

令和 5 年 4 月 28 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13910

研究課題名（和文）超弦理論から示唆される初期宇宙の進化

研究課題名（英文）Evolution of the early Universe based on string theory

研究代表者

山田 将樹（Yamada, Masaki）

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：20871106

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：初期の宇宙は高温高密度な状態になっており、現在知られている素粒子の標準模型が適用可能でない可能性がある。実際、標準模型を用いてもインフレーションやバリオン数の生成を行うことができず、それを越えた新しい物理が必要である。本研究では、超弦理論などから示唆されるような素粒子の有効理論を駆使して、初期宇宙においてインフレーションやバリオン数の生成がどのように実現されるかを研究し、現在の宇宙観測と無矛盾な宇宙論的シナリオが実現可能であるかを議論した。また、そのなかで将来の実験や観測に対する予言を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子の標準模型の拡張として有力な、アクシオン、余剰次元、CP対称なモデル、pure Yang-Mills理論といったモデルに注目し、それらが宇宙におけるダークマターやバリオン数の生成機構とどういった関連があるのかを議論した。また、それらのモデルは、荷電レプトンフレーバー対称性の破れ、強いCP位相、重力波などの将来的な観測実験によって検証が可能であることを明らかにした。これにより、将来的な素粒子や宇宙の実験観測によって、高エネルギーの素粒子模型の情報や宇宙の成り立ちについての理解が深まることを示した。

研究成果の概要（英文）：The early universe is in a high-temperature, high-density state, and the Standard Model of particle physics may not be applicable. In fact, the Standard Model cannot be used to realize inflation and produce baryon asymmetry, and new physics beyond the Standard Model is necessary. In this study, I investigated how inflation and the production of baryon asymmetry are realized in the early universe by making use of effective theories of elementary physics, such as those suggested by the string theory, and discussed the feasibility of a cosmological scenario that is consistent with current cosmological observations. I also made predictions for future experiments and observations.

研究分野：素粒子論的宇宙論

キーワード：ダークマター 物質反物質非対称性 重力波 インフレーション

## 1. 研究開始当初の背景

Large Hadron Collider (LHC) によって標準模型を超えた物理の兆候は未だに現れておらず、加速器による新物理の発見は厳しくなっている。しかし一方で宇宙初期は高温高密度であり、高エネルギーの素粒子理論によって様々な現象が記述される。このため、宇宙の未解決問題を解き明かすことによって、素粒子標準模型を超えた物理の情報を得ることができる。

ビッグバン標準宇宙論と軽元素の観測によれば、ビッグバン元素合成時期の宇宙のバリオン数密度は、光子数密度との比にして  $10^{-10}$  程度であることが知られている。一方で、インフレーション理論は地平線問題や平坦性問題などの宇宙論的な諸問題の解決や、宇宙の構造形成の種の生成などの成功を収め、観測的にも確かな理論である。しかし、このインフレーションはバリオン数を含めたあらゆる数密度を薄めてしまう。このため、インフレーションからビッグバン元素合成までの時期に、バリオン数の生成が起こるシナリオが必要である。このようなインフレーションの機構およびバリオン数の生成機構というのはいまだに明らかになっていない。

## 2. 研究の目的

以上のような現象が起きる初期宇宙は高エネルギーの物理学によって記述されるため、物理学の究極の理論と考えられている超弦理論やその低エネルギー有効理論を用いた解析を行うことが必須となる。そこで本研究では、超弦理論から示唆されている有効理論を用いて、インフレーションおよびその後のバリオン数の生成までの宇宙の熱史を包括的に考え、無矛盾な宇宙論シナリオを構築することを目的とする。また、重力波などの様々な観測によるこの宇宙論シナリオの検証可能性についても議論する。

このように、初期宇宙が高エネルギー物理学によって記述されることを利用して、理論的に整合性が取れつつ現在の観測と矛盾しない宇宙を要求することで、我々の宇宙を超弦理論のような究極理論を検証するこれ以上ない広大な実験場として活用することができる。

## 3. 研究の方法

超弦理論の低エネルギー有効理論においては、軽くて相互作用が弱くゲージ場と量子アノマリーを通じた相互作用を持つスカラー場が現れることが知られている。これを一般にアクシオンと呼ぶ。これは、素粒子標準模型の強い CP 問題を解決するためにも導入されることがある。このような軽いスカラー場は簡単に動くことができるため、初期宇宙において非自明なダイナミクスを持つことがある。たとえば空間に一樣なコヒーレント振動のエネルギーは物質のエネルギーのように振る舞うため、暗黒物質の候補となっている。また、このスカラー場を用いてインフレーションを実現するモデルも提案されている。さらに、アクシオンは擬南部-ゴールドストーンボソンとして振る舞うため、一般にカレントと相互作用をする。これらの性質によって引き起こされる初期宇宙の非自明なダイナミクスを明らかにし、それがどのように観測量と関係しているかを議論する。

超弦理論は超対称性とよばれるフェルミオンとボソンを入れ替える対称性を持つため、その低エネルギー有効理論も同様の対称性を持つ。このとき、クォークの超対称性パートナーであるスクォークが導入され、そのダイナミクスを通してバリオン数を生成する機構が提案されており、アフレックダイク機構と呼ばれている。このアフレックダイク機構は比較的低い再加熱温度を必要とするが、この性質と相性の良いダークマターのモデルや強い CP 問題を解決する機構を検討し、全ての宇宙論の問題を解決する矛盾のない有効理論を探究する。

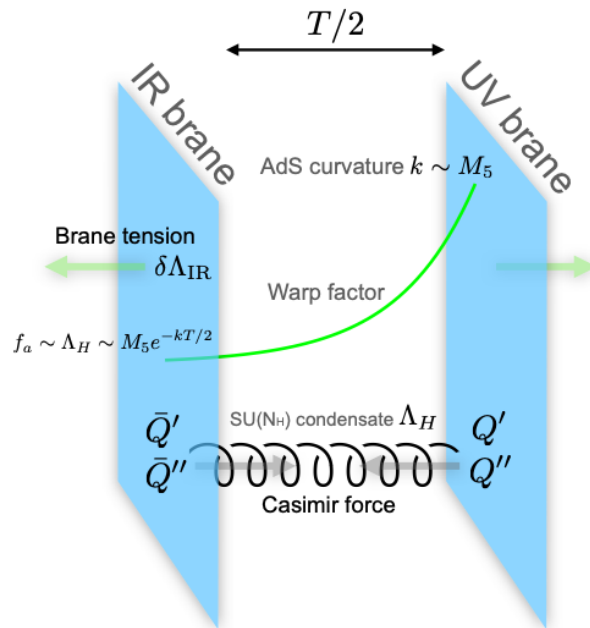
## 4. 研究成果

### (1) 強い CP 問題を解決する QCD アクシオンに関する研究

標準理論の強い CP 問題を解決するための有力な機構として Peccei-Quinn 機構が考えられている。しかし、この機構を実現するためには量子的には破れているものの古典的には高精度で保たれているような大局的対称性を導入する必要があり、なぜそのような対称性が存在するのかと

いう理論的な問題がある。これを解決するためのモデルとして余剰次元を考えるものが考えられていたが、その余剰次元のサイズを保つために新たな粒子を導入する必要があるなど、モデルが複雑化する傾向にあった。本研究ではこの大局的対称性を生み出す機構と余剰次元のサイズを保つための機構を、たった一つの相互作用を導入することによって実現できることを示した。さらに対称性の破れの大きさは暗黒物質の観測から示唆されている小さい値を自然に実現することができるため、理論的に微調整の必要のない理想的なモデルとなっている。この研究は、一般化されたカシミール効果からインスパイアされたもので、分野を横断した、他に類を見ないモデルになっている。

(図1: 余剰次元方向に働く力、それらのバランスによってブレーンが安定に止まっていることを表した模式図。ブレーン同士はそれぞれの張力によって離れようとする力が働いている。一方、各ブレーンに存在するクォークがカイラル凝縮を起こすと、カシミール力のようなブレーン間を引っ張り合う力が働くため、それらの力のバランスによってブレーンの位置が安定化される。さらに、カイラル凝縮によって Peccei-Quinn 機構が働き、強い CP 問題が解決される。)



## (2) レプトンフレーバー対称性を破る相互作用を用いたバリオン数の生成機構の提案

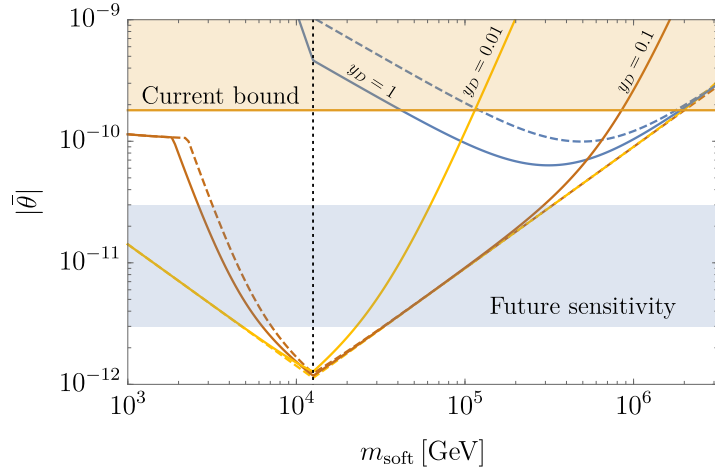
バリオン数の起源の問題は宇宙論の謎として残されている。多くの場合、B-L の非対称性を生成することでその後の電弱スファレロン過程を通してバリオン数を生み出すことが考えられている。しかし、レプトンフレーバーの非対称性が存在したとしても電弱スファレロン過程を通してバリオン数は作られる。このレプトンフレーバーの非対称性を作り出すための機構として wash-in/spontaneous leptoflavorgenesis と呼ばれるシナリオを提案した。具体的な例として、アクシオンが標準模型の場から構成される適当なカレントと相互作用していたとき、アクシオンの振動によって一般にレプトンフレーバー非対称性が生み出される。この非対称性がヒッグス相転移時まで残っていると、結果的にバリオン数が生み出されて宇宙に残ることになる。

この機構では、加速器実験などで探査可能な荷電レプトンフレーバー対称性を破る相互作用が重要な役割を果たしており、素粒子の現象論と宇宙のバリオン数の起源を結びつけている。

## (3) CP 対称なモデルにおけるバリオン数の生成

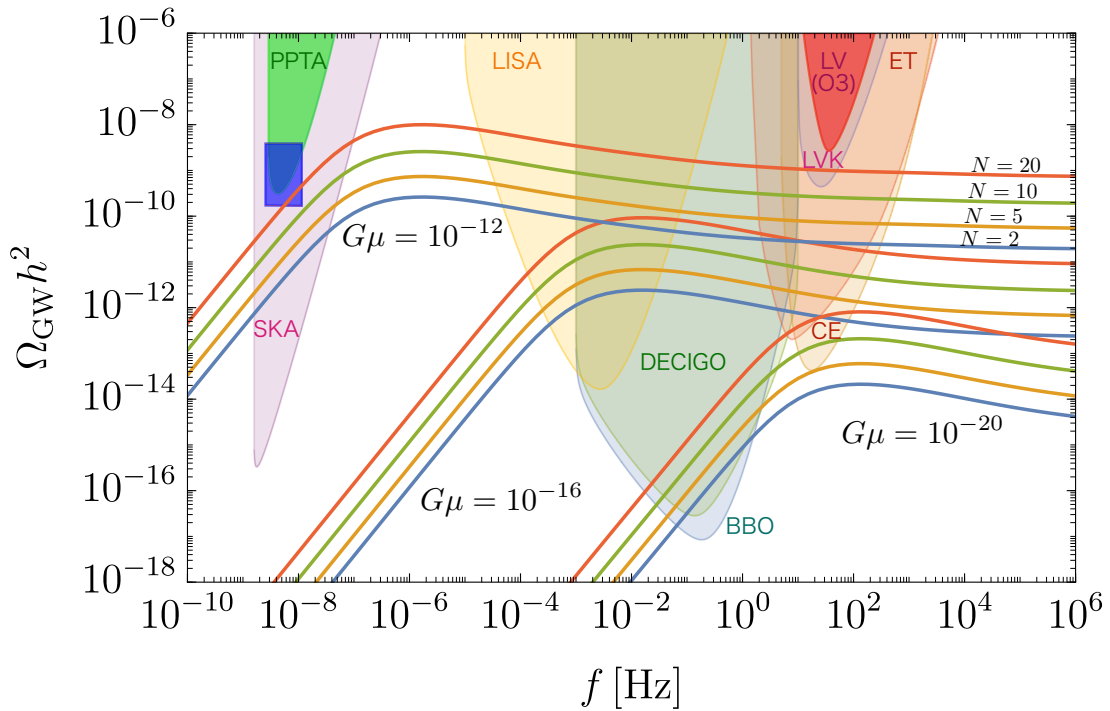
素粒子の強い CP 問題を解決する一つの機構に、CP 対称性を理論に課し、それを自発的に破るモデルが提案されており、その代表的なものに Nelson-Barr モデルというものがある。しかしこのとき、理論が高エネルギーで CP 対称性を保っているため、宇宙のバリオン数の起源を説明することが困難であった。本研究では、超対称性を持った Nelson-Barr モデルではアフレックダイク機構によって矛盾なくバリオン数を作り出すことができることを示し、強い CP 位相が将来的に観測可能な範囲に予言されることを示した。

(図 2: Nelson-Barr モデルにおいてアフレックダイン機構を実現したときに要求される強い CP 位相の大きさ。横軸は超対称性の破れのスケールを表す。用いるパラメータによって詳細な値は異なるものの、ほとんどの場合で  $10^{-12}$  以上の大きさの強い CP 位相が予言されており、将来的に検証可能な範囲に予言されていることがわかる。)



#### (4) 閉じ込め相転移に伴う cosmic string の形成と重力波の放射に関する研究

本研究では、基本表現の軽いクォークがないような Yang-Mills 理論において閉じ込めの相転移が起こるとマクロなスケールで弦状の物体 (cosmic string) を形成することを指摘し、その性質を詳細にまとめた。その弦が衝突したときには量子的な効果によってのみ組み替えのダイナミクスが生じることから、その効果を考慮した統計的なダイナミクスを記述するモデルを再解析し、弦のダイナミクスから生ずる重力波を求めた。これにより、将来的な重力波観測実験によって初期宇宙にどのような相転移が起きていたかを理解できることを示した。



(図 3: 閉じ込め相転移に伴って形成される cosmic string から放射される重力波のスペクトル。閉じ込めのエネルギースケールと相互作用の性質によって、重力波のスペクトルのピーク的位置が変わっている。薄く塗られている領域は、各実験によって将来的に観測可能な範囲を表している。)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Hiroyuki Kitamoto and Masaki Yamada	4. 巻 103
2. 論文標題 Semiclassical analysis of axion-assisted and axion-driven pair production	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	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) 10.1007/JHEP06(2022)103	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 Kyohei Mukaida, Kai Schmitz, and Masaki Yamada	4. 巻 129
2. 論文標題 Baryon Asymmetry of the Universe from Lepton Flavor Violation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Lett.	6. 最初と最後の頁 11803
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.129.011803	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 Kohei Fujikura, Yuichiro Nakai, Ryosuke Sato and Masaki Yamada	4. 巻 105
2. 論文標題 Baryon asymmetric Universe from spontaneous CP violation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	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) 10.1007/JHEP04(2022)105	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 Takanori Sato, Fuminobu Takahashi, and Masaki Yamada	4. 巻 8
2. 論文標題 Gravitational production of dark photon dark matter with mass generated by the Higgs mechanism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JCAP	6. 最初と最後の頁 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/08/022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaki Yamada and Kazuya Yonekura	4. 巻 838
2. 論文標題 Cosmic F- and D-strings from pure Yang-Mills theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.137724	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 Masaki Yamada and Kazuya Yonekura	4. 巻 106
2. 論文標題 Cosmic strings from pure Yang-Mills theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 123515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.123515	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 Kyohei Mukaida and Masaki Yamada	4. 巻 116
2. 論文標題 Cascades of high-energy SM particles in the primordial thermal plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JHEP	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) 10.1007/JHEP10(2022)116	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 Minxi He, Kazunori Kohri, Kyohei Mukaida, and Masaki Yamada	4. 巻 1
2. 論文標題 Formation of hot spots around small primordial black holes	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JCAP	6. 最初と最後の頁 27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/01/027	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Valerie Domcke, Kohei Kamada, Kyohei Mukaida, Kai Schmitz and Masaki Yamada	4. 巻 53
2. 論文標題 Wash-in leptogenesis after axion inflation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JHEP	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) 10.1007/JHEP01(2023)053	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 Shota Nakagawa, Fuminobu Takahashi, Masaki Yamada, Wen Yin	4. 巻 839
2. 論文標題 Axion dark matter from first-order phase transition, and very high energy photons from GRB 221009A	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 137824
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2023.137824	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 Nakagawa Shota, Takahashi Fuminobu, Yamada Masaki	4. 巻 2021
2. 論文標題 Trapping effect for QCD axion dark matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 062 ~ 062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/05/062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Domcke Valerie, Kamada Kohei, Mukaida Kyohei, Schmitz Kai, Yamada Masaki	4. 巻 126
2. 論文標題 Wash-In Leptogenesis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 201802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.126.201802	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 Nakai Yuichiro, Suzuki Motoo, Takahashi Fuminobu, Yamada Masaki	4. 巻 816
2. 論文標題 Gravitational waves and dark radiation from dark phase transition: Connecting NANOGrav pulsar timing data and hubble tension	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136238 ~ 136238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136238	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 Yamada Masaki, Yanagida Tsutomu T.	4. 巻 816
2. 論文標題 A natural and simple UV completion of the QCD axion model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136267 ~ 136267
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136267	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 Nakagawa Shota, Takahashi Fuminobu, Yamada Masaki	4. 巻 127
2. 論文標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 181103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.127.181103	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 Kohei Fujikura, Yuichiro Nakai, Ryosuke Sato, Masaki Yamada	4. 巻 4
2. 論文標題 Baryon Asymmetric Universe from Spontaneous CP Violation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics (in press)	6. 最初と最後の頁 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP04(2022)105	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12件(うち招待講演 3件/うち国際学会 10件)

1. 発表者名 山田將樹
2. 発表標題 Axion domain walls, and cosmic birefringence
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cascades of high-energy particles and non-thermal DM production in the pre-thermal phase
3. 学会等名 APCTP (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic F- and D-strings from pure Yang-Mills theory
3. 学会等名 APPC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic strings and gravitational waves from pure Yang-Mills theory
3. 学会等名 JGRG (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cascades of high-energy particles and non-thermal DM production in the pre-thermal phase
3. 学会等名 FY2022学術変革シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 PPC 2021: XIV International Workshop on Interconnections between Particle Physics and Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 26th International Symposium on Particle Physics, String Theory, and Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 Cambridge High Energy Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 The XXVIII 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 山田將樹
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 基研研究会 素粒子物理学の進展 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Leptoflavorgenesis: baryon asymmetry of the Universe from lepton flavor violation
3. 学会等名 New observational windows on the high-scale origin of matter-antimatter asymmetry (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaki Yamada
2. 発表標題 Cosmic Birefringence Triggered by Dark Matter Domination
3. 学会等名 FY2021 学術変革領域研究「ダークマター」シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宇宙背景放射の偏光面の回転を説明するアクシオンの運動機構の提唱  
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2021/10/press20211029-02.html>

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			
中国	Tsung-Dao Lee Institute	Shanghai Jiao Tong University		
スイス	CERN	EPFL		
ドイツ	Munster University	DESY		