

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25400250

研究課題名(和文)多成分暗黒物質で探る新物理の研究

研究課題名(英文)Multicomponent dark matter

研究代表者

青木 真由美 (Aoki, Mayumi)

金沢大学・数物科学系・准教授

研究者番号：70425601

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)：暗黒物質は、崩壊しないあるいは宇宙年齢よりも長い寿命をもつ安定粒子であり、その安定性は何らかの対称性によって保証されていると考えられる。最もシンプルな対称性としてはZ2対称性が考えられ、それにより一種類の暗黒物質が予言されるが、より大きな対称性を持つモデルでは、複数の暗黒物質が存在することが考えられる。本研究では、ニュートリノ質量を説明するモデルやスケール不変なモデルの枠組みにおいて、多成分暗黒物質が予言される可能性を議論した。さらに、多成分暗黒物質によって引き起こされる非標準的な暗黒物質の対消滅過程の定量的な解析を行い、それらが暗黒物質の残存量や検出可能性に大きく寄与していることを示した。

研究成果の概要(英文)：The origin of dark matter (DM) cannot be found within the framework of the standard model of elementary particles. A DM candidate can be made stable by an unbroken symmetry. The simplest possibility of such a symmetry is a parity, Z2. In that case, the lightest Z2-odd particle can be a DM candidate if it is a neutral, weakly interacting and massive particle. On the other hand, a multi-component DM system can be realized if the DM stabilizing symmetry is larger than Z2. In this work, we studied the multi-component DM system in some models. A multi-component DM system induces various DM annihilation processes that are different from the standard DM annihilation process. We showed that the relic abundance of DM can be very sensitive to these non-standard DM annihilation processes.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 暗黒物質

1. 研究開始当初の背景

宇宙観測により、宇宙のエネルギーのおよそ25%が光を出さない物質（暗黒物質）で占められていることがわかってきた。その正体としては非相対論的な粒子が有力候補であるが、素粒子の標準模型の枠内にはそれに相当する粒子が存在しないため、標準模型を拡張する必要がある。

暗黒物質は、崩壊しないあるいは宇宙年齢よりも長い寿命を持つ安定粒子であり、その安定性は何らかの対称性によって保証されていると考えられる。その最もシンプルな対称性としては Z_2 対称性が挙げられる。 Z_2 対称性のもとで奇 (-) である最も軽い粒子は崩壊出来ないため安定となり暗黒物質となりうる。

一方、理論が二つの Z_2 対称性 (Z_2, Z_2') を保有しているならば、最も軽い Z_2 奇かつ Z_2' 偶の (-, +) 粒子と最も軽い (+, -) 粒子の二種類の粒子が暗黒物質となる。さらに、(-, -) 粒子は (-, +) 粒子と (+, -) 粒子に崩壊可能だが、運動学的にこの崩壊が許されない場合は、最も軽い (-, -) 粒子も暗黒物質となり、三種類の暗黒物質粒子が存在することになる。このように、理論が複数の Z_2 対称性を持つ場合や、あるいは Z_4 対称性のようなより大きい対称性を持っている場合には、多成分暗黒物質が予想される。

暗黒物質が一種類しか存在しない場合には、暗黒物質は通常標準模型粒子へ対消滅する。しかし、二種類の暗黒物質が存在する場合には、重い暗黒物質が軽い暗黒物質に対消滅する過程 (DM Conversion) が存在する。さらに、暗黒物質粒子が三種類存在する場合には、異なる暗黒物質がさらに別の暗黒物質に対消滅する過程 (Semi-annihilation) も存在しうる。DM Conversion や Semi-annihilation の非標準消滅過程が寄与する場合には、暗黒物質の残存量や検証可能性の評価の仕方は、単成分暗黒物質のそれとは大きく異なることが考えられる。

一方、ニュートリノは 0.1eV 程度のわずかな質量を持つ粒子であるが、素粒子の標準理論ではニュートリノに質量を与えることができないため、標準模型の拡張が必要とされる。その一つである“輻射シーソー模型”は、量子補正によってループレベルでニュートリノに質量を与える模型であり、結合定数を強く抑制せずとも、TeV スケールの物理でニュートリノの微小質量を説明することが可能な模型である。輻射シーソー模型では、ツリーレベルでニュートリノ質量が生成されることを避けるため、しばしば離散対称性が課せられる。この対称性は同時に、暗黒物質の安定性を保証する可能性があることから、このような輻射シーソー模型は、標準模型では説明が出来ないニュートリノ質量と暗黒物質の二つの現象を同時に説明することが可能となる模型である。

2. 研究の目的

暗黒物質の正体は現在のところ不明であり、またその安定性がどのように保証されているかについても明らかにはなっていない。理論の持つ対称性によっては複数の暗黒物質粒子が存在する可能性があり、その場合には、暗黒物質の対消滅過程や探索実験および加速器実験におけるシグナルなどは、単成分暗黒物質の場合と大きく異なることが予想される。本研究の目的は、このような多成分暗黒物質がもたらす新たな現象を詳細に調べることによって、標準模型を超える新物理を探っていくことである。特にニュートリノ質量を説明しうる輻射シーソー模型など、他の問題解決にも繋がる模型の枠組みにおいて多成分暗黒物質を議論する。

3. 研究の方法

(1) 量子効果によってループレベルでニュートリノに質量を与える輻射シーソー模型では、ツリーレベルでニュートリノ質量が生成されるのを避けるため、しばしば模型に離散対称性が課せられる。本研究では、E. Ma 氏によって提案された輻射シーソー模型 (Ma 模型) の拡張として、二つの Z_2 対称性を伴う模型を提案し、暗黒物質粒子が二種類あるいは三種類存在する場合について議論を行った。

Ma 模型は、 Z_2 奇 (-) の右巻きニュートリノと真空期待値を持たない $SU(2)$ スカラー二重項 (イナートダブレットスカラー粒子) を標準模型に加えた模型であり、 Z_2 対称性によって、ツリーレベルのニュートリノ質量生成が禁止されている。暗黒物質としては、 Z_2 奇である右巻きニュートリノまたはイナートダブレットスカラー場に含まれる中性粒子のいずれかが考えられる。

本研究では、Ma 模型を拡張し、 $Z_2 \times Z_2$ 対称性を伴う2ループの輻射シーソー模型を提案した。暗黒物質となる粒子は、二種類あるいは三種類存在する。我々は、中性スカラー粒子が暗黒物質の一つとなる場合と、右巻きニュートリノが暗黒物質の一つとなる場合との二通りの可能性を議論した。

(2) 量子色力学に類似した Hidden セクターにおける非可換ゲージ理論の非摂動効果によってエネルギースケールが生成される模型において、暗黒物質の正体の解明とヒッグス粒子の質量起源の問題とが直結するスケール不変な理論を議論した。

(3) 冷たい暗黒物質モデルでは、銀河スケール以下の構造において、シミュレーションと観測との間にいくつかのアノマリーが存在

する(小スケール問題)。この小スケール問題を解決しうる可能性として、 Z_4 離散対称性を持つ模型を提案し、予言される多成分暗黒物質シナリオを議論した。

4. 研究成果

(1) Ma 模型を拡張し、 $Z_2 \times Z_2$ 対称性を持つ輻射シーソー模型を提案した。二つの Z_2 対称性により、ニュートリノ質量は2ループで生成され、二種類または三種類の暗黒物質の存在が予言される。我々は、暗黒物質の一つがイナートダブレットスカラー場の中性粒子である場合と右巻きニュートリノである場合について、それぞれ多成分暗黒物質による非標準的な対消滅過程の寄与を取り入れ、暗黒物質の残存量や直接および間接検出の可能性を議論した。

暗黒物質が、イナートダブレットスカラー場の中性成分とシングレットスカラー粒子の二種類となる二成分暗黒物質シナリオについて議論した。非標準的な対消滅過程としては DM Conversion が働くが、我々は両暗黒物質の質量差がそれほど大きくない場合には、軽い暗黒物質が重い暗黒物質に対消滅をする DM Conversion が残存量の決定に重要な役割を果たすことを示した。また、ヒッグス粒子が二光子に崩壊する過程の分岐比や、暗黒物質の二光子への対消滅過程の解析を行った。その結果、当時測定されていたヒッグス粒子の二光子崩壊における標準模型とのずれや、フェルミ衛星で兆候が見られた 135 GeV のガンマ線を説明できる可能性があることを示した。

右巻きニュートリノと二種類のシングレットスカラー粒子が暗黒物質となる三成分暗黒物質シナリオの可能性を議論した。暗黒物質の対消滅には DM Conversion や Semi-annihilation が寄与するが、観測されている残存量を説明するためには、特に Semi-annihilation が重要な役割を果たす場合があることを示した。また、太陽内部に捕獲された暗黒物質の Semi-annihilation によって生ずる単色ニュートリノのフラックスを計算し、暗黒物質の間接探索実験における検証可能性について議論した。

(2) 量子色力学に類似した Hidden セクターを持つスケール不変な理論において、多成分暗黒物質の物理を議論した。この模型では Hidden セクターにおける非可換ゲージ理論の非摂動効果によってエネルギースケールが生成される。また、Hidden セクターのフレーバー対称性によって、安定となる複数の暗黒物質候補が存在することから、それらの残存量を数値的に評価した。その結果、観測されている暗黒物質残存量と標準模型のエネルギー

スケールとの両方を説明できる可能性があることを示した。

(3) 標準模型に新たな $U(1)$ ゲージ対称性を課した模型を提案し、宇宙の小スケール問題を解決しうる多成分暗黒物質シナリオの可能性について議論した。この模型では、新たな $U(1)$ ゲージ対称性は、破れた後に Z_4 離散対称性を残し、それによって二種類のスカラー粒子が暗黒物質となる。これら二種類の暗黒物質の残存量や自己相互作用の大きさを解析した結果、一方の暗黒物質が 10 MeV-100 MeV 程度の軽い質量を持ち、さらにそれよりもわずかに重い暗黒光子二つに対消滅をする場合、軽い暗黒物質は小スケール問題を解決しうるほどの大きな自己相互作用を持つ可能性があることを示した。また、もう一方の暗黒物質は、100 GeV 程度の質量を持つことが数値解析により求められた。

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 10 件)

M. Aoki and T. Toma, Implications of Two-component Dark Matter Induced by Forbidden Channels and Thermal Freeze-out, JCAP1701, 042, 2017 [査読有]
DOI: [10.1088/1475-7516/2017/01/042](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/01/042)

M. Aoki, S. Kanemura, K. Sakurai and H. Sugiyama, Testing neutrino mass generation mechanisms from the lepton flavor violating decay of the Higgs boson, Phys. Lett. B 763, 352, 2016 [査読有]
DOI: [10.1016/j.physletb.2016.10.055](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.10.055)

Y. Ametani, M. Aoki, H. Goto and J. Kubo, Nambu-Goldstone Dark Matter in a Scale Invariant Bright Hidden Sector, Phys. Rev. D, 91, 11115007 (1-24), 2015 [査読有]
DOI: [10.1103/PhysRevD.91.1115007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.1115007)

M. Aoki, N. Haba and R. Takahashi, A model realizing inverse seesaw and resonant leptogenesis, PTEP, 11, 113B03, 2015 [査読有]
DOI: [10.1093/ptep/ptv149](https://doi.org/10.1093/ptep/ptv149)

M. Aoki, T. Toma and A. Vicente, Non-thermal Production of Minimal Dark Matter via Right-handed Neutrino Decay, JCAP1509, 063 (2015) [査読有]

DOI: [10.1088/1475-7516/2015/09/063](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2015/09/063)

M. Aoki, J. Kubo, H. Takano, Multicomponent Dark Matter in Radiative Seesaw Model and Monochromatic Neutrino Flux, Phys. Rev. D 90 (2014) 076011. [査読有]
DOI: [10.1103/PhysRevD.90.076011](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.076011)

M. Aoki, T. Toma, Impact of Semi-annihilation of Z3 Symmetric Dark Matter with Radiative Neutrino Masses, JCAP1409, 016 (2014). [査読有]
DOI: [10.1088/1475-7516/2014/09/016](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/09/016)

M. Aoki, S. Kanemura and H. Yokoya, Reconstruction of Inert Doublet Scalars at the International Linear Collider, Phys. Lett. B 725 (2013) 302 [査読有]
DOI: [10.1016/j.physletb.2013.07.011](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.07.011)

M. Aoki, J. Kubo and H. Takano, Two-loop radiative seesaw with multicomponent dark matter explaining the possible gamma excess in the Higgs boson decay and at the Fermi LAT, Phys. Rev. D87 (2013) 116001 [査読有]
DOI: [10.1103/PhysRevD.87.116001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.116001)

M. Aoki, S.Kanemura, M.Kikuchi and K.Yagyu, Radiative corrections to the Higgs boson couplings in the triplet model, Phys. Rev. D87 (2013) 015012 [査読有]
DOI: [10.1103/PhysRevD.87.015012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.015012)

〔学会発表〕(計 10 件)

M. Aoki, Implication of Two Component DM Induced by Forbidden Channels and Thermal Freeze-out, Focus Workshop on Particle Physics and Cosmology, 5-9 December 2016, Daejeon (Korea) (招待講演)

青木真由美、兼村晋哉、桜井巨大、杉山弘晃、レプトンフレーバーを破るヒッグス粒子の崩壊とニュートリノ質量生成機構、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 22 日、宮崎大学 (宮崎)

青木真由美、後藤弘光、久保治輔、隠れたカイラル相転移起源の重力波、日本物理学会、2016 年度秋季大会、2016 年 9 月 21 日、宮崎大学 (宮崎)

M. Aoki, Non-thermal Production of Minimal Dark Matter via Right-handed Neutrino Decay, the workshop “ Beyond the Standard Model in Okinawa 2016 ”, OIST (Okinawa), 2-7 March, 2016 (招待講演)

飴谷義高、青木真由美、後藤弘光、久保治輔、スケール不変な Bright Hidden Sector における Nambu-Goldstone Dark Matter、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 09 月 27 日、大阪市立大学 (大阪)

M. Aoki, Radiative Neutrino Mass and Dark Sector, Exploring the Dark Sector. KIAS, 16-20 March 2015, Seoul (Korea) (招待講演)

M. Aoki, Multicomponent dark matter in radiative seesaw model, FLASY2014, University of Sussex, 17-21 June 2014, Sussex (UK) (招待講演)

青木真由美、久保治輔、高野浩、暗黒物質と暗黒輻射を伴うニュートリノ質量生成機構、日本物理学会第 69 回年次大会、2014 年 03 月 27 日、東海大学 (神奈川)

M.Aoki, Radiative seesaw mechanism and multicomponent dark matter, High Energy Physics in the LHC Era, 16-20 Dec. 2013, Valparaiso (Chile) (招待講演)

青木真由美、M. Duerr, 久保治輔、M. Lindner、高野浩、2 ループ輻射シーソーモデルとバリオン数生成、2013 年日本物理学会秋季大会、高知大学 (高知) 2013 年 9 月 22 日

〔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〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
青木 真由美 (AOKI, Mayumi)

金沢大学・数物科学系・准教授
研究者番号：70425601