

## $z=3.1$ 原始銀河団の MOIRCS 近赤外線分光観測

久保 真理子 (東北大学大学院 理学研究科天文学専攻)

### Abstract

我々は  $z = 3.1$  SSA22 原始銀河団のすばる望遠鏡 MOIRCS (Multi-Objects Camera and Spectrograph) による深い近赤外撮像データから星質量に基づいて原始銀河団銀河候補を選び、MOIRCS 多天体分光観測を行った。65 天体を観測し、約半数の同定に成功した。[OIII] $\lambda\lambda 5007$  輝線からこれほど大量の天体を分光同定したのは世界でも初の例である。うち 24 天体は  $z_{\text{spec}} \approx 3.1$  であり、確かに原始銀河団銀河であった。これにより原始銀河団で既に大質量銀河が形成されつつあることが明かになった。また、SSA22 領域の Ly $\alpha$  Blobs、サブミリ源の対応天体のそれぞれ複数の対応天体について  $z_{\text{spec}} \approx 3.1$  だと示した。これらは multiple major merger の途中であると考えられる。

## 1 Introduction

大質量早期型銀河の形成進化は天文学の大きな課題の一つである。現在の銀河団中心部は大質量早期型銀河に占められている。それらがタイトな色等級関係を示すことから、約 100 億年以上前の短期間に形成されたと考えられている。近年の観測では、 $z > 2$  の宇宙に既に現在の大質量早期型銀河に近い古い星種族、形態の銀河が観測されている。宇宙の星形成のピーク期は  $z = 2 - 4$  と観測的に示されている。よって  $z = 2 - 4$  の遠方銀河高密度領域”原始銀河団”は、現在の銀河団大質量早期型銀河の形成進化を理解するための重要なターゲットである。

赤方偏移  $z = 3.1$  SSA22 原始銀河団は最も顕著な遠方銀河高密度領域の一つである。この領域は  $z = 3.1$  Ly $\alpha$  輝線銀河の顕著な密度ピークから検出された (Steidel et al. 1998; 2000; Hayashino et al. 2004; Yamada et al. 2012; Fig.1 1 LAEs の分布図)。その他にも Ly $\alpha$  Blobs (LABs, Matsuda et al. 2004)、AGN (Lehmer et al. 2009)、サブミリ源 (Tamura et al. 2009) の密度超過が観測されており、この領域では極めて活発な星形成が行われていることを示唆している。

我々はすばる望遠鏡 MOIRCS (Multi-Object Infra-Red Camera and Spectrograph) による近赤外線撮像データを使ってこの銀河団を解析してきた。原始銀河団密度ピーク周辺の 111.8 arcmin<sup>2</sup> (観測領域; Fig. 1 赤枠) にわたる深い ( $K_{\text{AB}} = 24(5\sigma)$ ) 近赤外線

データを用い、星質量に基づいて原始銀河団銀河を探した。多波長データによる SED フィットに基づく photometric redshift を使って原始銀河団銀河を選び ( $K_{\text{AB}} < 24$  and  $2.6 < z_{\text{phot}} < 3.6$ )、一般領域に比べ銀河の面密度超過があることを明かにした。このことは一般領域よりも大質量銀河の形成が進んでいることを示唆している。

しかしながら photometric redshift には不定性がある。これらが確かに原始銀河団銀河であることを示すには分光観測によって赤方偏移を決定しなければならない。赤い大質量銀河では概して静止系紫外線の Ly $\alpha$  輝線は弱く、静止系可視光の nebular emission ( $z = 3.1$  では [OIII] $\lambda\lambda 5007$ ) を使った分光赤方偏移の同定が適している。

## 2 Methods/Instruments and Observations

我々は昨年 9、10 月にかけて MOIRCS による原始銀河団銀河候補天体の近赤外線分光観測を行った。原始銀河団銀河から赤方偏移した [OIII] $\lambda\lambda 5007$  輝線を検出し、分光赤方偏移を決定するのが目的である。三夜にわたり、計 4 マスク、65 天体を観測した。観測には VPH- $K$  (1.9-2.3 $\mu\text{m}$ , R=2500 with 0."5 slit), HK500 (1.3-2.3 $\mu\text{m}$ , R=500 with 0."5 slit) グリズムを使用した。高分散グリズムを使うことで、2 $\mu\text{m}$  帯の顕著な OH 夜光をさけて分光を行うことができ、

また銀河の力学的性質を明らかにすることができる。Seeing は  $0.''4-0.''8$ 、1 マスク辺りの積分時間は 3-4 時間、輝線の検出限界は  $\sim 1 \times 10^{-17} \text{ergs}^{-1} \text{cm}^{-2}$  である。Data reduction には MOIRCS Data reduction ツール MCSMDP (Yoshikawa et al.) を使った。Fig. 1 はターゲットの分布図である。 $z = 3.1$  LAEs の密度ピークを中心に観測し、サブミリ源、最も巨大な LABs の一つの LAB01 もターゲットとした。

### 3 Results

Fig. 2 は検出された  $[\text{OIII}]$ ,  $\text{H}\alpha$  輝線から求めた分光赤方偏移の分布である。34 天体から輝線を検出し、赤方偏移の決定に成功した。 $[\text{OIII}]$  輝線からこれほど大量に赤方偏移を決定した例は他にないだろう。 $z = 3.1$  付近には顕著な赤方偏移のピークがみられ、24 天体が  $z_{\text{spec}} \approx 3.09$  だった。確かに photometric redshift を使って選んだ原始銀河団銀河候補が原始銀河団銀河に占められていたことを示している。

この原始銀河団には可視分光観測から赤方偏移を決定された LBGs, LAEs など分布している。近赤外線分光によってより赤く、大質量で比較的星形成率の高い、より現在の大質量早期型銀河の祖先らしい銀河を原始銀河団銀河と同定することができた。

## 4 Discussion

### 4.1 原始銀河団の力学的性質

Fig. 3 枠内は銀河団中心部の分光赤方偏移分布である。原始銀河団銀河の速度分散を計算すると、 $\sigma_v \sim 700 \text{kms}^{-1}$  であり、先行研究の結果  $\sigma_v \sim 500 - 1000 \text{kms}^{-1}$  (Venemans et al. 2007) と矛盾ない結果が得られた。 $[\text{OIII}]$  輝線から求めたため、天体の数は少ないが散乱の影響を受ける  $\text{Ly}\alpha$  輝線に比べて正確な値のはずである。この時代はまだピリアル平衡に達していないと考えられるが、ピリアル平衡を仮定して力学的質量を見積ると、 $\sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ 。現在の Coma cluster core に相当する。

### 4.2 Multiple merging galaxies

Uchimoto et al. (2012) では近赤外線撮像観測から SSA22 原始銀河団に分布する LABs の多くの  $\text{Ly}\alpha$  halo 内に  $z_{\text{phot}} = 2.6 - 3.6$  の複数の星質量成分を検出した。我々は幾つかの LABs、SMG の星質量成分の分光を行い、確かに原始銀河団銀河であるか確かめた。その特に顕著な例が Fig. 4 である (原始銀河団における天体の位置; Fig. 2)。

上は LAB01 と呼ばれる、 $z = 3.1$  で最も大きな LABs の一つの K バンド画像である。広がり  $> 100 \text{kpc}$  の  $\text{Ly}\alpha$  halo 内に 5 つの  $z_{\text{phot}} \sim 3.1$  の星質量成分が検出された。C は可視分光観測により  $z_{\text{spec}} = 3.109$  と同定された (Steidel et al. 2000)。今回の観測で更に二つの星質量成分 (A, B) を  $z_{[\text{OIII}]} = 3.099$  と同定した。それぞれ星質量は、 $M_A = 8.2 \pm 0.5 \times 10^{10} M_{\odot}$ 、 $M_B = 1.1 \pm 0.3 \times 10^{10} M_{\odot}$ 。A は Spitzer MIPS  $24 \mu\text{m}$  で検出されており、 $\text{SFR} \sim 1000 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  の爆発的星形成銀河であると考えらる。

下はサブミリ源の K バンド画像である。7 つの  $z_{\text{phot}} \sim 3.1$  の銀河が分布している。多くは DRGs (Distant Red Galaxies,  $J - K > 1.4$ ) もしくは HEROs (Hyper Extremely Red Objects;  $J - K > 2.1$ ) であり、100 kpc ほどの範囲に密集している。我々は 4 天体 (Fig. 4 A, B, C, D) を分光し、三天体 (A, C, D) を  $z_{[\text{OIII}]} \approx 3.09$  と同定した。星質量はそれぞれ  $M_A = 1.15 \pm 0.03 \times 10^{11} M_{\odot}$ 、 $M_C = 7.7 \pm 1.3 \times 10^{10} M_{\odot}$ 、 $M_D = 5.60 \pm 0.22 \times 10^{11} M_{\odot}$ 。天体 A は X 線源で、極めて広いライン幅、 $\text{Log}([\text{OIII}]/\text{H}\beta) \sim 1.3$  から、AGN であると考えられる。また、天体 D は古い大質量銀河の SED でフィットされた。サブミリ源で爆発的星形成を行っていると考えられるが、星質量成分自体は既にかなり形成の進んだ大質量銀河が集まっている。

宇宙論的な大質量早期型銀河の形成シミュレーションでは、その初期に multiple major merger が予測されている (Meza et al. 2003; Naab et al. 2007)。我々の観測はそれを直接裏付けるものである。LAB01, サブミリ源の対応天体の星質量の総和は既に  $10^{11-12} M_{\odot}$  であり、これらは将来的に現在の銀河団における Brightest Cluster Galaxies へ成長すると考えられる。

## 5 Conclusion

$z=3.1$  原始銀河団の近赤外線分光観測を行い、原始銀河団銀河の同定に成功した。これらは大質量、高い星形成率をもち、現在の大質量早期型銀河の祖先であると考えられる。また、原始銀河団における multiple merging galaxies の存在を確かめた。今後は検出した  $[O_{III}]$ 、 $H\beta$  輝線の性質の解析からこの領域の様々な銀河の総合的な描像を得たい。

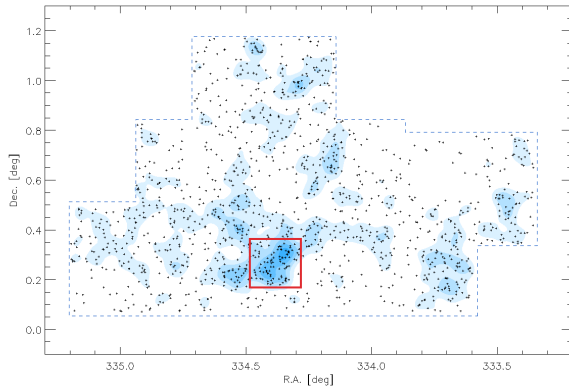


図 1: SSA22 領域の  $z = 3.1$  LAEs の面分布 (Yamada et al. 2009); 黒十字)。LAEs の密度が最も高い赤枠で囲まれた領域について MOIRCS 撮像、分光観測が行われた。

## Acknowledgement

Thanks for MOIRCS teams.

## Reference

Hayashino et al. 2004AJ....128.2073  
 Lehmer et al. 2009MNRAS.400..299  
 Matsuda et al. 2004AJ....128..569  
 Meza et al. 2003ApJ...590..619  
 Naab et al. 2007ApJ...658..710  
 Steidel et al. 1998ApJ...492..428  
 Steidel et al. 2000ApJ...532..170  
 Tamura et al. 2009Natur.459...61

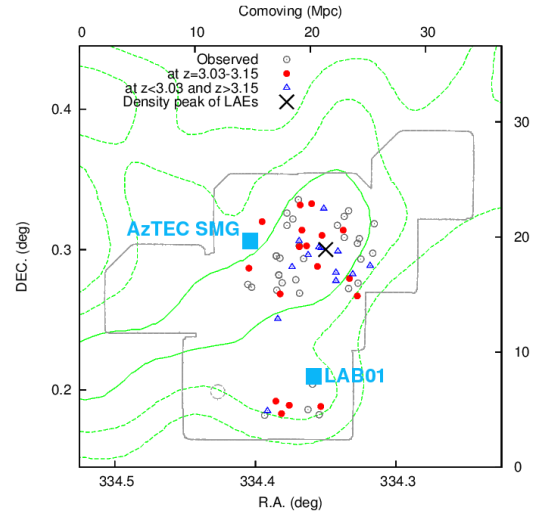


図 2: ターゲットの分布図。今回分光観測された天体 (白丸)、 $z_{\text{spec}} \approx 3.09$  (赤丸)、 $z_{\text{spec}} \neq 3.1$  (青三角)、Fig. 4 の AzTEC サブミリ源、LAB01 (水色四角)。MOIRCS 撮像観測領域 (灰色)、 $z = 3.1$  LAEs の等密度線 (Yamada et al. 2009, 緑)、LAEs の密度ピーク (十字)。

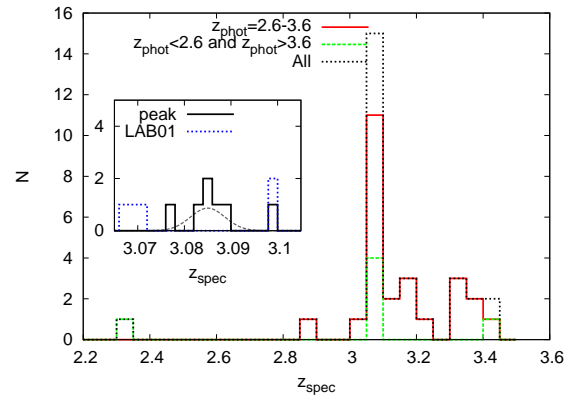


図 3: 近赤外線分光観測から同定した銀河の赤方偏移の分布。実践は今回分光同定下すべての天体、赤線は  $z_{\text{phot}} = 2.6 - 3.6$ 、緑線は  $z_{\text{phot}} \neq 2.6 - 3.6$  を表している。枠内は LAEs 密度ピーク周辺の銀河のみ (黒実線)、LAB01 周辺 (青点線) の分光赤方偏移分布。

Uchimoto et al. 2012ApJ...750..116

Venemans et al. 2007A&A...461..823

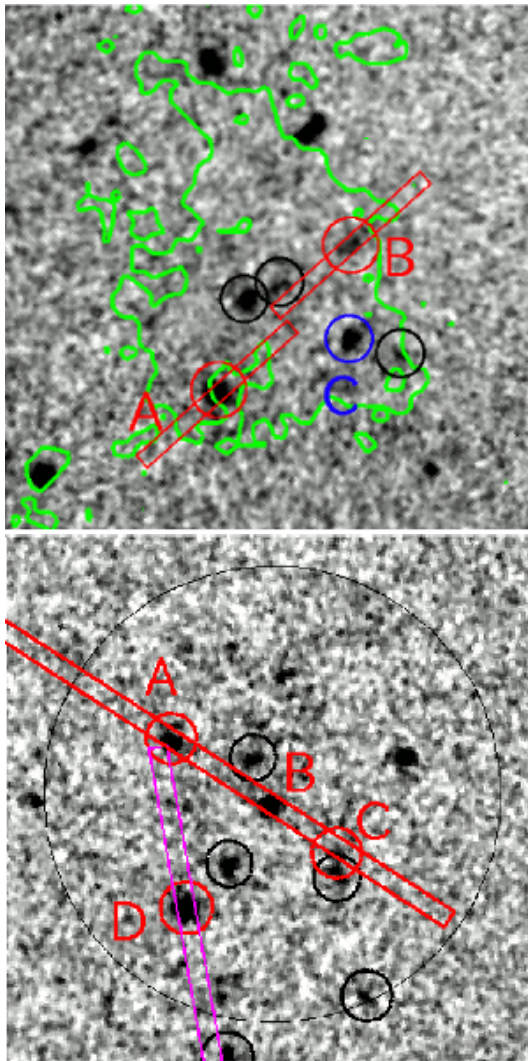


図 4: (上)LAB01 の MOIRCS  $K$ -band 画像 ( $23.''4 \times 23.''4$ )。緑線は  $\text{Ly}\alpha$  輝線の isophotal contour。丸がついた天体は  $z_{\text{phot}} \sim 3.1$ 。A、B 天体にスリットを切って分光観測を行った。両天体から  $[\text{OIII}]$  輝線を検出し、 $z_{[\text{OIII}]} = 3.099$  であると同定した。C は可視光観測によって  $z_{\text{Ly}\alpha} = 3.109$  であることが示されている (Steidel et al. 2000)。(下) 同じく AzTEC SMG の  $K$ -バンド画像。大円は AzTEC ビームサイズ (位置の不定性の範囲)。丸がついた天体は  $z_{\text{phot}} \sim 3.1$ 。A、B、C、D 天体を分光し A、B、D を  $z_{[\text{OIII}]} \approx 3.09$  と同定した。赤いスリットには VPH- $K$ 、マゼンタのスリットには HK500 を使用した。