

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01898

研究課題名（和文）暗黒物質から探る標準模型を超えた新物理

研究課題名（英文）Physics beyond the Standard Model and dark matter

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） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：標準模型を超える新しい理論体系を探究することは、現代物理学の重要な課題の一つである。特に、我々の宇宙の成り立ちを説明するためには、標準模型では十分でないことが判明している。本課題では、宇宙物理に関わる問題として暗黒物質を取り上げ、近年指摘された素粒子ニュートリノの質量起源を手がかりに、新素粒子右巻きニュートリノが宇宙暗黒物質となる可能性を検討した。この粒子は、通常のクォークやレプトンと違い、粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子である。そこで、このマヨラナ性をいかに実験的に検証するかを研究した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質を構成する素粒子にはクォークとレプトンが存在する。これらの粒子はディラック粒子と呼ばれ、それぞれの粒子には質量と寿命は同じだが、電荷などが反対の反粒子が存在する。本研究で対象とした右巻きニュートリノは、粒子と反粒子が同一のマヨラナ粒子であり、これまでに実験的にその存在が確認されておらず、その探索に向けて様々な研究が進められている。本課題では、この自然界に存在する物質の根本的な性質に対する問いに答えるために、研究を進めた。特に、素粒子ニュートリノの質量獲得機構を説明する新しいマヨラナ粒子の実験的な探索に対して、重要な提言を行なった。理論研究ではあるが、実験分野にも大きな貢献を果たした。

研究成果の概要（英文）：Physics beyond the Standard Model (SM) is one of the most important subjects in particle physics. Especially, various astrophysical observations show that the SM cannot describe the history and the constituents of our Universe. In this project, we investigate the problem of dark matter in connection to the origin of neutrino masses confirmed by oscillation experiments. In particular, we consider the case when the right-handed neutrino, which can explain the non-zero masses of neutrinos, is the candidate of dark matter. This particle is so-called Majorana particle, being different from ordinary quarks and leptons, and the lepton number is violated in nature. We have discussed how to confirm this Majorana property by experiments.

研究分野：素粒子理論

キーワード：暗黒物質 ニュートリノ マヨラナ粒子

1. 研究開始当初の背景

現代物理学における最重要課題として、標準模型を超えた新しい理論体系を見出すことが挙げられる。この模型は約半世紀に渡り、様々な実験観測からその正しさが示されてきたが、その問題点も明確になってきた。その一つとして、この模型には宇宙観測から示されている暗黒物質の起源が説明できないことである。そして、振動実験から示された素粒子ニュートリノの質量を説明できないことである。これら素粒子物理および宇宙物理の問題を解決することは重要な課題となっている。

約20年前になるが、スイス連邦工科大学の Shaposhnikov 教授らと共に、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]。この模型では、上記の暗黒物質とニュートリノ質量の問題を解決するだけでなく、同時に宇宙バリオン数の問題も解決することができる。その模型の単純さも評価を受け、世界中から注目を集め、多くの引用がされ、様々な研究が進められてきた。

この模型の特徴は、理論に新たに導入する新粒子、「右巻きニュートリノ」の質量を電弱スケール(約100 GeV)以下と軽い粒子である点である。これまでの先行研究では、振動実験により測定されたニュートリノの極微質量を説明するため、巨大な質量を持つ右巻きニュートリノを導入し、シーソー機構と呼ばれる質量獲得機構を実現していた。また、その質量が非常に重く、10の9乗 GeV の場合、右巻きニュートリノの崩壊から宇宙バリオン数の問題もレプトン数生成機構により同時に解決できた。しかし、このような巨大な質量を持つ新粒子を実験的に検証することは不可能であり、また宇宙暗黒物質との関連は説明できなかった。

我々が提唱した模型では、質量が10 keV 程度の右巻きニュートリノが宇宙暗黒物質となり、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。さらに、右巻きニュートリノの湯川相互作用の強さを微弱とすることにより、シーソー機構を実現している。研究代表者は、この模型に対する研究を進め、右巻きニュートリノの実験検証、そして初期宇宙での現象に対して多角的な研究を進めてきた。

[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

本研究の目的は、宇宙暗黒物質そしてニュートリノ質量の起源を同時に説明する理論は何か？そして、その理論の正しさを実験的にいかに検証するか？ これらの問いに対する答えを見出すことである。そこで、右巻きニュートリノを新たに導入した理論を対象として、この粒子がどのような性質を持つかを明確化し、その実験探索の方法を探究する。

そこで本研究では、2つの課題を設定した。

- 課題 A : 右巻きニュートリノ暗黒物質の生成機構の解明
- 課題 B : 右巻きニュートリノ暗黒物質の地上実験での検証法の提示

課題 A では、右巻きニュートリノの質量や相互作用の振る舞いを明確に理解した上で、初期宇宙での生成量等を導き出すことを目的とした。課題 B では、右巻きニュートリノの加速器実験や宇宙観測での検証について、新しい探索手法の開発も含めて、探究することを目的とした。一方、これらの課題を進める中で、右巻きニュートリノの基本的な性質であるマヨラナ性が重要な役割を果たすことに気づき、このマヨラナ性の実験検証についても検討する課題として加えた。

3. 研究の方法

本研究は、研究代表者の浅賀岳彦が統括して進めた。本課題は、理論研究であり、多くの共同研究者と共に実施してきた。研究協力者として、nuMSM 模型と一緒に提唱した、スイス連邦工科大学の Shaposhnikov 教授を想定した。特に、右巻きニュートリノ暗黒物質の生成機構について共同研究を実施する予定であったが、コロナ禍の時期もあり、国内研究者の共同研究へ切り替えた。そこで、本課題により雇用した PD 研究員、および新潟大学の大学院生を研究協力者として、研究を進めてきた。

本課題を進めていく上で、現在富山県立大学に所属する石田裕之氏と議論する機会があり、共に右巻きニュートリノの性質把握に取り組んだ点は、当初想定していなかった良い点であった。石田氏とは、博士論文の指導など共同研究の経験があり、課題に対する観点も共通する部分も多かったため、研究が大いに進展した。

4. 研究成果

(1) 右巻きニュートリノの質量や相互作用のパターンの背後にある物理

本研究において、右巻きニュートリノの性質把握することが重要な課題である。特に、その質量の大きさ、そして相互作用の強さを把握することが鍵となる。振動実験が示したニュートリノ質量の大きさや世代間混合角だけでは、これらの性質を確定することができない。その中、Feruglio氏が興味深いアイデアを提案した。余剰次元をコンパクト化する際、余剰空間の幾何学的特性から導かれるモジュラー対称性が、質量や相互作用のパターンを決める指導原理となり得るとしてきた。そこで、我々は、余剰次元の体積がある程度大きい時に、A4モジュラー対称性が存在すると、振動実験を上手く再現するだけでなく、右巻きニュートリノの質量や相互作用に対して強い予言が得られ、特にニュートリノに関わるCP対称性の破れの大きさが高い精度で予言されることを示した [3]。この研究により、右巻きニュートリノの性質特定に向けた指導原理を得ることとなった。

[3] T. Asaka, Y. Heo and T. Yoshida, Phys. Lett. B 811, 135956 (2020)

(2) 右巻きニュートリノ暗黒物質の生成機構の解明

質量が10 keV程度の右巻きニュートリノは、宇宙暗黒物質の候補である。この粒子の初期宇宙での生成機構を明らかにし、その生成量の評価に取り組んだ。先行研究では、Boltzmann方程式が用いられてきたが、量子力学的な干渉効果などが取り入れられないなど、原理的な問題を抱えてきた。そこで、SchwingerとKeldyshによるClosed Time Path (CTP)形式に基づき、CTP上に定義されたGreen関数に対するKadanoff-Baym (KB)方程式を用いて非平衡系の時間発展を探究した。本研究では、簡単化のため、実スカラー場の理論を考え、自己相互作用の2次の効果を取り入れて解析を進めた。スカラー粒子の生成、消滅過程などの非平衡系の時間発展の詳細について数値解析を行なった。その結果、Boltzmann方程式では再現できない粒子数の変化などKB方程式特有の現象を確認した。さらに、運動量の異なるモードが生成され熱平衡へ至る時間の違いについて検討を進めた。その結果、高運動量モードの方が熱平衡化に時間がかかることを具体的に示した。この結果は、スカラー粒子間の散乱過程の反応率からの予想と合致しており、非平衡過程の発展を理解する上で重要な新しい知見を与えた。本結果は、指導学生の修士論文として発表し [4]、今後論文として発表する。

[4]松橋怜, 令和5年度新潟大学修士論文「Kadanoff-Baym方程式に基づく非平衡系の発展」

(3) 右巻きニュートリノ暗黒物質の実験検証

右巻きニュートリノ暗黒物質の実験検証を探究した。これまで、その輻射崩壊から発生するX線を宇宙線観測により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、この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。

そこで、地上実験での直接検証可能性を研究した。我々の天の川銀河に束縛されている暗黒物質が実験室内の物質と衝突した際、物質(原子核や電子)が得る反跳エネルギーをシグナルにした探索法を検討した。右巻きニュートリノ暗黒物質の質量が10 keV程度と軽いため、十分な大きさの反跳エネルギーを得るためには、原子中の原子核より束縛電子との散乱に着目する方がよい。そこで、暗黒物質反応による電子反跳エネルギーのスペクトルを求めた。Roothaan-Hartree-Fock近似に基づく原子中の電子分布を考慮して、He, Ne, Xe原子との散乱による反跳エネルギーのスペクトルを求めた。入射エネルギーが低く、標的原子の原子番号が大きくなると束縛の効果による自由電子と比較して散乱断面積が小さくなることが判明した。これらの結果をもとに、現行の暗黒物質探索実験での感度を導出した。これらについては現在結果をまとめ論文を投稿準備中である。

(4) 右巻きニュートリノのマヨラナ性の検証

本研究の対象である右巻きニュートリノは、通常のクォークやレプトンと異なり、マヨラナ粒子である。このマヨラナ性を、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊で検証することを探究した。特に、将来実験における実験結果を予想し、そこから導かれる右巻きニュートリノの質量や相互作用の強さへの予言を導いた。特に、実験結果から右巻きニュートリノの性質を導き出すためには、異なる核種の崩壊を測定することが鍵となることを示した。このテーマについては、一連の論文を発表した [5,6,7]。

[5] T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, Phys. Rev. D103, no.1, 015014 (2021)

[6] T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, PTEP 2021, no.6, 063B01 (2021)

[7] T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, JHEP 07, 062 (2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Asaka Takehiko, Ishida Hiroyuki, Tanaka Kazuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Neutrinoless double beta decays tell nature of right-handed neutrinos	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 62
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP07(2023)062	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, Tanaka Kazuki	4. 巻 2021
2. 論文標題 What if a specific neutrinoless double beta decay is absent?	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 063B01
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab046	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, 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） 10.1093/ptep/ptab046	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） 10.1103/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, 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.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 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) 10.1016/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 該当する

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

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 浅賀岳彦
2. 発表標題 バリオジェネシスと宇宙論
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Leptogenesis
3. 学会等名 Flavor Physics workshop 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 The nuMSM Neutrino masses, dark matter, and baryon asymmetry of the universe
3. 学会等名 素粒子現象論研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro Yoshida
2. 発表標題 Modular symmetry and baryon asymmetry of the universe
3. 学会等名 Recent development of flavor symmetry (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takehiko Asaka
2. 発表標題 Lepton Flavor Model with Modular Symmetry
3. 学会等名 APCTP WORKSHOP "Recently development of Non-Abelian discrete flavor symmetries" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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)		
研究協力者	吉田 貴裕 (Yoshida Takahiro)		
研究協力者	清水 勇介 (Shimizu Yusuke)		

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
---------	---------