

課題4:ダークマターの密度ゆらぎから生まれる第1世代天体形成

# 宇宙初期の銀河形成と宇宙再電離

長谷川賢二

(筑波大CCS神戸分室)

共同研究者

梅村雅之(筑波大), Benoit Semelin(パリ天文台)

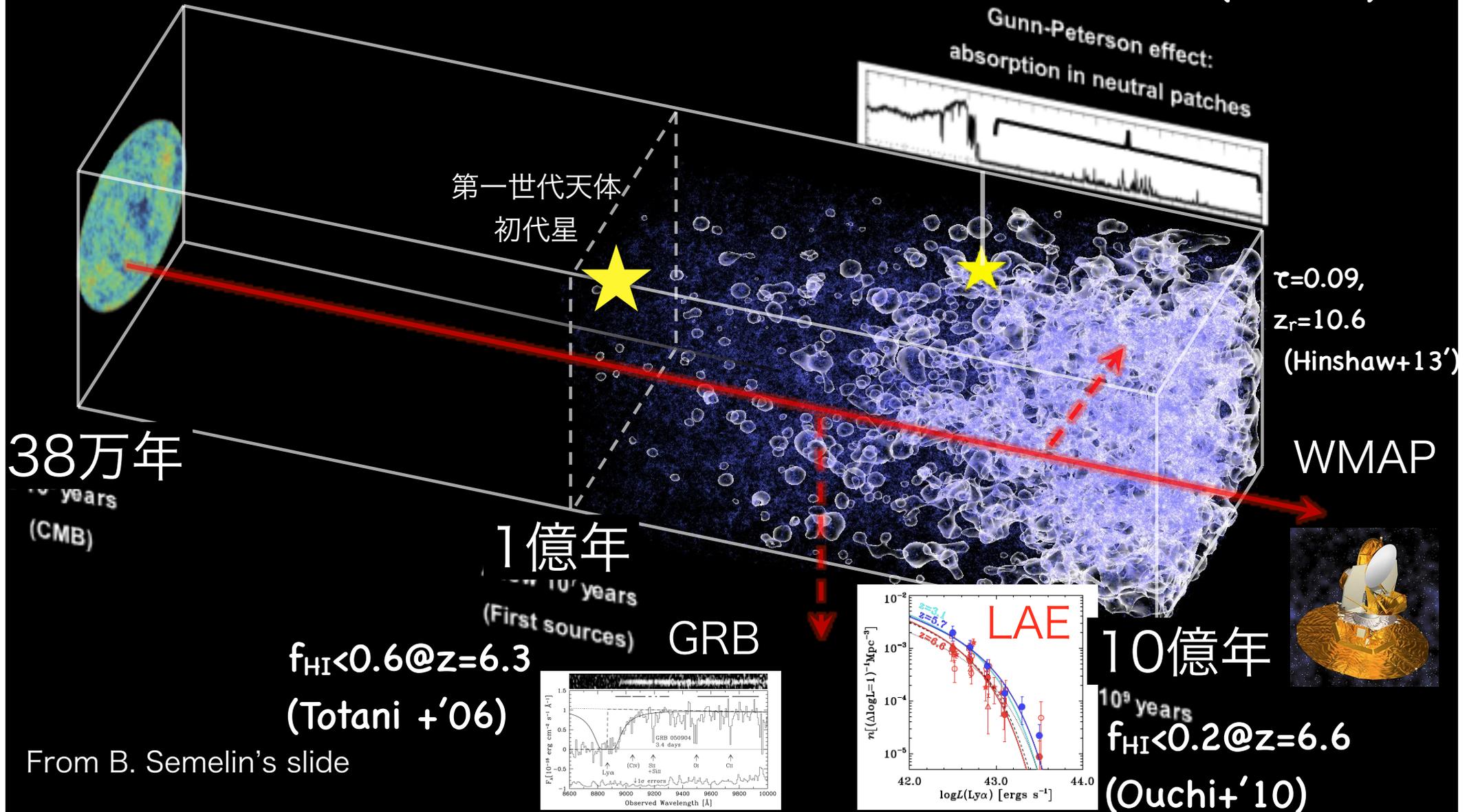
HPCI戦略プログラム分野5全体シンポジウム

2014年3月3-4日@富士ソフトアキバプラザ

# Reionization

$z \sim 1000$ で一旦中性化し、その後再び電離(現在の宇宙年齢137億年に比べて、非常に早期,10億年くらいまでの出来事)

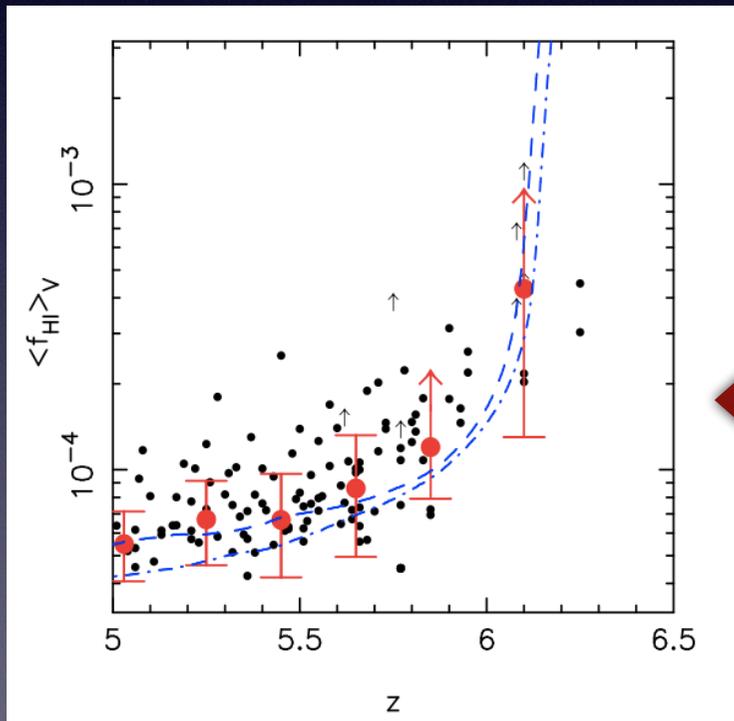
Almost ionized @  $z < 6$  (Fan+'06)



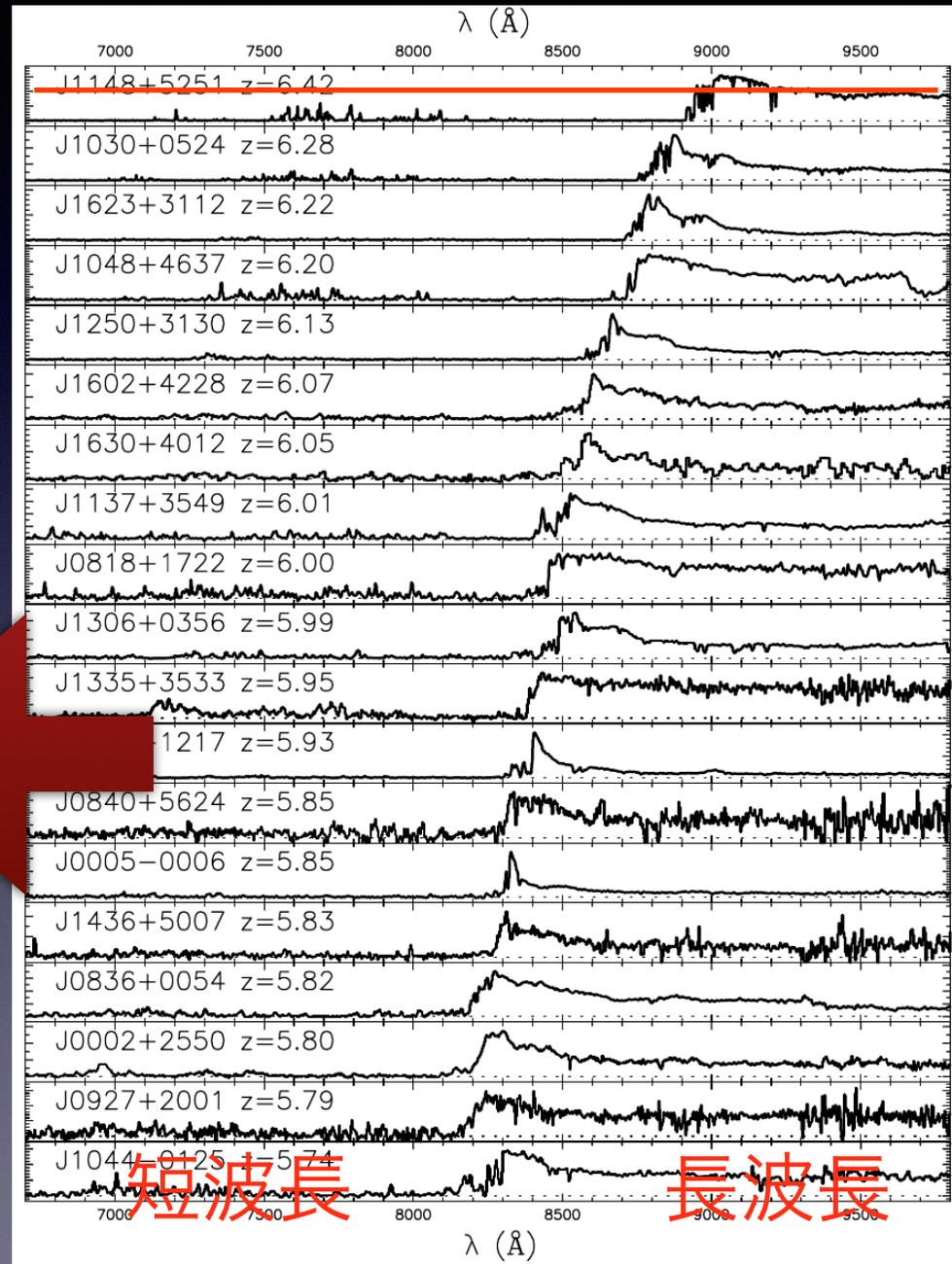
# 観測からの中性水素量制限の1例：QSO観測 QSOのSED

■QSOのスペクトルのLy $\alpha$ 吸収線の深さから中性水素割合を決める。

Fan+(2006)ので19個のSDSS  
QSOの解析



$z < 6$ では、ほぼ完全電離  
 $z > 6$ では中性水素割合増加?



高赤方偏移

# Photon Budget

既に $z > 6$ で多くの銀河が観測されており、これらが電離光子源として有力(これで決まりということもない)

Ionizing photon emissivity vs. recombination rate (Madau+99')

$$\dot{N}_{\text{ion}} = \frac{\langle n_{\text{H}} \rangle}{\langle t_{\text{rec}} \rangle} \overset{\text{再結合係数}}{=} \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}}^2 \rangle = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}} \rangle^2 C \quad C \equiv \frac{\langle n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} \quad \text{Clumping factor}$$

再電離史を調べる為には、

- 1) 銀河間物質(Intergalactic medium: IGM) clumping factor
- 2) 銀河の個数密度
- 3) 銀河当たりの放射される電離光子数(星形成率 $\times$  電離光子の escape fraction)

の情報が必要



# Simulations

これまでの再電離シミュレーション

- 輻射輸送の計算コストが高い為に、個々の銀河を分解するほどの空間分解のがなく、 $f_{\text{esc}}$ はパラメータとして扱わざるを得なかった.
- ほとんどがpost-processingな輻射輸送で為、輻射のダイナミクスへ影響が考慮できないなかった

Internal feedback Wise & Cen '09

★ SFR and Escape fraction

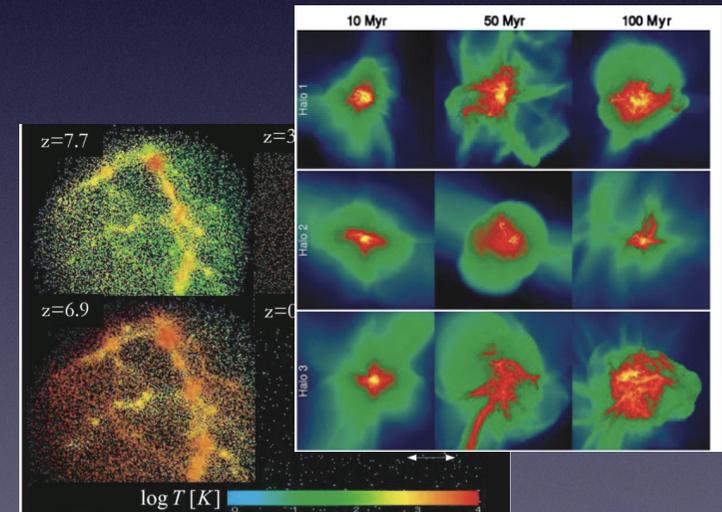
★ Number of star-forming galaxies

これらの量は輻射性フィードバックに敏感である事が先行研究(銀河ひとつづつの計算)によって示される

★ Clumping factor

External Feedback Susa & Umemura '04

N-体計算だと $z=6$ で $C \sim 10$ であるが、光加熱効果を考慮するこの値より小さくなる(e.g., Pawlik+'09). 再電離史に敏感であると予想される.



# 本研究

輻射流体計算によって銀河を分解しつつIGMの電離過程を計算する事で再電離史と銀河形成史を統一的に理解する。

特に

輻射フィードバックがどのような影響を与えるか?

結果として、どの時期に何故再電離が起こるのか?

(Photon Budgetがどう辻褃があっているのか?)

# "START"

SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer  
(KH & Umemura 2010)

- Hydrodynamics

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) Lagrange的手法

N-body

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \boxed{g} + \boxed{f_{\text{rad}}}$$
$$\frac{du}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\boxed{\Gamma} - \Lambda}{\rho}$$

$p = p(\rho, T)$

輻射輸送

- Non-equilibrium chemistry

$e^-$ ,  $H^+$ ,  $H$ ,  $H^-$ ,  $H_2$ ,  $H^{2+}$ ,  $He$ ,  $He^+$ , and  $He^{2+}$ , (dust, metal)

# “START”

## ● Radiative Transfer of UV photons

- 主に電離、解離光子の輸送(加熱 $\sim 10^4\text{K}$ , 水素分子=ガス冷却剤の破壊)
- SPH粒子をそのままRTグリッドとして用いる事で高密度領域を分解可能  
(cf. ほとんどの他の計算、RT用にグリッドを貼り直す)

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + n \nabla I_\nu = \overset{\text{emissivity}}{\eta} - \underset{\text{opacity}}{\chi} I_\nu \quad \text{輻射輸送方程式}$$



$$I_\nu(r) = I_\nu(0) \exp(-\tau_\nu)$$

$$\tau_\nu = \sum N_i \sigma_{i,\nu}$$

全ての吸収体の足し合わせ



化学反応率

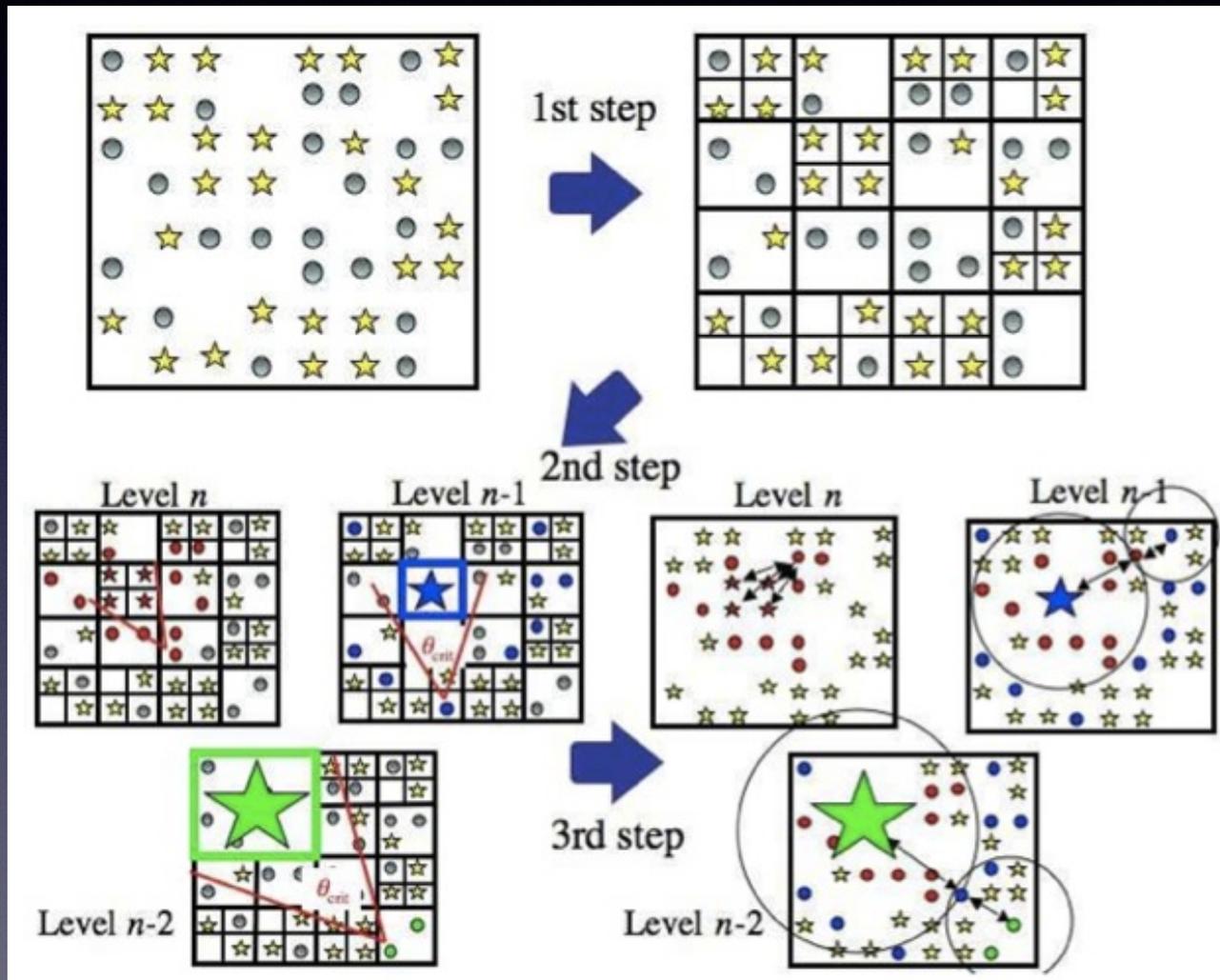
光加熱率

輻射力

流体+化学反応式とのカップル

(近似: 流体,光源の変動,原子の反応速度との比較、ガスからのdiffuseな放射はその場で吸収される.)

# Ray-Tracing: Tree-based acceleration



1)光源の分布に対してTREE構造を作る。

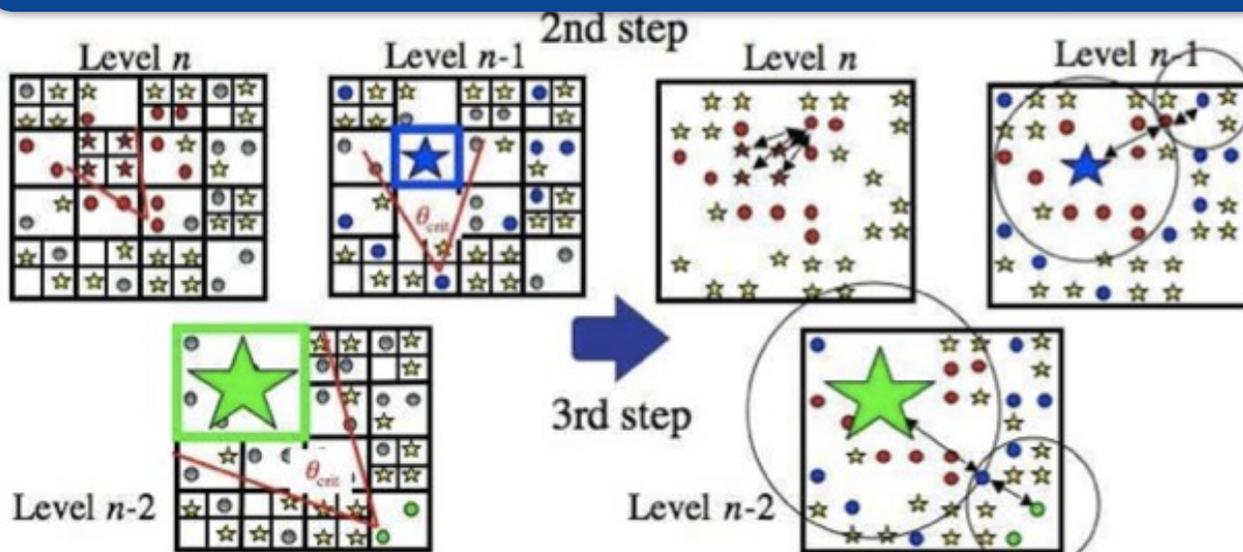
# Ray-Tracing: Tree-based acceleration

$$\frac{l}{d} < \theta_{\text{crit}}$$

In the limit of  $\theta_{\text{crit}} = 0.0$ ,  
the scheme corresponds to RSPH  
(Susa 2006)

l: size of a cell

d: distance between a SPH particle and a cell



1)光源の分布に対してTREE構造を作る。

2)もし、複数の光源を含むセル(左図の□)がターゲットとするSPH粒子より十分遠ければ、これらの光源をまとめて明るい仮想的な光源とみなす。

計算コストは $\log(N_s)$ に比例

#  $N_s$ : Number of sources

たくさんの光源からの輻射輸送を高速に解ける。

# Setup

- Lambda CDM Cosmology (WMAP 9yr)
- 粒子数(Volume):  $2 \times 256^3$  粒子(5Mpc)<sup>3</sup>,  $2 \times 512^3$  粒子(20Mpc)<sup>3</sup>
- $m_{\text{SPH}} \sim 10^4 M_{\text{sun}}$ , and  $\sim 10^5 M_{\text{sun}}$  (大雑把に  $z > 6$  で観測される最も暗い銀河の 1/100-1/1000 くらいの質量の銀河を 100 粒子で分解)

水素分子が必要

- Star Formation recipe

i)  $n_{\text{th}} > 0.1 \text{cm}^{-3}$

ii)  $T < 5000 \text{K}$

iii)  $\text{div}(\mathbf{v}) < 0$

$$\frac{d\rho_*}{dt} = C_* \frac{\rho_g}{t_{\text{dyn}}} \quad C_* = 1/30$$

- Feedback processes

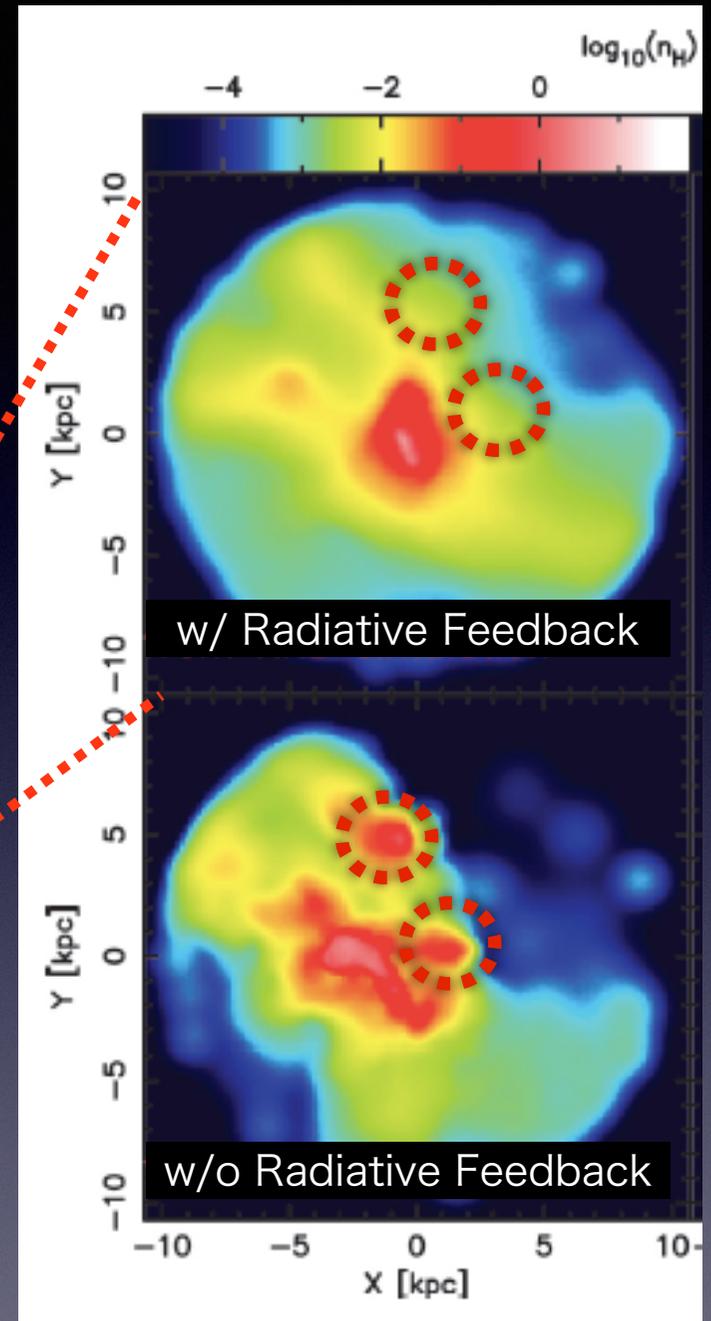
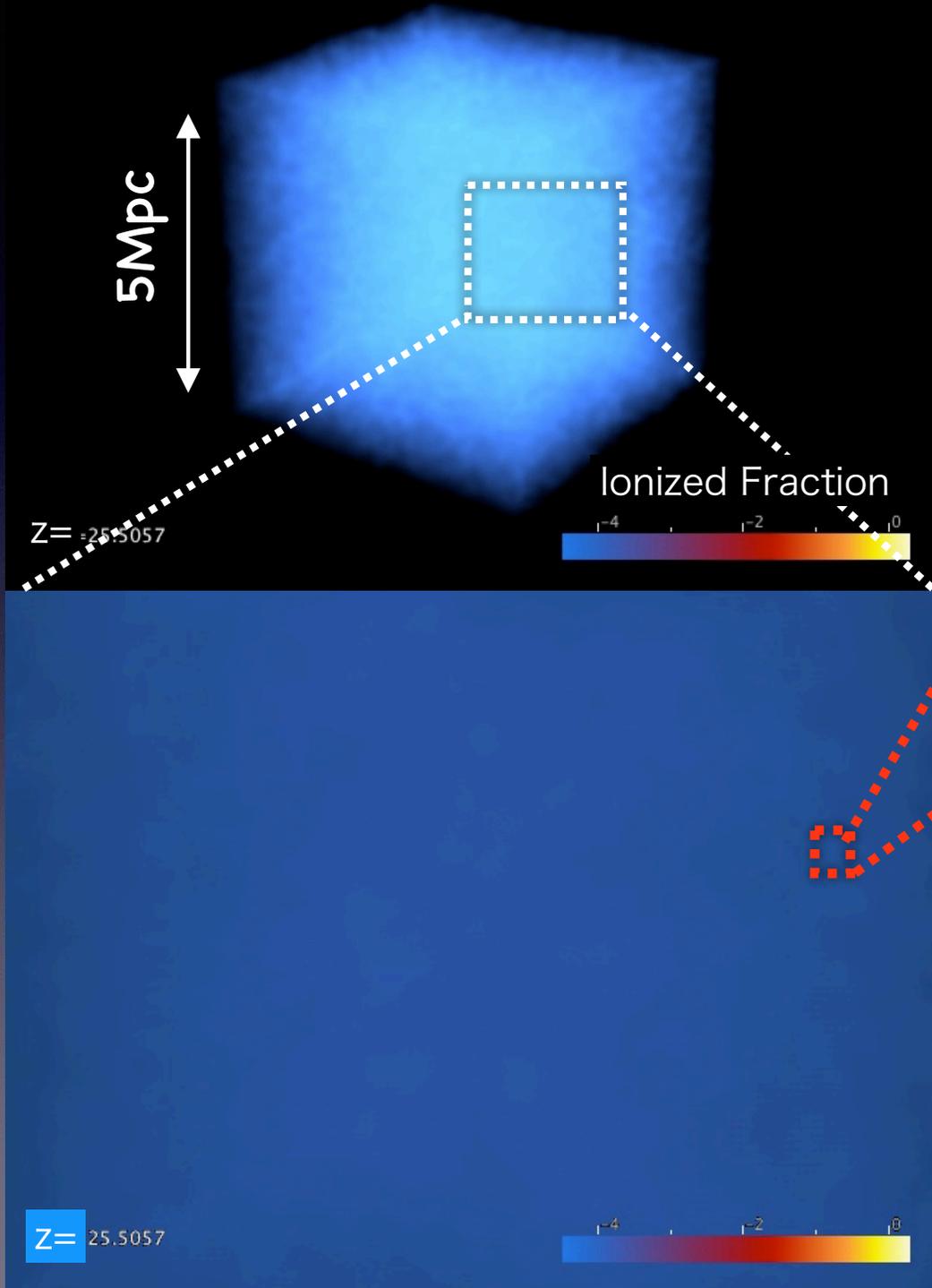
Age-dependent SED, SN rate (computed by PEGASE)

\*HI, HeI, HeII 光電離 と  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}^-$ ,  $\text{H}_2^+$  光解離

\*Thermal SN feedback

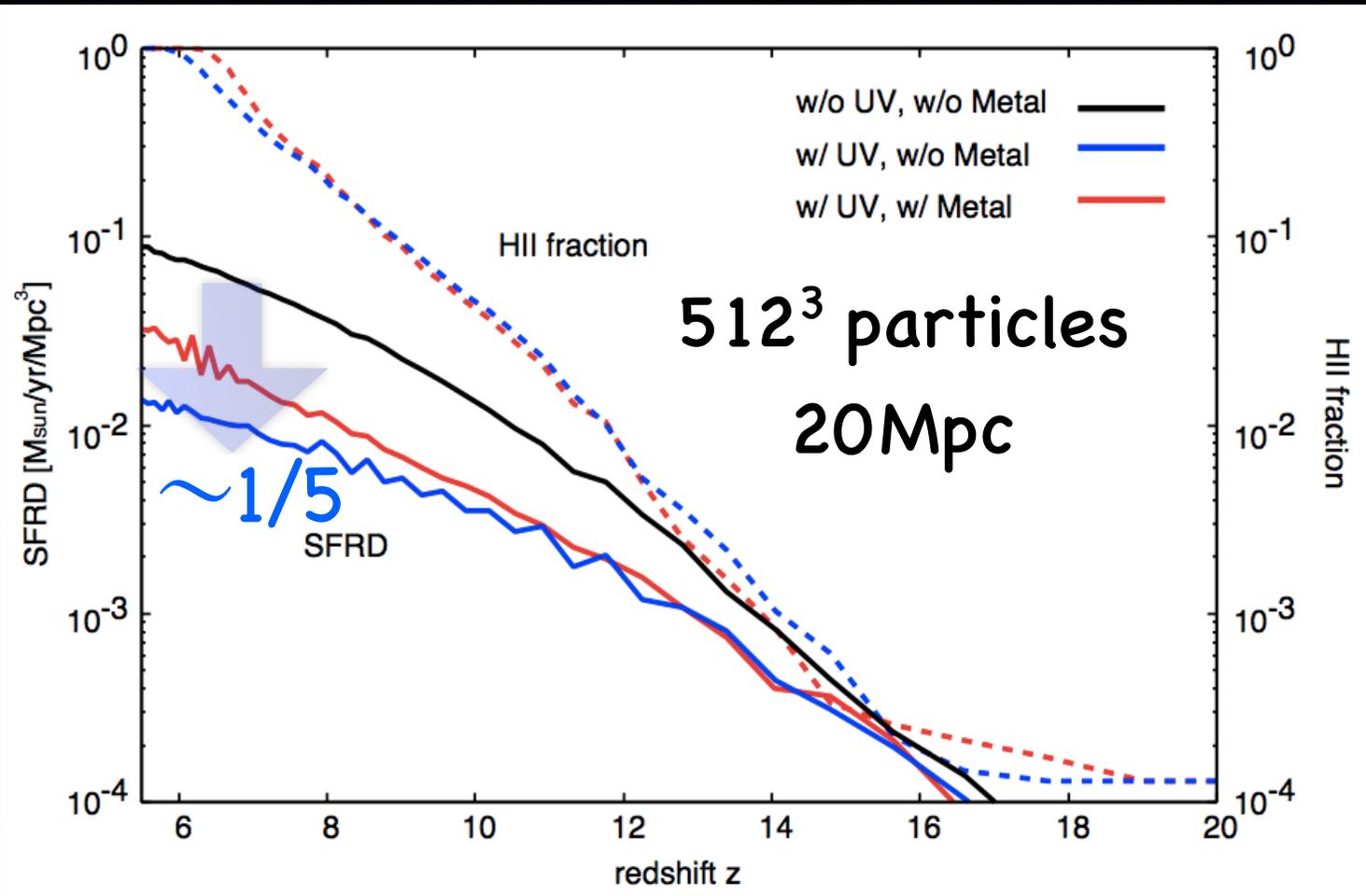
\*metal enrichment + 星間ダスト (Thermal process と SED)

# KH, Semelin '13



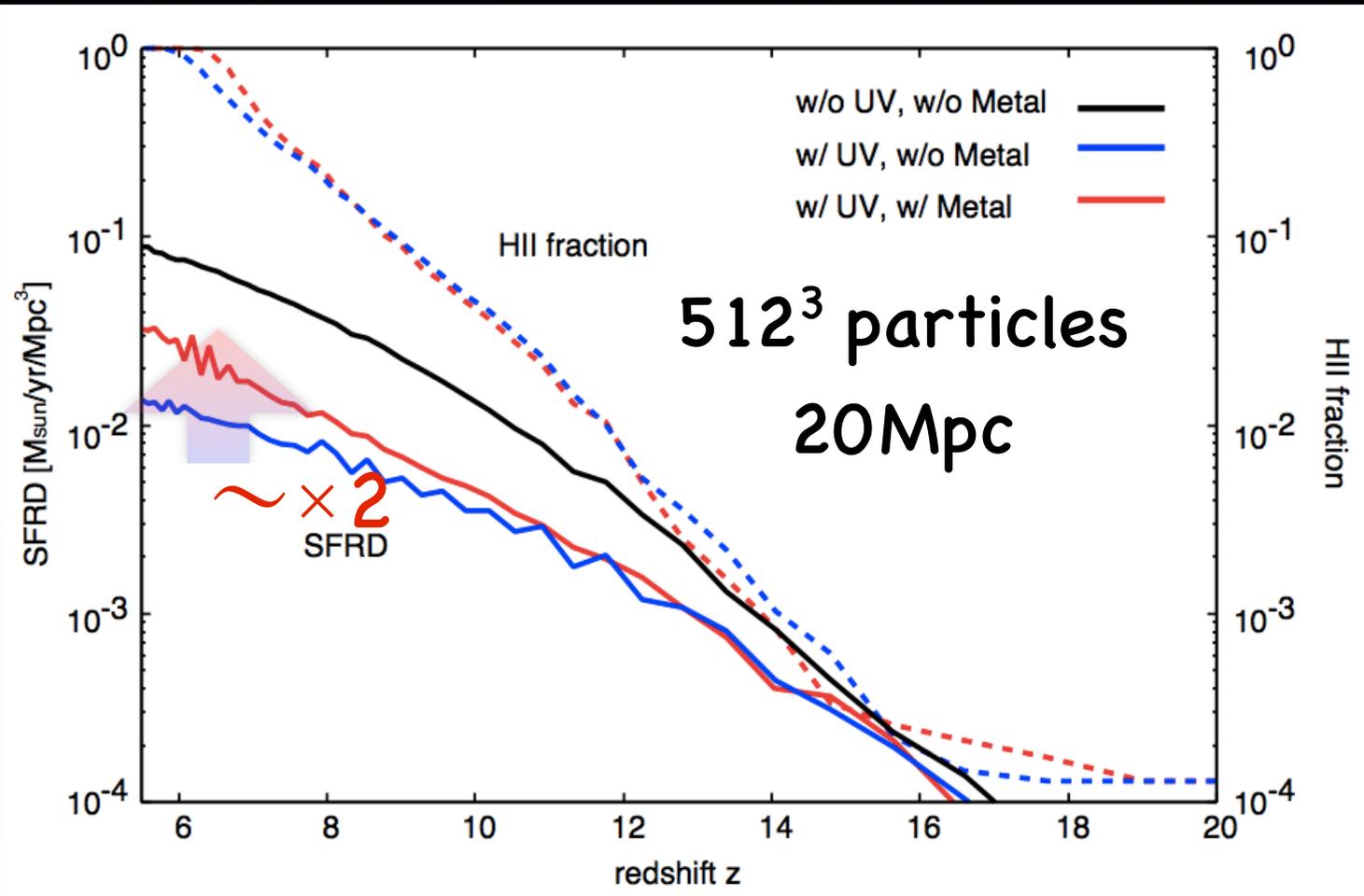
A galaxy @  $z=6$   
Umemura, KH+ '12

# Cosmic SFR and reionization history



\*UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる。

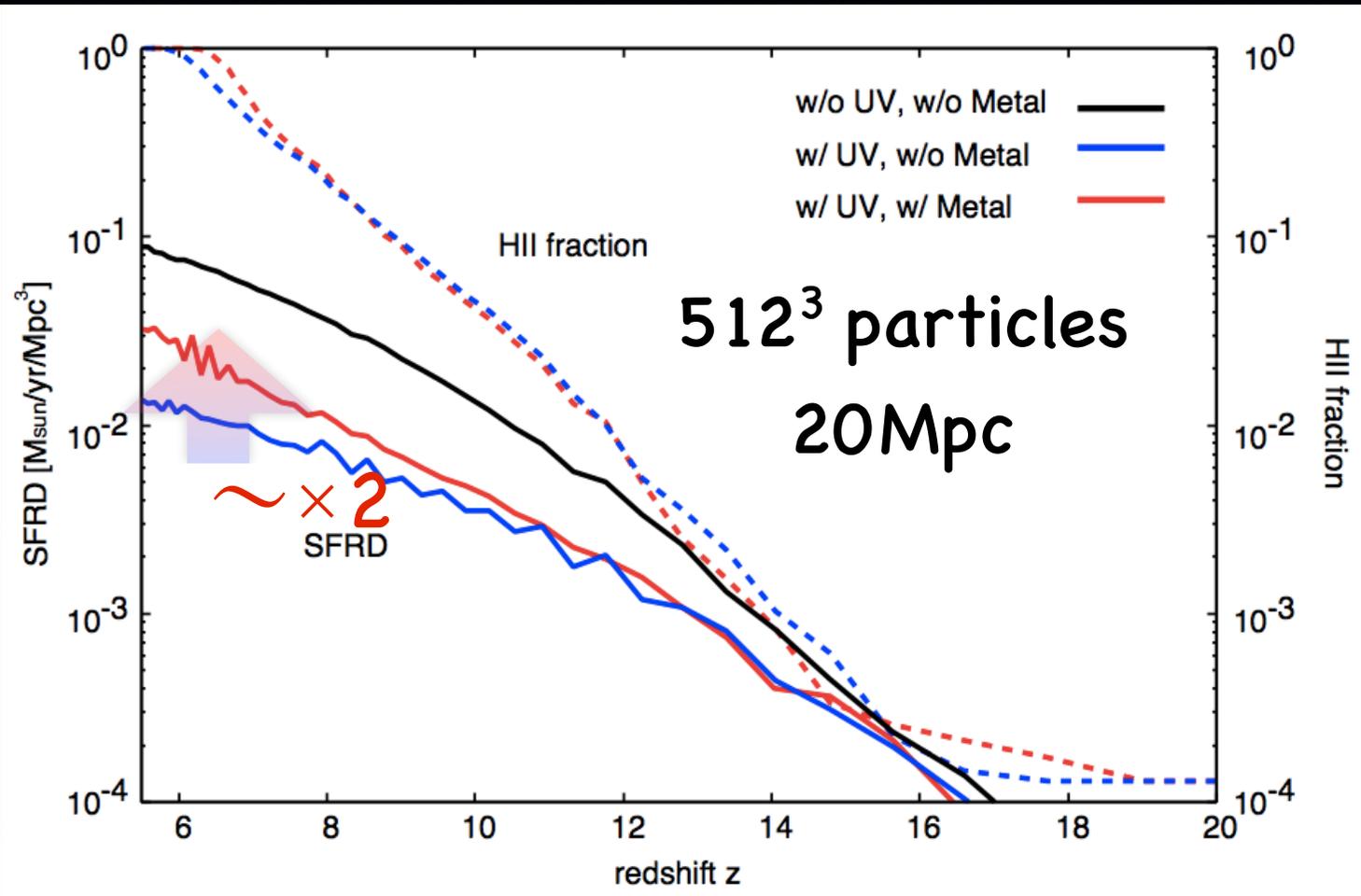
# Cosmic SFR and reionization history



\*UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる。

\*重元素汚染効果(重元素冷却、ダストでの水素分子形成)はUV negative feedbackを和らげる。

# Cosmic SFR and reionization history

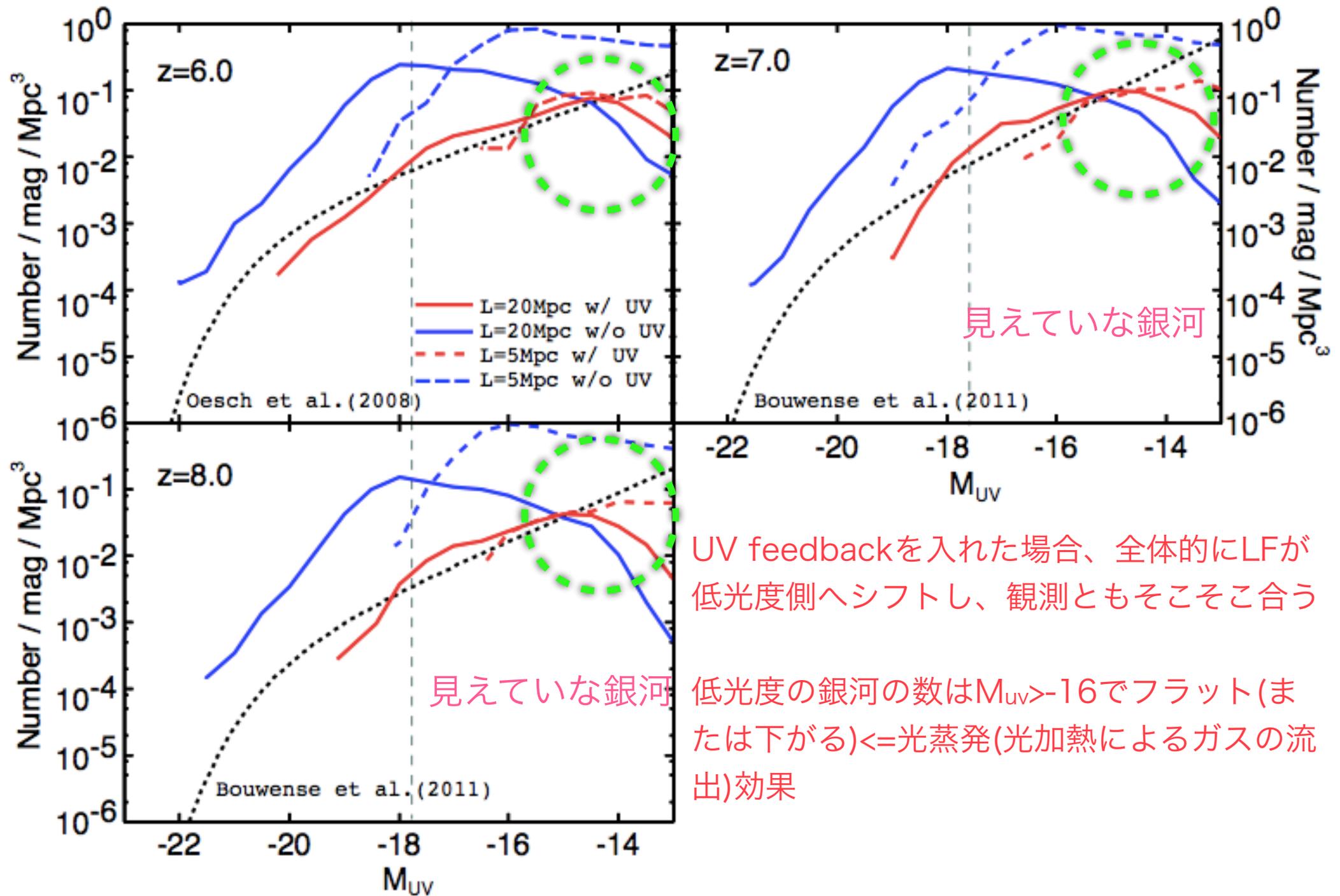


\*UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる。

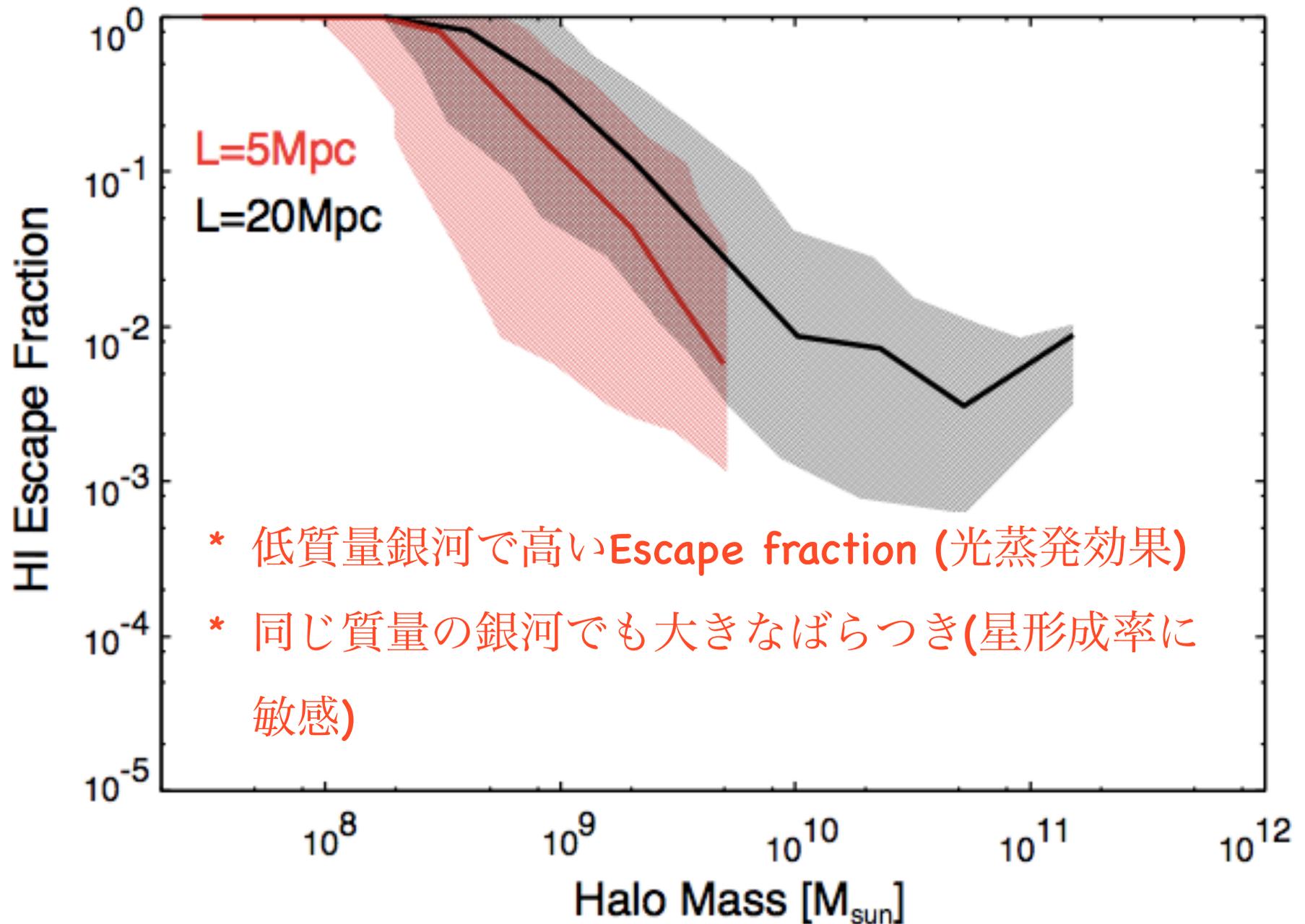
\*重元素汚染効果(重元素冷却、ダストでの水素分子形成)はUV negative feedbackを和らげる。

\*今回のシミュレーションでは、 $z \sim 6.5$ でほぼ完全電離。

# UV (1500Å)光度関数faint endの予言



# Escape fraction@z=6

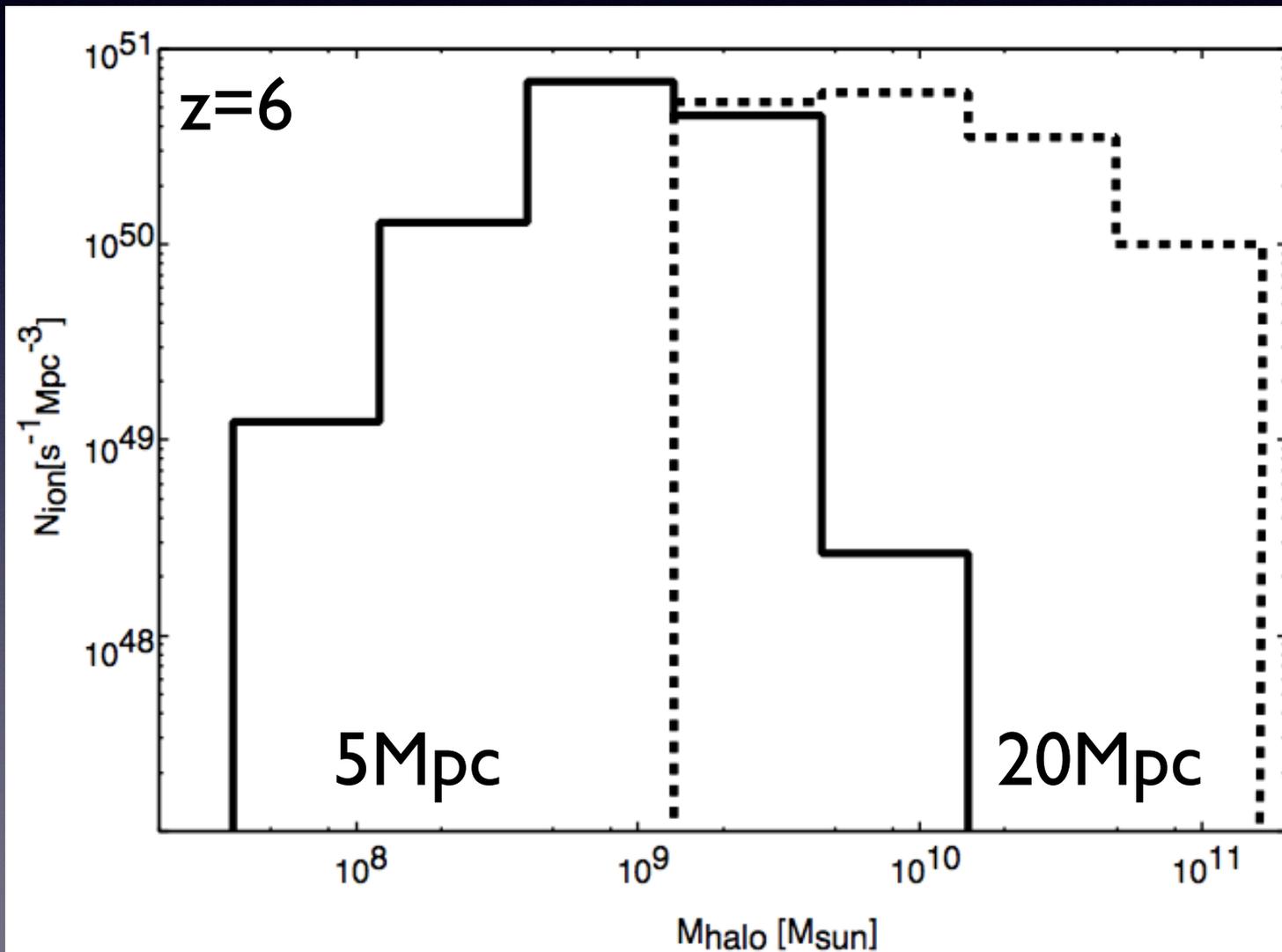


# Which are galaxies responsible for Reionization?

Intrinsic total emissivity (escape fractionを無視)

Low-mass: photo-evaporationで下がる

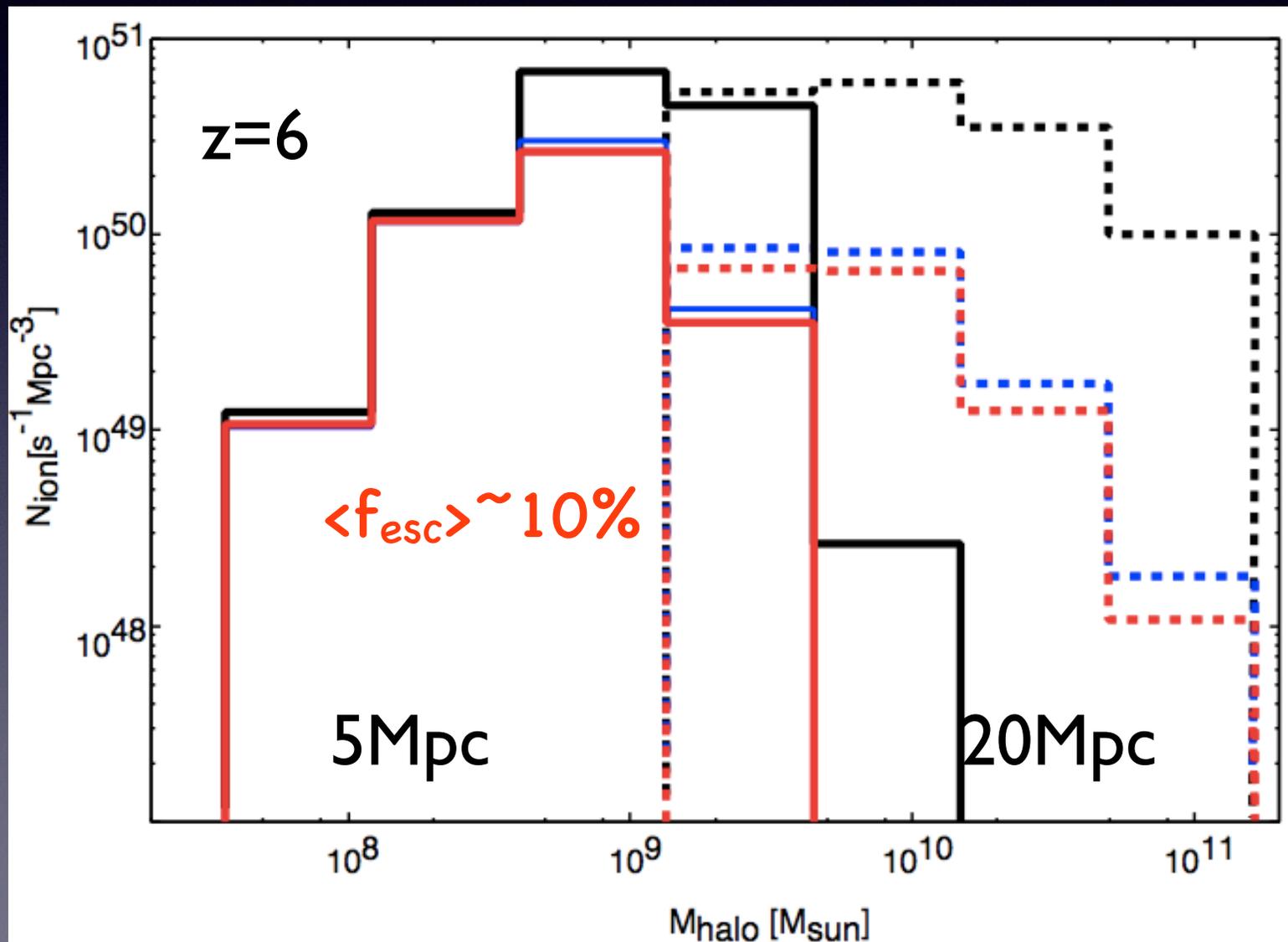
High-mass: 銀河の個数とSFRの銀河質量依存性がほぼ相殺=const



# Which are galaxies responsible for Reionization?

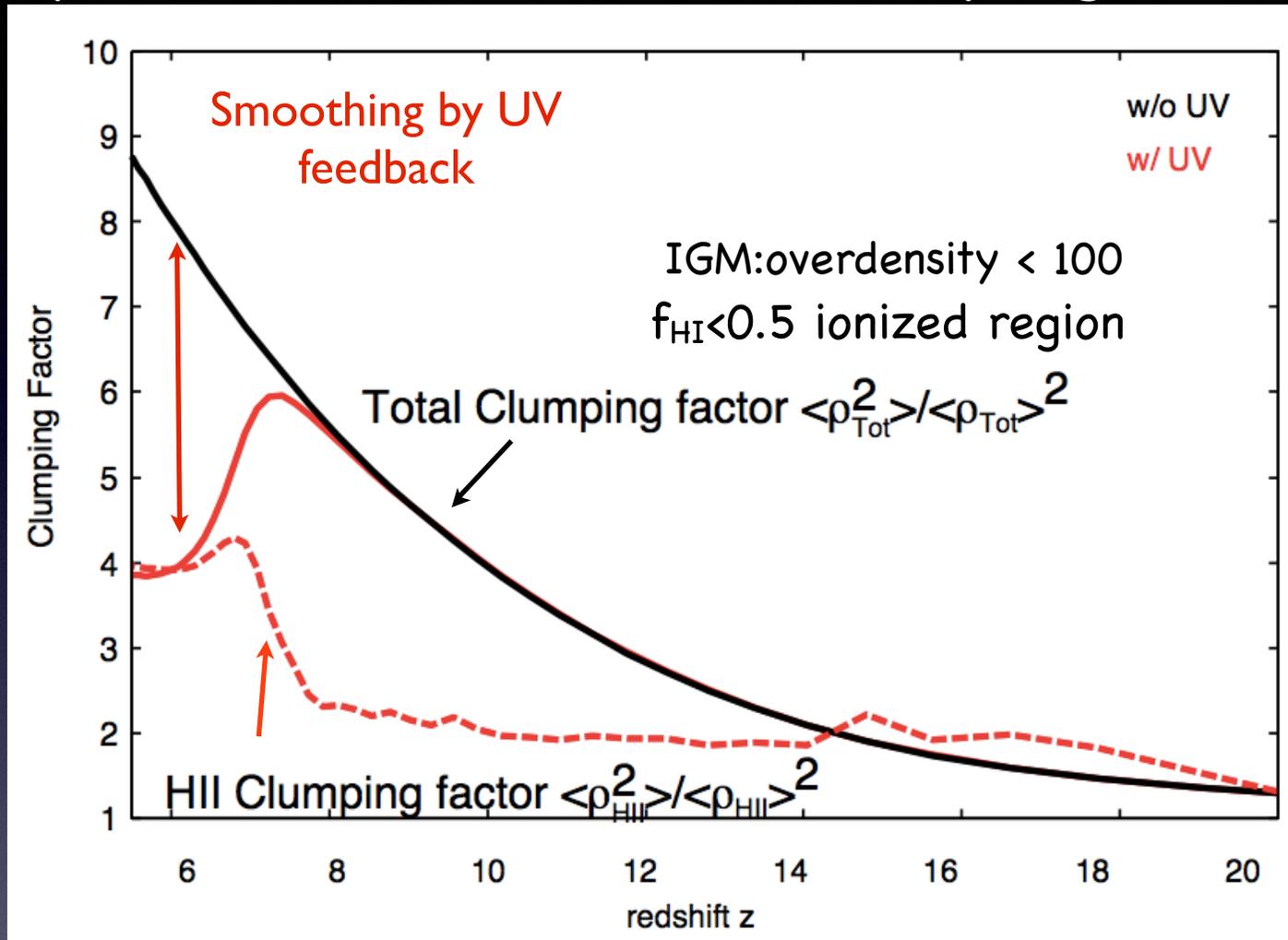
Emissivity with escape fraction

Escape fractionの質量依存性と合わせると $10^9 M_{\text{sun}}$ (現在の観測限界より一桁程度くらい銀河)くらいの銀河が再電離にとって最も重要である事が分かる。



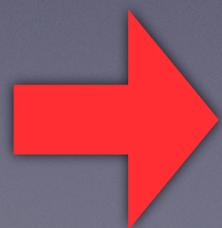


# Impact of UV on IGM clumping factor



✓ Total IGM clumpiness: 再電離史に非常に敏感

✓ HII IGM clumpiness: 再電離期に  $C_{\text{HII}} \sim 2-4$

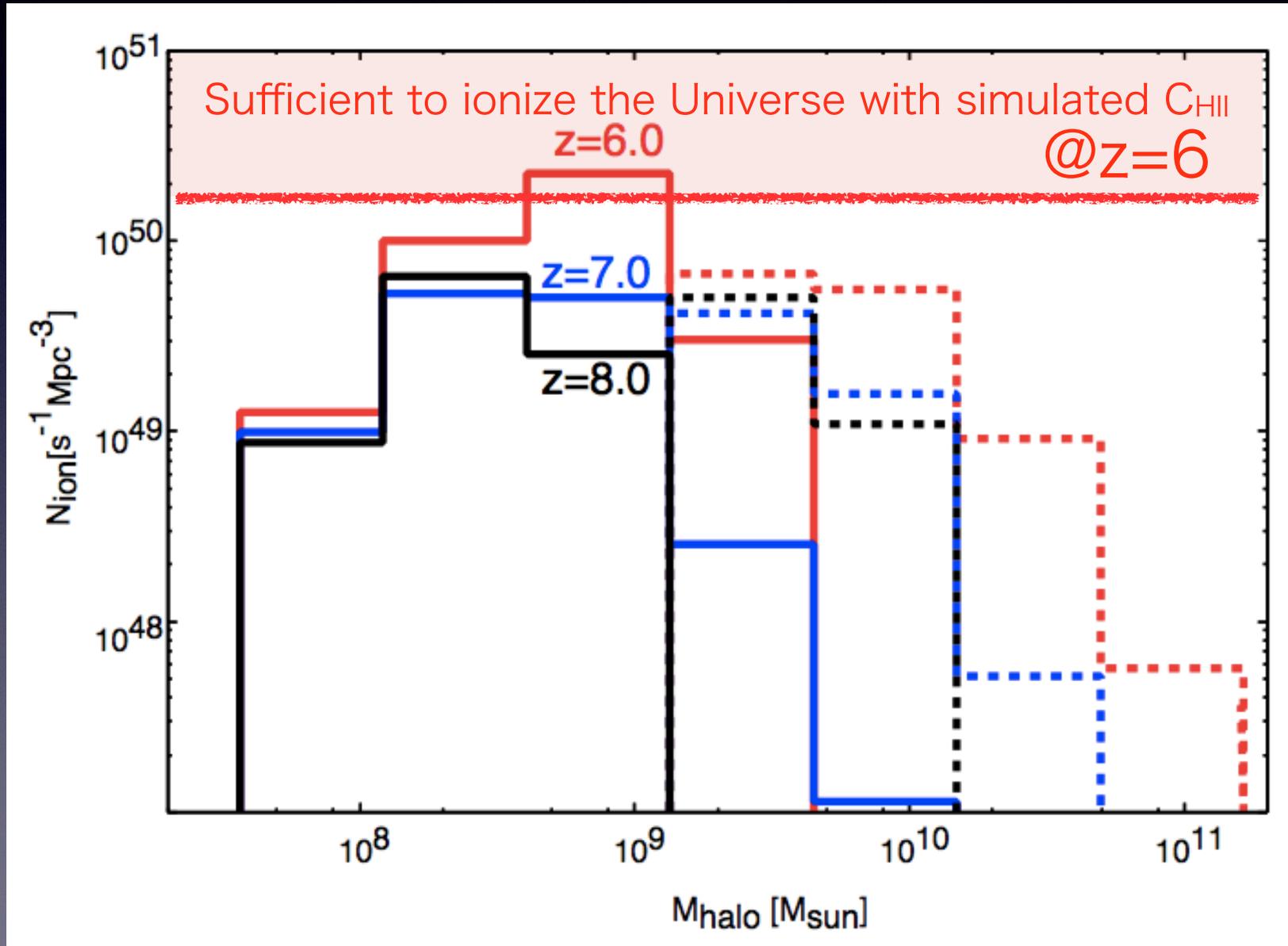


post-processingの輻射輸送計算の場合に比べて、少ない電離光子数で宇宙を電離できる。

# Can these galaxies ionize the Universe?

$$\dot{N}_{\text{ion}} = \frac{\langle n_{\text{H}} \rangle}{\langle t_{\text{rec}} \rangle} = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}}^2 \rangle = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}} \rangle^2 C$$

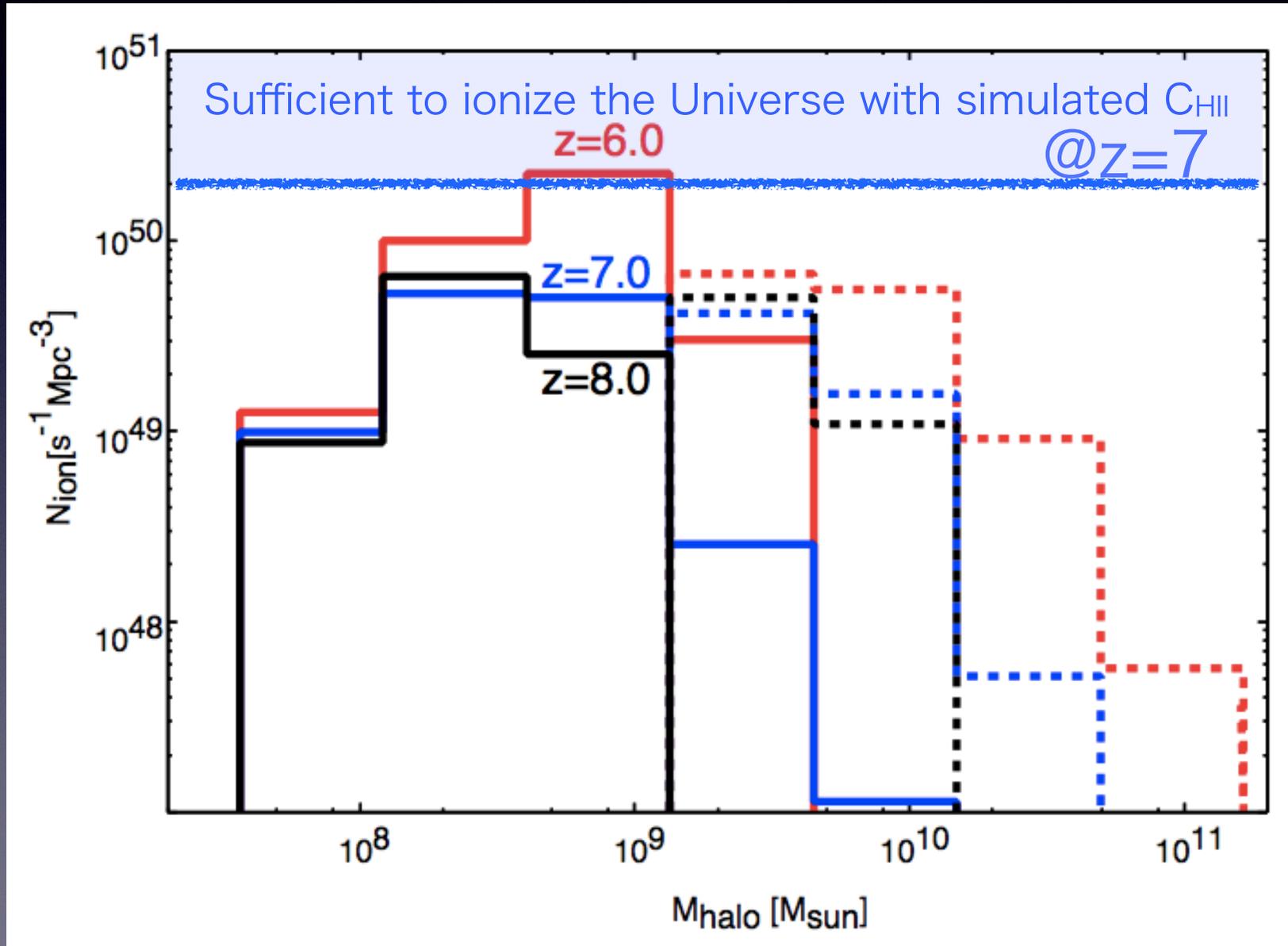
シミュレーションでは、 $z \sim 6.5$ で再電離が完了。



# Can these galaxies ionize the Universe?

$$\dot{N}_{\text{ion}} = \frac{\langle n_{\text{H}} \rangle}{\langle t_{\text{rec}} \rangle} = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}}^2 \rangle = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}} \rangle^2 C$$

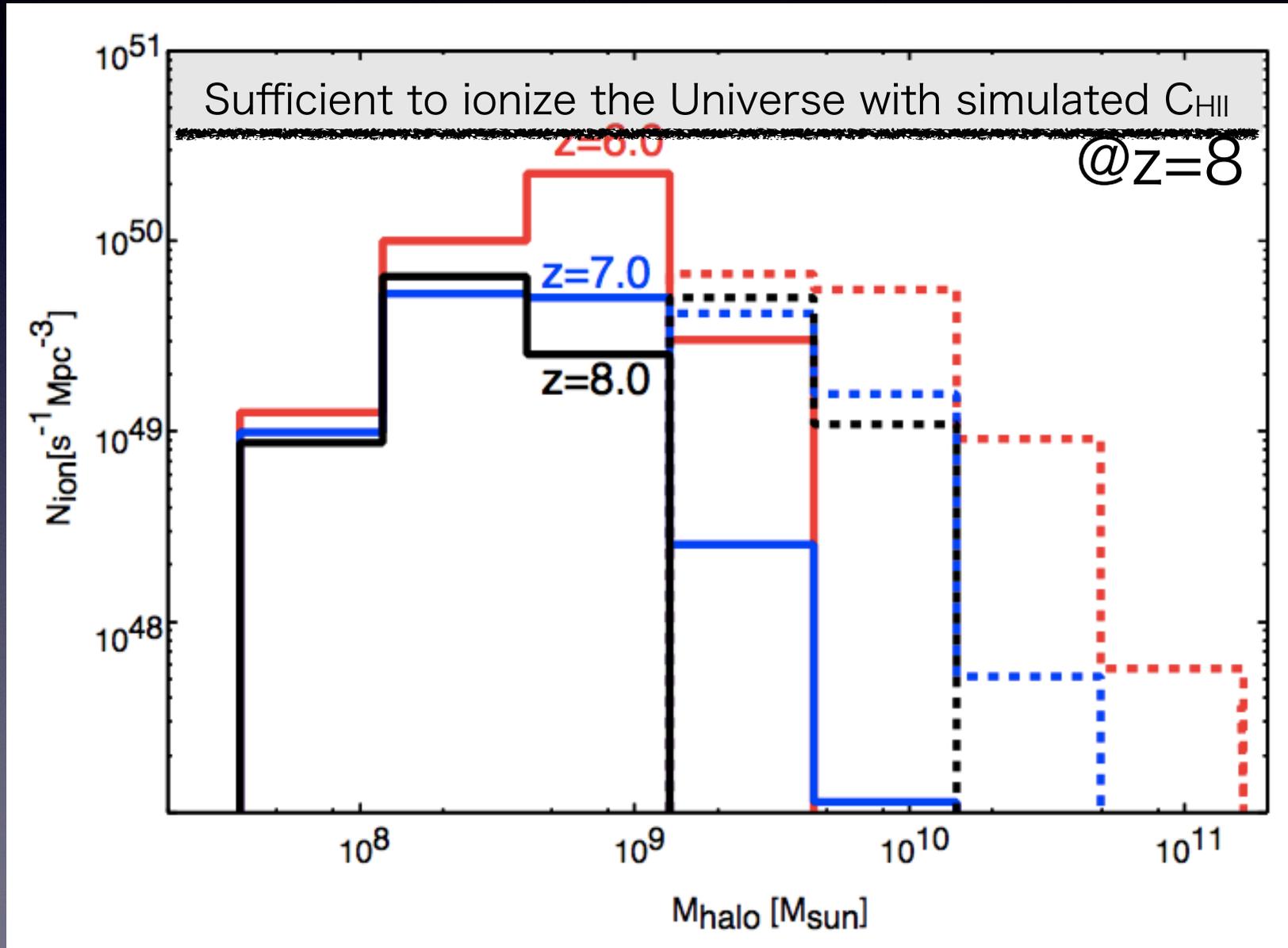
シミュレーションでは、 $z \sim 6.5$ で再電離が完了。



# Can these galaxies ionize the Universe?

$$\dot{N}_{\text{ion}} = \frac{\langle n_{\text{H}} \rangle}{\langle t_{\text{rec}} \rangle} = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}}^2 \rangle = \alpha_{\text{B}} \langle n_{\text{H}} \rangle^2 C$$

シミュレーションでは、 $z \sim 6.5$ で再電離が完了。

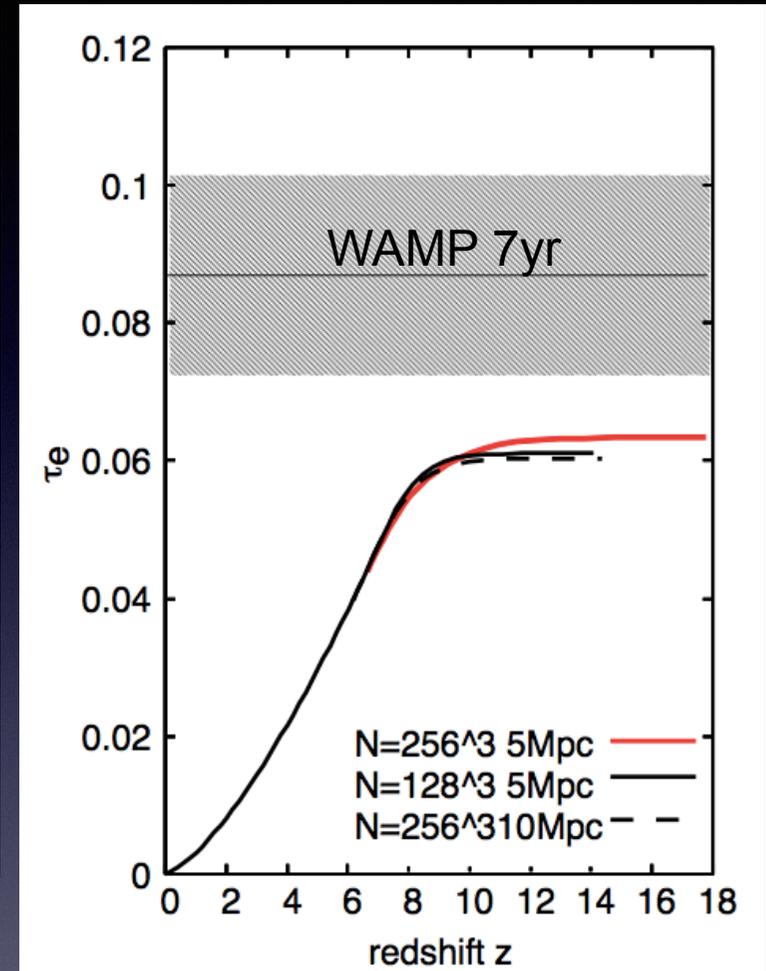
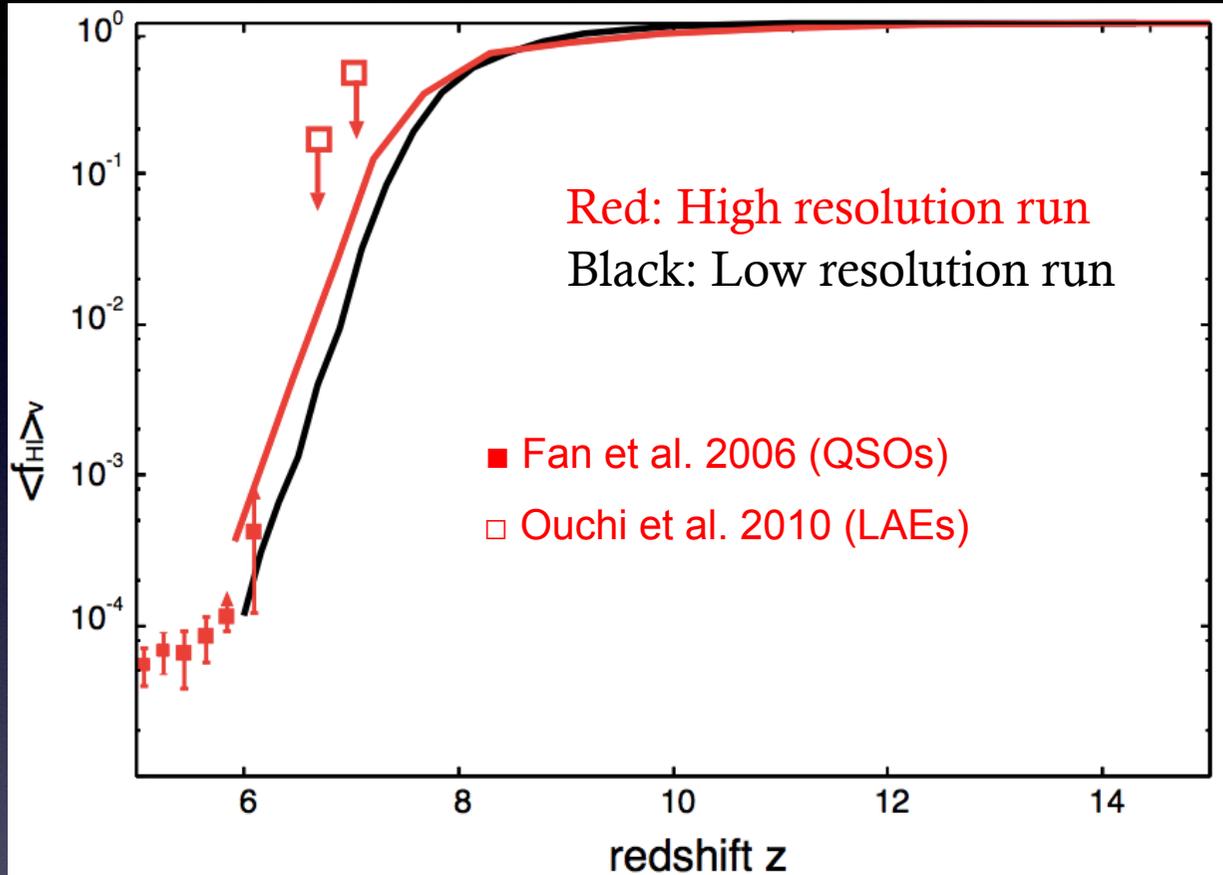


# Summary

輻射流体計算によって、宇宙の銀河(内の星)形成史、再電離史、銀河間物質の力学進化をconsistentに解いた

- ◆ **UV feedback** は星形成率(↓)、電離光子脱出割合(↑)、IGM clumping factor(↓)等に影響を与える.
- ◆ 結果得られるUV光度関数は、明るい部分で観測とほぼ一致し暗い側では、DMハローの質量関数とは異なりフラットなslopeを预言する。(次世代の観測機器では、この部分をとらえられる可能性がある.)
- ◆ 低質量( $10^{8-9}M_{\text{sun}}$ )銀河は、星形成率は低いが $f_{\text{esc}}$ が高い為に再電離に重要に働いている事を示唆.

# Comparison with Obs. : $f_{\text{HI}}$ & $\tau_e$



@ $z < 7$  中性水素割合は観測と consistent.

WMAPで観測される電離の柱密度は再現できない

=>より高赤方偏移のより小質量の天体形成(第一世代天体)

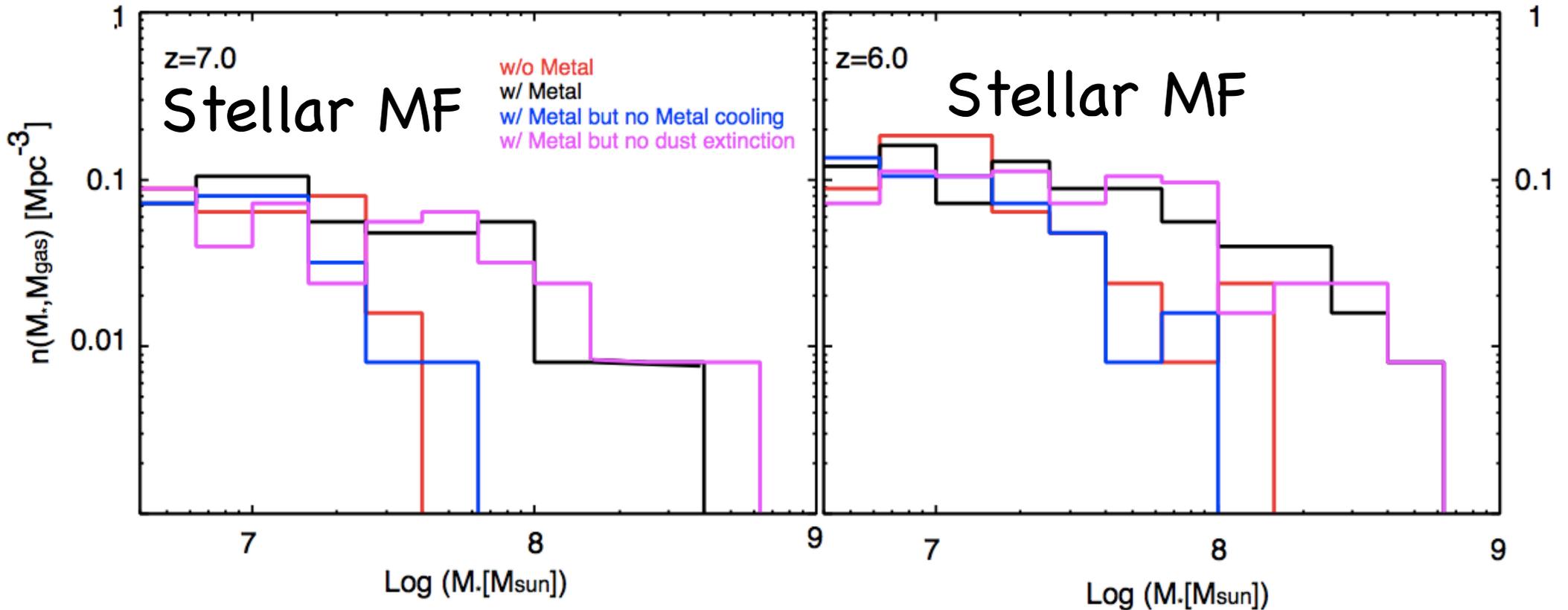
の解明が重要

# Previous studies on Escape fraction

	Wise & Cen (2009)	Gnedin et al. (2008)	Razoumov et al. (2010)	Yajima et al. (2011)	<b>THIS STUDY</b>
空間分解能 (Physical @z=6)	0.1pc	70pc	90pc for $10^9 M_{\text{halo}}$ 530pc for $10^{12} M_{\text{halo}}$	260pc	<b>85pc</b>
RHD or Post- processing?	RHD	RHD	Post- processing (no Rad. feedback)	Post- processing (no Rad. Feedback)	<b>RHD</b>
Metal enrichment	×	○ (dustは重要で ない)	○ (dustは重要で ない)	○ (dustは重要)	<b>× → ○</b>
Method	AMR+ adaptive ray tracing	AMR + OTVET	SPH + adaptive ray tracing	SPH + つくばART	<b>START (SPH + Tree-based Accelerated Ray-Tracing)</b>

# What is the role of Metal enrichment?

Cooling (metal & Enhanced H<sub>2</sub> fraction)? OR Dust Absorption



\* Even if dust attenuation is neglected, SMF hardly changes.

\* If metal cooling and enhanced H<sub>2</sub> cooling are neglected, the shape of SMF roughly corresponds to that without Metal enrichment.

# Effects of Metal

\* Metal cooling → Enhancement of SFR.

Metallicity-dependent cooling function by MAPPING III

\* Dust (0.1micron)  $\rho_{\text{dust}} = 0.01\rho_{\text{gas}}Z/Z_{\odot}$

Absorption → Enhancement of SFR, decrease of  $f_{\text{esc}}$

Drain & Lee (1984), Table (Size-, and frequency-dependent opacity)

H<sub>2</sub> formation on the surfaces of grains → Enhancement of SFR

Temperature of grains ⇒ Balance between Emission & absorption

$$\int \pi B_{\nu}(T_{\text{dust}})4\pi a_{\text{d}}^2 Q(a_{\text{d}}, \nu) d\nu \quad \leftarrow \text{RT} \quad \leftarrow \text{Thin}$$

$$= \int 4\pi J_{\nu} \pi a_{\text{d}}^2 Q(a_{\text{d}}, \nu) d\nu + \int 4\pi B_{\nu}(T_{\text{CMB}}) \pi a_{\text{d}}^2 Q(a_{\text{d}}, \nu) \nu$$

heating by stellar Radiation heating by CMB

Sublimation temperature  $T_{\text{sub}}=1500\text{K}$

# Accuracy Test

DATA: The distributions of SPH and (young) Stellar particles @z=7 obtained by a cosmological hydrodynamics simulation  $N_{\text{SPH}} = 128^3$ ,  $N_s \sim 300$

$\theta_{\text{crit}} = 0.5$  => the map is well consistent with that with  $\theta=0$

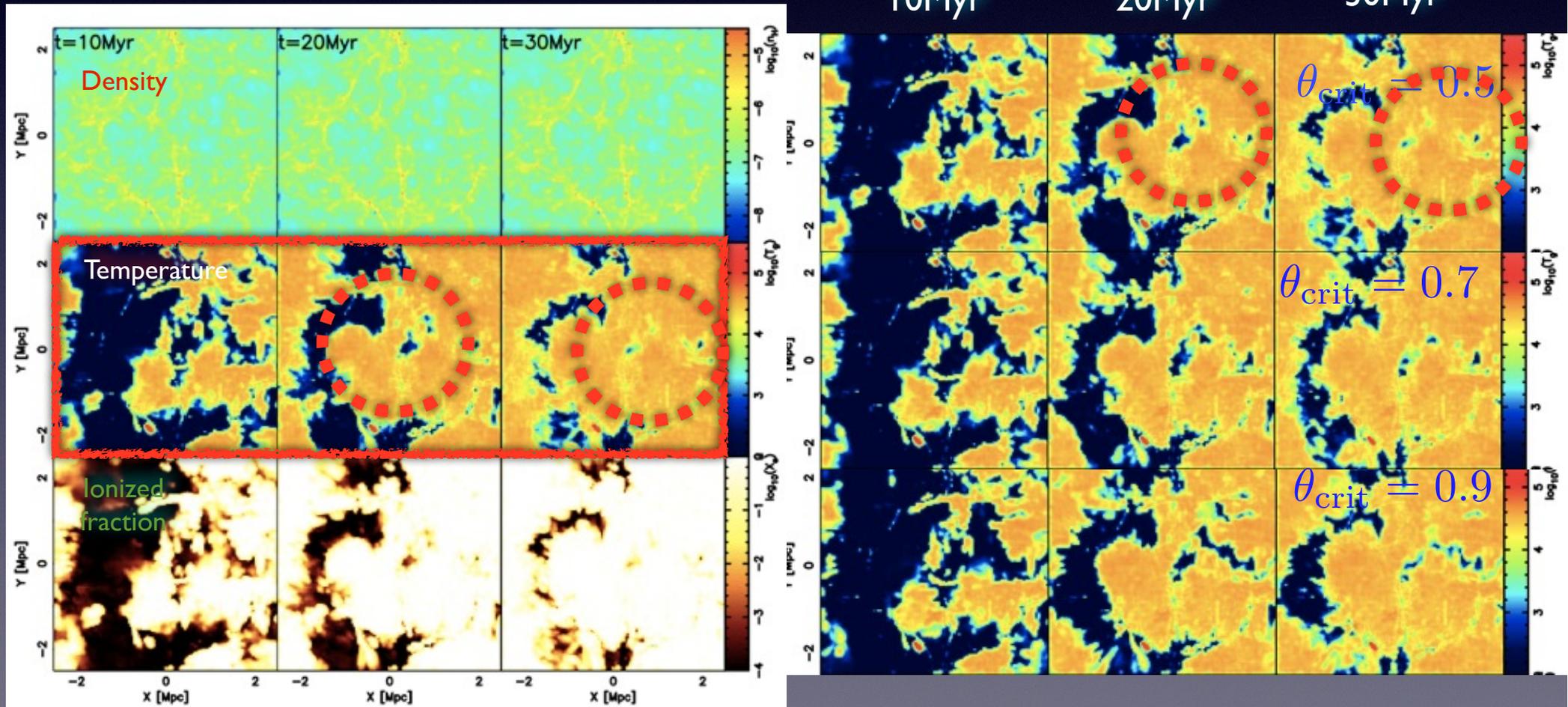
Reference ( $\theta=0$ , All-to-All RT)

Temperature by New START

10Myr

20Myr

30Myr



# SFR in halos@z=6

