

氏 名 齋藤 惠樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1589 号

学位授与の日付 平成25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 Cosmological tests of models for the accelerating universe in
terms of inhomogeneities

論文審査委員 主 査 准教授 井岡 邦仁
教授 小玉 英雄
教授 磯 暁
助教 郡 和範
教授 横山 順一 東京大学

論文内容の要旨

We study cosmological tests of models that can explain the apparent accelerated expansion of the present universe. In this thesis, we provide methods of testing these models by particularly focusing on inhomogeneities of the universe, because, practically, our universe is inhomogeneous.

First, we consider the effective gravitational stress-energy tensor for short-wavelength perturbations in modified gravity theories in the cosmological context. We address this problem in a simple class of $f(R)$ gravity theories on the assumptions that (i) the background, or coarse-grained metric averaged over several wavelengths, has the Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker symmetry and that (ii) when our $f(R)$ theory reduces to Einstein gravity, the field equations of Einstein gravity should be reproduced. We show by explicit computation that the effective gravitational stress-energy tensor for a cosmological model in our $f(R)$ theories, as well as that obtained in the corresponding scalar-tensor theory, takes a similar form to that in general relativity and is in fact traceless, hence acting again like a radiation fluid as in the case of general relativity. If the assumption (ii) above is dropped, then an undetermined integration constant appears and the resultant effective stress-energy tensor acquires a term that is in proportion to the background metric, hence being, in principle, able to describe a cosmological constant. Whether this effective cosmological constant term is positive and whether it has the right magnitude as dark energy depends upon the value of the integration constant.

Although we have focused on the R^2 model, especially concerning the FLRW background, we have pushed forward our calculations with a general $f(R)$ gravity about an arbitrary background as far as possible, and have not used the property of the R^2 model about the FLRW background, up to (5.3.11) in Sec. 5.3. We can immediately note that (5.3.11) does not involve any terms of fourth-order derivatives but has only terms of the square of first-order derivatives of perturbations $h_{\mu\nu}$ and $\delta\phi$. We have mainly worked in the Jordan frame in Sec. 5.2. When working in the Einstein frame, we have shown the traceless nature of the effective stress-energy tensor by merely using the background FLRW symmetry; we did not have to set S_1 to any particular value. This is in contrast to the case of the Jordan frame. This result obtained within the framework of scalar-tensor theory indicates that the higher-order derivatives could also vanish in the metric framework of general $f(R)$ gravity theory for a generic background. However, to see whether this is indeed the case needs further involved calculation, and is

beyond the scope of this chapter. This is left open for future study.

Our formulas derived in Sec. 5.2 deal directly with the scalar curvature R and the Ricci tensor $R_{\mu\nu}$, and therefore should apply to similar analyses of other modified gravity theories which contain higher-order curvature terms composed of R , $R_{\mu\nu}$, and R_{abcd} and which cannot even be cast in the form of a scalar-tensor theory. It would be interesting to consider an extension of our present work to a wide class of modified gravity theories with high-rank curvatures.

Second, we discuss temperature anisotropies of cosmic microwave background (CMB) in local void models. We derive analytic formulae for the dipole and quadrupole moments of the CMB temperature anisotropy that hold for any spherically symmetric universe model and can be used to compare consequences of this model with observations of the CMB temperature anisotropy rigorously. We check that our formulae are consistent with the numerical studies previously made for the CMB temperature anisotropy in the void model. We also update the constraints concerning the location of the observers in the void model by applying our analytic dipole formula with the latest WMAP data.

We can also utilize our analytic quadrupole formula to discuss the relevance of the LTB model to observed anomalies. For example, the observed magnitude of the quadrupole is known to be significantly lower than the Λ CDM model predicts. This is usually understood as a cosmic variance, i. e., to be produced by a special feature of our Universe, one particular realisation of the statistical ensemble. Because the local void model is one of such realisation with a very low probability in the standard Λ CDM model, it is tempting to see whether the quadrupole anomaly of the CMB anisotropy can be explained by a local void model. Unfortunately, however, the above analysis of the constraint on the observer offset by the dipole moment implies that the observed anomaly cannot be explained solely by the induced quadrupole moment in LTB models. Nevertheless, this result is not conclusive. For example, we have implicitly assumed that the off-center observer stays at a fixed comoving position. If the observer has a peculiar velocity pointed toward the center of the void, however, the value of δL could be chosen to be much larger than the case with no peculiar velocity. If it is the case, then the observed anomaly of the quadrupole could be explained within the LTB models. Therefore, it would also be worth attempting to develop other analytic formulae concerning CMB polarizations, lensing effects, etc. that can be used to distinguish the LTB and FLRW cosmologies.

博士論文の審査結果の要旨

本論文は、現在の宇宙の膨張則が宇宙項のない一様等方標準宇宙モデルの予想からずれているという観測事実を、宇宙の非一様性により説明する可能性について、2つのアプローチから研究したものである。

Ia型超新星を用いた銀河後退速度と距離の計測は、宇宙が空間的に一様等方で、重力理論として一般相対論が正しいとすると、宇宙膨張が現在加速していることを示唆している（2011年度ノーベル賞）。この現象を説明するモデルとして、微小な正の宇宙項を仮定する Λ CDMモデルが標準的であるが、これ以外、動的ダークエネルギーモデル、修正重力理論、非一様モデルなど様々なモデルが提案されている。現在、マイクロ波宇宙背景放射（CMB）、銀河分布の統計などの観測に基づく研究では、宇宙項による説明が最も有力となっているが、依然として他の可能性も残されている。これら非標準的なモデルの妥当性を理論と観測の比較により検証することは、超微小な宇宙項、すなわち真空のエネルギーの存在を確定する上で非常に重要であり、世界中でそのための観測実験プロジェクトが進行、計画されている。齋藤氏の研究は、このような背景のもと、様々な非標準モデルのうち、ボイドモデルおよび $f(R)$ 修正重力理論におけるゆらぎの反作用という2つのアプローチについて、一般的定式化とそれに基づく観測からの制限の定量評価を行ったものである。

まず、ボイドモデルでは、超新星の観測を、宇宙の膨張率が時間ではなく、距離とともに中心に向かって加速的に増大するためと考える。これを実現するには、宇宙に大きな球対称な低密度領域があり、我々がその中心近くにいるとしなければならないが、我々の位置が中心から大きくずれると、CMBなどに大きな非等方性が生じ、観測と矛盾する。齋藤氏は、この制限を具体的に評価するために、まず、中心からずれた位置にいる観測者が観測するCMB温度の双極型および4重極型非等方性の大きさに対する解析的表式を世界で始めて導き、それに基づいて、様々なボイドモデルについて観測者の位置に対する制限を導いた。

このアプローチでは、大きなスケールの非一様性の影響を用いるが、これとは異なり、小さなスケールの非一様性の非線形反作用により宇宙の加速膨張が起きる可能性を主張する研究も多く存在する。最近、Waldらにより一般相対論ではこの可能性は無いことが数学的に示されたが、齋藤氏は、この方法を拡張し、修正重力理論の一つである $f(R)$ 重力理論でも同様の結論が得られるかどうかを調べた。その結果、 $f(R)=R+cR^2$ となる最も単純なStarobinsky型モデルでも、宇宙定数に当たる不定項が反作用により生成される可能性があること、 c がゼロの極限で一般相対論の結果を再現するためには、この不定項をゼロとおく必要があることを見いだした。

本論文ではまず全体を概観した序文のあと、第2章から第4章で、様々な観測の現状とそれに対する主要なモデルの概要が、要領よく紹介されている。その後、第5章では $f(R)$ 修正重力理論についての成果が、第6章ではボイドモデルについての成果が丁寧に説明されており、英文も高いレベルにある。

このように齋藤氏の論文は、物理学における最重要課題の研究に重要な貢献をする最先端の独創的な成果を含んでおり、いずれの研究も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本質的な寄与をしたと認められる．本論文は，齋藤氏の深い学識と高い研究能力を明快に示しており，博士論文にふさわしいと判断した．