

Ly α Emitters とは何か？ 階層的構造形成における 理論モデルの構築

京大理 宇宙物理学教室 D2
小林 正和 (学振特別研究員 DC2)

戸谷 友則 (京大理)
長島 雅裕 (長崎大)

Outline

1. Introduction

Ly α Emitters (LAEs) の観測的特徴、
再電離と LAEs、LAEs の先行研究

2. Mitaka model for LAE population

LAE モデルの詳細を紹介

3. Numerical Results

LAEs 観測データとの比較

4. Conclusion

5. Future works

Outline

1. Introduction

Ly α Emitters (LAEs) の観測的特徴、
再電離と LAEs、LAEs の先行研究

2. Mitaka model for LAE population

LAE モデルの詳細を紹介

3. Numerical Results

LAEs 観測データとの比較

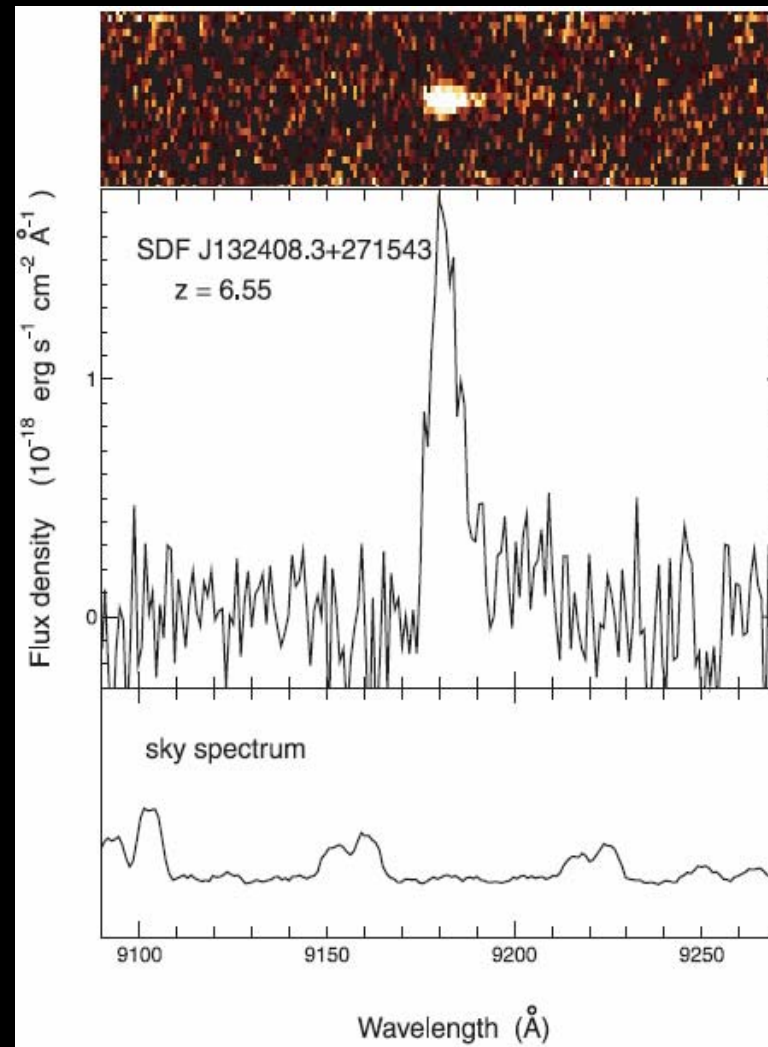
4. Conclusion

5. Future works

LAEs@high-z の観測的特徴

- ◆ narrow-band imaging で同定される redshift した Ly α 輝線を放つ天体
- ◆ Lyman Break Galaxies (LBGs) より暗い continuum (\sim undetected)
- ◆ LBGs より小さい angular size (\sim point source)
- ◆ high number density ($\sim 10^{-3}$ Mpc $^{-3}$ for $L_{\text{Ly}\alpha} > 10^{42}$ erg/s)

最初の burst を体験中の
非常に若い銀河？



LAEs から探る宇宙の再電離

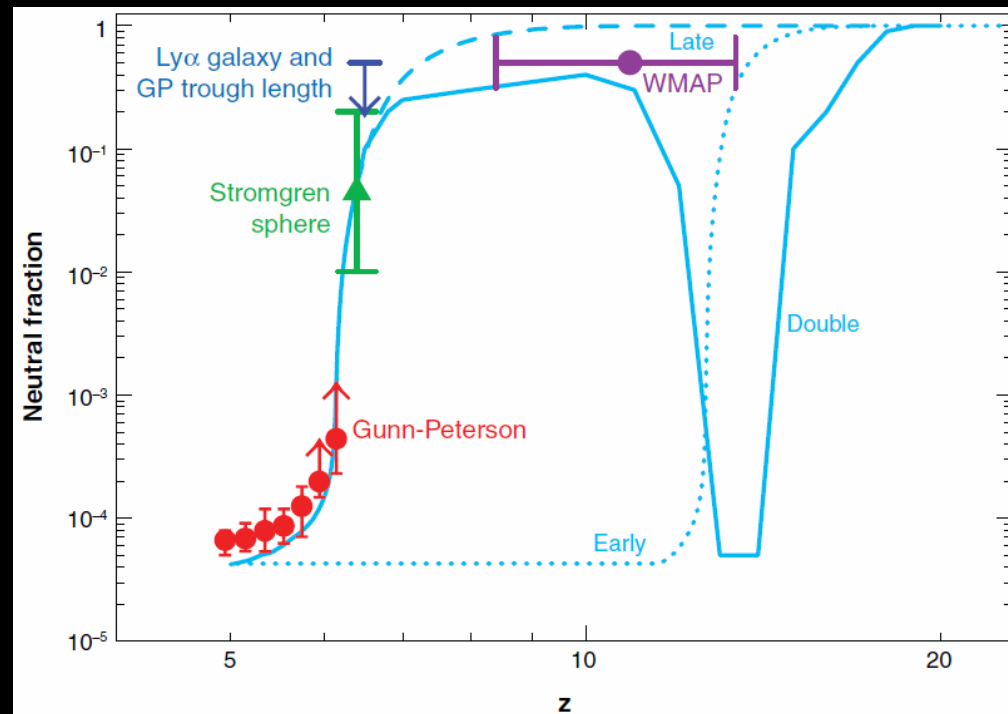
◆ Gunn-Peterson (GP) test に代わる有効な方法

- GP test はそもそも GP optical depth が非常に大きいいため、再電離の終わり ($x_{\text{HI}} < 10^{-4}$) に感度がある

$$\tau_{\text{GP}}(z) = 4.9 \times 10^5 \left(\frac{\Omega_m h^2}{0.13} \right)^{-1/2} \left(\frac{\Omega_b h^2}{0.02} \right) \left(\frac{1+z}{7} \right)^{3/2} \left(\frac{n_{\text{HI}}}{n_{\text{H}}} \right)$$

- LAEs の Ly α emission が IGM の HI による吸収を受けるのは $x_{\text{HI}} > 0.1$

LAE の光度関数 (LF) が redshift evolution しないと仮定すれば、観測された LF の変化から x_{HI} の情報が引き出せる



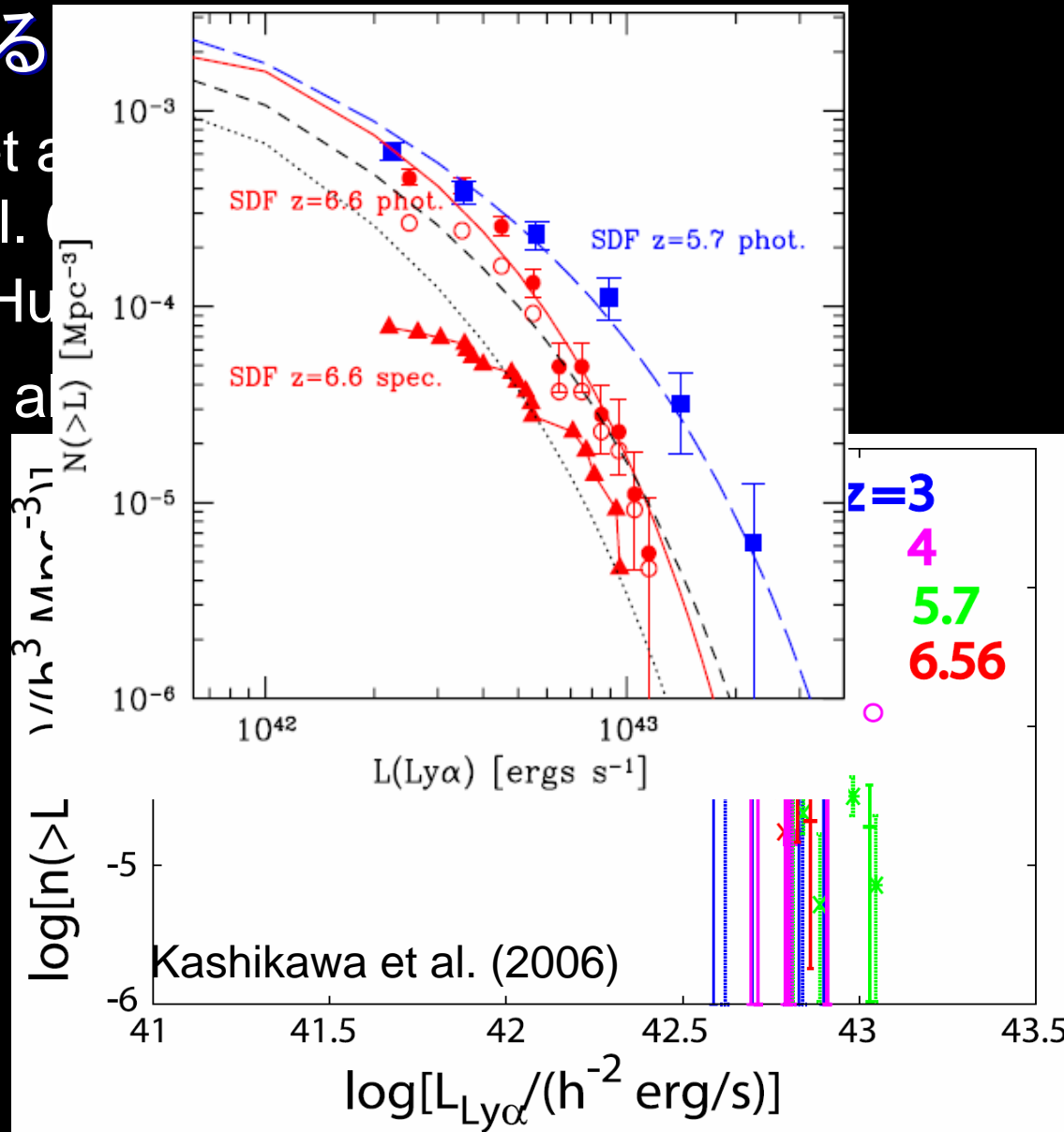
Fan et al. (2006)

observational LFs of LAEs

◆ 中・大型望遠鏡による

- SDF (e.g., Yamada et al. 2005, Kashikawa et al. 2006)
- Keck (e.g., Cowie & Hu 2001)
- VLT (e.g., Kudritzki et al. 2004)
- LALA (Rhoads et al. 2003)

この10年で LAE candidates の数は
増え、信頼のおける
光度関数(LF)が
得られつつある



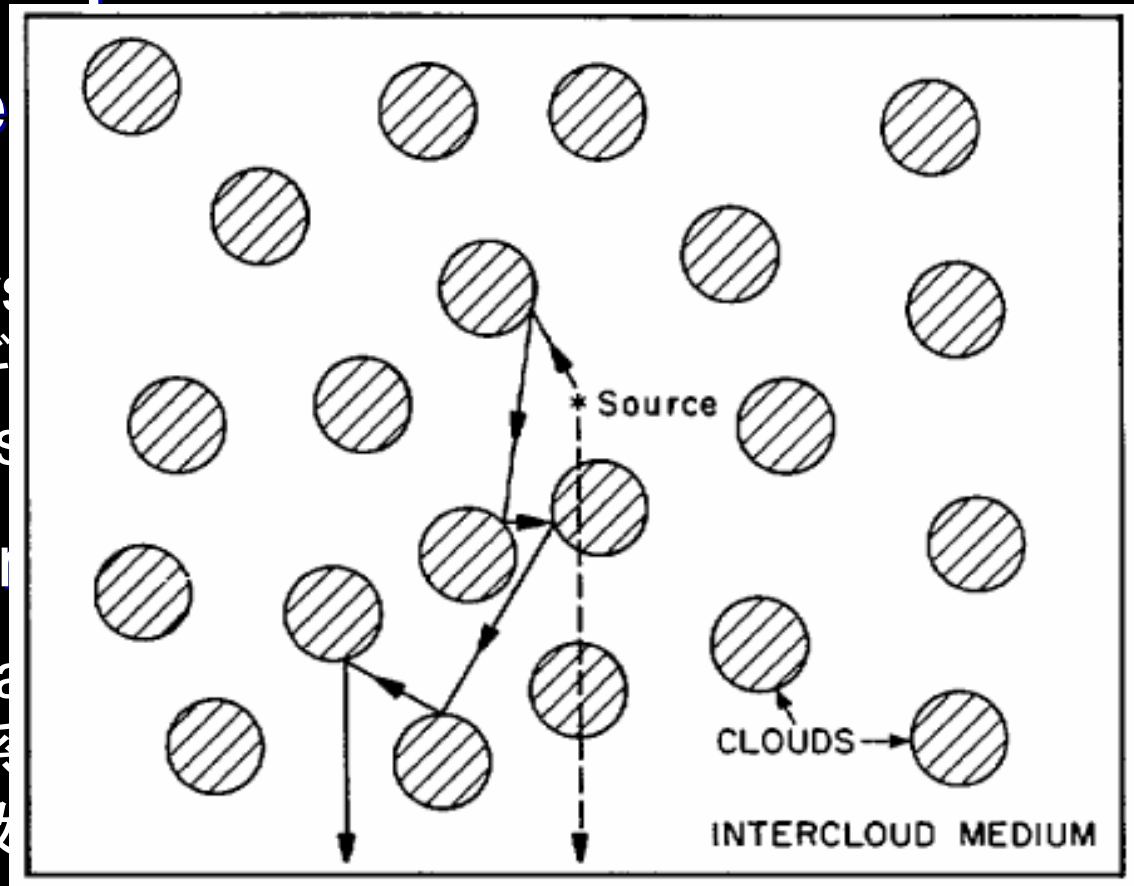
Ly α photon の性質

◆ Ly α = hydrogen
ionizing source

- ① massive stars
- ② 重力エネルギー
- ③ AGN (e.g. Os

◆ Ly α = hydrogen

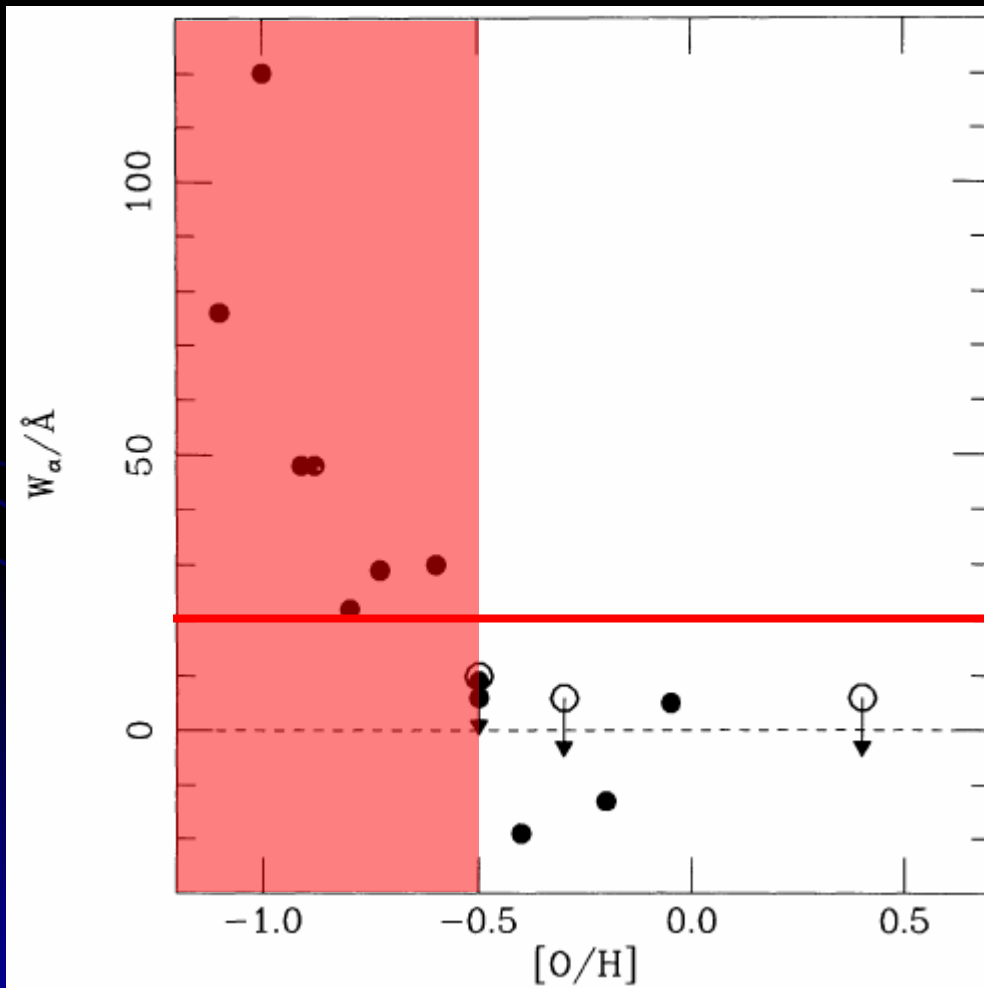
銀河の外に escape
path-length は系
→ dust による吸



ISM 中で dust が clumpy に分布していれば
Ly α EW は大きくなりうる (Neufeld 1991)

Ly α emitting galaxies @ low-z

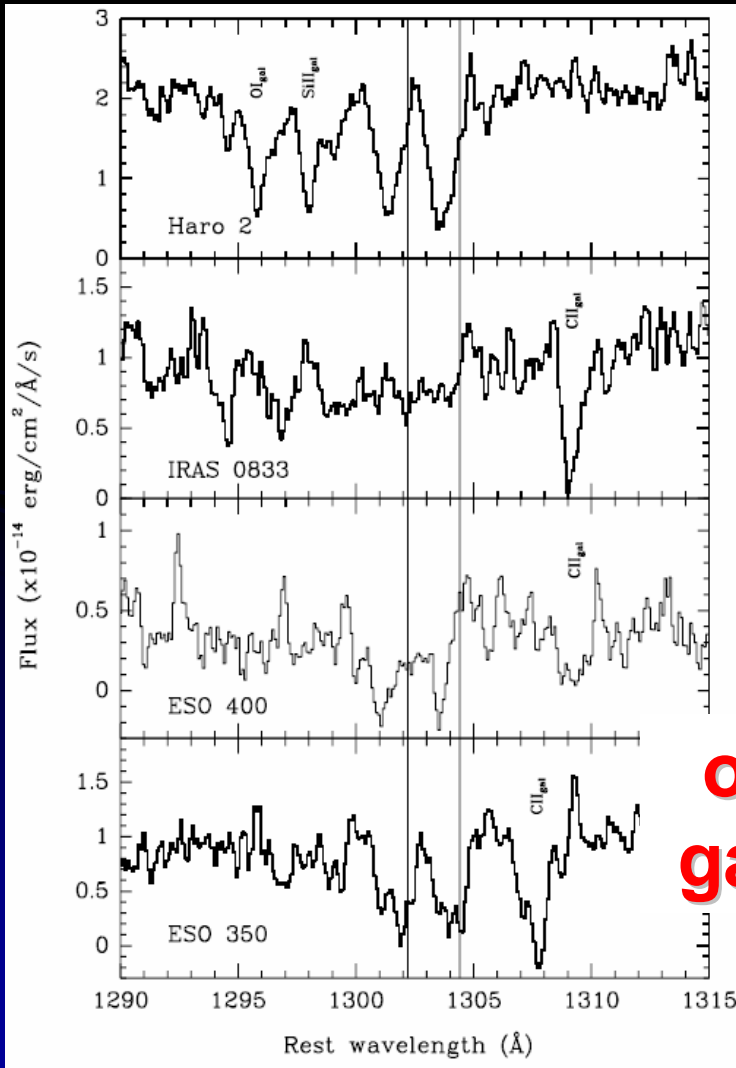
- ◆ metallicity dependence (Charlot & Fall 1993)



metallicity?

Ly α emitting galaxies@low-z

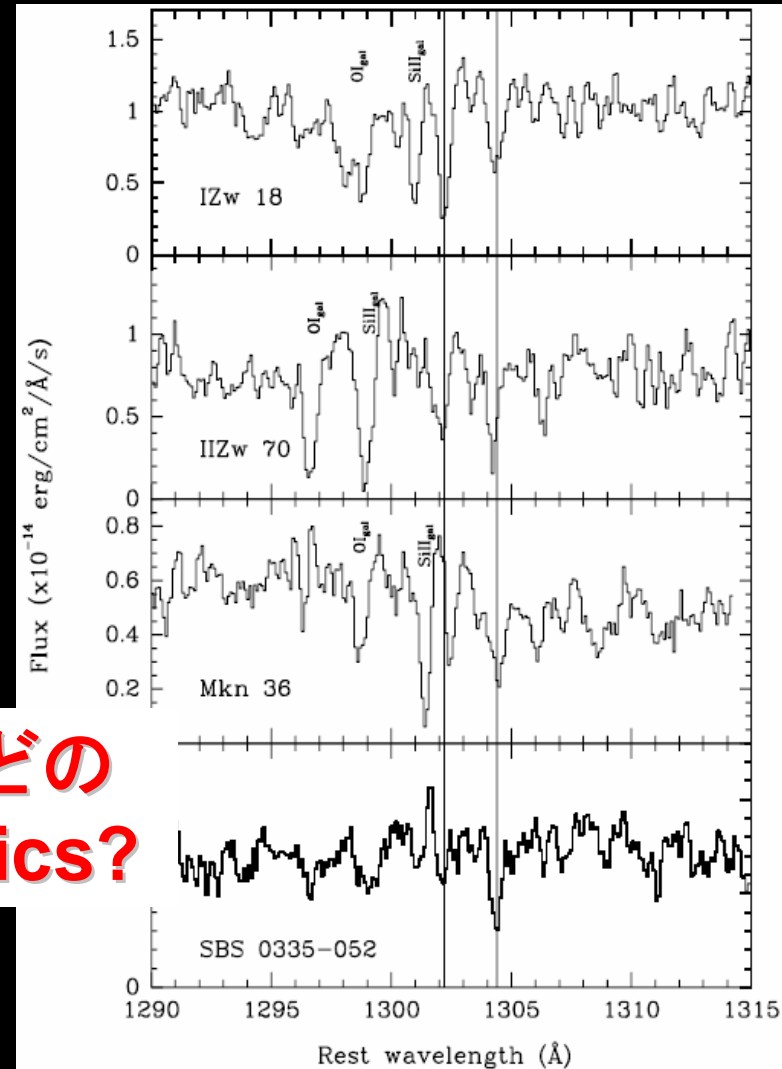
◆ inter-stellar absorption features (Kunth et al. 1998)



← Ly α
emission

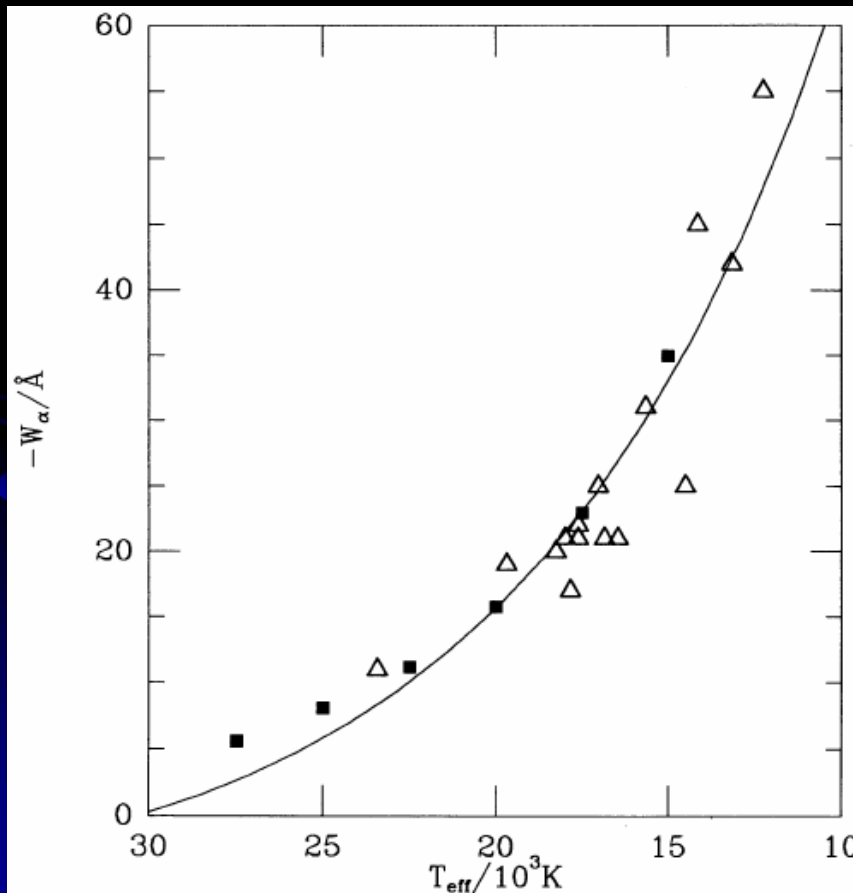
Ly α →
absorption

**outflow などの
gas-dynamics?**



Ly α emitting galaxies @ low-z

- ◆ stellar absorption (Charlot & Fall 93; Valls-Gabaud 91)

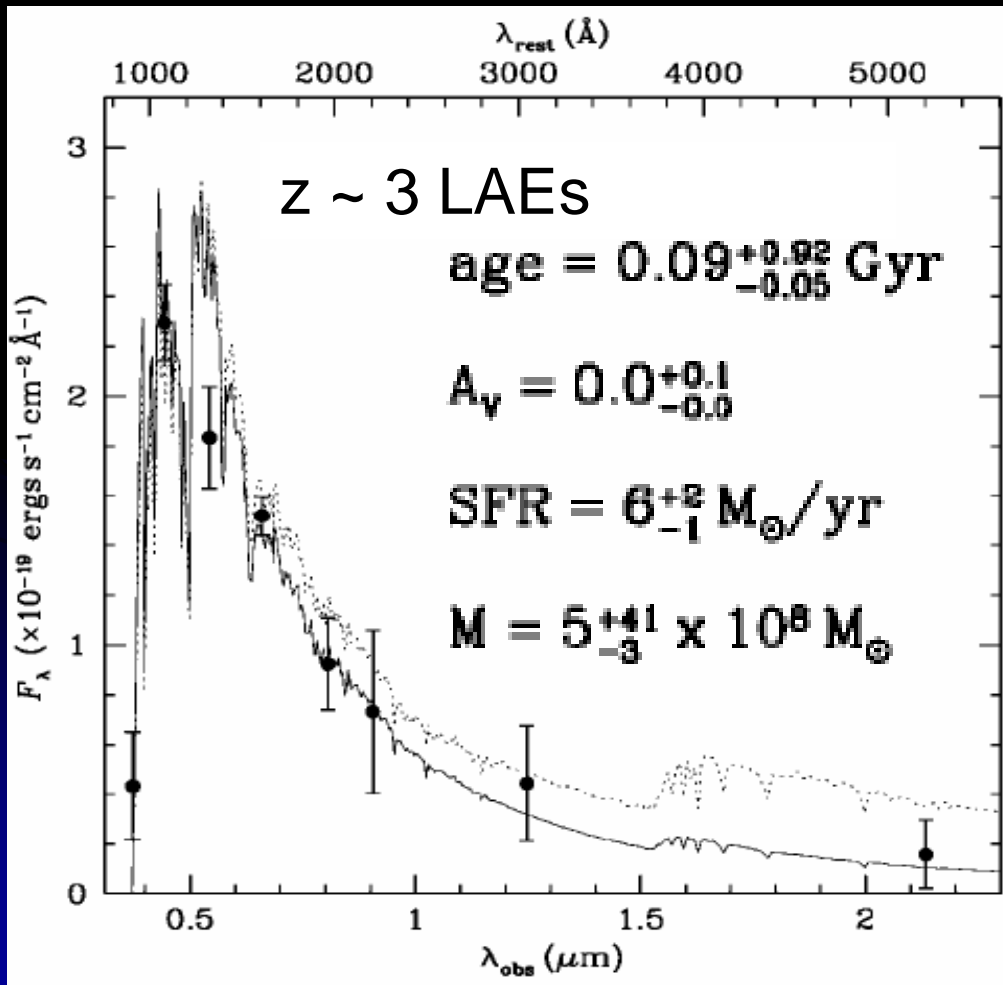


young burst
or
constant SF

Charlot & Fall (1993)

LAEs@high-z properties

- ◆ stacking broad-band fluxes (Gawiser et al. 2006)



- high SFR
- young (10-100 Myr)
- almost dust-free
- low stellar mass

LAE の理論モデルの先行研究

- ◆ 解析的取り扱い (Haiman & Spaans 99; Thommes & Meisenheimer 05)

$$\frac{dn_{\text{LAE}}}{dM_{\text{star}}} \propto \frac{dn_{\text{halo}}}{dM_{\text{halo}}}, \quad L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{obs}} = L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}} e^{-\tau_*}$$

- ◆ gas-dynamical simulation (Barton et al. 04)

$10 h^{-1}$ comoving Mpc, 2×324^3 particles

- ◆ SA モデル (Mao et al. 06; Le Delliou et al. 05, 06)
Mao: Granato et al. (2004) のモデル (monolithic collapse, no merger tree) をベース

Le Delliou: GALFORM (Baugh et al. 2005) をベース

階層的構造形成の枠組みで構築され、
観測から得られた LF と比較できる
これまでで唯一の LAE 理論モデル

Le Delliou et al. (2005, 2006)

- ◆ GALFORM (Baugh et al. 2005) をベース
burst 時 top-heavy IMF ($x=0$)
gas rich minor merger \rightarrow burst

$$\tau_{\star} = \tau_{\star 0} (V_c / 200 \text{ km s}^{-1})^{\alpha_{\star}}$$

$$\tau_{\star \text{burst}} = \max [f_{\text{dyn}} \tau_{\text{dyn}}, \tau_{\star \text{burst, min}}]$$

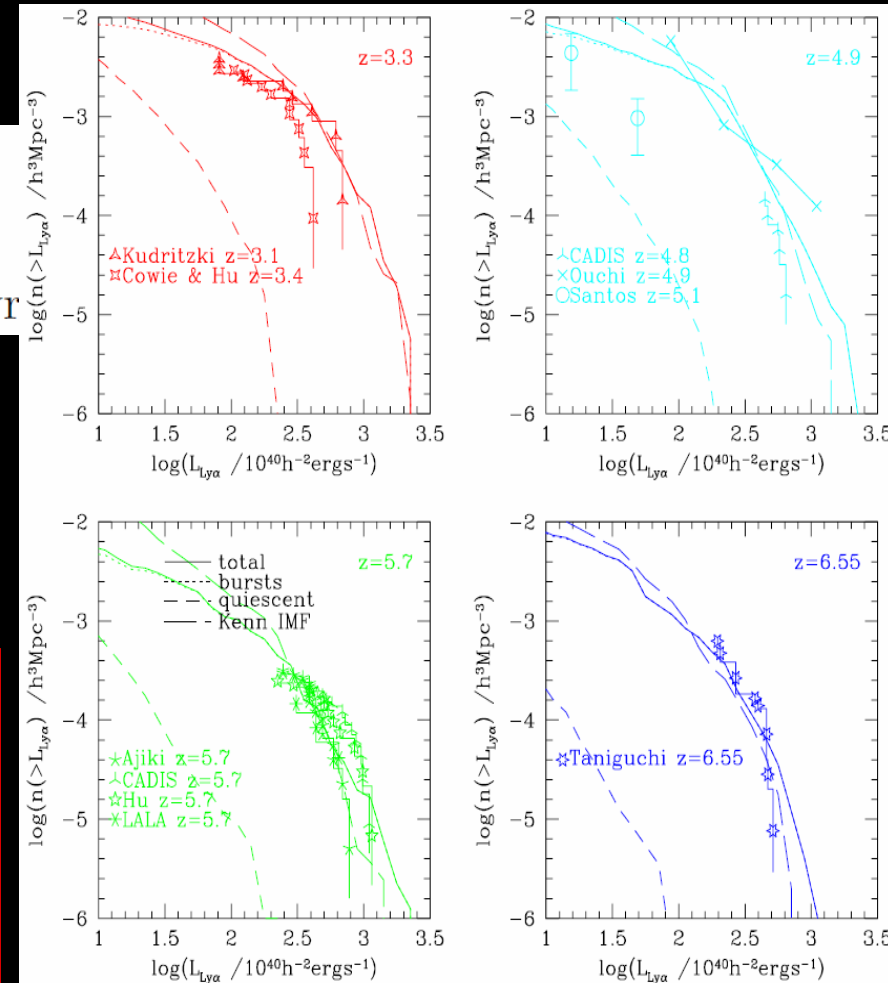
$$f_{\text{dyn}} = 50, \tau_{\star \text{burst, min}} = 0.2 \text{ Gyr}$$

- ◆ Ly α は星形成に起源

$$L_{\text{Ly}\alpha}(t) \propto \psi(t) f_{\text{esc}}$$

$$f_{\text{esc}} = \text{const} (= 0.02)$$

Ly α photon の性質を考慮した
 f_{esc} を現象論的に与えると共に、
新たな観測データとの比較に
 $f_{\text{esc}} = \text{const}$ のモデルが耐え
得るかを検証



Outline

1. Introduction

Ly α Emitters (LAEs) の観測的特徴、
再電離と LAEs、LAEs の先行研究

2. Mitaka model for LAE population

LAE モデルの詳細を紹介

3. Numerical Results

LAEs 観測データとの比較

4. Conclusion

5. Future works

Basic equations in Mitaka model

$$\psi(t) = \frac{M_{\text{cold}}(t)}{\tau_*} \propto \exp\left[-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}\right], \quad \tau_{\text{eff}} \equiv \frac{\tau_*}{\alpha + \beta}$$

$$\tau_* \equiv \tau_*^0 \left[1 + \left(\frac{V_c}{V_{\text{hot}}}\right)^{\alpha_*}\right] \quad \tau_*^{\text{burst}} \equiv f_*^{\text{burst}} \tau_{\text{dyn}}$$

$$\beta = \left(\frac{V_c}{V_{\text{hot}}}\right)^{-\alpha_{\text{hot}}}$$

$$\dot{M}_* = \alpha\psi$$

$$\dot{M}_{\text{cold}} = -(\alpha + \beta)\psi$$

$$\dot{M}_{\text{hot}} = \beta\psi$$

$$M_{\text{cold}} \dot{Z}_{\text{cold}} = [p - (\alpha + \beta) Z_{\text{cold}}] \psi$$

$$M_{\text{hot}} \dot{Z}_{\text{hot}} = \beta Z_{\text{cold}} \psi$$

$$\tau_*^0 = 1.3 t_{\text{Hubble}}$$

$$\alpha_* = -5.8$$

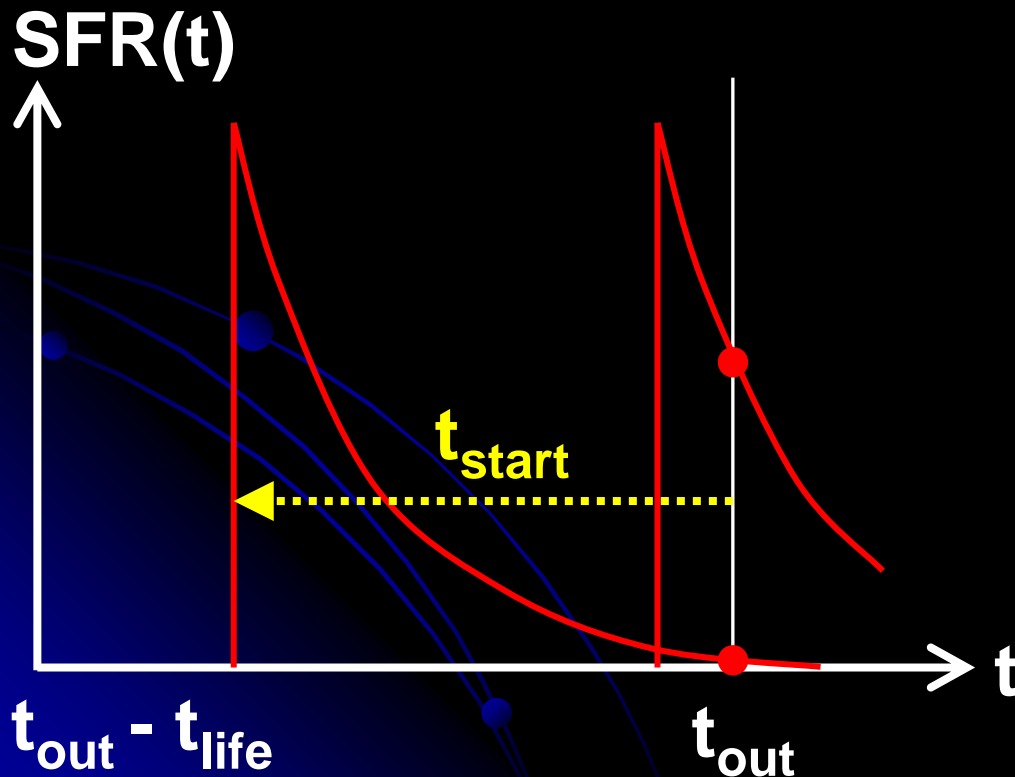
$$V_{\text{hot}} = 130 \text{ km s}^{-1}$$

$$\alpha_{\text{hot}} = 4.0$$

$$f_*^{\text{burst}} = 10$$

Starburst の取り扱い

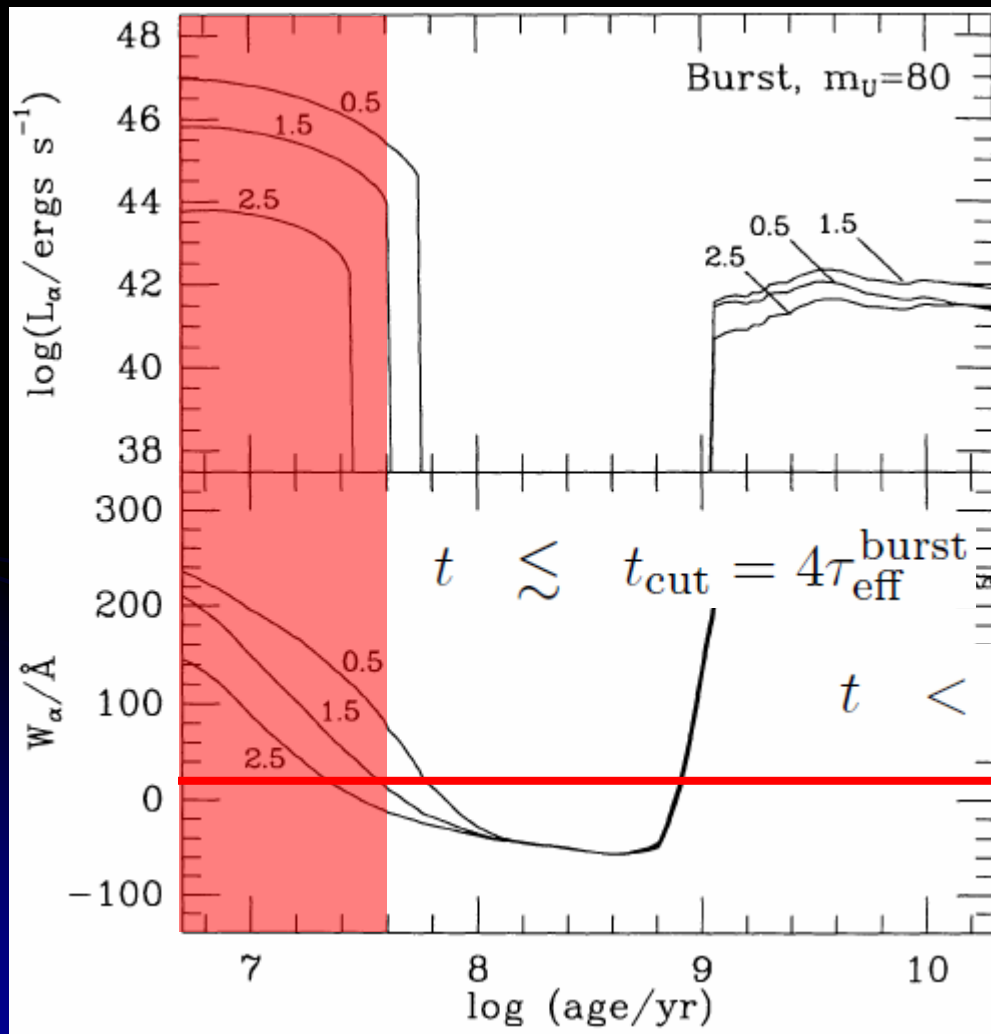
$$\psi^{\text{burst}}(t) = \frac{M_{\text{cold}}(t)}{\tau_{*}^{\text{burst}}} \propto \exp\left[-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}}}\right]$$
$$\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}} = f_{*}^{\text{burst}} \frac{\tau_{\text{dyn}}}{\alpha + \beta}, \quad f_{*}^{\text{burst}} = 10$$



$$t_{\text{start}} = R \times t_{\text{life}}, \quad R \in [0, 1]$$

t_{start} は t_{life} 間で一様を
仮定し、各銀河の重みを
N 分の 1 にして乱数を
N 回振る

Ly α で光っている時間



$$\psi(t) \propto \exp[-t/\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}}]$$

$$\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}} = 10^7 \text{ yr}$$

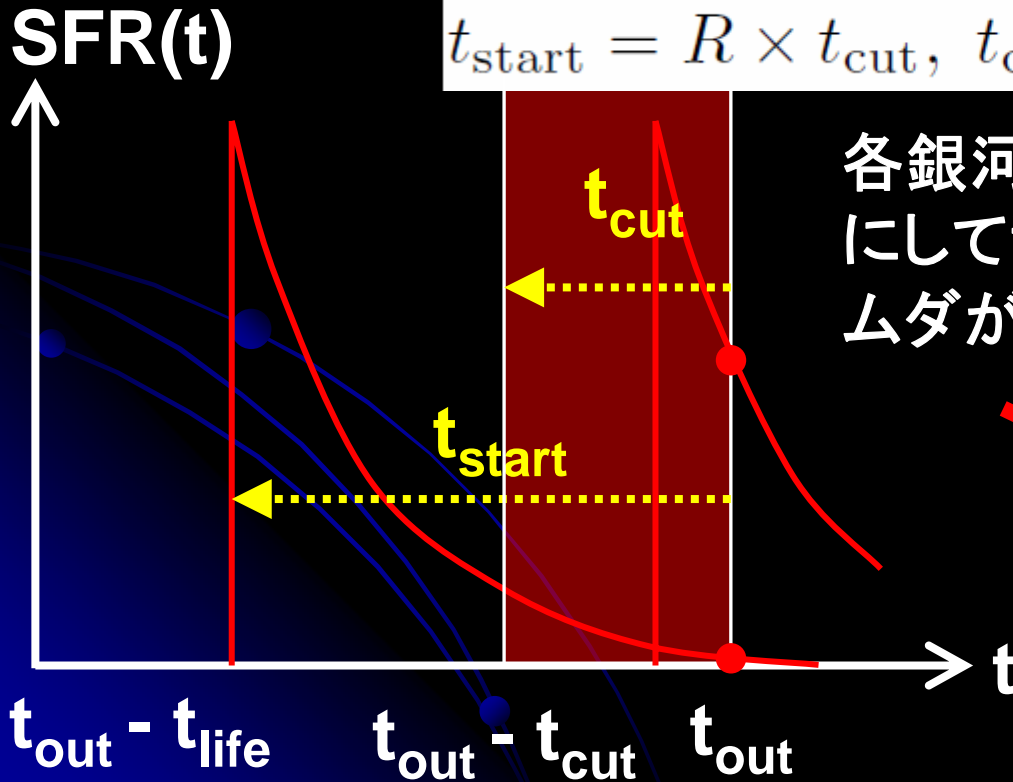
$$L_{\text{Ly}\alpha}(t) \propto \dot{N}_{\gamma}(t)$$

Starburst の取り扱い

$$\psi^{\text{burst}}(t) = \frac{M_{\text{cold}}(t)}{\tau_*^{\text{burst}}} \propto \exp\left[-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}}}\right]$$

$$\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}} = f_*^{\text{burst}} \frac{\tau_{\text{dyn}}}{\alpha + \beta}, \quad f_*^{\text{burst}} = 10$$

$$t_{\text{start}} = R \times t_{\text{cut}}, \quad t_{\text{cut}} = \max(10^7 \text{ yr}, 4\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}})$$



各銀河の重みを $(t_{\text{cut}} / t_{\text{life}})$ N 分の 1 にして乱数を N 回振れば、計算のムダが少なくて済む

~~$$t_{\text{start}} = R \times t_{\text{life}}, \quad R \in [0, 1]$$~~

~~t_{start} は t_{life} 間で一様を
仮定し、各銀河の重みを
 N 分の 1 にして乱数を
 N 回振る~~

Ly α line luminosity の計算法 (1)

$$\begin{aligned} L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}}(t) &= \dot{N}_{\text{Ly}\alpha}(t) h\nu_{\text{Ly}\alpha} \\ &= \psi(t) \times \left(\frac{\dot{N}_{\gamma}(t)}{\psi(t)} \right) \times \left(\frac{\dot{N}_{\text{Ly}\alpha}(t)}{\dot{N}_{\gamma}(t)} \right) \times h\nu_{\text{Ly}\alpha} \\ &= 1.366 \times 10^{42} \left(\frac{\psi(t)}{1.0 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \text{ [erg s}^{-1}\text{]} \end{aligned}$$

case B recombination (=0.677)

massive star の大気モデルの不定性 (factor ~ 2)、
metallicity 依存性 (Solar と Pop III で factor ~ 6)

$$\begin{aligned} L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{obs}}(t) &= L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}}(t) \times f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}(N_{\text{cold}}(t) Z_{\text{cold}}(t), v_{\text{out}}(t)) \\ N_{\text{cold}}(t) &\equiv \frac{M_{\text{cold}}(t)/2}{\pi r_{\text{eff}}^2(t)}, \quad v_{\text{out}}(t) \equiv \frac{r_{\text{eff}}(t)}{\tau_{\text{eff}}(t)} \end{aligned}$$

Ly α line luminosity の計算法 (2)

$$\psi^{\text{burst}}(t) = \frac{M_{\text{cold}}(t)}{\tau_*^{\text{burst}}} \propto \exp\left[-\frac{t}{\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}}}\right]$$

$$\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}} = f_*^{\text{burst}} \frac{\tau_{\text{dyn}}}{\alpha + \beta}, \quad f_*^{\text{burst}} = 10$$

$$t_{\text{start}} = R \times t_{\text{cut}}, \quad t_{\text{cut}} = \max(10^7 \text{ yr}, 4\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}})$$

$$t < t_{\text{cut}}$$

最小の effective burst timescale
(例えば $\sim 10^6$ yr) を設けた方がよい？

$$L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}}(t) \propto \psi(t) \quad \text{for } 4\tau_{\text{eff}}^{\text{burst}} > 10^7 \text{ yr}$$

$$\psi(t = 0) \quad \text{otherwise}$$

本当はこうするべき？
現段階ではともに SFR(t) に
比例させている

t_{dyn} が短い銀河で t_{cut} を
 10^7 yr とした意味がない

Models of Ly α escape fraction

- ◆ Ly α photon の性質や low- z の Ly α emitting galaxies の観測結果を考慮した4つのモデル

$$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha} = f_{\text{esc}}^0 : \text{simply proportional}$$
$$f_{\text{esc}}^0 \exp \left[-\frac{N_{\text{cold}} Z_{\text{cold}}}{(N_{\text{cold}} Z_{\text{cold}})^0} \right] : \text{dust (screen)}$$
$$f_{\text{esc}}^0 \frac{1 - e^{-x}}{x}, \quad x \equiv \frac{N_{\text{cold}} Z_{\text{cold}}}{(N_{\text{cold}} Z_{\text{cold}})^0} : \text{dust (slab)}$$
$$f_{\text{esc}}^0 \left(1 - \exp \left[-\frac{v_{\text{out}}}{v_{\text{cut}}} \right] \right) : \text{outflow}$$

LAEs の光度関数

SA モデル

$$L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}}(t) = 1.366 \times 10^{42} \left(\frac{\psi(t)}{1.0 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) [\text{erg s}^{-1}]$$

intrinsic Ly α 光度関数

$$L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{obs}}(t) = L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{int}}(t) f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha} (N_{\text{cold}}(t) Z_{\text{cold}}(t), v_{\text{out}}(t))$$

LF ①

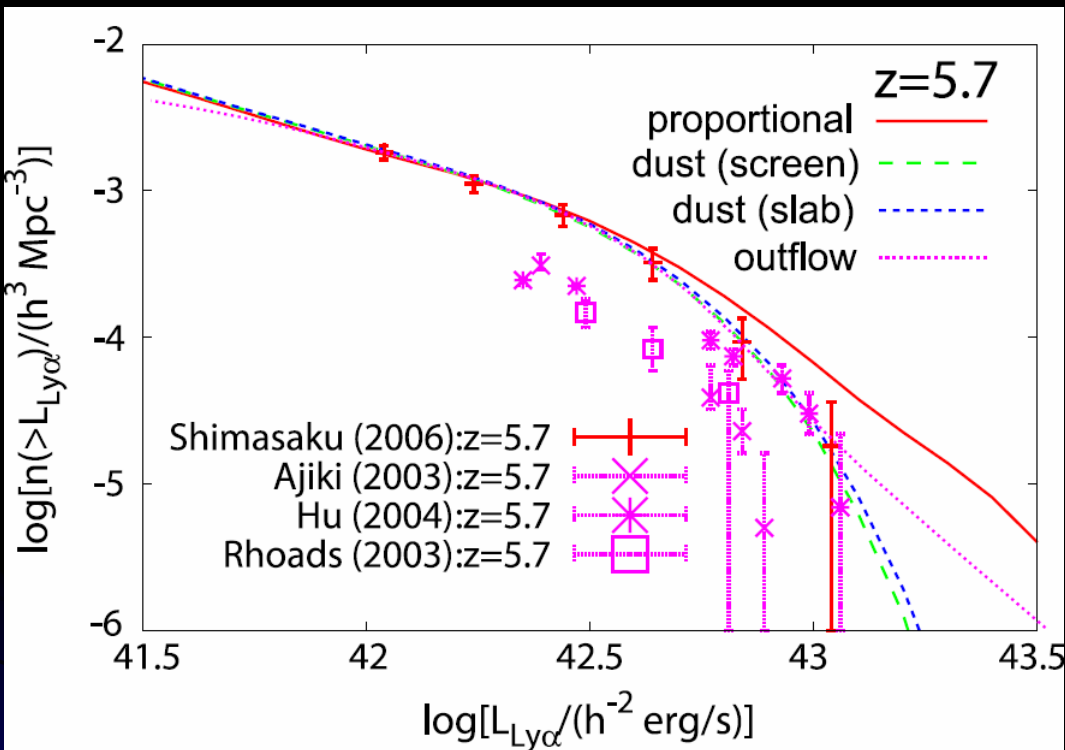
LF ②

LF ③

LF ④

observed Ly α 光度関数

f_{esc} のパラメータの決め方



- Shimasaku et al. 06 の LAE LF@z~5.7 に最もよく合うように選ぶ
- 得られたパラメータの値は redshift 依存しない一定の値とする

Model	f_{esc}^0	$(N_{\text{cold}} Z_{\text{cold}})^0 [10^{21} \text{ cm}^{-2}]$	$v_{\text{cut}} [\text{km s}^{-1}]$
simply proportional	0.24	—	—
dust (screen)	0.30	4.0	—
dust (slab)	0.30	2.0	—
outflow	0.28	—	6.5

Outline

1. Introduction

Ly α Emitters (LAEs) の観測的特徴、
再電離と LAEs、LAEs の先行研究

2. Mitaka model for LAE population

LAE モデルの詳細を紹介

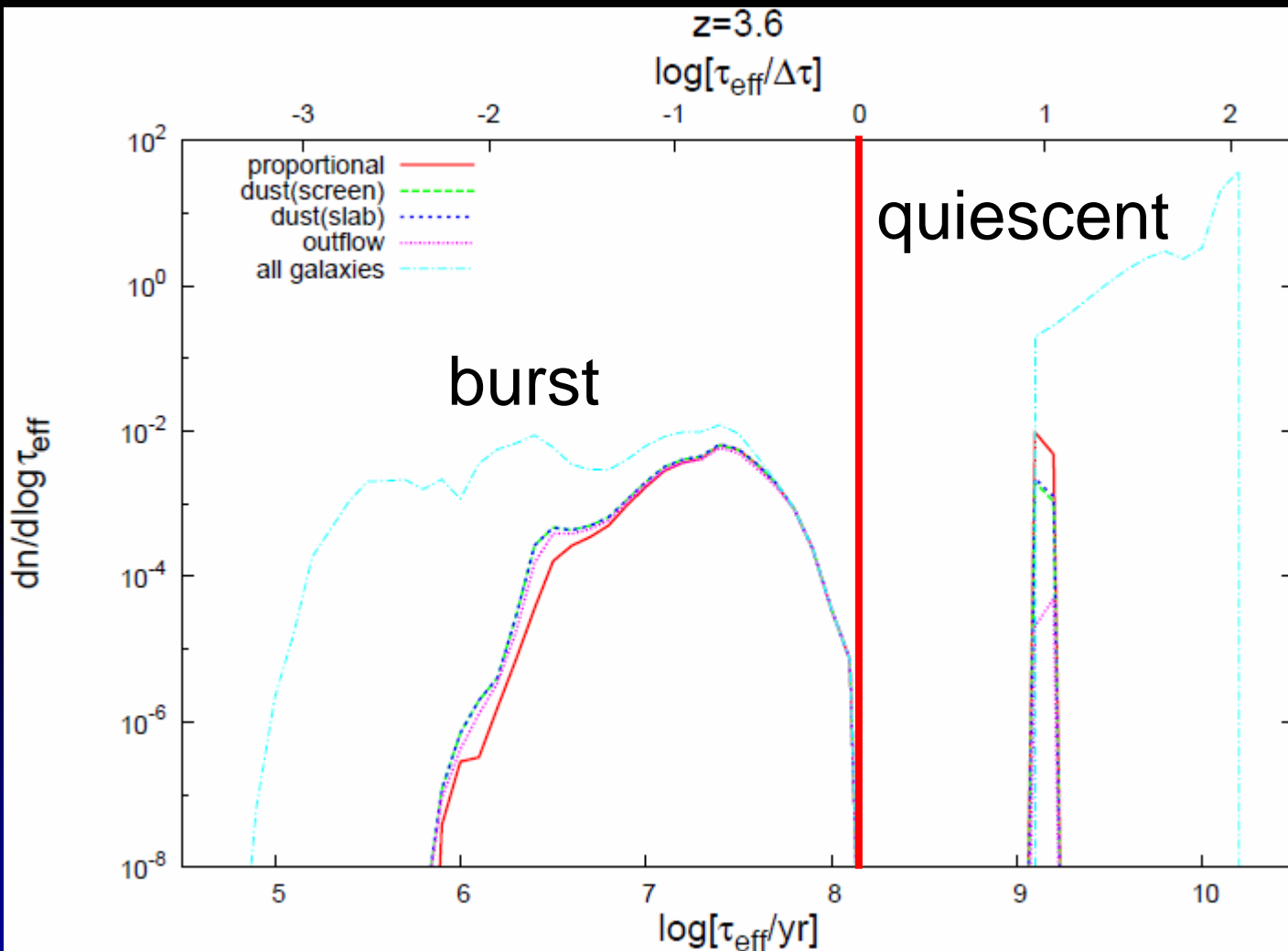
3. Numerical Results

LAEs 観測データとの比較

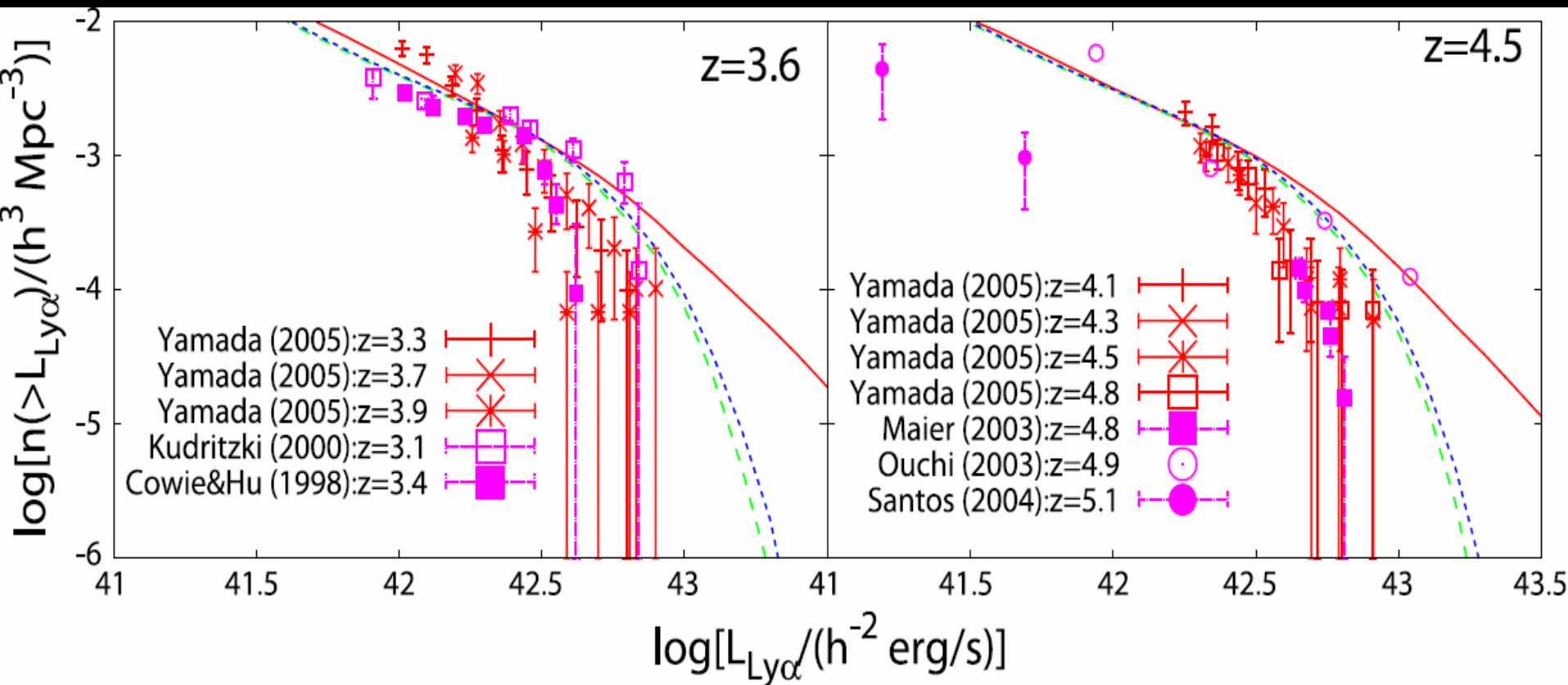
4. Conclusion

5. Future works

τ_{eff} と t_{life} の分布

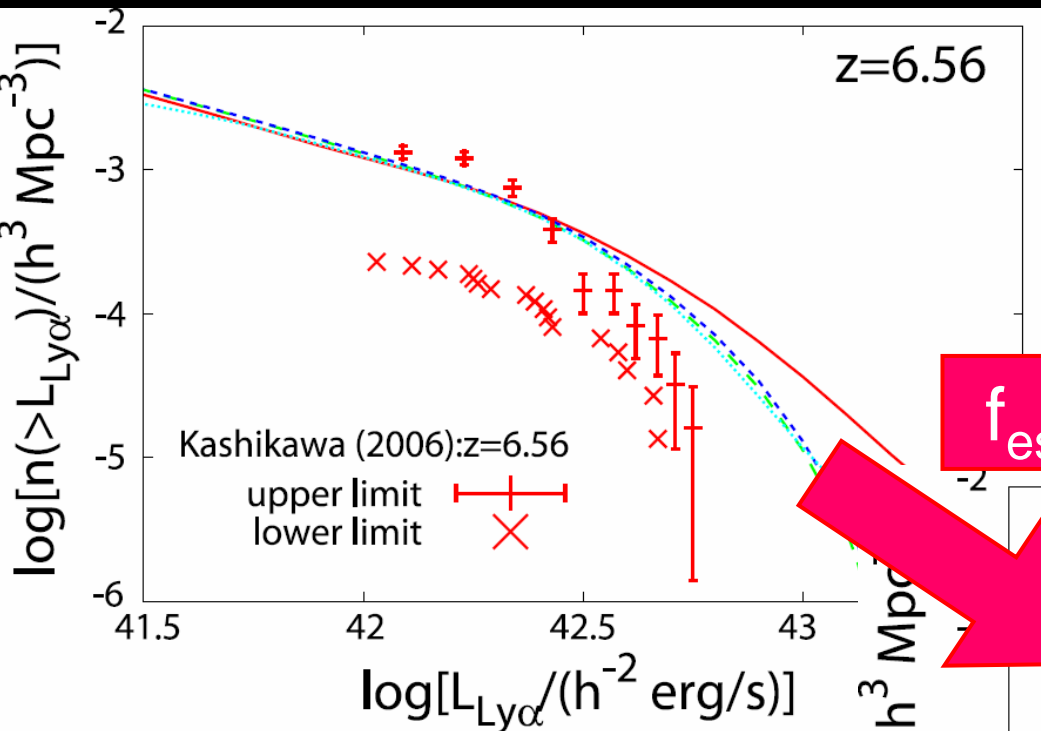


LAE 光度関数との比較 (1)



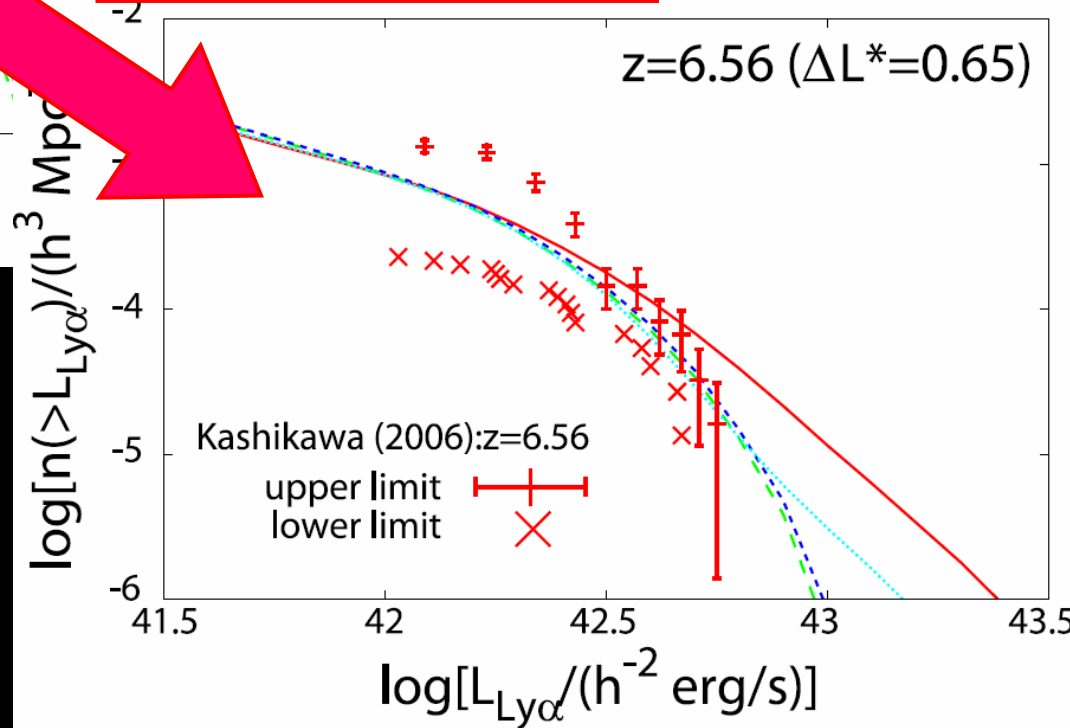
赤方偏移 3.6, 4.5 とともに、ダストの効果を加味した
我々のモデルの方が LAE 光度関数の新しい
データ(赤色データ)もよく再現できている

LAE 光度関数との比較 (2)



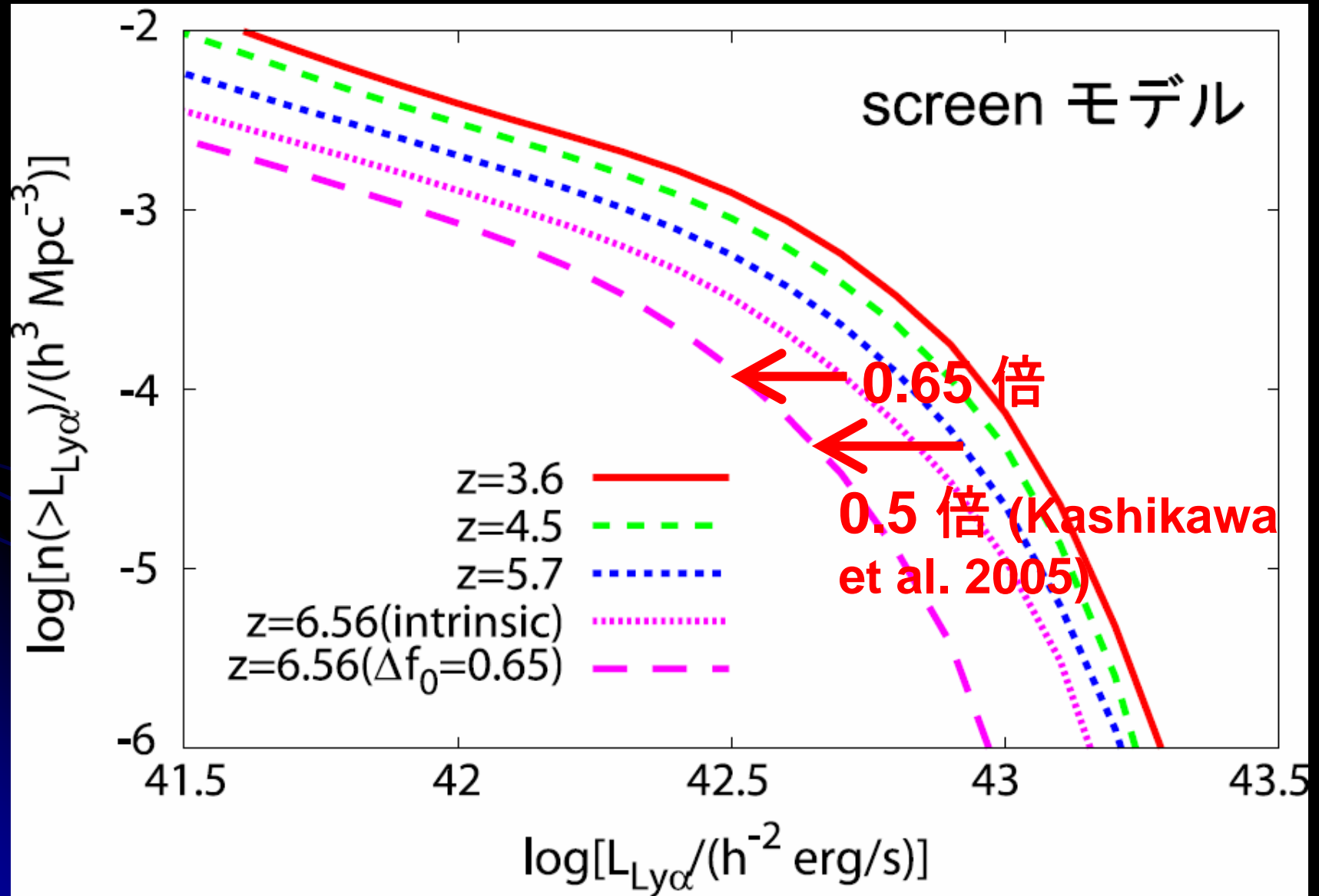
- $z=6.56$ では、計算結果は LAE 光度関数よりも明るい or 個数が多い

f_{esc}^0 を 0.65 倍

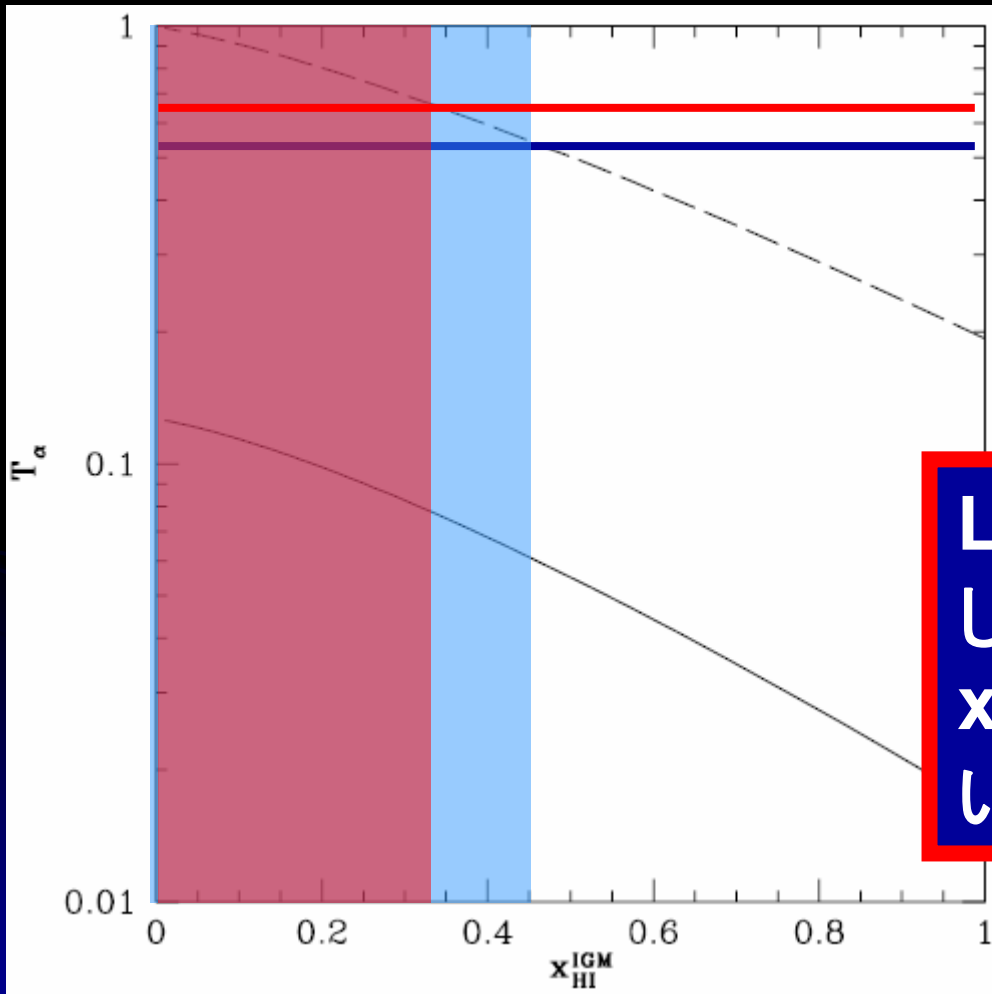


Kashikawa et al. 06 の信頼度の高い LAE LF @ $z \sim 6.5$ と consistent

LAE 光度関数から読み取る再電離



$x_{\text{HI}} @ z \sim 6.5$ の具体的評価



$x_{\text{HI}} \sim 0 - 0.45$
(Kashikawa et al. 2006)

$x_{\text{HI}} \sim 0 - 0.32$

LAE 光度関数が時間進化
しないと仮定して求めた
 x_{HI} は過大評価になって
いることが分かった

Outline

1. Introduction

Ly α Emitters (LAEs) の観測的特徴、
再電離と LAEs、LAEs の先行研究

2. Mitaka model for LAE population

LAE モデルの詳細を紹介

3. Numerical Results

LAEs 観測データとの比較

4. Conclusion

5. Future works

Conclusion

◆ 階層的構造形成の枠組みでの LAE 理論モデルを構築

- ・ LAE の光度関数を統計的に予言できる理論モデルとして、Le Delliou et al. に続き世界で2例目
- ・ 初めて Ly α photon の離脱率にダスト・ outflow の効果を加味し、新たな観測データとの比較を行った
- ・ これらの効果を加味していない先行研究に比べ LAE 光度関数をよりよく再現できた
- ・ LAE 光度関数は intrinsic evolution でわずかに暗くなっており、これまでの仮定からは x_{HI} を過大評価しているかもしれないことが分かった

Future Work

◆ clustering の観測データとの比較

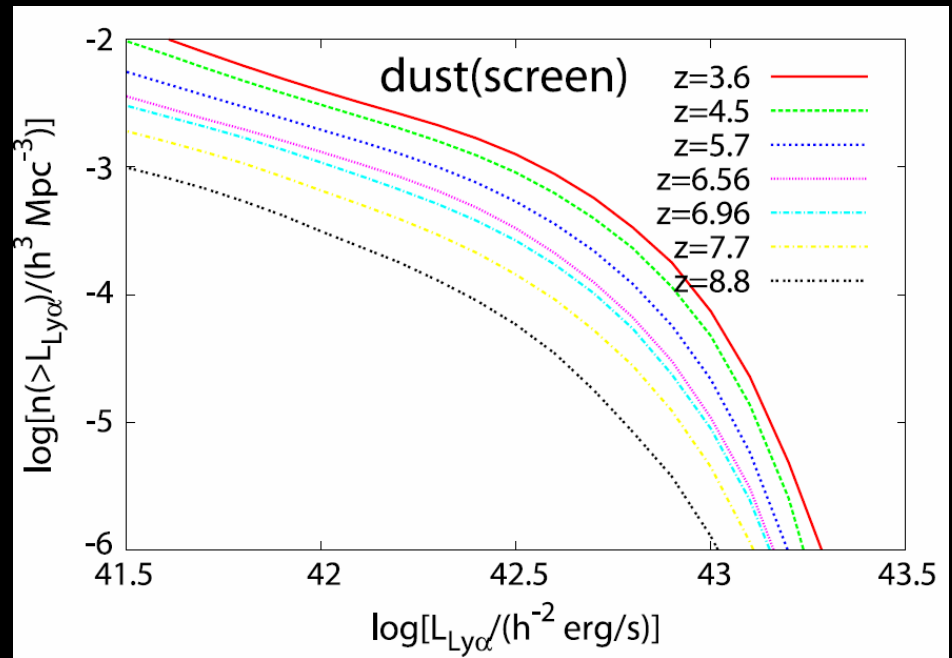
理論モデルの信頼性を調べる

◆ LAE の物理的性質の予言

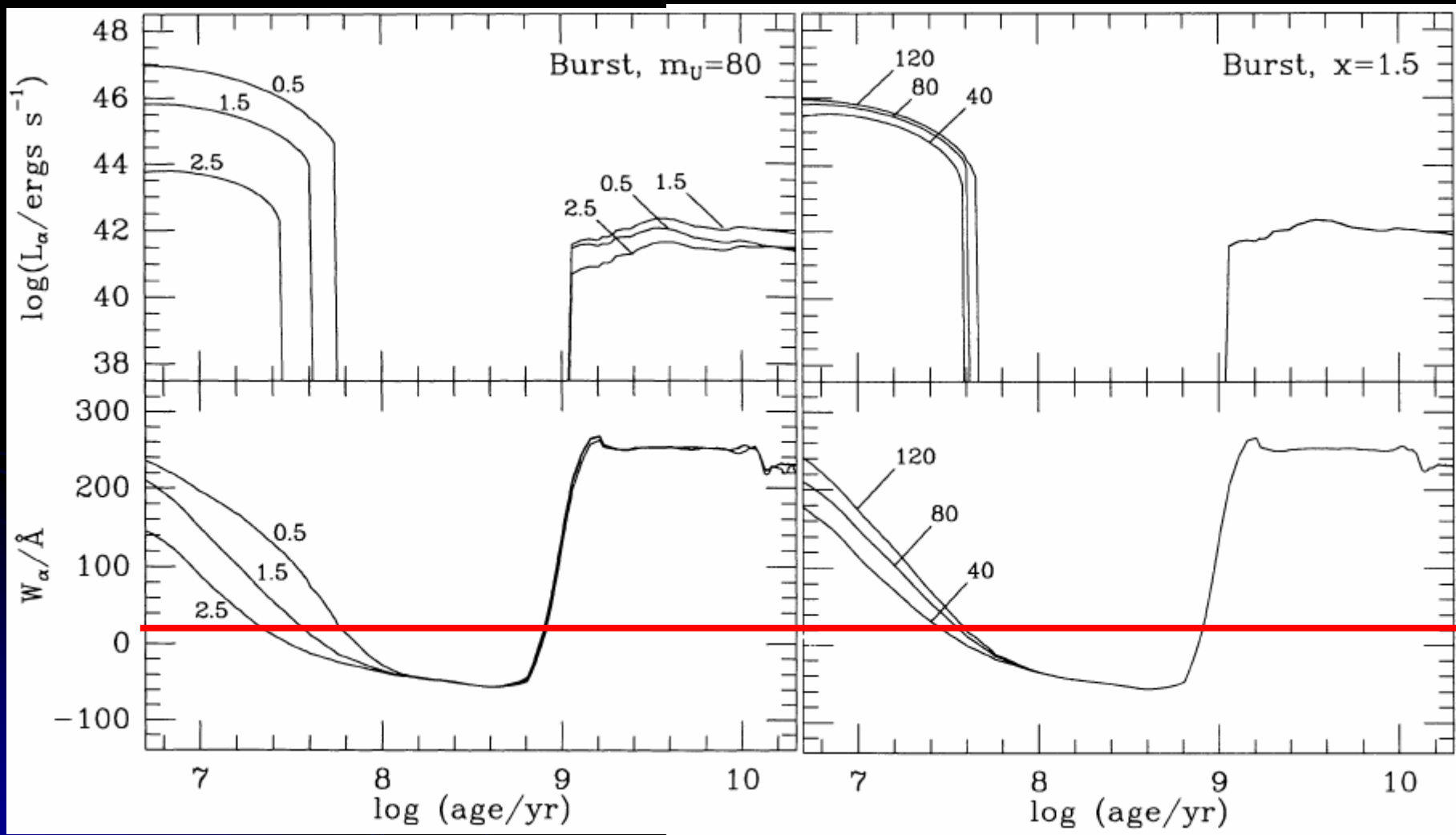
mass of hosting DM halo, stellar mass, metallicity, etc.

◆ IGM が transparent な場合の LAE 光度関数

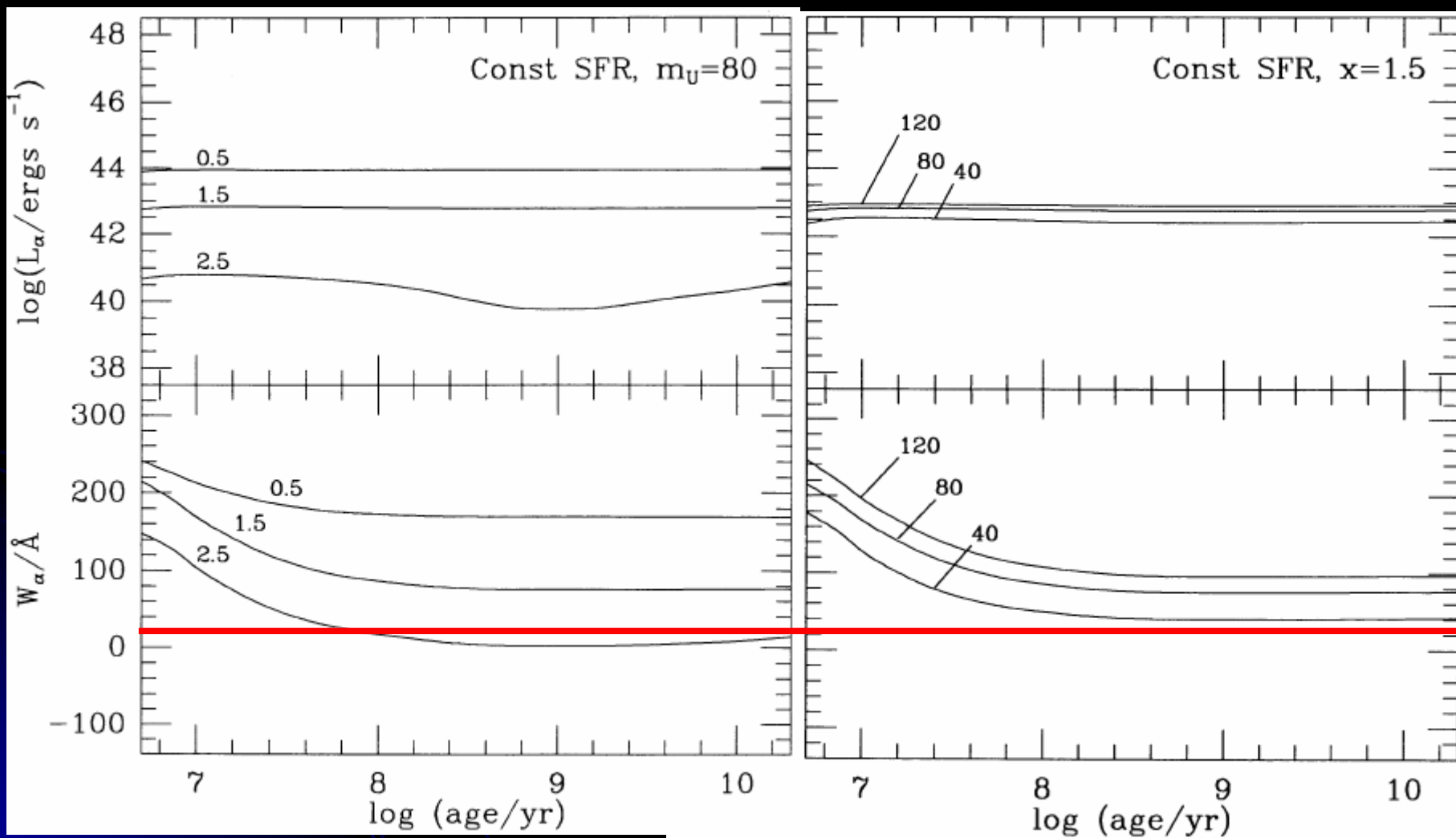
→ $x_{\text{HI}}^{\text{IGM}}(z)$ の予言



Ly α EWs の比較: starburst



Ly α EWs の比較: constant SF

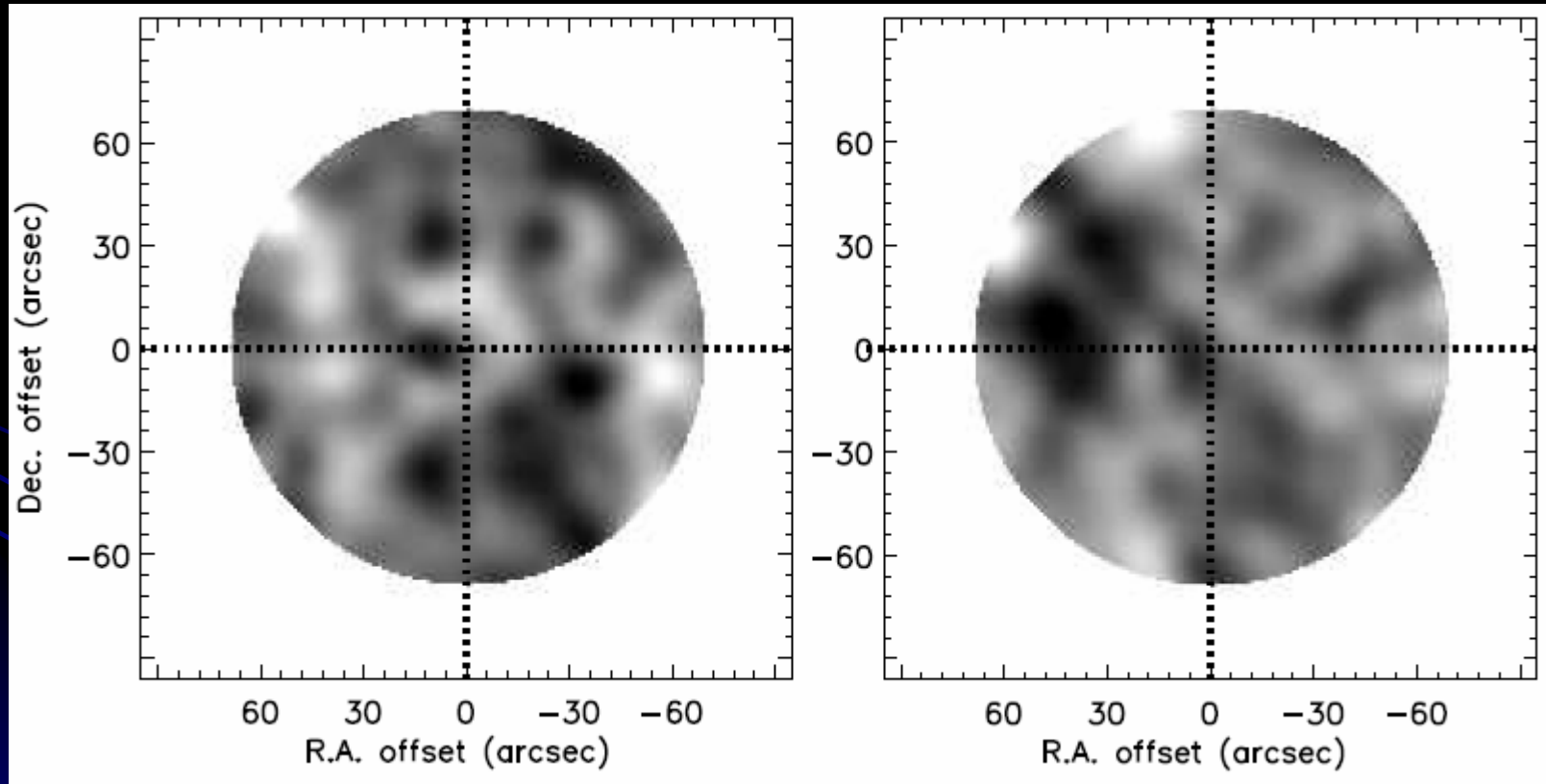


LAEs の観測データ(3)

◆ sub-mm imaging (Webb et al. 2006)

$z \sim 6.5$ LAEs 850 μm maps ($> 3.5\sigma$)

Webb et al. (2006)



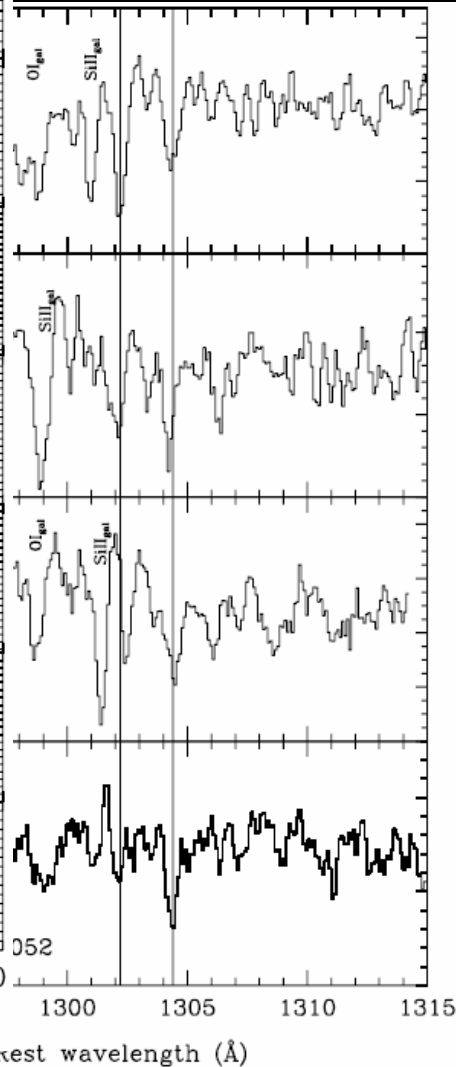
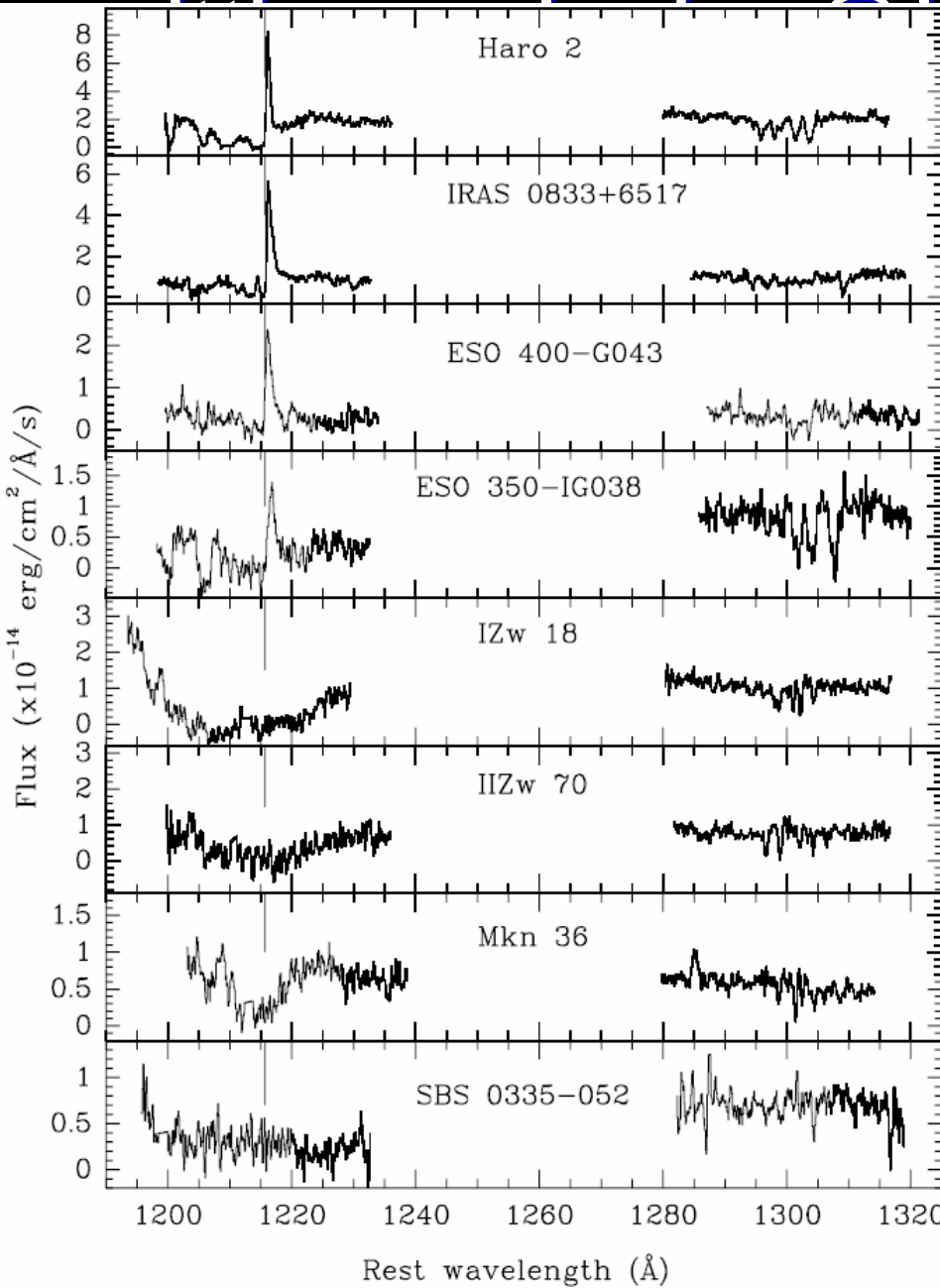
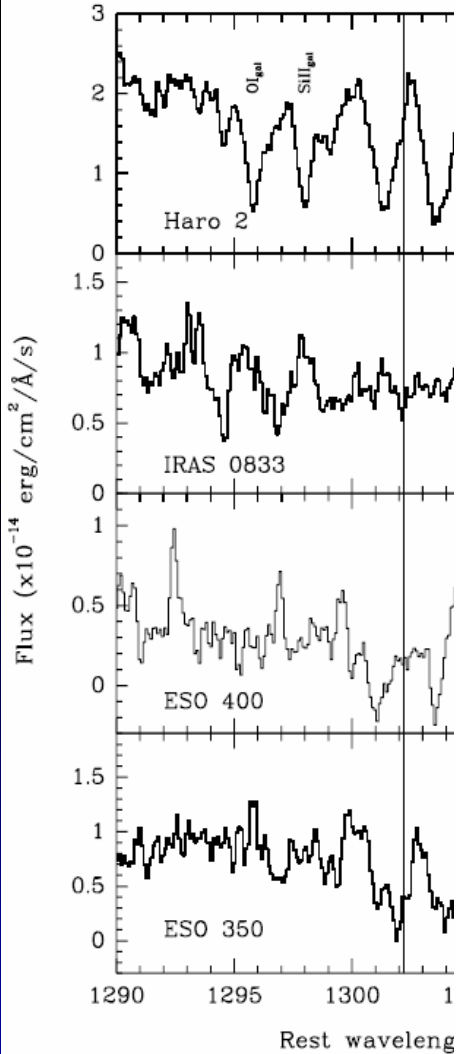
low dust mass ($< 10^8 M_{\text{sun}}$)

Ly α

◆ inter-stellar

LOW-Z

(1998)



観測データの比較

Name	redshift	$> EW_c^{\text{rest}} [\text{\AA}]$	$V [h^3 \text{ Mpc}^{-3}]$	$L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{low}} [h^{-2} \text{ erg s}^{-1}]$	$N(> L_{\text{Ly}\alpha}^{\text{low}}) [h^3 \text{ Mpc}^{-3}]$
Kudritzki (2000)	3.1		2.23×10^3	8.13×10^{41}	3.89×10^{-3}
Yamada (2005)	3.3		1.15×10^5	1.02×10^{42}	6.36×10^{-3}
Cowie (1998)	3.4			1.05×10^{42}	2.95×10^{-3}
Yamada (2005)	3.7		1.25×10^5	1.57×10^{42}	4.12×10^{-3}
Yamada (2005)	3.9		1.32×10^5	1.81×10^{42}	1.37×10^{-3}
Yamada (2005)	4.1		1.32×10^5	1.79×10^{42}	2.14×10^{-3}
Yamada (2005)	4.3		1.39×10^5	2.02×10^{42}	1.19×10^{-3}
Yamada (2005)	4.5		1.41×10^5	2.11×10^{42}	1.03×10^{-3}
Maier (2003)	4.8		$\times 10^5$	4.47×10^{42}	1.45×10^{-4}
Yamada (2005)	4.8		1.30×10^5	2.31×10^{42}	1.06×10^{-3}
Ouchi (2003)	4.9		$\times 10^5$	8.71×10^{41}	5.89×10^{-3}
Santos (2004)	5.1		$\times 10^5$	1.55×10^{42}	4.47×10^{-3}
Shimasaku (2006)	5.7		6.18×10^4	1.10×10^{42}	1.83×10^{-3}
Hu (2004)	5.7			2.24×10^{42}	2.45×10^{-4}
Ajiki (2006)	5.7		6.10×10^4	2.45×10^{42}	3.09×10^{-4}
Rhoads (2003)	5.7			3.09×10^{42}	1.48×10^{-4}
Kashikawa (2006)	6.56		7.45×10^4	1.23×10^{42}	1.63×10^{-3}