

令和元年5月29日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05084

研究課題名(和文)精密宇宙観測を用いた密度揺らぎの起源と宇宙進化の研究

研究課題名(英文) Exploring the origin of density fluctuations and the evolution of the early Universe in the precision cosmology era

研究代表者

高橋 智 (Takahashi, Tomo)

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：60432960

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年の宇宙観測の発展により、現在の宇宙の構成要素や宇宙の構造の起源となる原始密度揺らぎの性質が明らかにされてきている。しかしながら、宇宙初期に起こったと考えられているインフレーション、および、その後の初期宇宙の進化についての理解はまだ不十分である。本研究では、今後発展が期待される小スケールの密度揺らぎ、および、重力波の観測などを用いて、どのようにして初期宇宙進化、および、密度揺らぎの起源を解明できるかという観点で研究を行った。そして、具体的な将来観測を想定した場合に、初期宇宙進化、および、密度揺らぎの起源のどのような側面が今後の宇宙観測で検証できるかについて多くの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、初期宇宙の研究ではこれまであまり考えられていなかった観測(量)についても、初期宇宙進化、および、密度揺らぎの起源モデルの検証に有用であることを、具体的に幾つかのモデルにおける理論予言の解析も行いつつ示した。この点は本研究の意義深い点の一つである。

初期宇宙進化、密度揺らぎの起源を探る研究は、究極的には宇宙誕生の謎に迫る架け橋となる研究であり、究極的な根源知を追求するもので、人類の文化の蓄積に資するものと考えている。この点が本研究の社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：Recent precise cosmological observations have revealed various aspects of the Universe: the current energy budget of the Universe, the properties of primordial density fluctuations, and so on. Nevertheless, our understanding of the early Universe is still far from complete. In this research project, the evolution of the early Universe and the origin of density fluctuations have been explored, particularly focusing on small scale density fluctuations and gravity waves. By assuming concrete specifications of some future observations, we have analyzed expected constraints on models of the early Universe, then investigated what kind of models can be well tested by future observations. We believe that our findings have many implications for the research on the early Universe.

研究分野：宇宙論

キーワード：初期宇宙 精密宇宙観測 密度揺らぎ

## 1. 研究開始当初の背景

本研究開始の前年度には、宇宙背景放射の観測であるプランク衛星からの2回目のデータ公表もあり、それまでの宇宙観測から原始密度揺らぎのスケール依存性や原始重力波の振幅、非ガウス性などに対して厳しい制限が得られていた。しかしながら、それらの制限により多くのインフレーションモデルが排除される一方、プランク衛星のデータと整合しているモデルもまだ多く存在している状況であった。さらには、初期密度揺らぎの生成メカニズムについても、それまでに得られている観測データでは、そのメカニズムを峻別するには困難であった。しかしながら、今後、これまでの観測ではあまり探査されてこなかった小スケールの密度揺らぎや、重力波観測等において進展が見込まれており、そのような情報を用いた際、どこまで初期宇宙進化を明らかに出来るか、という動機で本研究は始まった。

## 2. 研究の目的

本研究では、それまでに得られていた宇宙観測の結果を念頭に、今後の宇宙観測の中でも特に進展が見込まれる小スケールの密度揺らぎ、重力波などの観測を用いた際、どのようにして、どこまで初期宇宙進化を明らかにできるか、を調べていくことを目的とした。さらには、これまではあまり考えられて来なかった物理量で、初期宇宙進化の探査に有用なものはどのようなものであるか、などについても検討し、密度揺らぎの起源、そしてインフレーション時期からその後の初期宇宙進化を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず小スケールにおける密度揺らぎに着目して、初期宇宙進化を探っていくことを目的の一つとした。そこで、まずは理論モデルにおけるその具体的な予言を幾つかの具体的なモデル、および、一般的なモデルの枠組みで解析を行った。そして、将来に計画されている具体的な小スケールの密度揺らぎの観測を想定し、どの程度まで初期宇宙進化のモデルを検証できるか解析を行った。さらには、今後の重力波観測を念頭に、宇宙初期に生成される重力波について、それぞれのモデル(一般的なモデルの枠組みも含む)における他の観測量との関係などにも着目しつつ、将来観測を具体的に想定した場合に、どの程度モデルの峻別が出来るか、という点についても調べた。

また、将来観測からの制限を解析する際はフィッシャー解析などを用いて、検討を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 将来の小スケールの密度揺らぎの観測を見据えた初期宇宙の探求

小スケールの密度揺らぎを用いたインフレーションモデルの峻別に関して、特にカーバトンモデル、modulated reheating 模型などの複数場インフレーションモデルを念頭に研究を行った。特に、将来の宇宙背景放射のスペクトル歪み( $\mu$ 歪み)の観測で、どの程度複数場モデルを峻別できるか、という観点で解析を行った。具体的に将来のPIXIEやPRISM等の観測で期待される精度を想定して解析を行い、複数場インフレーションモデルを検証する上で宇宙背景放射の $\mu$ 歪みの観測は非常に有用であることを示した[13](以下、[数字]は5.主な発表論文等〔雑誌論文〕のリストの中の論文番号に対応する)。

さらに、ミニハローからの中性水素21cm線パワースペクトルを用いて、原始密度揺らぎパワースペクトルのスケール依存性を将来観測からどの程度探ることが出来るか調べた[8]。具体的に将来の21cm線観測であるSKAなどを想定し、(密度揺らぎのスペクトル指数の波数依存性を表す)ランニングパラメタに対する将来観測からの精度を解析した結果、現在のプランク衛星のデータによる制限よりも格段にその精度が向上することが分かった。通常用いられるスペクトル指数、原始重力波の振幅(テンソル・スカラー比)の情報だけでは、理論予言が縮退し、峻別が難しいモデル間でも、ランニングパラメタに対する予言は一般には異なるため、今後このような小スケールの揺らぎの観測を用いたランニングパラメタの解析は、インフレーションモデル、密度揺らぎの起源、および、その後の初期宇宙進化の検証に有用である。

### (2) 複数場モデルにおける等曲率ゆらぎに関する研究

カーバトンモデル等の複数場インフレーションモデルにおいては、暗黒物質、または、バリオン数が生成される時期に依って、等曲率揺らぎが大きくなり得ることがある。しかしながら、プランク衛星などの宇宙背景放射のゆらぎの観測から、等曲率ゆらぎの振幅は非常に厳しく制限されている。よって、等曲率揺らぎが大きくなるモデルは観測から排除されるため、複数場モデルを考える際には、この等曲率揺らぎは考慮しなければならない制限の一つである。また、この等曲率ゆらぎの振幅の大きさは、インフレーション後に暗黒物質、バリオン数がどのように生成されるか、にも依るため、インフレーション後の宇宙進化を探る上でも有用である。本

研究では、カーバトン模型での等曲率揺らぎの生成について、これまでの研究での解析を見直し、再解析を行った。その結果、カーバトン場が宇宙（のエネルギー成分）を支配してから十分時間が経った後に崩壊する場合は、等曲率揺らぎが抑制されることが分かり、これまでの先行研究では排除されると考えられていた場合（パラメタ領域）でも、実は排除されない場合があることを示した[9]。この結果は、複数場インフレーション模型を考える上で重要である。

### (3) 「再加熱温度」の新しい探査方法

インフレーション後に宇宙が輻射優勢になる時の温度を「再加熱温度」と呼ぶ。初期宇宙進化過程を探る上で、この再加熱温度は非常に重要な量の一つである。標準的に考えられているシナリオでは、宇宙の再加熱は1度のみ起こるが、超弦理論などの高エネルギーの理論においては、宇宙初期にスカラー場が複数存在することは自然であり、このように複数存在する場合、宇宙初期において再加熱が2度起こる場合がある。インフレーション終了後に1度宇宙が輻射優勢になった後、インフラトン場以外のスカラー場が宇宙のエネルギー密度を支配し、そのスカラー場が崩壊することにより、2度目の再加熱が起こるようなシナリオである。このように2回再加熱が起こる場合、初期宇宙進化はインフレーション時期 輻射優勢期 スカラー場の(振動)エネルギー優勢期(宇宙膨張は物質優勢期の場合と同じ) 輻射優勢期、のように2度の輻射優勢期の中にスカラー場優勢期(物質優勢期)が存在する。このような場合、小さいスケールの物質密度揺らぎが増幅され、その結果ウルトラコンパクトミニハローを多く形成してしまう。ウルトラコンパクトミニハローについては、Fermi 衛星によるガンマ線観測から制限が得られており、この制限を用いると(暗黒物質の性質について仮定を置くことにより)2度目の再加熱温度に対して下限を得ることができる。解析の結果、ウルトラコンパクトハローから $0(10)-0(100)\text{MeV}$  という下限を得た[10]。この制限は暗黒物質の仮定に依るものの、ビッグバン元素合成からの制限より厳しくなっている。また、将来のパルサータイミングなどの観測からも2度目の再加熱温度に対して制限を与え得ることを指摘した[10]。

### (4) 重力波を用いた初期宇宙進化の研究

宇宙初期には、インフレーション、プレヒーティング、一次相転移など、重力波を生成するメカニズムが様々存在する。それらの生成機構はそれぞれ異なる重力波スペクトルを予言するため、重力波スペクトルを詳細に観測で調べることが出来れば、初期宇宙シナリオの検証に有用であると考えられる。それぞれのメカニズムにおける重力波スペクトルの詳細はモデルに依るが、多くの生成メカニズムにおいて、その重力波スペクトルは近似的にはスペクトル指数がある特徴的な周波数で変化するような(2重)べき乗則で記述できる。そこで、特徴的な周波数と二つのスペクトル指数を用いて重力波スペクトルを現象論的に記述して、将来の重力波観測(aLIGO-aVIRGO-KAGRA, および DECIGO)でどのようなスペクトルの場合に、どの程度重力波の生成機構を検証し得るか調べた[4]。フィッシャー解析を行うことにより、上記の将来観測でどの程度の精度で重力波スペクトルが検証できるか包括的に調べ、モデル(生成機構)の検証可能性について多くの知見を得た[4]。

また、一次相転移から生成される重力波に関して、具体的に素粒子物理の一次相転移のモデルを仮定した上で、そのモデルのパラメタ等が将来の重力波観測でどの程度の精度で決定できるか調べた研究もある[1]。パラメタの決定精度については、フィッシャー解析で定量的に評価した。この研究において、モデルのパラメタに対する一次相転移からの重力波による制限と加速器による制限が互いに相補的であることを具体的に示し、重力波が素粒子モデルの検証にも非常に有用であることを示した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)(すべて査読あり)

[1] Katsuya Hashino, Ryusuke Jinno, Mitsuru Kakizaki, Shinya Kanemura, Tomo Takahashi and Masahiro Takimoto

"Selecting models of first-order phase transitions using the synergy between collider and gravitational-wave experiments"

Physical Review D99, 075011 (2019)

DOI: 10.1103/PhysRevD.99.075011

[2] Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, Hiroyuki Tashiro, Shuichiro Yokoyama

"Probing primordial non-Gaussianity with 21 cm fluctuations from minihalos"

Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1902, 033 (2019)

DOI: 10.1088/1475-7516/2019/02/033

- [3] Shintaro Yoshiura, Keitaro Takahashi, Tomo Takahashi  
"Impact of EDGES 21-cm global signal on the primordial power spectrum"  
Physical Review D98, 063529 (2018)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.98.063529
- [4] Sachiko Kuroyanagi, Takeshi Chiba, Tomo Takahashi  
"Probing the Universe through the stochastic gravitational wave background"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1811, 038 (2018)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/11/038
- [5] Robert Brandenberger, Tomo Takahashi  
"Back-reaction of gravitational waves revisited"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1807, 040 (2018)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/07/040
- [6] Naoyuki Haba, Tomo Takahashi, Toshifumi Yamada  
"Sneutrinos as mixed inflaton and curvaton"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1806, 011 (2018)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/06/011
- [7] Ayuki Kamada, Tomo Takahashi  
"Dark matter kinetic decoupling with a light particle"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1801, 047 (2018)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/01/047
- [8] Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi, Hiroyuki Tashiro, Shuichiro Yokoyama  
"21 cm Angular Power Spectrum from Minihalos as a Probe of Primordial Spectral Runnings"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1802, 053 (2018)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2018/02/053
- [9] Naoya Kitajima, David Langlois, Tomo Takahashi, Shuichiro Yokoyama  
"Refined study of isocurvature fluctuations in the curvaton scenario"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1712, 042 (2017)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2017/12/042
- [10] Ki-Young Choi, Tomo Takahashi  
"New bound on low reheating temperature for dark matter in models with early matter domination"  
Physical Review D96, 041301 (2017)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.041301
- [11] Christian Byrnes, Guillem Domenech, Misao Sasaki, Tomo Takahashi  
"Strongly scale-dependent CMB dipolar asymmetry from super-curvature fluctuations"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1612, 020 (2016)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2016/12/020
- [12] Drazen Glavan, Tomislav Prokopec, Tomo Takahashi  
"Late-time quantum backreaction of a very light nonminimally coupled scalar"  
Physical Review D94, 084053 (2016)  
DOI: 10.1103/PhysRevD.94.084053
- [13] Kari Enqvist, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi  
"Mixed inflaton and spectator field models: CMB constraints and  $\mu$  distortion"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1604, 057 (2016)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2016/04/057
- [14] Kari Enqvist, Seshadri Nadathur, Toyokazu Sekiguchi, Tomo Takahashi  
"Decaying dark matter and the tension in  $\sigma_8$ "  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1509, 067 (2015)  
DOI: 10.1088/1475-7516/2015/09/067

(研究会、国際会議等での発表含む)

1)Tomo Takahashi

"Probing the early Universe with 21cm line"

(FAPESP-JSPS workshop on Dark Energy, Dark Matter and Galaxies, 2019年, Sao Paulo, Brazil)

2)Tomo Takahashi

"Probing the early Universe with 21cm line"

(The 2nd Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology, 2019年, Nagasaki, Japan)

3)高橋 智

"Probing the early Universe: Perspectives from current and future cosmological observations"

(第7回観測論的宇宙論ワークショップ, 2018年, 山口大学)

4)Tomo Takahashi

"Back-Reaction of Gravitational waves revisited"

(Cosmo 2018, 2018年, IBS, Daejeon, Korea)

5)Tomo Takahashi

"Back-Reaction of Gravitational waves"

(The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology, and gravitation, 2018年, Hokkaido, Japan)

6)Tomo Takahashi

"Possible roles of a spectator field in the early Universe"

(The origin and evolution of the Universe, 2017年, Jeju National University, Korea)

7)Tomo Takahashi

"How can we probe inflation and the origin of density fluctuations?"

(JGRG 26, 2016年, Osaka City University, Osaka, Japan)

8)Tomo Takahashi

"Aspects of Multi-field models of inflation"

(APCTP workshop "New Perspectives on Cosmology", 2016年, Asia Pacific Center for Theoretical Physics, Pohang, Korea)

9)Tomo Takahashi

"Decaying Dark Matter and Large Scale Structure"

(Busan Workshop on Particle Physics, String theory and Cosmology, 2015年, Busan, Korea)

10)Tomo Takahashi

"Aspects of Multi-field models of inflation"

(2nd LeCosPA International Symposium, 2015年, Taipei, Taiwan)

11)Tomo Takahashi

"Multi-field models of inflation and isocurvature fluctuations"

(International Workshop on Particle Physics and Cosmology, 2015年, Tohoku University, Sendai, Japan)

12)Tomo Takahashi

"Mixed Inflaton and Spectator Field Models: CMB constraints and  $\mu$  distortion"

(Cosmo 2015, 2015年, University of Warsaw, Poland)

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、研究者個人に帰属されます。