

Exploring Extreme Transients
Frontiers in the Early Universe and
Time-Domain Astronomy

@京都2025/8/5~8

$\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河の特性の年齢依 存性と宇宙再電離への寄与

Shimizu+25, arXiv : 2506.03242

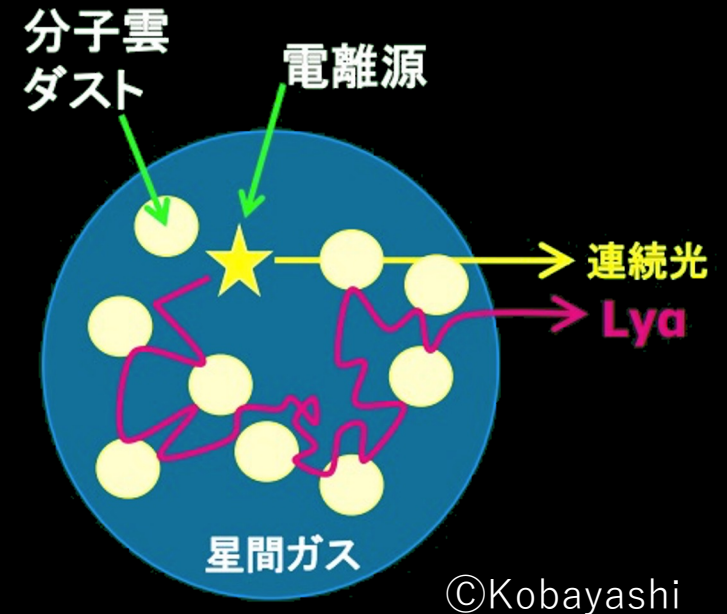
清水駿太 (東京大学)

柏川伸成, 菊田智史, 武田佳大, 有田淳也 (東京大学)

Introduction

LAE ($\text{Ly}\alpha$ emitter)

- ・非常に強い $\text{Ly}\alpha$ 輝線($1216\text{\AA}$)を出している遠方銀河
- ・一般的にダストが少ない若い銀河として観測されるが、年齢の古いLAEも存在 (Iani+24, Nilsson+09など)



- ・連続光が暗いため年齢などの物理量がうまく決まらない
- ・HI/ダスト/outflowなどの複雑な影響を受けるため、具体的な $\text{Ly}\alpha$ 脱出メカニズムは未解明
- $\text{Ly}\alpha$ escape fractionは $\text{Ly}\alpha$ 脱出の謎を探る有用な物理量

$$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha} = \frac{L_{\text{Ly}\alpha, \text{observed}}}{L_{\text{Ly}\alpha, \text{intrinsic}}}$$

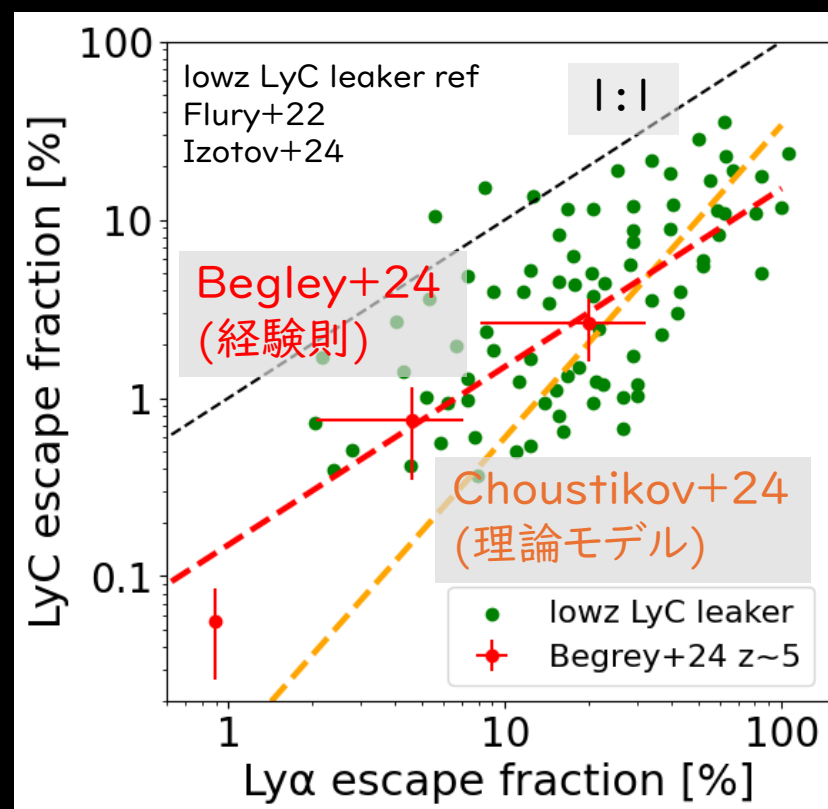
Introduction

高い $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ を持つLAEs
→再電離源の候補 (Matthee+22, Saxena+24)

IGM吸収によってhigh- z で直接LyC escape fraction($f_{\text{esc,LyC}}$)を測ることは困難

⇒ $f_{\text{esc,LyC}}$ と $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ の相関
を利用する (Begley+24, Choustikov+24など)

個々の銀河の $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ を直接見積もる
→共鳴散乱の影響を受けない $\text{H}\alpha$ 輝線を使う
しかし $z > 2$ では地上から観測することができない
JWSTの分光でもsample数が少ない、slitlossなどの問題あり



$$f_{\text{esc,Ly}\alpha} = \frac{F_{\text{Ly}\alpha,\text{obs}}}{8.7 F_{\text{H}\alpha,\text{int}}}$$

This Work

LAEの連続光(特に $H\alpha$ より長い側)を、JWSTのdeep imageで捉えることで、正確にSEDを求める
→SFRから $H\alpha$ 光度に変換し、多くのsampleで $f_{\text{esc}, Ly\alpha}$ を推定

研究目的

- ・年齢に着目して、LAEの詳細な性質を明らかにし、 $Ly\alpha$ 光子脱出のメカニズムを明らかにする
- ・ $Ly\alpha$ escape fractionを通して、LAEの再電離への寄与を明らかにする

Data Sample

LAE sample $\rightarrow$ Kikuta+23

すばる望遠鏡のNarrow band filter(NB)を使って $z=2.2, 3.3, 4.9, 5.7, 6.6, (7.0)$ のLAEを検出

JWST data(+HST data)

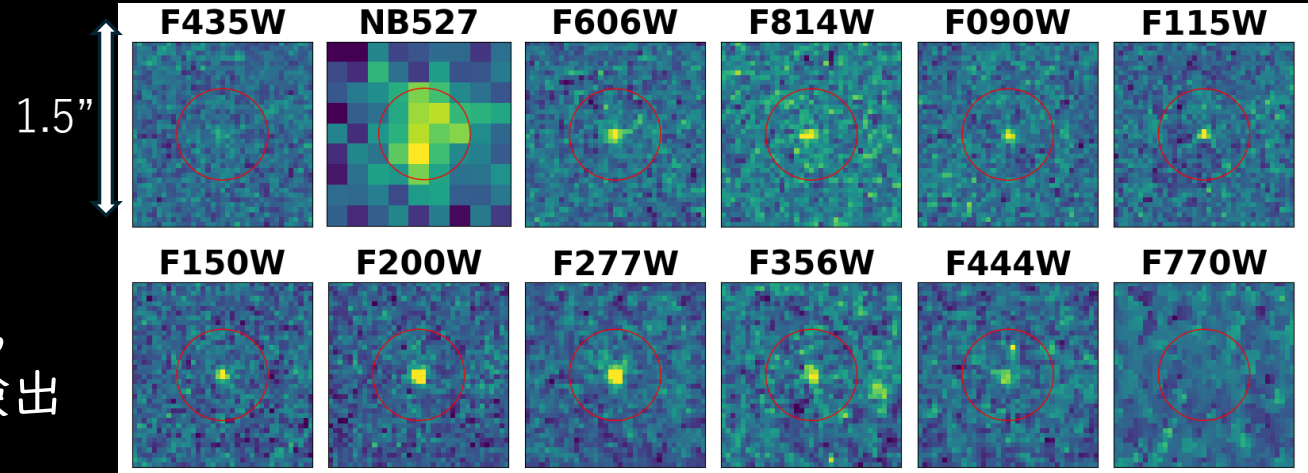
PRIMER COSMOS(190arcmin^2)

、UDS(230arcmin^2) (Dunlop+21)

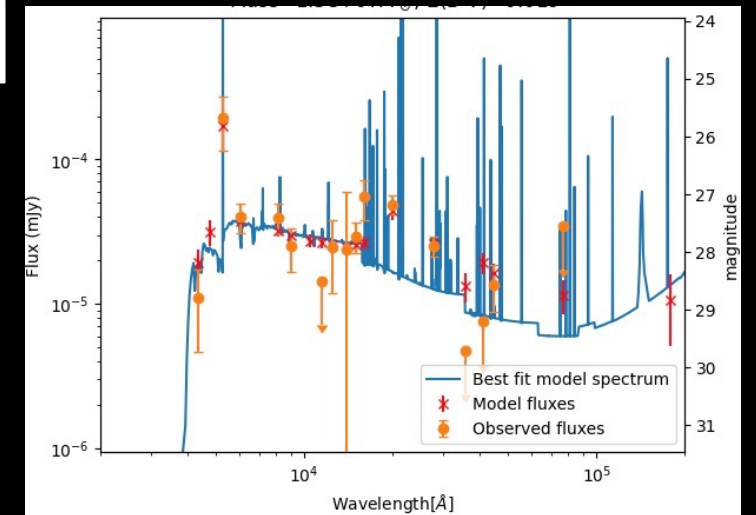
のHST+NIRCam+MIRI data *DAWNの公開データ

静止系で $0.4\sim 5.0$ (18) μm の連続光をカバー

$\rightarrow$ 単一の連続光天体に対応した $\text{Ly}\alpha$ 天体
に対しCIGALE(Boquien+19)でSED fitting
年齢、星質量、ダスト量などを推定



$z=3.3$ LAE



redshift	2.2	3.3	4.9	5.7	6.6	計
Number	20	69	13	20	5	127

LAE properties

全LAE中30%のageが100Myr以上
→

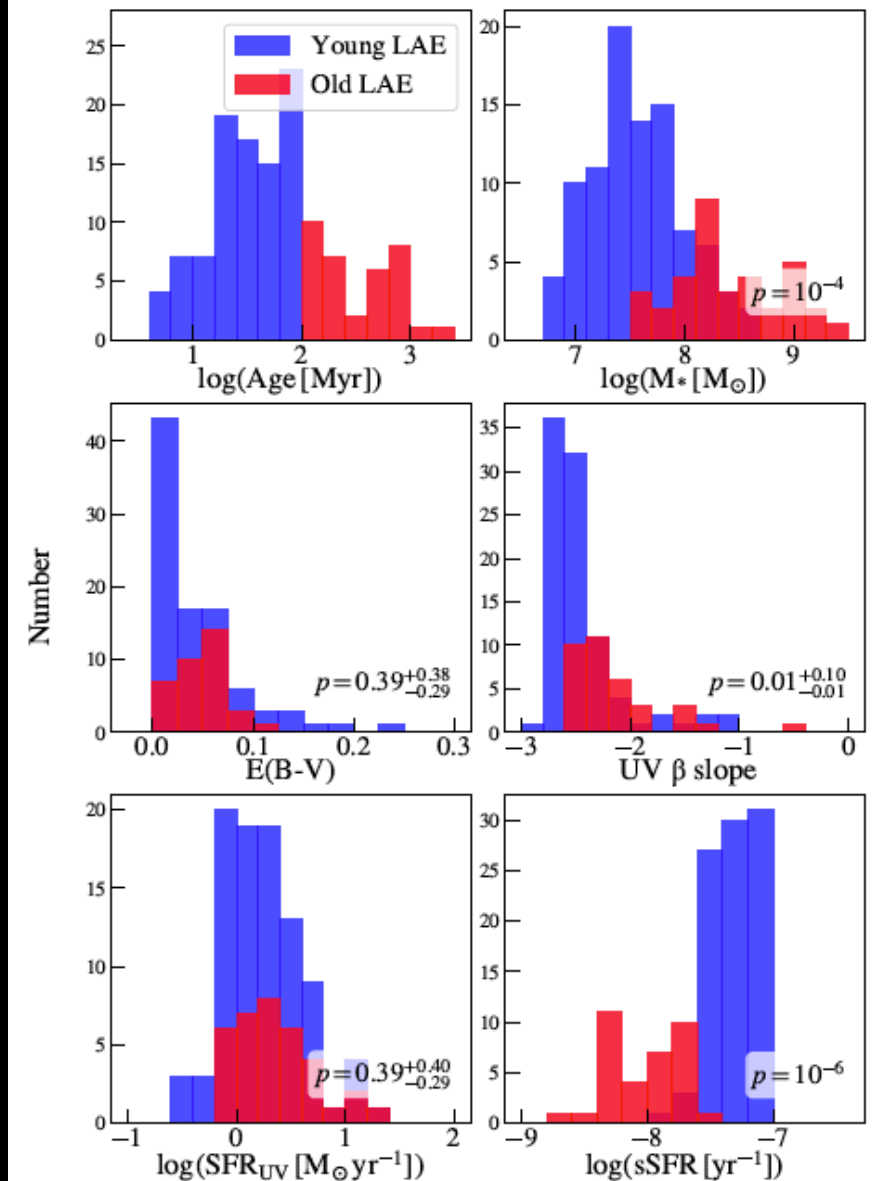
Young LAE (age < 100Myr) : N=92

Old LAE (age > 100Myr) : N=35

と定義し (Iani+24)、性質を比較

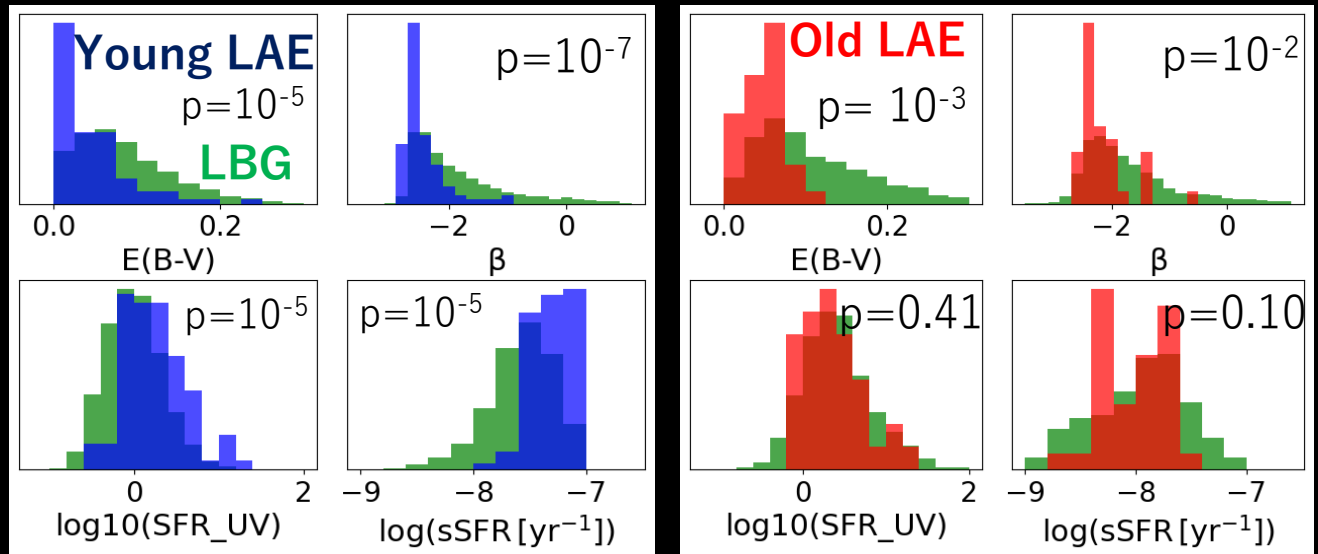
KS検定から、Old LAEは

- ・星質量が重い
- ・sSFRが低い
- ・ダスト量は違いがあるとはいえない
- ・high- z ほど数が少ない
($z=2.2$ で40%→ $z>5$ で15%)



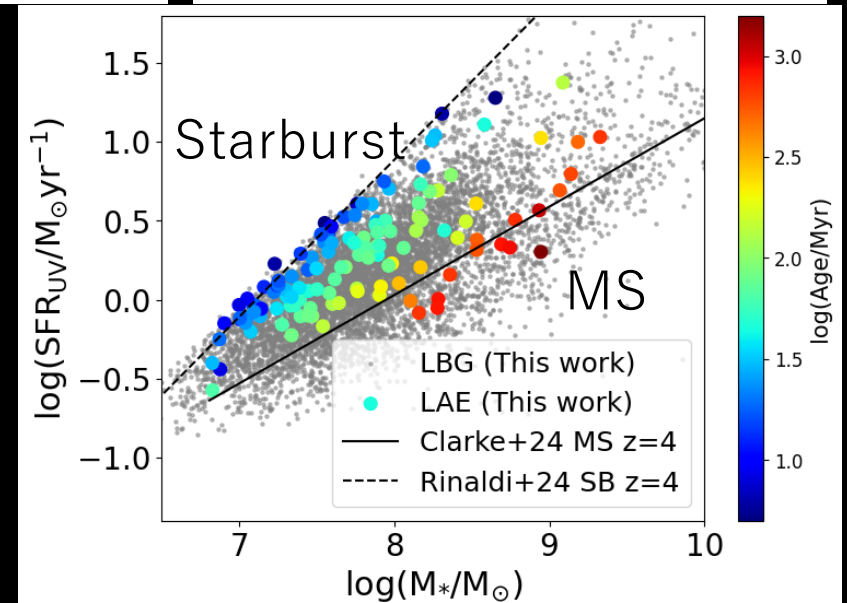
LAE properties

Young LAEと Old LAEを
phot-zで選んだLBGと比較
(星質量の分布が同じになるように
resampling)



KS検定の結果とMain sequenceとの比較

- Young LAEはLBGと全く異なる分布で starburstしている
- 一方Old LAEは、LBGとダスト量の分布が異なるが、Main sequence(MS)に近く、星形成活動はLBGに近い



Ly α escape fraction

$f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ の見積もり

$$f_{\text{esc,Ly}\alpha} = \frac{F_{\text{Ly}\alpha,\text{obs}}}{8.7 F_{\text{H}\alpha,\text{int}}}$$

Case B recombinationを仮定

Ly α 光度 $\rightarrow$ NBのfluxから計算 (Shibuya+18)

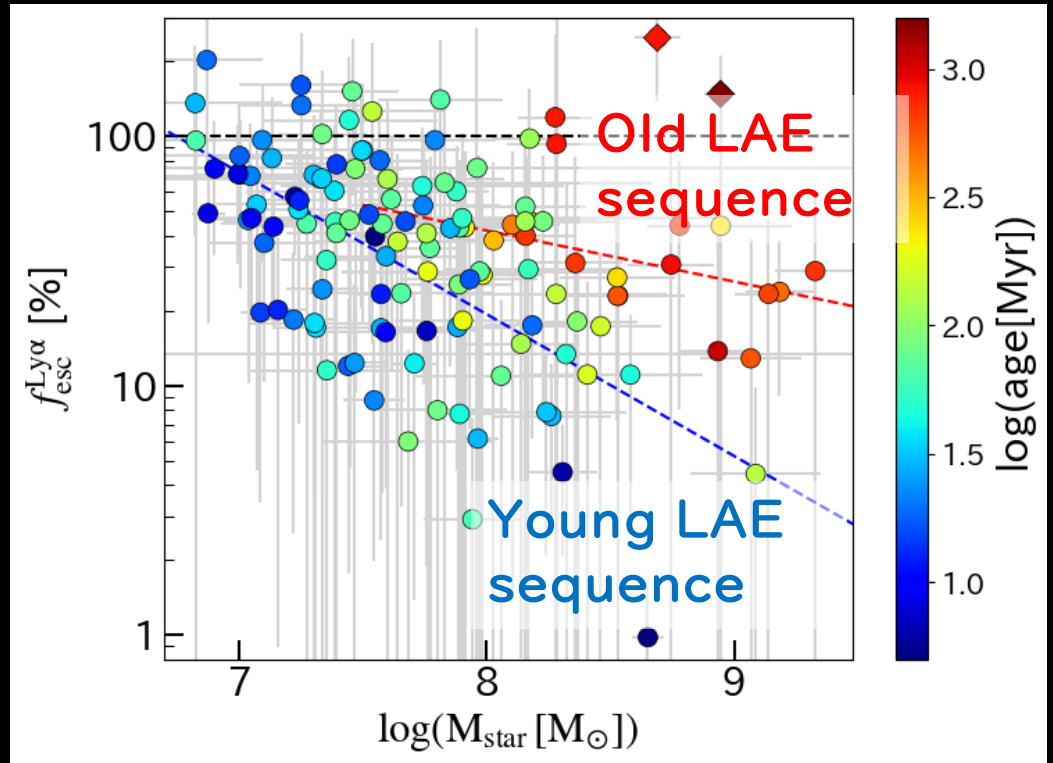
H α 光度 $\rightarrow$ SFR_{SED}から換算 (Goovaerts+24)

+IGM correction

星質量と $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ の相関

基本的には質量 $\uparrow$ 、 $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ $\downarrow$

しかし Young LAE と Old LAE で異なる
2つのsequenceが存在



Ly α escape fraction

Young LAE

銀河形成の初期段階

星質量 $\uparrow$ ダスト $\uparrow$ $\rightarrow$ $f_{\text{esc, Ly}\alpha}$ が下がる

Old LAE

LBGまで成長して、Ly α が見えなくなる

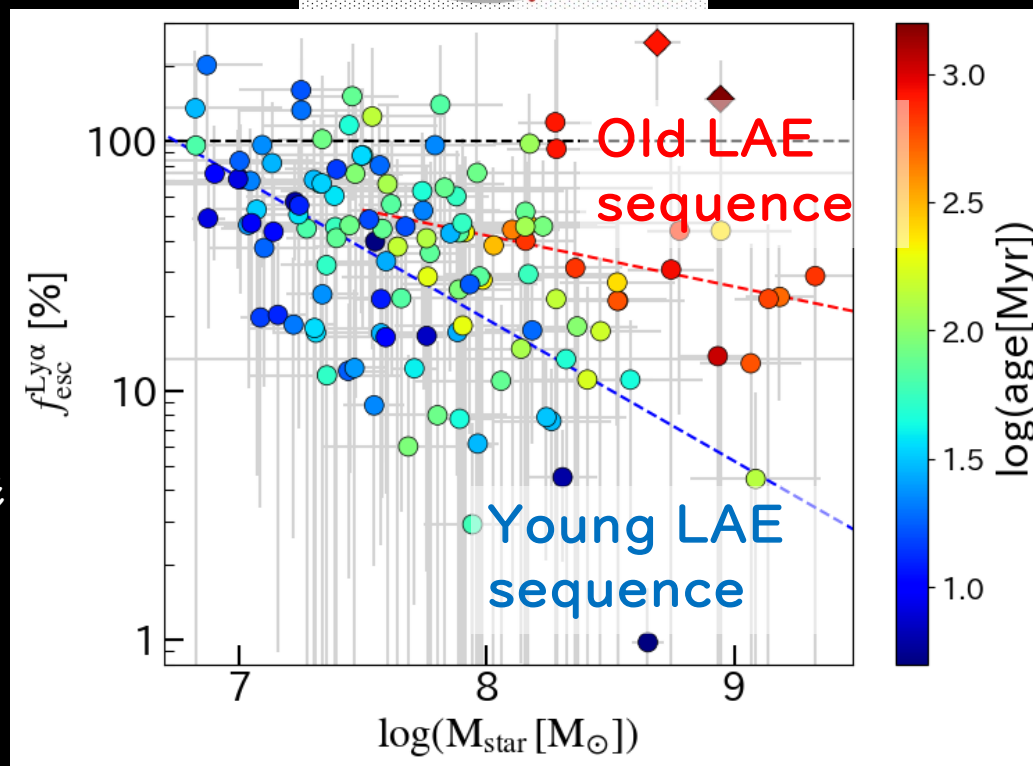
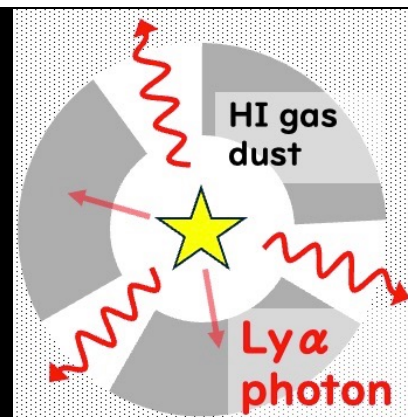
$\rightarrow$ 星形成によるoutflowなどにより、

HI/ダスト柱密度の低い領域が生まれる

$\rightarrow$ 特定の視線方向にだけLy α が脱出している可能性

このシナリオはOld LAEの性質(LBGと同じ星形成、ダスト量のみ小さい)とも整合的

今後PFS分光で調査(S25B+SSP)

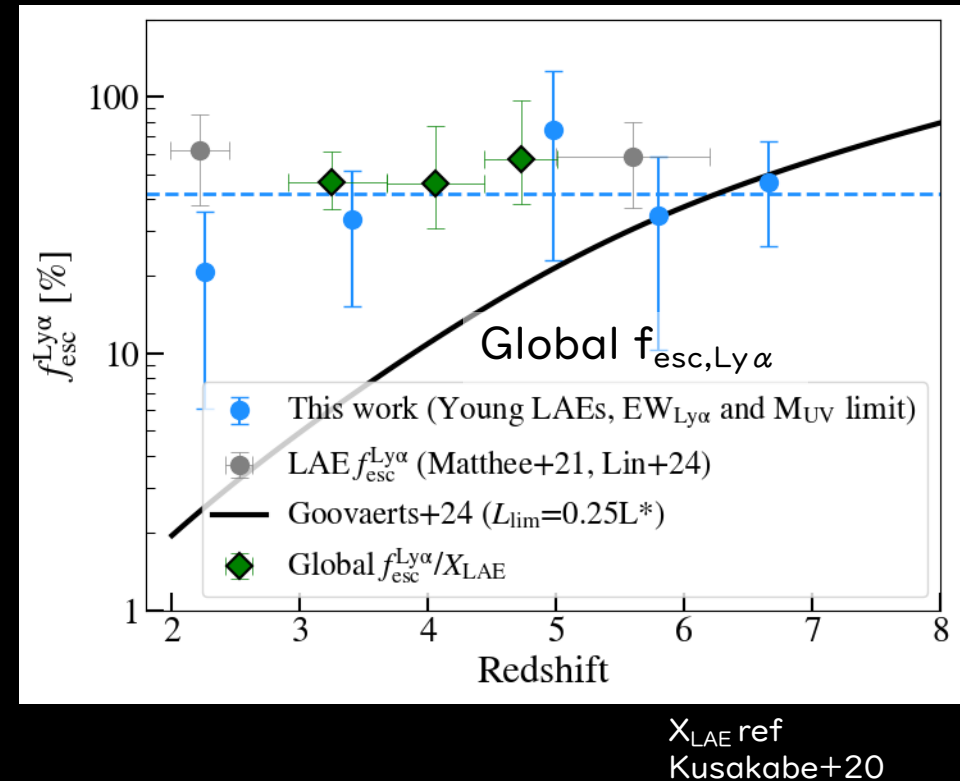


Ly α escape fraction

Young LAEに対して平均した $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ は
z~6まではほぼ無進化：~40%

これは "Global" $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ (一般的な星形成
銀河の $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$) を
LAE fraction (X_{LAE})で割った値と一致する

→ 星形成銀河のLy α 放出は、 $f_{\text{esc,Ly}\alpha}$ が進化
しているのではなく、星形成銀河中のLAEの
割合の進化だけで説明できる (Matthee+22)



Reionization

LAEの再電離への寄与をLy α から直接
見積もる (Goovaerts+24)

→ $\dot{n}_{\text{ion}}$ の計算 (電離光子数/s/Mpc³)

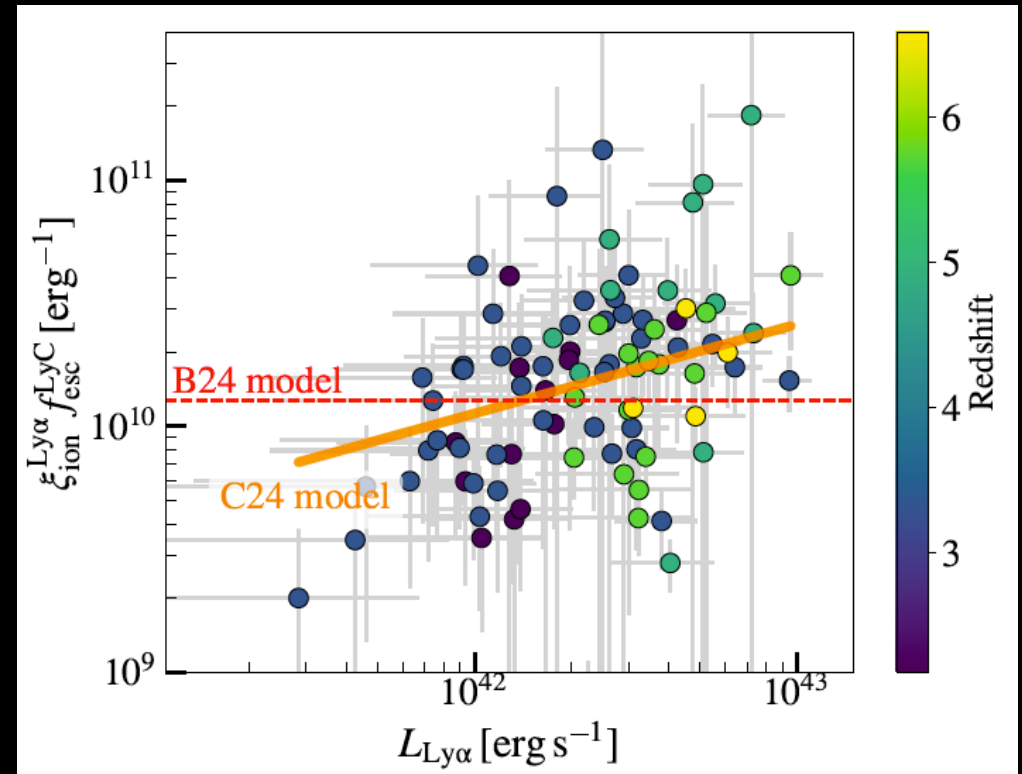
$$\dot{n}_{\text{ion}, \text{Ly}\alpha}(z) = \rho_{\text{Ly}\alpha}(z) \xi_{\text{ion}}^{\text{Ly}\alpha} f_{\text{esc}, \text{LyC}}$$

$\rho_{\text{Ly}\alpha}$: Ly α 光度密度 (無進化を仮定) (Thai+23)

$\xi_{\text{ion}}^{\text{Ly}\alpha}$: 電離光子生成率

$$\xi_{\text{ion}}^{\text{Ly}\alpha} = \frac{N(\text{H}^0)}{L_{\text{Ly}\alpha}} = \frac{1}{8.7 C_{\text{H}\alpha} f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha} (1 - f_{\text{esc}}^{\text{LyC}})}$$

$f_{\text{esc}, \text{LyC}}$: 経験則 (Begley+24)、理論モデル
(Choustikov+24) を用いて、 $f_{\text{esc}, \text{Ly}\alpha}$ から
見積もる



$\xi_{\text{ion}}^{\text{Ly}\alpha} \times f_{\text{esc}, \text{LyC}}$ を $L_{\text{Ly}\alpha}$ に対して fitting し、
 $\rho_{\text{Ly}\alpha} \xi_{\text{ion}}^{\text{Ly}\alpha} f_{\text{esc}, \text{LyC}}$ を Ly α 光度に対し積分
して、 $\dot{n}_{\text{ion}}$ を求める

Reionization

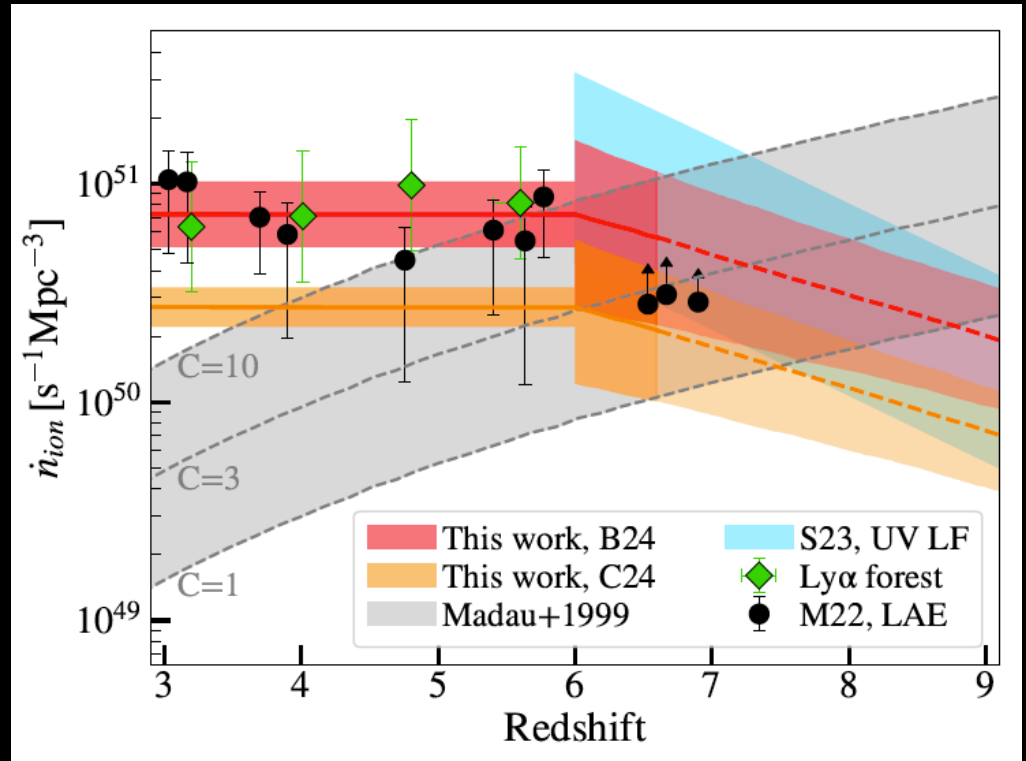
$$\dot{n}_{\text{ion}} [\text{/s/Mpc}^3] = \begin{cases} 10^{50.86} & (\text{Begley+24}) \\ 10^{50.48} & (\text{Choustikov+24}) \end{cases}$$

Begley+24のmodelはlow- z の独立な観測手法の結果とよく一致

$\text{Ly}\alpha$ 光度関数、LAEの $f_{\text{esc}, \text{Ly}\alpha}$ が無進化という仮定は、low- z の $\dot{n}_{\text{ion}}$ の平坦さも説明できる

一方 $z > 6$ ではintrinsicな $\text{Ly}\alpha$ LFの進化は不明

→UV LF (Harikane+25)の減少に比例すると仮定



Reionization

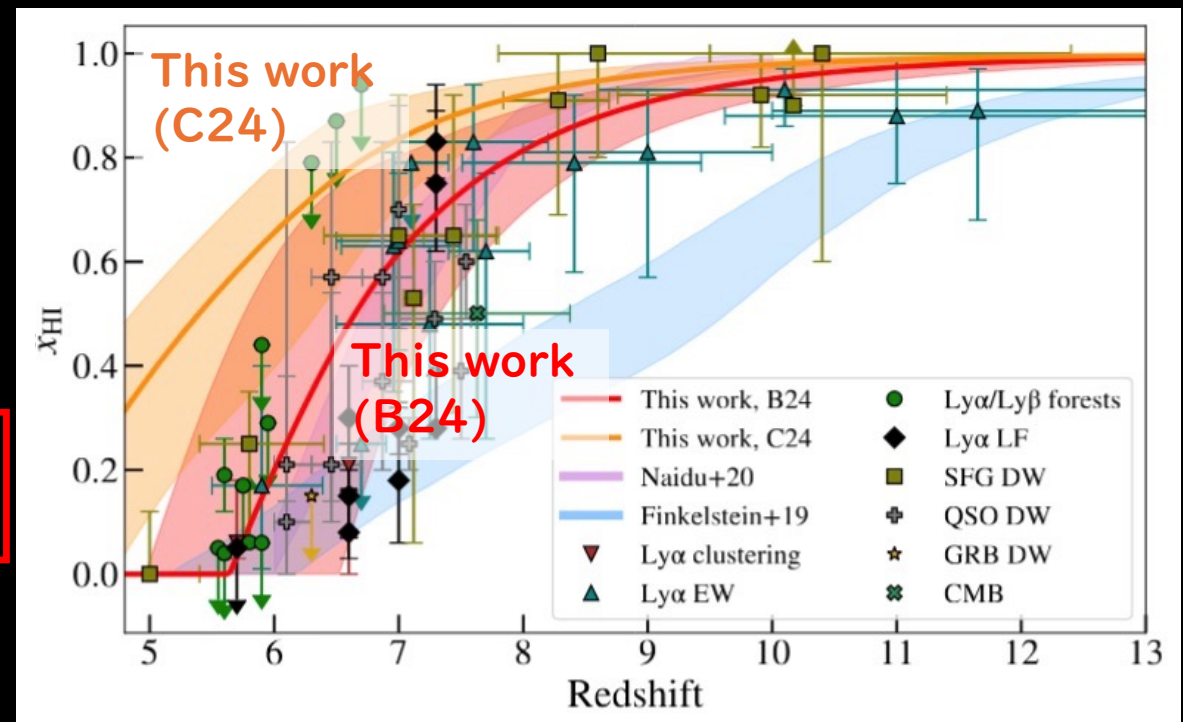
$X_{\text{H I}}$ (IGM neutral fraction)の進化

$$\dot{Q}_{\text{H II}} = \frac{\dot{n}_{\text{ion}}}{\langle n_{\text{H}} \rangle} - \frac{\bar{Q}_{\text{H II}}}{t_{\text{rec}}},$$

・**Begley+24**の経験則を用いたモデルは $X_{\text{H I}}$ についても観測およびNaidu+20とよく一致

→LAEだけで $z \sim 6$ までの再電離に必要な電離光子を出せる

一方**Choustikov+24**の理論によるモデルの場合は、LAEだけでは再電離できない



Summary

- ・LAEには年齢が若いものと古いものの2種類が存在し、Young LAEは starburst で星形成の初期段階であるのに対し、Old LAEはダストが少ないことを除き、LBGと同程度の星形成をしている。
- ・Old LAEにおける $\text{Ly}\alpha$ 脱出は、アウトフローによって、ISM内でHI/ダストの柱密度が低い領域が作られたことによる可能性がある。
- ・星形成銀河の $\text{Ly}\alpha$ 放出は、 $f_{\text{esc}, \text{Ly}\alpha}$ が進化しているのではなく、星形成銀河中のLAEの割合の進化だけで説明できる。
- ・LAEが出す電離光子の量を計算した結果、LAE単独で宇宙再電離が完了できる可能性が示された。