

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：82118

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21111006

研究課題名(和文)宇宙初期進化の直接観測に基づく究極理論探査

研究課題名(英文)Quest for the ultimate theory on the basis of direct observations of the early evolution of the universe

研究代表者

小玉 英雄(Kodama, Hideo)

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・教授

研究者番号：40161947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 64,900,000円、(間接経費) 19,470,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ゆらぎを軸とした宇宙現象論と重力を含む統一理論に基づく宇宙模型の構築という2つの異なる方向から研究を行い、これまで300編を超える論文を発表した。特に顕著な成果としては、1成分のスカラ場により引き起こされる最も一般的なインフレーション理論の構築とそのCMB観測との比較、整合的な非等方インフレーション模型の構築とその詳細な観測的予言の導出、4次元超重力統一理論に基づいた多様な大変動場インフレーション模型の構築、3次元数値シミュレーションを用いたアクシオン宇宙論の研究に基づく素粒子理論への制限、インフレーション場の量子補正赤外発散問題の解明、多様な修正重力理論の組織的研究が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have pushed forward investigations from the two different directions, the phenomenology of the universe focused on cosmological fluctuations and the construction of universe models based on unified theories including gravity, and published more than 300 papers. The most significant results are the construction of the most general inflation theory with a single driving scalar field and the comparison of its predictions with observations, the construction of a consistent anisotropic inflation model and the derivation of its detailed observational predictions, the construction of a variety of large field inflation models on the basis of 4D supergravity unified theories, derivation of constraints on elementary particle theory on the basis of investigations of axion cosmology by 3D numerical simulations, clarification of the IR divergence problem in quantum corrections to inflation, and systematic studies of various modified gravity theories.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：インフレーション ゆらぎ 超重力理論 超弦理論 宇宙背景放射 原始重力波

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、宇宙の初期進化の解明を目指して、WMAP に続く様々な CMB 観測プロジェクトが世界中で進行していた。特に、当学術領域が参加する QUIET や POLAR-BEAR では、CMB 偏光 B モード観測により原始重力波と銀河の種となる密度ゆらぎの相対強度(テンソル/スカラー比)を天球の部分領域において 1%レベルまで探索することを目指している。また、2009 年打ち上げられた Planck 衛星は宇宙初期ゆらぎの統計的特性(非ガウス性)について精密な情報をもたらすことが期待されていた。

ただし、これらの観測的研究が意味のある成果を上げるには、観測結果が宇宙進化や究極理論に対してどのような情報をもたらすかという点が理論的に明らかとなっていることが必須の条件であるが、この理論研究は必要なレベルからほど遠い現状にあった。

まず、インフレーションにより生成されるゆらぎの理論的評価について、詳しい結果が得られているのはインフレーションが 1 個のスカラー場により引き起こされるとする単純化されたモデルに限られ、究極理論の候補と考えられている高次元統一理論から導かれる多様なインフレーションモデルに対して、ゆらぎの組織的研究はまだなされていなかった。さらに、究極理論探査という側面でも大きな課題が残されていた。現時点で、統合的な唯一の究極理論候補は 10 次元ないし 11 次元の超弦理論・M 理論であるが、それから観測・実験と統合的で安定な 4 次元理論を導くことには成功していなかった。CMB 偏光を用いたインフレーションの観測と理論の比較は、これらの時空 4 次元化の機構を解明する手がかりとなることが期待された。また、究極理論が高次元理論であることを検証する手段となる可能性も高く、加速器による実験研究ではとうてい得られない貴重な情報をもたらされると予想された。

## 2. 研究の目的

本計画研究の目的は、(申請時点で)進行中および予定されている様々な波長帯の背景放射および重力波を用いた初期宇宙観測により、インフレーションモデルを絞り込み、さらにそれに基づいて究極理論探査を行うための理論研究を組織的に行うことである。特に、研究期間内に次の課題を達成する。

(1) 様々なインフレーションモデルに対しゆらぎのスペクトルおよび統計性(非ガウス性)を決定。

(2) (1)に基づいて、CMB 観測実験 QUIET/POLARBEAR/Planck の観測データと整合的な現象モデルを構築。

(3) 従来の宇宙論的制限に加えて LHC および暗黒物質検出実験の成果を考慮した 4 次元超重力理論に基づく統合的宇宙モデルの構築。

(4) 超弦理論・M 理論より宇宙論と統合的な

4 次元有効理論を導出。

(5) 背景放射を用いた初期宇宙の直接観測により重力を含む統一理論についての知見を得ることを可能にする新たな観測情報の発見。

## 3. 研究の方法

本計画研究は、多様なインフレーションモデルに対する観測量の組織的計算、観測との比較、究極理論に基づく統合的宇宙モデルの構築など様々な高度の技術と知識を必要とする困難な課題を 5 年間で行うものであり、観測的宇宙論、宇宙摂動論、重力理論の拡張、素粒子宇宙論、4 次元超重力理論、超弦理論など、それぞれ独自の専門知識と技術をもつ研究分担者(とその学生)により作業を分担し、さらに公募研究を通して連携研究者を含む多様な研究者の協力を得ることにより遂行する。具体的な研究戦略としては、現在の所、究極理論に基づいて満足の行くインフレーションモデルを導くことに成功していないことを考慮して、次の 2 つのテーマを軸として研究を行う。

インフレーション宇宙の生み出すゆらぎの組織的研究：インフレーションを起こす場が多成分となるモデルおよびインフレーション時期に軽いモジュライ場が存在するモデルなど多様なインフレーションモデルに対してゆらぎスペクトル、テンソル/スカラー比、統計性(非ガウス性)、非断熱性を算出する。これらを地上 CMB 温度ゆらぎ・偏光観測および Planck 衛星による高精度温度ゆらぎ・偏光観測より得られる情報を比較することにより、インフレーションモデルを絞り込む。

重力を含む統一理論に基づくインフレーションモデルの構築：4 次元超重力理論に基づく統合的インフレーション宇宙モデルの構築という中間的研究と、超弦理論・M 理論のフラックスコンパクト化による現実的 4 次元有効理論の導出という 2 つの研究を並行して行う。最終的には、これらの研究を上で得られた現象論モデルへの制限および LHC 実験・暗黒物質探査実験の結果と総合することにより究極理論を絞り込むことを目指す。

## 4. 研究成果

### ● 一般化された G-インフレーションモデルの構築と解析

最も一般的な 1 成分スカラー場理論に基づくインフレーションモデルを構築し、その整合性、安定性およびゆらぎに関する観測的予言を組織的に明らかにすることにより、多様なインフレーションモデルを観測と比較し、モデルを絞り込む上での足場となる統一的枠組みを構築。[論文リストの 19, 20, 21, 22, 23, 25, 27]

### ● 統合的非等方インフレーションモデルの構築と解析

スカラー場とゲージ場などのゲージテンソル場が結合する理論に基づいて、統合的な非等

方インフレーションモデルを構築し、ゆらぎパワースペクトルの統計的非等方性、スカラーゆらぎとテンソルゆらぎの相関など、その観測的予言を世界で初めて組織的かつ定量的に明らかにした。[論文リストの1,8,26,30]

● **4次元超重力統一理論に基づく多様な large field 模型の構築**

4次元超重力理論の枠内で large field 模型を作る処方一般化し、これまでの温度ゆらぎスペクトル観測と整合的で、かつ次世代CMB B-mode 観測で検出可能な原始重力波生成を予言する多様なインフレーションモデルを4次元超重力理論の枠内で構築。[論文リスト31]

● **アクシオン宇宙論の組織的研究**

QCD アクシオンのCMBへの影響、特に等曲率揺らぎの生成、ゆらぎ統計の非ガウス性を詳しく解析し、Planck データから宇宙再加熱温度とアクシオン崩壊定数について新たな強い制限を導出。さらに、3次元数値シミュレーションを用いてアクシオン放出、重力波放出、宇宙ひも・ドメインウォール形成について精密な評価を与え、素粒子統一理論の基本パラメータおよび離散対称性について強い制限をえた。[論文リスト6]

● **インフラトンに対する量子補正赤外発散問題の解明**

インフラトンに対する量子ループ補正における赤外発散問題を組織的に研究し、1成分インフラトンモデルでは赤外発散を回避するには量子場に対する初期条件を制限することが必要であることを明らかにした。また、量子補正が結合係数の時間依存性を生み出すことを見だし。[論文リストの4,7,32]

● **修正重力理論の組織的研究**

究極理論の低エネルギー極限としての多様な修正重力理論の整合性、安定性、Einstein理論との関係を組織的に研究し、さらにそれらの宇宙現象による検証について詳細に解析。[論文リストの3,9,10,12,15,17,29,33,34,35]

● **宇宙背景電波放射観測によるニュートリノ質量への制限**

CMB 偏光観測と将来計画である21cm宇宙背景放射観測の組み合わせにより、ニュートリノ質量について強い制限を得ることができること、さらにニュートリノ質量ヒエラルキーを決定できる可能性があることを示した。[論文リスト5]

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333件)すべて査読有り

1. “Gauge Fields and Inflation”  
Maleknejad, M.M. Sheikh-Jabbari, J. Soda: Phys. Rept. 528 (2013) 161-261.  
DOI: 10.1016/j.physrep.2013.03.003
2. “Classification and stability of

vacua in maximal gauged supergravity”

Hideo Kodama, Masato Nozawa: JHEP 1301, 045 (2013).

DOI: 10.1007/JHEP01(2013)045

3. “On the cosmology of massive gravity”

Antonio De Felice, A. Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama: Class. Quant. Grav. 30, 184004 (2013).

DOI: 10.1088/0264-9381/30/18/184004

4. “Soft Gravitons Screen Couplings in de Sitter Space”

H. Kitamoto, Y. Kitazawa: Phys. Rev. D87, 124007 (2013).

DOI: 10.1103/PhysRevD.87.124007

5. “Determination of neutrino mass hierarchy by 21 cm line and CMB B-mode polarization observations”

Yoshihiko Oyama, Akie Shimizu, Kazunori Kohri: Phys. Lett. B718, 1186 (2013).

DOI: 10.1016/j.physletb.2012.12.053

6. “Axions, Theory and Cosmological Role”

Masahiro Kawasaki, Kazunori Nakayama: Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 63, 69 (2013).

DOI: 10.1146/annurev-nucl-102212-170536

7. “Loops in inflationary correlation functions”

Takahiro Tanaka, Yuko Urakawa: Class. Quant. Grav. 30 (2013) 233001.

DOI: 10.1088/0264-9381/30/23/233001

8. “Statistical Anisotropy from Anisotropic Inflation”

Jiro Soda: Class. Quant. Grav. 29, 083001 (2012).

DOI: 10.1088/0264-9381/29/8/083001

9. “Massive gravity: nonlinear instability of the homogeneous and isotropic universe.”

A. De Felice, A. Emir Gumrukcuoglu, Shinji Mukohyama: Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 171101.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.171101

10. “Cosmological perturbations of self-accelerating universe in nonlinear massive gravity”

Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama: JCAP 1203 (2012) 006.

DOI: 10.1088/1475-7516/2012/03/006

11. “Dark Radiation and Dark Matter in Large Volume Compactifications.”

Tetsutaro Higaki, Fuminobu Takahashi: JHEP 1211, 125 (2012).

DOI: 10.1007/JHEP11(2012)125

12. "Anisotropic Friedmann-Robertson-Walker universe from nonlinear massive gravity."  
Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama: Phys. Lett. B717, 295(2012).  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.09.049
13. "Observational constraints on loop quantum cosmology  
M.Bojowald, G.Calcagni, S. Tsujikawa: Phys. Rev. Lett. 107, 211302 (2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.211302
14. "A theory of extra radiation in the Universe  
K. Nakayama, F. Takahashi, T.T. Yanagida: Phys. Lett. B697, 275 (2011).  
DOI: 10.1016/j.physletb.2011.02.013
15. "Open FRW universes and self-acceleration from nonlinear massive gravity"  
Emir Gumrukcuoglu, Chunshan Lin, Shinji Mukohyama: JCAP 1111, 030 (2011).  
DOI: 10.1088/1475-7516/2011/11/030
16. "Parity Violation in Graviton Non-gaussianity"  
Jiro Soda, Hideo Kodama, Masato Nozawa: JHEP 1108, 067 (2011).  
DOI: 10.1007/JHEP08(2011)067
17. "Matter perturbations in Galileon cosmology"  
De Felice, R. Kase, S. Tsujikawa: Phys. Rev. D83, 043515 (2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.043515
18. "On the waterfall behavior in hybrid inflation  
Hideo Kodama, Kazunori Kohri, Kazunori Nakayama: Prog. Theor. Phys. 126, 331 (2011).  
DOI: 10.1143/PTP.126.331
19. "Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field equations"(日本物理学会論文賞)  
Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama: Prog. Theor. Phys. 126, 511-529(2011).  
DOI: 10.1143/PTP.126.511
20. "Generalized Galileon cosmology."  
Antonio De Felice, Shinji Tsujikawa: Phys. Rev. D84, 124029 (2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.84.124029
21. "Higgs G-inflation"  
K. Kamada, T. Kobayashi, M. Yamaguchi, J. Yokoyama: Phys. Rev. D 83, 083515 (2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.083515
22. "Primordial non-Gaussianity from G-inflation."  
Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama: Phys. Rev. D83, 103524 (2011).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.103524
23. "G-inflation: Inflation driven by the Galileon field"  
Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama: Phys. Rev. Lett. 105, 231302 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.231302
24. "New cosmological constraints on primordial black holes"  
B.J. Carr, Kazunori Kohri, Yuuiti Sendouda, Jun'ichi Yokoyama: Phys. Rev. D81, 104019 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.104019
25. "Cosmology of a covariant Galileon field"  
Antonio De Felice, Shinji Tsujikawa: Phys. Rev. Lett. 105, 111301 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevLett.105.111301
26. "The Nature of Primordial Fluctuations from Anisotropic Inflation."  
M Watanabe, S Kanno, J Soda: Prog. Theor. Phys. 123, 1041 (2010).  
DOI: 10.1143/PTP.123.1041
27. "Observational constraints on Galileon cosmology."  
Savvas Nesseris, Antonio De Felice, Shinji Tsujikawa: Phys. Rev. D82, 124054 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.124054
28. "Dark Matter from Split Seesaw"  
A Kusenko, F Takahashi, TT Yanagida: Phys. Lett. B693, 144 (2010).  
DOI: 10.1016/j.physletb.2010.08.031
29. "Density perturbations in general modified gravitational theories."  
A De Felice, S Mukohyama, S Tsujikawa: Phys. Rev. D82, 023524 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.023524
30. "Anisotropic Power-law Inflation  
Sugumi Kanno, Jiro Soda, Masa-aki Watanabe: JCAP 1012, 024 (2010).  
DOI: 10.1088/1475-7516/2010/12/024
31. "Running Kinetic Inflation"  
K. Nakayama, F. Takahashi: JCAP 1011, 009 (2010).  
DOI: 10.1088/1475-7516/2010/11/009
32. "IR divergence does not affect the gauge-invariant curvature perturbation"  
Yuko Urakawa, Takahiro Tanaka: Phys. Rev. D82, 121301 (2010).  
DOI: 10.1103/PhysRevD.82.121301
33. "f(R) theories"  
Antonio De Felice, Shinji Tsujikawa: Living Rev. Rel.13, 3 (2010).  
DOI: 10.12942/lrr-2010-3
34. "Horava-Lifshitz Cosmology, A

Review. ”

Shinji Mukohyama: Class. Quant. Grav. 27, 223101 (2010).

DOI: 10.1088/0264-9381/27/22/223101

35. “Modified gravity models of dark energy”

S. Tsujikawa: Lect. Notes. Phys. 800, 99 (2010)

DOI: 10.1007/978-3-642-10598-2\_3

[学会発表](計 249 件)

1. Kazunori Nakayama: “Axionic dark radiation from string moduli”, PASCOS2013, 2013 年 11 月 20 日, GIS International Convention Center, Taiwan.
2. Shinji Tsujikawa: “Cosmological Perturbations in the Most General Scalar-Tensor Theories”, Seventh Aegean summer school, Beyond Einstein’s theory of gravity, 2013 年 9 月 24 日, パロス島(ギリシャ).
3. Jun’ichi Yokoyama: “G inflation”, APCosPA winter school and workshop, 2013 年 01 月 13 日~15 日, Taiwan University, Taiwan.
4. Jiro Soda: “Anisotropic Inflation and Statistical Symmetry Breaking in the CMB”, Pre-Planckian Inflation, 2011 年 10 月 08 日, Minnesota university, USA.
5. Masahiro Kawasaki: “Inflation from a SUSY Axion Model”, International Conference on Particle Physics and Cosmology(COSMO 11), 2011 年 08 月 22 日, Port (ポルトガル).
6. Hideo Kodama: “Probing the inhomogeneous universe by CMB B-mode”, Workshop on Inhomogeneous Universe, 2011 年 08 月 17 日, Jyvaskyla University, Jyvaskyla, Finland.
7. Takahiro Tanaka: “IR issues during inflation - constraints on quantum state -”, Cosmological Non-Gaussianity: Observations Confront Theory”, 2011 年 05 月 15 日, Michigan, USA.
8. Kazunori Kohri: “Big-bang nucleosynthesis and new physics”, 4th UniverseNet School. 2010 年 9 月 12 日, Lecce, Italy.
9. Fuminobu Takahashi: “Probing Variant Axion Models at LHC”, Planck Conference 2010, 2010 年 6 月 1 日, CERN, Geneva, Switzerland.
10. Shinji Mukohyama: “Horava-Lifshitz gravity”, Crete Workshop on the Frontiers of Cosmology, 2010 年 3 月 28 日, Crete Center of Theoretical

Physics, Greece.

[図書](計 4 件)

1. 小玉英雄, 井岡邦仁, 郡和範: 「宇宙物理学」KEK 教科書シリーズ 3, 共立出版 (2014) 291 ページ.
2. 辻川信二: 「現代宇宙論講義」サイエンス社 SGC ライブラリ 99 (2013) 201 ページ.
3. S. Tsujikawa: “Dark energy, investigation and modeling” Astrophys. Sp. Science Library Volume 370, “Dark Matter and Dark Energy, a Challenge for the 21st Century”, 331-402 (2011), DOI:10.1007/978-90-481-8685-3\_8
4. Luca Amendola, Shinji Tsujikawa: “Dark Energy: Theory and Observations”, Cambridge University Press (2010) 506 ページ.

[その他]

ホームページ:

[http://research.kek.jp/people/hkodama/U\\_TQuestHP/](http://research.kek.jp/people/hkodama/U_TQuestHP/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小玉 英雄 (KODAMA, Hideo)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号: 40161947

(2) 研究分担者

川崎 雅裕 (KAWASAKI, Masahiro)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号: 50202031

横山 順一 (YOKOYAMA, Jun’ichi)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号: 50212303

早田 次郎 (SODA, Jiro)

京都大学・大学院理学研究科・准教授(現、神戸大学・大学院理学研究科・教授)

研究者番号: 00222076

辻川 信二 (TSUJIKAWA, Shinji)

東京理科大学・理学部第 2・准教授

研究者番号: 30318802

向山 信治 (MUKOHYAMA, Shinji)

東京大学・数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号: 40396809

中山 和則 (NAKAYAMA, Kazunori)

平成 23 年度～平成 25 年度  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号： 90596652

(3)連携研究者

北澤 良久 (KITAZAWA, Yoshihisa)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・教授  
研究者番号： 10195258

千葉 剛 (CHIBA, Takeshi)  
平成 21 年度～平成 22 年度  
日本大学・文理学部・准教授  
研究者番号： 40324602

白水 徹也 (SHIROMIZU, Tetsuya)  
平成 21 年度～平成 22 年度  
京都大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号： 10282716

田中 貴浩 (TANAKA, Takahiro)  
京都大学・基礎物理学研究所・教授  
研究者番号： 40281117

郡 和範 (KOHRI, Kazunori)  
平成 22 年度～平成 25 年度  
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： 50565819

高橋 史宜 (TAKAHASHI, Fuminobu)  
東北大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号： 60503878

野澤 真人 (NOZZWA, Masato)  
平成 23 年度～平成 25 年度  
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： 60547321

中山 和則 (NAKAYAMA, Kazunori)  
平成 22 年度  
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： 90596652