

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 シミュレーションと観測による銀河形成過程の解析

氏 名 稲垣 貴弘

## 論 文 内 容 の 要 旨

現在、標準的な宇宙論である $\Lambda$ CDM宇宙論では、銀河などの構造は初めから存在していたのではなく、何度も衝突と合体を繰り返し階層的に成長してきたと考えられている。しかしながら、その形成過程は複雑であるために未だに十分な理解が得られていない。

そこで、本編では銀河形成過程を理解するために、シミュレーションと観測の両面から銀河形成過程を解析した。

まず、銀河衝突シミュレーションから得られた重力波スペクトルを基に、準解析的に宇宙背景重力波のスペクトルを導いた。この研究の目的は、宇宙背景重力波を見積もり、そこから銀河の衝突過程を探るという事である。そこで1対の銀河モデルを衝突させ、その時に発生する重力波を評価したところ、 $10^{12} M_{\text{sun}}/h$ （ここで $h$ は無次元のハッブル定数）の質量をもった銀河同士の衝突では、ピーク光度は $10^{31} \text{erg/s}$ 程度であることがわかった。さらに、銀河の各構成要素ごとの重力波への寄与を計算したところ、重力波の約90%はダークマターハローからの寄与である事もわかった。また Extended-Press-Schechter とモンテカルロ・シミュレーションとを組み合わせた準解析的な手法で、ハローの衝突の歴史を作成した。そして、この衝突の歴史と一対の銀河衝突からの重力波を全宇宙で積分する事で、宇宙背景重力波を評価した。結果として、宇宙背景重力波のエネルギー密度は、 $\Omega_{\text{GW}} \sim 5 \times 10^{-20}$  となり、インフレーションのテンソル・スカラー比が  $r < 10^{-4}$  の時、ここで評価した重力波は観測され、衝突過程が解明される可能性があることを示した。

次に、スニヤエフ・ゼルドビッチ効果 (SZ) 効果によって特定された銀河団中の Brightest Cluster Galaxies (BCGs)の時間発展を観測的に解析した。特に有効半径と質量に焦点を当て解析を進めた。これを可能にするために、赤方偏移  $z_1$  で質量が大きい順に選んだ銀河団の TOP N と赤方偏移  $z_2$  で選んだ TOP N は、近似的に祖先と子孫の関係とみなしてよいという仮定をした。実際、シミュレーションは TOP 30 以上では約 80%の確率で上記の仮定が正しい事を示した。用いる銀河団カタログと赤

方偏移は大きく2つに分けられた。プランク衛星と SDSS DR10 を用いて  $z < 0.4$  の銀河団に焦点を当てたものと、アタカマ宇宙論望遠鏡(ACT)と SDSS stripe 82 を用いて  $0.4 < z < 0.8$  の銀河団に焦点を当てたものである。結果として、有効半径は  $z=0.2$  と  $z=0.4$  で約 20%増加していた。また SED フィッティングを用いて、モデル質量、ペトロシアン質量、全質量を評価した。その結果  $z \sim 0.4$  から  $z \sim 0.2$  で BCGs 質量は 3-12%増加しているという結論を得た。さらに、ミレニアム・シミュレーションと比較した結果、有効半径は観測結果と近い値であった。しかしながら、質量に関しては、モデル質量以外はシミュレーションの示す値と一致しなかった。ACTによって特定された銀河団に関しては、赤方偏移を、 $z \sim 0.5$ 、 $z \sim 0.6$ 、 $z \sim 0.7$ の3つに分けた。結果として、 $z \sim 0.6$ と $z \sim 0.7$ では、有効半径は 2-18%増大していた。また、 $z \sim 0.5$ と $z \sim 0.6$ では有効半径の平均値は 13-30%増大していた。この結果はミレニアム・シミュレーションから得られた結果と一致していた。一方、質量に関して、ミレニアム・シミュレーションでは進化が見られたが、観測結果では進化が見られなかった。

最後に、ダークマターのための宇宙論的シミュレーションに、観測と一致するような銀河モデルを入れ、星成分を含んだ宇宙論的シミュレーションを実行した。ここでの目的は、観測では難しい Brightest Cluster Galaxies (BCGs)の進化過程を詳細に解明することである。特に、衝突過程に焦点を当てるため、 $z=0.6$ の宇宙論的シミュレーションに約 50 個もの銀河モデルを挿入し、 $z=0$ までシミュレーションした。解析した結果、初期の有効半径と質量の関係式から外れる原因は、衝突時の質量比が 25%以上で定義される Major merger である可能性が高く、質量比が 25%以下の Minor merger は非常に多くの衝突がない限りあまり大きな原因ではないという結論を得た。これは、Major merger によって銀河内部の構造が壊れるためであると考えられる。また、ビリアル化すると元の関係式に戻ると期待されるが、ビリアル化の途中で新たな銀河衝突が起こるので、結果として多くの BCGs が初期の関係式から外れている可能性があることを示した。