

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400249

研究課題名(和文) 宇宙物質創成機構の解明と新しい素粒子理論の構築

研究課題名(英文) Mechanism for generating baryonic and dark matter in the universe and particle physics model beyond the Standard Model

研究代表者

浅賀 岳彦 (ASAKA, Takehiko)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70419993

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：振動実験から明らかになったニュートリノ質量の起源を手がかりに新しい素粒子の理論的枠組みを探求した。特に、ニュートリノ質量、宇宙暗黒物質、および宇宙バリオン数を同時に説明する可能性を持つ右巻きニュートリノの物理を検討した。本研究では、質量が電弱スケール(100GeV程度)よりも軽い場合を考え、宇宙バリオン数を生成する機構、および右巻きニュートリノを地上実験での探索可能性について研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We have investigated physics beyond the Standard Model based on the origin of non-zero neutrino masses indicated by oscillation experiments. In particular, a framework in which neutrino masses, cosmic dark matter, and baryon asymmetry of the universe can be explained at the same time has been considered. We have focused on right-handed neutrinos which masses are lighter than the electroweak scale (about 100 GeV) and discussed the mechanism for generating the baryon asymmetry and the methods of the experimental searches for such particles.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ニュートリノ 宇宙暗黒物質 宇宙バリオン数

1. 研究開始当初の背景

2012年7月LHC実験においてHiggs粒子が発見され、標準模型の予言するすべての素粒子が実験的に確認された。理論的にも実験的にも大成功を収めた標準模型ではあるが、素粒子の最終理論ではないことははっきりしている。

20世紀終わりからスーパー神岡実験を含む様々な実験により、ニュートリノが微小の質量を持つことが確認された。標準模型ではニュートリノは質量を持たないため、模型の拡張が必要不可欠である。さらに、WMAP衛星による宇宙背景輻射の精密観測により、標準模型では説明がつかない宇宙物質の問題が確実となった。第一に、標準模型には暗黒物質の候補となる素粒子は含まれていない。第二に、宇宙バリオン物質と反物質との数の非対称性(宇宙バリオン数)の起源は標準模型では説明がつかないことがはっきりしている。

よって、ニュートリノ質量および宇宙物質の起源を説明する標準模型を超えた物理が存在することは確実であり、その新しい理論を解明することが現代物理学の最重要課題である。

2. 研究の目的

このような背景のもと本研究では、ニュートリノ質量の起源を手がかりに新しい素粒子理論の解明を目指す。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。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た。

この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。一番軽い右巻きニュートリノは暗黒物質の候補になり、残り2つの右巻きニュートリノ振動現象に起因して宇宙バリオン数が生成される。

本研究の目的は、我々のこれまでの業績を踏まえた上で、次の3つの研究課題を検討する。

- (1) 「軽い右巻きニュートリノ」による宇宙バリオン数の生成メカニズムの解明。
- (2) 暗黒物質の候補である「軽い右巻きニュートリノ」の生成メカニズムの解明。
- (3) 実験・観測による「軽い右巻きニュートリノ」探索による理論の検証。

これらの研究により、素粒子の新しい理論的枠組みを構築する。

3. 研究の方法

- (1) 宇宙バリオン数の起源の解明
nuMSM 模型では「軽い右巻きニュートリノ」

の振動現象に起因し宇宙バリオン数が生成される。この生成機構に関し申請者のグループは、右巻きニュートリノ密度行列の運動量依存性を考慮してバリオン数生成量を評価することに世界で初めて成功した。我々の先行研究により生成量の定量的評価方法は確立したが、その数値計算には非常に時間がかかる。そのため、これまでの研究では模型のパラメータの部分的領域のみで考察されていた。そこで本研究では、本格的にバリオン数生成量評価の数値計算を実行し、以下の点を明らかにする。

- 1 模型の全パラメータ空間で宇宙バリオン数生成量を評価し、現在の観測量を説明する領域を正確に求める。

- 2 バリオン数生成量の模型パラメータによる依存性、特にレプトンセクターにおけるCP対称性の破れの大きさと宇宙バリオン数の相関関係を明らかにする。

- 3 ニュートリノ振動実験によるCP対称性の破れやニュートリノレス二重ベータ崩壊によるレプトン数の破れの測定を用いた宇宙バリオン数の起源の検証を研究する。

(2) 暗黒物質の起源の解明

nuMSM 模型での暗黒物質の候補は「最も軽い右巻きニュートリノ」である。この暗黒物質の初期宇宙での生成方法について、最も単純な熱浴中の散乱過程による生成方法は現在の観測から実現が困難であることが指摘されている。そこで、他の生成機構を検討する必要がある。その上で、以下の項目について研究を行う。

- 1 宇宙背景輻射、元素合成、宇宙構造形成など宇宙観測、および「軽い右巻きニュートリノ」に対する探索実験からの模型への制限を総括的に調査する。

- 2 上記の研究結果を基に、観測と矛盾しない暗黒物質生成機構を探求する。

(3) 軽い右巻きニュートリノの実験検証

本研究ではさらに、この理論を確立するために必要な「軽い右巻きニュートリノ」の実験探索方法の確立を目指す。これまでの先行研究では一般的な探索方法が議論されてきたが、本研究では下記に挙げる具体的な実験観測装置を想定し、実験グループの研究者と連携して個別の詳細な探索方法を検討する。

- 1 T2K 実験などのニュートリノ長基線実験における検出方法の確立。特に、前方検出器中での崩壊から生じる荷電粒子を見いだす方法を研究する。

- 2 J-PARC 実験や SuperKEKB 実験における K、B 中間子崩壊を用いた検証方法の確立。

- 3 LHC 実験や ILC 実験などの高エネルギー衝突実験での検証方法の確立。

これらの研究から得られた成果を比較し「軽い右巻きニュートリノ」を検出するベストな方法を世界の実験グループに提示し、新しい素粒子理論の実験検証の道筋を明らかにする。

にする。

4. 研究成果

(1) 宇宙バリオン数の起源の解明

標準模型に新しく導入した右巻きニュートリノの世代間振動に起因した宇宙バリオン数生成機構を調べ、観測されているニュートリノ振動実験の結果および宇宙バリオン数を説明するために必要な右巻きニュートリノ質量の下限を求めた。

その値は、ニュートリノ質量が順階層の場合には 2.1 MeV、そして逆階層の倍には 0.7 MeV であることが判明した。先行研究と比較すると、より軽い領域でも十分なバリオン数下生成できることがわかり、そのためにはアクティブニュートリノの混合角 θ_{13} がゼロでない事が重要であることを指摘した。

さらに、これまでに行われてきた軽い右巻きニュートリノ探索実験からの制限、および宇宙元素合成からの制限を詳細に調べた。

これらの制限を課すと、許される右巻きニュートリノ質量領域は、順階層の場合には 163 MeV 以上、逆階層の場合には、188 ~ 269 MeV の範囲と 286 MeV 以上であることを示した。また逆階層の場合、軽い右巻きニュートリノの質量が 188 MeV 以上の時、CP 対称性を破るパラメータであるマヨラナ位相が取り得る値が制限されることを発見した。

そして、この位相への制限がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊率へ与える影響を議論した。崩壊率の予言は、右巻きニュートリノの質量に依存して変化することを指摘した。さらに、将来の二重ベータ崩壊探索実験および右巻きニュートリノ直接探索実験からマヨラナ位相の推定の可能性を議論した。

さらに上記の研究を進展させ、振動実験から指摘されているニュートリノ質量、および宇宙バリオン数を同時に説明できる右巻きニュートリノの性質を総括的に求めた。特に、GeV スケールの質量領域を考え、許される相互作用の強さ（具体的には右巻きニュートリノの混合角の大きさ）を求めた。この課題は、本研究の最終的な目標の一つとして設定していたものである。得られた結果を基に、将来の様々な実験計画での検証可能性を議論した。さらに、検証が比較的容易な混合角が大きい領域では、右巻きニュートリノの相互作用に独特のパターンが現れることを発見した。もし実験によりこれらのパターンが観測されると、ニュートリノに関する未知なる性質（質量階層性、CP 対称性の破れ、Dirac 粒子か Majorana 粒子か）に対して重要な情報が得られることを示した。

(2) 軽い右巻きニュートリノの実験検証

宇宙バリオン数の起源を説明する「軽い右巻きニュートリノ」が引き起こす、K 中間子

崩壊におけるレプトンユニバーサルリティの破れについて研究を行った。このレプトンユニバーサルリティとは、K 中間子の電子とニュートリノへの崩壊とミュオンとニュートリノへの崩壊が同じ弱いゲージ相互作用を通じて生じるため、その崩壊率の比が各粒子の質量により記述されることを示している。この量は、理論的にハドロンの不確定性を含まずに高い精度で予言でき、実験的にも現在精密測定が開始されており、新物理探索の強力な物理量となっている。

我々は、「軽い右巻きニュートリノ」によるレプトンユニバーサルリティのずれを詳細に調べた。特に、ニュートリノ質量と宇宙バリオン数を説明しつつ、実験探索からの制限と宇宙元素合成からの制限を回避する「軽い右巻きニュートリノ」の引き起こす破れの大きさを定量的に評価し、実験探索感度と比較した。その結果、現在 CERN や J-PARC などで行われている実験により、理論が予言する大きさの破れが検証され始めることを指摘した。

また一方で、 $\mu - e$ 転換を測定する COMET 実験装置を用いた右巻きニュートリノ探索についても議論した。特に、質量が 1 MeV よりも重く 100 MeV より軽い場合、右巻きニュートリノは、ミュオンの崩壊により生成され、さらに電子・陽電子対とニュートリノへ三体崩壊可能となる。我々は、この崩壊を検出器内で探索可能が議論し、探索感度を評価した

(3) 暗黒物質となる右巻きニュートリノ探索を目指した新しいニュートリノ実験の検討

本研究実施中に想定外に芽生えた課題は、新しいニュートリノ生成源の研究である。我々は、円形加速されたイオンからの大強度ニュートリノ対ビームについての研究を着手した。このニュートリノ対ビームは岡山大学の吉村氏らが提唱したものである。先行研究では、主にイオン電子の擬ベクトル相互作用による生成が議論されてきた。この場合、ニュートリノ対の片方の粒子を検出しただけでは、ニュートリノ振動は起こらないことが知られていた。

我々は、新たにイオン電子のベクトル相互作用による生成を検討した。その結果、ニュートリノ対の片方の粒子のみを検出した場合でも、ニュートリノ振動が生じることが判明した。そこで、このニュートリノ対ビームを用いた、ニュートリノの CP 対称性の破れの検証、質量階層性の特定、さらニュートリノ伝搬中の物質効果の影響を調べる方法を提唱した。

このニュートリノ対ビームによる暗黒物質となる右巻きニュートリノの探索手法の確立については、現在検討中である。

(4) 軽い右巻きニュートリノの新しい生成

過程

本研究成果の一つとして、右巻きニュートリノを含む高次元演算子の影響も上げられる。このような新しい相互作用が現れるとインフレーション宇宙後の再加熱時に右巻きニュートリノが微量生成される可能性がある。そこで、この付加的な生成過程による右巻きニュートリノが宇宙暗黒物質になる可能性を検討した。さらに宇宙バリオン数生成機構への影響も調べた。その結果、付加的な効果により宇宙バリオン数生成が加速される可能性がある事を示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 18 件)

1 T. Asaka and H. Ishida, “Lepton number violation by heavy Majorana neutrino in B decays”, Physics Letters B, (査読有), B763, (2016), 393-396 (4pp), doi:10.1016/j.physletb.2016.10.070

2 T. Asaka, S. Eijima and H. Ishida, “On neutrinoless double beta decay in the nuMSM”, Physics Letters B, (査読有), B762, (2016), 371-375 (5pp), doi:10.1016/j.physletb.2016.09.044

3 T. Asaka, M. Tanaka and M. Yoshimura, “Basic oscillation measurables in the neutrino pair beam”, Physics Letters B, (査読有), B760, (2016), 359-364 (6pp), doi:10.1016/j.physletb.2016.07.001

4 T. Asaka and A. Watanabe, “Probing heavy neutrinos in the COMET experiment”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (査読有), 2016 no.3, (2016), 033B03 (6pp), doi:10.1093/ptep/ptw011

5 T. Asaka and T. Tsuyuki, “Perturbativity in the seesaw mechanism”, Physics Letters B, (査読有), B753, (2016), 147-149 (3pp), doi:10.1016/j.physletb.2015.12.013

6 T. Asaka, S. Iso, H. Kawai, K. Kohri, T. Noumi and T. Terada, “Reinterpretation of the Starobinsky model”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (査読有), 2016 no.12, (2016), 123E01 (11pp), doi:10.1093/ptep/ptw161

7 S. Alekhin, W. Altmannshofer, T. Asaka et al (全 85 名), “A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case”, Reports on Progress

in Physics, (査読有), 79 no.12, (2016), 124201 (137pp), doi:10.1088/0034-4885/79/12/124201

8 T. Asaka and T. Tsuyuki, “Seesaw mechanism at electron-electron colliders”, Physical Review D, (査読有), D92, (2015), 094012 (9pp), doi:10.1103/PhysRevD.92.094012

9 T. Asaka, S. Eijima and K. Takeda, “Lepton Universality in the nuMSM”, Physics Letters B, (査読有), B742, (2015), 303-309 (7pp), doi:10.1016/j.physletb.2015.01.049

10 T. Asaka and S. Eijima, “Direct Search for Right-handed Neutrinos and Neutrinoless Double Beta Decay”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (査読有), 2013 no.11, (2013), 113B02 (10pp), doi:10.1093/ptep/ptt094

[学会発表](計 28 件)

1 浅賀岳彦, 石田裕之, “Lepton number violation by heavy Majorana neutrino in B decays”, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学豊中キャンパス (大阪府・大阪市)

2 T. Asaka, “Physics of right-handed neutrinos with GeV-scale masses”, The 3rd Toyama International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2017”, 2017 年 3 月 5 日, 富山大学五福キャンパス (富山県・富山市)

3 浅賀岳彦, 田中実, 吉村太彦, “Basic oscillation measurable in the neutrino pair beam”, 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 22 日, 宮崎大学木花キャンパス (宮崎県・宮崎市)

4 T. Asaka, “Search for right-handed neutrinos in the seesaw mechanism”, The international workshop “Particle Cosmology and beyond 2015”, 2015 年 11 月 17 日, 金沢アートホール (石川県・金沢市)

5 浅賀岳彦, “Physics of right-handed neutrinos”, 京都大学研究会 素粒子物理学の進展 2015, 2015 年 9 月 16 日, 京都大学基礎物理学研究所 (京都府・京都市)

6 T. Asaka, “Neutrino theory of everything?, dark matter, baryogenesis, neutrino masses”, The 25th International

Workshop on Weak Interactions and Neutrinos”, 2015年6月10日, MPIK, Heidelberg (Germany)

7 浅賀岳彦, 永島伸多郎, 石田裕之, “Neutrinoless double beta decay in the nuMSM”, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日, 早稲田大学早稲田キャンパス(東京都・新宿区)

8 T. Asaka, “Probing neutrino masses and cosmic baryon asymmetry at J-PARC”, The International Workshop on “Flavor of New Physics”, 2015年3月10日, Ibaraki Quantum Beam Research center (茨城県那珂郡東海村)

9 浅賀岳彦, “宇宙論におけるステライルニュートリノ”, 第28回ニュートリノ研究会「ニュートリノと非標準的枠組」, 2015年2月21日, 東京大学宇宙線研究所(千葉県・柏市)

10 T. Asaka, “Probing Baryon Asymmetry of the Universe by Lepton Universality”, The 2nd Toyama International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2015” (HPNP2015), 2015年2月14日, 富山大学五福キャンパス(富山県・富山市)

11 浅賀岳彦, 永島伸多郎, “A flavor symmetry for decaying dark matter”, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月20日, 佐賀大学本庄キャンパス(佐賀県・佐賀市)

12 T. Asaka, “Low-scale Baryogenesis”, The Xth Rencontres du Vietnam, Flavor Physics Conference”, 2014年8月1日, ICISE, Quy Nhon (Vietnam)

13 T. Asaka, “Overview of the nuMSM”, The First SHiP Workshop, 2014年6月10日, University of Zurich, Zurich (Switzerland)

14 T. Asaka, “Probing origins of neutrino masses and baryon asymmetry”, (招待講演), The 3rd KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology, 2013年11月15日, KIAS, Seoul (Korea)

15 浅賀岳彦, 永島伸多郎, 武田一浩, “How to probe the origins of neutrino masses and baryon asymmetry of the universe”, 日本物理学会2013年秋季大会, 2013年9月22日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県・高知市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅賀 岳彦 (TAKEHIKO ASAKA)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 70419993

(2) 研究分担者

谷本 盛光 (MORIMITSU TANIMOTO)
新潟大学・自然科学系・フェロー
研究者番号: 90108366

中野 博章 (HIROAKI NAKANO)
新潟大学・自然科学系・准教授
研究者番号: 60262424

渡邊 篤史 (ATSUSHI WATANABE)
京都産業大学・益川塾・研究員
研究者番号: 60567519