

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05410

研究課題名（和文）地上実験による宇宙暗黒物質と宇宙バリオン数の起源解明

研究課題名（英文）Search for the origins of dark matter and baryon asymmetry by direct search experiments

研究代表者

浅賀 岳彦（Asaka, Takehiko）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：70419993

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：右巻きニュートリノは、振動実験で観測された極微ニュートリノ質量をシーソー機構により説明する魅力的な素粒子である。本研究では、右巻きニュートリノの宇宙物理への関わり、暗黒物質およびバリオン数（物質反物質非対称性）の起源との関わりを検討した。第一の成果として、TeVスケール右巻きニュートリノによる共鳴レプトン数生成の実現可能性を示し、その実験的インパクトを導いた。また、宇宙バリオン数生成に必要なCP対称性の破れを導くモジュラー対称性に基づく理論を構築した。さらに、ニュートリノ物理の応用として、地球内部構造を探索するニュートリノトモグラフィー法を探究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、宇宙物質の起源の解明を目指しており、人類の基本的な疑問に答え、知のフロンティアを広げることにも貢献した。特に、梶田先生のノーベル賞で注目を集めたニュートリノ物理を記述する新しい理論体系を探究し、その実験的検証方法を提示した。さらに、ニュートリノ物理の素粒子物理以外の応用を検討し、地球内部構造解明を目指したニュートリノトモグラフィーについても研究を進めた。この成果は、物理分野だけでなく様々な分野に大きなインパクトを与えることができた。

研究成果の概要（英文）：We have investigated the impacts of right-handed neutrinos, which can lead to tiny neutrino masses observed in oscillation experiments through the seesaw mechanism, to the origins of dark matter and baryon asymmetry of the Universe. One of the outcomes is that we have shown that the resonant leptogenesis via TeV scale right-handed neutrinos is successful and its experimental implication to the neutrinoless double beta decays. Second, we have constructed the model for the baryon asymmetry based on the modular symmetry associated with the torus compactification in higher-dimensional theories. Finally, we have considered the neutrino tomography of the earth as one application of neutrino physics.

研究分野：素粒子物理、宇宙物理、ニュートリノ物理

キーワード：ニュートリノ 暗黒物質 宇宙物質反物質非対称性 右巻きニュートリノ

## 1. 研究開始当初の背景

2015年のノーベル物理学賞は、素粒子ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見に対して与えられた。素粒子物理の基本理論である標準模型ではニュートリノは質量を持たないため、新しい理論が存在することが確実である。一方、標準模型では宇宙暗黒物質、および宇宙バリオン数(物質と反物質の数の非対称性)の起源も説明できず、宇宙進化を理解するためにも、新しい素粒子理論が必要である。このような背景の下、世界中の研究者がこれらの問題を解決する理論を追い求め、研究を進めている。

2005年我々は、標準模型に3つの右巻きニュートリノを導入した“nuMSM”(neutrino Minimal Standard Model)模型を提唱した[1,2]。この模型は、ニュートリノ質量、暗黒物質、そして宇宙バリオン数の起源を同時に解決する魅力的な模型であり、広く研究者の注目を集めている。右巻きニュートリノは、振動実験から判明した極微のニュートリノ質量をシーソー機構により自然に説明する、魅力的な素粒子である。これまでの多くの議論では、右巻きニュートリノとして10の9乗 GeV以上の巨大な質量を持つ可能性が検討されてきた。その理由は、シーソー機構とともに、右巻きニュートリノ崩壊によるレプトン数生成機構により宇宙バリオン数を同時に説明できるからである。本模型の重要な特徴は、質量が約100 GeV以下の「軽い右巻きニュートリノ」を導入した点である。この場合、keVスケールの質量を持つ右巻きニュートリノが暗黒物質となり、残り2つは GeVスケールの質量を持ち、その世代間振動現象に起因して宇宙バリオン数を生成することができる。研究代表者はこれまでに、nuMSM模型の様々な現象について研究を進めてきた。

[1] T. Asaka, S. Blanchet and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B631 (2005) 151~156.

[2] T. Asaka and M. Shaposhnikov, Phys. Lett. B620 (2005) 17~26.

## 2. 研究の目的

ニュートリノ極微質量を説明する右巻きニュートリノによる暗黒物質、および宇宙バリオン数の起源解明について探究する。具体的に以下の二つの課題に取り組んだ。

### 課題(1) 右巻きニュートリノ暗黒物質の解明

暗黒物質の特定は、現代物理学の最重要課題の一つである。本研究では、ニュートリノ質量起源を説明する右巻きニュートリノが暗黒物質になる可能性を考え、地上実験による直接検証方法を探究する。この暗黒物質は小さな混合角により抑制された相互作用しか持たないため、その検出には大きな困難が伴う。

これまで、輻射崩壊から発生する X線を宇宙線観測により間接的に検証することが議論されてきた。また最近、暗黒物質シグナル発見の報告もあったが、現状は混沌とした状況である。この検出法の問題点は、天体中の暗黒物質の密度分布や信号近傍の背景事象が不確定な点である。よって、本手法により暗黒物質の確定的証拠を与えることは困難であると考えられる。また、近年トリチウムのベータ崩壊を用いた直接検出法が議論されているが、必要な感度は得られていないのが現状である。

本研究では、円形加速されたイオンからのニュートリノペアビーム[3]を用いた暗黒物質探索について研究する。このビームを用いる最大の利点は、これまでにない大強度のニュートリノ対生成を実現する点である。我々は既に論文[4]で、ニュートリノのCP対称性の検出、質量階層性の決定などが高い精度で実施できることを示した。本研究では、暗黒物質探索への応用を考察する。

[3] M. Yoshimura, Phys. Rev. D92, 073015 (2015).

[4] T. Asaka, M. Tanaka and M. Yoshimura, Phys. Lett. B760, 359 (2016).

### 課題(2) 右巻きニュートリノによる宇宙バリオン数生成の解明

本課題では、右巻きニュートリノによる宇宙バリオン数生成機構の解明を目指し、世代間振動現象、そしてそのCP対称性の破れを地上実験で検証する方法を提案する。

この振動現象の探索については、先行研究[6,7]がある。そこでは、B中間子崩壊により右巻きニュートリノを生成し、伝搬後電子、またはミュオン粒子への崩壊確率に現れる振動現象が議論された。そこで、これらの研究を進展させ、振動効果を正確に取り入れる基礎理論を定式化し、振動確率の評価法を確立する。

また、宇宙バリオン数生成に不可欠なCP対称性の破れに注目する。宇宙バリオン数生成に必要なとされるCP対称性の破れのパターンと強度を把握するとともに、加速器実験等での検証方法

について探究する。

[6] D. Boyanovsky, Phys. Rev. D90, 105024 (2014).

[7] G. Cvetič et al, Phys. Rev. D92, 013015 (2015).

### 3. 研究の方法

本研究は、研究代表者の浅賀（新潟大）、連携研究者の吉村太彦氏（岡山大）、研究協力者の石田裕之氏（NCTS、台湾（申請当時））の3人が中心となって実施する。さらに、新潟大学大学院生も研究に参画する。

浅賀と吉村氏が、課題(1)暗黒物質の解明について、浅賀と石田氏が課題(2)宇宙バリオン数生成の解明について、共同研究を並行して実施する。また、共同研究には適宜新潟大学大学院生が参加する。スカイプによる日常的な議論に加え、研究打合せにより直接討議する機会も設け、共同研究を遂行する計画を立てた。最終的には、個別の研究成果を有機的に融合し、ニュートリノ質量獲得機構および宇宙物質創成機構を説明する新しい素粒子理論の確立を目指す。

### 4. 研究成果

#### (1) 電弱スケール右巻きニュートリノによる共鳴レプトン数生成機構

これまで右巻きニュートリノの世代間振動現象に起因した宇宙バリオン数生成を想定していたが、LHC 加速器実験の進展を受け、電弱スケール右巻きニュートリノによる共鳴レプトン数生成機構について検討した。特に、TeV スケールの質量を持つ右巻きニュートリノに着目し、レプトン数生成において適切なフレーバー効果を取り入れ宇宙バリオン数生成量を求め、十分に観測値を再現できることを明らかにした。また、宇宙バリオン数の観測値を説明するためには、CP 対称性の破れのパターンと大きさに制限がつくことがわかり、そのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊への影響を提言した [8]。この研究成果は、LHC 実験での右巻きニュートリノ直接探索や二重ベータ崩壊実験に対して大きなインパクトを与えた。また、この研究をもとに、宇宙バリオン数生成のためには、CP 対称性の破れのパターンに大きな制限がつくことがわかり、その起源を探究する動機となった。これは以下に示すモジュラー対称性に基づく理論を検討する出発点となった。

[8] T. Asaka and T. Yoshida, JHEP09, 089 (2019).

#### (2) ニュートリノペアビームによるトモグラフィー

本研究では当初、円形加速されたイオンからのニュートリノペアビームを用いた暗黒物質の探索を検討していた。その最中、このペアビームを用いて地球内部の構造を探索するトモグラフィーが可能ではないかと着想した。そこで、地球内部の地殻中における空洞や質量密度が高い塊を探索するニュートリノトモグラフィーについて検討した [9]。検証原理は、地球内部をニュートリノが伝搬する際の物質効果による振動確率のエネルギー依存性の変化から、地球内部の物質密度のプロファイルを再構築することを目指した。特に、物質効果を摂動論的に取り扱い、ニュートリノ生成地点と検出地点を入れ替えた時物質密度のプロファイルが対称的な場合に有効な再構築の方法を提唱した。この研究に端を発し、ニュートリノトモグラフィーに関する研究を展開している。特に、現在地球コア部の探索を目指した研究を進めている。

[9] T. Asaka, H. Okui, M. Tanaka and M. Yoshimura, Phys. Lett. B785, 536-542 (2018).

#### (3) モジュラー対称性に基づくニュートリノ模型

上記(1)で述べたが、宇宙バリオン数を説明するニュートリノセクターの CP 対称性の破れのパターンは制限され、その痕跡を地上のニュートリノ実験により検証できる可能性が出てきた。そこで、ニュートリノ混合、および CP 対称性の破れを支配する対称性を探究した。特に、モジュラー対称性に着目した。この対称性は、時空次元を高次元に拡張した理論におけるトラスコンパクト化に付随した対称性であり、この対称性により物質の質量行列の構造が限定されるため、ニュートリノ混合や CP 対称性の破れのパターンと大きさに強い予言を与える。この魅力的な性質のため、近年活発に議論が進められている。このような状況の中、我々は世界に先駆けて、モジュラー対称性を持つ理論における宇宙バリオン数生成を検討した。特に、当時注目を集めていた A4 モジュラー対称性を持つ理論でのレプトン数生成量を計算し、地上実験で測定可能な CP 対称性の破れのシグナルとの相関を初めて提示した。物質が反物質より優勢である我々の宇宙を説明するために必要な CP 対称性の破れの領域を明らかにし、その領域が現在加速器ニュートリノ実験で指摘されている CP 対称性の破れの領域と矛盾しないことを示した。この成果 [10]

は、広く注目を集め、現在 41 回の引用を数えている。

我々は、このテーマについてさらに研究を進め、モジュラー対称性を持つ理論を探究した。特に、これらの理論は超対称性に基づく高次元理論に立脚するが、スーパーポテンシャルにおける物質の質量項はモジュラー対称性により限定することができるが、ケーラーポテンシャルによる物質場の規格化から、対称性では制御できない大きな補正が生じる可能性が指摘された。そこで、我々はこの問題を解決するために、補正が無視できるほど小さくできるように、余剰次元の体積が大きなコンパクト化を考え、その模型が予言するニュートリノ混合や CP 対称性の破れを導き出した [11]。

これら一連の研究は、ニュートリノ質量および宇宙バリオン数の起源を同時に説明する右巻きニュートリノに関する相互作用項、および質量項を対称性に基づき記述する可能性を示しており、非常に興味深い。よって、この対称性の存在を実験的に検証する手法を確立することは大変重要な問題となっており、次なる段階の課題として現在研究を進めている。

[10] T. Asaka, Y. Heo, T. H. Tatsuishi and T. Yoshida, JHEP01, 144 (2020).

[11] T. Asaka, Y. Heo and T. Yoshida, Phys. Lett. B811, 135956 (2020).

#### (4) 新しいバリオン数生成機構の提唱

本研究では、主に右巻きニュートリノのダイナミクスによりレプトン数を生成し、それを宇宙バリオン数に部分的に転換する機構を検討してきた。我々はさらに研究を進め、レプトン数生成を媒介せず、直接バリオン数を生成する新しい機構を提案した。このような機構では、生成に必要なバリオン数を破る相互作用により陽子の安定性が壊され、観測結果と矛盾してしまう困難があった。そこで我々は、陽子の安定性を保証するパリティ対称性を導入し、質量次元 9 をもつバリオン数を破る相互作用によるバリオン数生成機構を検討した。宇宙初期のインフレーションを実現するスカラー場などから生成されたクォークは、生成直後大きなエネルギーを持ち、散乱される前に世代間のフレーバー間振動現象を起こす。この振動における CP 対称性の破れを通じ、十分な宇宙バリオン数が生成されることを示した。この生成機構の特徴は、インフレーションの再加熱温度が電弱スケールより低くても働く点であり、多くの素粒子・宇宙模型で機能する。また、この生成機構は、高エネルギー加速器実験などで特徴的な反応を導くこと、さらに中性子・反中性子振動実験等でも検証可能性があることを指摘した。

[12] T. Asaka, H. Ishida and W. Yin, JHEP07, 174 (2020)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Asaka Takehiko, Heo Yongtae, Yoshida Takahiro	4. 巻 811
2. 論文標題 Lepton flavor model with modular A4 symmetry in large volume limit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135956 ~ 135956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135956	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 Asaka Takehiko, Ishida Hiroyuki, Yin Wen	4. 巻 2020
2. 論文標題 Direct baryogenesis in the broken phase	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 174
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2020)174	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 Asaka Takehiko, Ishida Hiroyuki, Tanaka Kazuki	4. 巻 103
2. 論文標題 Hiding neutrinoless double beta decay in the minimal seesaw mechanism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 15014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.015014	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 Asaka Takehiko, Okui Hisashi	4. 巻 814
2. 論文標題 Neutrino masses and gravitational wave background	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136074 ~ 136074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136074	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 Takehiko Asaka, Yongtae Heo, Takuya H. Tatsuishi, Takahiro Yoshida	4. 巻 2020
2. 論文標題 Modular A4 invariance and leptogenesis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 144(200)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2020)144	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 Takehiko Asaka, Takahiro Yoshida	4. 巻 2019
2. 論文標題 Resonant leptogenesis at TeV-scale and neutrinoless double beta decay	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 89(2019)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2019)089	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 Asaka Takehiko, Okui Hisashi, Tanaka Minoru, Yoshimura Motohiko	4. 巻 785
2. 論文標題 Tomography by neutrino pair beam	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 536 ~ 542
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.09.004	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asaka Takehiko, Eijima Shintaro, Ishida Hiroyuki, Minogawa Kosuke, Yoshii Tomoya	4. 巻 96
2. 論文標題 Initial condition for baryogenesis via neutrino oscillation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.083010	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13件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Theoretical aspects of neutrino physics: Particle Physics and Cosmology
3. 学会等名 The 3rd Univ. Ryukyus International Symposium of Theoretical and Computational Science, 20-22 March (2020), University of the Ryukyus, Okinawa, Japan. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Asaka
2. 発表標題 The nuMSM, Dark Matter, and Neutrino Masses
3. 学会等名 The 14th Rencontres du Vietnam, International Symposium on Neutrino Frontiers (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Asaka
2. 発表標題 Neutrino and Leptogenesis
3. 学会等名 Joint Symposium of TU-Dresden and Osaka University on Frontiers of Mathematics and Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 初期宇宙物理学の現状認識: L生成、暗黒物質、非加速器実験
3. 学会等名 質量階層性に対する新しい原理が導く 多彩な物理現象とプランクスケールの物理
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Asaka, M. Tanaka, K. Tsumura, M. Yoshimura
2. 発表標題 Precision electroweak shift of muonium hyperfine splitting
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Asaka
2. 発表標題 Origin of Baryon Asymmetry of the Universe
3. 学会等名 Toyama International Symposium on Physics at the Cosmic Frontier(招待講演)(国際学会)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 電弱スケールでの共鳴レプトン数生成機構
3. 学会等名 新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2017年領域研究会(招待講演)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Baryogenesis from right-handed neutrino oscillation
3. 学会等名 Gordon Research Conf (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Physics of the neutrino masses
3. 学会等名 The 13th Rencontres du Vietnam, Neutrinos(招待講演)(国際学会)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 On baryogenesis via neutrino oscillation
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 Sterile Neutrino as Dark Matter
3. 学会等名 研究会「宇宙観測と地上実験から探るダークマター研究の現状と展望」(招待講演)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 Right-handed neutrinos below the weak scale
3. 学会等名 大阪ワークショップ「地上実験で検証可能な新物理」(招待講演)(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Neutrinoless double beta decay and physics beyond the Standard Model
3. 学会等名 Korea-Japan symposium on non-accelerator nuclear and particle physics JPS 73rd Annual Meeting Meeting(招待講演)(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
研究協力者	石田 裕之  (Ishida Hiroyuki)		
連携研究者	吉村 太彦  (Yoshimura Motohiko)  (70108447)	岡山大学・理学部・特任教授   (15301)	

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			
スイス	スイス連邦工科大学ローザンヌ校			
台湾	National Center for Theoretical Sciences			
韓国	KAIST			