

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05412

研究課題名（和文）非標準的な消滅過程を伴う軽い暗黒物質による新物理探索

研究課題名（英文）Dark matter system with non-standard annihilation processes

研究代表者

青木 真由美（Aoki, Mayumi）

金沢大学・数物科学系・教授

研究者番号：70425601

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子標準模型に隠れた $U(1)$ ゲージ対称性を導入した模型において、二種類の粒子が暗黒物質となり、forbidden チャンネルと呼ばれる非標準的な消滅課程によって暗黒物質が熱的に残存するシナリオを議論した。MeV領域の軽い質量を持つ一方の暗黒物質は自己相互作用をおこなう。それによりこの模型では宇宙の小スケール問題が緩和される可能性があり、その場合の模型の検証方法を提案した。また、量子色力学に基づく隠れたセクターを伴う古典的スケール不変な理論の枠組みでも、複数の暗黒物質が存在しうる可能性を見出し、重力波観測で模型の検証が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質の解明は素粒子および宇宙物理における重要なテーマとなっている。暗黒物質の良い候補として幅広く研究されてきた電弱スケールの質量をもつWIMP暗黒物質は、直接探索実験によって、その質量領域に厳しい制限が課せられており、WIMPとは異なる性質の暗黒物質の探索が重要になってきている。本研究では、そのような暗黒物質の可能性を見出し、さらに小スケール問題を解く鍵を与えたことに非常に意義がある。さらにその検証方法を様々な角度から提案し、ハイパーカミオカンデや宇宙望遠鏡による重力波観測などの将来実験にインパクトを与えた。

研究成果の概要（英文）：We consider a model of two-component dark matter based on a hidden  $U(1)_D$  symmetry, in which relic densities of the dark matter are determined by forbidden channels and thermal freeze-out. A large self-interaction of the lighter dark matter component can be induced, which may solve the small scale problems of  $\Lambda$ CDM model. Detectabilities of these dark matter particles are explored.

We also investigate the testability of a scale invariant extension of the standard model using the GW background produced by the chiral phase transition in a strongly interacting QCD-like hidden sector, which triggers the electroweak phase transition.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論

## 1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の候補としては WIMP[Weak Interacting Massive Particle]と呼ばれる、弱い相互作用をする電弱スケールの質量を持った粒子が幅広く考えられてきた。なかでも宇宙の晴れ上がり時に質量エネルギーが運動エネルギーを上回っている冷たい暗黒物質は有力な候補であり、直接探索や間接探索、加速器実験による探索などさまざまな方法でその正体が探られている。一方、冷たい暗黒物質に対しては、銀河スケール以下の宇宙の小スケール構造において、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している。このアノマリーを説明する一つの可能性として、自己相互作用をおこなう軽い暗黒物質の存在が指摘されている。このような非標準的な相互作用をする暗黒物質はさまざまな特徴的なシグナルをもたらす可能性があり、それらを通じた新物理の解明が期待できる。

## 2. 研究の目的

現在の標準的な宇宙の構造形成理論である冷たい暗黒物質モデルでは、カスプコア問題などの宇宙の小スケール問題が存在する。本研究では、この問題を解く可能性として考えられている、MeV スケール程度の質量を持ち自己相互作用をおこなう暗黒物質について議論する。このような暗黒物質は、非標準的な対消滅過程を伴う暗黒物質シナリオにおいて実現できると考えられることから、その可能性を探っていく。さらに、古典的スケール不変性に基づく模型においても、非標準的な過程で残存する暗黒物質が存在するシナリオについて、その検証方法を追求する。

## 3. 研究の方法

暗黒セクターにおける対称性の破れによって、複数種類の暗黒物質が存在する模型に着目する。特に非標準的な対消滅過程によって暗黒物質が残存する場合を調べ、観測データを説明する暗黒物質シナリオを求める。さらに、直接探索や間接探索による暗黒物質の検証可能性や、対称性の破れによって生成される重力波を用いた模型の検証可能性などを探る。

## 4. 研究成果

- 本研究では、小スケール問題を解決する自己相互作用をおこなう暗黒物質が予言される模型として、標準模型に三つの複素スカラー場を加えた新たな  $U(1)D$  ゲージ対称性 ( $U(1)D$ ) を伴う模型を提案した。 $U(1)D$  対称性は自発的に破れ、 $Z_4$  離散対称性が残る。この離散対称性により、二つのスカラー粒子が暗黒物質となる。暗黒物質の残存量や直接探索、間接探索からの制限、また  $U(1)D$  対称性に付随するゲージボソンの質量や結合定数の制限などから、一方の暗黒物質は GeV スケールの質量を持つ複素スカラー粒子であり、もう一方は MeV スケールの質量を持ち、自己相互作用をする実スカラー粒子となるシナリオが可能であることがわかった。このシナリオでは、重い暗黒物質の対消滅によって自己相互作用をする軽い暗黒物質が生成される非標準的過程が存在する。銀河中心においてそのような過程で生成された暗黒物質はブーストされて地球に届き、水チェレンコフ検出器などで観測できることが期待される。そこで、将来の水チェレンコフ検出器であるハイパーカミオカンデによる自己相互作用暗黒物質の探索可能性を議論した。その結果、図 1 のように暗黒物質が検出器内の電子と非弾性散乱を行うことによって、特徴的な 3 リングイベントが観測される可能性があることを示した。

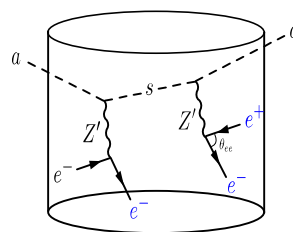


図 1 : 3 リングイベント

- 暗黒セクターが QCD ライクな構造をもつスケール不変な模型において暗黒物質の残存量などを議論した。暗黒セクターは、新たなスカラー場を通じて標準模型セクターと結合し、暗黒セクターにおける自発的対称性の破れに伴う複数の南部-ゴールドストーンボソンが暗黒物質の候補となる。暗黒物質の残存量には、暗黒物質が自身とは異なる暗黒物質に対消滅するような非標準的な対消滅過程が大きく寄与する場合がある。新たに導入したスカラー場と暗

黒物質との結合が小さい場合、直接探索や間接探索による暗黒物質の検証は難しいが、暗黒セクターの対称性の破れが一次相転移で実現される場合には、相転移で生成された重力波によってモデルの検証が期待できる。暗黒セクターにおける相転移の振る舞いを解析的に調べ、生成される重力波のスペクトルを見積もった結果、予言される重力波は将来の重力波実験で観測可能であることがわかった。さらに、このモデルの枠組みに右巻きニュートリノを新たに導入し、その量子補正によってヒッグス粒子の質量スケールを導く新たなシナリオにおいては、暗黒物質と他の粒子との相互作用が非常に弱いことから、通常の熱的残存ではなく非熱的残存が重要となる。右巻きニュートリノと暗黒物質、新スカラー場のボルツマン方程式を解くことによって暗黒物質の非熱的残存量を求め、観測値と矛盾しない残存量が得られることを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Aoki Mayumi, Kubo Jisuke, Yang Jinbo	4. 巻 2022
2. 論文標題 Inflation and dark matter after spontaneous Planck scale generation by hidden chiral symmetry breaking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 005 ~ 005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/01/005	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 Aoki Mayumi, Kaneko Daiki	4. 巻 2021
2. 論文標題 A hybrid seesaw model and hierarchical neutrino flavor structures based on $A_4$ symmetry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab008	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 Aoki Mayumi, Brdar Vedran, Kubo Jisuke	4. 巻 102
2. 論文標題 Heavy dark matter, neutrino masses, and Higgs naturalness from a strongly interacting hidden sector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.035026	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 Aoki Mayumi, Enomoto Kazuki, Kanemura Shinya	4. 巻 101
2. 論文標題 Probing charged lepton number violation via $IIWW$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.115019	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 Aoki Mayumi, Kubo Jisuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Gravitational waves from chiral phase transition in a conformally extended standard model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 001 ~ 001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/04/001	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 Mayumi Aoki, Katsuya Hashino, Daiki Kaneko, Shinya Kanemura, Mitsunori Kubota	4. 巻 5
2. 論文標題 Probing CP violating Higgs sectors via the precision measurement of coupling constants	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PTEP	6. 最初と最後の頁 053B02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz038	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 Aoki Mayumi, Toma Takashi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Boosted self-interacting dark matter in a multi-component dark matter model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 020 ~ 020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/10/020	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 Aoki Mayumi, Kaneko Daiki, Kubo Jisuke	4. 巻 5
2. 論文標題 Multicomponent Dark Matter in Radiative Seesaw Models	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Physics	6. 最初と最後の頁 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphy.2017.00053	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 Aoki Mayumi, Goto Hiromitsu, Kubo Jisuke	4. 巻 96
2. 論文標題 Gravitational waves from hidden QCD phase transition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 75045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.075045	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 -

[学会発表] 計11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 青木真由美, 榎本一輝, 兼村晋哉
2. 発表標題 ニュートリノ質量, 暗黒物質, バリオン数非対称性を同時に説明するモデルとその現象論
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木真由美, 久保治輔, 楊錦波
2. 発表標題 隠れたカイラル対称性の破れによるスケール生成, インフレーション, 暗黒物質
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青木真由美, Vedran Brdar, 久保治輔
2. 発表標題 隠れた強結合セクターによる重い暗黒物質
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木真由美, 小松崇宗, 澁谷紘人
2. 発表標題 2つのヒッグス2重項モデルにおける電弱スケールでの複数回相転移の可能性
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木真由美, 久保治輔
2. 発表標題 隠れたQCDライクセクターの相転移による重力波の検出可能性
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木真由美, 金子大毅
2. 発表標題 A4 対称性の下でのハイブリッドシーソー機構
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木真由美, 榎本一輝, 兼村晋哉
2. 発表標題 高次演算子によるレプトン数非保存過程の将来加速器実験を用いた検証
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木真由美, 榎本一輝, 兼村晋哉
2. 発表標題 将来加速器実験を用いたレプトン数非保存過程の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木真由美, 藤間崇
2. 発表標題 プーストされたSelf-interactingダークマターの検出可能性
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木真由美, 後藤弘光, 久保治輔
2. 発表標題 重力波による隠れた QCD セクターの検証可能性
3. 学会等名 日本物理学会 秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 青木真由美, 金子大毅, 久保治輔
2. 発表標題 暗黒輻射を伴う輻射シーソー機構
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
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
--	---------------------------	-----------------------	----

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