

論文審査の結果の要旨

氏名 岡部 泰三

本論文は、6章からなり、第1章は序章である。宇宙における銀河、銀河団などの豊かな階層構造の形成過程の標準的シナリオは、宇宙項および冷たいダークマターが支配的なモデル Λ CDM である。この Λ CDM モデルでは、より小さなスケール（質量の軽い）天体がまず形成し、それらの合体、質量集積を経て、より大きな天体が形成してきたと考えられている。特に、銀河団は宇宙最大の自己重力天体であり、宇宙論および構造形成を調べるには有用な天体である。この章では、銀河団の質量分布の非球対称性に着目し、その非球対称性の情報を構造形成、宇宙論を調べる手法を提案している。また、実際の宇宙での銀河形成、銀河中心の巨大ブラックホールの活動（以後の AGN）が及ぼす影響が議論され、銀河団領域の非球対称性と中心銀河の楕円率の向きが揃う可能性に関する過去の研究がレビューされている。銀河団の非球対称性、宇宙論、銀河形成の物理との関係の重要性が述べられており、本研究の物理的動機付けが与えられている。

第2章では、まず Λ CDM の構造形成シナリオにおいて天体の合体過程、質量集積の過程の物理機構を通して、銀河団の非球対称性、銀河団の非球対称性と中心銀河の楕円率の向きが整列する程度の物理的な起源が議論されている。その後で、銀河団の非球対称性を観測的に調べる手法として、重力レンズ効果、X線観測、電波波長におけるスニヤエフ・ゼルドヴィッチ (SZ) 効果が紹介され、そのテーマに関する先行研究がレビューされている。さらに、銀河団の非球対称性を理論的に調べる手法として、宇宙論的 N 体シミュレーションあるいは銀河形成、AGN のフィードバック効果の影響を取り入れた宇宙論的流体力学シミュレーションの手法、またその先行研究がレビューされている。

第3章では、現時点で世界最高級の大規模、高空間解像度、また数値高精度の宇宙論的流体力学シミュレーション「Horizon-AGN」のデータを詳細に解析している。シミュレーションの 120 個の銀河群、銀河団スケールのダークマター

ハロー（自己重力系）を同定し、ダークマターの分布の楕円率、星粒子の分布が作る楕円率、ガス粒子の分布が楕円率、また中心銀河の楕円率を調べる手法を開発した。このとき、重力レンズ、X線観測、あるいは電波観測のSZ効果の模擬観測データを作成し、それらの観測量から推定される物理量（ダークマター、ガス）の楕円率の検出可能性を議論している。さらに、多数のハローを解析することにより、楕円率の分布、またダークマター、ガス、星、中心銀河のあいだの楕円率の相関、またそれらの楕円率の主軸の方向が揃う程度を調べている。このように Λ CDM 構造形成モデルにおける、銀河団のダークマター、星、ガス、中心銀河の非球対称性を定量的に調べた。

第4章では、赤方偏移の範囲 ($0.2 < z < 1.0$) の 45 個の巨大銀河団のサンプルに着目し、そのハッブル宇宙望遠鏡などのデータを用い、銀河団の楕円率を観測的に調べた。特に、銀河団による背景光源（主に銀河）への強い重力レンズ効果の観測量からダークマターの空間分布の楕円率を観測的に明らかにし、またハッブル宇宙望遠鏡のデータから中心銀河の輝度分布の解析から、その星の分布から推定される楕円率を調べた。さらに、ダークマターの楕円率と中心銀河の楕円率のあいだの相関を調べ、またそれらの主軸の方向が統計的に有意に揃っていることを明らかにした。これは先行研究と比較して、サンプルのサイズを大きくしただけでなく、より定量的な結果であり、またダークマターと中心銀河の非球対称性の関係を調べた点で新しい。また、第3章のシミュレーションの理論的予言とも比較しており、その物理的示唆を議論している。

第5章では、第3章で用いた AGN-Horizon シミュレーションの異なる赤方偏移のデータ（ビックバン後 15 億年から 135 億年）を詳細に解析し、40 個の銀河団スケールのダークマターハローと中心銀河の楕円率の時間進化、またそれらの楕円率の主軸の方向のあいだの相関（揃っている度合い）の時間進化を定量的に調べた。その結果、ダークマターハローと中心銀河の楕円率の主軸の方向は時間と共に大きく変更していること、またダークマターハローと中心銀河の楕円率の主軸の方向は時間進化と共により強く揃うことを発見した。これらの主軸のあいだの相関の起源、またその時間進化について、 Λ CDM 構造形成シナリオにおける天体の合体、質量集積の観点からの物理的な考察を与えている。

最後に、第6章では、本論文のまとめが述べられている。

このように本論文は、 Λ CDM 構造形成シナリオ、また冷たいダークマターが重力以外では相互作用しないという性質が预言するダークマターハローの非球対称性を定量的に調べた。現時点で最高精度の宇宙論的流体力学シミュレーションのデータを詳細に解析し、銀河団スケールのダークマター、ガス、星の空間分布の非球対称性の理論的に調べ、またハッブル宇宙望遠鏡などの世界最高精度の観測データの重力レンズ効果の測定から銀河団のダークマターの分布の楕円率、中心銀河の楕円率、その相関を観測的に調べ、さらに理論预言と観測結果を比較し、その物理的示唆を議論した。このように、理論、観測、その比較を調べ、その学問的意義は高いと言える。なお、本論文 3 章以降 5 章までが論文提出者の研究に基づいて書かれており、大栗氏（第 3、4、5 章）、西道氏（3、4、5 章）、須藤氏（3、4、5 章）、北山氏（第 3、4、5 章）、佐々木氏（3、4、5 章）、Peirani Sebastian 氏（3、4、5 章）、Christophe Pichon 氏（4、5 章）、Yohan Dubois 氏（4、5 章）との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。