

# 論文審査の結果の要旨

氏名 河原 創

本論文は7章から構成されている。第一章は序論として観測的宇宙論における銀河団研究の位置づけが述べられている。最も標準的な宇宙の構造形成理論は、暗黒物質とバリオンからなる密度場の初期の小さな揺らぎが自己重力により成長し、銀河、銀河団、大規模構造といった諸階層が作られていくというものである。銀河団は、可視光によるメンバー銀河、高温プラズマ（銀河団ガス）から発せられるX線や宇宙背景放射の銀河団ガスによるスペクトル変形、「スニャーエフ・ゼルドビッチ効果（SZ効果）」等による宇宙論的観測が可能であるが、銀河団を用いた宇宙論をさらに精密に行うために、銀河団構成要素の良いモデリングをすることが必要である。

第2章では、銀河団研究の解説について、銀河間物質の密度プロファイルや温度プロファイル、銀河団中の高温ガスからのX線放射、さらにSZ効果によるハッブル定数の決定の現状が述べられている。本論文に必要な銀河団に関する様々な定式化がこの章で行われている。

第3章では、暗黒物質とバリオンからなる初期の密度揺らぎを重力、流体力学的に計算させて得られた高分解能の宇宙流体シミュレーションの結果、形成された銀河団に基づいて、密度、温度の非一様性の統計的性質の研究が行われている。シミュレーションから大きな銀河団6個を切り出し、密度、温度の動径平均とその周りのゆらぎの分布を求めると、温度、密度共に対数正規関数により近似できる事を見出した。異なる計算手法で得られたシミュレーションでも同様の性質が確かめられ、普遍的な性質であると言える事ができる。この発見は、今後、銀河団が関係する宇宙論的問題に対して、実際の計算で非一様性の影響を調べることが可能となるため意義は大きい。

第4章では、銀河団の温度推定に関する系統誤差に対するゆらぎの効果の研究である。銀河団の「温度」は質量推定に用いられる重要な量である。銀河団ガスの密度、温度ではガスは衝突電離平衡にあるため、温度がプラズマの電離状態を決め、高温ガスに対応するX線観測で温度を測定することができる。一方、理論、シミュレーションでは、代表温度の定義は、銀河団ガスが不均一なため重み関数を用いて平均量で定義せざるを得ない。この二つの温度の間に系統的な違い（温度バイアス）が、銀河団を用いた宇宙論パラメータ推定に直接影響

する事が指摘されてきた。本章では、先の対数正規モデルを用い、この温度バイアスの原因が密度、温度の動径分布だけではなく、銀河団ガスの非一様性にあることを示した。

第5章は、SZ効果とX線輝度を利用したハッブル定数の推定にゆらぎが及ぼす影響についての研究である。スペクトル温度を用い、温度、密度の非一様性、温度動径分布や非球対称性が推定方法にどのような系統誤差を与えるかを調べた結果、密度揺らぎ、温度動径分布、温度推定バイアスの三つが大きな系統誤差であることが分かり、それらの定量的な評価から、SZ効果を用いた推定法が実際に他の方法にくらべて10%程度の過小評価を与えることを導いた。これは銀河団中のゆらぎが実際に宇宙論パラメータの推定に影響を与える事を示す結果であり、非常に興味深い。

第6章では、実際の銀河団のX線観測データから密度揺らぎの統計的情報を得ることが試みられている。観測量は必然的に二次元投影されたものであるので、非一様性の三次元的統計的情報を二次元X線輝度分布から引き出す方法を開発し、その上で実際の銀河団のX線観測データが解析されている。投影による効果を調べるために密度揺らぎが対数正規分布に従うような場合のX線輝度分布を多数作成し、投影後の輝度ゆらぎの分布関数も対数正規分布に従う事を導いた。Chandraのアーカイブデータ中、最も光子統計の良い観測データを持つ銀河団であるAbell13667を用いてX線輝度揺らぎの分布を求めた所、対数正規分布が最も良く一致した。また、合成銀河団で得られた関係式をもちいて、(三次元)密度揺らぎの大きさを推定した。この結果は銀河団ガスの密度揺らぎに対する対数正規モデルの兆候を確かめた初めての観測結果であると言える。

第7章は全体を通した結論付けである。本論文において、銀河団ガス内の温度、密度揺らぎが、温度推定、ハッブル定数推定といった銀河団を用いた宇宙論やその解釈に大きく影響することが初めて示され、また、揺らぎの対数正規モデルを示唆する観測的な結果が初めて示された。本論文で発展させた非一様性のモデルは、今後の様々な観測による銀河団の観測データの解釈、宇宙論モデル検証のさらなる精密化に寄与する。

なお、本研究の一部はKlaus Dolag, Eric D. Reese, 須藤 靖, 北山 哲, Elena Rasia, 佐々木 伸, 清水 守との共同研究であるが、論文提出者が主体的に分析、検証を行っており、その寄与は十分であると判断される。

よって、博士(理学)の学位を授与できると認める。