

A Ly α EMITTER WITH AN EXTREMELY
LARGE REST-FRAME EQUIVALENT WIDTH
OF $\sim 900\text{\AA}$ AT $z=6.5$
: A CANDIDATE OF POPULATION III-DOMINATED
GALAXY

山田研 M1 山中 郷史

1. Introduction

What is PopIII ?

- **Big-bang**による元素合成 → Liより重い元素は最初生成されない
- 現在 → 宇宙は**90種類**近い元素から成る

metal rich にした初代星があるはず！ = PopIII

理論的予測については様々な論文

- **top-heavy IMF & metal-free** の極端な条件から生まれる
→ シミュレーションでは可能。“半信半疑”？
- **zero-metal** なので **CNO-cycle** では燃焼しない
→ 効率の悪い **proton-proton burning** で反応する

1. Introduction

What is PopIII ?

- Lyman continuum が全光度の大半を占める
- ionizing spectrum を持つ
 - ➡ $\text{Ly}\alpha$ や He^+ recombination line が卓越する
(He^+ recombination line = $\text{HeII } \lambda 1640$)

理論的には大きく発展し様々な予測がされている

観測された例は未だにない

1. Introduction

Where is PopIII ?

➤ Scannapieco et al. (2003)

PopIII の一部は Lyman alpha emitter(LAE) として見つかっているのでは？

→ high-z LAEs は非常に暗いため連続光を検出できず、EWを求められない

➤ Jimenez&Haiman 2006 ; Shapley et al. (2003)

➤ Jones et al. (2012)

それぞれ $z \sim 3$ 、 $z \sim 4$ の Lyman Break Galaxies(LBG) のスペクトル
コンポジットから弱い HeII を検出

→非常に弱いため stellar wind 起源のものと区別できない

➤ Nagao et al. (2005,2008) ; Cai et al. (2011)

Ly α と HeII の直接検出に試みるもうまくいかず

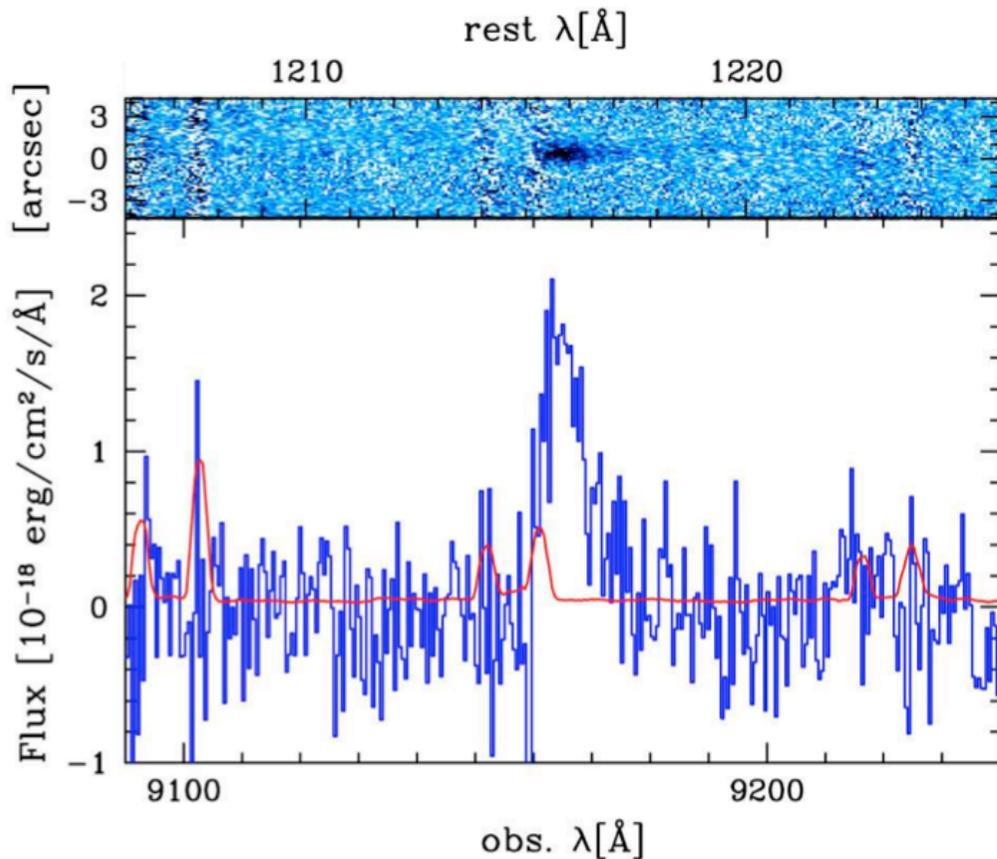
1. Introduction

This work

- **SDF**の測光観測から非常に強い**Ly α** を放射している**LAE**を見つけた
 - 候補天体は**SDF-LEW-1**
- 可視光のスペクトル観測から **z_{spec}** を決定
- **NIR** のスペクトル観測から**HeII**輝線の検出に試みる
 - この際**AGN**の可能性を取り除くために**CIV λ 1640** の輝線も調べる
- **Ly α** 、**HeII**、**CIV** の**EW**を見積もる
- モデルから**PopIII**の可能性を議論

2.The candidate & Ly α EW

2.1 Optical spectroscopy

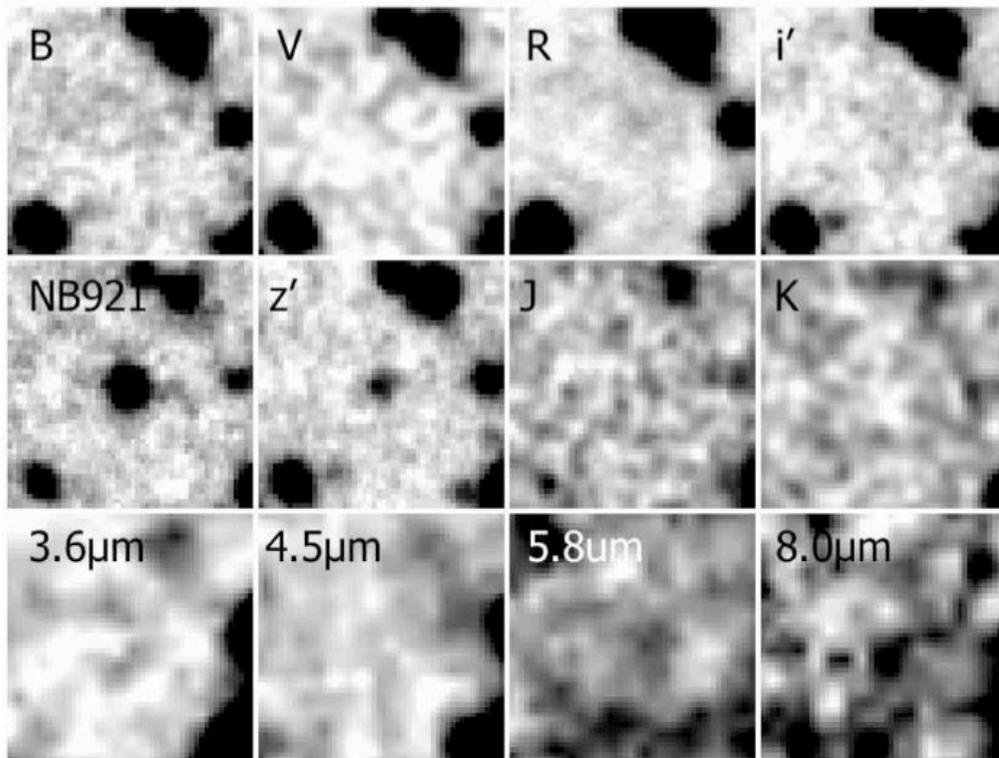


- 候補天体は**SDF-LEW-1**
- **Subaru/FOCAS & Keck/DEIMOS** により観測
 - Subaruの観測は天候に恵まれなかったためKeckで観測を再び行った
- 他の輝線から**Ly α** であることはほぼ間違いない

$$L(\text{Ly}\alpha) = 1.07 \pm 0.30 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$$

2.The candidate & Ly α EW

2.2 EW measurement



- NB921 & z'-band から SED fit

→ Ly α & UV continuum flux
を計算してEWを求める

$$f^{phot}(Ly\alpha) = 2.34 \pm 0.06 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

$$f_{cont}^{phot}(0.92\mu m) = 7.12 \pm 3.41 \times 10^{-21} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$$



$$EW_0(Ly\alpha) = 436_{-149}^{+422} \text{ \AA}$$

2.The candidate & Ly α EW

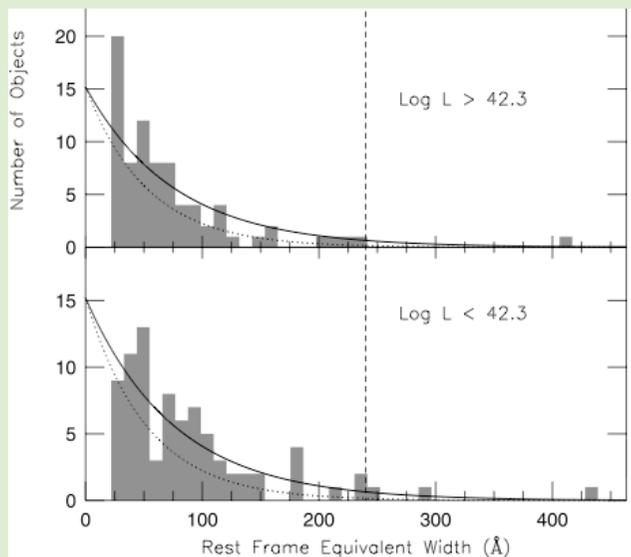
2.2 EW measurement

このEWはめっさ大きい！

➤ 今回の観測

2番目に大きなLAEはEW=152Å

➤ Gronwall et al. (2007)



• NB921 & z'-band から SED fit

→ Ly α & UV continuum flux
を計算してEWを求める

$$f^{phot}(\text{Ly}\alpha) = 2.34 \pm 0.06 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

$$f_{cont}^{phot}(0.92\mu\text{m}) = 7.12 \pm 3.41 \times 10^{-21} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$$



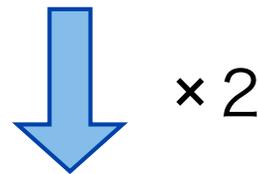
$$EW_0(\text{Ly}\alpha) = 436_{-149}^{+422} \text{ \AA}$$

2.The candidate & Ly α EW

2.3 Estimate of intrinsic EW

- IGM/ISM による吸収を補正する
- IGM/ISM の条件で吸収量は大きく変化
- ここでは **simple $\times 2$ correction** を使用

$$EW_0 (\text{Ly}\alpha) = 436^{+422}_{-149} \text{ \AA}$$



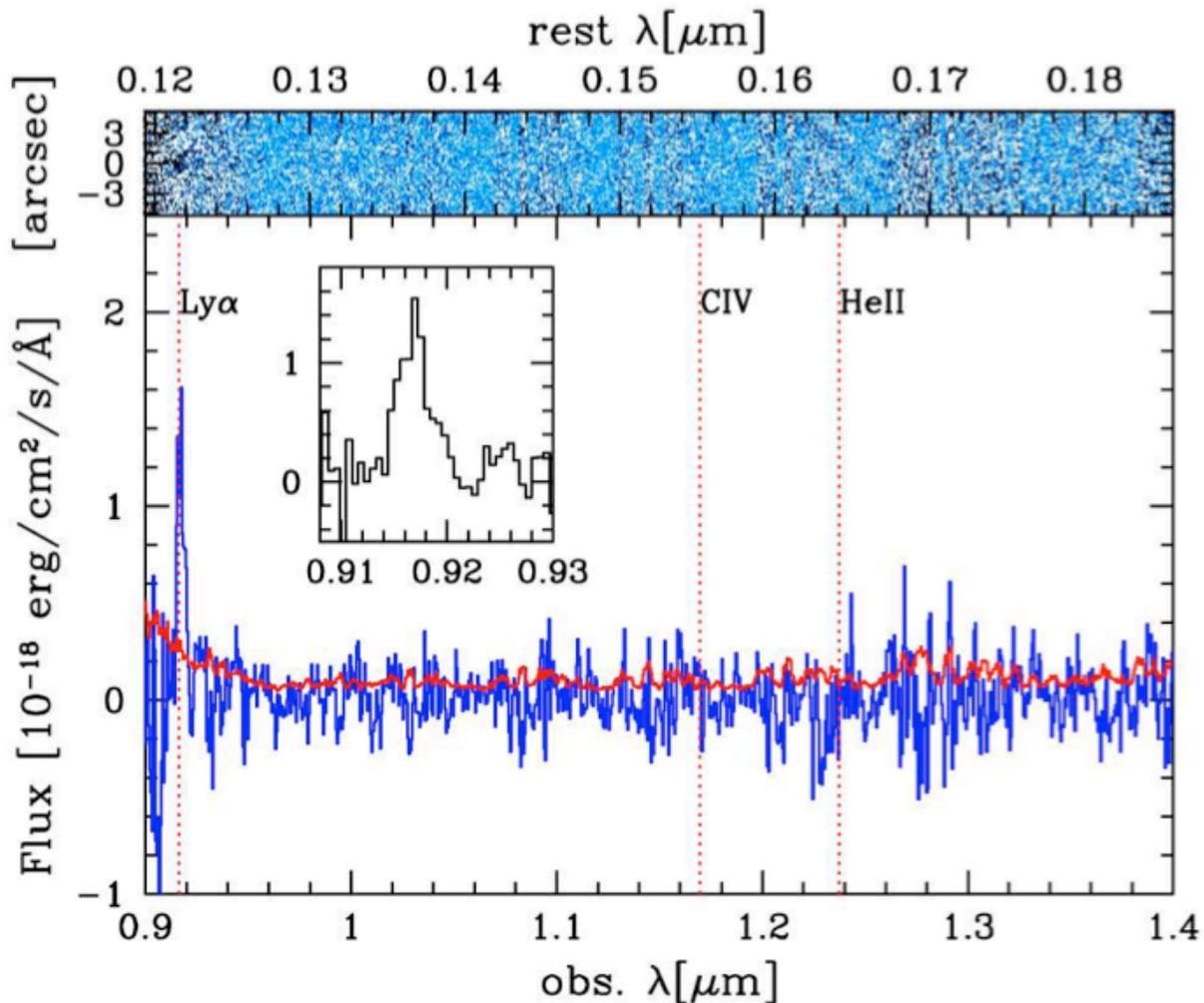
$$EW_0^{\text{int}} (\text{Ly}\alpha) = 872^{+844}_{-298} \text{ \AA}$$

3. NIR Spectroscopy

- **MOIRCS MOS mode** で観測
 - ガイド星をマスク上に数個用意するため、暗い天体に有効
- **zJ500 grism with a 0.8 arcsec slit (R~450)**
- **spectra covered 0.9–1.8 μm**
- **Total integration time ~ 44.8ks**
- **2 positions with a dithering of 5".0**
- **Seeing size ~ 1 arcsec**

4. Results

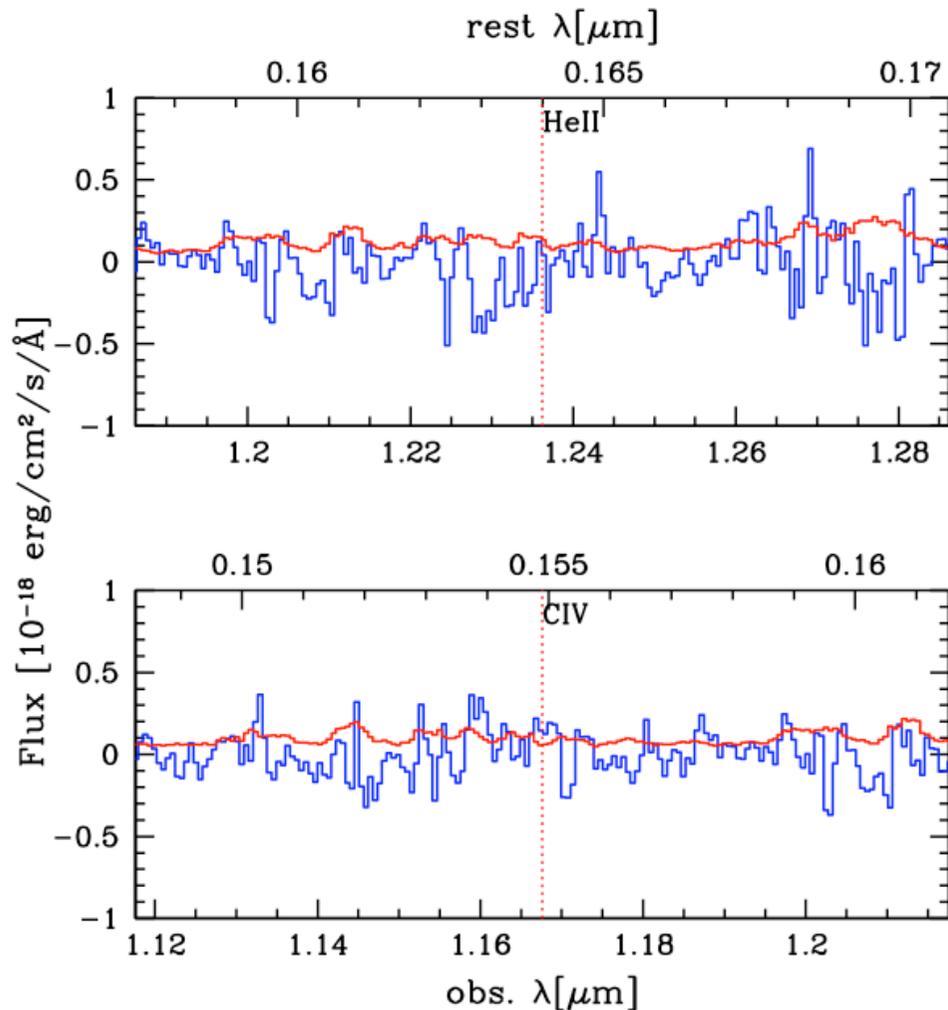
○ Spectrum



- 最終的なスペクトルが左記
- Ly α が見えているがfluxの値は photometryより大きい
→ Ly α についてはphotを使用
- HeII見えへん...
- CIV見えないよ! (´・ω・)b

4. Results

○ HeII & C_{IV}



HeII

- redshiftから計算した波長に現れず
- 3σ でupper-limit fluxを決定
- z'-bandのfluxと $f_\lambda \propto \lambda^{-\beta}$ から外挿的に連続光を見積もる

$$EW_0^{\text{int}}(\text{HeII}) \leq 11.5_{-3.98}^{+12.9} \text{ \AA}$$

C_{IV}

- 見えない!
- HeIIと同様にEWを見積もる

$$EW_0^{\text{int}}(\text{CIV}) \leq 8.55_{-2.82}^{+8.36} \text{ \AA}$$

5. Discussion

5.1 Pop III

☆ 得られた結果から **Stellar Population** への制限を考える

$$EW_0^{\text{int}}(\text{Ly}\alpha) = 872_{-298}^{+844} \text{ \AA}$$

$$EW_0^{\text{int}}(\text{HeII}) \leq 11.5_{-3.98}^{+12.9} \text{ \AA}$$



- IMF
- metallicity
- star formation history
- age

Raiter+ 2010にある6つのモデルを用いる

Salpeter IMF

Scalo IMF

log-normal IMF

Model-S : $1 < M < 100M_{\odot}$

Model-Sc : $50 < M < 500M_{\odot}$

Model-TA : $1 < M < 500M_{\odot}$

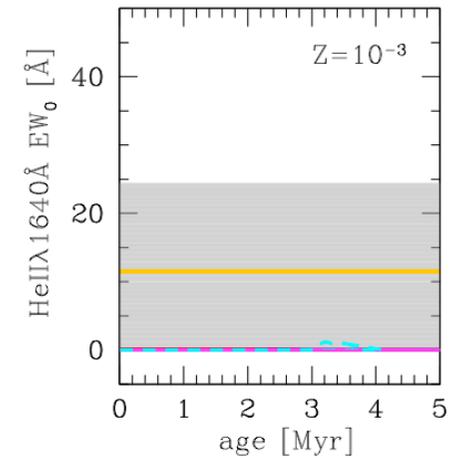
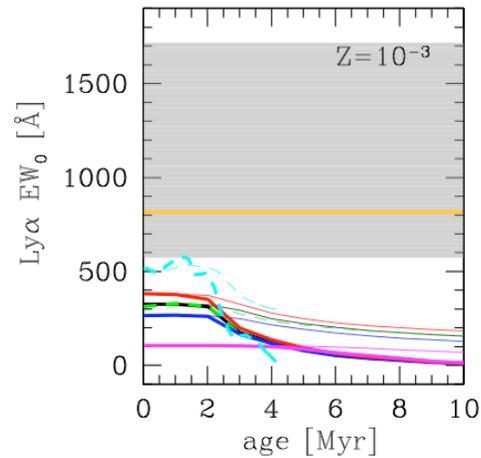
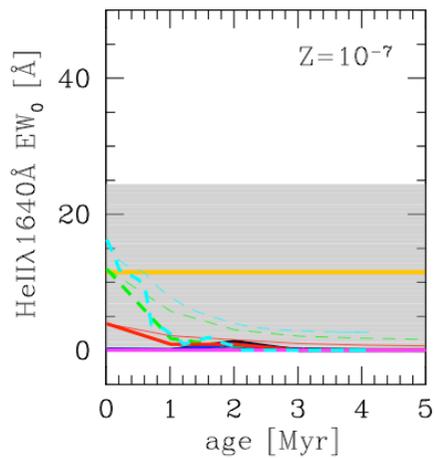
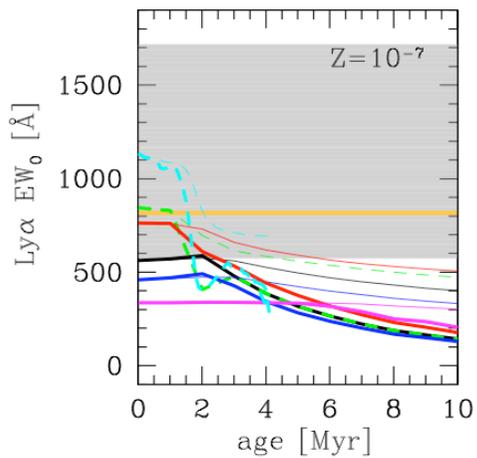
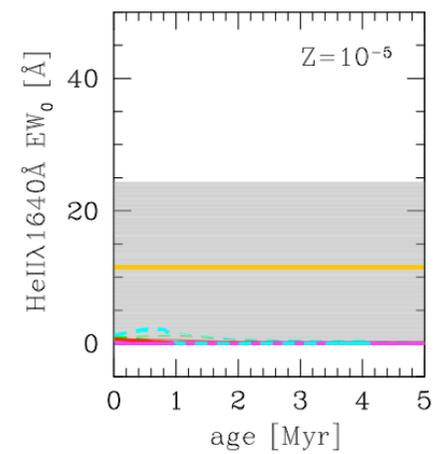
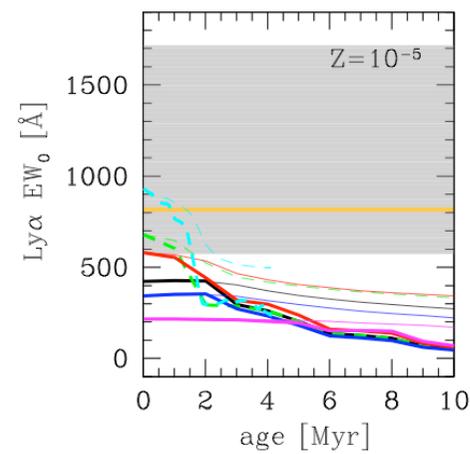
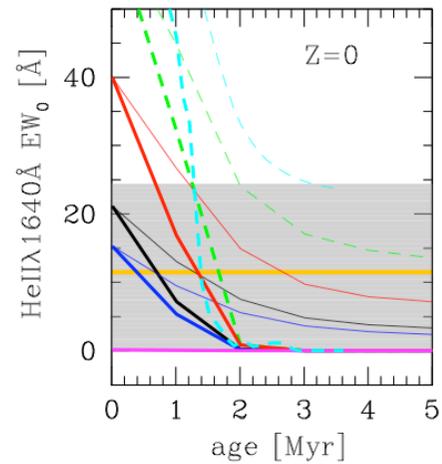
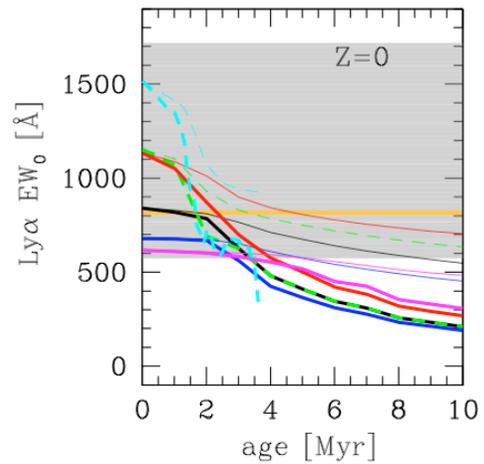
Model-B : $1 < M < 500M_{\odot}$

Model-C : $50 < M < 500M_{\odot}$

Model-TB : $50 < M < 500M_{\odot}$

5. Discussion

5.1 Pop III



5. Discussion

5.1 Pop III

- $\text{Ly}\alpha$ と HeII の両方を満たす age の範囲が右記となる
- $Z > 10^{-3}$ では観測結果の EW を満たすモデルはない
- burst を仮定したモデルの方が範囲が狭くなる

TABLE 2
CONSTRAINTS ON RAITER ET AL.(2010)'S IMF MODELS

Z		0	10^{-7}	10^{-5}	10^{-3}
Model-S	burst	< 3.5Myr	< 2Myr	-	-
	CSFR	< 9Myr	< 2Myr	-	-
Model-B	burst	1.5 – 3.5Myr	< 1.5Myr	< 1Myr	-
	CSFR	2Myr<	< 4.5Myr	< 1.5Myr	-
Model-C	burst	1.5 – 3.5Myr	< 1.5Myr	< 1.5Myr	-
	CSFR	-	< 4Myr	< 2Myr	-
Model-Sc	burst	< 3Myr	-	-	-
	CSFR	< 5Myr	-	-	-
Model-TA	burst	1 – 4Myr	< 2.5Myr	-	-
	CSFR	1.5Myr<	< 5.5Myr	-	-
Model-TB	burst	< 3Myr	-	-	-
	CSFR	< 5Myr	-	-	-

5. Discussion

5.2 Clumpy interstellar medium

Large Ly α EW₀ → clumpy & dusty interstellar mediumが原因？

- Ly α photon

cold HI gas clumpの端で散乱→dustに吸収されことなく銀河中を通過

- Continuum photon

cold HI gas clump中のdustにより吸収される



相対的に Ly α が強まって観測される

観測→支持
stellar population
の解析
Ly α , H α , H β の
輝線比の結果

5. Discussion

5.2 Clumpy interstellar medium

定量的に扱う

様々な理論モデルが考えられている

➤ Kobayashi et al. (2010)

- ・ Ly α LF, UV LF, EW distribution of LAEs の観測結果をこの論文中のモデルで説明するためには、clumpy dust ditribution が必要
- ・ $\Gamma = EW^{\text{obs}}/EW^{\text{int}}$ と定義
 - $\Gamma_{\text{best-fit,max}} = 1.53$ with a normal stellar population
 - $EW_0 \sim 900\text{\AA}$ を説明できない

5. Discussion

5.2 Clumpy interstellar medium

定量的に扱う

- ・ Galactic-scale outflow が存在すると仮定
 - Ly α の optical depth が大きく減少
 - $\Gamma_{\max} \sim 30$ となり、 $EW_0 \sim 900\text{\AA}$ を達成できる
 - 代わりに $z \sim 6.5$ のLAEsのEW distributionを説明できない

➤ Dayal et al. (2010)

- ・ モデルを観測結果と一致させるためにはclumpy ISMが必要
 - clumpy ISM が一方的に間違っているとは言い難い

今回の天体は clumpy ISM を仮定しても
normal stellar population で説明することは難しい

5. Discussion

5.3 AGN

Large Ly α EW₀ → AGN activity が原因？

- C_{IV} Line

- 明確な AGN signature

- 典型的な Ly α /C_{IV} 輝線比の値と比較すると大きく離れている

Ly α /C_{IV} = 6.7 @2<z<3 (Humphrey et al. 2008)

Ly α /C_{IV} = 8.6 @0<z<3 (McCarthy et al. 1993)

Ly α /C_{IV} ~ 4 for narrow-line AGN (Schaerer 2003)

Ly α /C_{IV} ~ 4.76 for local Syfert (Ferland & Osterbrock 1986)

Ly α /C_{IV} ≥ 82.7 (this work)

5. Discussion

5.3 AGN

Large Ly α EW₀ → AGN activity が原因？

- N_V Line

- high-ionization metal line = AGN の活動性を示している
- スペクトル中には見つからず

- Broad Ly α emission

- Hall et al. 2004 では強い metal-line を伴わないAGNが見つかっている
- 代わりに少し広がったLy α 輝線を示し、EW=34Åとなっている。

- time variability

- kashikawa et al. 2004 でのphotometry と等級を比較したが違いは見られず

5. Discussion

5.3 AGN

Large Ly α EW₀ → AGN activity が原因？

- N_V Line

SDF-LEW-1 は

AGN によって photoionize された天体ではない

- Hall et al. 2004 では強い metal-line を伴わない AGN が見つかっている
- 代わりに少し広がった Ly α 輝線を示し、EW=34Å となっている。

- time variability

- kashikawa et al. 2004 での photometry と等級を比較したが違いは見られず

5. Discussion

5.4 Ly α blob

Large Ly α EW₀ → Ly α blob の空間的広がりが原因？

- NB image

- 天体のFWHM = 1."04

- Ly α blob を示す証拠にはならない

- Ouchi et al. (2009)

- surface brightness が 26.8 mag arcsec⁻² となる半径で判断

- Matsuda et al. (2004)

- surface brightness が 28.0 mag arcsec⁻² となる半径で判断

これら半径より十分小さい = Ly α blob とは言い難い

5. Discussion

5.3 Fluorescently illuminated

Large Ly α EW₀ → Fluorescently illuminated Ly α emissionが原因？

- Fluorescently ?

➤ Cantalupo et al. (2012)

- $z=2.4$ にある hyperluminous quasar からの強い放射に照らされて quasarの近傍でLy α で光っている天体を見つけた
- サンプルの内、いくつかのLAEsは Ly α EW > 240Å
 - 銀河内のSFに関係なくLy α が強められる
- 天体内部の速度場によりLy α 輝線は(理想的には) double peak を示す

5. Discussion

5.3 AGN

Large Ly α EW₀ → Fluorescently illuminated Ly α emissionが原因？

- SDF-LEW-1 の場合は？

- この天体の周りに統計的に大きなEWをもったLAEが密集していない
- Ly α 輝線もシングルピーク
- 最も近いLAEはLy α のfluxがSDF-LEW-1より小さい@z'-drop
- 2番目に近いLAEはLy α のfluxがSDF-LEW-1の2倍程度@z'-drop
- i'-drop 天体も近くに3つ存在するが、暗い

Fluorescently illuminated の可能性も考えにくい

6. Summary

- Ly α のEWが非常に大きいLAEを見つけた
- NIRの追観測からAGNのfeatureは見られない
- PopIIIの明確な証拠となるHeIIの輝線も検出できず
必ず現れる輝線ではないので、upper-limitとして利用
- EW(Ly α)とEW(HeII)の値からモデルフィット
→Ly α を説明するいくつかのプロセスを考慮したが
PopI or IIのモデルで説明するのは無理がある
- PopIII-dominated な銀河の有力な候補と考えられる