すばる広領域深探査による銀河団の質量進化

玉澤 裕子 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

銀河団の形成や一般的な進化は観測的には未解明な面が多い。そこで、銀河団の質量進化を観測的に理解するため、z ∼4-5 のライマンブレーク銀河で構成される原始銀河団候補を探査した。使用した観測データは、Suprime-Cam で観測された SXDS 天域と、Hyper Suprime-Cam で観測された COSMOS 天域のデータである。探査の結果、SXDS 天域から z ∼5 において密度超過 δ が $\delta = 1.7^{+0.8}_{-0.5}$ で、$\sim 4\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。COSMOS 天域からは、z ∼5 において $\delta = 4.3^{+2.1}_{-1.6}$ で、$\sim 5\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。そこで、これらの原始銀河団候補の中心に存在するであろうダークハロー質量を、Millennium Simulation に基づく準解析的銀河形成モデルと light cone モデルを用いて推定した。その結果、それぞれ $1.9^{+0.9}_{-0.7} \times 10^{12}\ M_{\odot}h^{-1}$、$2.3^{+1.8}_{-1.0} \times 10^{12}\ M_{\odot}h^{-1}$ となった。さらに、これらの原始銀河団候補は z=0 で、それぞれ $3.2^{+4.8}_{-2.3} \times 10^{14}\ M_{\odot}h^{-1}$、$3.6^{+5.1}_{-2.6} \times 10^{14}\ M_{\odot}h^{-1}$ のダークハロー質量を持つ銀河団規模の構造に進化すると推定された。

1 イントロダクション

銀河団は、銀河や銀河群よりもスケールの大きな銀河の集団で、銀河が 50∼ 数千個程度集まってできている、宇宙で最大の力学系である。銀河団の質量は $10^{14}M_{\odot}$ 程度以上あり、半径は 1∼$2h^{-1}$ Mpc 程度ある。この銀河団のダークハロー質量の進化は理論的に研究されている。(Chiang et al. 2013) によると、現在質量の大きな銀河団の方が、より初期に銀河団程度の質量を持つ天体に進化し、現在低質量の銀河団は比較的最近まで銀河団程度の質量には達しないことを理論的に予言している。しかし、大質量銀河団でさえ、$z \sim 2$ 程度にならないと銀河団程度の質量を持つ構造に進化しない（図 1）。$z \sim 2$ を超えて、質量が $10^{14}M_{\odot}$ よりも軽い銀河集団は、原始銀河団と呼ばれ、形成途中にある銀河団である。原始銀河団の候補天体は、高赤方偏移銀河の密度超過領域と定義される。この原始銀河団の質量進化を辿れば、銀河団の質量進化を理解することができる。しかし、一般的な原始銀河団の探査法では、銀河の密度超過領域には AGN などの極めて明るい銀河が存在していると仮定し、そのような天体の周囲を探査する手法を用いている。そのため、これまでの原始銀河団研究では、原始銀河団の分布はこれらの明るい天体の周囲にバイアスがあり、銀河団の形成や進化は観測的にはまだあまり理解されていない。

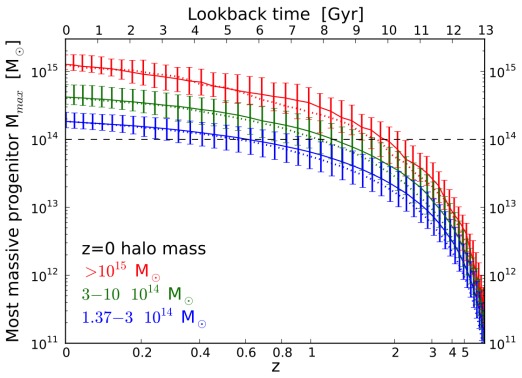

図 1: 銀河団のダークハロー質量進化を $z > 5$ から現在まで理論計算した図 (Chiang et al. 2013)。

そこで本研究では、銀河団の質量進化を観測的に理解することを目標とする。そのために、広領域データを用いて高赤方偏移の分布を調べ、そこから原始銀河団候補を探し出す。この探査法だと、原始銀河団内には明るい天体が存在するというバイアスがかからずに、純粋に銀河が密度超過している場所を探し出すことができる可能性がある。原始銀河団候補を探しだしたら、そのダークハロー質量の進化を、宇宙論モデルを用いて推定する。

2 データ

本研究では、Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) 天域のデータと、Cosmological Evolution Survey (COSMOS) 天域の 2 種の広領域撮像データを用いた。これらの天域の多色カタログから $z \sim 4-5$ の高赤方偏移銀河を選び出し、その分布から原始銀河団候補を同定する。

2.1 SXDS

本研究で使用した SXDS 天域のデータは、すばる望遠鏡の広視野可視光カメラ Suprime-Cam で観測された (Furusawa et al. 2008)。観測日は 2002 年 9 月から 2005 年 9 月で、総積分時間は 133 時間である。探査領域の中心は R.A. = $02^{\rm h}18^{\rm m}00^{\rm s}$、decl = -05°00′00″ である。このデータは Suprime-Cam 5 視野分で、面積は合計 1.22 平方度と広領域である。ここからマスクがけを行った後の有効面積は約 0.69 平方度である。このデータから、高赤方偏移銀河としてライマンブレーク銀河（LBGs）を選定する。LBGs はライマンブレーク法という、静止系の波長で 912Å の波長よりも長波長でしか観測できない性質を利用した高赤方偏移銀河の探査法を用いて選定された銀河である。LBGs は静止系で 912Å 以下では水素ガスにより銀河を検出出来ないのだが、例えば u バンドで非検出の LBGs を u ドロップアウト銀河というように呼ぶ。LBGs は高赤方偏移宇宙に一般的に見られる銀河で、さらに赤方偏移のおおよその値を推定できるという利点がある。探査の結果、SXDS 天域からは、$z \sim 4$ 銀河として B ドロップアウト銀河は 7308 個、$z \sim 5$ 銀河として V ドロップアウト銀河が 801 個、R ドロップアウト銀河が 182 個選出された。

2.2 COSMOS

本研究で使用した COSMOS 天域のデータは、すばる望遠鏡の次世代超大型可視光カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) で観測された。HSC のデータは観測される度に更新されていくが、今回用いたものは観測日が 2014 年 3 月から 4 月までで、総積分時間は 3 時間である。探査領域の中心は R.A. = $10^{\rm h}00^{\rm m}19^{\rm s}$、decl = -2°12′9.4″ である。この広領域データは HSC 約 1 視野分に相当し、総面積は約 1.5 平方度である。そこから、視野の端に位置しているため画像が切れて使用できない領域などを除去し、最終的に約 0.79 平方度分のデータを解析に使用した。ここから LBGs を選定した結果、$z \sim 5$ 銀河として r ドロップアウト銀河が 283 個選び出された。

3 原始銀河団候補

LBGs が選出されたら、それらを用いて原始銀河団候補を同定する。原始銀河団候補の定義は高赤方偏移銀河の密度超過領域なので、そのような領域を探し出す。ここで、銀河の密度超過の定義式は、ある範囲内での銀河の数密度を n、銀河の平均数密度を $\langle n \rangle$ とすると、

$$\delta = \frac{n - \langle n \rangle}{\langle n \rangle} \tag{1}$$

と表される。$\langle n \rangle$ はデータ全域の数密度の平均値を用いている。n を求めるためには、円の中心を半径の 1/10 ずつ動かし、その円内に存在する銀河の数密度を求める、という方法を本研究では用いた。ここで、面積を求める際にマスク領域を除去する必要がある。しかしマスクの形は単純な関数では表せないので、ランダムソースをばらまき実際の面積を計算した。数密度を求める際には、マスク領域を除いた円の有効面積が、マスク領域を除く前の円の面積の 8 割以上である場所の数密度のみを使用した。

その結果、SXDS 天域の V ドロップアウト銀河から、密度超過 δ の値が $\delta = 1.7^{+0.8}_{-0.5}$ で、$\sim 4\sigma$ の有意性を持つ密度超過領域が 1 か所見つかった。

図 2 は、その領域の顔写真、図 3 は δ の頻度分布である。図 2 を見ると、銀河の分布が円の縁に集まっているように見える。しかし、この構造は周囲と比べても密度超過しており、やがて円の上下で 2 つの大きな構造に進化し、その 2 つの構造が将来合体して 1 つの銀河団のような構造を形成する可能性がある。B、R ドロップアウト銀河の密度超過領域は、本研究では見つからなかった。

同様に、COSMOS 天域の r ドロップアウト銀河から、密度超過 $\delta = 4.3^{+2.1}_{-1.6}$ で、$\sim 5\sigma$ の有意性を持

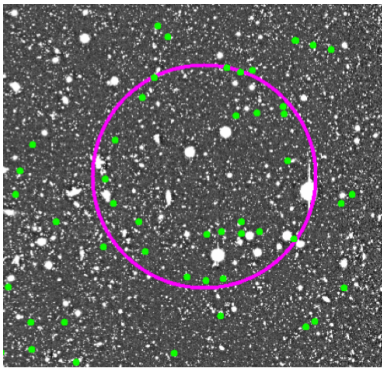

図 2: SXDS 天域の V ドロップアウト銀河から同定された、$\delta = 1.7^{+0.8}_{-0.5}$ となる銀河の密度超過領域。マゼンタ色の円の領域内に入る銀河 (緑色の点) の数密度が、平均よりも超過している。

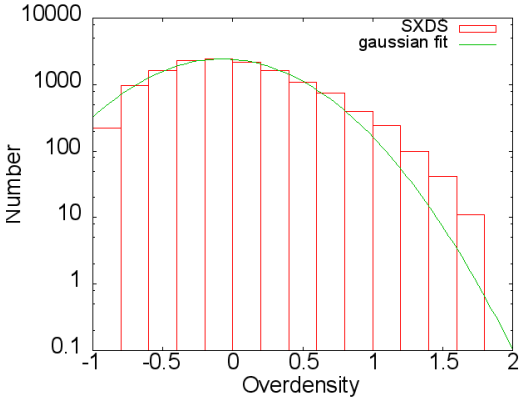

図 3: SXDS 天域における銀河の密度超過 δ の頻度分布と、そのガウシアンフィッティングの結果。フィッティング値を上回る $\delta \gtrsim 1$ の値を示す場所が、SXDS 天域における銀河の密度超過領域である。

つ密度超過領域が 1 か所、$\delta \sim 3.2$ で、$\sim 4\sigma$ の有意性を持つ密度超過領域が 1 か所見つかった。図 4 は、$\sim 5\sigma$ 有意性を持つ密度超過領域の領域の顔写真、図 5 は δ の頻度分布である。以下の COSMOS 天域データの解析では、$\sim 5\sigma$ 密度超過領域のみを扱った。

これらの密度超過領域の中から、今回は SXDS 天域、COSMOS 天域共に δ の値が最大のもの同士を質量進化の推定に用いた。

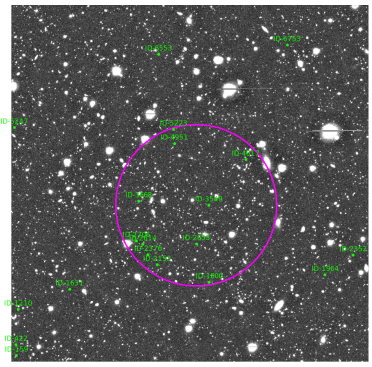

図 4: COSMOS 天域において $\delta = 4.3^{+2.1}_{-1.6}$ となる銀河の密度超過領域。

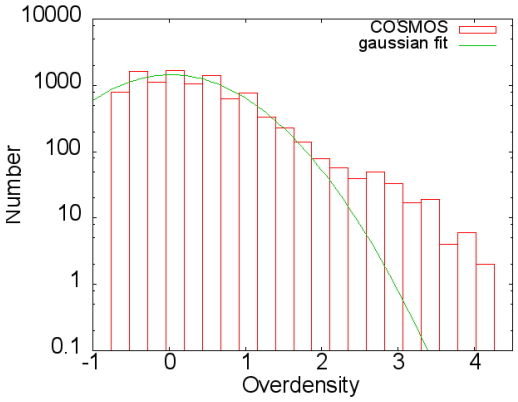

図 5: COSMOS 天域における銀河の密度超過 δ の頻度分布と、そのガウシアンフィッティングの結果。この図は図 3 と同様の図であり、$\delta \gtrsim 2.3$ の値を示す場所が COSMOS 天域における銀河の密度超過領域である。

4 考察

銀河の密度超過領域が同定できたら、それらを用いて原始銀河団候補と、それらが $z = 0$ に進化した場合のダークハロー質量を、モデルと比較して推定する。ここで、銀河の密度超過領域を原始銀河団の候補天体と定義した。よって、ここからは銀河の密度超過領域を原始銀河団候補として解析する。使用したモデルは、ΛCDM に基づく構造形成モデル (Guo et al. 2011) と、light cone モデル (Henriques et al. 2012) である。構造形成モデルの内、暗黒物質の性質は Millennium Simulation(Springel et al. 2005)

で再現されている。Millennium Simulation は、ダークハローの集積史を $0 < z < 127$ で再現した N 体シミュレーションである。銀河の性質は、準解析的手法で再現されている。これは、銀河内の星質量の分布や星形成率、大きさ、光度、金属量などの性質の進化や、それらの性質の関連性を予想するためのモデルである。一方 light cone モデルとは、モデルが出来るだけ直接的に実際の観測を真似るような手法を用いたモデルで、本研究では (Henriques et al. 2012) のモデルを使用した。

これらのモデルを用いて原始銀河団候補のダークハロー質量 $M_{\rm dh}$ を推定した結果、SXDS 天域の原始銀河団候補のダークハロー質量の推定値は、$1.9^{+0.9}_{-0.7} \times 10^{12}\ M_{\odot}h^{-1}$ となった。これは、銀河系のような銀河と同じオーダーの質量である。さらに、この質量の原始銀河団候補が $z = 0$ に進化した場合のダークハロー質量を推定した結果、$3.2^{+4.8}_{-2.3} \times 10^{14}\ M_{\odot}h^{-1}$ であった。

同様に、COSMOS 天域においても原始銀河団候補のダークハロー質量を推定したところ、$2.3^{+1.8}_{-1.0} \times 10^{12}\ M_{\odot}h^{-1}$ であった。さらにこれが $z = 0$ に進化した場合のダークハロー質量の推定値は、$3.6^{+5.1}_{-2.6} \times 10^{14}\ M_{\odot}h^{-1}$ であった。銀河団は $> 10^{14}\ M_{\odot}$ 程度の質量を持つ。よって、今回観測から同定した $z \sim 5$ の原始銀河団候補は、2 か所とも将来銀河団程度の質量を持つ天体に進化すると考えられる。

5 まとめと今後の展望

銀河団進化の観測的な理解を深めるため、SXDS と COSMOS の 2 種の天域で、z ∼4-5 の原始銀河団候補を探した。SXDS 天域は Suprime-Cam、COSMOS 天域は HSC で観測されたデータを用いた。原始銀河団候補を見つけるために、広領域データを用いて LBGs が密度超過している領域を探査した。その結果、SXDS 天域では z ∼5 銀河が密度超過 δ が $\delta = 1.7^{+0.8}_{-0.5}$ で、$\sim 4\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。COSMOS 天域では、$\delta = 4.3^{+2.1}_{-1.6}$ で、$\sim 5\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所、δ ∼3.2 で、$\sim 4\sigma$ の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。これらから、

1. SXDS 天域の $\sim 4\sigma$ 原始銀河団候補と COSMOS 天域の $\sim 5\sigma$ 原始銀河団候補の中心に存在するダークハロー質量を推定した。その結果、それぞれ $1.9^{+0.9}_{-0.7} \times 10^{12} M_{\odot}h^{-1}$、$2.3^{+1.8}_{-1.0} \times 10^{12} M_{\odot}h^{-1}$ と推定された。

2. これらの原始銀河団候補が z=0 でとりうるダークハロー質量の値を推定した。その結果、SXDS 天域の $\sim 4\sigma$ 原始銀河団候補は $3.2^{+4.8}_{-2.3} \times 10^{14} M_{\odot}h^{-1}$ に進化すると推定された。また、COSMOS 天域の $\sim 5\sigma$ 原始銀河団候補は、$z = 0$ で $3.6^{+5.1}_{-2.6} \times 10^{14} M_{\odot}h^{-1}$ になると推定された。ここから、今回発見した SXDS 天域と COSMOS 天域の原始銀河団候補は共に将来銀河団程度規模の構造に進化すると考えられる。

今後の研究では、統計的に銀河団進化に迫る。そのために、HSC の広領域探査データから原始銀河団を数百個同定する。そこから原始銀河団同士の角度相関関数を求め、これと構造系世モデルを用いることで、統計的にダークハロー質量を求める。

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号：YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

Reference

Chiang ,Y-K., et al. 2013. ApJ, 779, 127

Furusawa, H., et al. 2008. ApJS, 176, 1

Guo, Q., et al. 2011. MNRAS, 413, 101

Gwyn, S. D. J., 2008. PASP, 120, 212

Henriques, B. M. B., et al. 2012. MNRAS, 421, 2904

Springel, V., et al. 2005. Nature, 435, 629