

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博士 (理学)	氏名	松尾 大和
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・2 項該当		
論文題目 Behavior of Chameleon Mechanism on $F(R)$ Gravity ($F(R)$ 修正重力理論におけるカメレオン機構の振る舞い)			
論文審査担当者 主 査 教授 稲垣 知宏 (情報メディア教育研究センター) 審査委員 教授 小畠 康史 審査委員 教授 野中 千穂			
〔論文審査の要旨〕 観測技術の発展に伴い、重力波やブラックホールの直接撮像の成功など、一般相対性理論により予言されてきたさまざまな現象が確かめられている。一方で、一般相対性理論では解決できない未解決問題として、初期宇宙の加速膨張 (インフレーション)・ダークエネルギー・ダークマター問題が存在する。これらの諸問題を解決するため、一般相対性理論そのものを拡張した修正重力理論が、多くの研究者により提唱されている。 本論文は、 $F(R)$ 修正重力理論を用いた宇宙論の未解決問題解決と $F(R)$ 修正重力理論の検証方法構築を目的としている。一般相対性理論は曲率スカラー (R) に比例する Einstein-Hilbert 作用によって記述される。これを R の任意の関数へ拡張した理論が $F(R)$ 修正重力理論である。 $F(R)$ 修正重力理論は、計量テンソルのワイル変換により、Einstein-Hilbert 作用とスカラロンと呼ばれるスカラー場からなる理論に書き換えることができる。このスカラロンのポテンシャルエネルギーが宇宙のエネルギーを支配することによって、宇宙初期の加速膨張が生じることが知られている。一方で、スカラロンはワイル変換によって物質場と相互作用する。このとき、スカラロン質量は物質場のエネルギー密度に応じて変化するようになる。地球上ではスカラロンが十分に重くなり、その効果は遮蔽され観測されない。このカメレオン機構によって $F(R)$ 修正重力理論は観測実験と矛盾しないが、理論の検証は困難である。本論文では、宇宙初期の現象に対するカメレオン機構の寄与を解析することで $F(R)$ 修正重力理論の検証可能性を議論している。 本論文は 6 章から構成される。第 1 章では、宇宙論の発展と、修正重力理論でのインフレーションモデルまで、本研究の背景を紹介している。第 2 章では、スローロールインフレーションについて概観している。スローロールインフレーションでは、インフラトンと呼ばれるスカラー場のポテンシャルエネルギーによって宇宙の加速膨張を引き起こし、インフラトンがゆっくりと基底状態に転がり落ちることでインフレーションを終焉させる。また、スローロールインフレーションによる揺らぎが、観測されている宇宙背景放射の温度揺らぎと矛盾しないことについても論じている。第 3 章では、インフレーション後の宇宙である preheating 期について論じている。インフレーション後、インフラトンは基底状			

態の周りで振動するようになる。インフラトンが軽い物質場へ崩壊することで、振動エネルギーは熱エネルギーへ変換される。preheating 期には、インフラトンと軽い物質場の共鳴効果により指数関数的な崩壊現象が生じる。本章では、共鳴効果のモデルパラメータ依存性について論じている。第4章では、 $F(R)$ 修正重力理論のスカラ場による記述、カメレオン機構、さまざまな $F(R)$ のモデルの解析を行なっている。カメレオン機構に従うスカラロンはダークマターの候補となる。著者は、対数型 $F(R)$ モデルを取り上げ、インフレーションと同時にダークエネルギー・ダークマターも説明可能なモデルを構築することに成功している。第5章では、preheating 期におけるスカラロンの時間発展を、symplectic 数値積分法を用いて論じている。preheating 期にはスカラロンと軽いスカラ場の共鳴効果によって、スカラ場の粒子数密度が指数関数的に変化する。同時にカメレオン機構によってスカラロン質量も変化し、後の再加熱温度に影響を及ぼす可能性が指摘されている。ただし、数値計解析に成功した 0 次元ではカメレオン機構の影響は確認されていない。第6章では、解析結果について考察し、3+1 次元における preheating 期の解析可能性を今後の課題として論じている。

Einstein-Hilbert 作用に R^2 項を加えた Starobinsky 型 $F(R)$ 修正重力理論は、初期宇宙のインフレーションモデルとしてよく知られている。著者は、高エネルギー領域の新しい物理により R^2 項が生じるとすると、量子補正として対数型の項も付け加えることが自然と考え、これにより宇宙背景輻射の揺らぎと整合する結果が得られること、観測と矛盾しないダークエネルギーを得られること、カメレオン機構によってスカラロンがダークマターの候補になり得ることの3つを同時に満たす解を得た。このことは、一般相対性理論では説明できないインフレーション、ダークエネルギー、ダークマターが、いずれも R^2 項と対数型の補正を加えた $F(R)$ 修正重力理論により説明される可能性を示唆している。

また、preheating 期の解析においては、ハミルトニアンを厳密に保存しながら系の時間発展を計算することができる symplectic 数値積分法に対して、symplectic 対称性が成立しない場合の近似的な symplectic 数値積分法を提案している。0 次元の解析ではカメレオン機構の影響が確認できていないが、当該モデルにおいて、カメレオン機構の効果の検証は新しい試みである。また、開発された分析手法は、さまざまなモデルに適応されることで、新しい成果につながる可能性を持っている。

以上、審査の結果、本論文の著者は博士（理学）の学位を授与される十分な資格があるものと認める。

公表論文

1. “Dark Matter in logarithmic F (R) gravity,”
T. Inagaki, Y. Matsuo and H. Sakamoto,
(2019) Int. J. Mod. Phys. D 28 no.12, 1950157.

参考論文

1. “Four-Fermion Interaction Model on MD-1 \otimes S1,”
T. Inagaki, Y. Matsuo and H. Shimoji,
(2019) Symmetry 11, no. 4, 451.
2. “Lepton number violation in a unified framework,”
Y. Kawamura, Y. Matsuo, T. Morozumi, A. Salim Adam, Y. Shimizu, Y. Tokunaga
and N. Toyota,
(2020) PTEP 2020, no.9, 093B07 [erratum: (2020) PTEP 2020, no.12, 129401].
3. “Time Evolution of Lepton Number Carried by Majorana Neutrinos,”
A. S. Adam, N. J. Benoit, Y. Kawamura, Y. Matsuo, T. Morozumi, Y. Shimizu,
Y. Tokunaga and N. Toyota,
(2021) PTEP 2021, no5, 053B01.
4. “Precise Phase Structure in Four-fermion Interaction Model on Torus,”
T. Inagaki, Y. Matsuo and H. Shimoji,
(2022) PTEP 2022, no1, 013B09.