

# 論文審査の結果の要旨

氏名 本橋隼人

近年の観測的宇宙論の発展により我々の宇宙は二つの加速膨張期を経ていることが明らかになった。一つは宇宙初期に起こったとされるインフレーション期、もう一つは数十億年ほど前から現在に至る時期である。特に、現在の加速膨張を引き起こす原因はダークエネルギー（その特別な場合がアインシュタインの宇宙定数である）と呼ばれ、精力的な研究テーマとなっている。これは一般相対論が宇宙論的スケールで厳密に正しい理論であると仮定した上でのモデルであるが、実はそれは直接検証されているわけではない。したがって、逆に宇宙論的スケールでは一般相対論が厳密には正しくなく、その結果として加速膨張が起こっているのではないかとする考え方もある。これは修正重力理論とよばれ、近年活発に研究されるようになってきた。

本博士論文は、この修正重力理論の具体的なモデルを用いて、宇宙定数を仮定したモデルとの違いを詳細に調べたものである。

本論文は全部で7章からなる。

第1章は、宇宙の加速膨張の簡単な紹介と本論文の目的と構成を述べている。第2章は、ラグランジアン密度として宇宙のリッチ曲率  $R$  を用いる一般相対論を、関数  $f(R)$  に拡張した修正重力理論のレビューである。

第3章では、 $f(R)$  重力理論における背景量の時間発展を論じる。現在に近い時刻において  $f(R)$  重力理論の特徴を見出すために、実効的ダークエネルギーの圧力とエネルギー密度の無次元比である状態方程式パラメータ  $w$  の時間発展を数値計算により追跡した。その結果、 $f(R)$  重力理論においては  $w$  が時間変化し、現在に近い過去において  $-1$  より小さくなるファントム・クロッシング現象が生じることを示した。従来のスカラー場を用いたモデルでは  $w$  を安定に  $-1$  より小さくすることは不可能であるため、将来の観測結果から  $f(R)$  重力理論を検証する重要な予言であると考えられる。

第4章では、 $f(R)$  重力理論における物質密度揺らぎの時間発展を考察した。現在有力視されている Starobinsky 模型および Hu-Sawicki 模型では、関数  $f(R)$  が複雑な形であるため、密度揺らぎの厳密解を導出できないという問題点があった。しかし二つの模型は高曲率近似の極限では共通の関数形になる。これを用いて密度揺らぎの微分方程式を解析的に導出した。さらにその解析解を導出し、 $f(R)$  重力理論では小スケールの密度揺らぎの成長が促進されることを確認した。次に、高曲率近似が破れる領域において背景量と摂動量の発展方程式を

合わせて数値的に解き、密度揺らぎの時間発展を追跡した。質量を持つニュートリノは高速で運動するため、小スケールの密度揺らぎの成長を抑制する。これは上述の  $f(R)$  重力理論と反対の効果であるため、両者が相殺するため、宇宙定数モデルに比べてより大きなニュートリノ質量が許される。実際、近年のニュートリノ振動実験から、 $1\text{eV}$  程度の質量を持ったステライル・ニュートリノの存在が示唆されており、仮にそれが確立すれば宇宙定数モデルでは説明が困難であり、 $f(R)$  重力理論を支持する証拠となることが示された。

第5章は、具体的な  $f(R)$  重力理論におけるインフレーションと再加熱期を解析し、厳密解を導出した。このモデルは特に再加熱時の振動期において従来のモデルとは異なる非調和振動を引き起こす。これは再加熱期における重力的粒子生成の効率を下げる働きを持ち、 $10^7\text{GeV}$  という低い再加熱温度を導く。また曲率揺らぎとテンソル揺らぎを評価し、現在の観測データからモデルパラメータに制限を与えた。

第6章は、ここまで考察した修正重力理論にさらにパリティを破るチャーレン・サイモンズ項  $G$  を取り入れた  $f(R, G)$  理論において、ブラックホールのまわりの摂動にどのような帰結をもたらすかを解析した。その結果、非物理的なゴースト自由度が生じることが分かり、それを回避するために関数  $f(R, G)$  が満たすべき安定性条件を導いた。

第7章はこれらの結果の結論が要約されている。いくつかの数学的な補遺が付録AからCで与えられている。

このように、本学位論文は、修正重力理論を現象論として取り扱い、標準的な宇宙定数モデルからのずれを定性的・定量的に評価した。将来的には、精密な測データを用いて両者を区別すること、さらに修正重力理論をより本質的な理論の枠組みから導出することが、本分野の最終的な到達点であり、本研究はその段階への橋渡しとなるものである。なお、本論文の一部は、指導教官である横山順一教授、ビッグバンセンター客員教授アレクセイスタロビンスキー教授等との共同研究にもとづいているが、論文提出者が主体となって解析・議論を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって博士（理学）を授与できると認める。