

# 重力レンズで探る形成初期の銀河の性質と進化

川俣 良太 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

形成初期の銀河の性質や、現在の銀河までの銀河進化の過程を追うためには、銀河のサイズや形態の進化を知ることが重要となる。これまでの研究 (e.g. Ono et al. 2013) では、過去ほどサイズが小さい傾向が見られているが、 $z > 6$  の銀河に対しては、精度良くサイズを測ったサンプルの数は乏しく、サイズと等級の関係や星形成率面密度を議論するには十分ではない。この問題を解決するため、我々は Hubble Frontier Fields のデータを利用し、形成初期の銀河のサイズを測定した。重力レンズ効果には、暗い銀河を明るくする効果だけでなく、銀河の像を拡大する効果もあり、レンズ効果を受けた銀河はサイズの研究に適したものである。我々は、重力レンズ効果を受けた銀河の撮像データから、その銀河の真の等級とサイズを求めるコードを構築した。レンズされた銀河の画像に最もよく合う真の等級とサイズを、暗い銀河の測光において避けて通れない系統誤差も考慮して推定するものである。作成したコードを現時点で観測が完了している Abell 2744 に適用した結果、サイズが測定された銀河の数を先行研究から倍増させることに成功した。そのサンプルから、(1) サイズと明るさには相関があるが、先行研究が示唆するよりも弱いこと、(2) サイズが銀河の進化段階のよい指標となっていること、(3)  $z \sim 6-8$  の銀河の星形成の様子は、中心核付近で爆発的に星形成している現在の特殊な銀河の中心領域でのそれと似ていること、(4) 銀河のサイズとハローのサイズの比は、 $z \sim 4-8$  で約 3.5% で一定であることを明らかにした。

## 1 Introduction

銀河のサイズは、銀河の物理量の特徴づける重要な物理量である。サイズには、等級や色といった物理量とは異なり、銀河の星質量や角運動量といった、より力学的な情報が含まれている。したがって、サイズの赤方偏移進化を追うことで、等級や色からとは相補的な情報を得ることができる。この研究では、多くの先行研究と同じく、サイズは UV 領域の half-light radius, 等級は UV 等級を用いる。

Hubble Space Telescope (HST) とそれに搭載されたカメラによる高分解能の撮像観測により、高赤方偏移の銀河のサイズの測定が可能になってきた。これまでの  $z \sim 10$  までの銀河の観測により、high- $z$  の銀河ほどサイズが小さく、また星形成を活発に行っていたことがわかっている。しかしながら、銀河の等級とサイズに強い相関があると報告されている  $z \sim 7-8$  できえ、サイズが測定された銀河数は少なく、その関係の分散の大きさや、星形成率面密度の分散を議論するには十分ではない。

重力レンズ効果を用いることは high- $z$  の暗い銀河

を探索するために有効である。重力レンズの増光効果のおかげで、望遠鏡の観測限界を超えた真に暗い銀河を検出できる。

現在、Hubble Frontier Fields (HFF; PI: J. Lotz) と呼ばれる、HST を用いた非常に深く、かつ HUDF12 (PI: R. Ellis) よりも領域が広い観測が行われている。HFF は、重力レンズ効果の強い 6 つの銀河団を観測するもので、その銀河団の背景にあるレンズ効果を受けた高赤方偏移銀河の観測を主な目的としている。重力レンズ効果により、暗い銀河を検出できるだけでなく、像が拡大されるためサイズの測定に適したサンプルが得られる。この効果により、HUDF12 と同じか、より暗い銀河まで検出できる。

この研究では、HFF のデータを用いて  $z \sim 6-8$  の銀河の精密なサイズと等級の測定を行い、先行研究である Ono et al. (2013) から、測定された銀河数を  $z \sim 6-7$  で 9 個から 18 個に、 $z \sim 8$  で 6 個から 12 個に増やした。より統計的に有意なこのサンプルを用いて、サイズ-等級関係やその分散、銀河サイズの赤方偏移進化、星形成率面密度、さらに multiple

core をもつ銀河の割合などについて議論する。さらに、新たにサイズ-等級関係と銀河の色との関係や、abundance matching の結果 (Behroozi et al. 2013) を用いて、銀河サイズとハローサイズの関係も議論する。

## 2 Data and Samples

HFF の 1 番目の銀河団である Abell 2744 の撮像データを用いる。解析に使用したバンドは、HST の WFC3/IR の 4 バンド (F105W, F125W, F140W, F160W) と ACS の 3 バンド (F435W, F606W, F814W) である。これらのデータを用いて dropout selection を行い、 $z \sim 6-7$  で 10 天体、 $z \sim 8$  で 9 天体を検出した。さらに、サイズと等級を精度よく求めるため、これらの天体からフィッティングに適した十分明るい銀河を選択する。最終的に、 $z \sim 6-7$  で 9 天体、 $z \sim 8$  で 6 天体を抽出した。この中には、先行研究に比べて、絶対等級が約 2 等暗い天体も含まれている。

## 3 Mass Model

銀河団による重力レンズの計算には、レンズ天体となる銀河団の質量分布を知る必要がある。我々の研究では、重力レンズ計算には glafic (Oguri 2010) という公開されているソフトウェアを用いる。銀河団の質量分布は、銀河団の構成銀河と銀河団ハローの位置に質量プロファイルをおき、観測された multiple image の位置を再現するようフィッティングする。今回は、24 組 67 天体の像を用いてフィッティングを行い、質量分布を決定した。

## 4 Size of $z \sim 6-8$ galaxies

### 4.1 Measurements of Intrinsic Sizes and Luminosities

上で選択した銀河に対してサイズと等級を求めるために、重力レンズ効果を受けて歪ませた Sérsic profile ( $n = 1$ ) でそれぞれの銀河をフィッティングする。つ

まり、source plane 上に Sérsic profile をおき、重力レンズ効果を考慮して image plane 上でどのように観測されるかを計算し、その像と観測で得られた銀河の像とでフィッティングを行った。S/N を上げるため、フィッティングは 3 バンド合成の画像を用いて行った。 $z \sim 6-7$  の銀河に対しては F105W, F125W, F140W,  $z \sim 8$  の銀河に対しては F125W, F140W, F160W の画像を合成した。

また、 $z \sim 8$  の 6 つの天体のうち、3 天体は two-component の構造をもっていた。これらの天体に対しては、2 つの Sérsic profile でフィッティングを行い sky の値を求めたのち、sky の値を固定して 1 つの Sérsic profile でフィッティングを行った。これは、すべて 1 つの Sérsic profile でフィッティングを行っている先行研究と条件を揃えるためである。

### 4.2 Error Estimates

これらの表面輝度の低い天体に対するフィッティングでは、profile の周辺部が sky のノイズと紛れてしまうため、サイズは小さく、等級は暗めに見積もられてしまう。さらに、sky のノイズの影響で、サイズと等級には偶然誤差が含まれる。これらの誤差を見積もるため、シミュレーションを行った。このシミュレーションは、疑似天体を実際の画像に埋め込み、本物の天体同様に検出することで、あるサイズ、ある等級の銀河がどのように測定されるのかを見積もるものである。その結果から系統誤差と偶然誤差を求めた。

## 5 Results and Discussions

### 5.1 Size - luminosity relation

図 1 は、我々の結果と Ono et al. (2013) の結果を合わせたサンプルでのサイズ-等級関係である。明るく小さな銀河が見つかったことなどにより、この関係は Ono et al. (2013) で示唆されていたよりも弱く、分散が大きいことが分かる。また、 $z \sim 6-7$  と  $z \sim 8$  の間に赤方偏移進化が見られないことから、より統計精度をあげるため、今後はこの 2 つのサンプルを合わせて議論する。

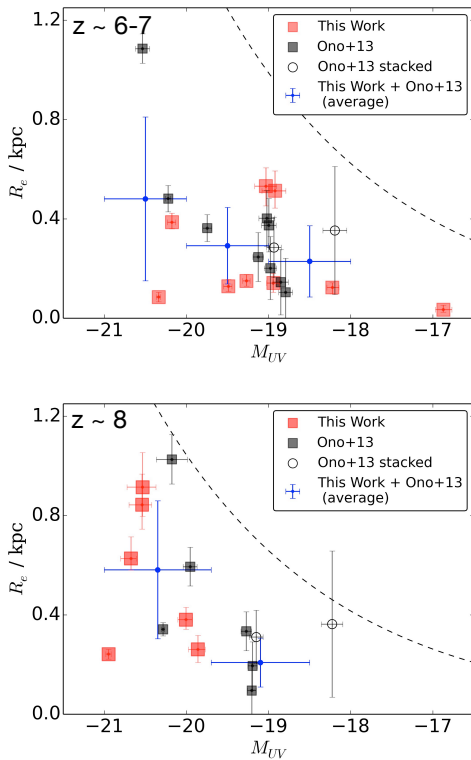


図 1:  $z \sim 6-7$  (上) と  $z \sim 8$  (下) におけるサイズ等級関係. 赤い点は我々の結果, グレーの点は Ono et al. (2013) の結果を表す. 青の点と線は, それぞれの等級幅でのサイズの平均である. 点線は, 50% の completeness lines を示す.

このサンプルに対して, UV slope, つまり  $\beta$  を求めた (図 2). 大きな銀河 ( $> 0.8$  kpc) は必ず赤く, かつ必ず明るい傾向にあることが分かる. 銀河を赤くする要因には, 豊富なダスト, 年齢, そして金属量の多さが挙げられる. これらはすべて, 進化段階の進んだ銀河の特長である.

## 5.2 Redshift evolution of size

図 3 は,  $L_{z=3}^*$  の範囲にある明るい銀河の平均サイズの赤方偏移進化を表している. 先行研究でわかっている過去ほどサイズが小さいという傾向を確認し, よく行われる  $(1+z)^m$  でのフィッティングの指数  $m$  の値も先行研究と矛盾がないことを確認した. 質量一定のダークハローのサイズは  $m = -1.0$  で進化し,

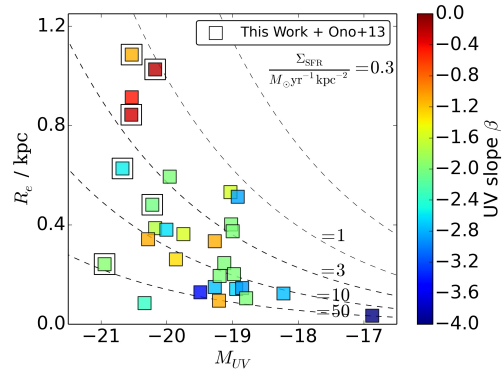


図 2:  $z \sim 6-7$  と  $z \sim 8$  のサンプルを合わせたサイズ等級関係. 色は, それぞれの UV slope, つまり  $\beta$  を表す. 四角の枠で囲まれた点は, multiple-core をもつ銀河である.

回転速度一定のダークハローのサイズは  $m = -1.5$  で進化することが理論的にわかっている (Mo et al. 1998). いくつかの先行研究では, 銀河サイズのフィッティングの結果と, このダークハローの形成理論とを対応づけた議論が行われているが, 定性的な議論にとどまり, より踏み込んだ議論はなされていない. 我々は, 星質量とダークハロー質量とを結びつけた abundance matching (Behroozi et al. 2013) の結果を用い, 各赤方偏移でのダークハロー質量を求めた. 星質量の見積もりには, Reddy & Steidel (2009) と González et al. (2011) の関係を用いた. 銀河サイズとダークハローサイズの比の赤方偏移進化を調べた結果, その比は  $z \sim 2.5 - 9.5$  で約 3.5% で一定であり, 進化が見られないことがわかった. Mo et al. (1998) のハローの理論式 (1) から, この赤方偏移範囲では, 質量比  $m_d$ , 角運動量比  $j_d$ , ハローのスピパラメータ  $\lambda$  の 3 つの物理量の乗除が一定であることが示唆される.

$$\frac{R_d}{r_{200}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{j_d}{m_d} \lambda \right) \quad (1)$$

興味深いことに, 比が 3.5% ということは,  $m_d, j_d, \lambda$  の典型的な値である  $j_d/m_d = 1, \lambda = 0.05$  とよい一致を示す.

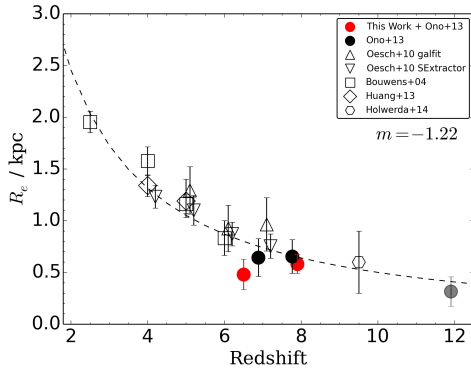


図 3: 平均サイズの赤方偏移進化.

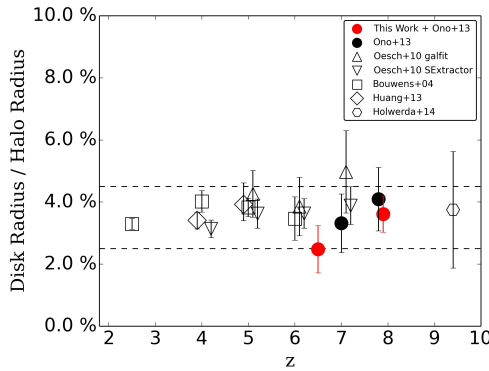


図 4: 銀河サイズとハローサイズの赤方偏移進化.

### 5.3 SFR Surface Density

銀河の星形成の様子は、星形成率 (SFR) と星形成率面密度 (SFRSD) でよく記述できる。これらは以下の式で見積もられる。

$$\frac{SFR}{M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} = 1.4 \times 10^{-28} \frac{L_{\nu}}{\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}}$$

$$\Sigma_{SFR} = \frac{SFR/2}{\pi r_e^2}.$$

図 2 の点線は、SFRSD 一定の線を表している。SFRSD の範囲は Ono et al. (2013) で示唆されているよりも広く、これはサイズ-等級関係に大きな分散が見られたことに起因する。

$z \sim 6-8$  の銀河の星形成の様子を、近傍銀河のそれと比較することは、 $z \sim 6-8$  の銀河の星形成を特徴づけるために有用である。図 5 は、SFRSD-SFR 平面上にこれらの銀河をプロットし、比較したもの

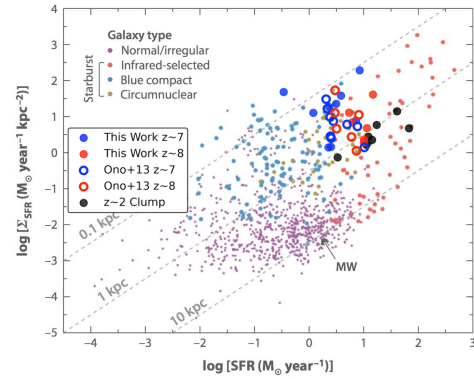


図 5: 近傍銀河と比較した  $6 \lesssim z \lesssim 8$  の銀河の星形成の様子。Kennicutt & Evans (2012) の Fig. 9 にプロット。

である。 $z \sim 6-8$  の銀河は、近傍星形成銀河の中心核周辺の活発に星形成を行っている領域と似た星形成を行っていることがわかる。また、 $z \sim 2$  の星形成銀河の中の個々の clump とも星形成が近い。

### 5.4 Multiplicity

銀河がどのように合体し集積したかを知るには、multiple core をもつ銀河の比率を調べるのが 1 つの手段となる。我々と Ono et al. (2013) のサンプルに対して、multiple core を持つ銀河の比率を求めると 20% であった。これは、Oesch et al. (2010) で求められた比率と一致する。

### Reference

- Behroozi, P. S., Wechsler, R. H., & Conroy, C. 2013, ApJ, 770, 57
- González, V. et al. 2011, ApJl, 735, L34
- Kennicutt, R. C., & Evans, N. J. 2012, ARA&A, 50, 531
- Mo et al. 1998, MNRAS, 295, 319
- Oesch, P. A. et al. 2010, ApJl, 709, L21
- Oguri, M. 2010, PASJ, 62, 1017
- Ono, Y. et al. 2013, ApJ, 777, 155
- Reddy, N. A., & Steidel, C. C. 2009, ApJ, 692, 778