

# 学位論文要旨

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)

氏名 照喜名 歩

1990年代後半、Ia型超新星の観測により我々の住んでいる宇宙は現在加速膨張期にあることが明らかになった。この事実は現在の宇宙には負の圧力を持つ未知のエネルギー成分が全体の約70%存在していることを示唆している。このエネルギーはダークエネルギーと呼ばれており、ダークエネルギーの解明は宇宙論の大きな目標の一つとなっている。宇宙の加速膨張を説明する標準模型として宇宙項模型がある。この宇宙項模型はアインシュタイン方程式に宇宙項と呼ばれる定数項を加えたシンプルな模型であるが、宇宙論的観測と非常に良い精度で一致することが知られている。しかし、この模型には宇宙定数問題と呼ばれる原理的問題が存在し、これはなかなか解決しない難しい問題となっている。

宇宙の加速膨張を説明するアプローチとして、このような未知のエネルギー成分の導入以外に重力理論の修正というアプローチがある。これはアインシュタインの一般相対論を宇宙論的な長距離スケールで修正し、その修正の効果により加速膨張を再現するアプローチである。修正重力理論の模型には、例えば、一般相対論の作用にリッチスカラーの非線形項を加える  $f(R)$  模型や、スカラー場の高階微分を含むガリレオン模型など様々な模型が提案されている。このような重力理論の修正は重力場に新たな自由度を生じることになる。この自由度がダークエネルギーと同等の効果をもたらす、宇宙の加速膨張を引き起こす。しかし、この自由度は物質に働く力としても作用する。これを「第5の力」とよんでいる。第5の力はニュートン重力と同程度に物質と作用することがある。

しかし、太陽系における実験では一般相対論またはニュートン重力が非常に良い精度で検証されているので、このような局所スケールにおいて第5の力は強い制約を受ける。したがって、修正重力理論では局所スケールで新たな自由度に起因する第5の力を「隠す」必要がある。これをスクリーニング機構とよんでいる。スクリーニング機構は重力模型によってその物理的プロセスが異なっており、よく研究されているものとして  $f(R)$  模型に代表される「カメレオン機構」とガリレオン模型に代表される「ヴァインシュタイン機構」がある。これらのスクリーニング機構は第5の力を物質の密度や時空の曲率に依存して隠すことができる。例えば、太陽系や銀河スケールでは密度が大きいのでスクリーニング機構が働くが、物質密度の小さい宇宙論的大スケールではスクリーニング機構は働かない。このような性質を持つスクリーニング機構の観点から、銀河団は修正重力理論を検証する良い実験室となる。銀河団は宇宙最大の自己重力系で Mpc スケールの天体であり、その密度は内側では物質密度が大きく、外側で物質密度が小さい。すなわち、内側ではスクリーニング機構により一般相対論が回復するが、外側ではスクリーニング機構が働かず第5の力が現れる可能性がある。

本論文では、銀河団を使った修正重力理論の新たな検証方法を提案し、その有効性を実証する。もし第5の力が銀河団中のガスに作用すれば、ガスの圧力勾配と重力との平衡状態が変化し、それによりガスの分布が変更されると予想される。銀河団は、銀河団ガスに起因する X線放射やスニヤエフ・ゼ

ルドヴィッチ効果、銀河団の物質分布に起因する重力レンズ効果などを通して多波長で観測される天体である。このことは銀河団中の物質分布の詳細なモデリングにより、これらの多波長観測を組み合わせることで修正重力理論の検証ができることを示している。

銀河団の理論モデルを修正重力理論の枠組みの中で構築し、その理論予想と実際の銀河団の多波長観測とを比較した。その結果、カメレオン模型と一般化されたガリレオン模型の2つの重力模型に対し有用な制限を得ることが出来た。まず、カメレオン模型に対しては、そのモデルパラメータである結合定数  $\beta$  と背景スカラー場  $\phi_\infty$  に対して制限を得た。この結果は、 $\beta = \sqrt{1/6}$  に対応する  $f(R)$  模型に対して強い制限を与えることがわかった。 $f(R)$  模型を特徴づけるモデルパラメータ  $f_{R0}$  は  $\phi_\infty$  と等価であり、この時の  $f_{R0}$  に対する上限として  $|f_{R0}| \lesssim 6 \times 10^{-5}$  (95%CL.) という制限を得た。下図はその制限の強さを示したものである。横軸はスケール、縦軸はモデルパラメータ  $f_{R0}$  で、棒グラフは先行研究等で得られたそれぞれのスケールに対応する観測によって与えられた  $f_{R0}$  の制限を示している。Coma で示した結果が本論文の結果であり、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ている。

次に、一般化されたガリレオン模型に対しては、そのモデルパラメータである  $\epsilon, \mu_G, \mu_L$  に対する制限を得た。これらのパラメータはそれぞれスクリーニング半径、修正された重力ポテンシャルとレンズポテンシャルの振幅を特徴づけるパラメータである。この模型では第5の力はガスの分布だけでなく重力レンズ効果にも影響し、その修正度合いはそれぞれモデルパラメータ  $\mu_G$  と  $\mu_L$  によって特徴づけられることになる。我々はこれらの特徴がガス分布と重力レンズ効果の観測を組み合わせることによって調べることが可能であることを示した。そして、これらの相補的な多波長観測は一般化されたガリレオン模型のモデルパラメータの縮退を解くことができ、その結果、3つのモデルパラメータ  $\epsilon, \mu_G, \mu_L$  のパラメータ空間における有用な制限が得られることを示した。また、これらの解析において銀河団観測に存在する系統誤差についても注意深く議論した。

