

氏名	赤間 進吾
学位の種類	博士（理学）
報告番号	甲第 557 号
学位授与年月日	2021 年 3 月 31 日
学位授与の要件	学位規則(昭和 28 年 4 月 1 日文部省令第 9 号) 第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Primordial Non-Gaussianities from General Models of Inflation and Bounce（一般化されたインフレーション及びバウンスモデル起源の原始非ガウス性）
審査委員	（主査） 原田 知広（立教大学大学院教授） 小林 努（立教大学大学院教授） 中野 祐司（立教大学大学院准教授）

## I. 論文の内容の要旨

### (1) 論文の構成

本論文の第一章は導入にあてられている。第二章ではまず一般相対論に基づいた標準宇宙論とその問題点が述べられている。次いで第三章では、一般相対論から修正された重力理論を念頭に置いて、この論文の主要なテーマである宇宙論的摂動論の一般論が述べられている。第四章では、インフレーション模型の代替理論としての反跳宇宙模型において生成される揺らぎの非ガウス性が申請者らの研究成果を含めて述べられている。第五章では、量子論的な揺らぎの生成の計算において標準的に採用されている Bunch-Davies 真空の仮定を緩めた場合の理論的予言が申請者らの研究成果を含めて述べられている。第六章は本論文全体のまとめである。

### (2) 論文の内容要旨

インフレーション宇宙模型は、標準ビッグバン宇宙論の問題点を解決できるだけでなく、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測事実と整合的であることから、現在ほぼ標準的とみなされている初期宇宙模型である。しかし、初期特異点問題や遷プランク問題といった、インフレーション模型でも解決できない問題点も存在する。

そこで、これらの問題点を回避する代替模型が古くから提案されている。これらの模型が初期宇宙模型の候補になるかどうかを知るには、まずインフレーション模型と同等に現在の観測と整合的になり得るのかを調べる必要がある。また、現在の観測と整合的な代替宇宙模型については、今後のより精密な CMB 及び原始重力波観測を見据え、観測による模型の判別可能性について議論することが重要になる。代表的な代替宇宙模型として、反跳模型がある。この模型では、インフレーション模型と同様にスケール不変な曲率揺らぎを生成できる。しかし、原始重力波が曲率揺らぎよりも十分小さいことと曲率揺らぎがほぼガウス統計に従うという観測事実を同時に実現できないことが、K-エッセンスと呼ばれる単一スカラー場理論において示されている。

本論文では、まず拡張されたスカラー場理論 (Horndeski 理論) に基づき、具体的な反跳模型に限定せずに、揺らぎのパワースペクトル及び統計の非ガウス性を計算する方法を示した。その後、上述の観測事実との矛盾が、Horndeski 理論

では一般には取り除けることを示した。さらに、原始重力波の非ガウス性を求めることで、インフレーション宇宙模型との理論予言の違いを探した。

一方、インフレーション起源の量子揺らぎは、これまで主に Bunch-Davies 真空と呼ばれる理論的に自然であるが特定の初期条件が仮定されている。しかし、揺らぎの初期条件は理論だけでは定まらない。そこで、非 Bunch-Davies 真空を初期条件に持つ揺らぎの研究も行われている。この場合、曲率揺らぎの非ガウス性が Bunch-Davies 真空の時とは異なる波数依存性を持ち、またその振幅も増幅されることが知られている。そこで本論文では、非 Bunch-Davies 真空を初期条件に持つ一般的なインフレーション模型を用いて、原始重力波の自己相互作用により生成される非ガウス性及び原始重力波と曲率揺らぎの相互作用を通して生成される非ガウス性を求めた。そして、後者の非ガウス性が Bunch-Davies 真空の時とは異なるだけでなく、これまで予言されたものとは異なる新しい波数依存性を持ち、振幅も増幅され得ることを示した。

## II. 論文審査の結果の要旨

### (1) 論文の特徴

本論文の特徴は、ビッグバン宇宙論の問題点を解決する宇宙模型としてほぼ標準的と言える一般相対論に基づいた Bunch-Davies 真空を仮定したインフレーション模型に対して、(1)代替模型である反跳模型を一般相対論から修正された Horndeski 理論において揺らぎを計算し、現在の観測的事実と整合的な揺らぎを生成することが可能であることを示した点、(2)非 Bunch-Davies 真空を仮定して一般相対論から修正された Gleyzes-Langlois-Piazza-Vernizzi 理論においてインフレーション模型における揺らぎを計算し、その重力波揺らぎの非ガウスの統計性を示した点の二点が特徴的であると言える。

### (2) 論文の評価

現在 CMB や大規模構造の観測等から強く支持されている、一般相対論に基づいて Bunch-Davies 真空を仮定したインフレーション模型という現代宇宙論の標準的な見方から一旦離れて、重力理論を一般相対論から変更し、現在の観測データと整合的な模型を探索するという枠組みを採用し、その場合の標準的模型か

らの将来的に観測可能なずれを理論的に指摘し、非標準的な宇宙模型に制限をつけたり非標準的な宇宙模型を実証または棄却できる可能性を探るという研究が最近大変盛んにおこなわれている。そうした中で、本論文では揺らぎの統計性に的を絞って、相当深いところまで基礎的および現象論的な研究が行われており、その点で独創的であるといえる。これらのことから、本論文は博士学位論文が満たすべき水準に十分に達していると評価する。

申請者は研究結果を得るために様々な数学的手法と数値計算の手法を駆使しており、理論物理学分野における研究能力は卓越したものがある。また、本研究は重力理論と宇宙物理学に関する深い知識を必要とするものであり、申請者が博士号の学位に相応しい学問的力量を持つ事を示すものといえる。

本論文のもととなっている二編の論文

Shingo Akama, Shin'ichi Hirano, Tsutomu Kobayashi, Physical Review D **101**, American Physical Society, 043529, 2020.

Shingo Akama, Shin'ichi Hirano, Tsutomu Kobayashi, Physical Review D **102**, American Physical Society, 023513, 2020

は、申請者を筆頭著者としていずれも評価の高い国際的な学術論文誌に掲載されている。

2021年1月7日午後1時30分から本論文に関する公聴会が開かれた。申請者は論文の内容を明快に説明し、また質問に対する応答も満足すべきものであった。