

学 位 論 文 題 名

Study of Formation of Globular Clusters  
in a Forming Galaxy

(形成中の銀河における球状星団の形成についての研究)

学位論文内容の要旨

1 背景

近年、多くの観測により我々の宇宙は、小さな構造が合体し、より大きな構造を作る階層的構造形成宇宙であることが支持されている。このような宇宙の中で、球状星団は年齢が古い低質量の星の集団であることから宇宙初期に形成された天体であると考えられている。そのため、銀河形成や宇宙の構造形成に密接に関連した非常に重要な天体である。有力な可能性として、球状星団が銀河形成過程に形成されたと考えられる。しかし階層的構造形成モデルで球状星団を作る場合に自然に予想される球状星団ダークハローは、観測されていない。

宇宙の構造形成における銀河形成は、宇宙の密度揺らぎが非線形に成長する過程であるため数値的な研究が盛んに行われている。しかし、球状星団と銀河の典型的な質量比がおよそ 100 万倍もあり、これらの形成とその関連を調べるには、非常に大規模な計算が必要なる。そのため、球状星団のみを対象にした研究や準解析的手法を用いた研究は行われているが、宇宙の構造形成の枠組みの中で球状星団を扱う研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、球状星団程度の構造が十分分解できる質量解像度を用いた大規模な銀河形成シミュレーションを行い、球状星団の形成・進化と形成期の銀河との関係について研究し、階層的構造形成宇宙における球状星団形成について調べた。

2 手法

本研究では、球状星団の形成と銀河の形成の関係を明らかにするため、CDM 宇宙における銀河形成シミュレーションを行った。CDM 宇宙は、ダークマターとバリオンからなる階層的構造形成宇宙である。ダークマターは重力相互作用のみをする物質である。バリオンは宇宙初期は大半が H や He のガスである。ガスは輻射によりエネルギーを散逸していく。これによって、冷えた高密度ガスからは星が形成される。そこで、ガス冷却とガスから星が形成されることを考慮した。

自己重力計算は宇宙論的な数値シミュレーションにおいて非常に膨大な計算量になる。そのため、遠方の重力をまとめて計算することで計算量を減らす Tree 法と重力計算専用計算機 GRAPE(GRAvity PipE) を組み合わせた Tree+GRAPE 法を用いた。また、ガスの運動は SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いた。

この研究では、宇宙の密度揺らぎが成長して銀河が形成される過程で、球状星団がどのように形成されるのかを調べる。その際、銀河スケールのガスが冷却、収縮するなかで、球状星団スケールのガスの分裂、収縮が、どのように生じるのかを SPH 法で計算する。SPH 法では、SPH 粒子一個の質量の 100 倍程度の質量までが、その分裂過程を正確に捉えることが可能な計算であると指摘されている。そのため、球状星団

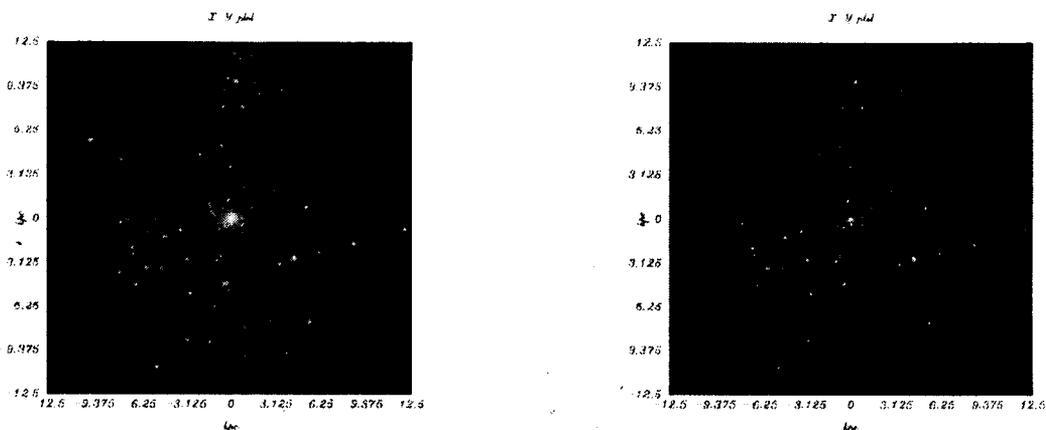


図 1:  $z=3.3$  における全粒子分布 (左) と星粒子分布 (右)。表示領域は一辺が 25kpc。近傍の密度に応じて輝度を変えている。明るい部分が密度の高い部分に対応している。

に進化する原始雲の進化を計算するためには、最低でも SPH 粒子一個の質量は  $10^3 M_\odot$  が必要である。そこで、我々は、SPH 粒子質量を  $\sim 10^3 M_\odot$  とした。

シミュレーションには、SPH 粒子、ダークマター粒子それぞれ 100 万個を用いた。これは、同様の手法における銀河形成シミュレーション史上、最大規模のシミュレーションである。高赤方偏移 ( $z \sim 86$ ) の密度揺らぎから銀河形成期 ( $z \sim 3$ ) までの計算に二ヶ月を要した。

### 3 結果・結論

図 1 に  $z=3.3$  の形成期の銀河の様子を示す。中心にあるのが母銀河である。この時期銀河ハロー内に非常に多くのサブストラクチャが存在していることがわかる。

次に、銀河ハローに含まれる自己重力で拘束されたサブストラクチャを選び出し、これらの進化について調べた。ダークマターとバリオンから成るサブストラクチャの中心には密集した星団が形成されている (図 2)。この星団のサイズは非常に小さく、現在の球状星団に対応するものの形成の可能性を強く示唆する。図 3 は、 $z=3.3$  におけるサブストラクチャの母銀河の中心からの距離とバリオン質量/全質量比である。また、中心部分にバリオン質量/全質量比の大きなものが多いことがわかる。これは、サブストラクチャに付随するダークマターが母銀河の潮汐力によって選択的にはぎ取られた可能性を示している。

そこでさらに、個々のサブストラクチャのバリオン質量/全質量比の時間進化について調べた。それにより、サブストラクチャが銀河内部を運動するにつれてバリオン質量/全質量比が増えていくことがわかった (図 4)。また、このときバリオンの質量はほとんど変化しないが、ダークマターがはぎ取られてその質量が減っている (図 5)。サブストラクチャの中心に位置する星団は非常に小さいためはぎ取られにくい、それに比べて広がった分布をもつダークマターははぎ取りの影響を強く受ける。以上からバリオン質量/全質量比の違いは、サブストラクチャのバリオンとダークマターの分布の違いと、母銀河との相互作用に起因するものであるといえる。

本研究では、形成期の銀河で星の集団がサブストラクチャの中に形成されて、そのサブストラクチャの元々持っていたダークマターがはぎ取られ、その結果ダークマターをほとんど持たないコンパクトな星の集団が形成されることを示した。これは、球状星団に対応する構造であると十分に期待される結果である。

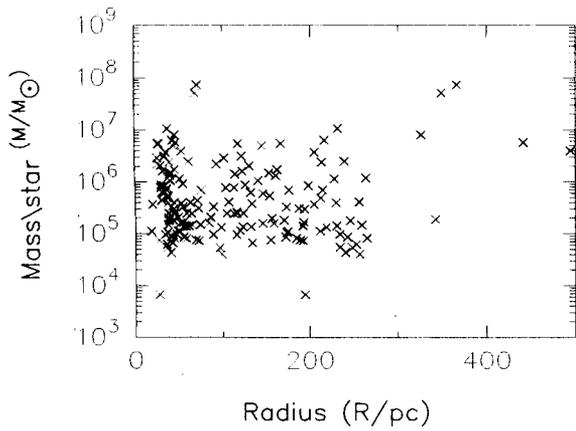


図 2:  $z=3.3$ における各サブストラクチャの星団の半径 (赤×)、ダークハローの半径 (青×)。

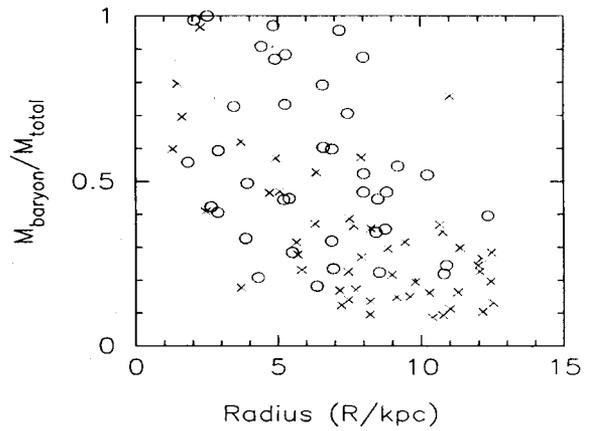


図 3:  $z=3.3$ における各サブストラクチャの銀河中心からの距離とバリオン質量/全質量比。赤×は銀河中心に向けて、青○は銀河中心から外へ運動しているサブストラクチャ。

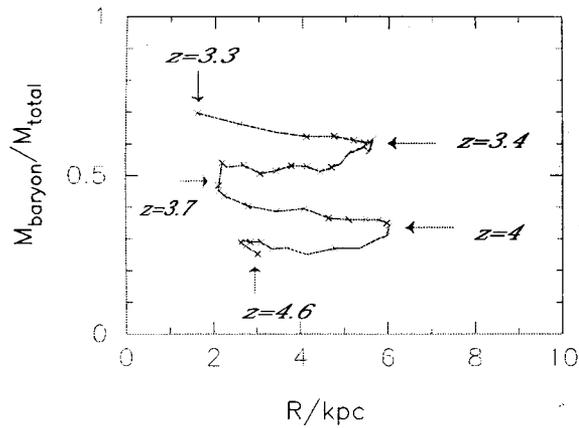


図 4: サブストラクチャのバリオン質量/全質量比の時間変化の例。

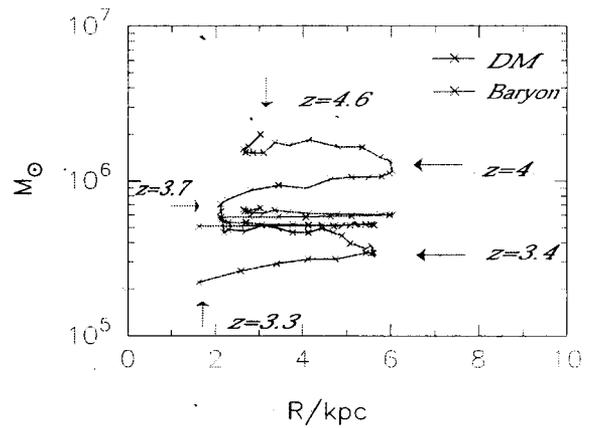


図 5: 図 4 と同じサブストラクチャのバリオン質量とダークマターの質量の時間変化。

# 学位論文審査の要旨

主査	助教授	羽部朝男
副査	教授	藤本正行
副査	教授	石川健三
副査	教授	和田宏
副査	助教授	兼古昇

学位論文題名

## Study of Formation of Globular Clusters in a Forming Galaxy

(形成中の銀河における球状星団の形成についての研究)

球状星団は、年齢が宇宙の年齢とほぼ同じであり、宇宙初期に形成されたと考えられているが、その詳細は明らかになっていない。特に、宇宙の初期に起きた銀河形成との関係が明確ではない。最近の宇宙背景放射の観測から、宇宙年齢、宇宙の膨張速度、ダークマターとバリオンの宇宙における密度などがかなり明確になり、こうした宇宙での宇宙の密度揺らぎから銀河や球状星団の形成を明らかにすることが、重要な研究課題となってきた。こうした形成過程は宇宙の密度揺らぎの大きさが非線形段階になるため、数値シミュレーションが唯一の研究方法であるが、銀河と球状星団では、質量比が10万倍以上有り同時に形成過程を数値的に調べるには非常に困難であった。

そこで、申請者は、この視点から銀河形成と球状星団形成の関連を明らかにするため、銀河形成と球状星団形成を同時に扱えるよう、tree GRAPE という方法を適用して、数値計算コードを開発し、これを用いて宇宙論的な数値シミュレーションを可能にした。これを用いて計算を行った結果、宇宙論的な密度揺らぎが成長して、銀河形成期に球状星団に対応する大きさの構造が形成され、そこでは球状星団に匹敵する高密度な星の集団が形成されることを初めて示した。また、この星の集団の質量関数は現在観測されている球状星団の質量関数と良く対応している。よって、本研究は銀河形成期に球状星団が形成される過程を具体的に明らかにした研究として評価され、宇宙初期の銀河とそこでの球状星団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。