

氏 名	横 山 修 一 郎
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3248 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Primordial Curvature Perturbations in Inflationary Universe (インフレーション宇宙における初期曲率揺らぎ)

論文調査委員 (主 査) 准教授 田 中 貴 浩 教 授 川 合 光 教 授 中 村 卓 史

論 文 内 容 の 要 旨

インフレーションはビッグバン宇宙論の問題点を解決するだけでなく、構造形成の種となる初期密度ゆらぎを自然に説明できるシナリオとして広く受け入れられている。パラダイムとしてのインフレーションは観測的にも確立されつつあるが、その詳細については様々な可能性があり議論されている。特に、素粒子の超対称性模型と整合的なインフレーションモデルを構築しようとする際にはディラトン問題やモジュライ問題などの新たな問題が生じ、モデルは単純な1スカラー場によるものでは済まない。多様化するインフレーションモデルに制限を与えるためには、初期密度ゆらぎの性質を調べ、今後さらなる進展が期待される観測との比較ができるように理論を整備することが重要である。このような観点から、多数の場が存在するインフレーションモデルにおいて、初期ゆらぎを評価する簡便で系統的な方法を導入することは理論の発展に役立つものである。

インフレーション期における初期密度ゆらぎの生成の過程は、初期のインフレーションを起こすスカラー場の量子ゆらぎが増幅される次期と、ゆらぎのスケールがホライズンスケールより長波長となり時空の重力的性質が重要となるふたつの時期に大きくわけることができる。前者は曲がった時空上での場の量子論が中心的役割を果たすのに対して、後者では一般相対論の重力を正しく考慮することが不可欠である。本博士論文では、観測を含めたインフレーションに関する基礎的事項を簡潔にまとめた上で、短波長側と長波長側の両面における初期密度ゆらぎの生成過程について詳細に議論した。特に、近年急速に注目を集めているゆらぎの非線形性の評価に関する総合的な議論を含むものである。

申請者の独自の研究成果として、まず、初期密度ゆらぎの評価法に関する定式化をおこなった。ゆらぎの短波長側における生成については「一般化されたスローロール近似」と呼ばれる通常のスローロール近似よりも適用範囲の広い近似を、長波長側におけるゆらぎの進化に関しては「 δN フォーマリズム」と呼ばれる非一様なゆらぎの発展を一様等方な背景時空の発展を解く問題に帰結させる手法を用いた。これらの二つの手法を統合することで新しい初期密度ゆらぎの公式を考案した。この公式はより広いクラスのインフレーションモデルに適用可能な初期密度ゆらぎの評価法を与える。さらに、「 δN フォーマリズム」を用いて長波長側におけるゆらぎの非線形性の成長を簡便に評価する手法を開発した。この手法は多成分からなるインフレーションモデルにおいて最終的なゆらぎの振幅に寄与する自由度を、ゆらぎの方程式を逆向きの時間方向に解くことで明らかにし物理的な考察を容易にすると同時に、これまで知られていた方法に比べてより少ない計算量でゆらぎの評価を可能にする。この手法を用いて幾つかの具体的な場合におけるゆらぎの非線形性の評価を与えた。まず、スローロール条件がインフレーション中、常に満たされるようなモデルでは長波長でのゆらぎの非線形性の顕著な成長はみられないことを示した。さらに、スローロール条件を破る時期が存在するようなダブルインフレーションのモデルにおいても、非線形性の増幅は見られないことを明らかにした。

論文審査の結果の要旨

本博士論文は、インフレーションを起こす場が多成分からなる場合についての初期密度ゆらぎの生成とその非線形性の効果の現れる様子を調べたものである。インフレーションとは宇宙初期に宇宙が加速膨張を起こしたとすることで観測される宇宙の一樣等方性等を自然に説明する宇宙進化のシナリオである。さらに、インフレーションは宇宙の構造形成の種となった初期密度ゆらぎの生成をも自然に説明し、この間その予言が観測的に実証されてきた。インフレーション期に生成される初期密度ゆらぎやその非線形性は、マイクロ波宇宙背景輻射や21cm線の観測など、今後観測的な精密化が早い速度で進むことが期待されており、初期宇宙を観測的に探るための有力な手段と考えられている。したがって、理論的な研究においても、インフレーション期に生成されるゆらぎの大きさや非線形性の程度の評価を幅広いインフレーションモデルに対して正確に行う手法を確立することは重要である。

インフレーションによって生成される初期密度ゆらぎの評価は、インフレーション中にゆらぎが生成される段階と、ゆらぎがホライズンスケールより長波長になった後の発展との二つのステージに大きくわけることができる。本博士論文ではその両方のステージについて詳しい議論がなされているが、申請者の独自の研究は主として後者のステージに関するものである。後者のステージに関しては δN フォーマリズムという手法が知られている。この手法はゆらぎの進化を一樣等方宇宙の進化の式と結びつけることで、後者の方程式を解くだけで長波長における非一樣なゆらぎの進化が議論できるというものである。これまで、この手法の利点を最大限有効に利用した方法が開発されていなかったが、申請者はこの手法を応用してインフレーションを起こす場が多成分からなる一般的なモデルにおいて系統的に初期密度ゆらぎの発展を簡便に計算する手法を独自に開発した。また、後者のステージで生成されるゆらぎの非線形性を評価する簡便な手法の開発にも成功した。この手法を用いることで多成分からなるインフレーションの複雑なダイナミクスにおいて、どのような側面が密度ゆらぎの非線形の成長に重要となるのかが明らかになった。加えて、本博士論文ではこれらの新しく開発した手法を用いて、いくつかの具体的なモデルについての議論もおこなっている。

論文の主たる結論としては、新しい計算手法の開発に加えて、インフレーション中にスローロール条件が破れない場合には非線形性が大きくなることはないことや、ダブルインフレーションと呼ばれる単純な形でスローロール条件を破るようなモデルにおいても非線形性が大きくならないことを示したこと等が挙げられる。新しく開発された解析の手法は、今後系統的に様々な具体的インフレーションモデルを調べ、その結果から普遍的な知見を得るという方向へ発展するものと思われ、これからの進展も大いに期待される。

論文全体としては当該分野の全体的な解説も含めて簡潔にわかりやすく提示されており、当該分野の知見を概観する上でも有益な内容となっている。上述のように内容の独自性という点についても充分と判断される。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。