

氏名（本籍）	加瀬竜太郎（神奈川県）
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	甲第1068号
学位授与の日付	平成27年3月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Effective field theory of modified gravity on cosmological and spherically symmetric backgrounds (宇宙論的及び球対称的な背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論)

論文審査委員	(主査) 教授 鈴木 彰
	教授 渡辺 一之 教授 趙 新為
	准教授 松下 恭子 准教授 辻川 信二

論文内容の要旨

1998年にIa型超新星の観測により、現在の宇宙は加速膨張していることが発見され、この未知の現象の源は暗黒エネルギーと名付けられた。暗黒エネルギーの最も単純な候補は宇宙項であり、素粒子物理学における真空のエネルギーに対応する。しかし、理論的に予言される真空のエネルギーのスケールと、観測的に分かっている暗黒エネルギーのスケールの間には非常に大きな差が存在し、この問題は未だ解決されていない。暗黒エネルギーの起源が宇宙項でないとした場合、代替案として大きく分けて二つの可能性が考えられている。一つ目は修正物質理論と呼ばれ、一般相対論（GR）の枠組みの中で時空の計量場と最小結合したスカラー場により後期加速膨張を引き起こす理論である。二つ目は修正重力理論と呼ばれ、大スケールでの重力理論の修正を考えることにより後期加速膨張の説明を可能とする。2013年にPlanck衛星による宇宙背景輻射（CMB）の観測から、暗黒エネルギーを特徴付ける量である状態方程式 w_{DE} に最新の観測的制限がつけられた。特に w_{DE} が一定であるとした場合、Planck衛星の観測データとIa型超新星の観測データ（SNLS）との複合解析による観測的制限は $w_{DE} = -1.13^{+0.13}_{-0.14}$ となっている。宇宙項や修正物質理論の

ような GR の枠組みにおいて $w_{DE} < -1$ を実現することは一般的に難しいが、修正重力理論ではこれを可能とする模型が数多く存在する。このような背景から、修正重力理論は現在世界中で活発に研究が行われている。

修正重力理論に基づいた暗黒エネルギー模型としては、フランス・ディッケ理論、 $f(R)$ 重力理論、DGP ブレーンワールド理論、ガリレオン重力理論等が現在までに考えられている。これらの大部分の模型には、時空の計量場と非最小結合したスカラー自由度が存在する。この重力的なスカラー自由度の存在によって大スケールでの重力理論が修正され、宇宙の後期加速膨張が実現する。

修正重力理論に基づいた暗黒エネルギー模型の宇宙論的な有効性を議論するためにはまず、理論的な安定性を検証する必要がある。宇宙論的摂動論を用いてラグランジアンを摂動量の二次まで展開し、運動エネルギーに対応する項が負の係数を持つ場合、その理論はエネルギーが下に有界でなくなり、ゴースト不安定性が生じる。また摂動の伝播速度の自乗が負の値を持つ場合、ラプシアン不安定性が生じる。これらの振る舞いを避けるための安定性の条件を求めることで、与えられたラグランジアンに理論的な条件を課すことができる。更に、修正重力理論に基づいた暗黒エネルギー模型において現れるスカラー自由度は時間変化する動的な場であることから、実際に理論がこれらの安定性の条件を満たしているか否かは、輻射優勢期、物質優勢期、加速膨張期といった宇宙の歴史の中の各時点において解析的・数値的に確かめることが必要となる。

修正重力理論は大スケール（宇宙論的背景時空）での重力理論の修正によって宇宙の後期加速膨張を実現する一方で、太陽系での局所重力実験は高い精度で GR が成立していることを確認しているため、重力理論の修正の効果は小スケール（球対称背景時空）においては抑制されなければならない。このような遮蔽機構としてはフランス・ディッケ理論、 $f(R)$ 重力理論等において働くカメレオン機構や、DGP ブレーンワールド理論、ガリレオン重力理論等において働くヴァインシュタイン機構というものが存在する。前者の機構では、スカラー場のポテンシャルが高密度領域で大きな有効質量を生じさせることで、スカラー場の伝播が阻害される。一方、後者の機構ではスカラー場の非線形な相互作用項によって小スケールでの重力理論の修正の効果が自然と抑制される。これらの機構によって重力理論の修正がどの程度抑制されるのかを調べ、局所重力実験の結果と比較することで修正重力理論に基づく暗黒エネルギー模型に制限を課すことが可能となる。また、宇宙論的背景時空の場合と同様に、球対称背景時空まわりでの摂動論を考え、理論の安定性を議論することも必須となる。

以上のことから、修正重力理論を研究する上では、宇宙論的背景時空（大スケール）及び球対称背景時空（小スケール）双方での解析が必須となる。これらの研究は、数多く存

在する修正重力理論に基づく暗黒エネルギー模型に対して、今まで別個に行われてきた。統一的な枠組みとしては、運動方程式が微分に関して二次のオーダー以下であるような理論を全て内包するホルンデスキー理論というものがあるが、近年 Gleyzes, Langlois, Piazza, Vernizzi らによって提唱された GLPV 理論はこの枠組みには内包できない。

このような背景から私は、宇宙論的及び球対称的な背景時空における修正重力理論に関する有効場の理論に関する研究を行った。この枠組みは、ホルンデスキー理論を越えて、修正重力理論に基づく様々な暗黒エネルギー模型を内包する。よって、修正重力理論に関する有効場の理論を用いることで、今までは個々の模型に関して別々に行われてきた研究を、模型に依存せず統一的に行うことが可能となる。

先行研究において提唱された宇宙論的背景時空での有効場の理論は、時空の 3+1 分解という手法に基づいている。この手法を用いることで、四次元時空の中から時間方向を抜き出し、重力理論を記述する幾何学量を時間一定三次元超平面に射影することが可能となる。更に、重力理論の修正に寄与するスカラー場は、ユニタリゲージでは時間のみに依存する関数となり、時間一定超平面ではスカラー場も一定となる。そこでスカラー場を時間と同定することにより、スカラー場をあらわに含めずとも三次元超平面に射影された幾何学量でラグランジアンを構築することが可能となる。このようなラグランジアンは、ホルンデスキー理論だけでなく GLPV 理論も部分集合として内包する。

上記の先行研究で導かれた有効場の理論のラグランジアンは、物質場を含めずに構成されている。しかし、理論の安定性を議論するためには、輻射優勢期や物質優勢期での振る舞いも検証しなければならない。そこで我々は、複数の物質場が存在する状況下で、宇宙論的背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論を研究した。ラグランジアンを宇宙論的摂動論の二次まで展開し、重力理論の修正に関わるスカラー場と新たに加えた物質場それぞれに対し、ゴーストを避ける条件、及び摂動の伝播速度の表式を求めた。これらの結果をホルンデスキー理論及び GLPV 理論に適用することで、後者の場合には全ての場の伝播速度が非自明に修正されることを示した。更に、我々の得た一般的な結果を具体的な模型、covariant Galileon (ホルンデスキー理論に属する) と covariantized Galileon (GLPV 理論に属する) に適用し、輻射優勢期、及び物質優勢期における伝播速度の自乗の時間変化を調べた。二つの模型は背景時空においては同じ運動方程式に従うものの、摂動レベルでは異なる振る舞いをする。特に後者の模型は物質優勢期中に重力理論の修正に寄与するスカラー場の伝播速度の自乗が負となり、ラプラス不安定性が生じることを明らかにした。我々の導出した一般的な結果は、ホルンデスキー理論を越えて様々な修正重力理論に基づく暗黒エネルギー模型に適用することができ、特に物質優勢期や輻射優勢期等における理論の安定性を議論する上で、強力なツールとなる。

我々はまた、修正重力理論を研究する上で宇宙論的背景時空と並んで非常に重要である球対称背景時空において、修正重力理論に関する有効場の理論を初めて構築した。宇宙論的背景時空では空間方向は全て等価だが、球対称背景時空では特別な空間方向、すなわち動径方向が存在する。そこで我々は、時空の $2+1+1$ 分解という手法を用いて四次元時空から時間方向と動径方向を分離した。更に動径ユニタリゲージをとり、重力理論の修正に寄与するスカラー場を動径のみに依存する関数にすることで、これを動径一定超平面に吸収させ、 $2+1+1$ 分解に現れる幾何学量のみを用いて修正重力理論の一般的なラグランジアンを構築した。我々は、宇宙論的背景時空の場合と同様に、ホルンデスキー理論だけではなく GLPV 理論等もこのラグランジアンに部分集合として内包されることを示した。このラグランジアンを球対称背景時空まわりでの摂動一次まで展開することで、背景時空における基礎方程式を導出した。この模型に依存しない基礎方程式は、遮蔽機構の研究等に応用することが可能である。更に我々は球対称背景時空まわりでの奇パリティ摂動に対し、ラグランジアンを摂動の二次まで展開して、ゴースト不安定性を避ける条件、及び動径方向と角度方向の摂動の伝播速度を導いた。我々はこれらの一般的な結果をホルンデスキー理論と GLPV 理論に適用し、更に前述の covariant Galileon と covariantized Galileon 模型においてどのように違いが出るのかを議論した。

我々が得た宇宙論的及び球対称的な背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論は、模型によらない統一的で体系立てられた解析を可能とする。特に前者は、宇宙の歴史の中での理論の安定性の議論だけではなく、重力ポテンシャルと物質ゆらぎの進化が、それぞれ CMB と宇宙の大規模構造に与える影響を研究する上でも非常に強力なツールとなる。一方で後者は特に、局所領域における重力理論の修正に関する遮蔽機構を研究する上で統一的な枠組みを提供する。理論的に安定であり、全ての観測と整合性のある模型を構築し、暗黒エネルギーの起源に迫る上で、我々の研究結果は非常に有用である。

論文審査の結果の要旨

1998 年に Ia 型超新星の観測から現在の宇宙は加速膨張していることが発見され、この未知の現象の源は暗黒エネルギーと名付けられた。近年、この後期加速膨張を大スケールでの重力理論の修正により説明する修正重力理論が活発に研究されている。また、小スケールにおいては局所重力実験により高い精度で相対論が成立していることが分かっているため、修正重力理論はこのようなスケールにおいて重力理論の修正を抑制する遮蔽機構が必要となる。そのため、修正重力理論を研究する上では、宇宙論的背景時空（大スケール）及び球対称背景時空（小スケール）双方での解析が必須となる。これら

の研究は、数多く存在する修正重力理論に基づく暗黒エネルギー模型に対して今まで個別に行われてきた。しかし近年、宇宙論的背景時空での修正重力理論の研究を模型に依存せず統一的に行うことを可能にする、宇宙論的背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論が J. Gleyzes らによって提唱された。この枠組みは、時空の $3+1$ 分解という手法により四次元時空から時間方向を分離し、その結果として現れる時空の幾何学量を用いることで作用が構成されている。この作用は、修正重力理論に基づく様々な暗黒エネルギー模型を内包し、非常に汎用性が高い一方で、物質場の存在しない真空中での議論のみが行われているため、非相対論的物質や輻射を含んだ実際の宇宙進化の中での修正重力理論の研究にそのまま用いることはできない。また、先行研究で提唱された枠組みは、宇宙論的背景時空を前提として構築されているため、遮蔽機構の研究が行われる球対称背景時空にそのまま応用することは不可能である。

本論文では宇宙論的及び球対称的な背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論の研究をまとめている。これらの研究から得られた一般的な結果は、模型に依存しない統一的かつ体系立てられたものであり、大スケールと小スケール双方での今後の修正重力理論の研究に非常に大きく貢献することが期待される。

第 1 章では、宇宙の後期加速膨張の発見と最新の観測的からの暗黒エネルギーに対する制限をふまえ、修正重力理論の研究背景と動機が述べられている。

第 2 章では、宇宙論的背景時空での修正重力理論の有効場の理論に関して述べられている。特に先行研究には含まれていなかった物質場を新たに導入し、実際の宇宙進化の中での修正重力理論の研究に用いることができるよう枠組みの拡張を行った。この有効場の理論の作用を宇宙論的摂動の二次まで展開し、作用の摂動一次から背景時空における運動方程式を、摂動二次から摂動方程式と、摂動の伝播速度及び理論の安定性の条件を導いた。これらの結果は模型に依存しない一般的なものである。論文著者は、これらの結果の具体的な模型への適用を行い、*covariant Galileon* 模型に関して先行研究と同じ結果を再現することを確かめた。更に、まだ安定性の議論がされていない *covariantized Galileon* 模型への適用を行い、宇宙進化の中で非相対論的物質が優勢となる時期に、摂動の伝播速度の自乗が負となるラプラシアン不安定性が現れることを明らかにした。

第 3 章では、球対称背景時空での修正重力理論の有効場の理論に関して述べられている。宇宙論的背景時空では空間方向は全て等価だが、球対称背景時空では特別な空間方向、すなわち動径方向が存在する。そこで論文著者は、時空の $2+1+1$ 分解という手法を用いて四次元時空から時間方向と動径方向を分離し、結果として現れる幾何学量を用いて球対称背景時空での修正重力理論の有効場の理論を構築した。論文著者は、球対称時空まわりでの摂動論を用いて、作用の摂動一次から背景時空での基礎方程式を導出した。この一般的な結果は遮蔽機構の研究に応用することが可能である。また、球対称時空まわりでの摂動のうち、奇パリティ成分に関して作用を摂動二次まで展開し、奇パリティ摂動に対する摂動方程式、摂動の伝播速度及び理論の安定性の条件を導いた。

このように本論文では、宇宙論的及び球対称的な背景時空での修正重力理論に関する有効場の理論の研究を行い、大小のスケールそれぞれにおいて、模型に依存せずを用いる

ことができる枠組みを構築した。これらの研究から得られた一般的な結果は潜在的に既存の模型を超えて適用可能であり、大小のスケールで観測と整合性のある理論模型の構築を行い、現在の加速膨張の起源に迫る上で非常に大きく貢献することが期待される。

以上により、本研究は博士（理学）の学位論文として適切であり、非常に価値があると博士論文審査員一同が認めるものである。