

学位論文要旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	f(R) 重力理論における宇宙初期と現在の加速膨張の統一モデルの観測的検証 (Observational tests of unified models of early and current accelerated expansions of the universe in f(R) gravity)
氏名 (Name)	家舗 真衣
<p>我々のいる宇宙には、2つの加速膨張期が存在する。1つはインフレーションとよばれる宇宙初期の急激な加速膨張である。インフレーション理論は、ビッグバンから宇宙が始まったとする標準宇宙モデルで生じる問題を自然に説明することができるだけでなく、宇宙最古の光である宇宙マイクロ波背景放射の観測結果と整合性があることがわかっている。もう1つは、Ia型超新星爆発の観測から発見された現在の宇宙の加速膨張であり、この加速膨張を引き起こす要因はダークエネルギーと呼ばれている。これら2つの加速膨張を引き起こす正体は未だわかっておらず、現在も様々な研究が行われているが、一般的にはそれぞれの加速膨張は別の機構によって引き起こされると考えられている。</p> <p>一方、f(R)重力理論と呼ばれる、一般相対論における重力の作用に含まれるスカラー曲率 R の線形項を、R の非線形関数 f(R)に置き換えた作用を用いて記述される重力理論では、関数 f(R)をうまく選ぶことによってインフレーションを説明するモデルにも、現在の加速膨張を説明するモデルにもなる。このことから、各加速膨張を説明するモデルを統一することで、2つの加速膨張期を1つのモデルで説明できないかという研究がなされている。もし1つのモデルで説明可能であるならば、その間の期間にあたる放射優勢期・物質優勢期でも重力が修正されていることになる。そこで、f(R)統一モデルで2つの加速膨張期を説明し、かつ間の期間も含めた宇宙全体の発展が観測と整合的であるかを議論した。f(R)統一モデルが現実的なモデルとなるためには、いくつかの観測結果と矛盾がないようにしなければならない。本論文では3つの統一モデルについて、宇宙初期・インフレーション以降の宇宙の発展・重力テストの3つの検証を行った。</p> <p>宇宙初期に関しては、統一モデルが予言するインフレーション中に生成される初期ゆらぎの大きさとスケール依存性が、観測結果と一致しているかを調べる必要がある。初期ゆらぎの情報は宇宙マイクロ波背景放射に刻まれており、宇宙マイクロ波背景放射の観測から初期ゆらぎの大きさとそのスケール依存性に対して制限がつけられている。本論文で用いた f(R)統一モデルが予言するこれらの値はモデルパラメータに依存している。各モデルにおける値と観測結果を比較することで、モデルパラメータに対する制限を与えることができる。先行研究では、本研究と同じモデルのパラメータに対する制限を求める際、BICEP2の観測結果を用いていたが、BICEP2のデータは後に間違っていることが判明した。そこで、Planck衛星による最新の観測による制限を使ってパラメータへの制限を再解析した。</p> <p>インフレーション以降の宇宙において、放射・物質優勢期では一般相対論が正しいことがわかっているため、重力理論を修正した f(R)統一モデルはそれらの時期では一般相対論を回復しなければならない。そのため、宇宙の発展を記述する以前に、通常の放射・物質優勢期が存在するための条件を満たしている必要がある。また、物質優勢期は星や銀河等の構造形成を行う重要な期間であるため、その継続期間が重要となってくる。これは各優勢期が存在するための条件だけでは非自明であるため、それぞれの優</p>	

勢期がどの程度続くかを宇宙の膨張則を支配する方程式を数値的に解くことで調べた。その結果、各優勢期が存在するための条件の下で、宇宙マイクロ波背景放射等の観測から得られる現在の宇宙の組成の割合と一致する宇宙の発展を実現することを示した。

$f(R)$ モデルには太陽系での重力テストから制限がつけられている。 $f(R)$ 重力理論を含む修正重力理論には、一般相対論では現れないスカラー自由度が存在し、このスカラー場が物質と相互作用することで、我々が知る 4 つの力以外の第 5 の力が発生してしまう。しかし、このような力は太陽や地球などの宇宙の局所領域では観測されていないため、抑制されなければならない。 $f(R)$ 重力理論における第 5 の力を抑制する機構をカメレオン機構といい、スカラー場の質量が周りの密度に依存して変化することで、局所領域ではスカラー場の寄与をなくすることができる。一般的な  $f(R)$ 統一モデルの研究では、インフレーションのエネルギースケールと現在のエネルギースケールは大きく違うことから、インフレーションを起こす項はインフレーション以降には寄与しないものとして重力テストを検証していた。しかし、各統一モデルのモデルパラメータの選び方次第で、比較的低いエネルギースケールでインフレーション項が関数  $f(R)$ のその他の項よりも優勢となる可能性があることがわかった。そこで、これまで無視されていたインフレーション項を考慮したスカラー場の質量を計算し、どの程度のスケールでインフレーション項の寄与が質量に現れるかを検証した。その結果、重力テストをパスするモデルパラメータの制限下において、インフレーションよりも低いエネルギースケールでインフレーション項の影響が現れることを示した。この時、重力テストからの制限が課されている範囲(〜地球スケール)で、カメレオン機構が破綻するほど質量は軽くはならないことがわかった。

(様式9号)

## 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏名	冢 鋪 真 衣
審査委員	主 査： 坂 井 伸 之
	副 査： 白 石 清
	副 査： 藤 澤 健 太
	副 査： 新 沼 浩 太 郎
	副 査： 齊 藤 遼
論文題目	f(R)重力理論における宇宙初期と現在の加速膨張の統一モデルの観測的検証 (Observational tests of unified models of early and current accelerated expansions of the universe in f(R) gravity)
<b>【論文審査の結果及び最終試験の結果】</b> 重力は「万有引力」と呼ばれるように、我々が知っているあらゆる物体は重力によって引きつけ合うため、宇宙膨張は減速するものと長年考えられてきた。しかし、現在の宇宙が加速膨張していることと、宇宙初期にもインフレーションという加速膨張の時期があったことが、近年の観測から示唆されている。一体何が宇宙膨張を加速させているのか。それを説明するための研究が盛んに行われてきたが、この2つの加速膨張は独立な現象として別々のモデルで検討されることが多い。本研究では、一般相対論を拡張したf(R)重力理論によって、この2つの加速膨張を1つのモデルで説明することを試みた。なお、一般相対論の作用関数がスカラー曲率Rの線形関数であるのに対し、それをRの非線形関数に拡張することから、f(R)重力理論と呼ばれる。 具体的には、f(R)理論として3つのモデルを仮定し、次の3つの理論解析を行い、様々な観測データと矛盾しないモデルパラメーターの範囲を求めた。 1. インフレーション期に作られる密度揺らぎを計算し、宇宙マイクロ波背景放射のPlanck衛星による最新のデータと比較し、モデルパラメーターに対する新しい制限を与えた。 2. インフレーション期の後は、放射優勢期・物質優勢期という減速膨張期を経て、現在の加速膨張に移行したと考えられている。この放射優勢期と物質優勢期が実現する条件を求めた。 3. f(R)重力理論では、天体間に一般相対論とは異なる力が働き「第5の力」と呼ばれる。一方、太陽系における地球や月の運動から、第5の力に対して観測的制限を与えられている。その制限からモデルパラメーターに対する制限を与えた。 本研究では、これまで別々に検討されてきた2つの加速膨張モデルを形式的に1つにまとめるだけでなく、各加速膨張に寄与する2つの項を考慮することによって、加速膨張期に挟まれた減速膨張期はどうか、天体の周りの重力場はどうか、といった新しい観点で研究を行ったことに特徴がある。また、宇宙論研究は多くの予備知識と先行研究の調査が必要であるため、一般に学生が最初から自分でテーマを設定することは難しいが、ほぼ自力で文献を調べてテーマを設定したことは、論文の直接的評価には当たらないが、特筆すべきである。 公聴会における主な質問内容は、第5の力のメカニズムに関するもの、宇宙の状態方程式の進化に計算結果に関するもの、3つのモデルが考えられた動機、及び本研究に基づく3つのモデル	

(別紙様式第 10 号)

の成否に関するものなどであった。いずれの質問に対しても、発表者からの的確な解答がなされた。  
以上により本研究は、十分な独創性と学術的意義があり、博士（理学）の論文に値するものと判断した。

審査員による口頭試問は、1 回目を 1 月 29 日に、2 回目を 2 月 12 日に実施した。1 回目では研究発表と質疑応答を行い、次の 3 点が課題として出された。

1. 修正重力理論の 1 つである Brans-Dicke 理論では、第 5 の力はどうなるのか。
2. 第 5 の力がどのようなメカニズムで現れ、どのような観測で検出されるのか。
3. インフレーションで生成されるスカラー揺らぎとテンソル揺らぎの物理的意味を説明せよ。

これらの課題について、2 回目の試験において的確に説明することができた。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、関連論文の発表状況は以下の通りである。(関連論文 1 編、参考論文 0 編)

・Mai Yashiki, Inflation and cosmological dynamics in  $f(R)$  dynamics, PHYSICAL REVIEW D 96, 103518 (2017)