

氏 名 森 太朗

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2069 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Superhorizon evolution of curvature perturbation in
multi-field inflation models

論文審査委員 主 査 教授 松原 隆彦
教授 磯 暁
教授 羽澄 昌史
講師 濱田 賢二
准教授 郡 和範
助教 鎌田 耕平 東京大学大学院
理学系研究科

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full Taro Mori

Title Superhorizon evolution of curvature perturbation in multi-field inflation models

In the Big Bang cosmology, it is well-known that radiation and matter can cause cosmic expansion. However, there are problems which cannot be explained by assuming that only radiation and matter contributed to the expansion of the Universe. They are known as the Horizon Problem and the Flatness Problem. These two problems are attributed to the fact that "Cosmic expansion caused by radiation/matter is decelerated". In fact, the above two problems can be solved by introducing the accelerated expansion phase in the early stage of the Universe. It is called inflation. This was proposed by A. Starobinsky, K. Sato, A. Guth and D.Kazanas in the 1980s(Historically, it was proposed to solve the Monopole problem of the unification of the gauge field theory). In inflationary cosmology, a scalar field called inflaton is introduced, and the energy density of this inflaton is while being dominant, the Universe goes accelerated expansion. This can solve the problems of the Big Bang cosmology.

So far, a lot of models which can realize inflation have been proposed. Thus, we have to discriminate each model and find ones which can better explain observational facts. It is informative to use the temperature fluctuation of Cosmic Microwave Background (CMB) for this verification. The assumption when discussing the expanding Universe is as the Universe is homogeneous and isotropic on large scale. On the other hand, inflation generates small perturbations (curvature fluctuations) on the spacetime. If the curvatures are slightly different at each point in the spacetime, these fluctuations will be reflected in the spatial distribution of the temperature fluctuation of CMB. Therefore, in each model, it is possible to verify whether a model can explain the observational results by comparing curvature perturbation generated by inflation and the temperature fluctuation of the observed CMB. Testing and verifying inflation models are main subjects of this thesis. In this thesis, we focus the power spectrum calculated from the two-point correlation function of fluctuation and so-called non-Gaussianity calculated from the three-point correlation function. These are the most important quantities to test inflation models and recently CMB observations have put bounds these quantities.

Inflation models can be trivially classified into two classes: One is the single-field type where a single inflaton contributes to inflation, and the other is the multi-field type. Many inflation models rely on single-field model construction. However, from the top-down viewpoint, multi-field model construction is much more attractive because it is known that in the effective theory of superstring theory/supergravity, a lot of scalar

fields will appear. If we can test inflation models based on these theories, we may have physical insights or constraints on these theories. This is why multi-field inflation model building is an interesting and exciting subject.

What is the difference between single-field inflation and multi-field inflation? In single-field cases, curvature perturbation is almost constant during inflation (strictly speaking on superhorizon scale). Therefore, we just need to compute perturbation at the beginning of inflation. On the other hand, in multi-field cases, we must have adiabatic perturbation which is along to the inflaton trajectory and the isocurvature perturbation which is perpendicular to the inflaton trajectory. Since the isocurvature perturbation can transfer to adiabatic perturbation, it has time evolution during inflation and we need to trace its evolution from the beginning to the end of inflation. This is particular for multi-field inflation. In addition, almost all single-field inflation predicts scale-invariant power spectrum and because of this invariance, there is a strong restriction between spectral tilt and non-Gaussianity.

This is called the Maldacena's consistency relation. In fact, in multi-field cases, we may have possibilities to break this relation. The most recent observational results are not so tight to test this relation, but if we find any deviation from this relation in future observations, it can be a strong support of multi-field inflation.

In the analysis of multi-field models discussed in this thesis, we adapt the δN formalism and the transport method. Relying on these, we can compute curvature perturbation by just determining the classical dynamics of inflatons and it is possible to trace each quantity during inflation. Moreover, the transport method is extended version of the δN formalism, and we can calculate curvature perturbation more efficiently by finding gauge transformation between the constant-time slice and the uniform-density slice.

Relying on these methods, we investigate two multi-field inflation models. One is based on Starobinsky model which is known to be in good agreement with current observations. We extend this model to multi-field inflation with adding another scalar field whose potential is quadratic. The other model is based on compactification of string theory. Associated with dimensional reduction of string theory, there appear a lot of scalar fields, called moduli. These moduli are attractive candidates of inflatons. We propose a multi-field inflation model in which moduli play roles of inflatons, and we analyze this model with taking into account multi-field effects.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 森 太朗

Title
論文題目 Superhorizon evolution of curvature perturbation in multi-field inflation models

重力をも統一すると期待されている究極的な力の統一理論の候補である超弦理論は、10次元もしくは11次元という高次元の時空上で定義されている。その高次元での理論を我々の住む世界である4次元時空の有効理論につなげる必要があるが、それら余剰空間のコンパクト化に伴い、モジュライ場と呼ばれる多くのスカラー場が4次元の理論に現れることが知られている。それらの多くはとても重い質量を持つことが理論的にも実験的にも要請されているが、不可避免的に軽くなってしまふものが存在することが予想されている。このことは、そうした軽いモジュライ場が、宇宙初期のインフレーションを引き起こすインフラトン場の候補となり得るという点でたいへん魅力的である。その一方、複数のモジュライ場が自然にインフレーションに寄与してしまうという新たな描像に至る。

具体的なモデルとして J. Conlon 達による、Large-Volume Compactification と呼ばれるコンパクト化の方法のモデルに基づいたインフレーションモデルが、世界的にも精力的に調べられてきた。しかし、これまでは解析の困難さから、単一のスカラー場だけがインフレーションを起こすという解析が、極端な仮定の下で行われてきた。それは理論的な要請ではなく、単に計算の簡便さからくる理由からであった。複数成分のインフラトン場により引き起こされるインフレーションが生み出す曲率ゆらぎの計算は、地平線の外での曲率ゆらぎの複雑な時間発展の一般相対論的な検討が必要で、満足に評価されたとは言えない状態であった。

このような状況の下、森氏は、数値的な手法により、複数場が引き起こすインフレーション中での場の運動と、曲率ゆらぎを正確に計算するための計算コードを開発することに成功した。本博士論文は、その研究成果をまとめたものである。具体的に、森氏は Transport Method と呼ばれる、これまでに知られている δN formalism を一般化した手法を数値計算にのせる方法を定式化した。これは複数場のインフレーションがつくる曲率ゆらぎの時間発展を正確に計算できる方法である。また、数値計算により、観測と比べられる物理量を計算し、宇宙論と素粒子論の双方に対して高いインパクトを与える結果が導かれている。

具体的に観測と比べられる物理量とは、曲率ゆらぎの大きさ、そのスペクトル指数、ゆらぎの非ガウス性、テンソルゆらぎなどである。複数場のインフレーション模型の場合、ゆらぎの混合は結果として非ガウス性を生み出すことを意味するため、ゆらぎに大きな非ガウス性を生成するモデルは観測から厳しく制限される。これは、Transport Method を

応用することで森氏により初めてなしえた成果である。将来計画されている 21cm 線観測などにより、インフレーションモデルのパラメーターを制限し、インフレーションモデルを選別することができる可能性を議論している。

本研究については、森氏本人が KIAS-YITP joint workshop 2017 や StringPheno18 などの国際会議において発表している。また、本研究の一部は論文誌 (JCAP 1710 (2017) no.10, 044) にすでに掲載されている。

本論文の構成は次のとおりである。まず、2 章と 3 章においてインフレーション理論の解説と、理論が予言する観測可能量の説明など、鍵となる理論の基礎事項が簡潔にまとめられている。また、インフレーションを引き起こす量子場が単一場成分か、それとも複数場成分かによって異なる理論予言を与えることが議論され、それに基づいて具体的な将来観測により、複数場の理論モデルを区別する方法が詳しく解説されている。次に、4 章において、本研究で中心的な役割を果たす解析の枠組みである δN formalism と Transport Method の解説が丁寧に行なわれている。以上の準備の元に、5 章と 6 章において、上で述べた Transport Method を 2 つの理論モデル (拡張 R^2 モデルと、複数場モジュライファイバーインフレーションモデル) に適用して観測可能量が導かれ、将来の観測でモデルの検証が可能であることが議論されている。全体として、素材の選択、構成が的確で、このテーマについての基本参考文献として使えるほどの学術レベルを持つ論文となっている。

このように、森氏の論文は、宇宙物理学による最先端の基礎物理の研究の独創的な成果を含んでいる。論文のテーマとなる研究は共同研究に基づくものであるが、問題設定や具体的な計算、物理的意義の検討すべての面において中心的な寄与をしたと認められる。本論文は、森氏の深い学識と高い研究能力を示している。以上のように、森氏による本学位論文は、高い学術的意義を有すると認め、審査員全員一致で本博士論文審査を合格とした。