

準解析的アプローチで探る Lyman α Emitters

京大理 宇宙物理学教室

学振特別研究員 DC2

小林 正和 (MARK)

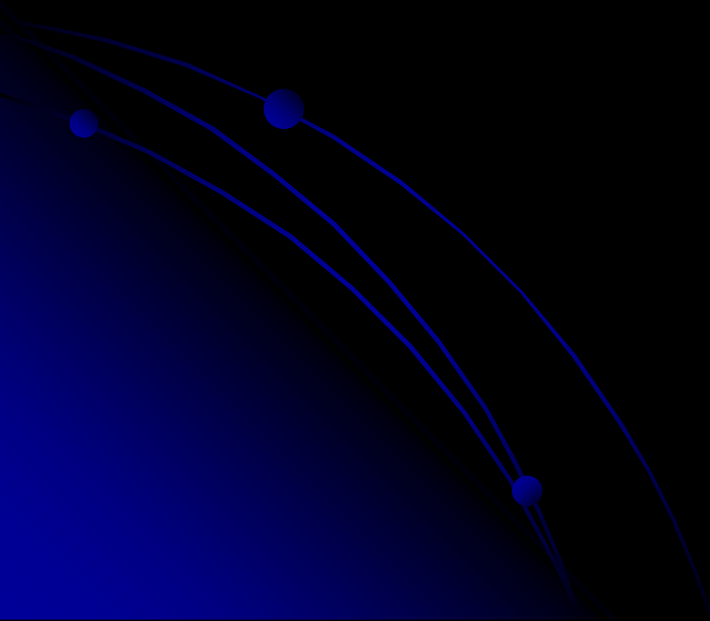
アウトライン

1. **LAE の観測的特徴**
2. **LAE 理論モデル**
3. **最新の LAE 理論モデル**
4. **LAE から探る宇宙再電離**

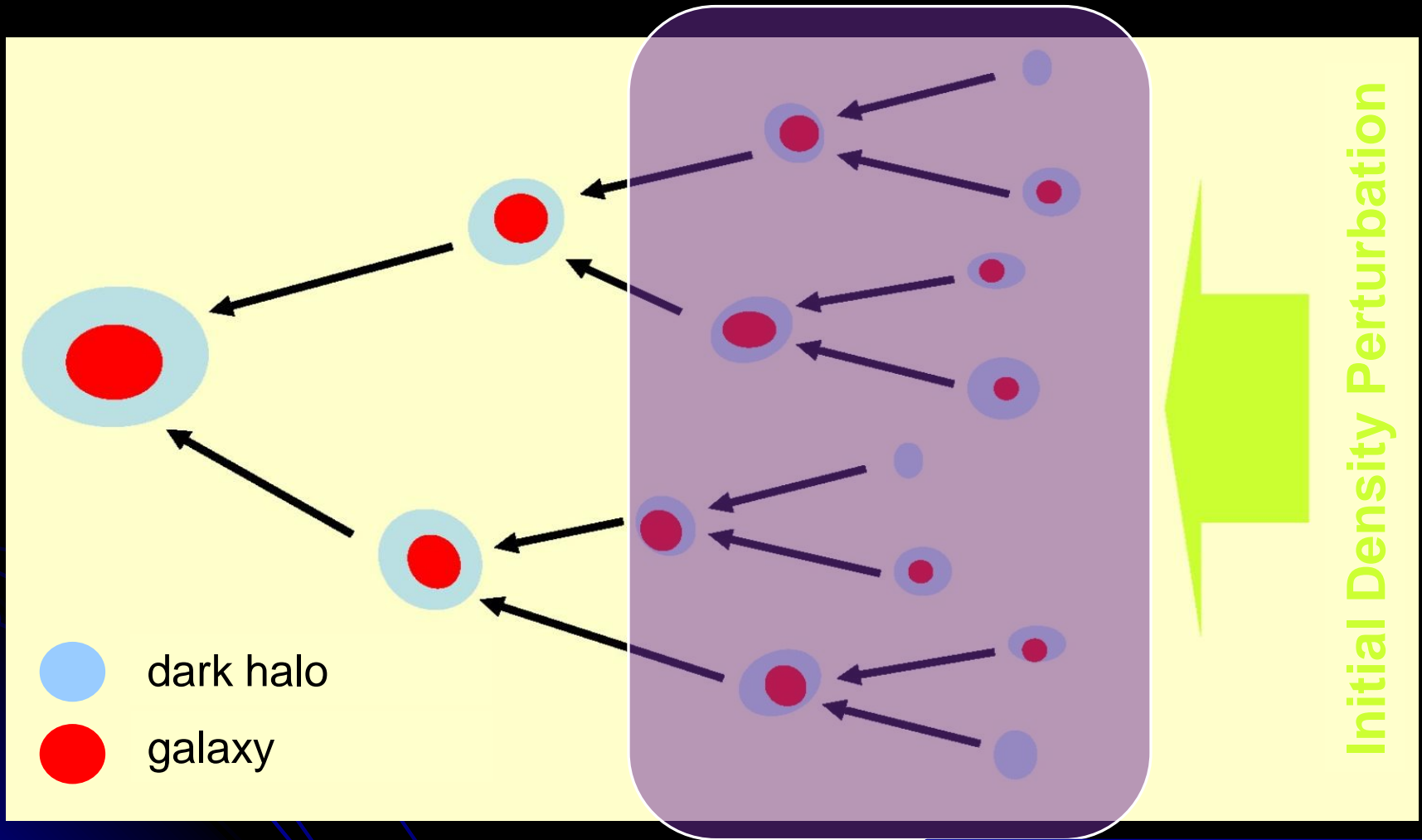
Ly α : Lyman α

LAE: Ly α Emitter

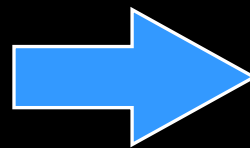
1. LAE の観測的特徴



階層的構造形成と LAE

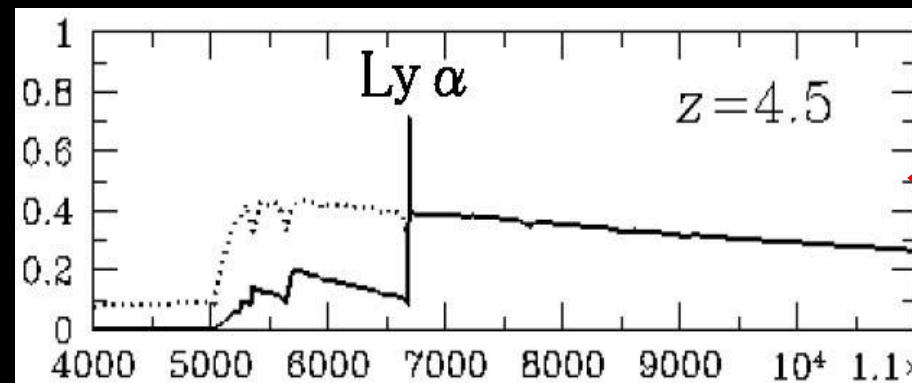


大質量星からの電離光子
→ 大量の Ly α 光子が生成
(Partridge & Peebles '67)

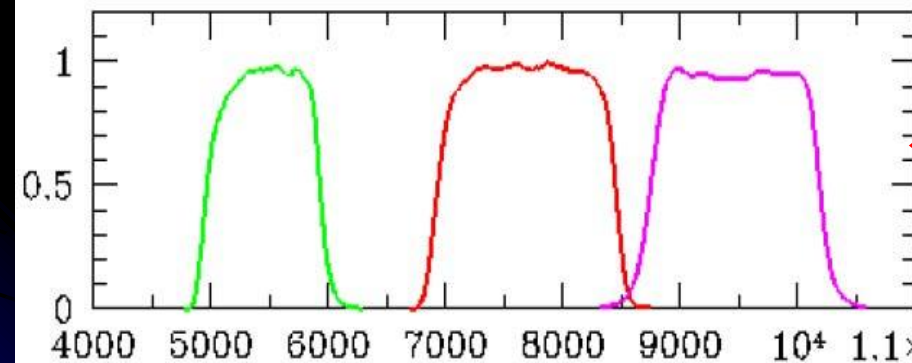


Lyman α
Emitter (LAE)

LAE の選択法

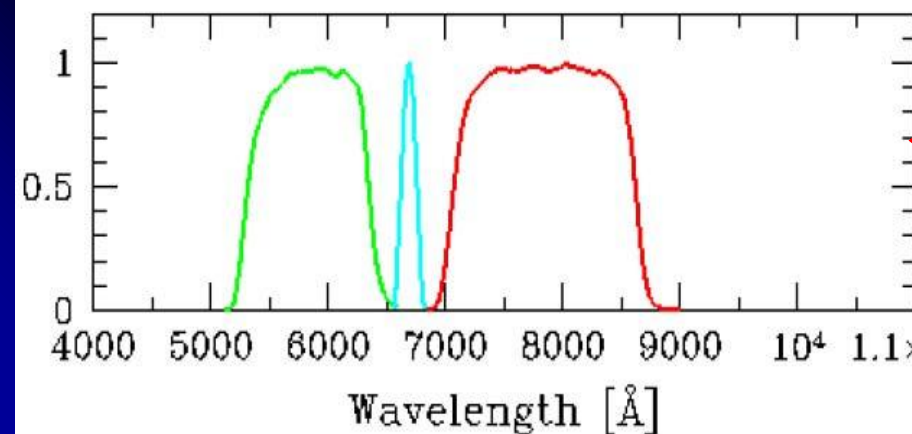


星形成銀河 @ $z=4.5$ の
モデル SED



Lyman Break Galaxies
(LBGs) の選択法:
広帯域フィルター

連続光が明るい銀河を選択



LAEs の選択法:
広帯域 + 狭帯域フィルター

輝線が明るい銀河を選択

LBG の選択法と相補的

LAE の観測的特徴(1)

◆ 強い Lyman α ($\text{Ly}\alpha$) 輝線

— 典型的な静止系等価幅 $\text{EW}(\text{Ly}\alpha) > 20 \text{ \AA}$

◆ 暗く青い rest-frame UV 連続光

◆ 小さなサイズ

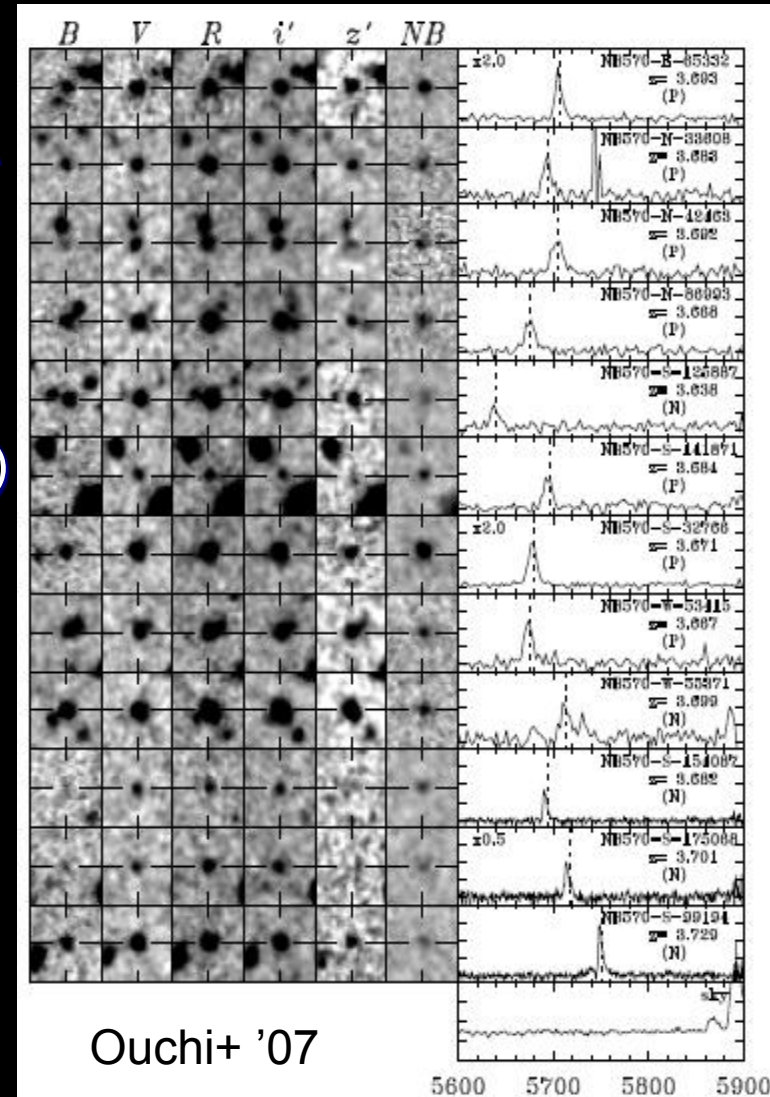
— 典型的には $< 1 \text{ kpc}$ (e.g., Pascarelle+ '96)

ダストをほとんど含まない
若い星形成銀河？

◆ LBG と同程度の高い個数密度

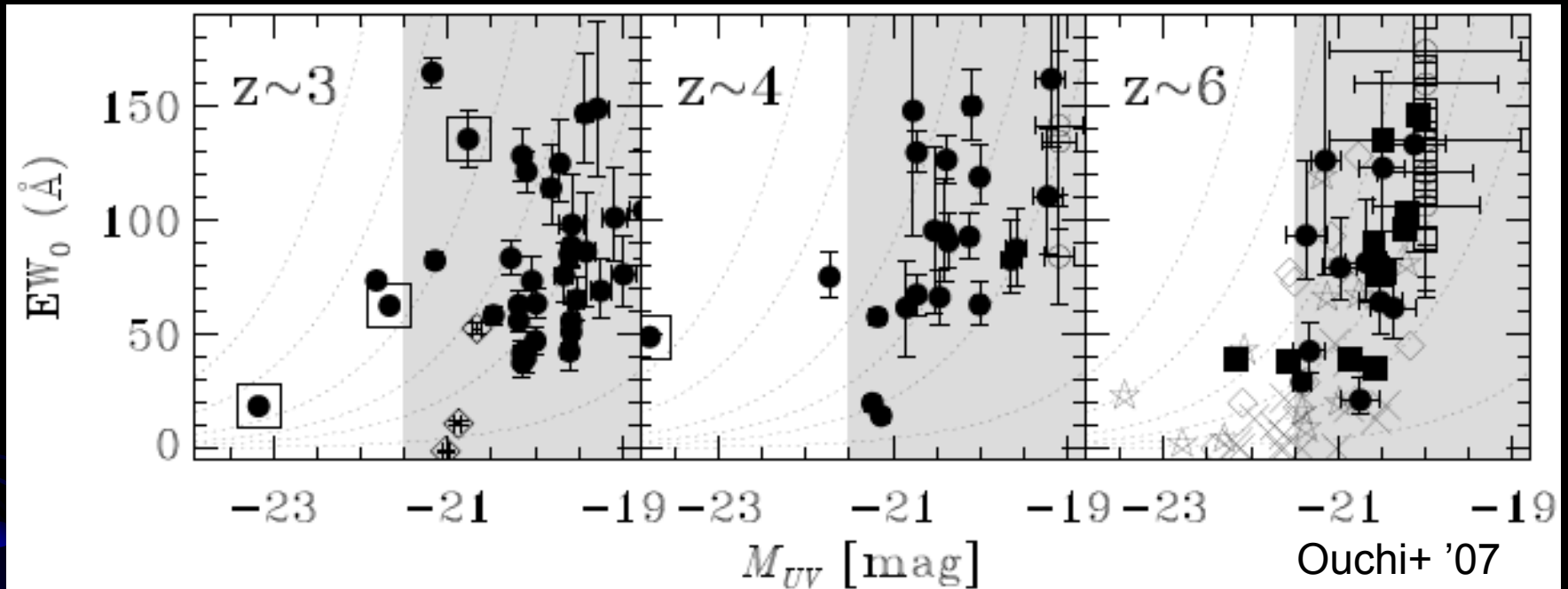
— $\sim 10^{-3} h^3/\text{Mpc}^3$ at $L(\text{Ly}\alpha) > 10^{42} \text{ erg/s/h}^2$

銀河の形成史を探る上で
非常に重要な種族



LAE の観測的特徴(2)

◆ UV 絶対等級 (M_{UV}) と Ly α 等価幅 (EW) の関係



— UV で明るい LAE に $EW(\text{Ly}\alpha)$ が大きい LAE はいない
(Shimasaku+ '06; Ouchi+ '07)

— LBG にも同じ傾向 (Ando+ '05)

LAE の観測的特徴(3)

◆ ガンマ線バースト(GRB)母銀河と LAE の強い相関

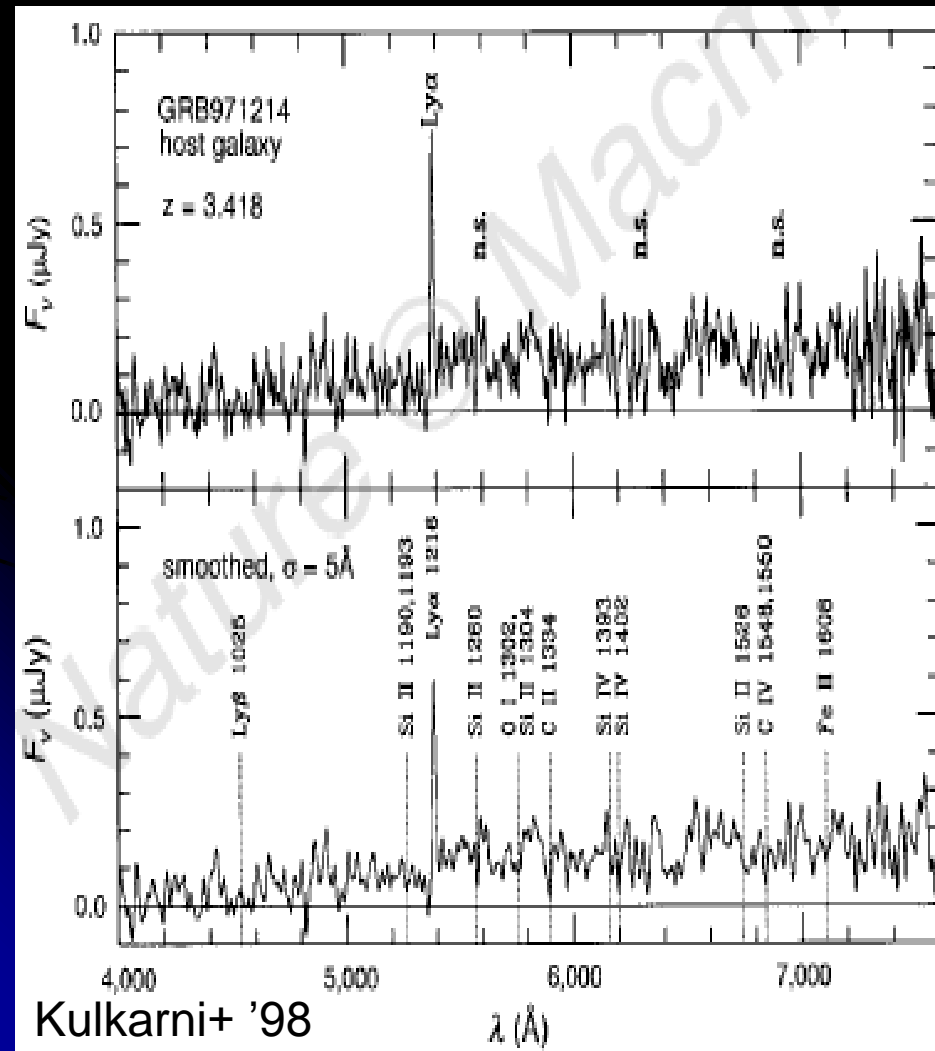
— GRB 母銀河 @ high- z の LAE fraction は非常に高い (Fynbo+ '03)

LAE / GRB 母銀河
= 4 / 5 ~ 80% @ $z \sim 2-3$

> LAE / LBG ~ 25% @ $z \sim 3$
(Shapley+ '03)

GRB971214 ($z=3.4$): EW = 14 Å (Kulkarni+ '98)
GRB000926 ($z=2.0$): EW = 71 Å (Fynbo+ '02)
GRB011211 ($z=2.1$): EW = 21 Å (Fynbo+ '03)
GRB021004 ($z=2.3$): EW > 50 Å (Moller+ '02)
GRB030323 ($z=3.4$): EW ~ 145 Å (Vreeswijk+ '04)

準解析的アプローチによる理論研究
→ 新納、戸谷、小林

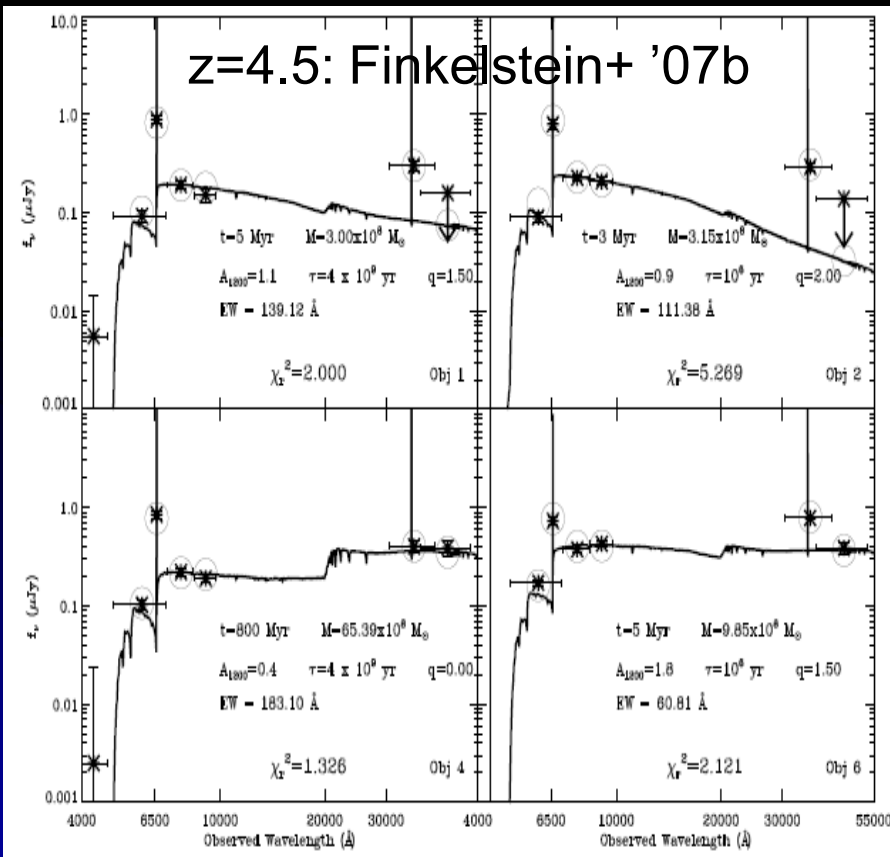


LAE の星種族

◆ SED fit から星質量への制限

→ rest-frame optical の情報が不可欠

$z > 3$ → observed-frame NIR-IR: **J, H, K or Spitzer IRAC**



多くは NIR-IR で検出限界以下
→ stacked sample を解析

$z=3.1$: Gawiser+ '06; Lai+ '07b;
Nilsson+ '07

$z=4.5$: Finkelstein+ '07a,b

$z=5.7$: Lai+ '07a

$z=4.0-5.7$: Pirzkal+ '07

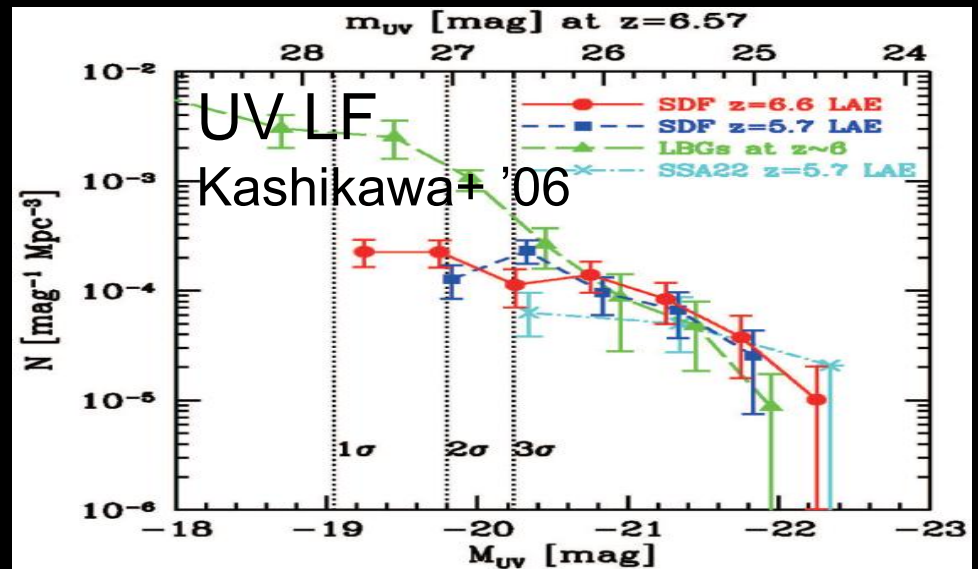
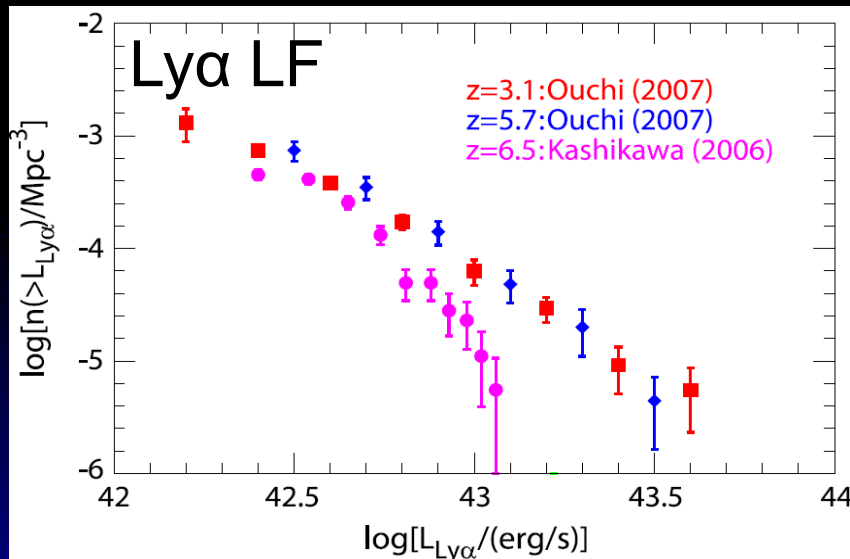
$z=6.56$: Chary+ '05

星質量: $\sim 10^8 - 10^9 M_{\text{sun}}$
年齢: $\sim 10 - 100$ Myr

LAE の観測的統計量

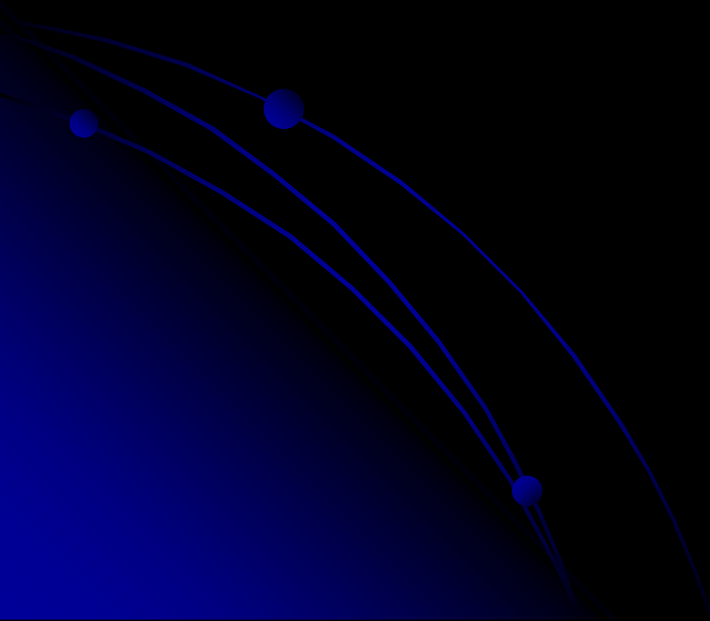
◆光度関数 (LF)、EW(Ly α) 分布

- ① Ly α LF @ $z < 6$, UV LF @ $z \sim 3-7$ → ほぼ無進化
- ② Ly α LF @ $z > 6$ → 明るい側が減少
→ IGM 中の中性水素による Ly α の減光、宇宙の再電離



観測から得られた LF と理論モデルとの比較
→ LAE や銀河形成史に関する非常に重要な情報

2. LAE 理論モデル



LAE 理論モデルの必須条件

① 詳細な階層的構造形成の効果

○ SAM
○ SPH

ダークハローの合体・形成史の中での銀河形成

② 軽い銀河 ($< 10^9 M_{\text{sun}}$) もきちんと resolve

○ SAM
△ SPH

③ 大きなボックスサイズ

光度関数 (= 観測的統計量) を得るため

④ 各銀河からの Ly α 離脱率 ($f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$) モデルの取捨選択

Ly α は水素による散乱断面積大

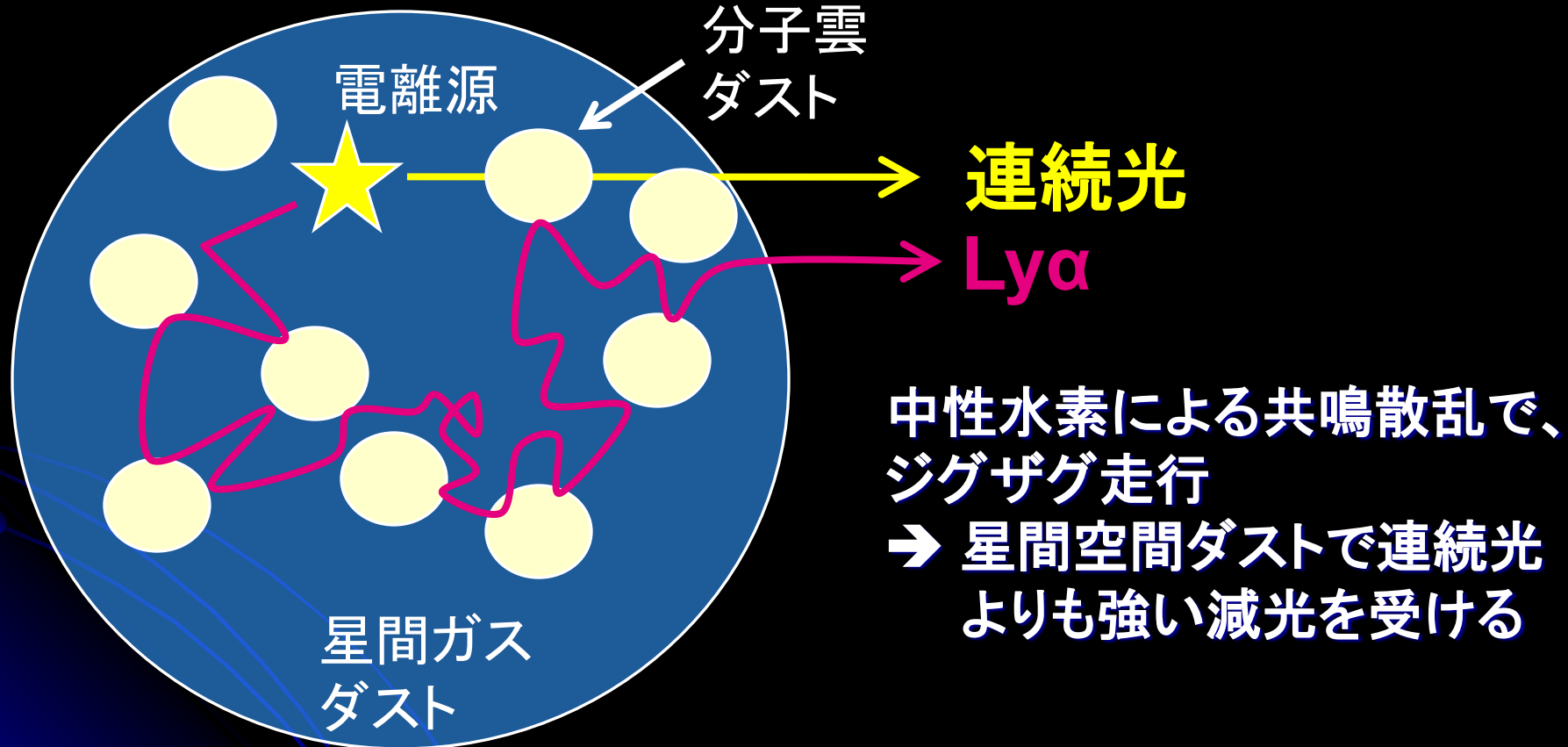
→ 星間物質のダスト量・速度構造に sensitive

○ SAM
× SPH

準解析的アプローチ (SAM)
数値シミュレーション (SPH)

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ に対する理論的予想 (1)

- ◆ 中性ガスが静的、星間ダストが一様分布する場合

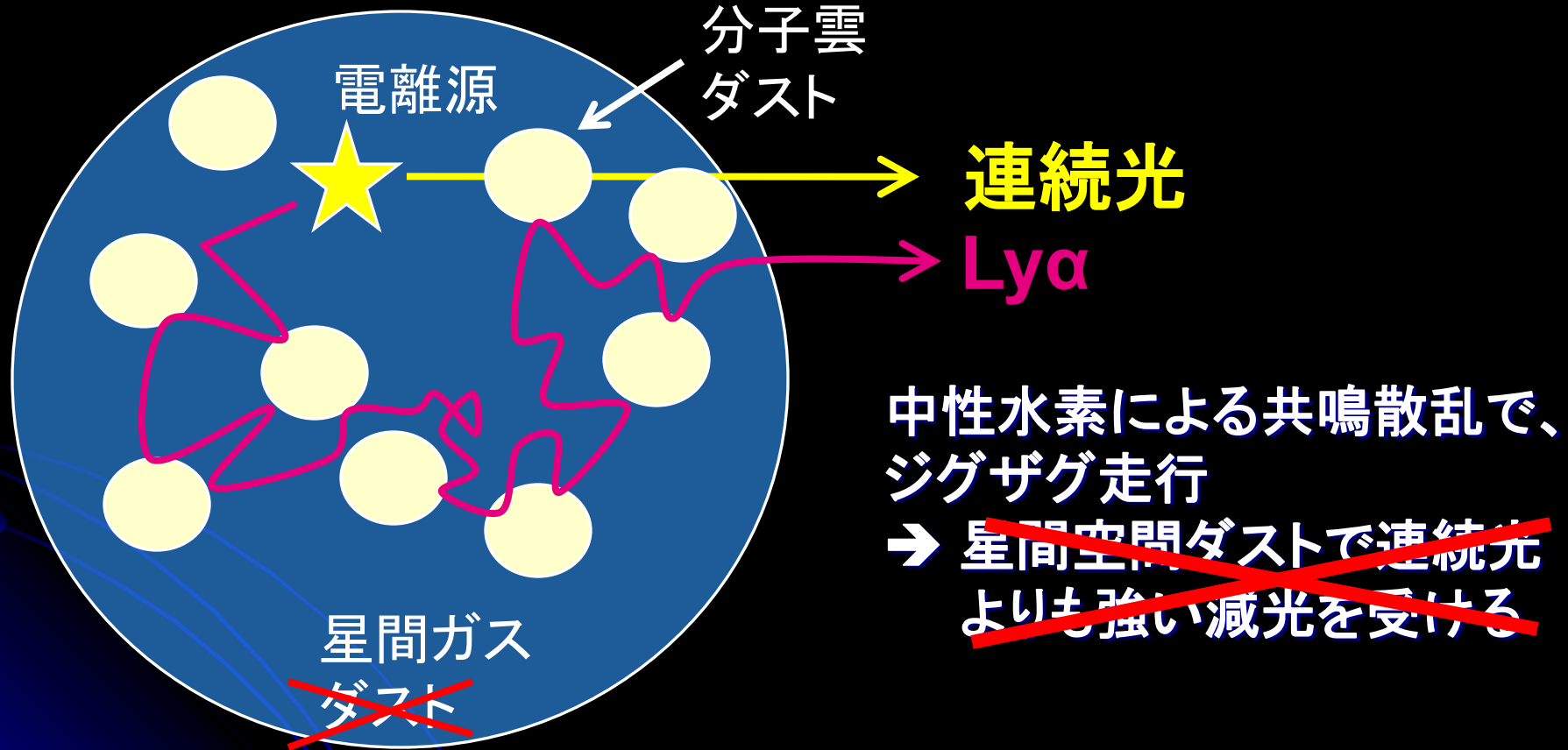


Neufeld '90

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ はダスト量(柱密度)に依存
連続光とは異なる光学的厚さ

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ に対する理論的予想 (2)

- ◆ 中性ガスが静的、ダストが分子雲中に分布する場合

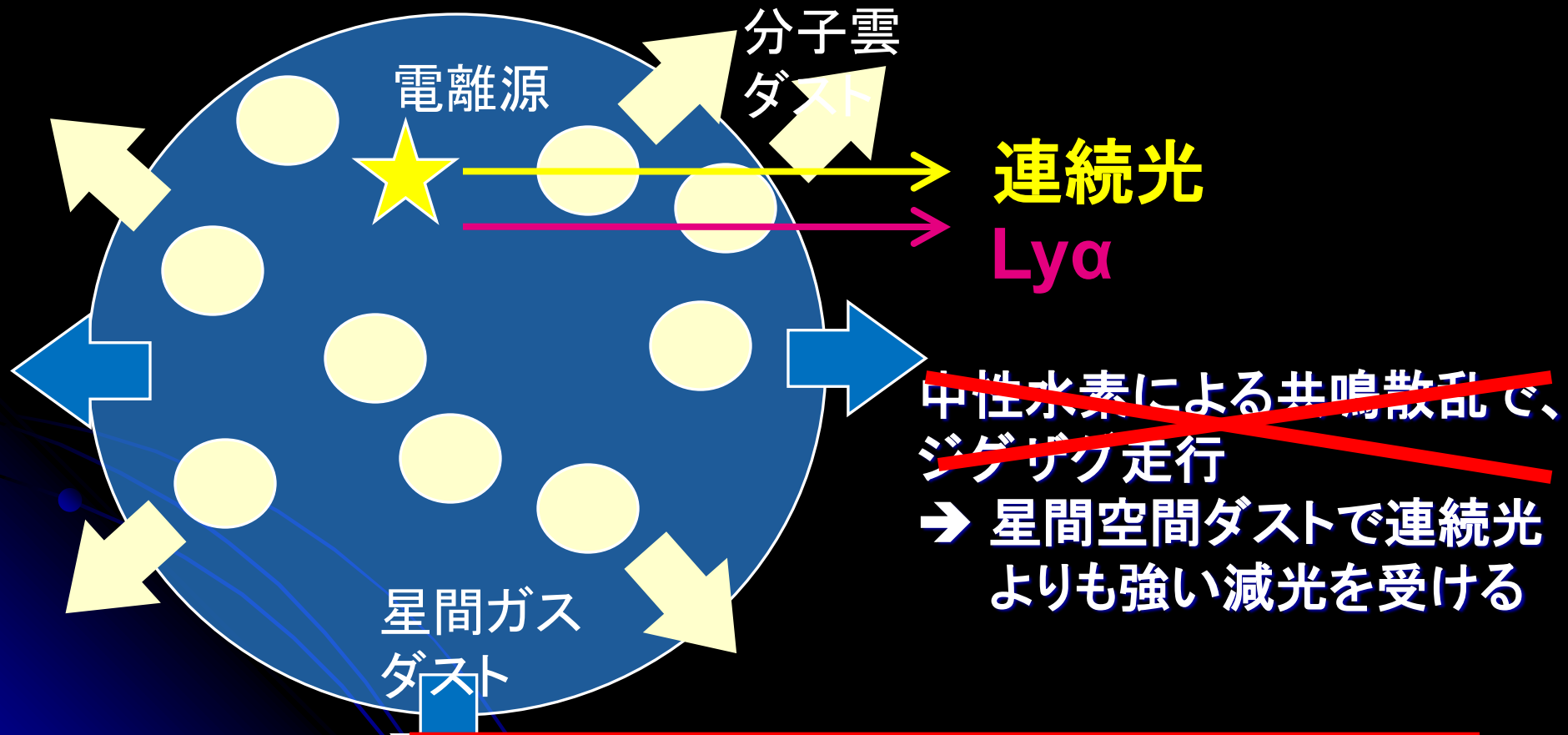


Neufeld '91

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ はダスト量 (柱密度) に依存しない
連続光とは異なる光学的厚さ

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ に対する理論的予想 (3)

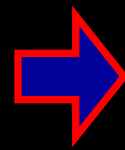
◆ 銀河スケールのアウトフローが吹く状況



$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ はダスト量(柱密度)に依存しない
連続光とは異なる光学的厚さ

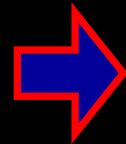
$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ に対する観測からの示唆

◆ 金属量依存性
(Charlot & Fall '93)



低金属量ほど $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ 大
(\Leftrightarrow ダスト量小)

◆ ガス運動状態依存性
(Kunth+ '98)



銀河スケールのアウトフロー
(銀河風)が吹くと $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ 大

→ 共に理論的予想と consistent

星間ダスト減光 & アウトフローの効果を
 $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ に組み込むべき

LAE 理論モデルの先行研究

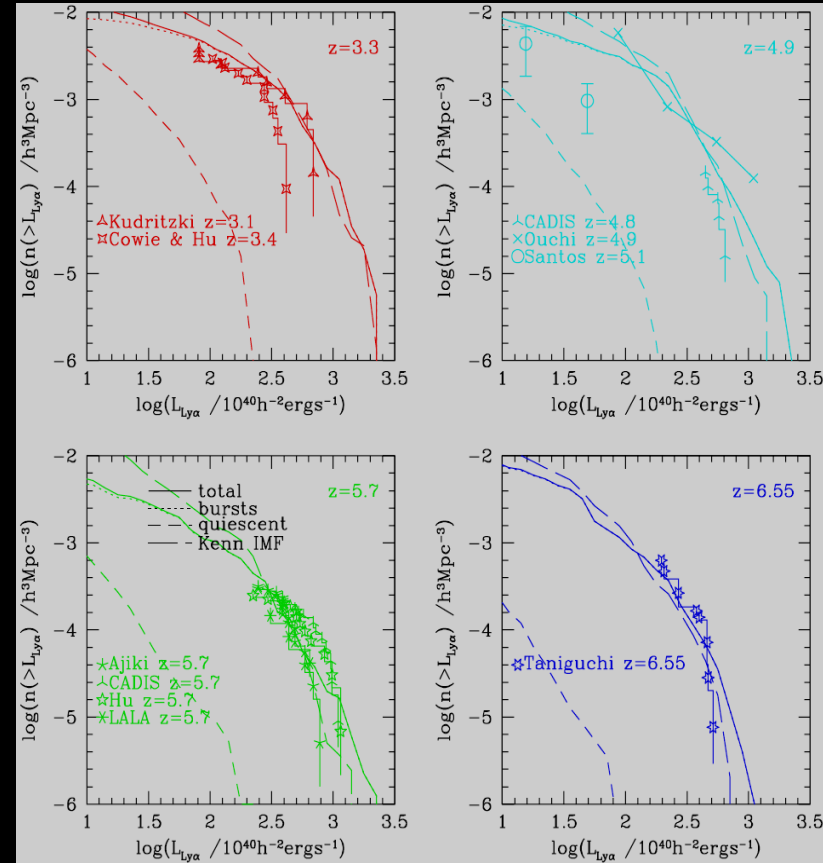
◆ 準解析的銀河形成モデル

(Le Delliou+ '05, '06)

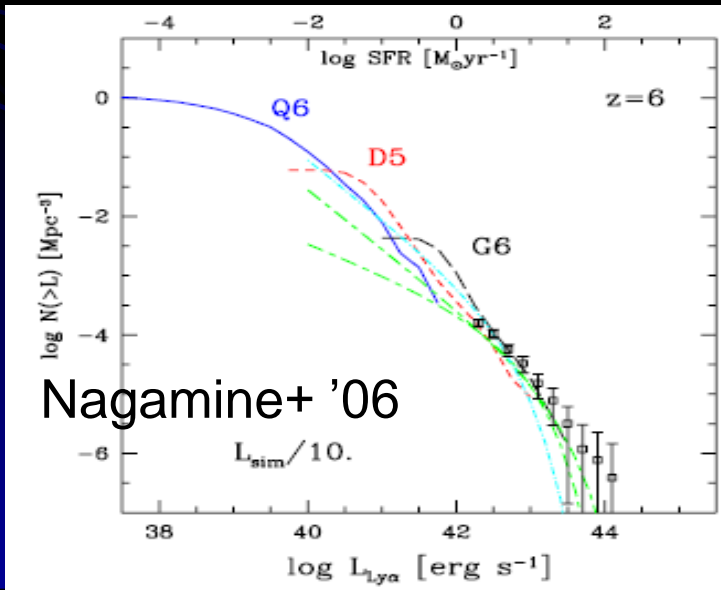
$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$: 全銀河で一定

◆ 数値シミュレーション

(e.g., Barton+ '04; Nagamine+ '06)



Le Delliou+ '06

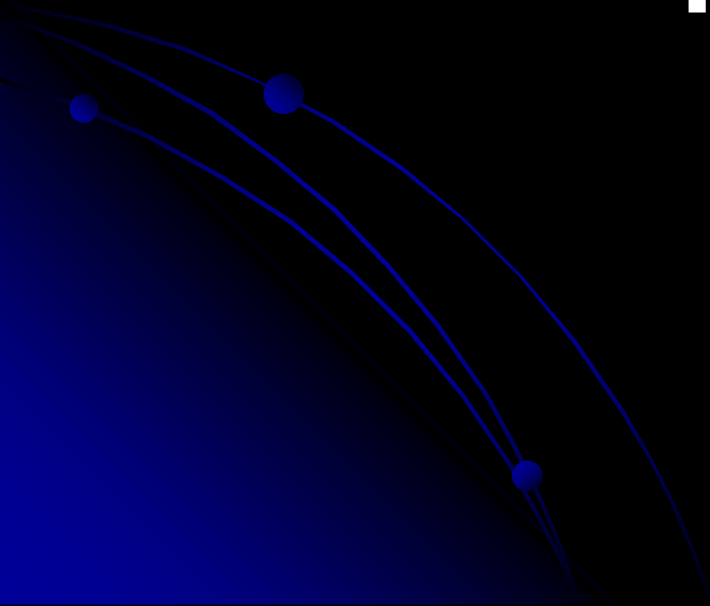


Nagamine+ '06

$f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$: 全銀河で一定 or 連続光と同じ

3. 最新の LAE 理論モデル

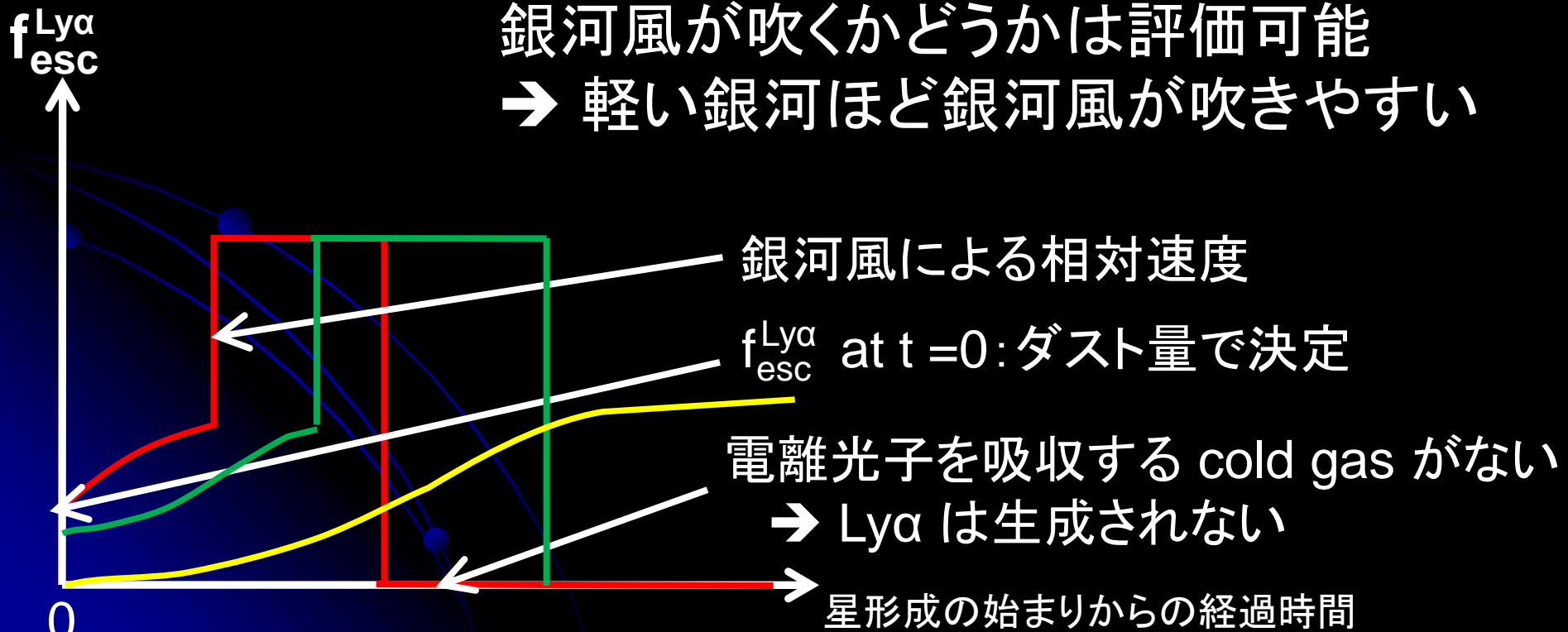
**(MARK, Totani, Nagashima, 2007,
ApJ, 670, 919)**



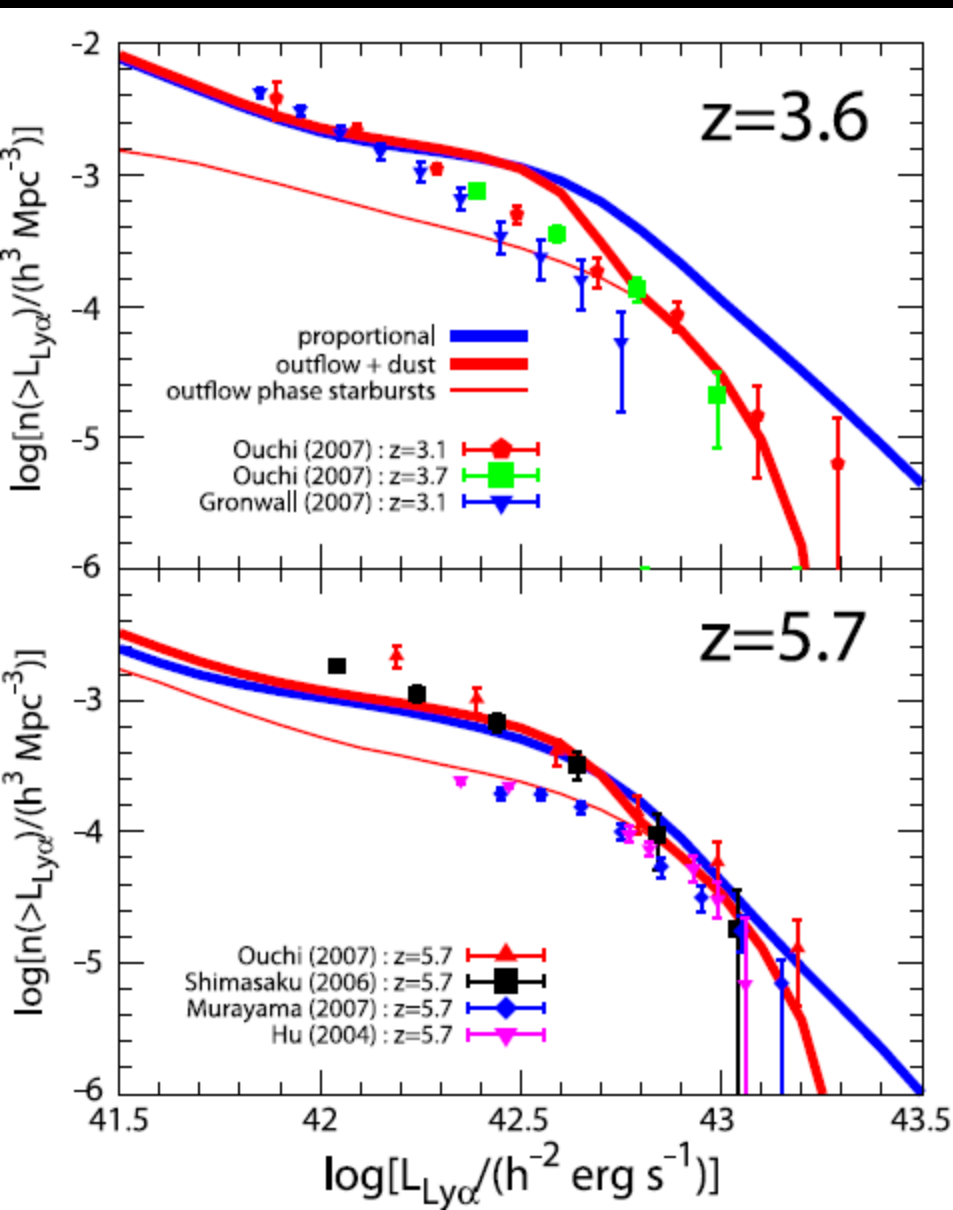
準解析的モデル + $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ の現象論的モデル

ダスト減光: ダスト量に応じた $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$
→ ダスト量小ほど $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ 大
連続光とは異なる吸収強度

アウトフロー: 銀河風が吹くと $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ 大
銀河風が吹くかどうかは評価可能
→ 軽い銀河ほど銀河風が吹きやすい



Comparison with Ly α LF: $z < 6$



一定値モデル:

フリーパラメータは1つのみ

→ Ly α LF はハローの進化に伴い進化

→ $z \sim 3$ Ly α LF の明るい側を過大評価

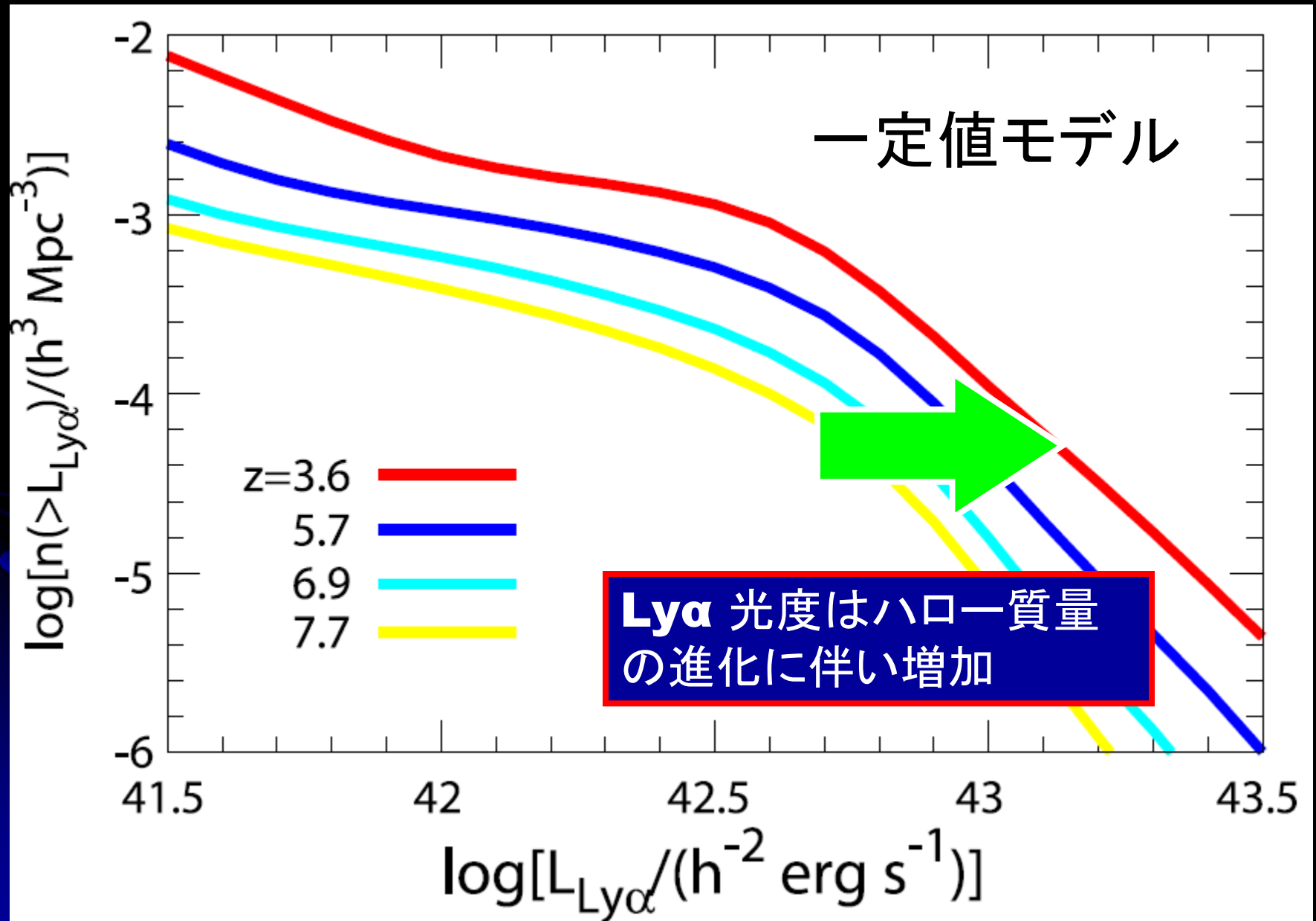
アウトフロー+ダストモデル:

フリーパラメータは3つ

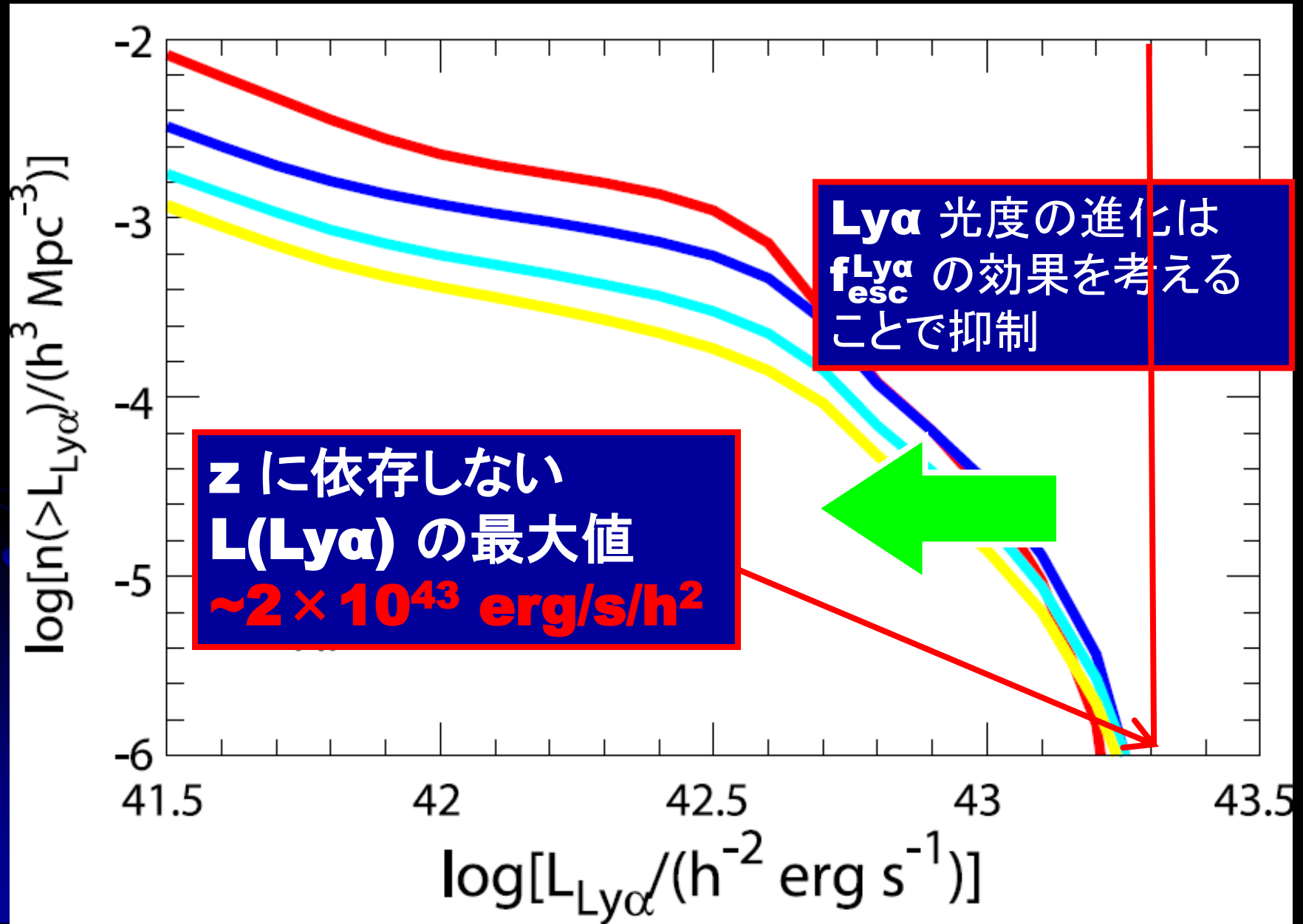
→ Ly α LF をよく再現

→ 銀河風の吹く銀河が Ly α LF の明るい側を dominate

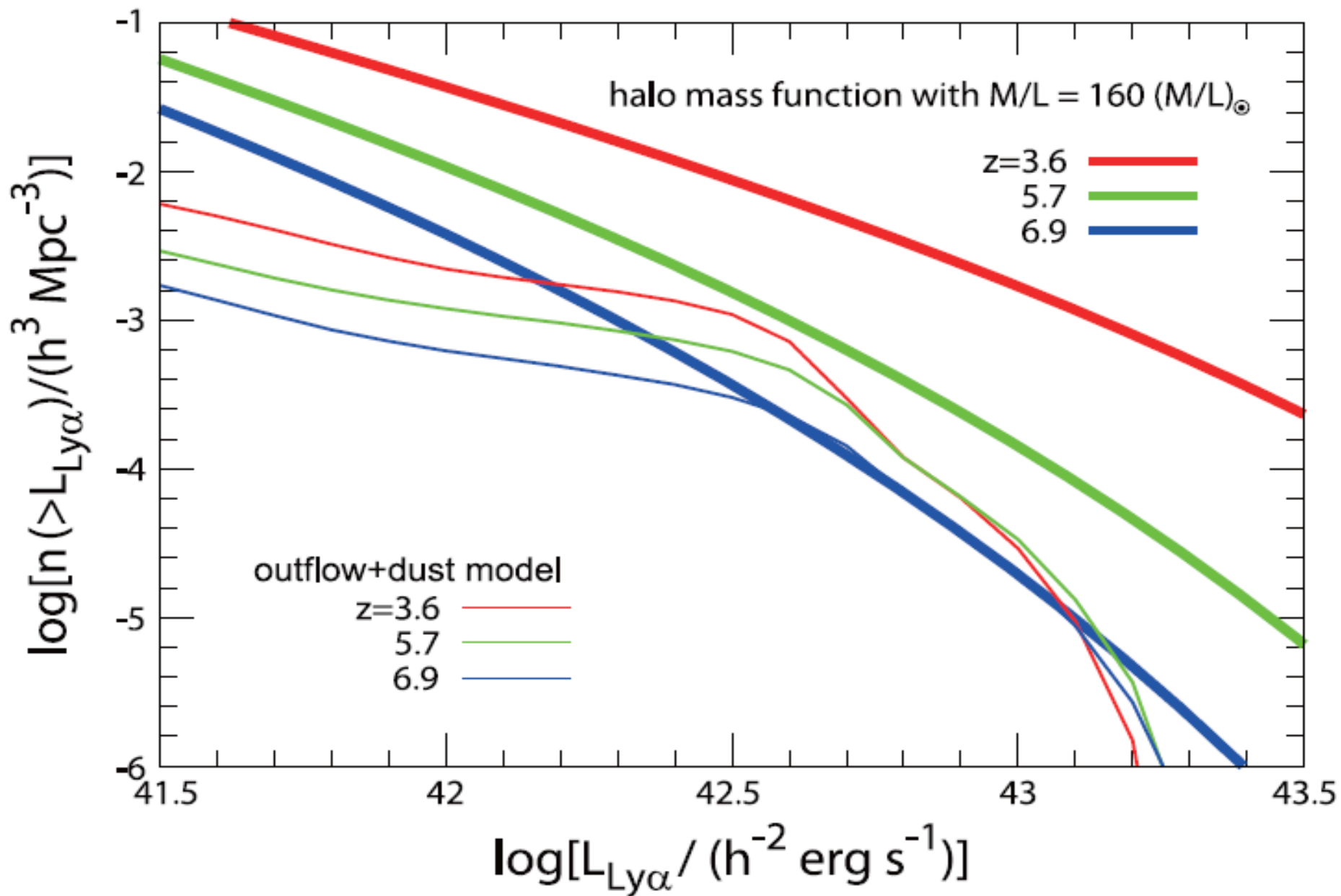
Redshift Evolution of Ly α LF



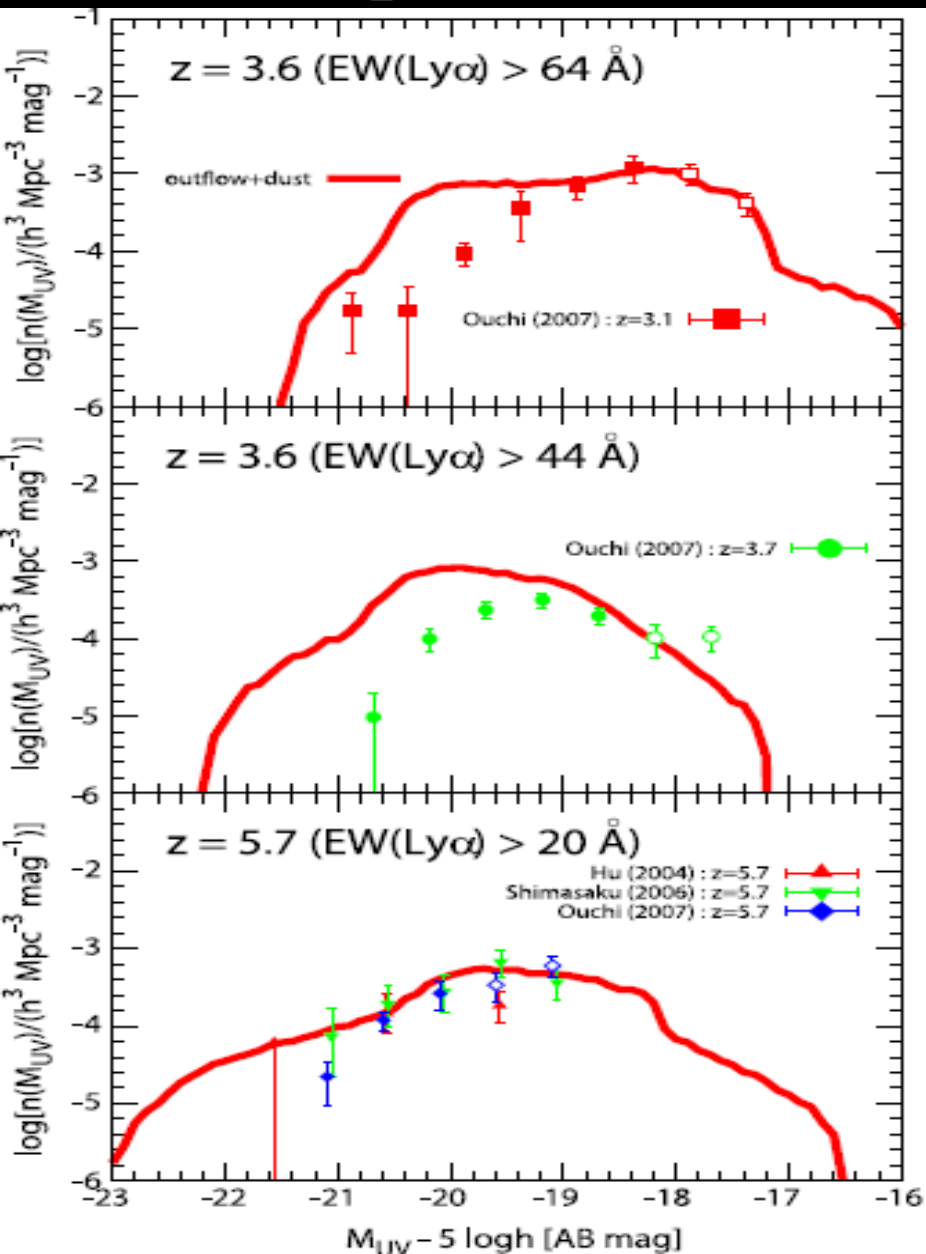
Redshift Evolution of Ly α LF



ハロー質量関数の進化との比較

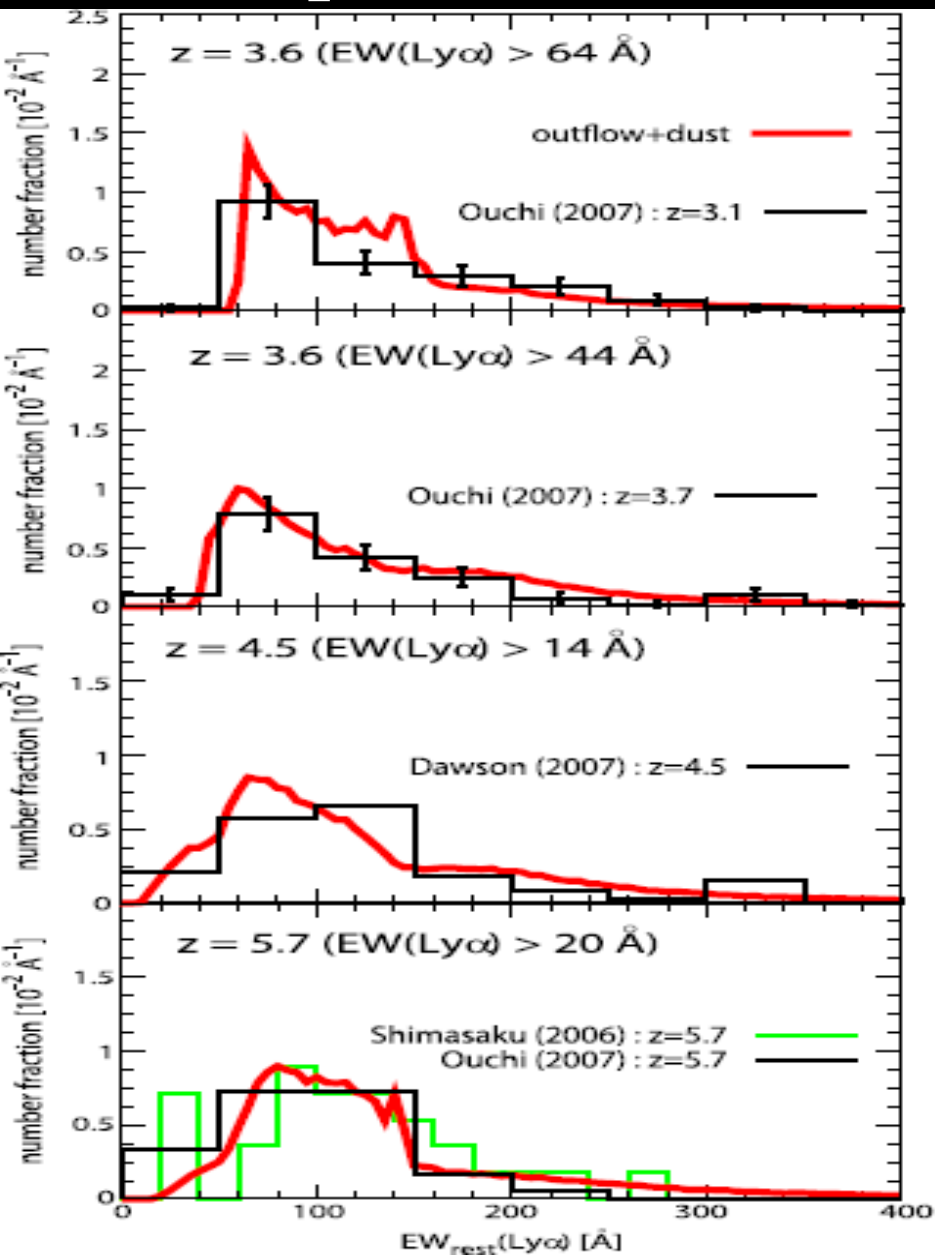


Comparison with UV LF: $z < 6$



- ◆ Ly α 光度と EW(Ly α) の閾値は比較する観測に合わせた
- ◆ $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ のパラメータは固定
→ **フリーパラメータは1つもない**
- ◆ UV LF の観測データをよく再現
→ 明るい側を1-2 等級ほど過大評価?
→ top-heavy IMF?

Comparison with EW(Ly α): z < 6



◆ Ly α 光度と EW(Ly α) の閾値は比較する観測に合わせた

◆ $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ のパラメータは固定
→ フリーパラメータは 1 つもない

◆ 観測結果をよく再現
Pop III は特に必要ない

4. LAE から探る宇宙再電離



宇宙の再電離と $z > 6$

◆ Gunn-Peterson テスト: クェーサー吸収線系

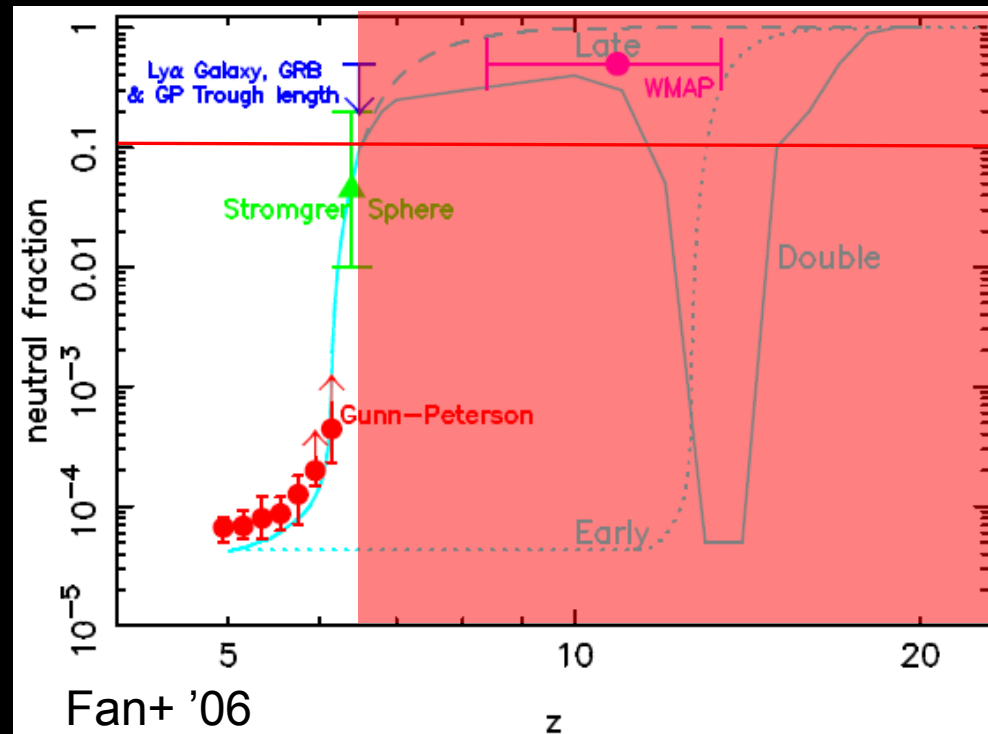
再電離の完了時期 (IGM の中性度 $x_{\text{HI}} < 10^{-4}$) にのみ sensitive
— Ly α の line center における散乱断面積

◆ LAE の Ly α 輝線

再電離の初期 ($x_{\text{HI}} > 0.1$) に sensitive (Santos '04)

— Ly α の damping wing
における散乱断面積

LAE Ly α LF は
 $z > 6$ で暗くなる
ことが示唆



宇宙の再電離と $z > 6$

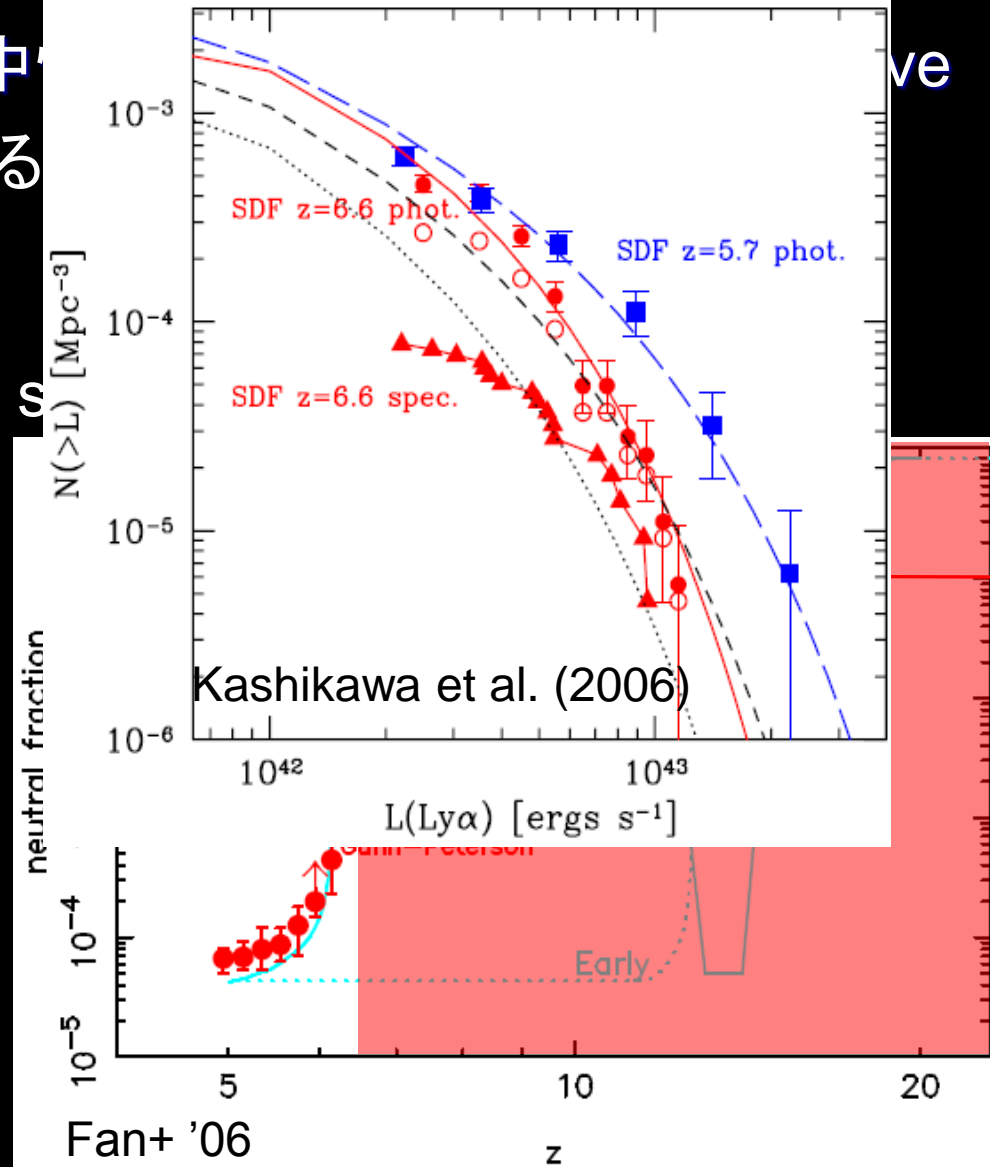
◆ Gunn-Peterson テスト: クェーサー吸収線系

再電離の完了時期 (IGM の中性水素の減少)
 - Ly α の line center における

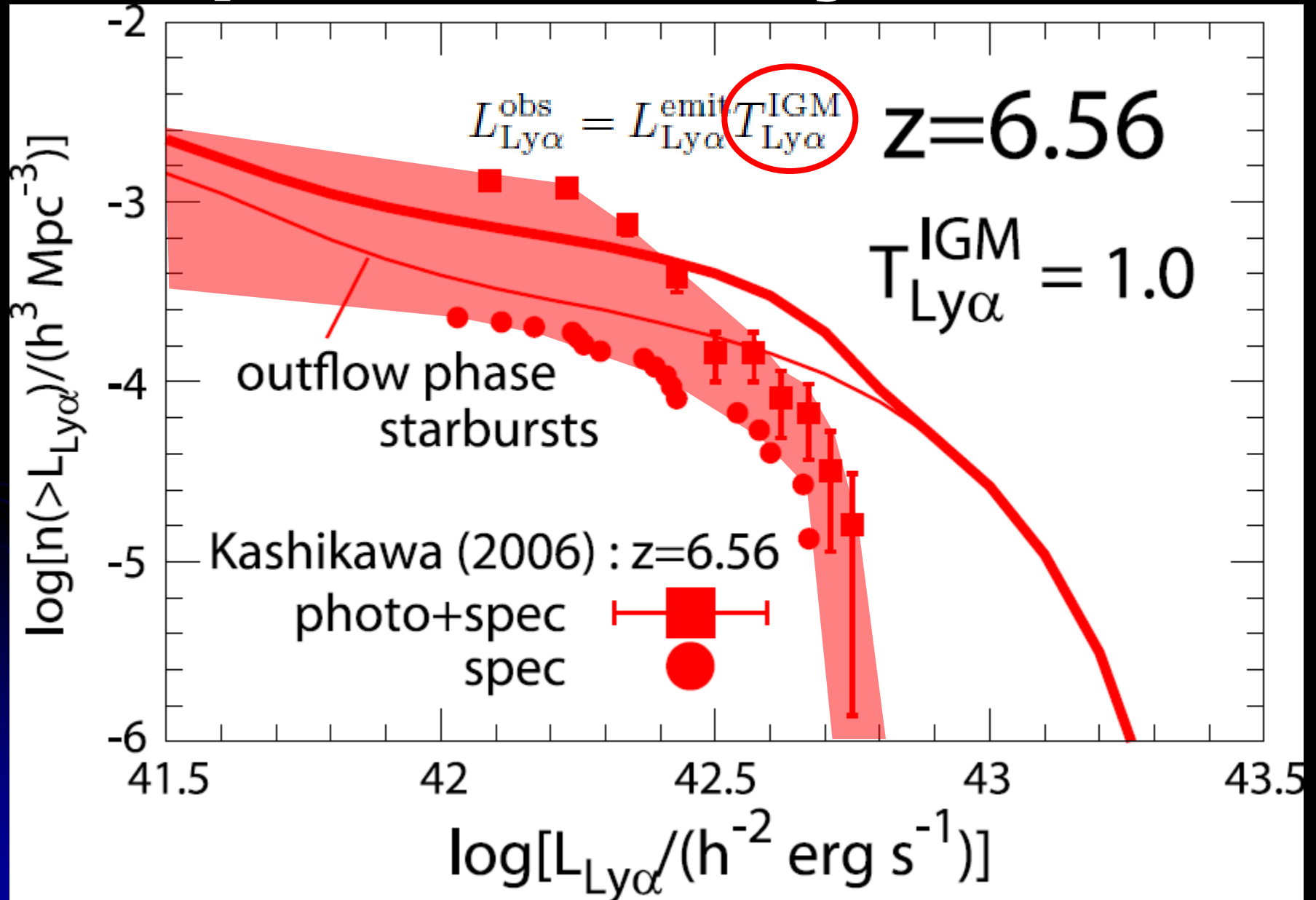
◆ LAE の Ly α 輝線

再電離の初期 ($x_{\text{HI}} > 0.1$) に s...
 - Ly α の damping wing
 における散乱断面積

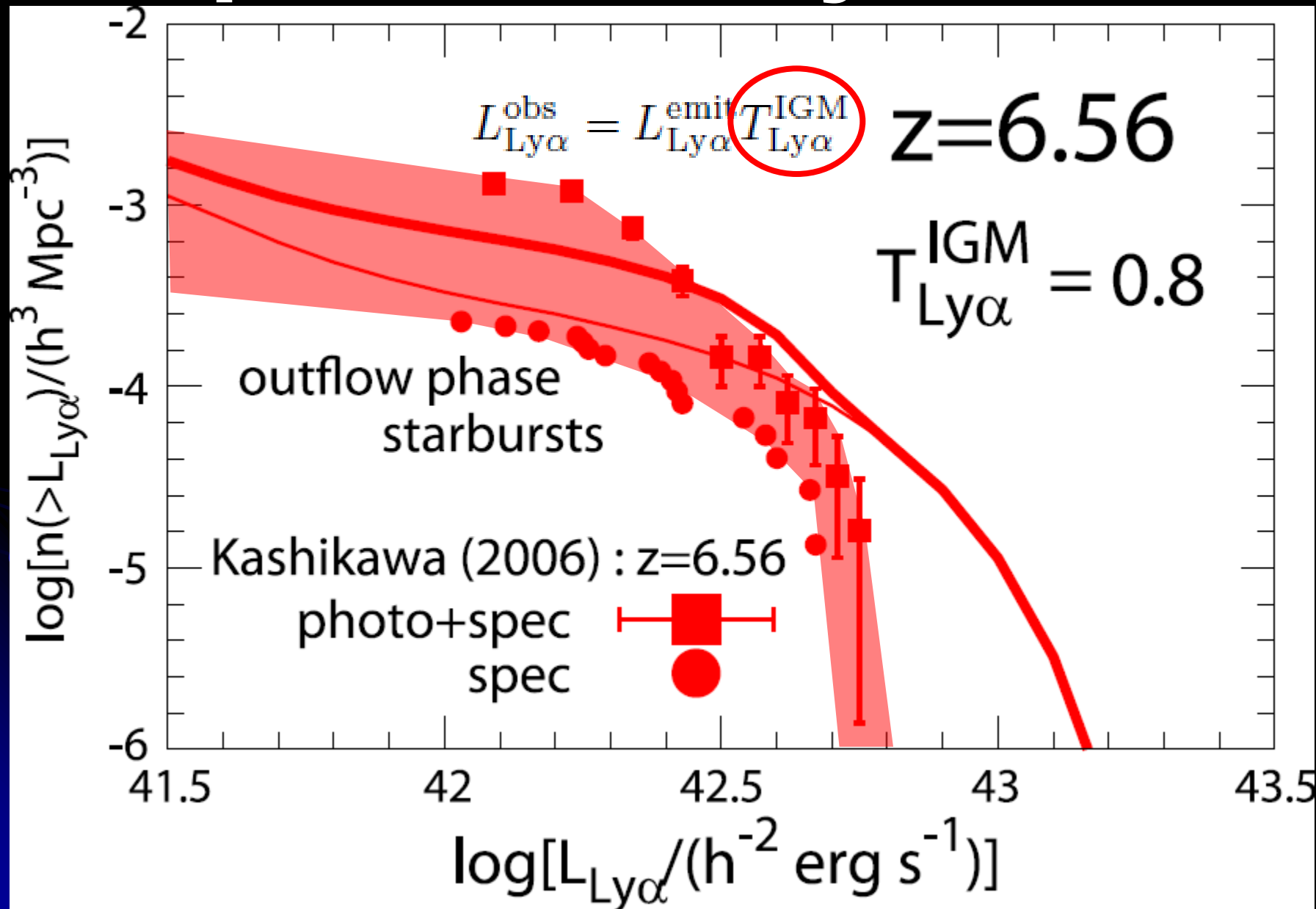
**LAE Ly α LF は
 $z > 6$ で暗くなる
 ことが示唆**



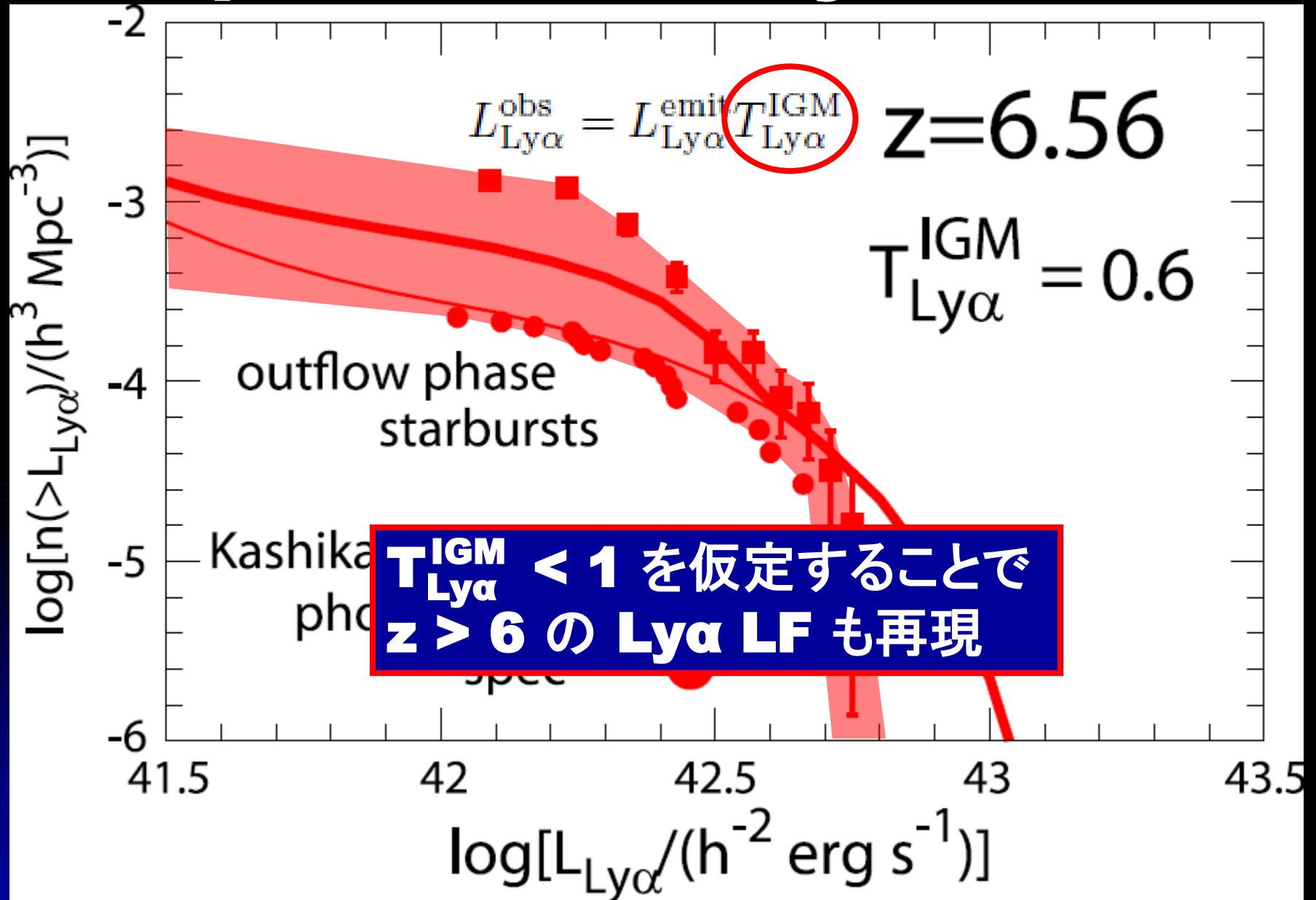
Comparison with Ly α LF: $z > 6$



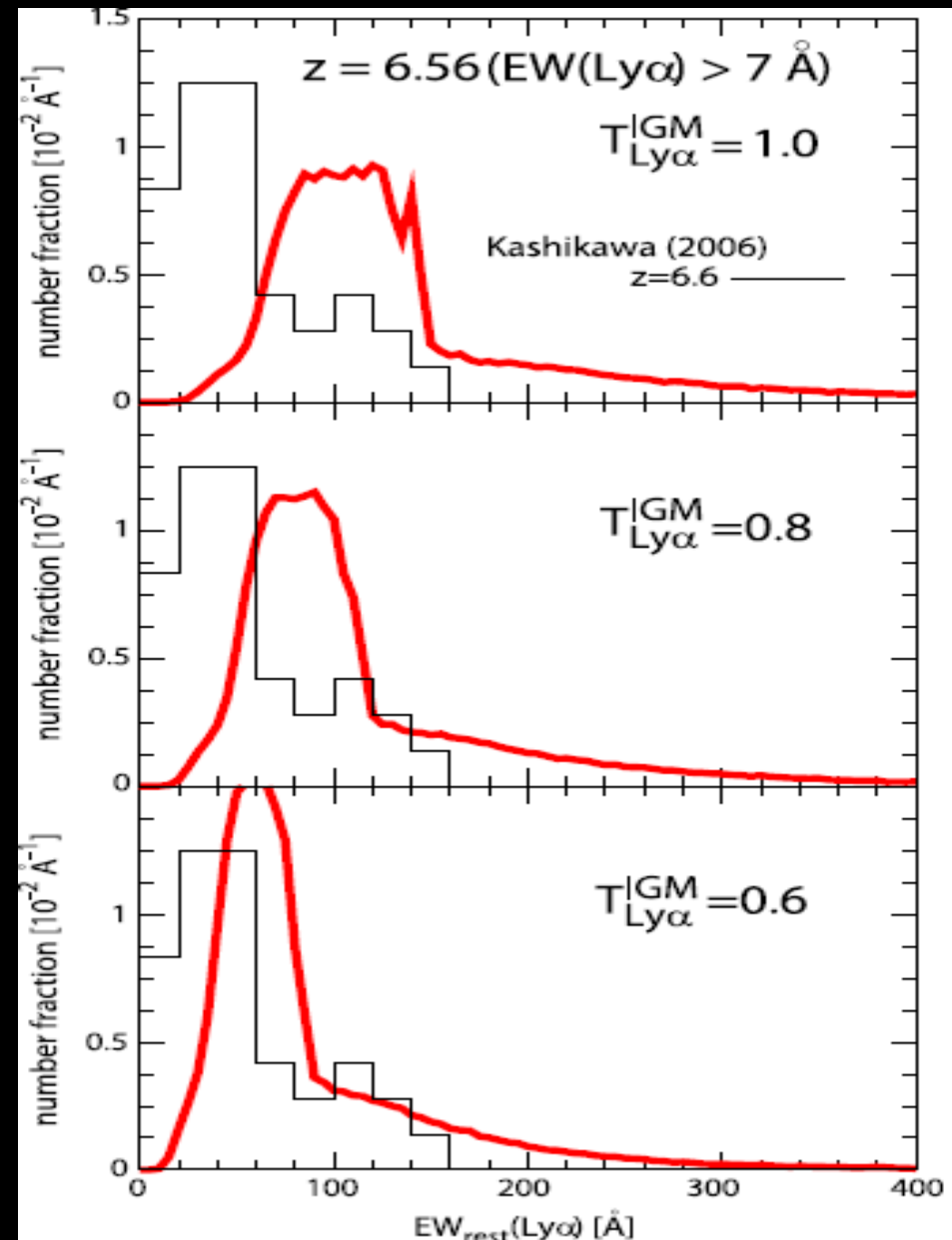
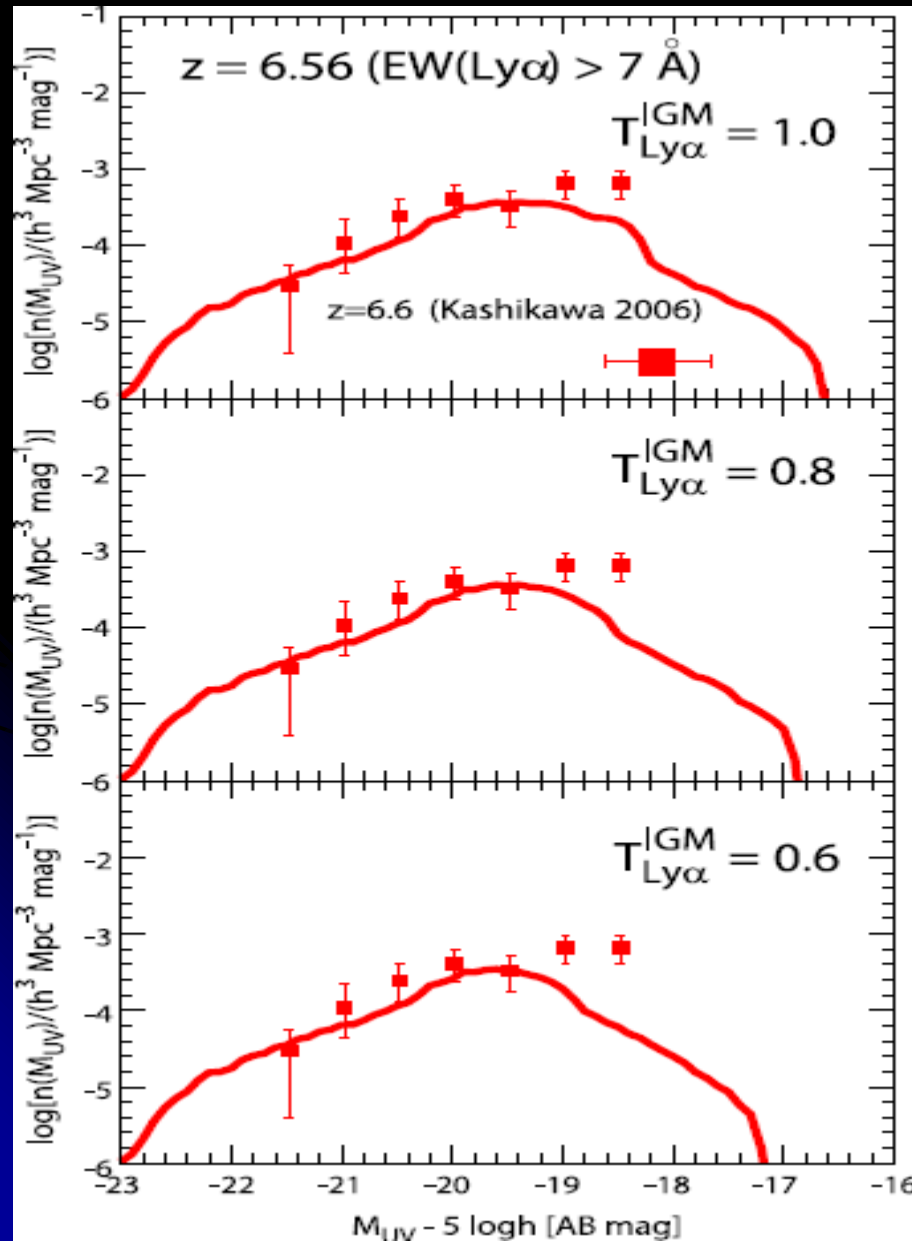
Comparison with Ly α LF: $z > 6$



Comparison with Ly α LF: $z > 6$



Comparison with UV LF & EW(Ly α)分布: $z > 6$



まとめ

◆ 階層的構造形成と LAE

- LBG とは異なる種族を探索可能
- ダストがほぼない若い銀河？ → 銀河形成を探る上で重要
- 宇宙の再電離も調べられる

◆ LAE 理論モデル構築

- 最も困難な問題は Ly α 離脱率 ($f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$)
- LAE 理論モデル構築には準解析的アプローチが有効
- ただし、準解析的アプローチの先行研究では一定の $f_{\text{esc}}^{\text{Ly}\alpha}$ のみ

◆ LAE の最新理論モデル

- 既存の Ly α 光度関数、UV 光度関数、EW(Ly α) 分布を再現
- $z > 6$ で再電離が未完了であることを示唆