

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03640

研究課題名(和文) 数値シミュレーションに基づくアクシオン暗黒物質生成機構の解明

研究課題名(英文) Analysis of production mechanisms of the axion dark matter based on numerical simulation

研究代表者

関口 豊和 (Sekiguchi, Toyokazu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員

研究者番号：30584750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：暗黒物質がアクシオンである可能性に焦点を当て、宇宙論における影響についてその生成過程からその後の時間発展、現在の宇宙での観測可能性について研究を行った。アクシオン宇宙紐などの位相欠陥からの生成過程について、世界最大規模の大規模並列シミュレーションに基づき新たな知見を得ることに成功した。とりわけ、アクシオン宇宙紐に長期ダイナミクスがあることを明らかにし、これまでのアクシオン宇宙紐の描像を刷新した。併せて、アクシオン電磁気学の数値シミュレーション新手法の開発と宇宙論的応用や、21cm輝線観測を用いたアクシオン暗黒物質シナリオの探索の研究などを行い、アクシオン宇宙論の理解を広範にわたり発展させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質の正体は宇宙・素粒子分野における最大の謎であり、その正体を明らかにすることで未知の物理への足掛かりが得られると期待されている。様々な暗黒物質候補の中で、アクシオンは最有力候補の一つであり、その直接検出のために様々な実験が世界中で進行・計画されている。他方、アクシオン暗黒物質の主要な生成過程であるアクシオン位相欠陥からのアクシオン放出には大きな理論的不定性があり、検出実験を計画する上で大きな問題となっている。我々は世界最大規模の第一原理数値シミュレーションに基づきアクシオン位相欠陥のダイナミクスにおける未知の性質を明らかにし、更なる理論予言の発展を導いた。

研究成果の概要(英文)：Focusing on the possibility of axion dark matter, we have investigated a variety of its cosmological aspects, including its generation processes, time evolution afterwards, and observability in the present universe. Regarding the generation processes from axion topological defects such as cosmic strings, we have successfully derived novel implications based on the state-of-the-art massively parallel simulations. In particular, we have shown that axion cosmic strings have a long-term dynamics, which have innovated the previous picture of the cosmic strings. In addition, we have developed an innovative numerical simulation method of the axion electrodynamics and investigated its cosmological applications. We also have studied probing axion dark matter scenario with 21cm line observations. Our study have improved our understanding of axion cosmology extensively.

研究分野：宇宙論

キーワード：暗黒物質 素粒子宇宙論 観測的宇宙論 アクシオン 位相欠陥

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙に存在する暗黒物質は現在の素粒子・宇宙物理における最大の謎といえる。暗黒物質の正体を明らかにすることで未知の物理への足掛かりが得られると期待されている。様々な暗黒物質候補の中でアクシオンは最も有力なものの一つであり、その直接検出のためにADMXなど様々な実験が世界中で進行・計画されている。

初期宇宙におけるアクシオン暗黒物質の生成過程は、Peccei-Quinn (PQ) 対称性の破れる時期に依存する。PQ対称性が宇宙の再加熱後に破れる場合、形成されるアクシオン位相欠陥から主にアクシオン暗黒物質が生成されると考えられている。しかしアクシオン位相欠陥からのアクシオン放出には大きな理論的不定性があり、検出実験を計画する上で大きな問題となっている。他方、地上実験では現在の技術では直接検出が困難なアクシオン質量レンジが存在し、天体・天文観測による間接検出を考える必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究の主たる目的は、初期宇宙においてアクシオン位相欠陥が形成される場合のアクシオン暗黒物質質量について理論的不定性を減らすことである。この不定性を取り除くことができれば、原理的にはアクシオン位相欠陥が形成される場合において観測されている暗黒物質質量を説明するアクシオン質量が一意に決まる。これによって、直接検出をアクシオン質量でピンポイントに行うことが可能となり、

もう一つの目的は、新たなアクシオン暗黒物質の間接検出手法を考案し、直接検出では到達の難しい $10^{-10}\text{eV}$ 以下の極小アクシオン質量に対する制限を与えることである。

## 3. 研究の方法

アクシオン位相欠陥からのアクシオン暗黒物質生成量の算出には、アクシオン位相欠陥のダイナミクスを知る必要がある。これは高度に非線形な物理であるため解析的には取り扱うことが難しい。そのために我々は場の理論に基づく第一原理計算によるシミュレーションを行った。特にこれまでの比較的小規模なシミュレーションを、MPIとOpenMPを組み合わせた大規模並列化することで、解像度やシミュレーション時間の大幅な向上を行った。併せて、アクシオン位相欠陥の速度の算出などを導入し、我々がこれまで開発したアクシオン放出スペクトルの統計的再構築などと組み合わせシミュレーション解析手法を充実させた。

## 4. 研究成果

まず我々はアクシオン位相欠陥の一つであるアクシオン宇宙紐のシミュレーションを世界最大規模である格子数 $4016^3$ で実施し、それ以前に比べ8倍程度シミュレーション時間を実現した。これにより、これまでの研究では見つかっていなかったアクシオン宇宙紐の長期的な振る舞いを捉えることを可能にした。とりわけアクシオン宇宙紐が、スケーリング解と呼ばれる宇宙紐の現象論的な振る舞いからずれ、数密度が時間の対数関数的に増加することを明らかにした。この結果はアクシオン宇宙紐から生成されるアクシオン暗黒物質質量がこれまでの見積もりに比べ増加し得ることを示しており、アクシオン位相欠陥が生成される場合の暗黒物質を説明するアクシオン質量がこれまで考えられていた値よりも大きい可能性を示している。このことはアクシオン暗黒物質の検出実験を計画する上で、重要な知見を与える結果である。

また、我々は電磁場のようなU(1)ゲージ場とアクシオン場が結合している系である、axion-electrodynamics について有限差分法に基づく数値シミュレーション手法を構築した。我々の数値計算アルゴリズムは、Yeeのアルゴリズムのaxion-electrodynamicsへの自然な拡張となっており、ゲージ対称性に伴う拘束条件を自動的に満たすことによる計算精度保障やシンプレクティック積分による効率的な時間発展など数多くの利点を持つ。topological insulatorなど宇宙素粒子以外の分野への応用も可能な画期的なコードとなっている。その上で、我々は以下に述べるような宇宙論的な応用を行った。

- アクシオンから宇宙磁場生成の可能性を追求した。宇宙に存在する銀河サイズ以上のスケールでの磁場の起源は謎である。我々は、アクシオンと電磁場、そしてhidden U(1)ゲージ場が結合している系を考え、アクシオン場の振動からhidden U(1)場が効率的に生成され、その一部が電磁場に転嫁され、銀河の磁場を説明できることを示した。我々のシナリオは、電子・陽電子対消滅後の比較的宇宙後期に大規模磁場を生成できる点で希有である。
- dark photonと呼ばれる質量を持ったU(1)ゲージ場が暗黒物質がアクシオンから生成されるシナリオを考えた。振動するアクシオン場とのパラメータ共鳴によりdark photonが効率的に生成され得ることを示し、幅広いdark photon質量に対してdark photon暗黒物質が生成され、暗黒物質を説明し得ることを示した。

一方で我々はPQ対称性の破れが非常に低い場合に宇宙論的な影響を調べた。我々は、PQ対称性の破れた時期の宇宙の地平線スケールでアクシオン場の揺らぎが大きな揺らぎを持つこと

に着目し、大規模構造形成への影響を調べた。我々はPQ対称性の破れの時期により、ミニハローと呼ばれる太陽の $10^3$ から $10^6$ 倍程度の質量の暗黒物質ハローの形成が何桁も増幅される可能性があることを示した。ミニハローは現在進行中のSquare Kilometer Arrayなど電波望遠鏡アレイで観測可能であると期待され、電波天文観測からPQ対称性の破れの時期についてどのような制限が与えられるかを定量的な見積もりを与えた。

これらの研究を通じて、アクシオン宇宙論について、大規模シミュレーションを駆使しながら、初期宇宙の生成過程から観測可能性に至るまで幅広く進展させることができた。

## 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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Enqvist Kari, Nadathur Seshadri, Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Tomo	4. 巻 2020
2. 論文標題 Constraints on decaying dark matter from weak lensing and cluster counts	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 015 ~ 015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/04/015	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 Ando Shin'ichiro, Kamada Ayuki, Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Tomo	4. 巻 100
2. 論文標題 Smallest halos in thermal wino dark matter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123519
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123519	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 Agrawal Prateek, Kitajima Naoya, Reece Matthew, Sekiguchi Toyokazu, Takahashi Fuminobu	4. 巻 801
2. 論文標題 Relic abundance of dark photon dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135136 ~ 135136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135136	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 該当する
1. 著者名 Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama	4. 巻 2018
2. 論文標題 Long-term dynamics of cosmological axion strings	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty098	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 Naoya Kitajima, Toyokazu Sekiguchi, Fuminobu Takahashi	4. 巻 781
2. 論文標題 Cosmological abundance of the QCD axion coupled to hidden photons	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 684 ~ 687
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2018.04.024	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 Kiwoon Choi, Hyungjin Kim, Toyokazu Sekiguchi	4. 巻 121
2. 論文標題 Late-Time Magnetogenesis Driven by Axionlike Particle Dark Matter and a Dark Photon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 31102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.031102	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 Fa Peng Huang, Kenji Kadota, Toyokazu Sekiguchi, Hiroyuki Tashiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Radio telescope search for the resonant conversion of cold dark matter axions from the magnetized astrophysical sources	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 123001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.97.123001	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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Toyokazu Sekiguchi
2. 発表標題 Long-term dynamics of axion strings
3. 学会等名 JGRG28 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toyokazu Sekiguchi
2. 発表標題 Long-term dynamics in axion string networks
3. 学会等名 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toyokazu Sekiguchi
2. 発表標題 Long-term dynamics of axion strings
3. 学会等名 RESCEU Summer School 2018 (国際学会)
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			
米国	Harvard University			
フィンランド	the University of Helsinki	Helsinki Institute of Physics		
韓国	Institute for Basic Science			
英国	Portsmouth University			