

$z = 2.4$ の 53W002 原始銀河団における大質量銀河探査

濱口 恵梨香 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

高密度環境における大質量銀河の形成過程を明らかにするために、5 Mpc にわたる Ly α 輝線銀河 (LAEs) の密度超過によって発見された $z = 2.4$ の 53W002 原始銀河団を、すばる望遠鏡/MOIRCS を用いて 3 視野にわたる近赤外撮像観測を行った。 $JHKs$ のカラーから、 $z \sim 2.4$ の大質量銀河候補である $JHKs$ 選択銀河を $Ks \sim 22$ まで 102 個選出した。この $JHKs$ 選択銀河の空間分布を調べ、一般領域との個数密度の比較を行ったところ、LAEs の構造に沿って大質量銀河の密度超過が見られた。また、赤い $JHKs$ 選択銀河ほどより LAEs の密度の高い領域をトレースするように分布しており、 $JHKs$ 選択銀河の個数密度は一般領域に比べて 2~3 倍ほど高い。このことから、フィラメント状でまだ力学的に若い状態の $z = 2.4$ の原始銀河団において既に多くの大質量銀河が形成されていることが示唆された。

1 Introduction

銀河の星形成史は環境に依存しており、現在の宇宙において、大質量の赤い早期型銀河は銀河団中に多く見られる。また、これまでの観測から、これらの早期型銀河は比較的古い星から構成されていることがわかっており、100 億年以上前 ($z > 2$) に形成されたと考えられている。したがって、高密度領域での早期型銀河の形成過程を明らかにするためには、 $z > 2$ の原始銀河団を直接観測することが重要となる。高赤方偏移の原始銀河団を探す非常に強力な方法の一つは、狭帯域フィルターを用いた Ly α 輝線銀河 (Lyman α emitter; LAE) 探査である。しかし、LAE の星質量は典型的に $10^9 M_{\odot}$ 以下と小さく、現在の銀河団に多く存在する大質量の早期型銀河とは異なっている。そのため、LAE 探査から発見された原始銀河団中に大質量銀河が存在するか、また、それらがどのような性質を持つかについて調べることは、高密度環境における早期型銀河の形成について理解する上で重要である。そこで、本研究では、電波銀河 53W002 の周りで 5 Mpc にわたる LAE の密度超過として発見された (Mawatari et al. 2012)、 $z = 2.4$ の 53W002 原始銀河団領域で、すばる望遠鏡/MOIRCS による近赤外線撮像観測を用いて大質量銀河探査を行った。近赤外線観測は、 $z = 2.4$ の銀河に対して、星質量を良く反映する静止系可視光をサンプルすることができるので、大質量銀河探査に

適している。

2 Data and Reduction

53W002 領域の LAE の構造をカバーするように、すばる望遠鏡/MOIRCS (Multiple-Object Infrared Camera and Spectrograph) を用いて、3 視野にわたる近赤外線撮像観測 (J , H , Ks バンド) を行った。MOIRCS は 2 つの検出器 (それぞれ chip1, chip2 と呼ぶ) によって 4×7 arcmin² の視野をカバーしており、ピクセルスケールは 0.117 arcsec/pixel である。今回撮像した視野を、それぞれ FOV1、FOV2、FOV3 と呼ぶ (図 2 参照)。観測日、シーイング、積分時間をそれぞれ表 1 に示した。

まず、観測したデータを MCSRED (MOIRCS 撮像データ解析のために IRAF をベースに開発されたパッケージ) を使用し、一次処理をした。この中の mcsall を使い、天体マスクの作成、フラットフィールドの作成、メジアンスカイ引き、スカイの引け残りを低次元関数 fitting で処理、象限間の溝の補正、歪み補正、及び、位置合わせを行った。次に、同じ天体が同じ明るさになるように、平均的な値にフラックス合わせし、全てのフレームを足し合わせた。カラー測定を行うためには、そのバンド間で PSF の FWHM を合わせる必要がある。全ての視野、chip の PSF を星の FWHM が大きく、裾が広がった FOV3 の

表 1: 観測データのまとめ。

Field	Date	Band	Seeing		Exposure time		5 σ 限界等級(1.3" aperture)	
			(arcsec)		(s)		(Vega mag)	
			ch1	ch2	ch1	ch2	ch1	ch2
FOV1	Jul. 22-23 2006	J	0.37	0.36	4770	3690	24.33	24.37
	Apr. 27 2007	H	0.42	0.42	4320	3360	23.49	23.47
		Ks	0.44	0.44	1361	1361	22.03	22.11
FOV2	Apr. 24-25 2013	J	0.62	0.63	4040	4040	23.34	23.02
	Jun. 12, 21-22 2014	H	0.62	0.61	3868	3868	22.37	22.14
		Ks	0.51	0.52	4710	4710	22.08	21.83
FOV3	Apr.23-24 2013	J	0.58	0.58	4480	4480	23.28	23.04
	Jun. 12 2014	H	0.47	0.48	3492	3612	22.33	22.22
		Ks	0.50	0.48	2970	2880	21.75	21.70

chip1 に合わせた。実際に天体の測光に用いる 1.3" アパーチャーでスカイのノイズを測定し、5 σ 限界等級を求めた (表 1)。

3 Analysis

まず、SExtractor を用いて、天体検出と測光を行った。誤検出を避けるため、検出した天体の内、S/N > 5 のみをサンプルとした。また、天体検出の一樣性を確保するために、各バンドでの積分時間が半分以下になっている領域は解析から除いた。その結果、総面積は 74.9 平方分となった。その内、H バンドの等級が 2 σ 限界等級より明るい天体は、FOV1 で chip1, 2 においてそれぞれ 387、434 天体、FOV2 でそれぞれ 580、469 天体、FOV3 でそれぞれ 513、428 天体選出された。

次に、 $z \sim 2.4$ の銀河候補を選び出すために、 $z = 2-3$ の銀河が Balmer / 4000 Å ブレイクによって特徴的な $J - K_s$ vs. $H - K_s$ のカラーを示すことを利用した色選択法 (Kajisawa et al. 2006) を用いた。3 視野において K_s バンドの限界等級はおよそ 22 等なので、それらの銀河は $z \sim 2$ だとすると $10^{10} M_{\odot}$ 以上の星質量を持つ大質量銀河であると期待される。この手法により選択された銀河を、今後、 JHK_s 選

出銀河と呼ぶ。 JHK_s 選択銀河は、FOV1 の chip1, 2 でそれぞれ 4、7 天体、FOV2 でそれぞれ 28、25 天体、FOV3 でそれぞれ 25、13 天体選出された。

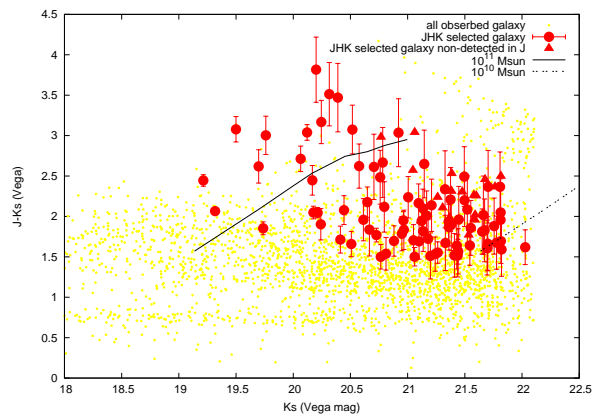


図 1: JHK_s 選択銀河の色等級図。赤丸は JHK_s 選択銀河、赤三角は JHK_s 選択銀河の中で J バンドが 2 σ 限界等級より暗いもの、黄色の点は JHK_s 選択銀河以外の天体である。また、黒の実線は種族合成モデルから計算した $z = 2.4$ の $10^{11} M_{\odot}$ の星質量を持つ銀河のトラックを示しており、点線は $10^{10} M_{\odot}$ の星質量の銀河のモデルトラックを表わす。

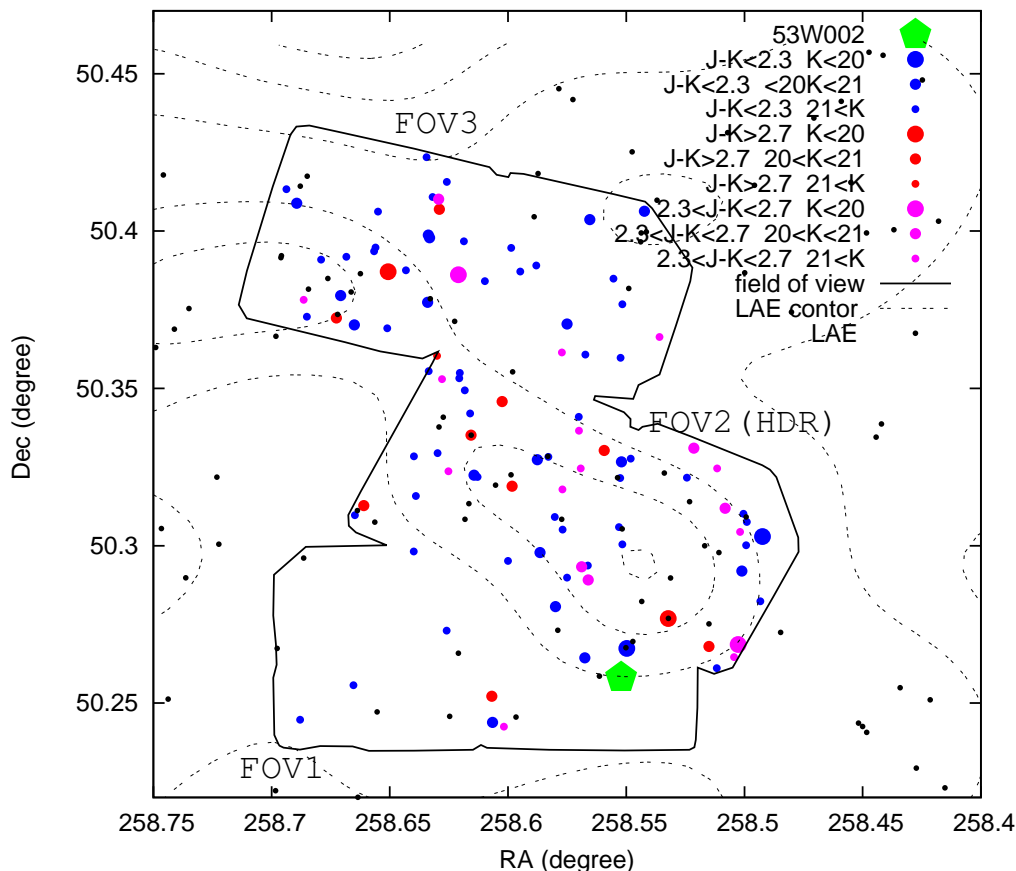


図 2: $JHKs$ 選択銀河と LAEs の空間分布。黒色の点は LAEs、黒色の破線は LAEs の密度のコントア (Mawatari et al. 2012) である。黄緑色の五角形は 53W002 電波銀河、赤丸は $J - K_s > 2.7$ の赤い $JHKs$ 選択銀河、ピンク丸は $2.3 < J - K/rms < 2.7$ の $JHKs$ 選択銀河、青丸は $J - K_s < 2.3$ の $JHKs$ 選択銀河である。 $JHKs$ 選択銀河の丸の大きさは K_s バンドでの明るさ示す。

4 Results and Discussion

4.1 $JHKs$ 選択銀河の色等級図

図 1 に、 $JHKs$ 選択銀河の色等級図を示す。 $JHKs$ 選択銀河の $J - K_s$ のカラーは 1.5 から 3 を超えるような非常に赤いものまで幅広く存在する。その中でも、 $J - K_s$ が 2.7 より赤いものは K_s バンドの等級が 21 等より明るいところに分布しているのに対して、 $J - K_s$ が 2.3 よりも赤い天体は、 K_s が 20.5 等あたりより暗い。 $JHKs$ 選択銀河の数を色別にみると、 $J - K_s > 2.7$ で 12 個、 $2.7 < J - K_s < 2.3$ で 19 個、 $J - K_s < 2.3$ で 71 個である。

4.2 $JHKs$ 選択銀河の空間分布

次に、 $JHKs$ 選択銀河の空間分布を調べたものを図 2 に示す。 $JHKs$ 銀河は、北東から南西にかけて帯状に分布している。また、LAEs の数密度の等高線と比較すると、 $JHKs$ 選択銀河は、まさに LAEs の密度が高い構造に沿って分布している様子が見られる。特に、赤い $JHKs$ 選択銀河は、一か所に集中するわけではなく LAEs の高密度構造をトレースするようにフィラメント状に分布しており、それに対して、青い $JHKs$ 選択銀河は LAEs の低密度構造までばらついているように見える。

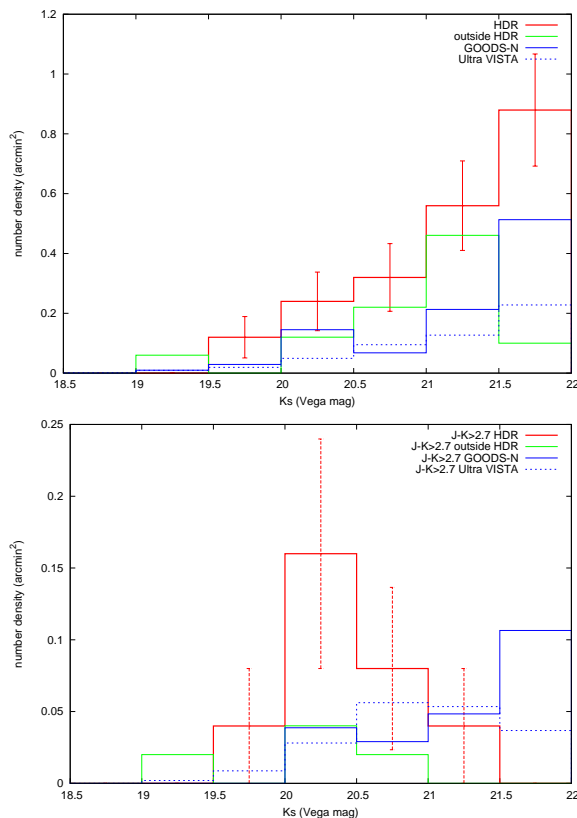


図 3: $JHKs$ 選択銀河の Ks バンドナンバーカウント。(上) $JHKs$ 選択銀河の個数密度を、HDR を赤実線、FOV1 + FOV3 を緑破線、一般領域である GOODS-N を青実線、Ultra VISTA を青破線で示した。(下) $J-Ks > 2.7$ の非常に赤い $JHKs$ 選択銀河の個数密度の比較。線の色は (上) と同様である。

4.3 $JHKs$ 選択銀河の数密度の比較

次に、一般領域と 53W002 原始銀河団の $JHKs$ 選択銀河の数密度を比較した結果を図 3 (上) に示す。この図は、3 視野の中でも LAE が特に多い FOV2 (これを High Density Resion, 略して HDR と呼ぶ) と、それ以外の FOV1、FOV3 と、一般領域 GOODS-N、Ultra VISTA における $JHKs$ 選択銀河の数密度を比較したものである。 $Ks < 21$ において、一般領域に比べて HDR は約 3 倍、FOV1、FOV3 は約 1.5 倍の $JHKs$ 選択銀河の密度超過が見られる。HDR については $21 < Ks < 22$ の $JHKs$ 選択銀河においても数密度は一般領域の約 2 倍である。また、

$J-Ks > 2.7$ の非常に赤い $JHKs$ 選択銀河において、数密度を比較したものを図 3 (下) に示す。このとき、一般領域に対して、FOV1 と FOV3 はほとんど違いが見られないが、HDR においては数密度超過が $Ks < 20.5$ で顕著に見え、数密度は一般領域の約 3 倍である。

これらのことから、 $z = 2.4$ の LAE の高密度領域には、比較的に数多くの大質量銀河が付随していると期待される。特に、 $Ks < 21$ と明るく、かつ $J-Ks \sim 3$ の非常に赤い銀河は、 $10^{11} M_{\odot}$ 以上の非常に大きな星質量を持つと推測される (図 1)。これらの非常に赤い $J-Ks$ カラーは、これらの銀河が既に静的進化段階に入っている可能性を示唆しており、少なくとも銀河団の大質量銀河の一部は、まだ力学的に若い原始銀河団内で既に形成されている可能性が示唆された。

5 Conclusion

高密度環境における大質量銀河の形成過程を明らかにするために、 $z = 2.4$ の 53W002 原始銀河団を近赤外撮像観測し、 $z \sim 2.4$ の大質量銀河候補である $JHKs$ 選択銀河を選出した。 $JHKs$ 選択銀河について、色等級図や空間分布を調べ、一般領域との個数密度の比較を行ったところ、(1) $JHKs$ 選択銀河は LAEs の高密度領域に沿って分布しており、赤い $JHKs$ 選択銀河ほどより LAEs の数密度が高い領域に分布していること、(2) $JHKs$ 選択銀河の個数密度は一般領域に比べて 2~3 倍ほど高いことが分かった。これらの結果は、この $z = 2.4$ の原始銀河団に多くの大質量銀河が付随していることを示唆している。また、非常に赤い $JHKs$ 選択銀河も存在することから、 $z = 2.4$ の原始銀河団で既に passive な大質量銀河が形成されている可能性があり興味深い。

Reference

- Mawatari, K., et al. 2012, ApJ, 759, 133
- Kajisawa, M., et al. 2006, MNRAS, 371, 577