

BCG progenitor candidate at $z \sim 8$ in the Abell 2744 field

石垣 真史 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

Hubble Frontier Fields プロジェクトによる Abell 2744 銀河団領域の探査の結果、 $z \sim 8$ の星形成銀河が非常に高密度に集まっている領域が発見された。このような高密度領域は過去の研究では見つかっておらず、極めて珍しい天体である。本研究ではこの高密度領域の密度超過を定量的に調べ、Millennium Simulation との比較によりハロー質量・星質量進化を推定した。シミュレーション内で同じような密度を持つ領域は、 $z = 0$ で銀河団中心銀河 (BCG) に成長し、周囲の銀河を取り込みながら $10^{14} M_{\odot}$ 程度のハロー質量を持つ銀河団に進化することがわかった。またその BCG の星質量は他の典型的な BCG と比べ非常に初期から進化が進んでいた。今回発見された高密度領域は、高赤方偏移における銀河団形成のコアとなるものであり、このような領域を探査することで高赤方偏移の大質量銀河の形成過程に制限を与えることができると考えられる。

1 Introduction

近年のハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の観測により、宇宙再電離期やさらに遠方の高赤方偏移を探査することが可能となった。Hubble Ultra Deep Field 2012 (UDF12) プロジェクトでは $7 \lesssim z \lesssim 12$ の星形成銀河が数多く観測されている (Schenker et al. 2013; McLure et al. 2013; Ellis et al. 2013)。2013 年 10 月からは Hubble Frontier Fields (HFF; PI: J. Lotz) という 6 つの銀河団領域を深撮像探査するプロジェクトが始まった。銀河団による強い重力レンズ効果を用いることにより、HFF は真の見かけ等級 30 等を超える暗い高赤方偏移銀河を検出することが可能となっている (Coe et al. 2015)。このプロジェクトにより高赤方偏移銀河の様々な性質が数多くの研究グループによって調べられている (Ishigaki et al. 2015; Kawamata et al. 2015; Atek et al. 2015; Zheng et al. 2014; Oesch et al. 2014)。

これらの研究の過程で、HFF の Abell 2744 銀河団領域 (A2744C) において $z \sim 8$ の銀河の密度超過領域が発見された (Zheng et al. 2014; Atek et al. 2015; Ishigaki et al. 2015)。本研究では以後この密度超過領域を A2744z8OD と呼ぶ。A2744z8OD では 8 個の銀河がさしわたし $12''$ (~ 600 comoving Mpc) の中に密集している。このような密度超過領域はこれまでの研究では発見されていない (Chiang et al.

2013 の Table 5 を参照)。 $z \sim 8$ の銀河の高密度領域は Trenti et al. (2012) によって報告されているが、A2744z8OD はそれに比べ銀河の数が多くかつ広がり非常に小さい。これらのことから、A2744z8OD は非常に興味深い天体だと言える。しかし、過去の研究は A2744z8OD の密度超過の定量的な評価、またモデルとの比較等を行ってこなかった。本研究では初めて A2744z8OD の物理的性質に迫り、シミュレーションのモデルとの比較から A2744z8OD の時間進化を推定する。

2 Observations

A2744z8OD の密度超過を正確に求めるため、本研究では HST による深い観測データを数多く集め解析を行う。今回用いたのは HFF と UDF12 のデータである。HST はこの他にも BoRG サーベイや CANDELS サーベイなど多くの広領域探査を行っているが、 $z \sim 8$ の暗い星形成銀河を検出できる観測は、現在のところ HFF と UDF12 のみである。

2.1 HFF

HFF では 6 つの銀河団領域と対応するパラレル領域が、可視光カメラ ACS と近赤外線カメラ WFC-3

で観測されている。本研究では 5 つの領域を用いる。ひとつめは Abell 2744 銀河団領域であり、これは A2744z8OD の高密度領域を含んでいる。他には現在観測が完了している 4 つの平行領域である Abell 2744 (A2744P)、MACSJ0416.12403 (M0416P)、MACSJ0717.5+3745 (M0717P)、MACSJ1149.5+2223 (M1149P) を用いた。それぞれのデータは ACS の F435W (B_{435}), F606W (V_{606}), F814W (i_{814}) バンドと WFC-3 の F105W (Y_{105}), F125W (J_{125}), F140W (JH_{140}), F160W (H_{160}) バンドで観測されている。

2.2 UDF12

UDF12 は Hubble Ultra Deep Field 2009 の領域を Y_{105} バンドを中心にさらに深く観測することにより、 $z \sim 7-8$ の星形成銀河を暗いものまで検出することに特化したプロジェクトである。このプロジェクトでは HFF で用いられたバンドに加え、F775W, F850W でも観測が行われている。また、UDFP1 と UDFP2 の UDF12 の平行領域も解析に用いた。 5σ 限界等級は UDF12 で 29.2 等から 30.6 等、UDFP1 と UDFP2 で 28.7 等から 30.6 等である。

3 Samples & Overdensity

HFF と UDF12 のデータを用い、 $z \sim 8$ の星形成銀河をライマンブレイク法を用いて色選択した。この手法の詳細は Ishigaki et al. (2015) を参照されたい。概要としては、 $z \sim 8$ の銀河が Y_{105} バンドより短波長側で暗くなる性質を利用して、

$$Y_{105} - J_{125} > 0.5 \quad (1)$$

$$J_{125} - H_{160} < 0.4 \quad (2)$$

などの色選択基準をもとに選択を行った。全領域で同じ選択基準により $z \sim 8$ 銀河を選択したところ、57 天体を選び出された。各領域の面積や $z \sim 8$ 銀河の個数などを表 1 に示す。このうち A2744C では過去の研究と同様、領域の北東に $z \sim 8$ 銀河の高密度領域、A2744z8OD が見つかった (図 1)。そのような高密度領域は他のフィールドには存在していない。

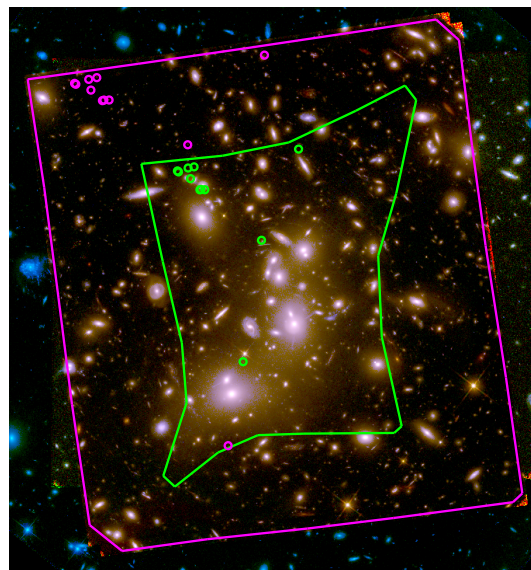


図 1: A2744C の 3 色図。マゼンタの線および丸はそれぞれ ACS と WFC-3 で観測された領域の境界と $z \sim 8$ 銀河の位置を表す。緑の線および丸は重力レンズ効果を補正した source plane 上のもとの位置における境界と銀河の位置。

表 1: 各領域の面積、深さ、検出された $z \sim 8$ 銀河の数

Field	Area arcmin ²	Depth (H_{160}) 5σ	$z \sim 8$ galaxies #
A2744C	4.79 (1.59)	28.90	11
A2744P	3.60	28.75	4
M0416P	3.81	28.98	8
M0717P	4.24	28.93	6
M1149P	4.71	29.07	9
UDF12	3.74	29.93	7
UDFP1	3.72	29.02	5
UDFP2	3.04	29.21	7

A2744z8OD の性質を定量的に調べるため、密度超過 δ を計算した。 δ は以下のような式で定義される。

$$\delta = \frac{n - \bar{n}}{\bar{n}} \quad (3)$$

ここで n はその領域内の銀河の個数密度、 $\bar{n}$ は平均個数密度を表す。A2744z8OD 内の個数密度を半径 $6''$ の円で計算したところ、 δ の値は 130 であった。これを過去の密度超過領域の研究と比較した結果を図

2 に示す。A2744z8OD は他の密度超過領域と比べ、極めて高密度でかつコンパクトな天体であることがわかる。

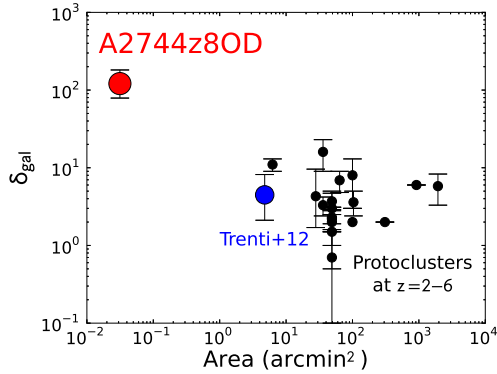


図 2: さまざまな密度超過領域の面積と δ の値。赤丸が本研究の A2744z8OD、青丸が Trenti et al. (2012) によって報告された $z \sim 8$ 銀河の密度超過領域、黒丸がその他の $z = 2 - 6$ の密度超過領域を表す (詳細は Chiang et al. (2013) を参照)

4 Comparison with the Simulation

A2744z8OD のハロー質量、星質量の時間進化を推定するため、次にシミュレーションのカatalog内では同じような δ を持つ密度超過領域を探す。用いたのは N 体シミュレーションである Millennium Simulation と、それをベースにして作られた銀河の準解析的モデルの Henriques2014a galaxy formation model である (Henriques et al. 2015)。Henriques2014a モデル内では 24 個の light cone (シミュレーションボックス内の銀河を実際の観測と同じように赤方偏移スペース上に配置したもの) が定義されている。1 個の light cone は 3.14 平方度の面積を持つ。本研究ではそれら全ての light cone を用いて、観測と同様に $z \sim 8$ 銀河の色選択を行った。その結果、シミュレーション内で A2744z8OD と同じ個数密度を持つ密度超過領域 (Modelz8OD) を発見した。Modelz8OD の 3 次元マップを図 3 に示す。高密度領域内の銀河 8 個中 7 個は $\Delta z \sim 0.03$ 以内と視線方向に対しても密集

しており、たまたま視線方向に重なったのではなく物理的な関係を持っていると考えられる。ただし天球面方向の広がりには比べると視線方向の広がり大きく、この Modelz8OD は非常に細長い構造をしている。これは宇宙の大規模構造のフィラメント上に銀河が位置しているのではないかと考えられる。

5 Discussion

最後に Modelz8OD のハロー質量と星質量の進化を調べた。ハロー質量は $z = 0$ で $10^{14} M_{\odot}$ ほどに成長していた。すなわち Modelz8OD は現在の銀河団の祖先、原始銀河団を形成している。また Modelz8OD 内の銀河のほとんどはマージャ - により原始銀河団中心の明るい銀河 (BCG) に成長することがわかった。この BCG の星質量進化をシミュレーション内の他の典型的な BCG と比較したのが図 4 である。今回見つかった高密度領域では、BCG が宇宙初期から成長を始め、速やかに $10^{11} M_{\odot}$ の大質量の銀河に進化することがわかる。以上より、Modelz8OD のような高密度領域は原始銀河団のコアを形成する天体であり、宇宙初期の大質量銀河の形成の現場であるということが推測される。今後このような高密度領域を A2744z8OD の他にも探索することで、高赤方偏移における大質量銀河の形成を明らかにする手がかりを得られるかもしれない。

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

- Atek, H., Richard, J., Kneib, J.-P., et al. 2015, ApJ, 800, 18
- Chiang, Y.-K., Overzier, R., & Gebhardt, K. 2013, ApJ, 779, 127
- Coe, D., Bradley, L., & Zitrin, A. 2015, ApJ, 800, 84
- Ellis, R. S., McLure, R. J., Dunlop, J. S., et al. 2013, ApJ, 763, L7

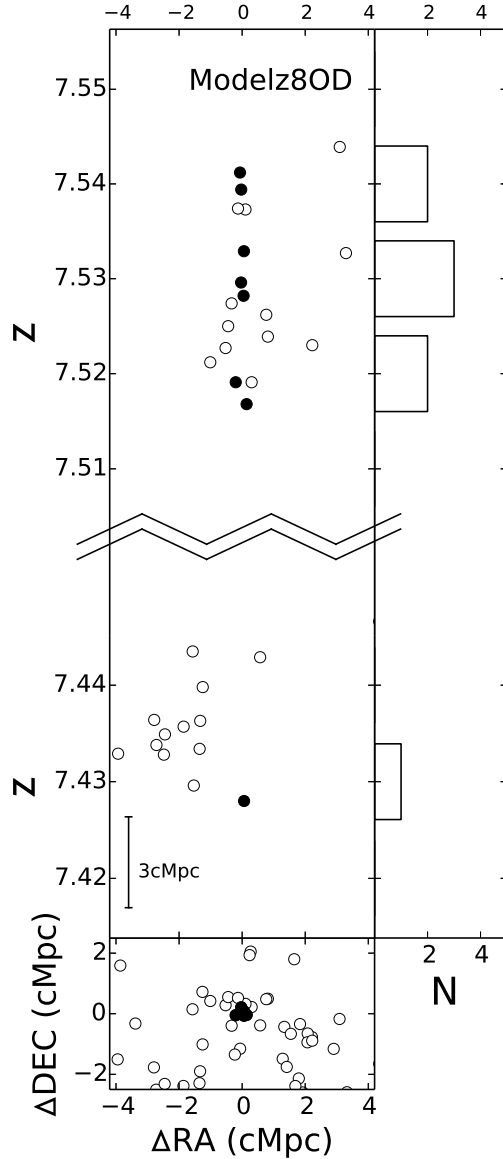


図 3: Modelz8OD の 3 次元マップ。左上図は $z \sim 8$ 銀河の天球面方向と赤方偏移方向の分布、左下図は天球面方向に射影した銀河の分布を示す。黒丸が半径 $6''$ の円内に入った 8 個の銀河、白丸がその他の銀河の位置を表す。右上図は円内の銀河の赤方偏移分布のヒストグラム。

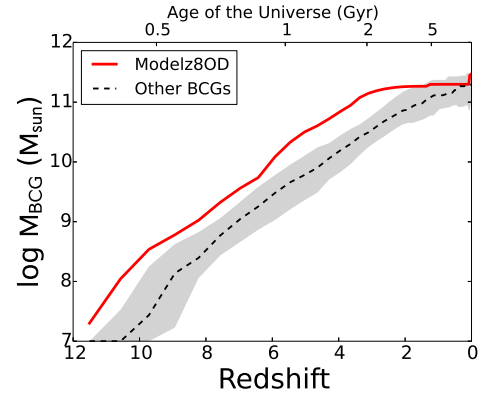


図 4: Modelz8OD に対応する BCG の星質量進化 (赤線)。黒点線は $z = 0$ で $10^{14} M_{\odot}$ に進化する他の銀河団の BCG の平均的な進化の様子を示す。灰色の領域はそれらの BCG の進化の 1σ の分散。

Henriques, B. M. B., White, S. D. M., Thomas, P. A., et al. 2015, MNRAS, 451, 2663

Ishigaki, M., Kawamata, R., Ouchi, M., et al. 2015, ApJ, 799, 12

Kawamata, R., Ishigaki, M., Shimasaku, K., Oguri, M., & Ouchi, M. 2015, ApJ, 804, 103

McLure, R. J., Dunlop, J. S., Bowler, R. A. A., et al. 2013, MNRAS, 432, 2696

Oesch, P. A., Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., et al. 2014, ArXiv e-prints, arXiv:1409.1228

Schenker, M. A., Robertson, B. E., Ellis, R. S., et al. 2013, ApJ, 768, 196

Trenti, M., Bradley, L. D., Stiavelli, M., et al. 2012, ApJ, 746, 55

Zheng, W., Shu, X., Moustakas, J., et al. 2014, ApJ, 795, 93