

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540256

研究課題名(和文)量子重力理論に基づく宇宙論

研究課題名(英文)Cosmology based on quantum gravity theories

研究代表者

向山 信治 (Mukohyama, Shinji)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：40396809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙では、様々なスケールの物理現象が互いに影響を及ぼしながら絶えず起こっている。その中でも、最も壮大なスケールの物理を対象とするのが宇宙論であり、最も基本的な最小スケールの物理が素粒子物理そして量子重力であると言える。本研究では、量子重力理論に基づいて宇宙のより深い理解を得ることを目的として研究し、5年間で47本の研究論文を査読付き学術誌に出版した。具体的には、(i) 量子重力理論に基づく宇宙論、(ii) ローレンツ対称性を破る重力理論に基づく宇宙論、(iii) 非線形massive gravity理論に基づく宇宙論、(iv) その他の関連する題材、についての研究をおこなった。

研究成果の概要(英文)：In our universe physical phenomena at various scales occur constantly, having mutual influence on each other. I consider it necessary for physics at the largest scales, i. e. cosmology, to be connected with physics at the shortest scales, i. e. quantum gravity. I thus continued my research to deepen our understanding of the universe based on quantum gravity and published 47 research papers in referred journals in 5 years. Concretely, I worked on (i) cosmology based on quantum gravity, (ii) cosmology based on Lorentz-violating gravity theory, (iii) cosmology based on nonlinear massive gravity, and (iv) other related subjects.

研究分野：重力理論・宇宙論

キーワード：宇宙論 初期宇宙 インフレーション理論 ダークエネルギー 量子重力 超弦理論

1. 研究開始当初の背景

宇宙では、様々なスケールの物理現象が互いに影響を及ぼしながら絶えず起こっている。その中でも、最も壮大なスケールの物理を対象とするのが宇宙論であり、最も基本的な最小スケールの物理が素粒子物理そして量子重力であると言えよう。重要なことは、ノーベル賞受賞の理論物理学者 Sheldon Glashow が著書で述べているように、この両極端の物理は繋がっている、繋がらなければならない、ということである (Cosmic Uroboros)。生まれたばかりの宇宙は超高エネルギーの極限の状態にあるため、ミクロの物理が本質的になるからである。

現代宇宙論は、精密な観測データを背景に飛躍的に発展してきた。今や、宇宙を記述するパラメーターの多くはかなりの精度で決まった、少なくとも決まりつつあると言っても過言ではない。しかし、それらのパラメーターが何を意味するのか？それは未だベールに包まれたままである。近年の超新星や宇宙背景輻射の観測は、現在の宇宙の加速膨張、そして負の圧力を持ったエネルギーの存在を強く示唆している。また、銀河の回転曲線を説明するには、見えない物質が必要と考えられる。これらのエネルギーと物質は、それぞれダークエネルギー、ダークマターと呼ばれているが、我々はそれらが何であるかを知らない。宇宙の大部分を占めていると考えられているのかかわらず、である。また、生まれて間もない宇宙は、インフレーションによって急激に引き延ばされて熱い火の玉宇宙に転じたと考えられている。インフレーションは、理論として美しいだけでなく宇宙背景輻射の観測結果を正しく予言する為、現代宇宙論の一大要素として多くの研究者によって支持されている。しかし、インフレーションを起こす源と言われる真空のエネルギーが何によるものなのか、それは未だに分かっていない。豊富な精密観測データを誇る宇宙論の前には、ダークエネルギー・ダークマター・インフレーションという、3つの大きな謎が立ちだかっているのだ。

一方、宇宙創世のような重力と量子論の両方が本質的となる状況では、重力現象を記述する一般相対性理論も、素粒子の世界を記述する場の量子論も破綻してしまう。従って、真に宇宙創生を論ずるには、この理論的破綻を回避して重力と量子論と調和させる、量子重力理論が必要である。

2. 研究の目的

上述の Cosmic Uroboros を思い出せば、現代宇宙論の三大謎を解くヒントを、超弦理論等の量子重力理論が与えてくれるかもしれないと期待するのは自然であろう。従

って、量子重力理論に基づく宇宙の研究は、宇宙の創世と進化を理解する有効な手段であると考えられる。また、量子論の発展の歴史において黒体輻射や水素原子についての具体的な研究が果たした役割を鑑みれば、量子重力理論の構築に向けて、宇宙論の研究が重要な役割を果たすであろうと予想される。本研究の目的は、量子重力理論に基づいて、宇宙のより深い理解を得ることである。

3. 研究の方法

基礎理論から出発して観測との比較や新しい予言を行うトップダウン方式と、観測データから背後にある普遍的法則を導き出すボトムアップ方式を、相補的に用いて研究を推進する。具体的には、「弦理論的インフレーション宇宙モデルの構築」、「Horava-Lifshitz 理論に基づく宇宙論」、「余剰次元のダイナミクスとブレーン宇宙における重力」、「重力のヒッグス相と量子重力」、「Multi-throat 宇宙における再加熱の問題」の5課題を並行して行う。

4. 研究成果

24年度: (i) Horava-Lifshitz 理論の $U(1)$ 拡張に対して、太陽系内観測から制限を与えた。(ii) 新しい量子重力理論の構築に向けて、リーマン計量の理論が、長距離でローレンツ計量の理論に自発的に変化する機構を提唱した。(iii) 非線形 massive gravity 理論に基づく宇宙論において、一様等方解に、非線形レベルでの新しい不安定を発見した。そして、その帰結として、新たな加速膨張宇宙解を構成した。この解では、背景時空は一様等方であるが、摂動レベルでは統計的非等方性が期待される。また、背景重力波による重力子の質量の観測可能性についても議論した。(iv) ガンマ線バーストからのガンマ線の偏光観測により、CPT の破れに対する強い制限を得た。(v) インフレーション中に磁場を生成するシナリオに対し、インフレーションスケールにモデルに依存しない上限を与えた。

25年度: (i) Horava-Lifshitz 理論の $U(1)$ 拡張に対して、PPN パラメータを全て計算し、太陽系内観測からの制限を全て満たすことができることを示した。(ii) 前年度に提唱した、リーマン計量の理論が長距離でローレンツ計量の理論に自発的に変化する機構に基づき、繰り込み可能な新しい重力理論を提唱した。(iii) 非線形 massive gravity 理論に基づく宇宙論において、quasi-dilaton 理論を拡張することで、安定な加速膨張宇宙解を構成した。(iv) LIGO のデータを用いて、背景重力波のパリティの破れに制限を与えた。(v) 量子トンネリングを伴うインフレーションモデルにおいて、ベクトル場に超曲率モードが存在しないことを証明した。(vi) Galileon 模型のベクトル場へ

の拡張が Minkowski 時空で存在しないことを証明した。

26年度: (i) 時間のないユークリッド空間の理論から、時間のあるローレンツ符号の計量およびそれを記述する理論を導くシナリオにおいて、Weyl spinor および Majorana spinor を組み込むことに成功し、ユークリッド空間の理論を出発点として素粒子の標準理論を導けることを示した。(ii) 非線形 massive gravity 理論に基づく宇宙論において quasidilaton 場と重力場との新しい相互作用を導入することで、加速膨張宇宙論解を安定化することに成功した。(iii) インフレーション中のベクトル場の粒子生成により、テンソル揺らぎの blue spectrum を生成可能であることを示した。

27年度: (i) Horava-Lifshitz 重力理論の $U(1)$ 拡張について、projectability 条件を課さない場合にハミルトニアン解析を行い、自由度の数が一般には3であることを非線形レベルで示した。(ii) 非線形 massive gravity 理論に基づく宇宙論において、dRGT 理論と全く同じ宇宙論解を持ちつつ、完全に安定な massive gravity 理論 (Minimal Theory of Massive Gravity) を構成することに初めて成功した。ハミルトニアン形式を用いて理論を定義した後、この理論の自由度の数が一般相対性理論と同様に2であることを証明し、加速膨張宇宙論解の存在を示した。(iii) massive gravity において、任意のスケールで BD ゴーストが生じないように、物質場を physical metric と fiducial metric の両方に結合させることに初めて成功した。(iv) 重力理論にスカラー場の微分に依存する conformal または disformal 変換を施した場合に、運動方程式の階数が変わっても、変換が正則であれば自由度の数が不変であることをハミルトニアン形式を用いて示した。

28年度: (i) 宇宙揺らぎを生成するカーバトン場と計量の disformal 変換について考察し、超弦理論における D ブレーンインフレーションに適用した。その結果、カーバトン場が余剰次元の自由度なのか、あるいはブレーン上の自由度なのかによって、観測量に顕著な違いが生じることがあることを指摘した。(ii) bigravity 理論において massive graviton がダークマターになる可能性を考察した。(iii) 宇宙磁場を生成する新しいシナリオを提唱した。(iv) Generalized Proca 理論に基づき、ダークエネルギー模型とインフレーション模型の提唱をした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 47 件)

Universal upper limit on inflation energy scale from cosmic magnetic field, Tomohiro Fujita, Shinji Mukohyama, JCAP 1210 (2012)

034, 査読有.

Solar system tests and interpretation of gauge field and Newtonian prepotential in general covariant Horava-Lifshitz gravity, Kai Lin, Shinji Mukohyama, Anzhong Wang, Phys.Rev. D86 (2012) 104024, 査読有.

Massive gravity: nonlinear instability of the homogeneous and isotropic universe, Antonio De Felice, A.Emir Gumrukcuoglu, Shinji Mukohyama, Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 171101, 査読有.

Anisotropic Friedmann-Robertson-Walker universe from nonlinear massive gravity, A.Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama, Phys.Lett. B717 (2012), 査読有.

Strict Limit on CPT Violation from Polarization of Gamma-Ray Burst, Kenji Toma, Shinji Mukohyama, Daisuke Yonetoku, Toshio Murakami, Shuichi Gunji, Tatehiro Mihara, Yoshiyuki Morihara, Tomonori Sakashita, Takuya Takahashi, Yudai Wakashima, Hajime Yonemochi, Noriyuki Toukairin, Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 241104, 査読有.

Gravitational wave signal from massive gravity, A.Emir Gumrukcuoglu, Sachiko Kuroyanagi, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama, Norihiro Tanahashi, Class.Quant.Grav. 29 (2012) 235026, 査読有.

Measurement of Parity Violation in the Early Universe using Gravitational-wave Detectors, S.G. Crowder, R. Namba, V. Mandic, S. Mukohyama, M. Peloso, Phys.Lett. B726 (2013) 66-71, 査読有.

From configuration to dynamics: Emergence of Lorentz signature in classical field theory, Shinji Mukohyama, Jean-Philippe Uzan, Phys.Rev. D87 (2013), 査読有.

Emergence of time in power-counting renormalizable Riemannian theory of gravity, Shinji Mukohyama, Phys.Rev. D87 (2013) no.8, 085030, 査読有.

Nonlinear stability of cosmological solutions in massive gravity, Antonio De Felice, A.Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama, JCAP 1305 (2013) 035, 査読有.

On the cosmology of massive gravity,

Antonio De Felice, A. Emir Gümrukçüoğlu, Chunshan Lin, [Shinji Mukohyama](#), Class.Quant.Grav. 30 (2013) 184004, 査読有.

Cosmological Perturbations in Extended Massive Gravity, A. Emir Gümrukçüoğlu, Kurt Hinterbichler, Chunshan Lin, [Shinji Mukohyama](#), Mark Trodden, Phys.Rev. D88 (2013) no.2, 024023, 査読有.

Nonlinear massive gravity and cosmology, [Shinji Mukohyama](#), Int.J.Mod.Phys. D22 (2013) 1330007, 査読有.

Towards consistent extension of quasidilaton massive gravity, Antonio De Felice, [Shinji Mukohyama](#), Phys.Lett. B728 (2014) 622-625, 査読有.

Self-accelerating universe in nonlinear massive gravity, A.E. Gumrukcuoglu, C. Lin, [S. Mukohyama](#), Mod.Phys.Lett. A28 (2013) 1340016, 査読有.

Generalized quasidilaton theory, Antonio De Felice, A. Emir Gümrukçüoğlu, [Shinji Mukohyama](#), Phys.Rev. D88 (2013) no.12, 124006, 査読有.

Post-Newtonian approximations in the Hořava-Lifshitz gravity with extra U(1) symmetry, Kai Lin, [Shinji Mukohyama](#), Anzhong Wang, Tao Zhu, Phys.Rev. D89 (2014) no.8, 084022, 査読有.

A no-go theorem for generalized vector Galileons on flat spacetime, Cedric Deffayet, A. Emir Gümrukçüoğlu, [Shinji Mukohyama](#), Yi Wang, JHEP 1404 (2014) 082, 査読有.

Is there supercurvature mode of massive vector field in open inflation?, Daisuke Yamauchi, Tomohiro Fujita, [Shinji Mukohyama](#), JCAP 1403 (2014) 031, 査読有.

Galileons Coupled to Massive Gravity: General Analysis and Cosmological Solutions, Garrett Goon, A. Emir Gümrukçüoğlu, Kurt Hinterbichler, [Shinji Mukohyama](#), Mark Trodden, JCAP 1408 (2014) no.08, 008, 査読有.

Emergent Lorentz Signature, Fermions, and the Standard Model, John Kehayias, [Shinji Mukohyama](#), Jean-Philippe Uzan, Phys.Rev. D89 (2014) no.10, 105017, 査読有.

Viable cosmology in bimetric theory,

Antonio De Felice, A. Emir Gümrukçüoğlu, [Shinji Mukohyama](#), Norihiro Tanahashi, Takahiro Tanaka, JCAP 1406 (2014) 037, 査読有.

Blue Tensor Spectrum from Particle Production during Inflation, [Shinji Mukohyama](#), Ryo Namba, Marco Peloso, Gary Shiu, JCAP 1408 (2014) 036, 査読有.

Cosmology in rotation-invariant massive gravity with non-trivial fiducial metric, David Langlois, [Shinji Mukohyama](#), Ryo Namba, Atsushi Naruko, Class.Quant.Grav. 31 (2014) 175003, 査読有.

Hamiltonian structure of scalar-tensor theories beyond Horndeski, Chunshan Lin, [Shinji Mukohyama](#), Ryo Namba, Rio Saitou, JCAP 1410 (2014) no.10, 071, 査読有.

Cosmological perturbations in massive gravity with doubly coupled matter, A. Emir Gümrukçüoğlu, Lavinia Heisenberg, [Shinji Mukohyama](#), JCAP 1502 (2015) 022, 査読有.

A new quasidilaton theory of massive gravity, [Shinji Mukohyama](#), JCAP 1412 (2014) no.12, 011, 査読有.

Cosmology in bimetric theory with an effective composite coupling to matter, A. Emir Gumrukcuoglu, Lavinia Heisenberg, [Shinji Mukohyama](#), Norihiro Tanahashi, JCAP 1504 (2015) no.04, 008, 査読有.

Hamiltonian analysis of nonprojectable Hořava-Lifshitz gravity with U(1), [Shinji Mukohyama](#), Ryo Namba, Rio Saitou, Yota Watanabe, Phys.Rev. D92 (2015) no.2, 024005, 査読有.

Minimal theory of massive gravity, Antonio De Felice, [Shinji Mukohyama](#), Phys.Lett. B752 (2016) 302-305, 査読有.

Derivative-dependent metric transformation and physical degrees of freedom, Guillem Domènech, [Shinji Mukohyama](#), Ryo Namba, Atsushi Naruko, Rio Saitou, Yota Watanabe, Phys.Rev. D92 (2015) no.8, 084027, 査読有.

Matter coupling in partially constrained vielbein formulation of massive gravity, Antonio De Felice, A. Emir Gümrukçüoğlu, Lavinia Heisenberg, [Shinji Mukohyama](#), JCAP 1601 (2016) 003, 査読有.

Phenomenology in minimal theory of massive gravity, Antonio De Felice, Shinji Mukohyama, JCAP 1604 (2016) no.04, 028, 査読有.

Gravitational scalar-tensor theory, Atsushi Naruko, Daisuke Yoshida, Shinji Mukohyama, Class.Quant.Grav. 33 (2016) no.9, 09LT01, 査読有.

On p-form theories with gauge invariant second order field equations, Cédric Deffayet, Shinji Mukohyama, Vishagan Sivanesan, Phys.Rev. D93 (2016) no.8, 085027, 査読有.

Ghost inflation and de Sitter entropy, Sadra Jazayeri, Shinji Mukohyama, Rio Saitou, Yota Watanabe, JCAP 1608 (2016) no.08, 002, 査読有.

New Quasidilaton theory in Partially Constrained Vielbein Formalism, Antonio De Felice, A.Emir Gümrukçüoğlu, Lavinia Heisenberg, Shinji Mukohyama, Norihiro Tanahashi, JCAP 1605 (2016) no.05, 061, 査読有.

Cosmology in generalized Proca theories, Antonio De Felice, Lavinia Heisenberg, Ryotaro Kase, Shinji Mukohyama, Shinji Tsujikawa, Ying-li Zhang, JCAP 1606 (2016) no.06, 048, 査読有.

Massive gravitons as dark matter and gravitational waves, Katsuki Aoki, Shinji Mukohyama, Phys.Rev. D94 (2016) no.2, 024001, 査読有.

Effective gravitational couplings for cosmological perturbations in generalized Proca theories, Antonio De Felice, Lavinia Heisenberg, Ryotaro Kase, Shinji Mukohyama, Shinji Tsujikawa, Ying-li Zhang, Phys.Rev. D94 (2016) no.4, 044024, 査読有.

Is the DBI scalar field as fragile as other k-essence fields?, Shinji Mukohyama, Ryo Namba, Yota Watanabe, Phys.Rev. D94 (2016) no.2, 023514, 査読有.

Low energy ghosts and the Jeans' instability, A. Emir Gümrukçüoğlu, Shinji Mukohyama, Thomas P. Sotiriou, Phys.Rev. D94 (2016) no.6, 064001, 査読有.

Graviton mass might reduce tension between early and late time cosmological data, Antonio De Felice, Shinji Mukohyama,

Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.9, 091104, 査読有.

Stealth magnetic field in de Sitter spacetime, Shinji Mukohyama, Phys.Rev. D94 (2016) no.12, 121302, 査読有.

Where does curvaton reside? Differences between bulk and brane frames, François Larroutourou, Shinji Mukohyama, Ryo Namba, Yota Watanabe, Phys.Rev. D95 (2017) no.6, 063509, 査読有.

Role of matter in extended quasidilaton massive gravity, A. Emir Gumrukcuoglu, Kazuya Koyama, Shinji Mukohyama, Phys.Rev. D94 (2016) no.12, 123510, 査読有.

Stable solutions of inflation driven by vector fields, Razieh Emami, Shinji Mukohyama, Ryo Namba, Ying-li Zhang, JCAP 1703 (2017) no.03, 058, 査読有.

[学会発表](計 36 件)
Shinji Mukohyama, “Nonlinear massive gravity and Cosmology” (招待講演), QUARKS-2012, 2012年6月, Yaroslavl, Russia.

Shinji Mukohyama, “Massive gravity and cosmology” (招待講演), Cosmological Frontiers in Fundamental Physics, 2013年7月, Perimeter Institute, Canada.

Shinji Mukohyama, “Massive gravity and cosmology” (招待講演), Progress on Old and New Themes in Cosmology, 2014年04月, Avignon, France.

Shinji Mukohyama, “Massive gravity and cosmology” (招待講演), Gravity @ all scales, 2015年08月, University of Nottingham, UK.

Shinji Mukohyama, “Ghost Condensation and Horizon Entropy” (招待講演), Hot topics in Modern Cosmology, 2016年05月, Cargese, France

[図書](計 2 件)
“宇宙の扉をノックする”、リサ・ランドール (著), 向山信治 (監訳), 塩原通緒 (翻訳)、NHK 出版、2013年

“ダークマターと恐竜絶滅”、リサ・ランドール (著), 向山信治 (監訳), 塩原通緒 (翻訳)、NHK 出版、2016年

〔産業財産権〕

出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向山信治 (MUKOHYAMA SHINJI)

京都大学・基礎物理学研究所・教授

研究者番号：40396809

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()