

$z \sim 2$ の Ly α 輝線銀河 (LAEs) のダスト放射の性質とその応用

日下部 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

LAEs のダスト吸収量は、星成分のみからの SED fitting から小さいとされていたが、正確な見積もりをするにはダスト放射の直接観測が必要である。しかし、 $z \gtrsim 1$ では、非常に明るいごく少数の LAEs をのぞき、ダスト放射の個別検出はおろか、スタッキング解析でもゆるい上限値しか得られていなかった。本研究では、 $z \sim 2$ の LAEs の Herschel/PACS と Spitzer/MIPS の深いスタッキング解析を行うことで、初めて有意な赤外光度の上限値を得る事に成功した。LAEs の平均的な赤外光度の 2σ 上限値は $L_{IR} \sim 7 \times 10^9 L_{sun}$ と大変暗く、星形成率の比は $SFR_{IR}/SFR_{UV} \lesssim 1$ に相当する。UV 光度との比 $IRX=L_{IR}/L_{UV} \lesssim 1.5$ と UV slope β から、本サンプルに local starburst (Calzetti et al. (2000)) の吸収曲線を適用すると、赤外光度や星形成率の過大評価になることがわかった。より適切な SMC curve (Pettini et al. (1998)) を用いて SED fitting を行うと、Calzetti's law の時と比べて $E(B-V)$ が小さくなり、星形成率は 6 割程度に小さく、星質量は 1.3 倍、年齢は 2 倍程度大きくなる。この結果から星形成のモードは "normal" となる。また、Ly α 光子の脱出率は $0.23 \lesssim f_{esc}^{Ly\alpha} \lesssim 0.43$ と求まる。 $f_{esc}^{Ly\alpha}$ や IRX は同時代の全銀河の平均的な値 (Burgarella et al. (2013), Hayes et al. (2011)) とかけ離れており、むしろ $z \sim 5, 6$ の値に近いことが明らかとなった。

1 Introduction

銀河の物理量を正確に求めるには、星からの放射とダストの放射の両成分が必要である。Reddy et al. (2012) では、個別にダスト放射を検出することが難しい "moderate luminosity" に該当する $z \sim 2$ の紫外連続光銀河サンプルについて、stacking 解析を用いる事でダスト放射を検出することに成功し、その吸収特性が明らかになった。銀河の階層的進化考えると、観測しやすい明るくて大質量な銀河だけでなく、暗くて低質量な銀河を調べることは大事である。しかし、遠方では、この "moderate luminosity" の銀河までしか、星とダストの両成分を合わせての解析はされていない。LAEs は主要な遠方銀河の一種で、典型的に暗く低質量とされる (Gawiser et al. (2006))。Wardlow et al. (2014) は、 $z > 2$ の LAEs に対して FIR の stacking 解析を行ったが、非検出であった。得られた赤外光度の制限はゆるく、ダストの性質に示唆を与えることはできていない。

そこで本研究では、 $z \sim 2$ の LAEs の大きなサンプル数と深いデータを活かして紫外から遠赤外の 18band の多波長データについて stacking 解析をおこなう。ダスト放射は非検出であったが、初めて非

常に強い制限値を得られた。

紫外光に対する赤外光度の比と UV slope の傾きの関係 (IRX- β) からダスト吸収の特性、適切な吸収曲線が判断できる。適切な吸収曲線を用いて、ダスト吸収量を制限することでより正確な SED fitting 結果を得られる。この正確な fitting 結果を用いて SFR と M_* から $z \sim 2$ の典型的な LAE 銀河の星形成のモードについて議論する。また、赤外光度を求めることで、Ly α の脱出率 ($f_{esc}^{Ly\alpha}$) も推定でき、得られた $f_{esc}^{Ly\alpha}$ や IRX を cosmic average と比較する。さらに LAEs は faint ($S_{1.2mm} \sim 0.1 mJy$) SMG の候補天体 (Ono et al. (2014)) になりえるかを議論する。

2 Methods

2.1 Data

本研究では GOODS-S の MIPS, PACS の深い data のある領域内に、U, B, NB387 の 3band を用いて (Nakajima et al. (2012))、 $z \sim 2.18$ の LAEs を 213 個得た。用いた多波長データは、VLT/VIMOS U, Subaru/Suprime-Cam NB387, Blanco/

MOSAIC II B, V, R, i', z, VLT/ISAAC J, H, K_s, Spitzer/IRAC 1-4ch, MIPS 24 μ m, Herschel/PACS 70, 100, 160 μ m の計 18band である。今回注目する LAEs のダスト放射は MIPS, PACS において、1 天体も受からなかった。全てのサンプルを使って (図 1)、SN を 10 倍以上にあげるも MIPS と PACS では非検出であった。赤外光度の上限値は次章の方法で求めた。全ての band の flux density は図 2 のようになった。

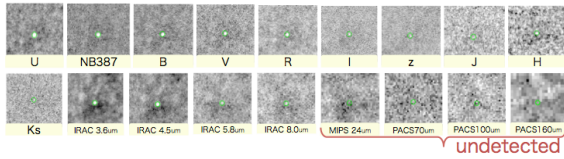


図 1: $z \sim 2$ の LAE の stacked images

2.2 Infrared luminosity

MIPS, PACS の 4band について、stacking 解析によって得られた画像の sky noise の 2σ をそれぞれの flux density の上限値とした。赤外光度の上限値を求めるために、銀河のダスト放射の SED template の fitting を行った。用いたテンプレートは、Herschel Reference Survey に基づく Ciesla et al. (2014) の低金属量銀河で、4 つの flux density の上限値と矛盾しないように fitting し (図 2)、8-1000 μ m を積分して赤外光度の 2σ 上限値とした。このテンプレートセットのうち LAE の先行研究 (Z, M_* , SFR) と矛盾しないものの中から、赤外光度上限値を過小評価するリスクが最も小さくなる低金属量銀河のものを採用した。

3 Results

3.1 Luminosity & Starformation rate

本サンプルの紫外光度は $L_{UV} = \nu L_\nu \sim 4.7 \times 10^9 L_\odot$ (1600 \AA) となり、赤外光度の 2σ 上限値は $L_{IR} \sim 7 \times 10^9 L_\odot$ となる。これは $z \sim 2$ の IR 光度関数の典型的な光度 L_{knee} (Magnelli et al. (2013)) の 320 分の 1 以下で、ALMA をもってしても簡

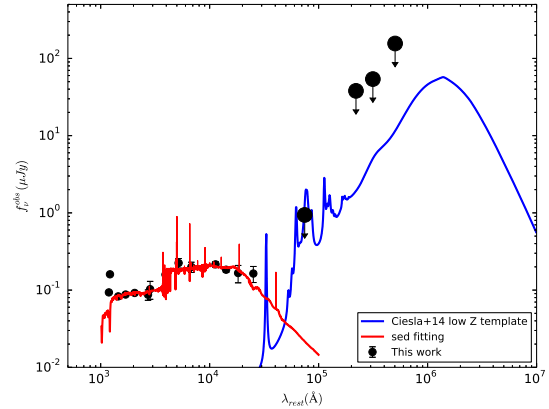


図 2: $z \sim 2$ の LAE の stacked SED。黒い点が観測データで、エラーバーは静止系 NIR までで 1σ 。非検出であった MIR, FIR は黒点が 2σ 上限値を表す。赤色の線は 3.3 節の SED fitting の結果で、青色の線は 2.2 節のダスト放射の SED の fitting 結果である。

単に到達できる深さではない。Salpeter の IMF を仮定して Kennicutt et al. (1998) から星形成率は $SFR_{UV} \sim 1.3 M_\odot/\text{yr}$, $SFR_{IR} \lesssim 1.2 M_\odot/\text{yr}$ と求めた。 $SFR_{IR}/SFR_{UV} \lesssim 3-12$ (Wardlow et al. (2014)) と比べ、本研究では $SFR_{IR}/SFR_{UV} \lesssim 1$ となり、 SFR_{IR} への制限が非常に強くなったことがわかる。 $1.3 M_\odot/\text{yr} \lesssim SFR_{total} \lesssim 2.5 M_\odot/\text{yr}$ となる。

3.2 IRX- β relation & Extinction curves

本サンプルの赤外光度と紫外光度の比は $IRX = L_{IR}/L_{UV} \lesssim 1.5$ となる。これと SED の UV slope $\beta \sim -1.7$ から $IRX-\beta$ の図を描くことができる (図 3)。図から、紫外連続光銀河は一般的に使われている近傍の local starburst (Meurer et al. (1999), Calzetti et al. (2000)) と矛盾しない (Reddy et al. (2012)) ことを示している。一方、 $z \sim 2$ の LAEs には Calzetti's law は不適切であり、 β から推定される赤外光度を 2-3 程度倍過大評価してしまうことがわかる。 $z \sim 2$ の LAEs に適切なのは、Meurer et al. (1999) の data を正確に解析し直した修正版 local starburst (Takeuchi et al. (2012)) や

表 1: SED fitting の結果。

	χ_r^2 $E(B-V)_*(A_{1600})$	f_{esc} $age(Myr)$	$M_*(10^8 M_\odot)$ $SFR(M_\odot/yr)$
Calzetti's law	0.69 0.11(1.1)	0.45 260	6.2 2.8
SMC curve	0.3 0.05(0.6)	0.5 570	7.9 1.7

SMC となる。また age が若いものに限った $z \sim 2$ の紫外連続光銀河 (Reddy et al. (2012)) もこのような傾向がある。IRX の値から $A_{1600} < 0.9mag$ となる。

3.3 SED fitting

Calzetti's law と SMC の 2 つの吸収曲線を用いて B から IRAC Ch4 まで SED fitting を行った。fitting の code は nebular emission 入り (Ono et al. (2010b)) と同様のものである。今回は赤方偏移を $z = 2.18$ 、星形成史は constant star formation に固定した。金属量は LAE の先行研究を参考にし $Z = 0.2Z_\odot$ (Nakajima et al. (2013)) とした。パラメータは f_{esc} , $E(B-V)_s$, age , SFR (規格化定数) の 4 つとなる。stellar mass は age と SFR が決まれば一意に定まる。fitting 結果は表 1 に示す。Calzetti's law の SED fitting は、3.1,3.2 節で求めた $SFR_{total} \lesssim 2.5M_\odot/yr$, $A_{1600} < 0.9mag$ を満たせない。更に、 χ_r^2 の値は Calzetti's law よりも SMC curve の方が小さくなる。

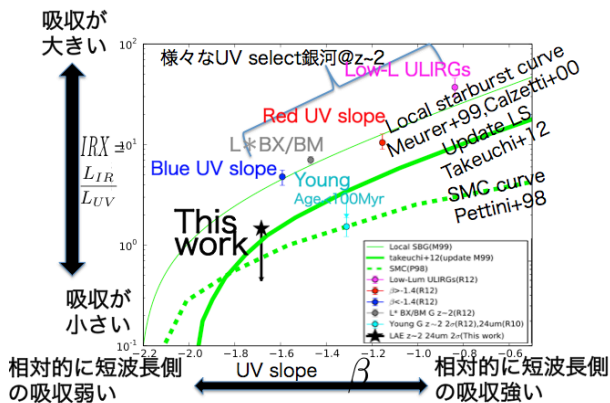


図 3: IRX- β の図。黒い点が this work、その他の色の点は様々な種類の紫外連続光銀河。ライム色の線は、細実線が一般的に用いられている local starburst, 太実線が改訂版 local starburst, 点線が SMC curve である。(参照先は本文にあり)

したがって、SED fitting の結果からも $z \sim 2$ の LAEs には、SMC の吸収曲線の方が適切であると言える。従来のように Calzetti's law を使った場合に比べ、SMC curve で fitting をすると SFR は 6-7 割に減少、 M_* は 2,3 割増加、age は二倍程度に増加する。今回は SMC curve の best fit を fitting 結果として採用する (図 2)。

4 Discussion

4.1 Starformation main sequence

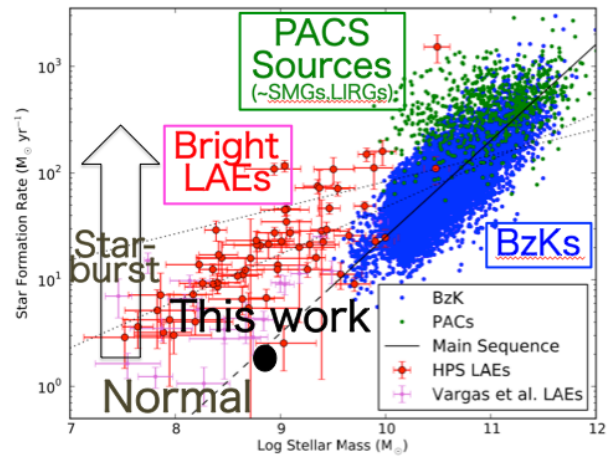


図 4: SFR と M_* の図 (Hagen et al. (2014))。黒い点が今回の結果 (典型的な LAEs)。その他の点は他のサンプル。破線上に天体があれば MS にのり、星形成のモードが normal に、上にいけば starburst になる。

$2 \lesssim z \lesssim 4$ の明るい LAEs の個別天体で SED fitting (Hagen et al. (2014)) から、明るい LAEs は star-forming Main Sequence には乗らず、SMG のような starburst の延長線上にのり、starburst 的であることが報告されている。本研究で得られた典型的な LAE は、main-sequence にのる。つまり $z \sim 2$ の明るい LAEs とは異なり、典型的な LAEs の星形成モードは、normal である。しかし、明るい LAEs も本サンプルと同様に SMC curve に従う場合、 $sSFR = \frac{SFR}{M_*}$ が Calzetti's law を用いたことで過大評価されているので、これらも実際は starburst ではない可能性もある。

4.2 Escape fraction of Lyman α

赤外光度の上限値が求まったことから、Ly α の脱出率 $f_{esc}^{Ly\alpha}$ を求めることができる。Ly α 輝線から求まる星形成率は $SFR_{Ly\alpha} \sim 0.57M_{\odot}/yr$ (Kennicutt et al. (1998)) となる。赤外の星形成率の上限値を用いる事で、 $f_{esc}^{Ly\alpha}$ に上限値と下限値の制限をつけることができる。

$$0.23 \sim \frac{SFR_{Ly\alpha}}{SFR_{UV} + SFR_{IR}^{上限値}} \lesssim f_{esc}^{Ly\alpha} \lesssim \frac{SFR_{Ly\alpha}}{SFR_{UV}} \sim 0.43 \quad (1)$$

これを Ly α 脱出率の赤方偏移進化に plot したのが図 5 である。図内の赤と黒の plot のみ IR と UV から LAEs の $f_{esc}^{Ly\alpha}$ を求めている、cosmic average との差が明らかなのは本研究のみである。図 3,5 からわかるように、 $z \sim 2$ の LAEs の IRX や $f_{esc}^{Ly\alpha}$ は同時代の cosmic average の銀河と異なっていて、むしろ $z \sim 5, 6$ の銀河に近い (Burgarella et al. (2013), Hayes et al. (2011))。

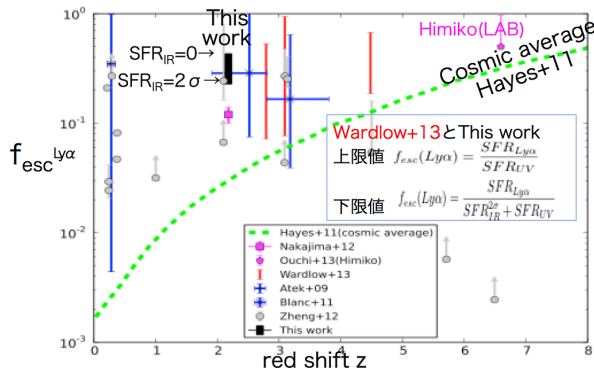


図 5: Ly α 脱出率の赤方偏移進化。ライム色の線は cosmic average な銀河を表す。黒の棒が今回の上限値と下限値の範囲を表す。その他の点は図内の注釈の通り。

4.3 ALMA's faint SMG

$z \sim 2$ の LAEs のダスト放射の SED(2.2 節) から推定される、波長 1.2mm の flux density は 0.01mJy 以下である。また、現在の ALMA による 1 番深い銀河計数は 0.1mJy まで得られていて、そのような faint SMG の候補天体は galaxy bias から LAE, LBG, sBzK

とされている (Ono et al. (2014))。 $z \sim 2$ の紫外連続光銀河は 0.3mJy 程度と推定され (Reddy et al. (2012)) するため候補になり得るが、あらゆる LAEs がどのような赤方偏移でも本研究のような低い L_{IR} をもつとすると、faint SMG の銀河計数に LAEs はほとんど含まれていないと考えられる。

5 Conclusions

本研究では、大きなサンプルと深いデータを合わせる事で、初めて遠方の LAEs のダスト放射に有意な制限をつけることができた。星形成率の比は $SFR_{IR}/SFR_{UV} \lesssim 1$ に相当し、先行研究よりも数倍強い制限となった。対応する光度比は $IRX = L_{IR}/L_{UV} \lesssim 1.5$ ($A_{1500} \lesssim 0.9$) である。 $IRX-\beta$ の図と SED fitting の結果から、 $z \sim 2$ の LAE には Calzetti's law の吸収曲線を用いると赤外光度の過大評価となり不適切で、SMC curveの方がより適切であることが明らかとなった。 SMC curveを用いると、Calzetti's law を用いた時と比べ、SED fitting の結果が M_* が 3 割程度増加し、age が二倍程度に大きくなる。この結果から $z \sim 2$ の典型的な LAE は、star formation main sequence にのらず星形成のモードが normal であることも示せた。また、ダスト放射の SED fitting の結果から、LAEs が ALMA で見つかる faint SMG の候補天体から除外できることも言えた。更に、 IRX や $f_{esc}^{Ly\alpha}$ から、 $z \sim 2$ の LAE は $z \sim 5, 6$ の cosmic average の銀河に近いこともわかった。

Reference

- Burgarella, D., et al. 2013 ,A&A, 554, A70
- Calzetti, D., et al. 2000, ApJ, 533, 682
- Ciesla, L., et al. 2014, ApJ, A&A, 565, 128
- Gawiser, E., et al. 2006, ApJ, 642, 13
- Hagen, A., et al. 2014, ApJ, 786, 59
- Hayes, M., et al. 2011, ApJ, 730, 8
- Kennicutt, R., et al. 1998, Annu. Rev., 36, 189
- Magnelli, B., et al. 2013, A&A, 553, A132
- Meurer, G., et al. 1999, ApJ, 521, 64
- Nakajima, K., et al. 2012, ApJ, 745, 12
- Nakajima, K., et al. 2013, ApJ, 769, 3
- Ono, Y., et al. 2014, submitted to ApJ
- Ono, Y., et al. 2010b, ApJ, 724, 1525
- Pettini, M., et al. 1998, ApJ, 508, 539
- Reddy, N., et al. 2012, ApJ, 754, 25
- Takeuchi, T., et al. 2012, ApJ, 755, 144
- Wardlow, J., et al. 2014, ApJ, 787, 9