

令和元年9月2日現在

機関番号：56203

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H07319

研究課題名（和文）原始重力波のガウス性検定によるインフレーション宇宙の徹底究明

研究課題名（英文）Testing Gaussianity of primordial gravitational waves toward understanding the inflationary Universe

研究代表者

白石 希典 (Shiraishi, Maresuke)

香川高等専門学校・一般教育科（高松キャンパス）・助教

研究者番号：00803446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目標は、原始重力波のガウス性検定を通してインフレーション中に存在する素粒子の個数や性質を特定し、宇宙の始まりに関する理解を深めることである。そのために、重力子やアクシオンに関する理論的、観測的研究を行った。前者では、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の既存データから重力子の質量を推定し、ゼロと無矛盾であることを突き止めた。後者では、CMBや背景重力波の将来観測計画(LiteBIRDやLISA)が成功すれば、アクシオンの基本的性質(ゲージ場との結合の強さなど)に対する未知の情報が得られることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今回の研究で得た重力子の質量の上限値は世界初のものであり、観測される宇宙像と無矛盾なインフレーションモデルを構築する上で貴重な情報となっている。一方で、将来的に高解像度のCMBデータ解析が実現すれば、微小な質量を持つ重力子も見つかるかもしれない。また、アクシオンの性質に関しても、宇宙観測技術の精度向上とともに新たな情報にアクセスできる可能性がある。本研究は、宇宙開闢に関する最新の理解を提供するとともに、将来研究の道筋を示す役割も担っている。

研究成果の概要（英文）：A main goal of this project is to understand the origin of our universe more deeply by determining the inflationary particle content through tests for Gaussianity of primordial gravitational waves (GWs). We therefore examined for inflationary gravitons and axions by means of both theoretical and observational approaches.

The graviton mass was then constrained from the observed data of the cosmic microwave background (CMB) anisotropies, and a massless scenario is accordingly preferred. Our forecast analysis on axions indicates that unknown information on some fundamental properties (e.g. a coupling strength) could be obtained from future CMB and interferometric GW experiments such as LiteBIRD and LISA.

研究分野：宇宙論

キーワード：原始重力波 非ガウス性 インフレーション CMB アクシオン Chern-Simons修正重力 超弦理論 パリティの破れ

## 1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙の初期条件に関する謎は、人間の根源にも関わる大問題であり、専門家、非専門家問わず誰もが1度は抱く疑問である。ここで提案する研究計画は、その答えに迫ろうとするものである。

これまでの宇宙観測結果から、我々の宇宙は極初期においてインフレーションと呼ばれる加速膨張を体験し、その後緩やかに大きくなっているということが広く認められた。これは、宇宙が誕生して間もない頃はマイクロな世界であったということの意味する。従って、星、銀河、銀河団といった宇宙の豊かな構造はすべて、初期宇宙の量子揺らぎの中に起源を持ち、それが重力進化してできたというのが自然な解釈となっている。

このようなシナリオは、全天からやってくる宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の強度の空間的な揺らぎを詳細に解析することによりわかってきた。CMB揺らぎはその生成過程が理論的に明確であるため、解析によって初期条件となる原始揺らぎの情報を比較的簡単に抽出できるという利点を持っている。CMBは宇宙の初期条件に関する最もクリーンな観測量と言える。

宇宙論解析で扱う「揺らぎ」はテンソル量であるため独立な成分が6つある。それらのダイナミクスを解く際には、スピン固有関数で分解して扱うのが便利である。ここで、スピン0成分は物質(バリオン、ダークマターなど)の密度の揺らぎやニュートンの重力ポテンシャル、スピン1成分は渦度、スピン2成分は重力波に対応しており、それぞれ、スカラー、ベクトル、テンソルモードという。CMB揺らぎは、エネルギー密度(温度揺らぎ)と2つの偏光成分の強度(E/Bモード揺らぎ)によって定量化されるが、スカラーモードが温度とEモード偏光のみしか作らないのに対して、ベクトル、テンソルモードは温度、Eモード偏光、Bモード偏光全て生成する。これまでのCMB解析から、スカラーモードの初期条件についてはよくわかっている。一方で、テンソルモードの初期条件、つまり原始重力波に関しては、Bモード偏光が未発見ということもありよくわかっていない。

原始重力波は、宇宙太古の時空構造に依存する物理量である。従ってそれが検出されれば、インフレーションのエネルギースケールや真空状態がわかると信じられている。しかしそれは、原始重力波をソースする粒子がインフレーション中に何も存在しないという仮定のもとでのみ成り立つ話である。例えば、インフレーション中にゲージ場が存在する場合は、そこから大きな重力波が作られ、真空の量子揺らぎ起源のものを完全に隠してしまう。インフレーション中の真空状態を知るためには、まず、原始重力波の起源を特定することが必須なのである。

ソース場の有無を判定するには、CMB揺らぎの統計的性質を調べるのが有効である。真空起源の重力波はランダムガウス場であると考えられるので、そこから作られるCMB揺らぎもガウス統計に従う。一方で、ソース場起源の重力波は相互作用の大きさによってはガウシアンから大きく逸脱し、生成されるCMB揺らぎに強い非ガウス性が残る。

このCMB揺らぎを用いた原始重力波のガウス性検定にいち早く可能性を見出し、研究を世界的にリードしてきたのが研究代表者であり、ここ数年で、テンソルモード起源のCMB高次相関関数の計算手法の開発、具体的な宇宙モデルから生じるシグナルの理論予言、観測データを用いたその検証など、様々な成果を上げてきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、このような研究を大きく飛躍させる。具体的には、(1)重力子が有限の質量を持つインフレーションモデルで生成される原始重力波のガウス性検定、(2)アクシオンインフレーションモデルで生成される原始重力波のガウス性検定、というテーマに挑戦する。

テーマ(1): 重力子が有限の質量を持つ重力理論では新たなスカラー場の生成が起き、それが重力波の非ガウス性をソースする。そのような重力波が特徴的なCMB揺らぎの3点相関関数(バイスペクトル)を作り、観測可能であると研究代表者の先行研究で理論予言したにもかかわらず、観測データを用いた検証はまだできていない。これをテーマ(1)で行い、得られた結果から新たなスカラー場の存在の有無を判定し、原始宇宙の重力子の性質や真空の状態に対する情報を得る。

テーマ(2): アクシオンは超弦理論などで自然に発生する粒子であり、インフレーション中にアクシオンが存在し宇宙論観測に影響を及ぼす可能性が指摘されている。アクシオンはゲージ場との相互作用やChern-Simons重力相互作用を通してノンガウシアンでパリティの破れた重力波を生成する。研究代表者の先行研究では、U(1)ゲージ場のモデルを既に解析しており、Bモード偏光のバイスペクトルやミンコフスキー汎関数を用いた重力波のガウス性検定が有用であることを発見している。テーマ(2)では、SU(2)ゲージ場のモデルやChern-Simons修正重力モデルの解析を新たに行う。生成されるCMB温度、偏光スペクトルの理論解析を行って、LiteBIRDなど次世代CMB観測プロジェクトでどれだけ検証精度が向上するのか推定し、将来観測へのモチベーションを与える。

### 3. 研究の方法

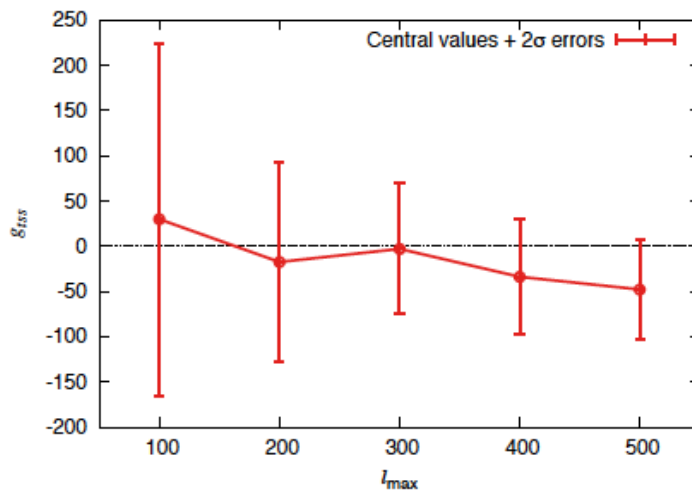
テーマ(1): WMAP 衛星が観測した温度マップを用いて、研究代表者の先行研究で計算された CMB バイスpekトルの理論テンプレートの大きさの測定を行う。まず、観測データから計算したバイスペクトルと理論テンプレートを比較し、ベストフィット値を求める。次に、実際の観測データを再現するような擬似マップを数百枚作成し、それら 1 枚 1 枚を理論テンプレートと比較して、得られた値の標準偏差からエラーバーを推定する。これら一連の計算の手法は、研究代表者の先行研究で確立しており、それは理論モデルによらない一般的なものであるため、本研究にもそのまま適用可能である。観測データの処理や擬似マップの作成の際には、観測機器の雑音、観測領域の形状、銀河内のダストなどが出す非宇宙論的なシグナルが与える影響を正確に考慮する必要があるが、これらも研究代表者の先行研究で得たノウハウがそのまま使える。これら一連の計算は大規模並列計算機を用いて行う。得られた結果から、ソース場の有無を判定し、原始重力波の起源について議論する。

テーマ(2): SU(2)モデルや Chern-Simons 修正重力理論における原始重力波から作られる CMB 統計量の理論計算を行う。研究代表者の先行研究で開発した CMB バイスpekトルの計算手法は理論モデルによらない一般的なものであるため、ここではそれをそのまま適用して計算できる。原始重力波のスペクトル計算では、研究協力者の力を借りる。ここでは、B モード偏光とともに、温度や E モード偏光の統計量も計算する。E/B モード偏光の解析では、国産の次世代 CMB 観測プロジェクトである LiteBIRD において期待されるシグナルノイズ比を計算する。これらの結果から、原始重力波の起源の研究に関する今後の進展を議論する。

### 4. 研究成果

テーマ(1): 実際の CMB 観測データからこのモデルで予言される重力波の非ガウス性を検証した。具体的には、WMAP 衛星が観測した温度マップを用いて、重力波スカラー-スカラー-3 点相互相関関数の大きさ(gtss)の推定を行った。結果として有限のシグナルが検出されなかったことから、重力子の質量やスカラー場との相互作用の強さに対する新たな制限が得られた。この結果は WMAP で観測可能な大スケール領域 ( $l_{\max} = 500$ )には際立った痕跡が存在しないことを意味するが、それより小スケール ( $l_{\max} > 500$ )には存在する可能性が依然残されており、Planck データなどを用いたさらなる検証が必要である(図 1)。なおこの仕事は、重力波スカラー-スカラー-3 点相互相関関数の推定に成功した初めての例として世界的に認められている[4]。

図1: WMAP温度マップから得られた重力波スカラー-スカラー-3点相互相関関数の大きさ(gtss)の制限値[4]。  $l_{\max} = 500$  までの解析ではゼロと無矛盾である。この結果は、重力子の質量がゼロであり、新たなスカラー場の生成も起きない初期宇宙像を示唆する。



テーマ(2): Chern-Simons 修正重力理論の解析では、CMB 温度場(T)または E モード偏光場(E)と B モード偏光場(B)の 3 点相互相関関数(BBT, BBE)が最もクリアな観測量となることを発見した(図 2)。これまでの 2 点相互相関関数(TB, EB)を用いた解析ではわからなかった情報にも BBT, BBE を使えばアクセスできることが明らかとなり、アクシオン探査や重力波パリティの検証に関する新たなアプローチを提案した[1]。

SU(2)モデルの解析では、特定の場合に CMB 2 点相関関数(BB など)に非自明な振動が現れることを発見した[arXiv:1812.03667]。同様の事象は CMB 3 点相関関数(BBB など)にも現れると考えるのが自然であり、今後の追研究が期待される。また、CMB 観測では検証不可能な理論パラメータ領域も、将来の重力波干渉計観測実験において検証できることを明らかにした[3]。これは、初期宇宙研究においても重力波天文学と光天文学の融合が重要となることを示唆している。

この他のテーマに関しても、理論、観測双方から研究を進めており、ソース粒子の有無に対する新たな見解を得ている。成果は以下に記すようにすでに複数の論文にまとめ、世界に公表している。これらを今後の研究で発展させ、宇宙の初期条件に関するさらなる理解を目指す。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

雑誌名の略:

- JCAP = Journal of Cosmology and Astroparticle Physics,
- PRD = Physical Review D,
- MNRAS = Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

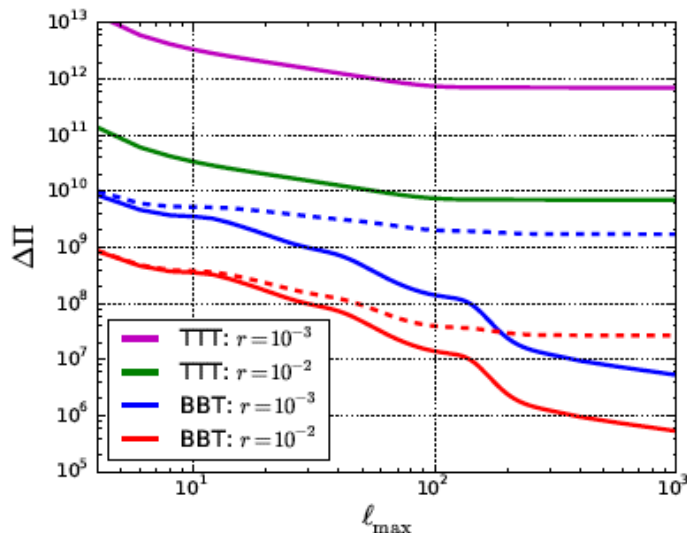
以下は全て査読付原著論文である。

1. N. Bartolo, G. Orlando, M. Shiraishi, “Measuring chiral gravitational waves in Chern-Simons gravity with CMB bispectra”, JCAP 1901, 050 (2019/01), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/01/050>
2. G. Franciolini, A. Kehagias, A. Riotto, M. Shiraishi, “Detecting higher spin fields through statistical anisotropy in the CMB bispectrum”, PRD 98, 043533 (2018/08), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.043533>
3. B. Thorne, T. Fujita, M. Hazumi, N. Katayama, E. Komatsu, M. Shiraishi, “Finding the chiral gravitational wave background of an axion-SU(2) inflationary model using CMB observations and laser interferometers”, PRD 97, 043506 (2018/02), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.043506>
4. M. Shiraishi, M. Liguori, J. R. Fergusson, “CMB bounds on tensor-scalar-scalar inflationary correlations”, JCAP 1801, 016 (2018/01), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/01/016>
5. N. Bartolo, A. Kehagias, M. Liguori, A. Riotto, M. Shiraishi, V. Tansella, “Detecting higher spin fields through statistical anisotropy in the CMB and galaxy power spectra”, PRD 97, 023503 (2018/01), <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.023503>
6. N. S. Sugiyama, M. Shiraishi, T. Okumura, “Limits on statistical anisotropy from BOSS DR12 galaxies using bipolar spherical harmonics”, MNRAS 473, 2, 2737 [stx2333] (2017/09), <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2333>
7. A. Ravenni, M. Liguori, N. Bartolo, M. Shiraishi, “Primordial non-Gaussianity with  $\mu$ -type and  $\gamma$ -type spectral distortions: exploiting Cosmic Microwave Background polarization and dealing with secondary sources”, JCAP 1709, 042 (2017/09), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/09/042>
8. G. Domenech, T. Hiramatsu, C. Lin, M. Sasaki, M. Shiraishi, Y. Wang, “CMB scale dependent non-Gaussianity from massive gravity during inflation”, JCAP 1705, 034 (2017/05), <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/05/034>

[学会発表](計 4 件)

- M. Shiraishi, “Current and future constraints on gravitational wave non-Gaussianities”, Accelerating Universe in the Dark, YITP 2019/03
- M. Shiraishi, “Finding higher spinning particles through cosmic symmetry breakings”, Colloquiums and Seminars, ASIAA, Taipei (Taiwan) 2019/02
- 白石希典, “Seeking higher spin fields through cosmic symmetry breakings”, 宇宙論セミナー, 神戸大学 2017/11
- 白石希典, “CMB B-mode non-Gaussianity search”, LiteBIRD F2F 会議, 岡山大学 2017/09

図2: Chern-Simons修正重力モデルで実現するパリティ破れた重力波非ガウス性の検出可能な最小の値[1]。TTTよりBBTの方が小さな値を検出できることが見て取れる。



## 6 . 研究組織

### (2)研究協力者

研究協力者氏名 : Nicola Bartolo, Giorgio Orlando, Gabriele Franciolini, Alex Kehagias, Antonio Riotto, Ben Thorne, Tomohiro Fujita (藤田智弘), Masashi Hazumi (羽澄昌史), Nobuhiko Katayama (片山伸彦), Eiichiro Komatsu (小松英一郎), Michele Liguori, James R. Fergusson, Vittorio Tansella, Naonori S. Sugiyama (杉山尚徳), Teppei Okumura (奥村哲平), Andrea Ravenni, Guillem Domenech, Takashi Hiramatsu (平松尚志), Chunshan Lin, Misao Sasaki (佐々木節), Yi Wang

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。