

論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)	氏名	照 喜 名 歩
学位授与の要件	学位規則第 4 条第①・2 項該当		
論文題目			
Testing modified gravity models with multi-wavelength observations of galaxy clusters (銀河団の多波長観測を用いた修正重力理論の検証)			
論文審査担当者			
主 査	准教授	山本 一博	
審査委員	教 授	小 嶋 康史	
審査委員	教 授	大 川 正典	
審査委員	教 授	深 澤 泰司	
〔論文審査の要旨〕			
<p>宇宙の加速膨張の発見は、引力という馴染みのある重力の性質とは相反する重力の性質が宇宙論的スケールで現れていることを示しており、物理学の根本的問題として多くの研究の動機となっている。重力理論の修正によって、宇宙の加速膨張を説明する試みが議論され、その中に本論文の動機ともなっている加速膨張を説明し観測と矛盾しない興味深い修正重力モデルが提案されている。一般に、一般相対性理論を修正すると、余計な自由度が生じる。この自由度は、第五の力を生み出すが、第五の力は太陽系スケールの精密観測によって強く制限されている。そこで、このような修正重力モデルは、太陽系スケールのように物質密度の高い物体やその周辺において、第五の力を隠す巧みなスクリーニング機構を備えている。</p> <p>本研究では修正重力モデルとスクリーニング機構を検証する新しい方法を提案し、その有効性の実証までを行った。具体的には、銀河団という宇宙の非線形構造に着目し、理論モデルを構築して観測と比較することで検証を行った。銀河団は、ダークマターが作る重力に銀河と銀河間ガスが閉じ込められた系である。ガスの分布は静水圧平衡による理論モデルが第零近似として成立する。申請者は、先ず第五の力が銀河団ガスに働く場合、ガスの分布が影響を受け、銀河団の観測量に影響するため、これを用いて検証できる可能性を指摘した。さらに近年、銀河団の多波長観測、つまり X 線観測、電波によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果の観測、弱重力レンズ観測など複数の手法による同じ銀河団の観測が進んでいることに着目し、これらの観測データを利用することで、精密な理論と観測との比較から重力理論の検証が可能であることを実証した。</p> <p>修正重力理論の検証は、太陽系スケールから宇宙論スケールまでこれまでも異なる方法により研究がなされてきた。特に宇宙論スケールでは、宇宙背景放射の温度揺らぎや、銀河の大規模構造を用いた密度揺らぎの線形領域での検証研究は、先行研究として成果が挙げられている。銀団を用いた重力検証の特徴の第一は、数 Mpc スケールという宇宙論的に小スケールで、密度揺らぎの非線形スケールの検証としてユニークである。第二に銀河団を用いた重力検証の特徴は、スクリーニング機構を検証できる点にある。宇宙の加速膨張に動機付けられた修正重力理論の代表としてまず $f(R)$ 模型があげられる。この模型は共形変</p>			

換によりカメレオン模型と等価であることが示される。カメレオン模型は、重力の修正により現れる自由度を、物質と相互作用して第五の力を与えるスカラー場によって表現する。この模型では、物質との相互作用により物質密度の高い領域では、スカラー場の有効質量が大きくなり、スカラー場の物質への影響を隠すスクリーニング機構が働く。また、本研究では、一般化されたガリレオン重力模型も取り上げている。カメレオン模型と同様に物質と相互作用し、第五の力を生み出すスカラー場を含む修正重力模型である。ガリレオン模型がカメレオン模型と異なる点は、スクリーニング機構の違いである。物質密度の高い領域では、スカラー場の微分非線形相互作用により、スカラー場の値を小さくするスクリーニング機構が働く。

申請者は、カメレオン重力模型と一般化されたガリレオン重力模型に基づいて銀河団のガス分布に対する模型を構築した。これは、ダークマター分布が作る重力ポテンシャルとスカラー場の配位、それらが作る力とガスの圧力勾配を基礎にした模型である。さらにこれらの理論模型にもとづいて、銀河団の X 線強度・温度プロファイル、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果による電波強度プロファイル、弱重力レンズ・シアプロファイルの理論予言を行い、観測データとの比較を可能にした。実際に髪の毛座銀河団に対して得られている観測データと比較し、修正重力模型に対するテストを行った。

この結果、上記のカメレオン模型に対しては、そのモデルパラメーターである結合定数 β と背景スカラー場 ϕ_0 に対する制限を得た。この制限は、 $f(R)$ 重力模型のパラメーターに変換した場合、 $|f_{R0}| < 6 \times 10^{-5}$ (95% C.L.) という制限をえた。これは、現在これまでに得られている Mpc 以上のスケールにおける $f(R)$ 模型の制限としては、最も強い制限となった。さらに、一般化されたガリレオン模型に対しても、スクリーニングの遷移が起こるスケール、重力ポテンシャルとレンズポテンシャルそれぞれの振幅を決めるパラメーターに対して同様の解析を行った。この解析で、一般的な重力理論では、重力ポテンシャルとレンズポテンシャルへの影響が独立であり、X 線観測、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果の観測、および重力レンズ効果の観測を組み合わせることで、それらのパラメーター間の縮退を解いて、有用な観測的制限を得ることができると始めて示した。

上記の解析では、マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて統計誤差の評価も行っている。また、系統誤差に関する議論も丁寧に行っている。特に、銀河団模型において問題が指摘されている非平衡圧力に関して、シミュレーションから予想されるランダム運動に由来する成分の寄与を考慮して、その影響まで検証している。今後銀河団の観測データの蓄積を考えると、これらの研究は、観測から銀河団の精密な理論模型を構築、およびそれを利用した重力理論の検証において重要な指針を与える成果である。

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) Gas density profile in dark matter halo in chameleon cosmology, Ayumu Terukina, Kazuhiro Yamamoto, *Physical Review D* 86, 103503 (2012)
- (2) Testing chameleon gravity with the Coma cluster, Ayumu Terukina, Lucas Lombriser, Kazuhiro Yamamoto, David Bacon, Kazuya Koyama, Robert C. Nichol, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 04(2014)013
- (3) Testing a generalized cubic Galileon gravity model with the Coma Cluster, Ayume Terukina, Kazuhiro Yamamoto, Nobuhiro Okabe, Kyoto Matsuhita, Toru Sasaki, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 10(2015)064

参考論文

- (1) Bispectrum of cosmological density perturbations in the most general second-order scalar-tensor theory, Yuichiro Takushima, Ayumu Terukina, Kazuhiro Yamamoto, *Physical Review D* 86, 104007 (2014)
- (2) What can we learn from higher multiple power spectra of galaxy distribution in redshift space?, Tatsuro Kanamaru, Chiaki Hikage, Gert Huetsi, Ayumu Terukina, Kazuhiro Yamamoto, *Physical Review D* 92, 023523 (2015)
- (3) Yuichiro Takushima, Ayumu Terukina, Kazuhiro Yamamoto Third order solutions of the cosmological density perturbations in the Horndeski's most general scalar-tensor theory with the Vainshtein mechanism, *Physical Review D* 92, 104033 (2015)
- (4) The XMM Cluster Survey: Testing chameleon gravity using the profiles of clusters, Harry Wilcox, David Bacon, Robert C. Nichol, Philip J. Rooney, Ayumu Terukina, A. Kathy Romer, Kazuya Koyama, Gong-Bo Zhao, Ross Hood, ROobert G. Mann, Matt Hilton, Maria Manolopoulou, Martin Sahlen, Chris A. Collins, Andrew R. Liddle, Julian A. Mayers, Nicola Mehtens, Christopher J. Miller, John P. Stott, Pedro T.P. Viana, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society* 452, 1171 (2015)