

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：13301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2022

課題番号：20K22349

研究課題名（和文）南部ゴールドストーン粒子の性質を持つ暗黒物質の理論的研究

研究課題名（英文）Theoretical research on Nambu-Goldstone dark matter

研究代表者

藤間 崇 (Toma, Takashi)

金沢大学・GS教育系・助教

研究者番号：60786325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,600,000円

研究成果の概要（和文）：現在、暗黒物質の直接検出実験は熱的暗黒物質に対して非常に厳しい制限を与えている。しかし擬-南部ゴールドストーン暗黒物質は、その制限の適用を逃れる面白い性質を持つ。当該研究では、先行研究において提案された最も単純な擬-南部ゴールドストーン暗黒物質モデルの理論的な拡張性及び実験的検証可能性について広く研究した。特に大統一理論やニュートリノ質量生成機構の枠組みに擬-南部ゴールドストーン暗黒物質を埋め込むことが可能であることを明らかにした。またそれらの拡張モデルは、将来ガンマ線観測実験を通じて今後の検証が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

熱的暗黒物質は、1970年代から有力な暗黒物質候補として広く研究されてきた。しかし、近年の高精度な探索実験を用いても発見に至らないことから、熱的暗黒物質の有望性が徐々に薄まりつつあり、その他の暗黒物質候補の可能性も提案されている。当該研究で得られた熱的暗黒物質の一種である擬-南部ゴールドストーン暗黒物質についての知見は、将来暗黒物質探索実験をどのように推進していくべきかを判断する材料となることから学術的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：The present direct detection experiments provide a very strong bound on thermal dark matter. However, the pseudo-Nambu-Goldstone dark matter model naturally evades the strong bound. In this research, we have investigated theoretical extensions of the simplest pseudo-Nambu-Goldstone dark matter model, and its experimental detectability. In particular, we have found that the simplest original model can be embedded in the framework of grand unified theories and accommodated with the small neutrino mass generation mechanism. Furthermore, it is anticipated that this kind of extended models can be tested through future gamma-ray observations.

研究分野：天体素粒子物理学

キーワード：暗黒物質 直接検出 暗黒物質生成機構 模型構築 大統一理論 ニュートリノ質量

## 1. 研究開始当初の背景

暗黒物質の正体を探ることは宇宙論のみならず、素粒子論的立場から見ても非常に重要である。それは現在までに確立されている素粒子標準模型において暗黒物質となる粒子が含まれておらず理論的にその存在を説明できないからである。これまでに様々な理論的な暗黒物質候補が提案されているが、その中でも初期宇宙において熱平衡状態から逸脱することにより残存量が決定される熱的暗黒物質は有力な候補の一つである。この種の実験的検証方法はいくつかあるが、特に暗黒物質粒子-原子核間の散乱過程を探索する直接検出実験は、他の検証方法に比べて不定性が少なく有望である。近年、様々な実験方法を用いた直接検出実験が世界各地で盛んにおこなわれており、検出感度が非常に高くなっている。しかし、現在までのところ暗黒物質シグナルの発見には至っておらず、それらの実験結果は熱的暗黒物質模型に対して非常に強い制限を与えている。

2017年に申請者を含む研究グループは、擬-南部ゴールドストーン粒子が広い意味での熱的暗黒物質候補となり、直接検出実験の強い制限を自然に回避できる模型を提案した。南部ゴールドストーン粒子は、理論が元々持っていた大域的対称性が自発的に破れたときに生じる質量ゼロの粒子であり、擬-南部ゴールドストーン粒子はその大域的対称性が近似的であることにより有限の質量を持つ粒子である。南部ゴールドストーン粒子の持つ相互作用は微分項で特徴付けられ、その結果、暗黒物質の速度が遅いときには原子核との散乱振幅が強く抑制され、直接検出の制限を自然に回避できるのである。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は擬-南部ゴールドストーン暗黒物質を我々の宇宙に存在する暗黒物質とみなしたときに、その物理的特性はどのようなものであるか、その背後にある理論は何か、さらにはどのようにして実験的に検証できるのかを探ることである。具体的には、擬-南部ゴールドストーン暗黒物質と大統一理論との整合性や初期宇宙での生成機構、それらの検証可能性を調べることで、擬-南部ゴールドストーン暗黒物質のこれまで以上に深い理解や暗黒物質の正体そのものに迫ることを目標とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 擬-南部ゴールドストーン暗黒物質模型の大統一理論への埋め込み

元々の擬-南部ゴールドストーン暗黒物質は標準模型の対称性の下で一重項であった。この動機付けから、一重項を含むSO(10)対称性に基づく大統一理論を考え、その中に擬-南部ゴールドストーン暗黒物質が自然に埋め込めるかを詳しく調べる。具体的には、新たにSO(10)の16多重項を導入し、その対称性が自発的に破れた後に、その中の一部の粒子が擬-南部ゴールドストーン暗黒物質となり得るのかを検証する。重要な点は、SO(10)対称性が破れた後に近似的な大域的対称性が残るかどうかどうかという疑問である。また、SO(10)という大きな対称性に基づくことから、非常に質量の重い新粒子も同時に導入される。これらの粒子が暗黒物質に如何なる影響を与えるかを考察する。特にそれらの粒子の存在によって暗黒物質が不安定化する場合がある。その場合、暗黒物質の寿命を正しく評価する必要がある。同時に、これら重い新粒子の質量は理論に含まれるゲージ結合定数の変化にも影響するため、ゲージ結合定数の統一と暗黒物質の寿命の間

の相互関係も確認する。

#### (2) フリーズイン機構による擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の生成

擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の全ての相互作用は真空期待値の逆数に比例するという性質を持つ。つまり真空期待値の取り方により暗黒物質の相互作用を容易にコントロールすることが可能である。一方で、微小なニュートリノ質量生成機構や暗黒物質の実験的観測の難しさから暗黒物質と通常物質の相互作用は非常に小さいことが示唆される。したがって、このような場合を仮定し、暗黒物質の生成に最も寄与する素粒子反応過程を抽出し、それらの散乱断面積や崩壊幅を計算する。さらにその結果をボルツマン方程式に加えて、解析的・数値的に解くことで暗黒物質の残存量を定量的に決定し、観測量と矛盾がないかを検証する。加えて、他の観測や実験によりモデルにどのような制限が与えられるか、また将来実験を用いてどこまで検証可能かを詳しく調べる。現在までに知られている暗黒物質候補と比較し、優れている点と劣っている点を評価する。

#### (3) 軽い媒介粒子を通じた擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の直接検出

先行研究では、擬-南部ゴールドストーン暗黒物質は、原子核との散乱振幅が強く抑制されることから、直接検出実験の強い制限を自然に満足することができた。それは逆に直接検出実験を用いての擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の検証は難しいことを意味する。しかし、媒介粒子の質量が十分軽ければ、暗黒物質粒子と原子核の間の散乱振幅に対する相殺機構は働かない可能性がある。この点について詳細に調べ、擬-南部ゴールドストーン暗黒物質が将来直接検出実験を通じて検証可能かどうかを調べる。

#### (4) マヨロンと結合する暗黒物質模型の構築とその現象論

擬-南部ゴールドストーン粒子の一種であるマヨロンと結合する暗黒物質の新模型の構築とその特徴を研究する。マヨロンはその性質から、ニュートリノへの崩壊が支配的になると考えられる。したがって、暗黒物質の対消滅によりマヨロンが生じ、その崩壊により生じるニュートリノがこの暗黒物質模型の特徴となる。そのスペクトルはどのようなものであるのか、また現在における実験的制限・将来実験での感度はどの程度であるのかを詳細に調べる。

### 4. 研究成果

#### (1) ニュートリノ質量生成と大統一理論への埋め込み

第一に $U(1)_{B-L}$ ゲージ対称性に基づく擬-南部ゴールドストーン暗黒物質模型の拡張を行った。これにより微小なニュートリノ質量をシーソー機構を通じて理論的に導出することを可能にした。さらにその拡張模型を $SO(10)$ 対称性に基づく大統一理論の枠組みに埋め込むことに成功した。解析の結果、この模型の整合性を保つためには、電弱スケールと大統一スケールの間に生じる「中間スケール」が $10^{11}$ GeV程度と比較的低い必要があることが分かった。これにより擬-南部ゴールドストーン暗黒物質が不安定となり、現在の宇宙線の観測的制限を満足するためには質量が $O(100)$ GeV以下に制限されることが分かった。さらに大統一理論の予言として陽子崩壊が引き起こされることから、陽子の寿命も評価し、十分長寿命となることを確認した。

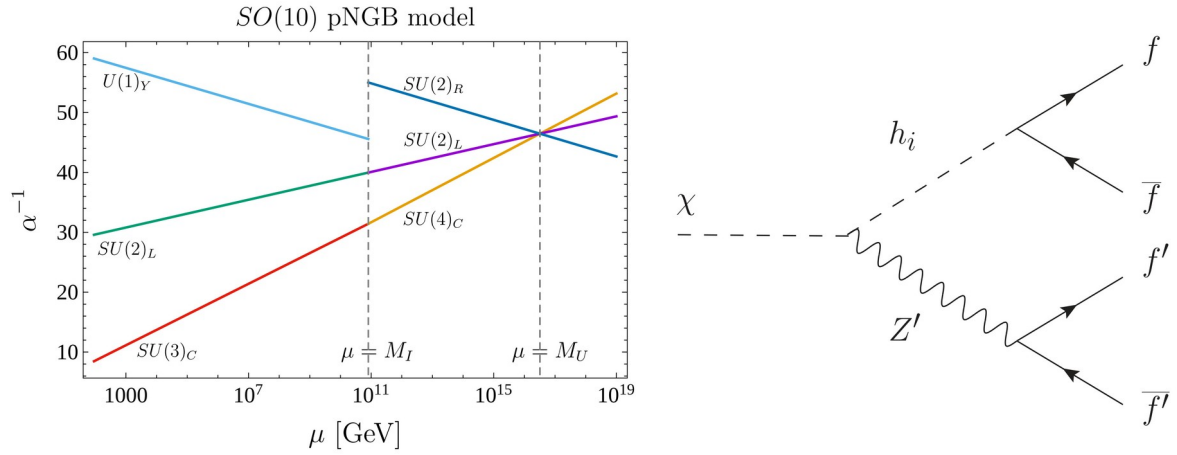


図1：大統一理論に埋め込んだときのゲージ結合定数が統一する様子（左図）。横軸 $\mu$ はエネルギースケール、縦軸はゲージ結合定数の逆数を表す。U(1)<sub>B-L</sub>拡張モデルにおける暗黒物質の崩壊過程（右図）。

### (2) フリーズイン機構による擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の生成とインフレーション

近似的な大域的対称性を自発的に破る真空期待値を大きな値と仮定することにより、擬-ゴールドストーン暗黒物質粒子と通常物質粒子の間の相互作用は非常に弱くなる。このとき、暗黒物質の残存量はフリーズイン機構による決定される。この点を詳細に議論し、現在の宇宙における残存量を詳細に評価した。さらに重力との非最小結合を仮定することで、宇宙最初期における宇宙のインフレーションも矛盾なく引き起こされる可能性を指摘し、理論的パラメータ領域を評価した。

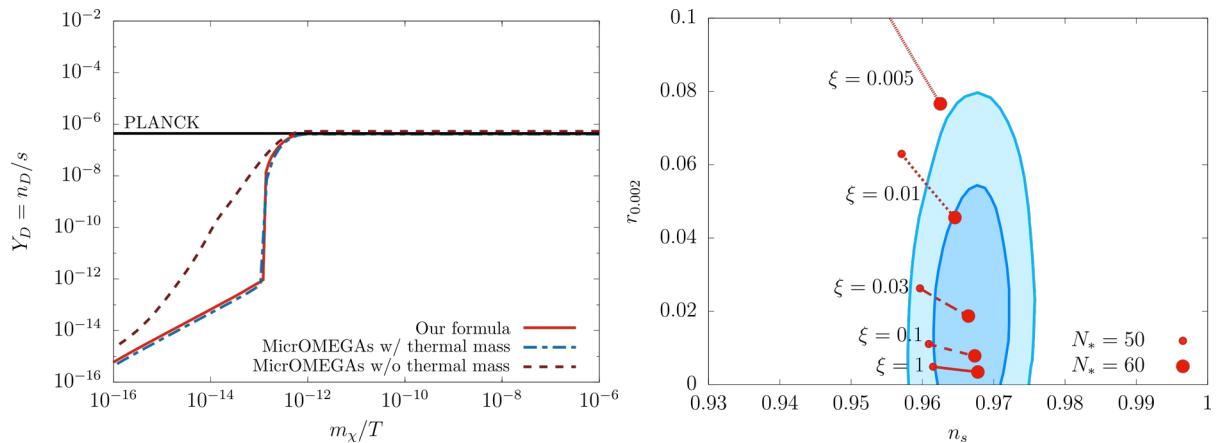
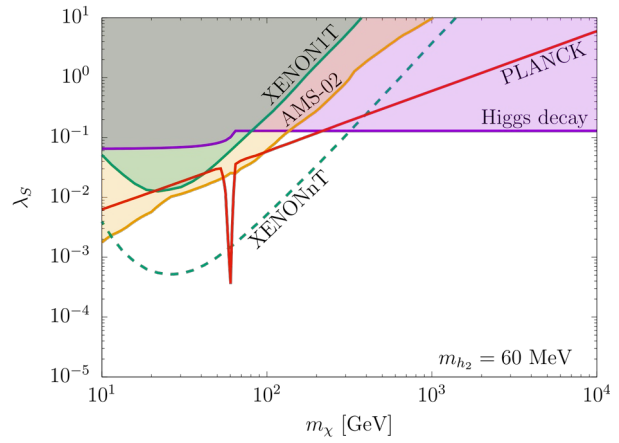


図2：初期宇宙での擬-南部ゴールドストーン暗黒物質のフリーズイン機構による生成（左図）横軸は暗黒物質質量を宇宙の温度で割った量であり、時間発展を意味する。縦軸は生成された暗黒物質の量を表す。インフレーションがPLANCKの観測（青い領域）と矛盾のないパラメータ領域を示す（右図）。 $\xi$ は重力との非最小結合定数の大きさを表す。

### (3) 軽い媒介粒子による擬-南部ゴールドストーン暗黒物質の直接検出

擬-南部ゴールドストーン暗黒物質と原子核の散乱を引き起こす媒介粒子の質量が暗黒物質質量に比べて軽い状況を想定し、この場合直接検出実験に対する感度がどのように変化するかを調べた。その結果、媒介粒子の質量がO(10) MeVスケール程度であれば、次世代直接検出実験 XENONnTを用いて検証が可能であることが分かった。さらに反跳エネルギースペクトルも通常の熱的暗黒物質の場合と異なることから、将来の模型判別のための知見を得ることができた。

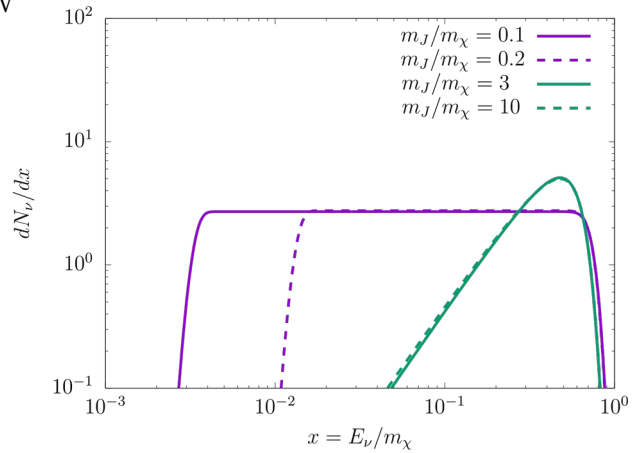
図3：横軸は暗黒物質質量、縦軸は暗黒物質の相互作用の大きさを表す。上部の色のついた領域は既に排除されている領域である。赤線は熱的生成により観測されている暗黒物質の残存量を満足することができるパラメータを示す。緑の点線は将来直接検出実験XENONnTによる感度を示す。



#### (4) マヨロンと結合する暗黒物質

擬-南部ゴールドストーン粒子の一種であるマヨロンと結合する暗黒物質の新モデルの構築とその特徴を研究した。このモデルの特徴として、暗黒物質の半対消滅過程を通じて加速された暗黒物質粒子とマヨロンが同時に生成されることが分かった。このとき生成されたマヨロンは主にニュートリノへ崩壊することから、特徴的ニュートリノスペクトルが予言される。このニュートリノシグナルは、暗黒物質質量がO(10)MeV程度であれば、次世代ニュートリノ観測実験ハイパーカミオカンデにおいて検証可能であることを明らかにした。

図4：暗黒物質の半対消滅過程から生じるニュートリノエネルギースペクトル。マヨロン質量と暗黒物質質量の比 $m_J/m_\chi$ に依存してスペクトルの形が大きく変化する。



#### (5) その他の研究成果

上記に加えて、ステライルニュートリノの質量に対する2ループレベルの繰り込み群方程式の導出、有限温度効果や電弱相転移の効果を取り入れたことによるステライルニュートリノ暗黒物質の残存量の詳細な計算、レプトンの電気双極子モーメントへのレインボー型ファインマン・ダイアグラムの計算、加速された暗黒物質粒子の検出可能性等に関する研究を行った。

以上の研究成果は全て査読付き学術雑誌に出版されている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 17件）

1. 著者名 Takumi Miyagi, Takashi Toma	4. 巻 07 027
2. 論文標題 Semi-annihilating dark matter coupled with Majorons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP07(2022)027	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 Hiroyuki Takahashi, Takashi Toma	4. 巻 11 064
2. 論文標題 Impact of first-order phase transitions on dark matter production in the scotogenic model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP11(2022)064	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 Asmaa Abada, Nicolas Bernal, Antonio E. Carcamo Hernandez, Sergey Kovalenko, Tessio B. de Melo, Takashi Toma	4. 巻 03 035
2. 論文標題 Phenomenological and cosmological implications of a scotogenic three-loop neutrino mass model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2023)035	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 Oleg Lebedev, Takashi Toma	4. 巻 05 108
2. 論文標題 Sterile neutrino dark matter: relativistic freeze-out	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2023)108	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 Takumi Miyagi and Takashi Toma	4. 巻 7
2. 論文標題 Semi-annihilating dark matter coupled with Majorons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP07(2022)027	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 Hiroyuki Takahashi and Takashi Toma	4. 巻 11
2. 論文標題 Impact of first-order phase transitions on dark matter production in the scotogenic model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP11(2022)064	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 Asmaa Abada, Nicolas Bernal, Antonio E. Carcamo Hernandez, Sergey Kovalenko, Tessio B. de Melo and Takashi Toma	4. 巻 3
2. 論文標題 Phenomenological and cosmological implications of a scotogenic three-loop neutrino mass model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2023)035	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 Motoko Fujiwara, Junji Hisano, Chihiro Kanai, Toma Takashi	4. 巻 114
2. 論文標題 Electric dipole moments in the extended scotogenic models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2021)114	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 Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koji Tsumura, Naoki Yamatsu	4. 巻 104
2. 論文標題 Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter model inspired by grand unification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.104.035011	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 Motoko Fujiwara, Junji Hisano, Takashi Toma	4. 巻 237
2. 論文標題 Vanishing or non-vanishing rainbow? Reduction formulas of electric dipole moment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2021)237	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 Yoshihiko Abe, Takashi Toma	4. 巻 822
2. 論文標題 Direct detection of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with light mediator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136639	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 Takashi Toma	4. 巻 105
2. 論文標題 Distinctive signals of boosted dark matter from its semiannihilation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.043007	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 Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koji Tsumura	4. 巻 05 057
2. 論文標題 Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from gauged U(1)B-L symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2020)057	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 James Cline, Matteo Puel, Takashi Toma	4. 巻 05 039
2. 論文標題 A little theory of everything, with heavy neutral leptons	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP05(2020)039	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 Valentina De Romeri, Dimitrios Karamitros, Oleg Lebedev, Takashi Toma	4. 巻 10 137
2. 論文標題 Neutrino dark matter and the Higgs portal: improved freeze-in analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2020)137	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 Alejandro Ibarra, Patrick Strobil, Takashi Toma	4. 巻 102 055011
2. 論文標題 Two-loop renormalization group equations for right-handed neutrino masses and phenomenological implications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.055011	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 Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koichi Yoshioka	4. 巻 03 130
2. 論文標題 Non-thermal production of pNGB dark matter and inflation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2021)130	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20件(うち招待講演 11件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 軽い媒介粒子を伴う 擬南部ゴールドストーン暗黒物質の直接検出
3. 学会等名 岡山理科大学と東邦大学のジョイントセミナー(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原素子, 久野純治, 藤間崇
2. 発表標題 電気双極子モーメント計算の簡略化
3. 学会等名 北陸信越地区素粒子論グループ合宿
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 暗黒物質と素粒子実験
3. 学会等名 次世代エネルギーフロンティア実験の検討会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮城拓実, 藤間崇
2. 発表標題 マヨロンと結合する半対消滅ダークマター
3. 学会等名 素粒子物理学の進展
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Toma
2. 発表標題 Dark matter models, properties and particle physics candidates
3. 学会等名 The 2nd DMNet International Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Toma
2. 発表標題 Ultra-violet completion of a pseudo-Nambu-Goldstone dark matter model
3. 学会等名 Seminar at University of Helsinki (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 擬-南部ゴールドストーン暗黒物質
3. 学会等名 新潟大学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 Distinctive signals of boosted dark matter from semi-annihilations
3. 学会等名 広島大学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 輻射ニュートリノ質量模型における荷電レプトンのEDM
3. 学会等名 北陸信越地区素粒子論グループ合宿
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshihiko Abe, Takashi Toma, Koji Tsumura, Naoki Yamatsu
2. 発表標題 Pseudo-Nambu-Goldstone Dark Matter Model Inspired by Grand Unification
3. 学会等名 The XXVIIIth International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原素子, 久野純治, 金井千浩, 藤間崇
2. 発表標題 輻射ニュートリノ質量模型における荷電レプトンのEDM
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 Takashi Toma
2. 発表標題 Direct detection of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with light mediator
3. 学会等名 DM + nu Forum at TDLI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Toma
2. 発表標題 Distinctive signals of boosted dark matter from semi-annihilations
3. 学会等名 Dark Matter Working Group (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Toma
2. 発表標題 Direct detection of pseudo-Nambu-Goldstone dark matter with light mediator
3. 学会等名 Seminar at Chung-Ang University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Toma
2. 発表標題 Pseudo-Nambu-Goldstone boson as thermal dark matter
3. 学会等名 Kashiwa dark matter symposium 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤間崇
2. 発表標題 軽い媒介粒子を伴う擬南部ゴールドストーン暗黒物質の直接検出
3. 学会等名 新ヒッグス勉強会 第32回定例会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿部慶彦, 藤間崇
2. 発表標題 軽い媒介粒子を伴う擬南部ゴールドストーン暗黒物質の直接検出
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Alejandro Ibarra, Patrick Strobil, 藤間崇
2. 発表標題 右巻きニュートリノ質量の輻射補正
3. 学会等名 素粒子物理学の進展
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Alejandro Ibarra, Patrick Strobil, 藤間 崇
2. 発表標題 右巻きニュートリノ質量に対する輻射補正
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 Valentina De Romeri, Dimitrios Karamitros, Oleg Lebedev, 藤間崇
2. 発表標題 ステライルニュートリノダークマターの ヒッグスポータル生成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021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			
フランス	IJCLab	CNRS		
アラブ首長国連邦	New York University Abu Dhabi			
チリ	Universidad Tecnica Federico Santa Maria	SAPHIR	Universidad Andres Bello	他1機関
ブラジル	Universidade Federal de Pelota			
カナダ	McGill University			
ドイツ	Technical University of Munich			
フィンランド	University of Helsinki			
スペイン	University of Valencia			
ポーランド	National Centre for Nuclear Research			