

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17689

研究課題名（和文）初期宇宙探査に基づく高エネルギー物理の検証

研究課題名（英文）Probing high energy physics from observations of early Universe

研究代表者

浦川 優子 (Urakawa, Yuko)

名古屋大学・理学研究科・招へい教員

研究者番号：80580555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙初期の加速膨張期であるインフレーション期に生成される原始揺らぎの精密観測を通じた高エネルギー物理の検証、特に、超弦理論（課題1）、ゲージ/重力対応（課題2）、ローレンツ対称性の破れ（課題3）の検証に取り組んだ。課題1では、超弦理論が预言する多様なスピンを持つ粒子がインフレーション宇宙に存在した場合、揺らぎの進化にどのような影響を与え、またどのような観測を通じてその痕跡を探查できるかを調べた。課題2では、ゲージ/重力対応を通じたインフレーション宇宙の新たな理解の構築に取り組む、課題3ではローレンツ対称性の破れの帰結として現れる余剰自由度が、揺らぎの進化にどう影響を与えるのか明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

インフレーション宇宙の典型的なエネルギースケールは、地上実験で到達可能なエネルギースケールよりも遥かに高い。インフレーション宇宙の物理法則を、宇宙の精密観測を通じて明らかにすることは、高エネルギー物理に迫るユニークなアプローチである。

課題1の対象である超弦理論は、自然界の4つの力を統一する究極の理論の最有力候補として期待されているが、その実験的検証は一般に非常に困難である。一方で、スピンの2より大きい高スピン粒子の痕跡を、宇宙の観測を通じて捉えることができれば、超弦理論の直接的な証拠となり得る。本課題を通じて得られた成果は、この実現に向け、重要な一歩を踏み出すものとなった。

研究成果の概要（英文）：In this project, I have studied what we can learn about high energy physics beyond standard model through observations of primordial perturbations generated during cosmic inflation. In particular, as high energy physics, I focused on string theory (project 1), gauge/gravity correspondence (project 2), and violation of Lorentz invariance (Project 3). In Project 1, I studied possible influence of non-zero spin particles, predicted in string theory, on the large scale evolution of primordial perturbations and whether we can observe their imprints encoded in large scale structure through future galaxy surveys. In Project 2, I have explored whether the gauge/gravity correspondence can apply to an inflationary Universe, focusing on the existence of the conserved variable at large scales. In Project 3, I studied the possible imprint of Lorentz violation on primordial perturbation, especially solving the additional degree of freedom consistently.

研究分野：宇宙物理

キーワード：インフレーション 宇宙論的摂動 ゲージ/重力対応 超弦理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙背景輻射 (CMB) や大規模構造 (LSS) などの観測データは、宇宙の極初期にインフレーションと呼ばれる加速膨張期が存在していたことを強く示唆する。インフレーションのエネルギースケールはまだわかっていないが、その典型的なエネルギースケールは、現在、加速器実験で到達可能なエネルギースケールを凌駕する。従って、インフレーション宇宙に、どのような粒子が存在し、どのような物理法則に基づいて衝突・散乱していたのかを、宇宙論的観測に基づいて明らかにすることにより、地上の加速器実験では検証できない高エネルギーの物理法則についての知見を得られると期待される。

### 2. 研究の目的

異なる理論に基づいて構築されたインフレーションモデルは、異なる原始ゆらぎの分布を予測する。このため、精密観測を通じて宇宙初期の密度分布を調べることにより、インフレーションモデル、ひいてはその背後にある高エネルギー物理を記述する理論の検証を行うことができる。本課題の目的は、高エネルギー物理として、とりわけ以下の3つ

【課題1】究極の理論として期待される「超弦理論」

【課題2】重力現象に新たな洞察を与えた「ゲージ/重力対応」

【課題3】素粒子理論における基本的な対称性である「ローレンツ不変性」

に関する検証を行うことである。これらの課題を遂行することにより、初期宇宙探査を通じて、地上実験とは独立な方法に基づく高エネルギーの物理の検証を行うことを目指した。

### 3. 研究の方法

【課題1】インフレーションのエネルギースケールが弦のスケールと同程度であった場合には、インフレーション宇宙には多様なスピンをもつ場が存在することが、超弦理論において言われている。課題1では、このような多様なスピンをもつ場が、原始ゆらぎのスペクトラムにどのような痕跡を残すのか、またその痕跡を観測することは可能であるのか検証を行う。

【課題2】反ドジッター時空/共形場理論(AdS/CFT)対応は、重力理論とゲージ理論という全く異なる理論に対し、双対な対応関係を与える驚くべき発見であった (Maldacena 97)。本課題では、Strominger(01)らの先駆的な研究をもとに、ゲージ/重力対応の宇宙論への応用の可能性を探る。特に、ゲージ/重力対応に基づき、インフレーション宇宙の物理に新たな洞察が得られるかどうか調べる。

【課題3】ローレンツ不変性は、重力を含まない素粒子理論における基本的な対称性である。一方、ゴーストと呼ばれる不安定性の原因となる場を導入することなく重力の整合的な量子化を行うために、Horava-Lifshitz(HL)重力理論など、高いエネルギーにおいてローレンツ不変性が破れた理論が考えられてきた。本課題では、HL重力理論においてインフレーション期に生成される揺らぎの解析及び観測データとの比較を行うことにより、ローレンツ不変性の破れを伴う初期宇宙モデルが、宇宙論的観測と整合的であるのか検証する。

### 4. 研究成果

課題1、2、3それぞれに対して以下の成果が得られた。

【課題1】インフレーション宇宙において生成される原始ゆらぎを、観測量と結びつけるためには、ホライズンスケールを超えた大スケールにおけるゆらぎの成長を解く必要がある。単純なインフレーションモデルでは、大スケールにおいて保存量が存在する。このため、インフレーション宇宙において生成された原始揺らぎと観測量を簡単な関係式で結びつけることができる。[1]では、重い場の輻射補正を考慮しても、大スケールにおいて保存量が存在することを示した。また、[2]では、この成果を拡張し、重いスピンを持つ場が宇宙に存在しても、同様に保存量が存在することを示した。これにより、従来考えられてきた状況よりも一般的な状況で保存量が存在することがわかった。また、この派生研究として、原始ゆらぎの赤外発散が生じる機構について調べ、どのような場合に赤外発散が相殺されるのか調べた。

一方、高いエネルギーを持つインフレーション宇宙において生成されたスピンを持つ場は、原始ゆらぎの非ガウス分布に、特徴的な痕跡を残すことが知られている。[3]では、この痕跡を、銀河サーベイを通じて探査できるかどうか調べるため、Euclidなどの将来観測を想定した予測解析を行った。特にこの論文において、スピン2の重い粒子が生み出す非ガウス性は、小スケールの銀河形状の分布に顕著な痕跡を残すことを、線形解析に基づいて指摘した。尚、より厳密な解析を行うためには、非線形の構造形成を解く必要があり、これについては将来の課題として残された。

【課題2】一般相対性理論に代表される多くの理論では、課題1で述べたように、大スケールにおいて保存量が存在することが知られている。この保存量の存在は、重力理論の基本的性質である一般共変性により保証されている。[4]では、ゲージ/重力対応の宇宙論への応用可能性を調べる一環として、大スケールにおける保存量の存在が、双対な場の理論ではどのような性質から保証されているのか調べた。その結果、保存量の存在は、双対な場の理論の繰り込み可

能性と密接な関係があることがわかった。

【課題 3】インフレーション宇宙において、ローレンツ対称性が破れていた場合に、原始ゆらぎにどのような特徴が現れるのか調べるため、HL 重力理論において原始揺らぎの計算を行った。ローレンツ対称性の破れの影響として、分散関係の変更、及び時間スライスを取り方に対応する新たな自由度の出現、の2つが考えられる。前者についてはこれまでよく調べられてきたが、後者についてはこれまで総合的な解析が行われてこなかった。[5]では、新たな自由度が揺らぎの進化に影響を与える場合と与えない場合について分類し、それぞれの場合に予言される原始揺らぎの特徴的性質を明らかにした。

<引用文献>

[1] “Conservation of  $\epsilon$  with radiative corrections from heavy field,”  
T. Tanaka and Y. Urakawa,  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 6, 020, 2016  
DOI: 10.1088/1475-7516/2016/06/020

[2] “Large gauge transformation, Soft theorem, and Infrared divergence in inflationary spacetime,” T. Tanaka and Y. Urakawa,  
Journal of High Energy Physics 10, 127, 2017  
DOI: 10.1007/JHEP10(2017)127

[3] “Intrinsic galaxy alignment from anisotropic primordial non-Gaussianity,”  
K. Kogai, T. Matsubara, A. J. Nishizawa and Y. Urakawa,  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 08, 014, 2018  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/08/014

[4] “Consistency relations and conservation of  $\epsilon$  in holographic inflation,”  
J. Garriga and Y. Urakawa,  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 10, 030, 2016  
DOI: 10.1088/1475-7516/2016/10/030

[5] “Inflationary perturbations with Lifshitz scaling.”  
S. Arai, S. Sibiryakov, and Y. Urakawa,  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 03, 034, 2019  
DOI: 10.1088/1475-7516/2019/03/034

## 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 0件）

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 -
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 Arai Shun、Sibiryakov Sergey、Urakawa Yuko	4. 巻 2019
2. 論文標題 Inflationary perturbations with Lifshitz scaling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 034 ~ 034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2019/03/034	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 Kogai Kazuhiro、Matsubara Takahiko、Nishizawa Atsushi J.、Urakawa Yuko	4. 巻 2018
2. 論文標題 Intrinsic galaxy alignment from angular dependent primordial non-Gaussianity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 014 ~ 014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/08/014	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, Soda Jiro, Urakawa Yuko	4. 巻 2018
2. 論文標題 Gravitational wave forest from string axiverse	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 008 ~ 008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2018/10/008	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 田中貴浩、浦川優子	4. 巻 10
2. 論文標題 Large gauge transformation, Soft theorem, and Infrared divergence in inflationary spacetime	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 127-1 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2017)127	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 浦川優子、小林達夫、瀬戸治、下村崇	4. 巻 32
2. 論文標題 Relaxion window	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1750142-1 ~ 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0217732317501425	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 Takahiro Tanaka, Yuko Urakawa	4. 巻 6
2. 論文標題 Conservation of with radiative corrections from heavy field	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2016/06/020	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 Tatsuo Kobayashi, Daisuke Nitta, Yuko Urakawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Modular invariant inflation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2016/08/014	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 Jaume Garriga, Yuko Urakawa	4. 巻 10
2. 論文標題 Consistency relations and conservation of in holographic inflation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2016/10/030	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

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Axions, Oscillons, and Gravitational waves
3. 学会等名 Kosmologietag 2020 (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

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 Infrared universality of     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 Infrared universality of     in asymptotically FLRW universe
3. 学会等名 15th Recontres du Vietnam (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 Workshop: Resonance instability in cosmology (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 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 Accelerating Universe in the Dark (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Infrared universality a la Weinberg: New perspective on inflation
3. 学会等名 Symposium of the Cosmic Acceleration grant program
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Infrared universality a la Weinberg: New perspective on inflation
3. 学会等名 2nd Korea-Japan String axion cosmology (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 Korea-Japan String axion cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Gravitational wave forest from string axiverse
3. 学会等名 25th Rencontres du Vietnam, Windows on the Universe (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Large gauge transformation, Soft theorem, and infrared divergence in inflationary spacetimes
3. 学会等名 Avenues of QFT in curved space (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Gravitational wave forest from string axiverse
3. 学会等名 First NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Large gauge transformation, Soft theorem, and infrared divergence in inflationary spacetimes
3. 学会等名 Joint Canada Asia Pacific Conference on General Relativity and Relativistic Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Lifshitz scaling regime of inflationary perturbations
3. 学会等名 International workshop for String theory, Gravitation, and Cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Effective field theory in Lifshitz regime of gravity
3. 学会等名 PASCOS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Large gauge transformation, Soft theorem, and Infrared divergence in inflationary spacetime
3. 学会等名 Nordita- Advances in Theoretical Cosmology in Light of Data (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Imprints of higher spin particles on primordial perturbations
3. 学会等名 Post-Inflationary string Cosmology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Oscillon window in string axiverse
3. 学会等名 Gravitational Dynamics and Black Holes (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Cosmological imprints of string axions in plateau
3. 学会等名 27th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG 27) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Cosmological imprints of string axions in plateau
3. 学会等名 Axion physics and dark matter cosmology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浦川優子
2. 発表標題 Cosmological imprints of string axions in plateau
3. 学会等名 Gravity and Cosmology 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Modular invariant inflation
3. 学会等名 Theoretical cosmology in the era of large surveys (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Soft theorem and conservation of
3. 学会等名 26th Workshop on General Relativity and Gravitation (JGRG 26) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Modular invariant inflation
3. 学会等名 Hidden sector Physics and Cosmophysics (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Inflation as a probe of high energy physics
3. 学会等名 APCTP 2016 workshop on frontiers of physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yuko Urakawa
2. 発表標題 Inflation as a probe of string theory
3. 学会等名 Why the universe accelerate?
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 浦川 優子	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Institute for Advanced Research, Nagoya University	5. 総ページ数 2
3. 書名 Exploring imprints of string theory from cosmological observations	

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----