### [OIII] 輝線銀河で探る最盛期前夜における銀河形成の活動性

鈴木 智子 (総合研究大学院大学 天文科学専攻)

#### Abstract

 $z\sim$ 1-3 の時代は宇宙の大局的な星形成率密度が高く、銀河形成の最盛期と言われている。本研究では、何故この時代に最盛期を迎えることになったのかを理解するために、最盛期をさらに遡った z>3 という時代に着目している。すばる望遠鏡の MOIRCS と挟帯域フィルターを用いた撮像観測から、一般フィールドである SXDF において  $z=3.2,\,3.6$  の [OIII] 輝線銀河のサンプルを構築した。そしてそれらの星質量や星形成率といった大局的な物理量を調べ、同じフィールドの  $z=2.2,\,2.5$  の  $\mathrm{H}\alpha$  輝線銀河との比較を行った。その結果、異なる時代のふたつの銀河サンプル間で星質量や星形成率の分布に明らかな違いが見られることが分かった。この質量分布の差は、z>3 から  $z\sim2$  にかけての銀河の進化、もしくは異なる輝線を指標として用いていることによる選択効果をみていると解釈できる。この差が銀河の進化によるものであると仮定した場合、初期の質量が  $10^9-10^{11}M_\odot$  の星形成銀河は、z=3.2 から z=2.2 までのおよそ 1 Gyr の間に最終的な質量の 90-50 %を獲得することが分かった。このことから、この時代に星形成銀河は大きく成長し、z>3 の時代から銀河形成最盛期へ向けて銀河の星形成活動性は加速度的に活発になっていったのではないかということが示唆される。

#### 1 Introduction

現在からおよそ80-100億年前にあたる赤方偏移 1-3 の時代は、宇宙の大局的な星形成活動および活 動銀河核 (AGN) の活動性が非常に高い時代であり、 銀河形成・進化の最盛期と呼ばれている。近年この 最盛期の銀河についての研究は活発に行われており、 遠方の銀河は近傍銀河とはまた異なった物理的特性 を持つことが明らかになってきた。例えば、星形成銀 河の星質量と星形成率の間にはタイトな正の相関が 見られることがよく知られているが(星形成主系列; e.g., Daddi et al. 2007)、この星形成主系列は赤方偏 移とともに大きく進化することが分かっている (e.g., Whitaker et al. 2012; Koyama et al. 2013)。少なく とも $z\sim2.5$ までは、ある同じ星質量の銀河を見た時 に遠方のものほど活発な星形成を行っている。また、 z>3 の宇宙における銀河の星形成活動性は主に紫 外線でセレクトされた銀河サンプルを用いて調べら れているが、星形成活動がどう進化していくかとい うことに関しては、サンプルのセレクション方法の 問題などもあり未だ結論には至っていない。

我々の研究グループでは、すばる望遠鏡に搭載された可視光および近赤外線撮像装置 (Suprime-Cam

と MOIRCS) と多数の挟帯域フィルター (NB) を用いて、星形成銀河から放射される  $\mathrm{H}\alpha$ , [OII], [OIII] といった輝線を捉え、最盛期前後の幅広い時代かつ様々な環境におかれた星形成銀河のサンプルを構築してきた (Mahalo-Subaru; Kodama et al. 2013)。

本研究では、このプロジェクトを通して得られた 観測データを用いて、最盛期の時代からさらに10億 年ほど遡った z>3 の時代の銀河形成を探ることを 目的としている。z>3 は、銀河の活動性が最盛期に 向けて活発になっていった時代にあたると考えられ、 何故  $z\sim 2$  で最盛期を迎えることになったのか、そこ に関わる物理過程を調べる上で非常に重要な時代で あると言える。星形成銀河の良い指標としては ${
m H}lpha$ 輝 線がよく用いられるが、地上観測においては $H\alpha$ 輝線 では $z \sim 2.5$ 程度までしか到達することができない。 そこで本研究では、より波長の短い[OIII] 輝線を指 標としてz > 3 の星形成銀河のサンプルを構築する。 近年の大規模な近赤外線分光観測により、遠方の星形 成銀河は近傍の星形成銀河と比較して強い [OIII] 輝線 を示すことが分かってきている (Steidel et al. 2014)。 また、[OIII] 輝線は紫外線と比較してダストによる 減光の影響を受けにくい。こう言った点から、[OIII] 輝線は遠方の星形成銀河の良い指標になることが期待される。

# 2 Observation and sample selection

#### 2.1 NB imaging survey at SXDF

Tadaki et al. (2013) では、先述のプロジェクトの一環として一般フィールドである Subaru/XMM-Newton Deep survey Field(SXDF) という領域において、すばる望遠鏡の MOIRCS とふたつの NB フィルターを用いた撮像観測を行った。挟帯域フィルター NB209(中心波長:2.09  $\mu$ m,FWHM:0.025  $\mu$ m),NB2315(中心波長:2.315  $\mu$ m,FWHM:0.027  $\mu$ m)はそれぞれ、z=2.19,2.53 の  $H\alpha$  輝線と z=3.17,3.62 の [OIII] 輝線を捉えることができる。

#### 2.2 Selection of z > 3 [OIII] emitters

z>3の[OIII]輝線銀河のサンプルを構築するために、Tadaki et al. (2013) において用いられたものと同様の方法を用いた。まず、広帯域フィルター (BB) の等級と NB の等級とを比較して BB に対して NB の明るさが卓越している天体を輝線銀河として選ぶ。そのように選ばれた天体には異なる赤方偏移にある異なる輝線銀河が含まれているが、ふたつの BB のカラーを用いることでそれらを分離することができる。この様なセレクションを通して、SXDF において 34 個の z=3.2, 3.6 の[OIII] 輝線銀河のサンプルを得た。(z=2.2, 2.5 の  $H\alpha$  輝線銀河は 107 個;Tadaki et al. 2013)

銀河の電離領域から放射される [OIII] 輝線のエネルギー源としては、星形成領域に存在する大質量星から放射される紫外光だけではなく、AGN の活動も考えられる。今回の [OIII] 輝線銀河のサンプルの中で明らかに AGN であると言える天体の有無を確認するため、XMM-Newton による X 線観測で受かっている天体の有無を調べた。 X 線で受かっている天体はなく、明るい unobscured AGN は含まれていないと言える。また、赤外線宇宙望遠鏡 Spitzer の MIPS/ $24~\mu m$  に

よる検出の有無を調べたところ、3天体が MIPS で検出されていた。これらの天体は AGN の周囲のダストからの放射のために中間赤外線で明るくなっている可能性が高い。しかしながら、これらが本当に AGN であるかどうかを明らかにするためには分光観測を行う必要があり、以下の解析では MIPS で受かった3天体についてもサンプルから除外しない。

#### 3 Results

SXDF で構築された z=3.2, 3.6 の [OIII] 輝線銀河に対して星質量と星形成率を求め、ふたつの物理量の間に成り立つ関係を調べていく。銀河の星質量は、SXDF における多波長測光データを用いて SED fitting を行うことで求めた (Galametz et al. 2013)。また、星形成率は紫外線光度を焼き直すことで求め (Madau et al. 1998)、ダスト減光の補正は SED fitting から得られた減光量  $A_{\rm V}$  を用いて行った。図 2 は、z=3.2, 3.6 の [OIII] 輝線銀河のサンプルに対して求めた星質量—星形成率関係を表している。

同じフィールドで構築された  $z\sim 2$  の  ${\rm H}\alpha$  輝線銀河 (Tadaki et al. 2013) と比較すると、それぞれのサンプルについて行った直線のフィットの結果は誤差の範囲で一致し、星形成主系列の位置は二つのサンプルでほぼ変わらないことが分かった。一方で、星質量や星形成率の分布を比較すると、z>3 の [OIII] 輝線銀河は明らかにより低質量・低星形成率側に分布していることが分かる。この二つの銀河サンプルに見られる質量分布の差は、単純に考えると二通りの解釈ができる。ひとつは、z=3.2, 3.6 から z=2.2, 2.5 にかけての星形成銀河の進化を反映しているというもの、もうひとつは [OIII] 輝線と  ${\rm H}\alpha$  輝線という異なる輝線を指標として用いていることによる選択バイアスである。

#### 4 Discussion

異なる時代の二つの銀河サンプル間の星質量の分布の差を銀河の進化によるものだと仮定した場合に、z=3.2(3.6) から z=2.2(2.5) にかけての約 1 Gyr の間に銀河の星質量がどの様に進化するかを調べる。

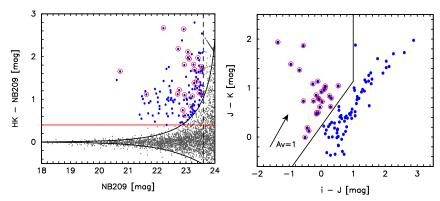


図 1: NB209 で観測された天体から z=3.2 の [OIII] 輝線銀河を選び出す際に用いた二つの図。青い点が輝線銀河として選ばれた天体、そのうち赤の丸で囲まれているのが z=3.2 の [OIII] 輝線銀河だと思われる天体を表している。(左) 輝線銀河を選択するための色等級図。(右) 異なる赤方偏移の異なる輝線銀河を分離するための二色図。銀河のスペクトルに見られる Balmer/4000 Å break を捉えることで、異なる赤方偏移の銀河を分けることができる。

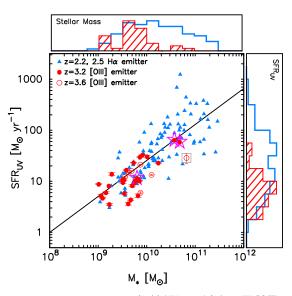


図 2: z=3.2, 3.6 の [OIII] 輝線銀河に対する星質量-星形成率関係。青の三角は z=2.2, 2.5 の  $H\alpha$  輝線銀河を表している。直線は  $H\alpha$  輝線銀河に対するベストフィット。上と右のヒストグラムはそれぞれ、任意のスケールで表した星質量と星形成率の個数密度分布。

z=3.2(3.6) と z=2.2(2.5) における星形成主系列の位置はほぼ同じであるという結果から、この  $1~{
m Gyr}$  の間星形成銀河は同じ星形成主系列に沿って進化すると考えることができる。星形成主系列は  ${
m H}lpha$  輝線銀

河に対するベストフィットの式

SFR = 129 
$$(M_*/10^{11} M_{\odot})^{0.705}$$
 (1)

で表す。銀河同士の相互作用やアウトフローなどの 無い非常に単純な場合を考えると、銀河の星質量の 時間変化は

$$dM_*/dt = (1 - R) \times SFR$$
$$= (1 - R) \times 129(M_*/10^{11} M_{\odot})^{0.705}(2)$$

と表される。ここで R は星形成で作られた星のうち

星間空間へと戻っていく質量の割合であり、本研究で仮定している Salpeter IMF の場合は 0.3 となる。式 (2) から、z=3.2 から z=2.2 にかけて星形成銀河がどのようにしてその質量を獲得していったのかを求め、その結果を図 3 に示した。z=3.2 における銀河の星質量は  $10^9$ ,  $10^{10}$ ,  $10^{11}M_{\odot}$  を考えた。星質量の増加率は初期の星質量によって異なるが、 $10^9M_{\odot}$  の銀河で最終的な (z=2.2 における) 星質量の 90%の質量を、 $10^{11}M_{\odot}$  の銀河でもおよそ 50%の質量を 1 Gyr の間に獲得するという結果になった。この星質量の増加率は非常に高く、星形成銀河が 1 Gyr という短い期間に非常に活発に星形成を行っていたと考えられる。このことから、z>3 から銀河形成最盛期の  $z\sim2$  の時代に向けて銀河の星形成活動性は加速度的に進んでいったということが示唆される。

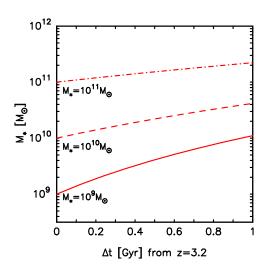


図 3: z=3.2 から z=2.2 へかけての星質量の時間変化。 z=3.2( $\Delta t$ =0) において 3 つの星質量を仮定した。

## 5 Conclusion and on-going work

本研究では、銀河形成最盛期前夜の z>3 にお ける銀河の活動性を探るために、すばる望遠鏡の MOIRCS と NB フィルターを用いた撮像観測を行 い、z=3.2, 3.6 の [OIII] 輝線銀河のサンプルを構築、 それらの星質量、星形成率といった物理量を求めた。 星質量と星形成率との間に成り立つ関係 (星形成主系 列) を z=2.2, 2.5 の  $H\alpha$  輝線銀河と比較すると、異な る時代の二つの銀河サンプル間で星形成主系列の位 置は変わらないという結果が得られた。その一方で、 星質量・星形成率の分布には明らかな違いが見られ る。この分布の差が、銀河の進化によるものだと考 え、z=3.2(3.6) から z=2.2(2.5) にかけて星形成銀河 が同じ主系列に沿って進化すると仮定すると、この 1 Gyr の間に銀河の星質量は大きく増加することが 分かった。この時、星形成率も時間とともに増加し ていくことになり、銀河の星形成活動性はz>3か ら最盛期にかけて加速度的に活発になっていくとい うことが示唆された。このことから、z>3 の時代 は銀河形成・進化を理解する上で非常に重要な時代 であると言える。

一方で、星質量の分布の差が [OIII] 輝線銀河と  $H\alpha$  輝線銀河の間のバイアスを反映しているという可能性ももちろん考えられる。この選択バイアスに関しては現在検討中で、ペアの NB フィルターを用いたサーベイを通して得られた同じ赤方偏移 (z=2.23)の [OIII] 輝線銀河と  $H\alpha$  輝線銀河のサンプルを用いている (HiZELS; Sobral et al. 2013, 2014)。初期成果として同じ時代の [OIII] 輝線銀河と  $H\alpha$  輝線銀河との間で星質量や星形成率の分布に大きな偏りは無いという結果が得られている。

### 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。

本研究で用いた多波長測光カタログは、the Universidad Complutense de Madrid (UCM) と the University of California Observatories at Santa Cruz (UCO/Lick,UCSC) による the Rainbow Cosmological Surveys Database から得られたものを用いています。

#### Reference

Daddi, E., et al. 2007, ApJ, 670, 156
Galametz, A., et al. 2013, ApJS, 206,10
Kodama, T., et al. 2013, in IAU Symp. 295, 74
Koyama, Y., et al. 2013, MNRAS, 434, 423
Madau, P., et al. 1998, ApJ, 498, 106
Tadaki, K.-i., et al. 2013, ApJ, 778, 114
Sobral, D., et al. 2013, MNRAS, 428, 1128
Sobral, D., et al. 2014, MNRAS, 437, 3516
Steidel, C. C., et al. 2014, ApJ, 795, 165
Suzuki, T. L., et al. 2015, ApJ, 806, 208
Whitaker, K. E., et al. 2012, ApJL, 754, L29