

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740161

研究課題名(和文)「最も一般的なインフレーションモデル」による宇宙論の展開

研究課題名(英文)Cosmology based on the most general single-field inflation model

研究代表者

小林 努(Kobayashi, Tsutomu)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号：40580212

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)：アインシュタインの一般相対性理論を拡張した重力理論の諸側面を研究した。特に、そのような理論を宇宙論的観測により検証することを目指し、密度揺らぎと重力波の相互相関関数の解析をおこなった。また、そのような理論におけるブラックホールの安定性を判定する一般公式を導出した。そして、広いクラスのブラックホール解が不安定であることを証明した。それに加え、最も一般的な単一場インフレーションモデルを複数場の場合に拡張するために、先行研究の提案が誤りであることを示し、一般的な運動方程式まで導出をおこなった。

研究成果の概要(英文)：We have explored various aspects of gravitational theories beyond Einstein's General Relativity. We have focused on observational tests of such theories and gave a complete classification of cross-correlation functions of cosmological fluctuations. We have also addressed the stability of black holes in such theories.

研究分野：宇宙論・重力

キーワード：インフレーション 修正重力 宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙初期のインフレーション(加速膨張)は、ビッグバン宇宙論の諸問題を整合的に解決すると同時に、マイクロ波背景放射(CMB)の温度揺らぎなどを通して観測されている揺らぎの種を生み出す機構も備えた魅力的なシナリオであり、もはや「標準宇宙論」の一部に組み込まれたと言っても過言ではない。インフレーションは通常、インフラトンと呼ばれるスカラー場によって引き起こされると考えられ、多種多様な模型が提唱されている。

研究代表者らは最近、2 階の場の方程式を導く最も一般的なスカラー場と重力の理論にもとづいて、(単一のスカラー場による)最も一般的なインフレーション模型の構築に成功した。これは、既存のすべての単一場インフレーション模型とこれまで考えられてこなかった新しい模型とを特別な場合として含み、さらにそれ以上の一般化が不可能なことも証明できる、真に最も一般的なものである。この模型は、その一般性ゆえ広範な応用が考えられることから注目を集め、現在、世界中で多くの関連研究を生んでいる。

## 2. 研究の目的

本研究では、この最も一般的なインフレーション模型の枠組みにもとづいた初期宇宙研究をさらに発展させていく。

具体的な課題を以下に3つ挙げる。

- (1) マイクロ波背景放射(CMB)温度揺らぎの非ガウス性の評価
- (2) インフレーション後の宇宙の再加熱過程の解析
- (3) 多成分スカラー場によるインフレーション模型への拡張

これらはいずれも、初期宇宙模型の構築とその観測的検証、初期宇宙の基礎的物理過程の理解にとって重要である。最も一般的なインフレーション模型を使ってこれらの課題に取り組むことで、その特別な場合である個々の具体的模型の観測(温度揺らぎなど)に対する予言を、効率よく与えること、ならびに、具体的模型に依らず普遍的に成り立つ事実や関係式(等式・不等式)を見通しよく発見することを目指すものである。

## 3. 研究の方法

最も一般的な単一場インフレーション模型にもとづいて、マイクロ波背景放射(CMB)の温度揺らぎの非ガウス性を評価する研究に取り組む。本研究は、以下で述べるように2つのステップに分割できる。

### (1) 最も一般的な原始非ガウス性の計算

まず、最も一般的なスカラー場理論のラグランジアンを宇宙論的摂動について3次まで展開する。曲率揺らぎ(スカラー摂動)単独、重力波(テンソル摂動)単独からなる項に加え、スカラー摂動とテンソル摂動の積からなるような混合型の項も保持しながら、あり得るすべての項を書き下す。については先行研究が存在し、については研究代表者らによる予備的な解析が済んでいた。はこれまでほとんど関心が払われてこなかった特に新しい要素である。

最も一般的な揺らぎの3次の作用を得れば、この種の問題で通常用いられる“in-in formalism”によって、非ガウス性を特徴付ける3点相関関数(原始バイスペクトル)を求めることが可能となる。(これは、続く計算において「初期条件」に相当するものである。)一般的な3次のラグランジアンを構成する各項とそれぞれに起因するバイスペクトルを精査し、特徴的な寄与とそれを生み出す模型との対応を詳細に分類する。寄与を観測可能なほど大きくすることが原理的に不可能な項がある場合には、該当する項を特定し、そのことを証明する。解析が比較的容易な場合にはこの過程は実行可能であり、新しい の場合にもそれに倣うことで実行可能と考えられる。

### (2) 温度揺らぎの非ガウス性の評価

ステップ1で得た原始バイスペクトルから出発し、直接の観測量であるCMBの非ガウス性、すなわちバイスペクトルを評価する。計算を実行するための基本的な定式化と、簡単な模型にもとづいた計算のデモンストレーションは先行研究でなされている。ここでは、その手法を最も一般的なスカラー場模型に適用し、一般的な揺らぎの3次のラグランジアンの各項がCMBバイスペクトルに対してどのように寄与するのかを明らかにする。

原始バイスペクトルからCMBバイスペクトルにいたる計算は、まずは揺らぎの線形進化にもとづいて実施する。しかし、この分野における非線形効果を取り入れた揺らぎの進化計算の進展は著しい。そこで、研究期間中における当該分野の進展状況は適宜吸収し、非線形進化の効果を考慮に入れることでCMBバイスペクトルの評価の高精度化も狙う。

DBI インフレーションやヒッグスインフレーションなど、非線形な運動項を持つスカラー場模型や重力と非最小結合したスカラー場模型におけるインフレーション後の宇宙の再加熱を研究する。上記のような模型のすべてを包含する一般的な模型から出発し、ある程度の一般性は保ちつつも、具体的な計算が実行可能なように、模型をいくつかの代表的なクラスに分類する。それぞれについて、

数値的・解析的にインフレーション終了時のスカラー場と揺らぎのダイナミクスを解き、通常の正準スカラー場の場合とどのような違いが現れるのかを明らかにする。揺らぎの増幅や非ガウス性の生成などに着目する。さらに、再加熱過程に随伴する「グラビティノ問題」や「モジュライ問題」など、素粒子論的宇宙論の諸問題がどのような影響を受けるのかを議論する。

多成分スカラー場による一般的なインフレーションモデルの構築にも取りかかった。

#### 4. 研究成果

本研究では、一般的なインフレーションモデルにおけるマイクロ波背景放射温度揺らぎの非ガウス性の評価、特に相互3点相関関数の計算を完成させた。また、これまで1成分スカラー場モデルでおこなわれていた揺らぎの評価等の計算を、一般的な多成分スカラー場モデルの場合へと拡張することに成功した。また、インフレーション後の再加熱を安定に進行させるモデルの具体的な構築にも成功した。こうして、具体的課題として挙げた3点について、予定通りの成果を出すことができた。以下では、具体的におこなった多数の研究とその成果を列挙する。

最も一般的な単一場インフレーションモデルにおける相互3点相関関数を評価した。最も一般的な単一場インフレーションモデルの揺らぎの非線形進化を解析した。有質量重力理論において弱場近似のもとでの球対称解を得た。最も一般的な複数場インフレーションモデルと予想されているモデルについて、線形摂動の定式化をおこなった。そして、それが予想に反して最も一般的でないということを示した。ヒッグスGインフレーションの終了期について解析した。最も一般的な単一場インフレーションモデルにおいて、宇宙論的接続条件を導出した。一般的な重力理論におけるブラックホール摂動論の定式化をおこなった。シフト対称性を持つ重力理論におけるブラックホール解を構成した。有質量重力理論の共変ストッケルベルグ解析をおこなった。ホルンデスキ理論を一般化すると、重力の遮蔽機構がはたらないことを示した。ガリレアンジェネシスモデルを一般化した。それをインフレーション宇宙に安定につなぐことに成功した。最も一般的な2つのスカラー場からなる理論の運動方程式を決定した。高階微分理論のゴースト不安定性を除去する手法を既存のものから拡張した。密度揺らぎを変更せずに重力波の振幅を下げるインフレーションモデルを同定した。シフト対称性を持つ理論のブラックホール解(前述)がすべて不安定であることを証明した。その結果を高次元に拡張した。一般化されたガリレアンジェネシスモデルにおける再加熱過程と生成される重力波を計算した。

#### 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 20 件)

S. Nishi and T. Kobayashi,  
“Reheating and Primordial  
Gravitational Waves in Generalized  
Galilean Genesis”  
JCAP 1604, no. 04, 018 (2016), 1-17  
doi:10.1088/1475-7516/2016/04/018  
査読有

Y. Akita and T. Kobayashi,  
“Primordial non-Gaussianities of  
gravitational waves beyond Horndeski  
theories”  
Phys. Rev. D 93, no. 4, 043519 (2016),  
1-16.  
doi:10.1103/PhysRevD.93.043519  
査読有

H. Ogawa, T. Kobayashi and T. Suyama,  
“Instability of hairy black holes in  
shift-symmetric Horndeski theories”  
Phys. Rev. D 93, no. 6, 064078 (2016),  
1-9.  
doi:10.1103/PhysRevD.93.064078  
査読有

S. Ohashi, N. Tanahashi, T. Kobayashi  
and M. Yamaguchi,  
“The most general second-order field  
equations of bi-scalar-tensor theory  
in four dimensions”  
JHEP 1507, 008 (2015), 1-21  
doi:10.1007/JHEP07(2015)008  
査読有

T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J.  
Yokoyama,  
“Galilean Creation of the  
Inflationary Universe”  
JCAP 1507, no. 07, 017 (2015), 1-22  
doi:10.1088/1475-7516/2015/07/017  
査読有

[学会発表](計 16 件)

T. Kobayashi, “Galilean Creation of  
the Inflationary Universe”  
Second LeCosPA International Symposium  
Everything About Gravity,  
台北(台湾),  
12月15日, 2015

T. Kobayashi, “Galilean Creation of  
the Inflationary Universe”

MG14

ローマ(イタリア),

7月14日, 2015

〔その他〕

ホームページ等

<http://www2.rikkyo.ac.jp/web/tsutomu/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 努 (KOBAYASHI, Tsutomu)

立教大学・理学部・准教授

研究者番号: 40580212