

令和元年6月11日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17659

研究課題名(和文) 宇宙論的観測で探る初期揺らぎの非線形性と初期宇宙モデルの検証

研究課題名(英文) Investigating non-linear property of primordial fluctuations from future cosmological observations and probing the physics of the early Universe

研究代表者

横山 修一郎 (YOKOYAMA, Shuichiro)

名古屋大学・基礎理論研究センター・助教

研究者番号：80529024

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：将来計画されている精密かつ大規模な宇宙論的観測による、インフレーションをはじめとした初期宇宙モデルの検証可能性についての研究を行った。結果として、これまで峻別が難しかったインフレーションモデルに対しても新たな知見が得られる可能性がわかった。また、大きな成果として、2015年に初検出された連星ブラックホールからの重力波の源が原始ブラックホールである可能性を指摘し、原始ブラックホール研究、さらには初期宇宙研究の新たな方向性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上記本研究で得られた結果により、2020年代の精密宇宙論的観測を通じて超高温高密度状態であったと考えられる初期宇宙の様子がより明らかになっていくことが期待される。つまり、地上実験では到底到達不可能なエネルギー状態における物理学の検証につながると考えられる。現在の物理学の基礎となっている素粒子標準模型や一般相対性理論がそのような高エネルギー状態で適用可能かどうかについての重要な知見が得られると考えられ、真の物理理論は何かという問いに迫るという意味で学術的に重要である。

研究成果の概要(英文)：I have investigated the possibility of probing the physics of early Universe from future planned cosmological observations. As a result, I have found that from the bunch of future cosmological observations we could obtain new and precise information about the physics of the early Universe, in particular, inflation.

As another important research result, I and collaborators open new research fields for the physics of the early Universe through the primordial black holes, by pointing out the possible detection of the primordial black holes as a source of the gravitational waves detected by LIGO/VIRGO collaboration.

研究分野：初期宇宙論

キーワード：インフレーション 初期密度揺らぎ 原始ブラックホール 宇宙マイクロ波背景輻射 宇宙大規模構造

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、宇宙マイクロ波背景放射の温度・偏光ゆらぎや宇宙の大規模構造などを通じた宇宙論研究は観測のめざましい発展により、非常に精密化してきている。これら観測される宇宙の構造は、初期宇宙に生成された小さな揺らぎにその起源を持つと考えられている。最近になって、その揺らぎの非線形進化に、理論・観測両面から注目が集まっている。

### 2. 研究の目的

本研究では、線形摂動論の範疇では現れなかったような非線形進化特有の現象に着目し、初期宇宙における宇宙論的揺らぎの非線形進化に対する精査をまず行ない、宇宙マイクロ波背景放射と宇宙の大規模構造の観測による検証について調べる。その結果から初期宇宙モデルに迫る。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的に基づき、初期揺らぎの非線形進化に対する理論評価の精密化、将来計画されている宇宙論的観測を用いた検証可能性、そして、以上に基づいた初期宇宙モデルへの示唆と大きく3つの観点から研究を遂行した。より具体的には、理論評価に対しては複数スカラー場インフレーションモデルにおける初期密度揺らぎの進化の精密解析、密度揺らぎと重力波、そして初期磁場間の非線形結合による新たな初期揺らぎ生成機構についての検証を行った。将来観測を用いた検証可能性に対しては、将来計画されている LSST や EUCLID をはじめとした大規模銀河サーベイや大型電波干渉計 SKA による電波銀河サーベイや高赤方偏移宇宙観測、さらに宇宙マイクロ波背景放射の精密偏光観測を念頭に置き、初期揺らぎの非線形性に対して将来期待される制限を評価する。

### 4. 研究成果

下記の主な発表論文にまとめた研究成果について記載する。

#### A) 将来の大規模銀河サーベイを用いた初期密度揺らぎの非ガウス性の検証

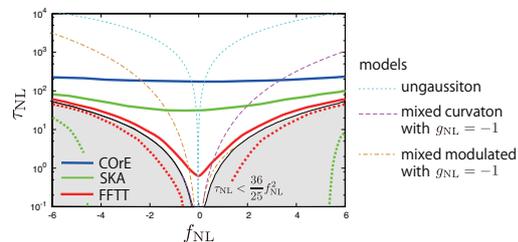
(雑誌論文 9), 11), 13))

本研究課題期間以前に、研究代表者は共同研究者とともに、初期密度揺らぎの非ガウス性が与える銀河3点相関への影響を精密評価を行い、汎用性の高い評価法を確立した。その評価法に基づき、実際に計画されている将来の大規模銀河サーベイから初期密度揺らぎの非ガウス性を表すパラメータに対してどの程度の制限が得られると期待されるかについて精査した。発表論文 9) では、EUCLID, SKA と呼ばれる分光サーベイを念頭に置き、パラメータへの制限を評価、現在の宇宙マイクロ波背景放射観測に比べて2-3倍程度強い制限が得られることを示した。12), 14) では、9) で仮定した非ガウス性パラメータとは異なるパラメータ(初期密度揺らぎの4点相関を記述するパラメータ)に対して期待される制限を評価した。観測計画としてはLSSTをはじめとした撮像サーベイを念頭においた。このパラメータに対しては宇宙マイクロ波背景放射観測に比べてより厳しい制限を得ることができることが明らかになった。

#### B) 高赤方偏移宇宙におけるミニハロー観測による初期非ガウス性の検証

(雑誌論文 2))

将来の大型電波望遠鏡による高赤方偏移宇宙のミニハロー観測を念頭に置き、上記A)で行った解析と同様の解析を行った。得られた結果と、研究代表者の先行研究により得られた各種のインフレーションモデルからの理論予想を比較することで、現在峻別の難しい模型に関しても制限可能となることを明らかにした(右図)。右図において、横軸と縦軸はそれぞれ初期揺らぎの3点相関、4点相関を特徴付けるパラメータ。細線が各種モデルにおける理論予想を表す。太線が将来のミニハロー観測により期待されるパラメータへの制限を表している。灰色で塗られた領域は理論的に禁止されている領域。表示しているパラメータ領域は、現状の宇宙マイクロ波背景放射観測では許されている領域であり、ミニハロー観測が初期揺らぎの非ガウス性への制限に非常に強力であることがこの図からわかる。



#### C) 統計的非等方性を持つ背景重力波生成モデルの提唱とその観測的検証可能性

(雑誌論文 1), 5))

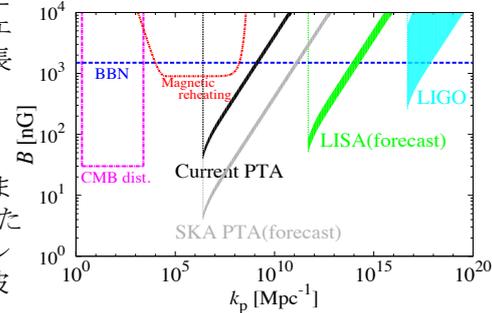
一般に超弦理論などの高エネルギー理論に基づく、インフレーション中にインフレーションを引き起こすスカラー場(インフラトン)とは別にゲージ場と結合した軽いスカラー場が存在するモデルも考えられる。下記の雑誌論文 5) では、そのようなモデルではある種の初期条件の元ではゲージ場が期待値を持つことでインフレーション中にも関わらず、宇宙はわずかではあるが非等方性を持つことがわかった。またその非等方性を通じて、そのゲージ場の量子揺らぎがテンソル型の揺らぎを誘発し、統計的な非等方性を持った特徴的な原始重力波が生成される可能性を指摘した。さらにその非等方性は従来の四重極タイプのみならず、さらに高次の多重極モー

ドにも現れることを明らかにした。

インフレーション中に生成された原始重力波は、宇宙マイクロ波背景輻射の偏光 B モード観測により検証可能である。雑誌論文 1) では、上記の研究に基づき、将来計画されている宇宙マイクロ波背景輻射偏光 B モード観測を用いた原始重力波の統計的非等方性の検証可能性を精査した。結果として、上記のモデルで予言される統計的非等方性が十分検証可能であることが明らかになり、これにより原始重力波の統計的非等方性が新たな初期宇宙のプロブとなることを提唱した。

D) 原始磁場による背景重力波生成とエントロピー生成の精査と原始磁場に対する観測的制限 (雑誌論文 3), 7)

銀河・銀河団にはマイクロガウス程度の磁場が付随していることが観測的に明らかとなっている。さらに近年の遠方高エネルギー天体の観測により、宇宙大規模構造のボイド領域にも磁場が存在する可能性が示唆されている。このような磁場は天体起源ではなく、初期宇宙の何らかの機構で生成された原始磁場起源である可能性があり、そのような原始磁場生成メカニズムに関する研究が盛んに行われている。本研究の研究対象でもあるインフレーションにおいても、そのような磁場生成の可能性が議論されており、原始磁場に対する観測的制限はインフレーションメカニズムの解明にも大いに役立つと考えられる。雑誌論文 3) では、原始磁場が作る非等方ストレスを通じて生成される原始重力波を評価し、現状の背景重力波振幅に対する制限から原始磁場に対する制限を見積もった。また、雑誌論文 7) では、原始磁場と初期宇宙の光子-電子プラズマとの相互作用を通じた原始磁場散逸の効果を評価し、その効果による初期宇宙におけるエントロピー生成量を評価した。ビッグバン元素合成期のバリオン光子比は軽元素量の観測により測られているが、それとは別に宇宙マイクロ波背景輻射観測からも最終散乱面でのバリオン光子比は精密に測定されている。両者を比較することで、ビッグバン元素合成期から最終散乱面までのエントロピー生成量に対して上限を与えることができる。以上背景重力波に対する観測制限とエントロピー生成量に対する上限から、我々は相関長が数 pc 程度の原始磁場の強度に対して従来より厳しい制限を得ることに成功した (右図)。

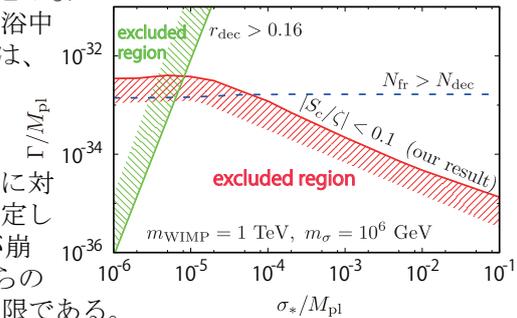


右図において、横軸が原始磁場の相関長を表し、縦軸が磁場の強度を表す。青線、マゼンタ線はこれまでの研究で得られた制限で、赤線が本研究で得られたエントロピー生成量からの制限である。黒線がパルサータイミングアレイから得られている背景重力波の制限から得られたもので、シアン線は LIGO

重力波干渉計からの制限を表す。灰色線、緑線は将来計画で期待される制限を表す。

E) カーバトンシナリオにおける物質等曲率揺らぎに対する精査 (雑誌論文 8)

カーバトンシナリオとは、インフレーション期に加速膨張を引き起こす源となるインフラトン場とは別の軽いスカラー場 (カーバトン) が存在し、インフレーション終了後輻射優勢期においてそのスカラー場が熱浴中の粒子へと崩壊することでそのスカラー場の持つ密度揺らぎが原始曲率揺らぎへと転換されるような初期揺らぎ生成機構である。そのようなモデルでは、一般に比較的大きな非ガウス性が出ることを示唆されており、その比ガウス性に関する研究は盛んに行われてきた。また、そのスカラー場が崩壊する前の輻射優勢期において、スカラー場の持つ密度揺らぎは等曲率揺らぎ (エントロピー揺らぎ) として振る舞い、その時期に暗黒物質が生成されるとその暗黒物質は物質等曲率揺らぎを持つことになり、宇宙マイクロ波背景輻射観測を通じて暗黒物質生成メカニズムにも迫ることができる。この



ようなカーバトンシナリオにおいては上記の通り、熱浴中のスカラー場ダイナミクスが重要となる。本研究では、その熱浴の効果を考慮し、カーバトンシナリオにおける物質等曲率揺らぎの進化を精査した。右図は、本研究の精密計算によって得られた、物質等曲率揺らぎの観測的制限を元にしたカーバトンシナリオに対する制限である。暗黒物質の質量や散乱断面積は固定している。横軸がカーバトン場の初期期待値、縦軸が崩壊率である。緑の excluded region は非ガウス性からの制限で、破線は本研究以前の等曲率揺らぎからの制限である。

赤い excluded region が本研究で得られた結果であり、図を見てわかるように初期期待値が大きい場合、観測的に許されるパラメータ領域が広がることがわかった。

F) 原始ブラックホールに関する研究 (雑誌論文 4), 12)

2015 年 9 月 14 日、米国の advanced LIGO 地上重力波干渉計がついに世界で初めて宇宙からの

重力波を検出した。解析によりその重力波源は太陽質量の30倍程度のブラックホール連星合体であることが報告された。本研究ではそのブラックホールが原始ブラックホールである可能性についての考察を行った。原始ブラックホールは一般には宇宙初期揺らぎが直接重力崩壊を起こして初期宇宙で形成された考えられている。この点において、原始ブラックホールは本研究目的と無関係ではなく重要な研究対象である。本研究の結果として、30太陽質量程度の原子ブラックホールが、暗黒物質の総質量の0.1%を占めているとすると、LIGOによって検出された重力波源として無矛盾であることがわかった。本研究により、世界中で原始ブラックホールが注目を浴びることになり、2015年以来、原始ブラックホール研究が非常に盛んとなっている。論文13)はPhysical Review Letters誌のeditor's suggestionに選定され、プレスリリースも行った。関連のweb記事も執筆した。

#### G) 初期揺らぎの非線形性から派生して行なった研究

(雑誌論文 6), 10), 14))

本研究では、宇宙初期揺らぎの非線形性に着目したが、その研究を通じて派生して行なった研究もある。論文6)では、上記A)で行なった、銀河3点相関の解析をもとに、初期揺らぎの非線形性ではなく、重力理論を変更した場合に銀河3点相関がどのような変更を受け、その3点相関の観測から重力理論に対してどのような制限が期待できるかを議論した。結果として、広く行われている、銀河2点相関だけでは制限不可能な修正重力理論に対しても有意な制限が得られることがわかった。さらに、10), 14)では、上記B)で行なった高赤方偏移宇宙観測を念頭に置き、初期揺らぎの非線形性ではなく、宇宙の再イオン化史の解明にとって重要な中性水素21cmの空間分布に現れる非線形性に着目した研究を行った。その結果、その非線形性の観測から、再イオン化期におけるイオン化源についての重要な知見をもたらす可能性があることを示した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14件)

(全て査読あり)

- 1) T. Sekiguchi, T. Takahashi, H. Tashiro, [S. Yokoyama](#)  
"Probing primordial non-Gaussianity with 21cm fluctuations from minihalos"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1902(2019)033
- 2) T. Hiramatsu, [S. Yokoyama](#), T. Fujita, I. Obata  
"Hunting for statistical anisotropy in tensor modes with B-mode observations"  
Physical Review D, 98(2018) no.8, 083522
- 3) S. Saga, H. Tashiro, [S. Yokoyama](#)  
"Limits on primordial magnetic fields from direct detection experiments of gravitational wave background"  
Physical Review D, 98(2018) no.8, 083518
- 4) M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka, [S. Yokoyama](#)  
"Primordial black holes -perspectives in gravitational wave astronomy"  
Classical and Quantum Gravity, 35(2018) no.6, 063001
- 5) T. Fujita, I. Obata, T. Tanaka, [S. Yokoyama](#)  
"Statistical anisotropic tensor modes from inflation"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1807(2018)023
- 6) S. Saga, H. Tashiro, [S. Yokoyama](#)  
"Magnetic reheating"  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 474(2018) no.1, L52-L55
- 7) Daisuke Yamauchi, [S. Yokoyama](#), H. Tashiro  
"Constraining modified theories of gravity with the galaxy bispectrum"  
Physical Review D, 96(2017) no.12, 123516
- 8) N. Kitajima, D. Langlois, T. Takahashi, [S. Yokoyama](#)  
"Refined study of isocurvature fluctuations in the curvaton scenario"  
Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1712(2017) no.12, 042
- 9) D. Yamauchi, [S. Yokoyama](#), K. Takahashi  
"Multitracer technique for galaxy bispectrum: An application to constraints on nonlocal primordial non-Gaussianities"  
Physical Review D, 95(2017) no.6, 063530
- 10) H. Shimabukuro, S. Yoshiura, K. Takahashi, [S. Yokoyama](#), K. Ichiki  
"Constraining the epoch of reionization model parameters with the 21cm bispectrum"  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 468(2017) no.2, 1542-1550

- 11) I. Hashimoto, S. Mizuno, S. Yokoyama  
“Constraining equilateral-type primordial non-Gaussianities from imaging surveys”  
Physical Review D, 94(2016) no.4, 043532
- 12) M. Sasaki, T. Suyama, T. Tanaka, S. Yokoyama  
“Primordial black hole scenario for the gravitational-wave event GW150914”  
Physical Review Letters, 117(2016) no.6, 061101
- 13) I. Hashimoto, A. Taruya, T. Matsubara, T. Namikawa, S. Yokoyama  
“Constraining higher-order parameters for primordial non-Gaussianities from power spectra and bispectra of imaging surveys”  
Physical Review D, 93(2016) no.10, 103537
- 14) H. Shimabukuro, S. Yoshiura, K. Takahashi, S. Yokoyama, K. Ichiki  
“21cm line bispectrum as a method to probe cosmic dawn and epoch of reionization”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 458(2016) no.3, 3003-3011

[学会発表] (計 7件)

(国際会議・研究会における招待講演のみ記載)

- 1) Shuichiro Yokoyama “Dark Energy” The 4<sup>th</sup> KMI international symposium, 2019 February
- 2) Shuichiro Yokoyama “Clustering of primordial black holes” The 2<sup>nd</sup> Korea-Japan bilateral workshop on String Axion Cosmology, 2019 January
- 3) Shuichiro Yokoyama “A new constraint on PBH abundance and its implications” The 2<sup>nd</sup> NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology and gravitation, 2019 January
- 4) Shuichiro Yokoyama “Gravitational Wave Background from Primordial Magnetic Fields” The first NRF-JSPS workshop in particle physics, cosmology and gravitation, 2018 July
- 5) Shuichiro Yokoyama “Isocurvature fluctuations in the curvaton scenario” The origin and evolution of the Universe, 2017 May
- 6) Shuichiro Yokoyama “PBH scenario for GW150914” Workshop on Particle Physics, Cosmology, and Gravitation, 2016 September
- 7) Shuichiro Yokoyama “Excavating primordial non-Gaussianities in large scale structure” 2015 September

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0件)
- 取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等

(研究成果に関する記事) <https://academist-cf.com/journal/?p=2307>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

なし

### (2) 研究協力者

なし

※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。