

研究課題名（和文）物質粒子の起源と宇宙進化の解明

研究課題名（英文）Unraveling the origin of matter and the evolution of the Universe

研究代表者

柳田 勉（Yanagida, Tsutomu）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：10125677

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 37,100,000円

研究成果の概要（和文）：本計画研究が挑む(a)小さいニュートリノ質量、(b)宇宙のバリオン数非対称性、(c)宇宙の暗黒物質の3つの謎に関して、素粒子模型・宇宙論・各種探索での検証といった多様な角度から理論的研究を行い、数多くの業績を挙げた(査読付論文141編、学会発表104件)。領域内の計画研究A01、A02がターゲットとするレプトン数の破れの探索に予言を与えたり、計画研究B01、B02がターゲットとする暗黒物質直接探索に指針を与える理論的成果も得られた。研究会や総括班会議を通して領域内の各計画研究との情報交換や交流を行った。以上のように研究成果、領域内連携などにおいて、新学術領域研究としての十分な進展を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子模型構築や宇宙論の観点からニュートリノ物理への予言を与える研究をいくつか行い、ニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊への予言を与えるなどした。またWIMP暗黒物質に関して特定の素粒子模型に依らない包括的な研究を行い、特に地下実験での直接探索の重要性や他の探索との相補的關係を明らかにした。その他、本計画研究の対象であるニュートリノ質量、宇宙のバリオン数非対称性、暗黒物質の3つの謎に関連した幅広い研究を多様な角度から行い、数多くの業績を挙げた。また、本科研費で雇用した外国人博士研究員が出身国でニュートリノ職を得るなど、国際交流・若手育成にも貢献した。

研究成果の概要（英文）：The puzzles of (a) the small neutrino mass, (b) the baryon asymmetry of the universe, and (c) the dark matter are the keys to reveal the history of the universe. In this theoretical research project, which is one of the projects in the Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas "Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research", we have worked on various topics related to above three puzzles, and published 141 papers and gave 104 talks in conferences and workshops. For example, we have given predictions on the neutrino physics, including the neutrinoless double beta decay that is searched for in the research projects A01 and A02 in this Innovative Area. We have also studied various phenomenological aspects on dark matter and clarified the roles of the direct search experiments conducted by the research projects B01 and B02 in this Innovative Area.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ニュートリノ 宇宙のバリオン数非対称性 暗黒物質 標準模型を超える物理 レプトジェネシス

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

宇宙の歴史をひもときその全容を理解するには、物質粒子の起源から宇宙進化への一連の理論的枠組みを構築することが不可欠である。特に、宇宙のバリオン数非対称性の起源や暗黒物質の正体・起源を矛盾なく統一的に説明するには、素粒子論の標準理論を超える物理を解明する必要がある。特に魅力的なシナリオとして、非常に重い右巻きニュートリノの導入がある。右巻きニュートリノの導入により (a) 小さいニュートリノ質量、(b) 宇宙のバリオン数非対称性の2つを同時に説明できる。このとき小さいニュートリノ質量はシーソー機構により説明されマヨラナタイプとなり、領域内の計画研究 A01, A02 がターゲットとするニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊を予言する。一方、宇宙のバリオン数非対称性は重い右巻きニュートリノの崩壊によるレプトジェネシス機構により説明される。また右巻きニュートリノの背後には大統一理論 (GUT) の考えがあり、GUT を考えるとヒッグス質量の安定性及び LEP でのゲージ結合定数の精密測定から超対称性理論 (SUSY) が魅力的である。したがって SUSY のニュートラリーノ暗黒物質は (間接的に) 右巻きニュートリノの物理とも関連している魅力的なシナリオである。ニュートラリーノ暗黒物質を含む WIMP 暗黒物質は領域内の計画研究 B01, B02 が行う暗黒物質直接探索の主要なターゲットである。

2. 研究の目的

本理論研究計画は、(a) 小さいニュートリノ質量、(b) 宇宙のバリオン数非対称性、(c) 宇宙の暗黒物質の3つの現象を素粒子の標準理論を超える理論の重要なヒントであると考え、これらを説明する素粒子宇宙像を構築することを目的とする。(a) (b) (c) それぞれを説明することの出来る素粒子模型・宇宙論シナリオの研究をこれまで以上に深化させる一方、これらを同時に説明出来る統一的なシナリオの構築も行う。また計画研究 A01, A02 がターゲットとするニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊探索や計画研究 B01, B02 が行う暗黒物質直接探索に対して、理論的研究によって予言や情報提供を行う。

3. 研究の方法

(a) 小さいニュートリノ質量、(b) 宇宙のバリオン数非対称性に関しては、上述した重い右巻きニュートリノの存在を新理論の基本的枠組の基礎と考え、素粒子模型、宇宙シナリオの構築などを行う。

(c) 暗黒物質に関しては、ニュートラリーノ暗黒物質を中心に、幅広く暗黒物質の可能性を追求し、模型構築および、直接探索、間接探索、コライダー探索など包括的な探索についての理論的研究を行う。

(a)~(c) を説明する素粒子宇宙像の構築において、1つの大きな柱が超対称性理論の枠組みである。8TeV の LHC 実験での結果を受けて超対称性理論に対する考え方が大きく変わってきており、それを踏まえて (a)~(c) を説明出来る新たな超対称素粒子模型を構築する。

また上記の高エネルギーのシーソー機構とは別の可能性として、低エネルギーの物理で (a)~(c) の3つの現象を同時に説明出来る輻射シーソー模型が研究されている。本計画では輻射シーソー模型の現象論も発展させる。

宇宙のバリオン密度と暗黒物質密度の比が何故 1:5 と非常に近いかという宇宙論の大問題 (Coincidence Problem) を解決する魅力的なシナリオとして、非対称暗黒物質 (Asymmetric Dark Matter, ADM) がある。本計画では非対称暗黒物質の研究も発展させる。

4. 研究成果

本計画研究が挑む (a) 小さいニュートリノ質量、(b) 宇宙のバリオン数非対称性、(c) 宇宙の暗黒物質の3つの謎に関して、素粒子模型・宇宙論・各種探索での検証といった多様な角度から理論的研究を行い、数多くの業績を挙げた (査読付論文 141 編, 学会発表 104 件)。以下にその一部を記述する。

(1) ニュートリノ質量と宇宙のバリオン数非対称性

- ・ [ニュートリノ質量] 柳田は、Occam's Razor の考えを Quark Mass Matrix に使い、Cabibbo Angle を説明することに成功した [arXiv:1601.04459]。中山は、離散フレーバー対称性によりニュートリノ混合の実験値を自然に説明する模型について、宇宙論的な問題を引き起こさない単純な模型の構築に成功した [arXiv:1810.05791]。また浜口は、 $U(1)_{[\mu-\tau]}$ 模型におけるニュートリノ質量行列を解析し、ニュートリノを伴わないダブルベータ崩壊などに対して予言を与えた [arXiv:1705.00419]。
- ・ [レプトジェネシス] 柳田は、Axion-like な場を使う新しいタイプのレプトジェネシス機構を発見した [arXiv:1412.2043]。また浜口、中山は IBS-CTPU の Bae 氏 (本科研究費で博士研究員として雇用後に栄転) と共にアフレルク・ダインレプトン数生成機構の研究を行い、ニュートリノ質量が Peccei-Quinn 場の値によって与えられる模型を提

- 案し、ニュートリノ質量が不自然に軽くなりすぎる解決した [arXiv:1612.02511]。
- ・ [インフレーションを含む拡張/輻射ニュートリノ質量模型] 中山、柳田は超対称カオティックインフレーションおよび湯川結合による再加熱を仮定すると、自動的にシーソー機構が働き、軽いニュートリノ質量および混合角が説明できることを示した [arXiv:1601.00192]。この場合右巻きスカラーニュートリノをインフラトンと同定することができ、最も軽いニュートリノは質量ゼロになることが予言される。またこの模型のパラメータを詳細に解析しニュートリノの CP 位相を予言した [arXiv:1705.04796]。末松は、拡張輻射ニュートリノ質量模型におけるインフレーションシナリオを提案し、非熱的レプトジェネシスに基づくバリオン数生成の定量的解析を行った [arXiv:1409.6889, 1509.05841, 1606.07884]。

(2) 暗黒物質

- ・ 松本は 'Well-Tempered WIMP' を、特定の素粒子模型に依らない手法で包括的に調べ、この範囲に入る WIMP 暗黒物質が、近い将来の直接探査のみで殆ど探査可能であることを定量的に示した [arXiv:1603.07387]。
- ・ 松本、柳田は、非常に軽い暗黒物質 ($< eV$) に注目し、太陽系における天体の運動を考えた際にこれら暗黒物質との散乱が摩擦として働くことを示し、これを利用した新たな暗黒物質の直接検出手法を提案した [arXiv:1801.02807]。
- ・ 中山、柳田は B-L 対称性にもとづいた軽いカイラルフェルミオン暗黒物質について、これが弦理論から予言されている弱い重力予想と相性が良いこと、さらにニュートリノとの混合により放出される X 線で観測できる可能性があることを指摘した [arXiv:1811.01755]。
- ・ 浜口、中山は、超対称性理論において、グラビティーノがアクシーノに崩壊する暗黒物質模型を提案し、ハッブル定数の観測値のずれを説明する可能性があることを示した [arXiv:1705.04521]。

(3) 統一素粒子宇宙シナリオの構築

- ・ 松本はニュートリノ物理と深く関係する非対称暗黒物質について研究を行い、模型の詳細に依らず、現在の宇宙でこの暗黒物質が保持する B-L 電荷が (宇宙のバリオン数が正となる表記で) 必ず正となる事を証明した [arXiv:1411.4014]。これは非対称暗黒物質の間接検出で必ず反ニュートリノを伴う事を意味する。
- ・ 博士研究員の K. J. Bae は natural SUSY と呼ばれる枠組み内でレプトジェネシスおよび mixed axion-Higgsino 暗黒物質のシナリオを考え、様々な宇宙論的制限を含めた包括的な解析を行った [arXiv:1510.00724]。
- ・ 浜口、中山は素粒子標準模型の問題である強い CP 問題、フレーバー階層性問題、暗黒物質、バリオン非対称性、ニュートリノ質量、インフレーションを同時に解決するフラクシオン模型を提案した [arXiv:1612.05492]。またこれに超対称性を課した超対称フラクシオン模型を提案し、この模型が上記に加えてゲージ階層性問題も解決し、さらにこの模型の枠内でインフレーションが実現可能であることを示した [arXiv:1802.07739]。
- ・ 末松は輻射シーソー模型に Peccei-Quinn 対称性を導入することにより、strong CP 問題、ニュートリノ質量、暗黒物質、バリオン数生成を同時に説明する模型を提案した [arXiv:1709.07607]。さらに拡張標準模型においてクォーク・レプトンの質量行列の構造と暗黒物質の存在を PQ 対称性に関連付ける可能性を指摘した [arXiv:1809.06563]。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 141 件) (うち査読付論文 141 件) 全て査読有

- 1) Inflation in a modified radiative seesaw model
By Romy H. S. Budhi, Shoichi Kashiwase, Daijiro Suematsu.
arXiv:1409.6889 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.90.113013.
Phys. Rev. D90 (2014) no.11, 113013.
- 2) Asymmetric dark matter in early Universe chemical equilibrium always leads to an antineutrino signal
By Hajime Fukuda, Shigeki Matsumoto, Satyanarayan Mukhopadhyay.
arXiv:1411.4014 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.92.013008.
Phys. Rev. D92 (2015) no.1, 013008.
- 3) Leptogenesis via Axion Oscillations after Inflation
By Alexander Kusenko, Kai Schmitz, Tsutomu T. Yanagida.
arXiv:1412.2043 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevLett.115.011302.
Phys. Rev. Lett. 115 (2015) no.1, 011302.
- 4) Inflation due to a nonminimal coupling of singlet scalars in the radiative seesaw

model

- By Romy H. S. Budhi, Shoichi Kashiwase, [Daijiro Suematsu](#).
arXiv:1509.05841 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.93.013022.
Phys.Rev. D93 (2016) no.1, 013022.
- 5) Leptogenesis scenarios for natural SUSY with mixed axion-higgsino dark matter
By [Kyu Jung Bae](#), Howard Baer, Hasan Serce, Yi-Fan Zhang.
arXiv:1510.00724 [hep-ph]. 10.1088/1475-7516/2016/01/012.
JCAP 1601 (2016) 012.
- 6) Viable Chaotic Inflation as a Source of Neutrino Masses and Leptogenesis
By [Kazunori Nakayama](#), Fuminobu Takahashi, [Tsutomu T. Yanagida](#).
arXiv:1601.00192 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2016.03.051.
Phys.Lett. B757 (2016) 32-38.
- 7) Occam's Razor in Quark Mass Matrices
By Morimitsu Tanimoto, [Tsutomu T. Yanagida](#).
arXiv:1601.04459 [hep-ph]. 10.1093/ptep/ptw024.
PTEP 2016 (2016) no.4, 043B03.
- 8) WIMP Dark Matter in a Well-Tempered Regime: A case study on Singlet-Doublets Fermionic WIMP
By Shankha Banerjee, [Shigeki Matsumoto](#), Kyohei Mukaida, Yue-Lin Sming Tsai.
arXiv:1603.07387 [hep-ph]. 10.1007/JHEP11(2016)070.
JHEP 1611 (2016) 070.
- 9) Leptogenesis in a neutrino mass model coupled with inflaton
By [Daijiro Suematsu](#).
arXiv:1606.07884 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2016.07.048.
Phys.Lett. B760 (2016) 538-543.
- 10) Affleck-Dine Leptogenesis with Varying Peccei-Quinn Scale
By [Kyu Jung Bae](#), Howard Baer, [Koichi Hamaguchi](#), [Kazunori Nakayama](#).
arXiv:1612.02511 [hep-ph]. 10.1007/JHEP02(2017)017.
JHEP 1702 (2017) 017.
- 11) Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model
By Yohei Ema, [Koichi Hamaguchi](#), Takeo Moroi, [Kazunori Nakayama](#).
arXiv:1612.05492 [hep-ph]. 10.1007/JHEP01(2017)096.
JHEP 1701 (2017) 096.
- 12) Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged U(1)[μ -tau] model
By Kento Asai, [Koichi Hamaguchi](#), Natsumi Nagata.
arXiv:1705.00419 [hep-ph]. 10.1140/epjc/s10052-017-5348-x.
Eur.Phys.J. C77 (2017) no.11, 763.
- 13) Gravitino/Axino as Decaying Dark Matter and Cosmological Tensions
By [Koichi Hamaguchi](#), [Kazunori Nakayama](#), Yong Tang.
arXiv:1705.04521 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2017.06.071.
Phys.Lett. B772 (2017) 415-419.
- 14) Neutrino CP phases from Sneutrino Chaotic Inflation
By [Kazunori Nakayama](#), Fuminobu Takahashi, [Tsutomu T. Yanagida](#).
arXiv:1705.04796 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2017.08.024.
Phys.Lett. B773 (2017) 179-185.
- 15) Possible roles of Peccei-Quinn symmetry in an effective low energy model
By [Daijiro Suematsu](#).
arXiv:1709.07607 [hep-ph]. 10.1103/PhysRevD.96.115004.
Phys.Rev. D96 (2017) no.11, 115004.
- 16) Direct Detection of Ultralight Dark Matter via Astronomical Ephemeris
By Hajime Fukuda, [Shigeki Matsumoto](#), [Tsutomu T. Yanagida](#).
arXiv:1801.02807 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2018.12.038.
Phys.Lett. B789 (2019) 220-227.
- 17) Supersymmetric Flaxion
By Yohei Ema, Daisuke Hagiwara, [Koichi Hamaguchi](#), Takeo Moroi, [Kazunori Nakayama](#).
arXiv:1802.07739 [hep-ph]. 10.1007/JHEP04(2018)094.
JHEP 1804 (2018) 094.
- 18) An extension of the SM based on effective Peccei-Quinn Symmetry
By [Daijiro Suematsu](#).
arXiv:1809.06563 [hep-ph]. 10.1140/epjc/s10052-018-6370-3.
Eur.Phys.J. C78 (2018) no.11, 881.
- 19) Flavon Stabilization in Models with Discrete Flavor Symmetry
By So Chigusa, Shinta Kasuya, [Kazunori Nakayama](#).

- arXiv:1810.05791 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2018.11.051.
Phys.Lett. B788 (2019) 494-499.
- 20) Revisiting the Number-Theory Dark Matter Scenario and the Weak Gravity Conjecture
By Kazunori Nakayama, Fuminobu Takahashi, Tsutomu T. Yanagida.
arXiv:1811.01755 [hep-ph]. 10.1016/j.physletb.2019.01.013.
Phys.Lett. B790 (2019) 218-224.
(他 121 件)

[学会発表] (計 104 件) (うち招待講演 95 件、国際学会 58 件)

- 招待講演: Tsutomu Yanagida, "Chaotic Inflation From Particle Physics," CosPA 2014, 8-12 December 2014, Auckland, New-Zealand.
- 招待講演: Tsutomu Yanagida, "Neutrino mass in the landscape of vacuum," CosPA 2016, 2016 年 11/28~12/2, シドニー大学, オーストラリア.
- 招待講演: Daijiro Suematsu, "Roles of Peccei-Quinn symmetry in an effective model for dark matter and neutrino mass," The XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018), 2018 年 6/4~6/9, Heidelberg, ドイツ.
- 招待講演: S. Matsumoto, "Estimating J-factors of dSphs for indirect dark matter detections," PLANCK 2017, 2017 年 5/22~5/27, University of Warsaw, ポーランド.
- 招待講演: Kazunori Nakayama, "Production of Purely Gravitational Dark Matter," COSMO2018, 2018 年 8/27~8/31, IBS, 韓国.
- 招待講演: Koichi Hamaguchi, "Flaxion: a minimal extension to solve puzzles in the standard model," Moriond Electroweak 2018, 2018 年 3/10~3/17, La Thuile, イタリア.
- 招待講演: 柳田勉, "ニュートリノの質量と CP の破れ, ダブルベータ", 日本物理学会 2015 年年次大会, 2015 年, 早稲田大学.
- 招待講演: 松本重貴, "素粒子物理学における指導原理としての暗黒物質探査", 日本物理学会 2019 年年次大会, 2019 年, 九州大学.
(他 96 件)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

アウトリーチ

- 松本重貴「ダークマターの正体は？」2017 年 4 月, 朝日カルチャーセンター新宿
- 松本重貴「暗黒物質の正体について」2014 年 11 月, 第 11 回 KAVLI IPMU/ICRR 合同一般講演会「宇宙を捉える-暗黒物質の正体に迫る-」東京大学駒場キャンパス
など

ホームページ

E01 研究成果 http://www.lowbg.org/ugnd/?page_id=859

受賞

- 中山和則、第 12 回(2017 年度)素粒子メダル奨励賞

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 松本 重貴
ローマ字氏名: (MATSUMOTO, shigeki)
所属研究機関名: 東京大学
部局名: カブリ数物連携宇宙研究機構
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 00451625

研究分担者氏名: 濱口 幸一
ローマ字氏名: (HAMAGUCHI, koichi)
所属研究機関名: 東京大学
部局名: 大学院理学系研究科(理学部)
職名: 准教授
研究者番号 (8 桁): 80431899

研究分担者氏名: 中山 和則

ローマ字氏名：(NAKAYAMA, kazunori)
所属研究機関名：東京大学
部局名：大学院理学系研究科(理学部)
職名：助教
研究者番号(8桁)：90596652

研究分担者氏名：末松 大二郎
ローマ字氏名：(SUEMATSU, daijiro)
所属研究機関名：金沢大学
部局名：数物科学系
職名：教授
研究者番号(8桁)：90206384

(2)研究協力者

研究協力者氏名：伊部 昌宏
ローマ字氏名：(IBE, masahiro)
所属研究機関名：東京大学
部局名：宇宙線研究所
職名：准教授
研究者番号(8桁)：50599008

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。