

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01894

研究課題名(和文)重力波多波長観測で切り拓くアクシオン宇宙

研究課題名(英文)Deciphering string axiverse from multi-wavelength observations of gravitational waves

研究代表者

浦川 優子(Urakawa, Yuko)

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・准教授

研究者番号：80580555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：アクシオン暗黒物質由来の重力波の生成機構に関する理解を深め(Fukunaga, Kitajima, Urakawa 19)(Patel, Tashiro, Urakawa 19)、またその重力波が大型電波望遠鏡SKAにより検出可能であることを見出した(Soda, Kitajima, Urakawa 21)。さらに開始当初は予想していなかった成果として、QCDアクシオンの新たな性質を見出し(Kogai, Kitajima, Urakawa 22)、アクシオン暗黒物質探査の新たな方法を提案し(Basu, Goswami, Schwarz, Urakawa 21)これをもとに実際に観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

アクシオン宇宙及びアクシオン暗黒物質の新たな探査方法の確立に向けて一定の役割を果たすことができた。

研究成果の概要(英文)：We have deepen the knowledge of the generation mechanism of the gravitational wave from axions (Fukunaga, Kitajima, Urakawa 19) (Patel, Tashiro, Urakawa 19) and found that the gravitational wave from axion dark matter is indeed detectable by SKA (Soda, Kitajima, Urakawa 21). Furthermore, as an unexpected achievement, we have found new properties of QCD axion (Kogai, Kitajima, Urakawa 22), and proposed a new method for investigating axion dark matter (Basu, Goswami, Schwarz, Urakawa 21), which was then implemented for actual observations.

研究分野：宇宙物理

キーワード：アクシオン 暗黒物質 重力波

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超弦理論は自然界に存在する四つの力を統一的に記述する究極の理論の最も有力な候補である。超弦理論の理論的整合性は、我々が住む4次元時空に加えて、コンパクト化された6次元の余剰次元空間の存在を要請する。4次元時空の物理法則は余剰次元空間の幾何学的性質に大きく依存し、その特徴的な性質としてアクシオン場の存在を预言する。このようなアクシオン場がひしめく宇宙は、アクシオン宇宙(アクシバース)と呼ばれている。超弦理論の直接検証は、実験的に到達可能なエネルギースケールの制約により困難を極める。そこで次善策として、超弦理論が预言するアクシオン場の痕跡を実験及び宇宙論的観測を通じて網羅的に探査するという方法が取られてきた。アクシオン場の質量スペクトルを決定出来れば、超弦理論の検証及びその基本的性質の究明が可能となる。本事業開始の前年となる2018年までに、浦川(代表者)、北嶋(分担者)らにより、重力波観測を通じたアクシオン探査の新たな方法が開発された(Soda and Urakawa, 17)(Kitajima, Soda, and Urakawa 18)。この結果、従来の方法では調べられなかった質量スケールのアクシオン場を検出することが可能となり、アクシオン場の網羅的な探査を実現可能となった。

アクシオン場は、宇宙史においても重要な役割を果たし得る。宇宙背景輻射(CMB)や大規模構造の精密観測により、現在の宇宙の約30%は暗黒物質と呼ばれる素粒子標準モデルでは説明できない物質によって占められていることがわかっている。アクシオン場は暗黒物質の有力な候補の一つと考えられ、アクシオン場の探査は暗黒物質の正体解明につながる可能性がある。

### 2. 研究の目的

地上重力波干渉計 aLIGO/aVirgo による連星ブラックホール及び連星中性子星による重力波の検出は、重力波が今後更なる新発見をもたらすであろうことを印象付けた。従来のCMBによる極低周波重力波観測に加え、衛星重力波干渉計 eLISA による mHz 帯の重力波の直接観測、電波干渉計 SKA などによる nHz 帯の重力波観測などを合わせ、高精度の重力波多波長観測が可能となる時代が到来することは間違いない。そこで、本研究では、「重力波多波長観測により、アクシオン宇宙の解明、特にアクシオン場の質量スペクトルの決定に、どこまで迫ることができるのか?」を具体的に検証することを目的とした。さらに暗黒物質の正体がアクシオンであった場合、重力波観測を通じてその正体の解明が可能であるかを検証することを目的とした。

加えてアクシオンによる重力波生成機構の系統的理解の構築を目指した。

### 3. 研究の方法

上記の目的達成のため、以下の2課題を遂行することとした。

#### 【課題1】重力波生成機構の系統的理解の確立

北嶋、早田、浦川は、アクシオン場が引き起こす共鳴不安定性として、異なるタイプの不安定性が存在する事を見出した(Kitajima, Soda, Urakawa 18)。卓越する不安定性に応じて、重力波振幅及びスペクトルの形状は大きく異なる。重力波観測からアクシオン模型の情報を抽出するには、卓越する不安定性のタイプに応じた、模型の系統的分類が重要となる。解析計算及び格子シミュレーションの両刀を駆使することで、アクシオンの模型パラメータに応じてどの不安定性が卓越するのか系統的理解の構築を目指す。

#### 【課題2】アクシオン場による重力波の観測手法の確立

まずアクシオン暗黒物質由来の重力波の特徴的な性質を調べ、次にその検出可能性を明らかにする。

### 4. 研究成果

課題1、課題2それぞれにおいて以下の成果を得た。さらに研究開始当初は想定していなかった成果として課題3、課題4の成果を得た。

【課題1】浦川、北嶋は、指導学生の福永とともに、重力波生成を引き起こすアクシオンの自己相互作用による共鳴不安定性の機構について調べ、どのようなアクシオン模型においてどのタイプの共鳴不安定性が起こるのかを明らかにした(Fukunaga, Kitajima, Urakawa, Journal of Cosmology and Astroparticle physics, 19)。また、浦川は、指導学生のPatelらとともに、アクシオンとゲージ場の相互作用を通じた共鳴不安定性の機構について調べ、その応用として、初期宇宙における磁場の共鳴的生成機構について調べた。その結果、最大  $10^{-15}$  Gauss 程度の銀河間磁場が生成可能であることがわかった(Patel, Tashiro, Urakawa, Journal of Cosmology and Astroparticle physics, 20)。これらの研究は、課題2を遂行する基盤となった。

【課題2】浦川、北嶋らは、アクシオン場の共鳴不安定性により放出される重力波は、二つの大きな特徴を持つことを見出した (Kitajima, Soda, Urakawa, *Physical Review Letters* 21)。一つ目は、重力波スペクトルは、共鳴振動で決定される周波数に鋭いピークを持つこと。二つ目は、アクシオン場とゲージ場の相互作用がパリティ対称性を破ることに起因し、重力波の円偏光右巻きモードと左巻きモードが異なる振幅を持ち得ることである。さらに暗黒物質となるアクシオン場由来の重力波は大型電波望遠鏡 SKA によるパルサー観測を通じて検出可能であることを示した。この成果をもとに現在、パルサー観測を通じたアクシオンの円偏光を持つ重力波の検出可能性に関する研究を遂行している。

【課題3】アクシオンは暗黒物質の有効な候補の一つであるが、元々は QCD の強い CP 問題を解決するために提案されたものである。暗黒物質の有効な候補である QCD アクシオンは、QCD 相転移期にグルーオンとの直接相互作用を通じてポテンシャルを獲得する。この直接相互作用が、宇宙におけるアクシオンの空間分布に与える影響は、これまでほとんど考えられていなかった。浦川、北嶋は、直接相互作用の影響により、アクシオンが非常に非一様な空間分布を形成することを示した (Kogai, Kitajima, Urakawa *Journal of Cosmology and Astroparticle physics* 22)。この結果は、アクシオン模型の重要なパラメータである Peccei-Quinn スケールを観測から探る際に、従来課されていた基本的な仮定を再考する必要があることを示唆する。

【課題4】浦川らは重力レンズされた活動銀河核の観測により、天体模型の不定性や系統誤差の影響を取り除いたアクシオン探査の手法を提案した (Basu, Goswami, Schwarz, Urakawa *Physical Review Letters* 21)。この成果をもとに執筆した VLA, VLBI への観測提案が採択され、現在実データの解析を行なっている。

さらに 2019 年には 2 週間の国際ワークショップ「Resonant instabilities in cosmology and their observational consequences」を京都大学基礎物理学研究所において開催し、当該分野の最新の動向に関する理解を深めた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tanaka Takahiro, Urakawa Yuko	4. 巻 2021
2. 論文標題 Anisotropic separate universe and Weinberg's adiabatic mode	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 051 ~ 051
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/07/051	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 Kitajima Naoya, Kogai Kazuhiro, Urakawa Yuko	4. 巻 2022
2. 論文標題 New scenario of QCD axion clump formation. Part I. Linear analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 039 ~ 039
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2022/03/039	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 Fukunaga Hayato, Kitajima Naoya, Urakawa Yuko	4. 巻 2019
2. 論文標題 Efficient self-resonance instability from axions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 055 ~ 055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/06/055	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 Patel Teerthal, Tashiro Hiroyuki, Urakawa Yuko	4. 巻 2020
2. 論文標題 Resonant magnetogenesis from axions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 043 ~ 043
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2020/01/043	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 Jung Sunghoon, Kim TaeHun, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 102
2. 論文標題 Constraining the gravitational coupling of axion dark matter at LIGO	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.055013	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 Arai Shun, Karmakar Purnendu, Nishizawa Atsushi	4. 巻 102
2. 論文標題 Cosmological evolution of viable models in the generalized scalar-tensor theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.024003	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 Kitajima Naoya, Tada Yuichiro, Takahashi Fuminobu	4. 巻 800
2. 論文標題 Stochastic inflation with an extremely large number of e-folds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135097 ~ 135097
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2019.135097	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 Fukunaga Hayato, Kitajima Naoya, Urakawa Yuko	4. 巻 2021
2. 論文標題 Can axion clumps be formed in a pre-inflationary scenario?	5. 発行年 2021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) 10.1088/1475-7516/2021/02/015	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 Basu Aritra, Goswami Jishnu, Schwarz Dominik J., Urakawa Yuko	4. 巻 126
2. 論文標題 Searching for Axionlike Particles under Strong Gravitational Lenses	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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/PhysRevLett.126.191102	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 Kitajima Naoya, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 126
2. 論文標題 Nano-Hz Gravitational-Wave Signature from Axion Dark Matter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	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/PhysRevLett.126.121301	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11件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Searching for ALP DM under strong gravitational lenses
3. 学会等名 Workshop on Very Light Dark Matter (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 New scenario of axion minicluster formation
3. 学会等名 YITP workshop Frontier of Particle Physics 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Signature of axion dark matter through gravitational messenger
3. 学会等名 RTG spring workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Nano-Hz gravitational wave signature from axion dark matter
3. 学会等名 CRC-TR 211 spring meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Gravitational wave forest from string axiverse
3. 学会等名 Geometrical Tools for String Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Gravitational wave forest from string axiverse
3. 学会等名 Resonance instability in cosmology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoya Kitajima
2. 発表標題 Gravitational wave forest from axions
3. 学会等名 2 day mini-workshop: Axion Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Infrared universality of zeta in asymptotically FLRW universe
3. 学会等名 15th Recontres du Vietnam (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Infrared universality of zeta in asymptotically FLRW universe
3. 学会等名 Avenues of Quantum Field Theory in Curved Spacetime (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Axion like particle search from gravitational messenger
3. 学会等名 Dark Odyssey 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Coarse graining in cosmology
3. 学会等名 From inflation to the Big Bang (国際学会)
4. 発表年 2020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
研究分担者	北嶋 直弥  (Kitajima Naoya)  (50737955)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教   (11301)	
研究分担者	西澤 篤志  (Nishizawa Atsushi)  (90569378)	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教   (12601)	

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1件

国際研究集会 Resonant instabilities in cosmology and their observational consequences	開催年 2019年～2019年
--	--------------------

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