

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月15日現在

機関番号：12611

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22840043

研究課題名（和文）

初期ゆらぎの生成に関する基礎的問題

研究課題名（英文）

Fundamental problems in a generation of a primordial perturbation

研究代表者

浦川 優子 (URAKAWA YUKO)

お茶の水女子大学・理学部・学部教育研究協力員

研究者番号：80580555

研究成果の概要（和文）：インフレーションは、宇宙背景輻射と整合的な宇宙論的揺らぎを説明できるため初期宇宙モデルとして広く受け入れられてきた。しかし、そのモデルに関しては不確かさが多く残されている。そこで重要となるのが、宇宙初期に生成されたゆらぎを、観測を通じて明らかにすることである。我々は、観測量と比較されるべき揺らぎの理論予言を与える際に、観測可能な領域は全宇宙の一部である有限の領域であることを考慮すると、計算結果が大きく変更され得ることを示した。また、観測量となる揺らぎの計算方法の定式化を行った。

研究成果の概要（英文）：Inflation has become the leading scenario of the early universe by explaining the large scale temperature fluctuation of the cosmic microwave background. In spite of the great success of the inflationary scenario, there is a huge ambiguity in the model of inflation. To obtain more detailed information regarding the model of inflation, it is crucial to observe the non-linear primordial fluctuations. To calculate an observable large scale fluctuation in each model of inflation, it is necessary to take into account the finiteness of the observable region. We establish a way to calculate a non-linear observable fluctuation based the gauge-invariant perturbation theory in a local universe.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	840,000	252,000	1,092,000
2011年度	770,000	231,000	1,001,000
総計	1,610,000	483,000	2,093,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：(1)インフレーション (2)宇宙背景輻射 (3)非線形摂動 (4)ゲージ不変摂動論 (5)赤外発散 (6)非ガウス性

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙背景輻射（CMB）や大規模構造（LSS）の観測に代表される宇宙論的観測の技術向上に伴い、宇宙の姿は精密科学として議論することが可能となった。宇宙の進化過程は、地上実験では検証できない高エネルギー

一状態の物理法則や超マクロな宇宙論的スケールの物理法則に大きく依存する。従って、宇宙の精密観測によってこのような極限的な状況における物理法則を明らかにすれば、宇宙論のみならず物理学の大きな進歩に繋がると考えられる。

ビッグバン宇宙論は観測と整合的な宇宙の膨張則、3Kの宇宙背景輻射、及び軽元素量を説明することにより標準理論としての地位を確立した。しかし、ビッグバン宇宙論に基づいて現在の宇宙を理解するには、宇宙の初期条件を非常に高い精度で微調整する必要がある。この初期条件の不自然さを解決すべく提案されたのがインフレーション理論である。ビッグバン元素合成の時期よりもはるか以前に加速膨張期があったと考え、より普遍的な初期条件の下で、空間的にほぼ一様等方な現在の宇宙の幾何構造を説明することができる。また現在の大規模構造の種となる初期ゆらぎを生成できる点も、インフレーションの魅力の一つである。

インフレーション理論は基本的枠組みにおいては大きな成功を収めているが、その現実的モデルの構築に於いては多くの課題が残されており、現在までに膨大な数のインフレーションモデルが提案されてきた。こうした状況を打開する切り札として期待されているのが、CMBやLSSなどの精密観測を通じて、インフレーション期に生成されたゆらぎを観測的に明らかにすることである。初期ゆらぎにはインフレーションモデルの情報が刻まれており、ゆらぎの詳細な解析によってインフレーションのダイナミクスが明らかになると期待されている。インフレーションを起こすスカラー場の量子ゆらぎによって生成された密度ゆらぎは、急速な宇宙膨張によって引き延ばされ、宇宙の構造の起源となる古典統計的なゆらぎとなる。そのゆらぎの振幅は 10^{-5} 程度と非常に小さいため、線形摂動で十分よく近似される。しかし、線形解析の範囲内でゆらぎの2点相関を考えると、異なる理論に基づいて提唱された多くのインフレーションモデルが、観測と整合的なゆらぎを予言する。このモデルの縮退を解くためには、3点以上の相関関数によって特徴づけられる非ガウス性やループ補正といった非線形効果に着目することが必要となる。特にゆらぎの3点相関関数については、既に観測的制限を議論することが可能な段階に入っており、実際にいくつかのインフレーションモデルが棄却され始めている。

観測精度の向上に伴い初期ゆらぎについて多くの情報を得ることが可能となったが、その一方で、インフレーション中に生成される揺らぎの理論計算においてはいくつかの重要な問題が残されている。CMBの温度揺らぎなど、実際に観測される揺らぎは非物理的な自由度を含まないゲージ不変な揺らぎであるはずである。従って、観測データと比較すべき理論テンプレートを与えるためには、ゲ

ージ不変摂動論の実現が不可欠であるが、後述のように従来の方法には重大な問題点があった。一方、初期ゆらぎのループ補正は、紫外だけでなく赤外でも発散することが、M. Slothらにより指摘されてきた。初期揺らぎの理論予言を行うためには、これらの発散の正則化の方法を示す必要がある。

2. 研究の目的

従来のゲージ不変摂動論は、“我々は宇宙全体のゆらぎを観測しよう”という仮定の下で議論されてきた。しかし、実際に観測可能なのは、我々と因果的に結びつきのある宇宙の一部の領域のみである。宇宙全体のような無限の空間領域におけるゲージ不変摂動論と、観測可能な領域のような有限の領域におけるゲージ不変摂動論の相違は、これまでほとんど認識されていなかった。前者の場合、空間的無限遠で正則なゲージ変換のみに対する不変性を要請すればよい。一方、後者の場合には、観測可能でない無限遠での正則性を要請する必要はないため、より広いクラスのゲージ変換に対する不変性を要請する必要がある。本研究の目的は、観測量となる有限の領域におけるゲージ不変性(以下、真のゲージ不変性)を保つ量の計算方法を確立し、観測量となる宇宙論的な揺らぎの理論計算を行うことにある。

3. 研究の方法

2009年度までの我々の研究において、従来の摂動論では無限の領域におけるゲージ不変性は保たれていたが、実際の観測量に対して保証されるべき有限の領域におけるゲージ不変性が保たれていないことがわかった。そこで、観測可能でない領域の影響を受けない真にゲージ不変な量を計算するため以下のような方法をとった。量子論に於ける相関関数は、演算子と量子状態という2つの構成要素からなる。真にゲージ不変な演算子を構成し、また観測可能でない領域の影響を受けない量子状態を選ぶことにより、観測量となる相関関数を計算することが可能となる。観測量となる揺らぎの定式化を行い、その後具体的なモデルにおいて予言される揺らぎの計算を行い、観測との比較を行った。

4. 研究成果

(1) 真のゲージ不変摂動論の構築

論文[4]では、スピン0の成分である密度揺らぎに対して有限の領域におけるゲージ不変摂動論を行う方法を具体的に提案した。量子相関関数がゲージ不変であるためには、演算子と量子状態がともにゲージ不変である必要がある。まず、我々はゲージ不変な演算子の構成を行った。我々は、物理的な座標である測地座標を導入し、この座標においてゆら

ぎを評価することにより、真にゲージ不変な演算子が構成できることを示した。次に、量子状態としてどのような状態を選べば、観測可能でない領域の影響を受けない真にゲージ不変な量となる相関関数が得られるかを調べた。その結果、この要請を満たす量子状態は非常に強く制限され、真空状態であれば、ほぼ一意的に量子状態が定まっているということがわかった。また、このような観測量となるゲージ不変な相関関数を考える限り、赤外補正は正則化されていることがわかった。論文[3]では、スピン2の成分である重力波を含む系に拡張し、真のゲージ不変量の計算を行った。従来の摂動論に基づく計算では、重力波のループ補正も赤外発散を出すことが知られていたが、真のゲージ不変性を要請することにより赤外補正は正則化されることを示した。

(2) 一般化されたモデルにおける真のゲージ不変摂動論

(1) では我々は、正準形の運動項をもつスカラー場がゆっくりポテンシャルを転がる(スローロール)際に引き起こされる“標準的な”インフレーションモデルにおいて、予言される初期揺らぎを調べてきた。しかし、観測データとの整合性からこのような“標準的”モデルであることが要請されている訳ではなく、より一般的なモデルの可能性を考える必要がある。また、統一理論として期待されている超弦理論やその低エネルギー有効理論である超重力理論に基づき、非正準形の運動項をもつスカラー場やスローロール条件を満たさないスカラー場によるインフレーションモデルが提案されているため、この一般化は非常に重要である。これらの一般的なモデルの中には、現在稼働中の PLANCK 衛星によって検出可能な程度の大きな非ガウス性を予言する可能性があることが、従来の摂動論に基づく計算によって示されている。従って、真のゲージ不変摂動論を用いて観測可能な初期揺らぎを再評価することは非常に重要である。我々は、①スローロール条件を外した場合及び②非正準系の運動項をもつスカラー場を考えた場合に拡張を行い、(1)と同様にして量子状態が満たすべき条件を導き、観測量となる初期揺らぎの定式化を行った。これらの結果は、現在執筆中の論文において発表する予定である。

(3) 真のゲージ不変摂動論に基づく初期揺らぎの非ガウス性

論文[2]では、論文[3], [4]で提案した真のゲージ不変摂動論に基づき、一成分のスカラー場を含むインフレーションモデルにおいて3点相関の計算を行った。その結果、従来の摂動論において計算された3点相関の

主要な項は、観測されることのないゲージモードであり、真のゲージ不変性を要請すると、従来の予言は大きく変更されることがわかった。論文[2], [3], [4]では一成分系を考えたが、論文[1]ではインフレーション期に複数のスカラー場を含む多成分系への拡張を行った。真のゲージ不変性の要請の下、量子状態に対して要請される条件を導出し、また多成分系において予言される初期揺らぎの計算を行った。

これらの研究は、真のゲージ不変摂動論の構築が、よりアカデミックな観点から重要な赤外発散の正則化のためだけではなく、観測データと比較されるべき初期揺らぎの理論予言を与えるためにも不可欠であることを示している。

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4件)

全て査読有り

- ① 浦川 優子 “Influence of gauge artifact on adiabatic and entropy perturbations during inflation.”, Progress of Theoretical Physics, 理論物理学刊行会, 126, 961-982, 2011
- ② 田中 貴浩, 浦川 優子 (in alphabetical order) “Dominance of gauge artifact in the consistency relation for the primordial bispectrum.”, JCAP, 英国物理学協会出版局, 1105, 014, 1-17, 2011
- ③ 浦川 優子, 田中 貴浩 “Natural selection of inflationary vacuum required by infra-red regularity and gauge-invariance.”, Progress of Theoretical Physics, 理論物理学刊行会, 125, 1067-1089, 2011
- ④ 浦川 優子, 田中 貴浩 “IR divergence does not affect the gauge-invariant curvature perturbation.”, Physical Review, APS, D 82, 121301, 1 - 5, 2010

[学会発表] (計10件)

- ① 浦川 優子, 田中 貴浩 “Implications of genuine gauge invariance & inflationary vacua”, Backreaction where do we stand, パリ (フランス), 2011年11月22日
- ② 浦川 優子, Jaume Garriga “Primordial perturbations in holographic inflation.”, CPAN days, バルセロナ (ス

ペイン)、2011年11月3日

(3)連携研究者
無し

- ③ 浦川 優子、田中 貴浩
“Gauge-invariant perturbations in the local universe- Applications -. ”、UK-Cosmo Meetings Cosmology Workshop、ポーツマス (イギリス)、2010年9月19日
- ④ 浦川 優子、田中 貴浩 “Dominance of gauge artifact in the consistency relation for the primordial bispectrum.”、Cosmo 11、ボルト (ボルトガル)、2010年8月23日
- ⑤ 浦川 優子、Jaume Garriga、田中 貴浩 “Gauge artifacts in primordial bi-spectrum & holographic non-Gaussianity.”、SI 2011、人材開発センター (富士吉田/山梨県)、2011年8月4日
- ⑥ 浦川 優子、田中 貴浩 “Revisit of primordial Non-Gaussianities in gauge-invariant perturbation theory.”、Extra-Dimension Probe by Cosmophysics、高エネルギー加速器研究所、2010年11月8日
- ⑦ 浦川 優子、田中 貴浩 “IR regularity and gauge invariance.”、Cosmological Backreaction Workshop、McGill university (カナダ)、2010年10月31日
- ⑧ 浦川 優子、田中 貴浩 “IR divergence problem in single field models of inflation.”、IR Issues and Loops in de Sitter Space、Perimeter institute (カナダ)、2010年10月27日
- ⑨ 浦川 優子、田中 貴浩 “Implications of genuine gauge invariant perturbations.”、COSMO/COSPA 2010、東京大学、2010年9月30日
- ⑩ 浦川 優子、田中 貴浩 “IR divergence problem during inflation.” GC2010、京都大学基礎物理学研究所、2010年6月2日

6. 研究組織

(1)研究代表者

浦川 優子 (URAKAWA YUKO)
お茶の水女子大学・理学部
学部教育研究協力員

研究者番号 : 80580555

(2)研究分担者

無し