

# Stellar Populations of Lyman Alpha Emitters at $z \sim 6 - 7$

(Ono et al. 2010a)

東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 D2  
小野宜昭

## 概要

我々は *Suraru/XMM-Newton* Deep Survey (SXDS) で見つけた  $z = 5.7$  と  $6.6$  にある Lyman Alpha Emitters (LAEs) の平均的な spectral energy distributions (SEDs) を求めた。それらの UV 連続光は  $\beta \sim -3$  と、UV で同程度の明るさの  $z$ -dropouts と同じくらい極めて青いが、一方で IRAC  $3.6\mu\text{m}$  では明るく UV-to-optical の色は赤いことがわかった。我々はさらに、モデル SEDs との比較から LAEs の stellar populations を調べたところ、星質量が軽く ( $\sim 10^{7.5} - 10^8 M_\odot$ )、極めて若く ( $\sim 10^6 - 10^{6.5}$  yrs)、ダスト吸収をほとんど受けておらず、さらに電離領域起源の nebular emission が大いに寄与していることがわかった。 $z \sim 6 - 7$  LAEs は、より低赤方偏移にある銀河の building blocks となったと推測される。また、観測された SEDs を再現するのに必要な nebular emission の最小の寄与の見積もりから、銀河からの電離光子離脱率の上限値を求めたところ、 $z = 5.7$  は  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} \lesssim 0.6$ 、 $z = 6.6$  は  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} \lesssim 0.9$  だった。

## 1 イントロ

LAEs は  $z \sim 2 - 7$  の高赤方偏移で数多く見つかった銀河種族である。一般に、 $\text{Ly}\alpha$  放射が強い一方で、UV や可視の連続光で暗い。 $z \sim 3 - 5$  で見つかった LAEs の stellar population analysis から、星質量が軽く ( $M_{\text{star}} \sim 10^8 - 10^9 M_\odot$ )、年齢が若く ( $\sim 1 - \text{several} \times 10^2$  yrs)、星形成率は  $\sim 1 - 100 M_\odot \text{yr}^{-1}$  で、ダスト吸収の影響をあまり受けていない銀河だということがわかってきている (e.g., Gawiser et al. 2007; Pirzkal et al. 2007; Lai et al. 2008; Ono et al. 2010b) これらの性質から、LAEs はより大きな銀河の部品となった可能性がある。LAEs の詳細な研究は、銀河形成の早い段階を理解する上で重要だ。しかし、さらに遠方 ( $z > 5$ ) にある典型的な LAEs の stellar populations はこれまで調べられていない。また、最近指摘されている (e.g., Zackrisson et al. 2008; Schaerer & de Barros 2009, 2010) 電離領域起源の nebular emission を考慮した研究はこれまでにない。そこで本研究では、広視野多波長深撮像サーベイのデータを組み合わせることで  $z \sim 6 - 7$  LAEs の平均的な SEDs を初めて求め、nebular emission を適切に考慮した SED モデルとの比較からそれらの stellar populations に初めて制限を付ける。

## 2 データ

- 観測領域 : *Subaru/XMM-Newton* Deep Field (面積  $\sim 0.65 \text{ deg}^2$ )
- 多波長深撮像データ
  - 可視 : *Subaru/XMM-Newton* Deep Survey (Furusawa et al. 2008)
    - \* Instrument: *Subaru/Suprime-Cam*
    - \* Filter: *B, V, R, i', z', NB816, NB921*
  - 近赤外 : UKIDSS Ultra Deep Survey (UDS) DR5 (Lawrence et al. 2007)
    - \* Instrument: UKIRT/WFCAM
    - \* Filter: *J, H, K*
  - 中間赤外 : Spitzer Legacy Survey of UDS (SpUDS; PI: J.Dunlop)
    - \* Instrument: Spitzer/IRAC
    - \* Filter:  $3.6\mu\text{m}, 4.5\mu\text{m}, 5.8\mu\text{m}, 8.0\mu\text{m}$
- LAE samples:  $\text{Ly}\alpha$  が UV 連続光より十分に明るい LAEs 候補のうち、PSF の広がった IRAC で周囲の天体の影響を受けていないもののみ解析。 $z = 5.7$  LAEs : 165 個、 $z = 6.6$  LAEs : 91 個。

### 3 SED Model

- Stellar Population Synthesis Model: Bruzual & Charlot (2003)
  - Star Formation History: constant star formation.
  - IMF: Salpeter IMF (Salpeter 1955).
  - $Z[Z_{\odot}] = 0.2$ .
  - Age:  $\sim 0.1$  Myr – 当時の宇宙年齢.
  - Dust Extinction: Calzetti law (Calzetti et al. 2000).
- Nebular Emission
  - $T_e = 10^4$  K,  $n_e = 10^2$  cm $^{-3}$ , case B,  $Z[Z_{\odot}] = 0.2$ .
    - \* H recombination lines: Storey & Hummer (1995).
    - \* emission lines from non-H: Anders & Fritze-v. Alvensleben (2003).
    - \* nebular continuum: Ferland (1980); Aller (1984); Krueger et al. (1995).

### 4 結果

以下の2通りの銀河 SED モデルでそれぞれフィッティング。結果は図1。

- stellar+nebular:  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 0$  (nebular emission の寄与最大)。
- pure stellar:  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 1$  (nebular emission を無視)。

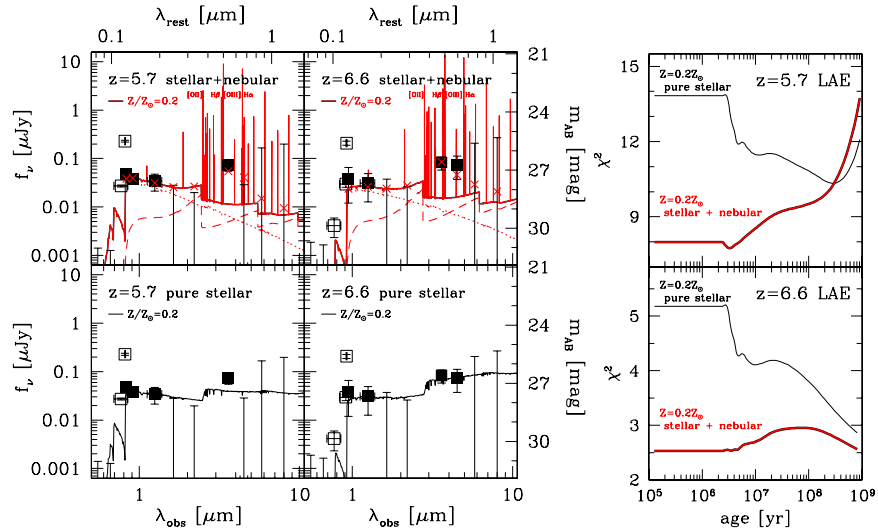


図1 **Left:** best-fit SEDs (curves) and observed magnitudes (filled squares: used for SED fitting, open squares: not used) for the  $z = 5.7$  LAE (left panels) and the  $z = 6.6$  LAE (right panels). The top panels are for ‘stellar + nebular’ ( $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 0$ ) models. The red solid curves indicate the best-fit SEDs that are the sum of a stellar SED (red dotted curve) and a nebular SED (red dashed curve). The crosses indicate synthesized flux densities in individual bandpasses. The bottom panels are for ‘pure stellar’ ( $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 1$ ) models. **Middle:**  $\chi^2$  of the best-fit model as a function of age (top:  $z = 5.7$  LAE, bottom:  $z = 6.6$  LAE). The red curves are for  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 0$  and the black curves for  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} = 1$ .

- $z = 5.7$  LAE

nebular emission を考慮した方が、観測された SED を良く説明できることがわかった。→ 星質量が軽く極めて若くダスト吸収をほとんど受けていない銀河。

- $z = 6.6$  LAE

nebular emission を考慮しても、 $\chi^2$  はそれほど改善しなかった。(重くて年老いたモデルでも、軽くて若いモデルでもよく合う。) ただ、 $z \leq 5.7$  の結果から、典型的な LAEs は若くて低質量の銀河とわかっており、 $z = 6.6$  で急に性質が変わるのは不自然。→ 星質量が軽く極めて若くダスト吸収をほとんど受けていない銀河か。

次に、 $f_{\text{esc}}^{\text{ion}}$  を 0.1 刻みで振って SED fit。これにより、観測された SED を再現するのに必要な nebular emission の寄与の最小値を見積もる。結果は以下の通り (図 2):

- $z = 5.7$  LAE:  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} \lesssim 0.6$ ,
- $z = 6.6$  LAE:  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}} \lesssim 0.9$  (ただし、 $\text{age} < 2 \times 10^7$  yrs)。

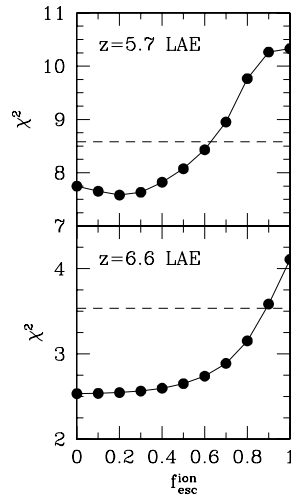


図 2  $\chi^2$  versus the Lyman-continuum escape fraction  $f_{\text{esc}}^{\text{ion}}$  for the  $z = 5.7$  LAE (top panel) and the  $z = 6.6$  LAE (bottom panel). The dashed lines correspond to  $\chi_{\text{min}}^2 + 1$ .

## 5 結論

LAEs は星質量が軽く ( $\sim 10^{7.5} - 10^8 M_{\odot}$ )、極めて若く ( $\sim 10^6 - 10^{6.5}$  yrs)、ダスト吸収をほとんど受けていない銀河種族。これまでに行なわれていたより近傍 ( $z = 3 - 5$ ) LAEs の最適解も、nebular emission を適切に考慮することで、より星質量が小さく若い解に変わる可能性がある。

## 参考文献

- Aller, L. H., ed. 1984, *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 112, Physics of thermal gaseous nebulae
- Anders, P., & Fritze-v. Alvensleben, U. 2003, *A&A*, 401, 1063
- Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., Kinney, A. L., Koornneef, J., & Storchi-Bergmann, T. 2000, *ApJ*, 533, 682
- Ferland, G. J. 1980, *PASP*, 92, 596
- Furusawa, H., et al. 2008, *ApJS*, 176, 1
- Gawiser, E., et al. 2007, *ApJ*, 671, 278
- Krueger, H., Fritze-v. Alvensleben, U., & Loose, H. 1995, *A&A*, 303, 41

Lai, K., et al. 2008, *ApJ*, 674, 70  
Lawrence, A., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 1599  
Ono, Y., Ouchi, M., Shimasaku, K., Dunlop, J., Farrah, D., McLure, R., & Okamura, S. 2010a, *ArXiv e-prints*  
(arXiv:1004.0963)  
Ono, Y., et al. 2010b, *MNRAS*, 402, 1580  
Pirzkal, N., Malhotra, S., Rhoads, J. E., & Xu, C. 2007, *ApJ*, 667, 49  
Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, 121, 161  
Schaerer, D., & de Barros, S. 2009, *A&A*, 502, 423  
—. 2010, *A&A*, 515, A73+  
Storey, P. J., & Hummer, D. G. 1995, *MNRAS*, 272, 41  
Zackrisson, E., Bergvall, N., & Leitert, E. 2008, *ApJ*, 676, L9