

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：17201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740195

研究課題名(和文)精密宇宙観測および素粒子論に基づく初期宇宙進化の探求

研究課題名(英文) Exploring the early Universe with cosmological observations and particle physics

研究代表者

高橋 智 (Takahashi, Tomo)

佐賀大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60432960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、Planck衛星等の精密な宇宙観測から、宇宙の様々な局面が明らかにされてきている。本研究では、特に、現在の宇宙の構造の「種」となる初期密度揺らぎに焦点を当て、その生成機構、また、初期密度揺らぎを用いて初期宇宙進化史を探索することをテーマに研究を進めた。宇宙観測データ、および、素粒子論から示唆される初期宇宙シナリオに基づき、現時点でどのような初期宇宙進化シナリオが考えられるか詳細に検討した。また、将来の宇宙観測で、どのようにして、密度揺らぎの起源、初期宇宙進化を明らかにしていくかについても研究を行った。

研究成果の概要(英文)：Recent cosmological observations such as Planck satellite have revealed various aspects of the Universe. In this research project, focusing on primordial density fluctuations, we have studied its generation mechanism and the evolution of the early Universe. By using the data from current cosmological observations such as WMAP and Planck, we have investigated various generation mechanisms of primordial fluctuations and the thermal history of the Universe. By taking account of models of particle physics, we have discussed possible scenarios of the evolution of the early Universe. The prospects of future observations of how such scenarios can be probed have also been discussed.

研究分野：宇宙論

キーワード：密度揺らぎ 初期宇宙 インフレーション

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、WMAP 衛星等による宇宙背景放射の観測により、宇宙の構成要素(バリオン、暗黒物質、暗黒エネルギー)のエネルギー密度や、初期密度揺らぎの性質などが精密に測定され、宇宙の様々な側面が明らかにされてきていた。特に、WMAP 衛星の観測結果から、初期密度揺らぎの性質について、その揺らぎの非ガウス性がインフラトン場によって生成される初期密度揺らぎよりも大きいのではないか、ということが示唆されていた。もし、初期密度揺らぎの非ガウス性が大きかった場合、密度揺らぎの生成機構として、従来考えられてきたインフラトン場の揺らぎ以外の生成機構を考えなければならなくなり、また、初期揺らぎの生成機構は初期宇宙の進化過程にも大きな示唆を与えるため、非常に重要な課題である。

さらに、研究期間中には WMAP 衛星よりも、さらに精密に宇宙背景放射の揺らぎを観測できる Planck 衛星からの観測結果が公表される予定であったため、この Planck 衛星の観測を念頭に、初期揺らぎの生成機構を検証するためには、揺らぎのどのような性質を調べればよいか、また、初期揺らぎの生成機構として、その当時知られていたモデル以外にどのような可能性があるか、などの理論研究を進めることが急務であった。このような背景の中、本研究は開始された。

2. 研究の目的

上記で述べたように、研究期間中に Planck 衛星からの観測結果の公表が予定されていたため、Planck 衛星の観測を念頭に、初期密度揺らぎの性質、特に、非ガウス性について詳細に調べることが目的のひとつであった。具体的には、非ガウス性を議論する際、通常用いられる揺らぎの3点関数の情報だけでなく、4点関数、また、非ガウス性のスケール依存性についても、様々な密度揺らぎの生成機構について調べ、どのような観測量を検討すれば、生成機構を峻別できるか明らかにすることを目指して研究を進めた。また、非ガウス性のみでなく、宇宙初期に生成される重力波についても研究を進め、重力波の性質(振幅やスケール依存性)を調べることで、初期密度揺らぎの生成機構に対してどのような知見が得られるか、詳細に検討することも目的とした。

さらには、初期揺らぎの生成機構として、それまでに知られているモデル以外の可能性として、どのような生成機構があり得るか、新しいモデル構築なども含め、検討することも目的としていた。

また、初期密度揺らぎの性質を用いて、暗黒物質、宇宙のバリオン数生成機構のモデルについて、検証していくことも本研究のテーマ

の一つであった。観測から、初期密度揺らぎは「断熱的揺らぎ」と呼ばれる種類の揺らぎであることが示唆されていたが、この断熱的揺らぎ以外に「等曲率揺らぎ」と呼ばれる種類の揺らぎも宇宙初期には生成される。そして、この種の揺らぎが現在の密度揺らぎの一部を担っている、という可能性は排除されていない。実は、このような揺らぎは暗黒物質の生成機構、また、生成される時期などによっては、その振幅が大きくなり得るため、観測によって「等曲率揺らぎ」に対して制限が与えられれば、ある種の暗黒物質のモデルに対して制限を与えることができる。「等曲率揺らぎ」に関しては、暗黒物質による等曲率揺らぎと、バリオンにより等曲率揺らぎは、同様の性質(パワースペクトルの形状など)をもつため、バリオンモードの等曲率揺らぎについても、同様の研究を進めることにより、バリオン数生成機構に対して、どのような示唆を与えることができるか検討することも目的としていた。

本研究は、上記のように、初期密度揺らぎを軸として、初期密度揺らぎの生成機構、初期宇宙の進化過程、暗黒物質の性質(モデル)等について、宇宙進化の様々な面を精査していくことをテーマとした。

3. 研究の方法

本研究は理論研究であるが、数値計算についても多く取り組んだ。例えば、宇宙観測のデータを用いて、初期揺らぎの性質等(宇宙論的パラメタに対する制限)を調べる際、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて、数値解析を行った。この際、具体的には WMAP 衛星のデータや Planck 衛星のデータ等、公表されているデータを用いた。

その他においても、解析的に解くことが困難な微分方程式などを数値計算により解くなど、様々な数値的手法でも研究を進めた。

4. 研究成果

(1)初期密度揺らぎの非ガウス性に関する研究:密度揺らぎの非ガウス性について、そのスケール依存性に着目して行った研究がある。特に、カーバトン模型と呼ばれる、インフレーションのダイナミクスには影響しないが、密度揺らぎは生成するようなスカラー場の模型について、生成される密度揺らぎの非ガウス性がどのようなスケール依存性を持ち得るか、詳細に研究を行った。その結果、カーバトン場が自己相互作用をもつ場合、スケール依存性が大きくなることを具体的に示した(下欄「5.発表論文等」の[雑誌論文]の[24,26]。以下も同様に番号を付す)。さらには、密度揺らぎがカーバトン場だけでなく、インフラトン場からも生成

されるような混合密度揺らぎ生成機構においても、非ガウス性のスケール依存性が大きくなり得ることがあることを具体的に示した[24]。

また、暗黒物質やバリオンに付随する「等曲率揺らぎ」についても、その非ガウス性について WMAP 衛星のデータを用いて制限を与えた。そして、具体的な模型（アクシオン暗黒物質模型、カーバトン模型における等曲率揺らぎ）に対して、この制限を適用し、それぞれの模型における有効なパラメタ領域を解析した[21,22]。

また、研究期間中には Planck 衛星からの観測結果が公表されたが、この結果が初期密度揺らぎの生成機構に対して、どのような示唆を与えるかについて研究を行った。具体的には、非ガウス性を表すパラメタである f_{NL} (3点関数の振幅を表す)、パワースペクトルのスケール依存性を表すスペクトル指数 n_s 、原始重力波の振幅を表すテンソル・スカラー比 r に対する Planck 衛星からの制限を考慮して、知られている模型に対する制限等を議論した[13,14,15]。

また、密度揺らぎの生成機構について、新たな模型を提唱した研究もある[18]。さらには、近年の観測の精密化を鑑み、これまでに行われている研究における解析を見直し、特に、これまで用いられてきた解析における近似法などを詳細に検討した[3]。その結果、カーバトン模型における解析でこれまでよく使われてきた“sudden decay”近似と呼ばれる近似法は、カーバトン場の崩壊率が宇宙の温度に依存する場合などは、あまり良い近似ではないことを具体的に示した。

(2)原始重力波に関する研究：インフレーション時期に生成される原始重力波に関しても研究を行った。特に、将来の宇宙空間における干渉計を用いた重力波実験を念頭に研究を進めた。

そのうちの一つに、重力波スペクトルのスケール依存性に関する研究がある。宇宙背景放射の観測で探査している波長スケールと、上記の将来の干渉計実験が探査するスケールが大きく異なるため、通常用いている重力波のパワースペクトルの波数のべき乗則の記述が有効でなくなる場合があることを議論した研究である[27]。具体的に、カオスのインフレーション模型などを仮定した場合、どの程度べき乗則から外れてくるか、解析を行った。そして、パワースペクトルの波数による展開の高次の項まで取り入れると、この記述が良くなっていくことも示した。

また、将来の DECIGO などの宇宙空間の干渉計を用いて、宇宙の再加熱温度などをどの程度探査できるかについて、具体的に解析を行った[5,20]。

他に、いわゆる“small-field inflation”模型において、インフレーション時期に生成される重力波の振幅がこれまで議論されて

いるより、大きくなり得ることを議論した研究もある[17]。通常、Small-field inflation では、重力波の振幅は小さいと言われているが、インフレーション中に、インフレーションのダイナミクスには影響しないスカラー場が存在するような模型を考えると、重力波の振幅を表すテンソル・スカラー比が大きくなり得ることを示した。

また、重力波の振幅が小さいスケールで大きくなっていくようなスケール依存性をもつ模型（所謂、blue-tilt をもつ模型）について、現在の観測から、そのスペクトル指数に対する制限を詳細に解析した[4]。この際、宇宙初期の熱史も考慮し、スペクトル指数の制限はこの再加熱温度に依存することを具体的に示した。

(3)その他の研究：上記で述べた以外にも、様々な研究成果を得た。

例えば、将来の中性水素 21 cm 線の観測を用いて、暗黒物質とバリオンに付随する等曲率揺らぎがどのように見分けられるかに関して研究を行なった[28]。暗黒物質とバリオンに付随する等曲率揺らぎについては、宇宙背景放射の揺らぎの観測からは（それらのパワースペクトルの形が同じになるため）原理的に峻別が不可能であるが、21 cm 線の観測を行うと区別をつけることができることを具体的に示した。また、21 cm 線に関しては、将来観測を念頭に、初期密度揺らぎのスケール依存性をどの程度精密に測定できるか[16]、レプトン数非対称性をどこまで制限することができるか[8]、などについても研究を行い、将来の 21 cm 線の観測の有用性を示した。

また、R パリティが破れている際のアフレク・ダインバリオン数生成機構[7]、重力レンズの観測を用いた「暖かい」暗黒物質の性質に対する制限[1]、暗黒エネルギーの候補であるクインテッセンスと呼ばれるスカラー場模型のポテンシャルを将来の様々な宇宙観測を用いて、どのように（どの程度）峻別できるか[10]、など他にも様々な研究を行なった。

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 28 件)(すべて査読あり)

[1] “Constraints on warm dark matter from weak lensing in anomalous quadruple lenses”

Kaiki Taro Inoue, Ryuichi Takahashi, Tomo

Takahashi, Tomoaki Ishiyama.
Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 448 (2015) 3,
2704-2716.

- [2] "Primordial non-Gaussianity and the inflationary Universe"
Tomo Takahashi.
PTEP 2014 (2014) 6, 6B105-0.
- [3] "Thermal Effects and Sudden Decay Approximation in the Curvaton Scenario"
Naoya Kitajima, David Langlois, Tomo Takahashi, Tomohiro Takesako, Shuichiro Yokoyama.
JCAP 1410 (2014) 10, 032.
- [4] "Blue-tilted Tensor Spectrum and Thermal History of the Universe"
Sachiko Kuroyanagi, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama.
JCAP 1502 (2015) 003.
- [5] "Studying Inflation with Future Space-Based Gravitational Wave Detectors"
Ryusuke Jinno, Takeo Moroi, Tomo Takahashi.
JCAP 1412 (2014) 12, 006.
- [6] "CMB mu distortion from primordial gravitational waves"
Atsuhisa Ota, Tomo Takahashi, Hiroyuki Tashiro, Masahide Yamaguchi.
JCAP 1410 (2014) 10, 029.
- [7] "Affleck-Dine baryogenesis with R-parity violation"
Tetsutaro Higaki, Kazunori Nakayama, Ken'ichi Saikawa, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi.
Phys.Rev. D90 (2014) 4, 045001.
- [8] "Probing Lepton Asymmetry with 21 cm Fluctuations"
Kazunori Kohri, Yoshihiko Oyama, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.
JCAP 1409 (2014) 014.
- [9] "Isocurvature perturbations and tensor mode in light of Planck and BICEP2"
Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama.
JCAP 1408 (2014) 043.
- [10] "Probing quintessence potential with future cosmological surveys"
Yoshitaka Takeuchi, Kiyotomo Ichiki, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi.
JCAP 1403 (2014) 045.
- [11] "The minimal curvaton-higgs model"
Kari Enqvist, Rose N. Lerner, Tomo Takahashi.
JCAP 1401 (2014) 01, 006.
- [12] "Higher order non-linear parameters with PLANCK"
Jinn-Ouk Gong, Tomo Takahashi.
Phys.Rev. D89 (2014) 2, 023516.
- [13] "Mixed Inflaton and Spectator Field Models after Planck"
Kari Enqvist, Tomo Takahashi.
JCAP 1310 (2013) 034.
- [14] "Spectator field models in light of spectral index after Planck"
Takeshi Kobayashi, Fuminobu Takahashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi.
JCAP 1310 (2013) 042.
- [15] "Implications of Planck results for models with local type non-Gaussianity"
Teruaki Suyama, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Shuichiro Yokoyama.
JCAP 1306 (2013) 012.
- [16] "Precise Measurements of Primordial Power Spectrum with 21 cm Fluctuations"
Kazunori Kohri, Yoshihiko Oyama, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.
JCAP 1310 (2013) 065.
- [17] "Large Tensor-to-Scalar Ratio in Small-Field Inflation"
Takeshi Kobayashi, Tomo Takahashi.
Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 23, 231101.
- [18] "Density Perturbations from Modulated Decay of the Curvaton"
David Langlois, Tomo Takahashi.
JCAP 1304 (2013) 014.
- [19] "Structure of Dark Matter Halos in Warm Dark Matter models and in models with Long-Lived Charged Massive Particles"
Ayuki Kamada, Naoki Yoshida, Kazunori Kohri, Tomo Takahashi.
JCAP 1303 (2013) 008.
- [20] "Early universe tomography with CMB and gravitational waves"
Sachiko Kuroyanagi, Christophe Ringeval, Tomo Takahashi.
Phys.Rev. D87 (2013) 8, 083502.
- [21] "Extended analysis of CMB constraints on non-Gaussianity in isocurvature perturbations"
Chiaki Hikage, Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.
JCAP 1303 (2013) 020.
- [22] "CMB constraint on non-Gaussianity in isocurvature perturbations"

Chiaki Hikage, Masahiro Kawasaki,
Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.
JCAP 1307 (2013) 007.

[23] “Generalized Higgs inflation”
Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Jun’ichi Yokoyama.
Phys.Rev. D86 (2012) 023504.

[24] “Runnings in the Curvaton”
Takeshi Kobayashi, Tomo Takahashi.
JCAP 1206 (2012) 004.

[25] “Dark Radiation from Modulated Reheating”
Takeshi Kobayashi, Fuminobu Takahashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi.
JCAP 1203 (2012) 036.

[26] “Strongly scale-dependent polyspectra from curvaton self-interactions”
Christian T. Byrnes, Kari Enqvist, Sami Nurmi, Tomo Takahashi.
JCAP 1111 (2011) 011.

[27] “Higher Order Corrections to the Primordial Gravitational Wave Spectrum and its Impact on Parameter Estimates for Inflation”
Sachiko Kuroyanagi, Tomo Takahashi.
JCAP 1110 (2011) 006.

[28] “Differentiating CDM and Baryon Isocurvature Models with 21 cm Fluctuations”
Masahiro Kawasaki, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi.
JCAP 1110 (2011) 028.

[学会発表](計 12 件)
(研究会、国際会議等での発表含む)

1) “Studying the inflationary Universe with gravitational waves”
Tomo Takahashi
(Joint Winter Conference on Particle Physics, String and Cosmology, High1, Korea: 2015 年 01 月)

2) “Studying the inflationary Universe with gravitational waves”
Tomo Takahashi
(JGRG 24, Kavli IPMU, Kashiwa, 2014 年 11 月)

3) “Probing the inflationary Universe with gravitational waves”
Tomo Takahashi
(Benasque Modern Cosmology 2014

workshop, Benasque, Spain: 2014 年 08 月)

4) “Inflationary Gravitational Waves and CMB”
高橋智
(加速器・物理合同 ILC 夏の合宿 2014, 鳥取: 2014 年 07 月)

5) “Curvaton and high-scale inflation”
Tomo Takahashi
(Enqfest-30 years of Cosmology, Helsinki, Finland: 2014 年 05 月)

6) “The origin of density fluctuations and the early Universe”
Tomo Takahashi
(Tohoku Forum for Creativity “Particle Physics and Cosmology after the Discovery of Higgs boson,” Sendai, Japan: 2013 年 10 月)

7) “Spectator field models after Planck”
Tomo Takahashi
(Cosmological Perturbation post-Planck, Helsinki, Finland: 2013 年 06 月)

8) 「宇宙密度揺らぎの非ガウス性とは」
高橋智
(日本物理学会第 68 回年次大会シンポジウム「宇宙密度揺らぎの非ガウス性」、広島大学: 2013 年 03 月)

9) “Probing the early Universe with Primordial Fluctuations: beyond fNL”
Tomo Takahashi
(PPC2012, KIAS, Seoul, Korea: 2012 年 11 月)

10) “Scale-dependence of non-Gaussianities as a probe of the early Universe”
Tomo Takahashi
(Corfu Summer Institute, TR33 workshop, Corfu, Greece: 2012 年 09 月)

11) “Probing Dark Matter with CMB and LSS”
Tomo Takahashi
(Workshop on Dark Matter Phenomenology, APCTP, Pohang, Korea: 2012 年 08 月)

12) “Cosmology of Moduli”
高橋智
(Summer Institute 2011, 富士吉田市: 2011 年 08 月)

6. 研究組織

(1) 研究代表者
高橋 智 (TAKAHASHI, Tomo)
佐賀大学大学院 工学系研究科・准教授
研究者番号: 6 0 4 3 2 9 6 0