

学 位 論 文 題 名

# Theoretical Study on Morphological and Color Evolution of Cluster Galaxies in $\Lambda$ CDM Universe

( $\Lambda$  CDM 宇宙における銀河団銀河の形態・色進化に関する理論的研究)

## 学位論文内容の要旨

銀河は宇宙を構成する最も基本的な構造であり、銀河形成は天文学における最も重要な問題の一つとなっている。この銀河形成問題では初期密度揺らぎの重力成長、ガスの放射冷却、星形成、超新星爆発、銀河同士の合体等の複雑な過程が絡み合っており、個々の物理過程が如何に有機的に結びついているのかを理解する必要がある。本研究では後述するように銀河形成を理解する上での手がかりが豊富にある銀河団銀河の性質と銀河形成モデルの関係を N 体シミュレーションと解析的な銀河形成モデルを結合させることにより調べた。宇宙モデルは近年の Ia 型超新星爆発や宇宙背景放射の観測から有力視されている、宇宙項、 $\Lambda$ 、のある平坦なコールドダークマターモデルを採用した。

銀河団は観測的に一様な銀河のサンプルを集め易く、現在まで楕円銀河の色・等級関係（明るい楕円銀河ほど赤い）や、銀河の形態・密度関係（銀河密度の高い領域ほど早期型銀河の割合が多い）、Butcher-Oemler 効果（高赤方偏移の銀河ほど青い銀河の割合が多い）などが発見されてきた。一方、理論的には銀河団は均質な環境を銀河に与えているため、前述の観測的特徴と合わせて銀河の進化を解明するための格好のプロープであると言える。

前述の形態・密度関係は、銀河の周囲の環境に依存するメカニズムが最終的な銀河の形状を決定していることを示唆している。そのようなメカニズムとして、銀河団ガスによる星間ガスの ram pressure stripping や、銀河同士、もしくは銀河と銀河団の間の潮汐相互作用、銀河同士の合体等が提唱されて来た。N 体計算により渦巻銀河同士の合体により楕円銀河と良く似た天体が形成されることが確認されているため、銀河の合体は銀河の形態進化を引き起こすメカニズムとして最も支持されてきた。また、銀河の合体による形態進化のモデルは楕円銀河の色・等級関係を再現できることも準解析的モデル（後述）を用いて示された。

そこで、本研究では宇宙論的な数値シミュレーションを行い、この銀河の合体による形態進化モデルが銀河団銀河の形態・密度関係や楕円銀河の色・等級関係を再現できるかを調べる。そのための方法としてガス冷却、星形成、超新星爆発、化学進化等を含む重力+流体シミュレーションを行うのは現状では事実上不可能である。なぜならばそのようなシミュレーションは計算時間を非常に多く必要とし、不十分な空間解像度で限ら

れたパラメータ空間しか調べられないからである。

一方、銀河形成を調べる上で近年大きな成果を上げているのが準解析的手法と呼ばれる方法である。この方法では個々のダークハローの形成史は宇宙モデルに基づいてモンテカルロ的手法を用いて計算する。そのダークハロー内部での星形成等の各過程は簡単なモデルを導入して取り扱う。この手法では解析解をつないで結果を得るため計算時間が短く、銀河形成問題のように統計量を出し、かつ広大なパラメータ空間を調べねばならない場合には非常に有効である。しかし、準解析的手法は線形理論を拡張した形式に基づくものであり、基本的に宇宙の空間構造を考慮できない。従って、銀河の空間分布に関する情報は得られず、形状・密度関係のような空間分布を必要とするような観測量について調べることはできない。

そこで、本研究では銀河団形成の宇宙論的な高精度  $N$  体シミュレーションを行い、そこから直接個々の銀河に付随するダークハローの形成史を調べた。ダークハロー内でのガス冷却、星形成、超新星爆発によるガス加熱等の過程は準解析的手法で用いられている簡単なモデルを導入して計算する。この方法により、通常の準解析的手法で得られる、銀河の色、等級、形状ばかりでなく空間・速度分布も得られる。銀河の形態は前述したように銀河同士の合体によって進化するものとする。このような仮説を **merger** 仮説と呼び、このシナリオでは、銀河はまず渦巻銀河として生まれ、近い質量の銀河同士の合体により楕円銀河が形成される。その後のガス冷却と星形成は新たな銀河円盤を形成し、バルジ（楕円成分）とディスクを持つ銀河が形成される。このバルジとディスクの **B-band** での光度の比によって、銀河を **S**（渦巻）、**S0**（中間型）、**E**（楕円銀河）に分類する。

このようにして得られた形態・密度関係と色・等級関係を観測と比較することにより以下の結果を明らかにした。(1) **merger** 仮説は銀河団内での楕円銀河の分布を再現し、(2)同時に楕円銀河の色・等級関係も再現する。一方、(3)このモデルの下では十分に **S0** 銀河を形成することができず、(3)その分布の傾向も観測と一致しない。

以上の結果から、楕円銀河は主に銀河同士の合体によって形成されているが、**S0** 銀河の形成には合体以外の物理過程が重要な役割を果たしていると考えられる。**S0** 銀河の形成に関わるメカニズムの有力な候補として、質量比の大きく違う銀河同士の合体や、銀河団ガスによる星間ガスの **ram pressure stripping**、銀河-銀河、銀河-銀河団間の潮汐相互作用が考えられる。

## 学位論文審査の要旨

|    |     |    |    |
|----|-----|----|----|
| 主査 | 教授  | 藤本 | 正行 |
| 副査 | 教授  | 河本 | 昇  |
| 副査 | 教授  | 加藤 | 幾芳 |
| 副査 | 助教授 | 羽部 | 朝男 |
| 副査 | 助教授 | 兼古 | 昇  |

### 学位論文題名

## Theoretical Study on Morphological and Color Evolution of Cluster Galaxies in $\Lambda$ CDM Universe

( $\Lambda$  CDM 宇宙における銀河団銀河の形態・色進化に関する理論的研究)

銀河は宇宙を構成している基本的な天体であり、銀河の宇宙論的なスケールの分布は宇宙の構造形成の手がかりを与える。その意味で銀河形成は宇宙物理学の最も重要な研究課題の一つとなっている。銀河形成は、まず宇宙初期の密度揺らぎの成長し、その結果ダークハローが形成され、さらに、そこでのバリオンの冷却と星形成による小銀河の形成、その小銀河の合体でさらに大きな銀河の形成という複雑な物理過程がからみ合っている。そのため、これらの過程を全て考慮したモデルを取扱うことは、大規模な数値モデルを必要とし、非常に困難であった。

一方、銀河には、大きく分けて楕円銀河と渦巻銀河そしてその中間的な性質をもつS0銀河があり、これらは銀河の集団化の程度、すなわち、銀河の個数の空間的な密度に依存していることが明らかになっている。最近のハッブル宇宙望遠鏡によって、遠方の銀河団（銀河が数百個集団化した天体）に属する銀河にも、これらの関係があり、定量的な関係は我々の近傍の銀河とは異なっていることが示されている。このことから、この銀河の形態と銀河個数の空間的な密度の関係の物理的理由を宇宙論的に明らかにすることが課題となっている。

本学位論文の著者は、銀河団という環境効果が銀河形成と進化への影響に着

目して研究した。この銀河団環境を考慮するため、ダークハローの形成・合体の過程を詳細なN体計算を行って求め、ダークハローの形成によって集められたバリオンからの星形成については準解析的モデルを用いるという、従来にない新しいモデルを提案して研究を行った。銀河の形態進化については合体仮説を仮定した。宇宙背景放射の研究などから最近有力視されている $\Lambda$ 宇宙モデルを仮定した。その結果、銀河団における楕円銀河が占める割合と銀河環境の関係・色進化は合体仮説で説明することが可能であることを示した。この結果は、銀河の形態と銀河環境の関係を具体的に明らかにした研究として評価される。また、全銀河に占めるS0銀河の割合については、合体仮説だけでは説明できず、新たな物理過程を考慮した研究が必要であることを明らかにした。

これを要するに、著者は宇宙物理学における基本的な問題である銀河形成進化において銀河団の形成と進化が与える影響について新しい知見をえたものであり、宇宙物理学における銀河形成の研究に対して貢献するところ大なるものがある。

よって審査員一同は、著者が北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。