

# 宇宙再電離期における紫外線フィード バックの銀河・銀河間物質への影響



長谷川 賢二 (名古屋大学)

共同研究者

石山智明(千葉大)、井上昭雄(大坂産業大)  
鈴木裕行(筑波大)、梅村雅之(筑波大)、Benoit Semelin (パリ天文台)  
他 SKA-JP EoRサイエンスワーキンググループ



第二回銀河進化研究会 2015年6月3日-5日@名古屋大学

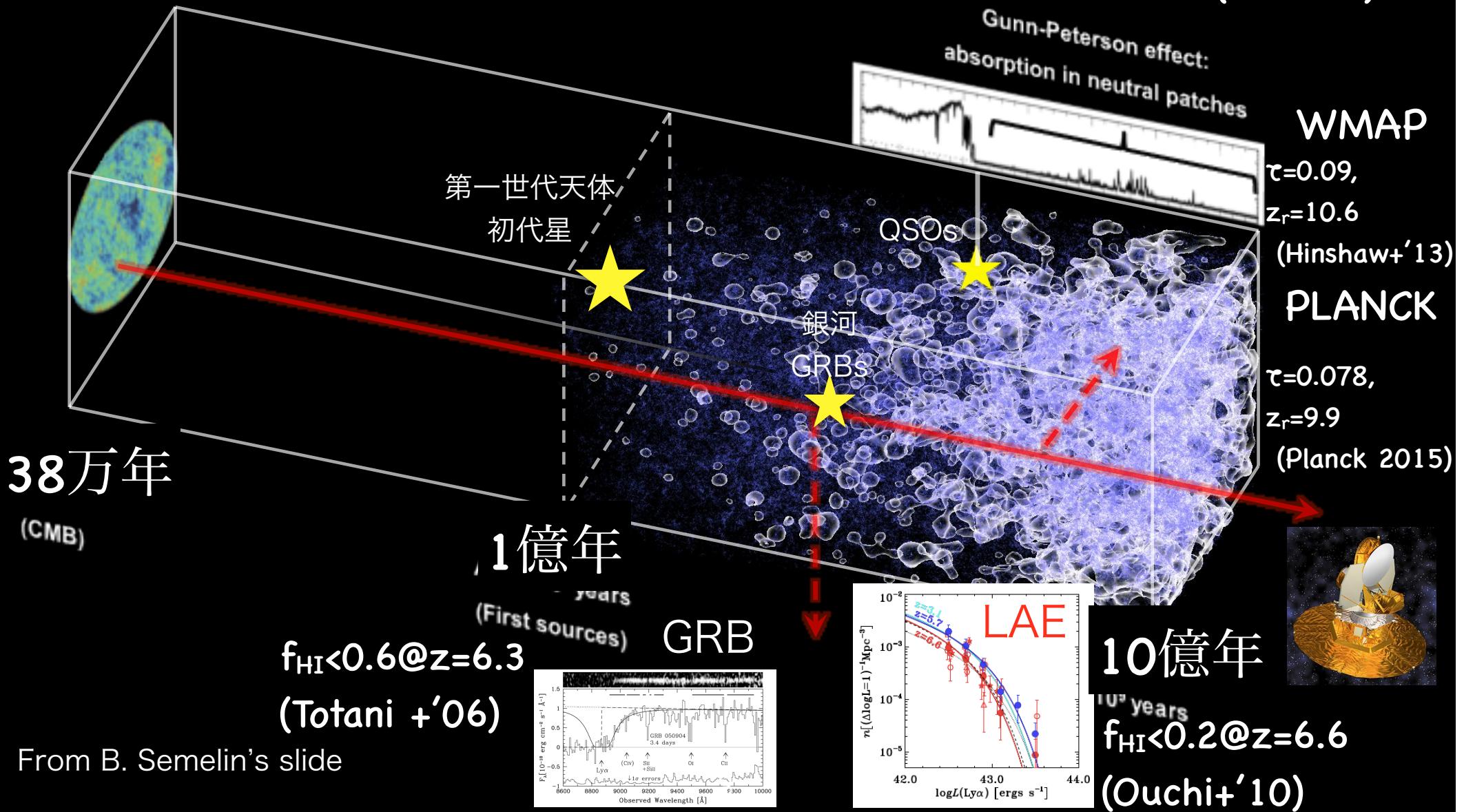


# もくじ

- Introduction
- 本研究
  - 目的
  - 手法
  - 結果
  - まとめ
- 進行中 & 今後の研究
  - 将来観測との比較に向けて

# Reionization

様々な観測から制限がついている



# 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(これだけで決まりということもない)

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

$$\dot{N}_{\text{ion}} > \alpha_B(T) \langle n_e n_{\text{HII}} \rangle \approx \alpha_B(T) \langle n_{\text{HII}}^2 \rangle = \alpha_B(T) \langle n_{\text{HII}} \rangle^2 C_{\text{HII}}$$

$\alpha_B$ 再結合係数

$$C \equiv \frac{\langle n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2}$$

Clumping factor

再電離史を調べる為には、

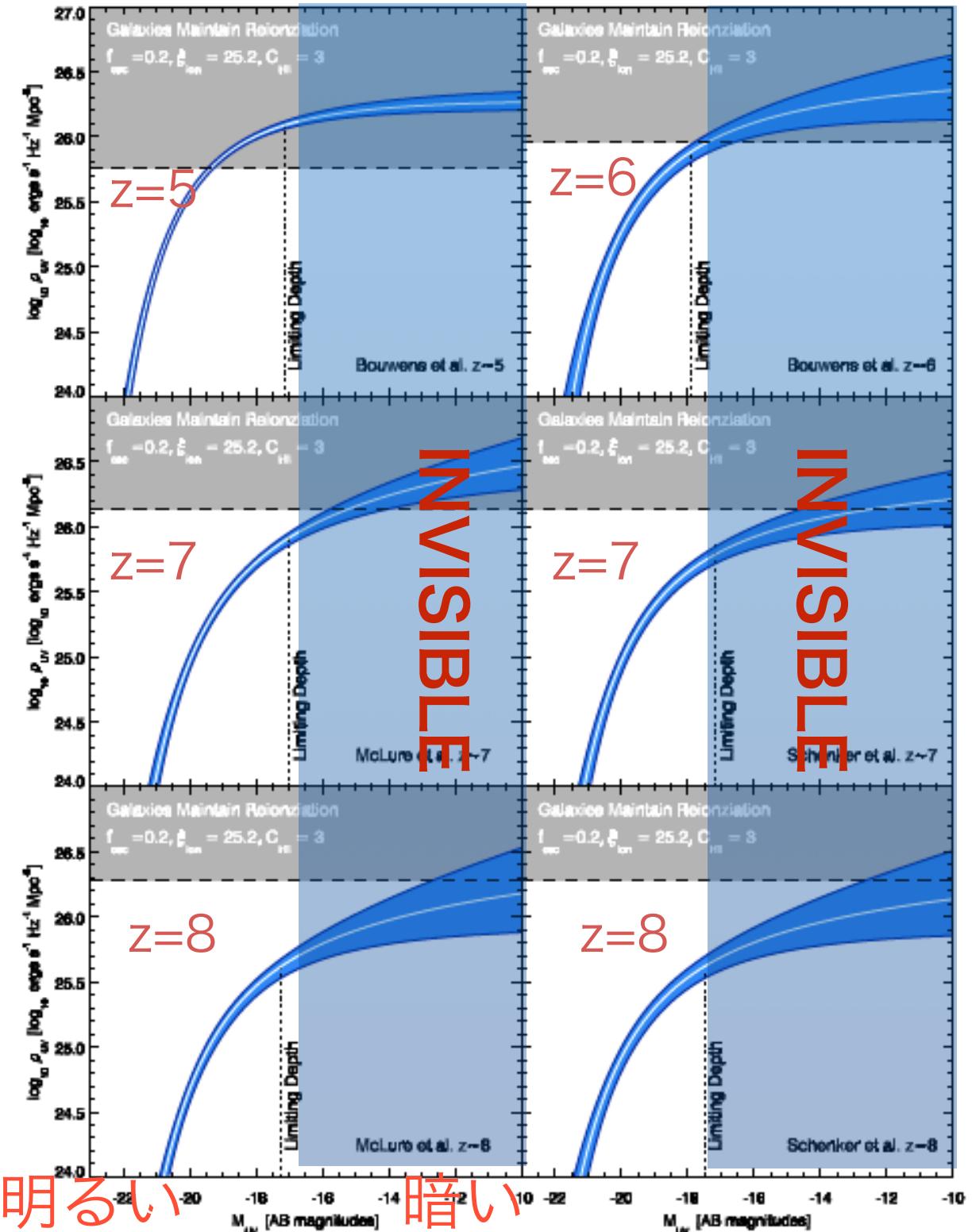
- 1) 銀河間物質(Intergalactic medium: IGM) clumping factor
  - 2) 電離光子源(銀河)の個数密度
  - 3) 光子源当たりの放射される電離光子数(星形成率 × 電離光子が IGM へ抜け出す割合:  $\text{escape fraction} = f_{\text{esc}}$ )
- の情報が必要

# High- $z$ galaxies

Integrated UV光度関数@ $z \sim 5-8$   
(Robertson+'13)

観測される銀河のnumber  
countからどの時期で再電  
離が可能かどうかを調べる。  
 $f_{\text{esc}}=0.2, C_{\text{HII}}=3$ を仮定

Escape fraction, faintな銀  
河の数等の観測できていな  
い部分の不定性が大きい。



# UV feedback

天体形成・IGMの熱・化学・力学進化を考える上で重要な効果

光電離: 電離されたガスはおよそ  $10^4\text{K}$ まで加熱

(電離に使われた残りのエネルギーは電子の運動エネルギーへ)

>  $13.6\text{ eV}$  光子 (HeI, HeII は  $24.5\text{eV}$ ,  $54.4\text{eV}$ )

– ビリアル温度  $10^4\text{K}$ 以下の天体は、形成が強く阻害される (Jeans filtering).

再電離期では、ハロー質量  $\sim 10^{8-9}\text{M}_{\text{sun}}$  に対応

+ 電離が増えること自体は、水素分子形成を促進する。 (H-過程)

光解離(水素分子): 水素分子の破壊

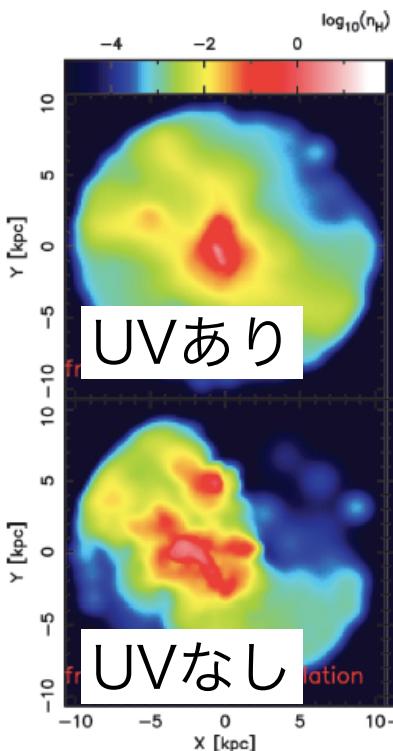
$11.2\text{eV}-13.6\text{eV}$  Lyman-Werner (LW) Band radiation で分子解離

– 重元素がない (or 非常に少ない) 環境下では、水素分子以外に低温まで冷やす輻射冷却過程がない (原子だけでは  $\sim 10^4\text{K}$ までしか冷えない)。 => 星形成の阻害

# 銀河とIGMへのUV feedback

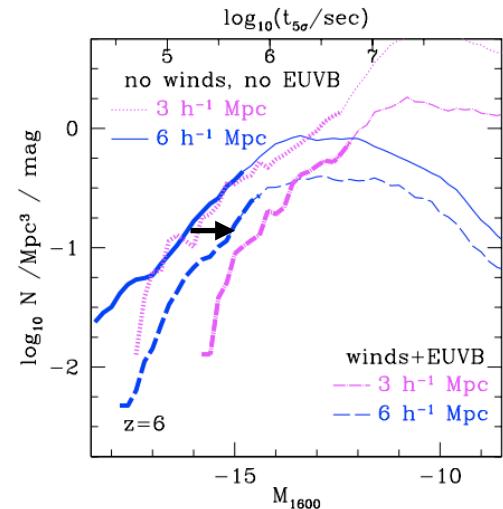
中性ガスの電離  $\Rightarrow$  加熱( $T \sim 10^4 K$ )  $\Rightarrow$  ガスの分布へ影響

## 銀河への影響



Umemura, KH+ '12: ガスの流出・高密度領域の破壊  
 $\Rightarrow$  星形成率減少・電離光子脱出確率の上昇

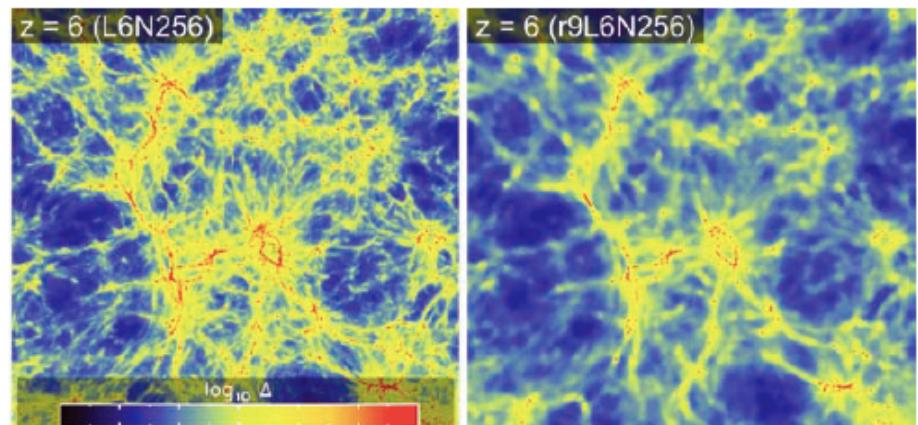
## UV光度関数



Finlator+ '13: 暗い銀河の個数減少

## IGMへの影響

電離加熱(一様加熱モデル)  
なし あり



Pawlik+ '09: 加熱によってIGMの細かい構造がならされる  
 $\Rightarrow z \sim 6$ で平均のClumping factorは10  $\rightarrow$  3に減少

# UV feedback on Key Quantities

## ★ Clumping factor $C_{\text{HII}}$

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。再電離史に敏感であると予想され、電離史と矛盾しないように計算する必要がある。

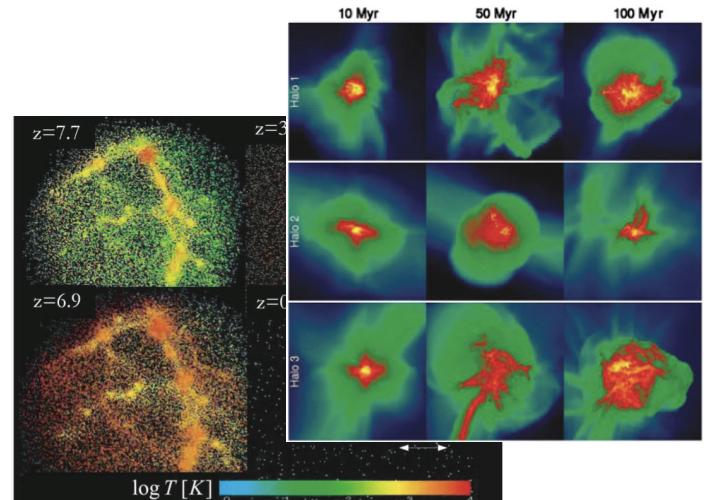
## ★ 銀河あたりのIGMへの電離光子放射率(SFR $\times f_{\text{esc}}$ に比例) e.g., Umemura, KH+ '12

## ★ 銀河の数密度

再電離期には、Externalな輻射(UVB)と  
Internalな輻射(星からの輻射)のfeedback  
があり両方を同時に考える必要がある。

UV feedback とガスの運動を矛盾なく解く「輻射流体力学計算」が必要

Internal Feedback Wise & Cen '09



External Feedback Susa & Umemura '04

# 本研究

輻射流体計算(Radiation Hydrodynamics: RHD)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の統一的な理解を目指す。

銀河を分解しつつ、大局的な電離構造も解く

特に

- UV feedbackが銀河形成史・再電離史にどの程度影響を与えるか?
- 結果として、どの時期に何故再電離が起こるのか?

を調べる

# “START”

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

- Hydrodynamics(+ Dark Matter Dynamics)

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) Lagrange的手法

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

辐射輸送を解くことで求める  
(次のページ)

- Non-equilibrium chemistry

$$\frac{dn_i}{dt} = \boxed{\text{Creation}} - \boxed{\text{Destruction}} n_i$$

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

# “START”

## ● Radiative Transfer of UV photons

- 主に電離、解離光子の輸送(加熱~ $10^4$ 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

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \nabla I_\nu = \eta - \chi I_\nu$$

emissivity

opacity

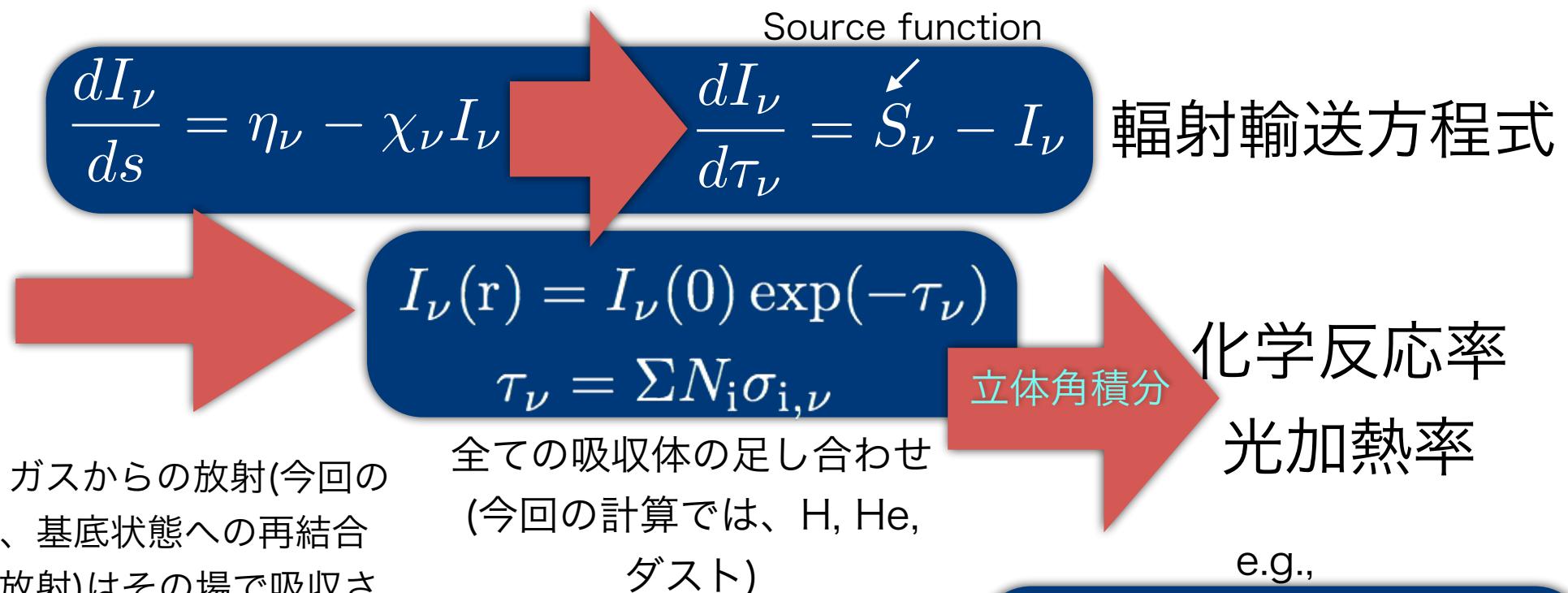
輻射輸送方程式

近似1: 流体,光源の変化のタイム  
スケールはlight crossing timeより充分長い(時間微分項を落とす)  
#高赤方偏移で伝播する平均自由行程が短いUVでは良い近似

# “START”

## ● Radiative Transfer of UV photons

- 主に電離、解離光子の輸送(加熱~ $10^4$ 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



# Setup

- Lambda CDM Cosmology (WMAP 9yr)
- 粒子数(Volume):  $2 \times 256^3$ 粒子( $5\text{Mpc}$ ) $^3$ ,  $2 \times 512^3$ 粒子( $20\text{Mpc}$ ) $^3$

水素分子 or Metalが必要

- $m_{\text{SPH}} \sim 10^4 M_{\text{sun}}$ , 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), sub ckpc くらい構造を分解

- Star Formation recipe

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

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

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

$$\frac{d\rho_*}{dt} = C_* \frac{\rho_g}{t_{\text{dyn}}}$$

- Feedback processes

Age-dependent SED, SN rate (population synthesisを解いておく)

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

\*SN feedback  $10^{51} \text{erg/SN}$

\*Metal & Dust enrichment

# 重元素 & ダストの効果

- \* Metal cooling (Mapping III)-> 星形成率の上昇 ↑
- \* Dust (0.1micron)  $\rho_{\text{dust}} = 0.01 \rho_{\text{gas}} Z/Z_{\odot}$   
UV吸収->星形成率↑ & 電離光子脱出率↓

Drain & Lee (1984)のテーブル (Size-, and frequency-dependent opacity) を用いる  
ダスト表面でのH<sub>2</sub>形成-> 星形成率↑

ダストの温度決定: 輻射平衡(吸収と放射の釣り合い)を仮定

Thermal radiation from grains

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

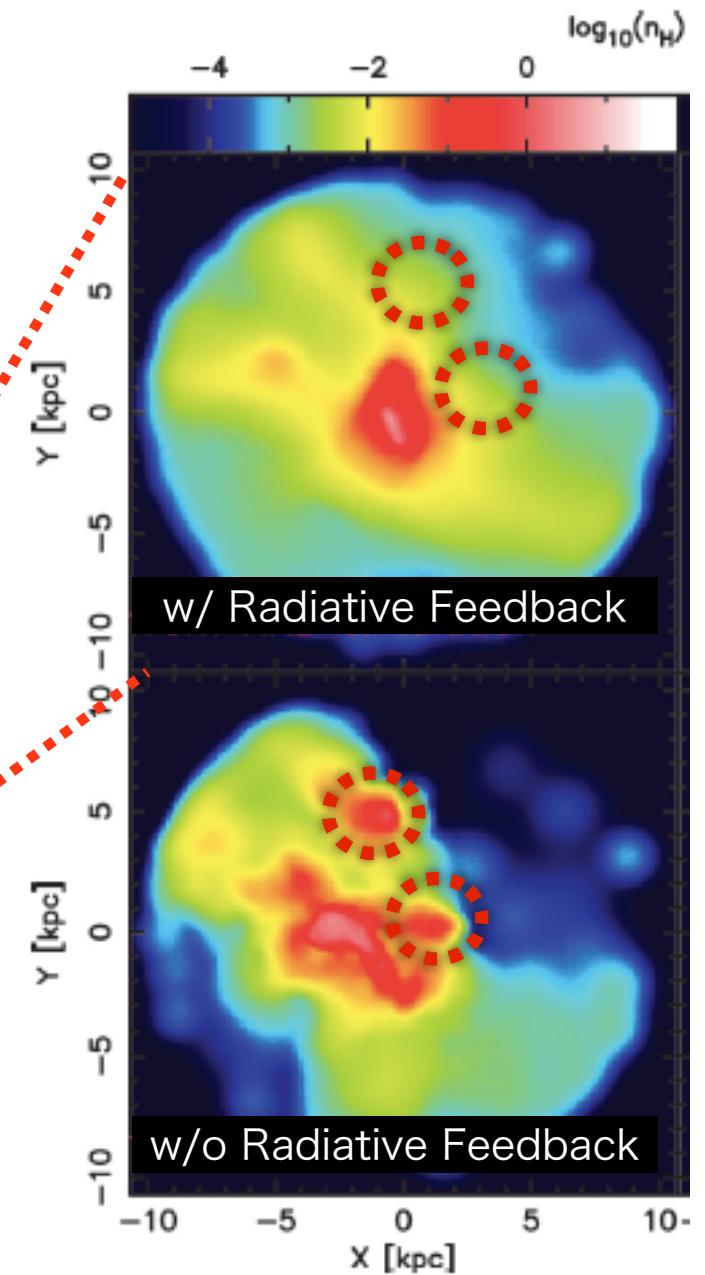
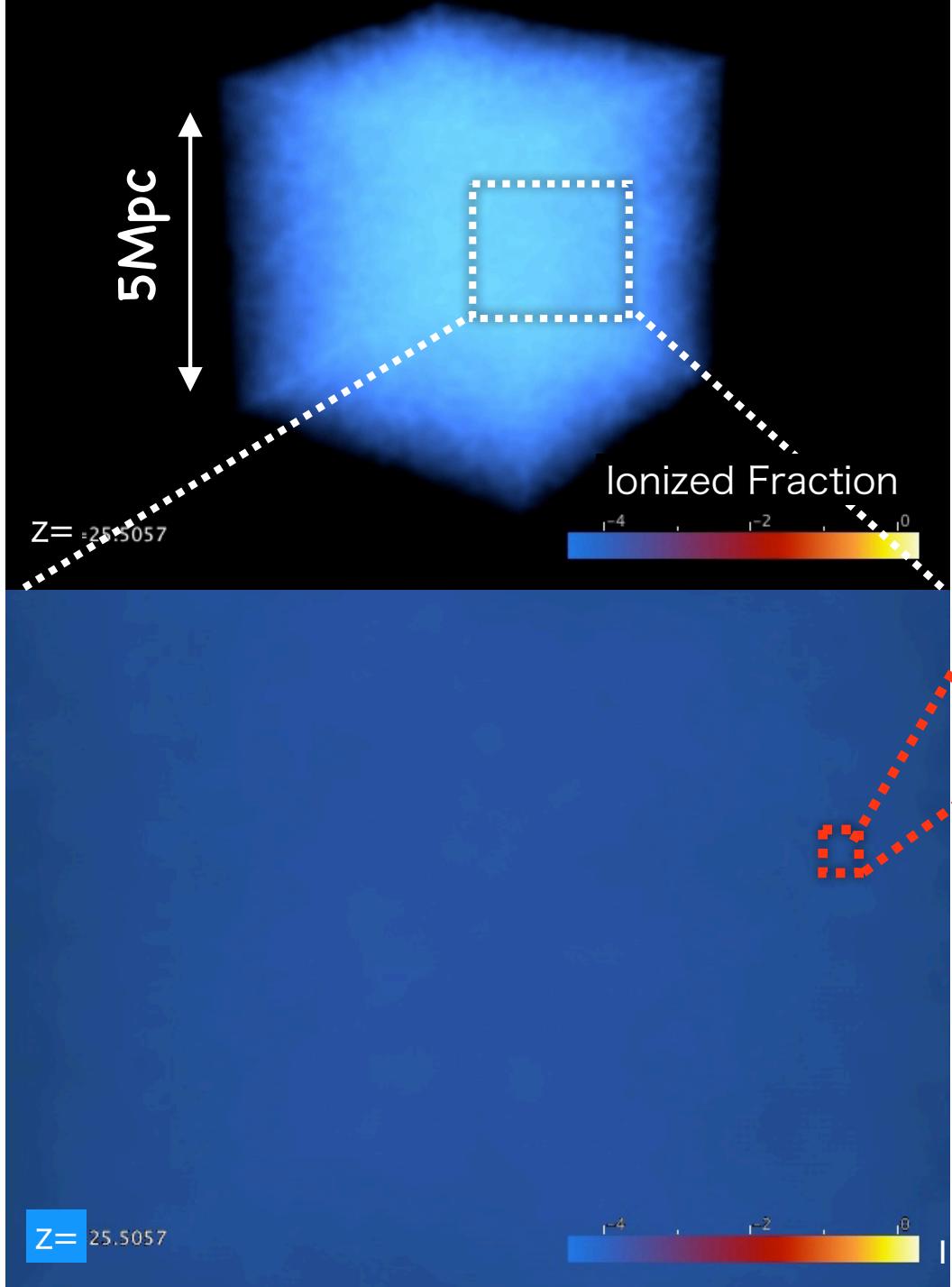
heating by stellar Radiation

輻射輸送

heating by CMB

Opt. thin

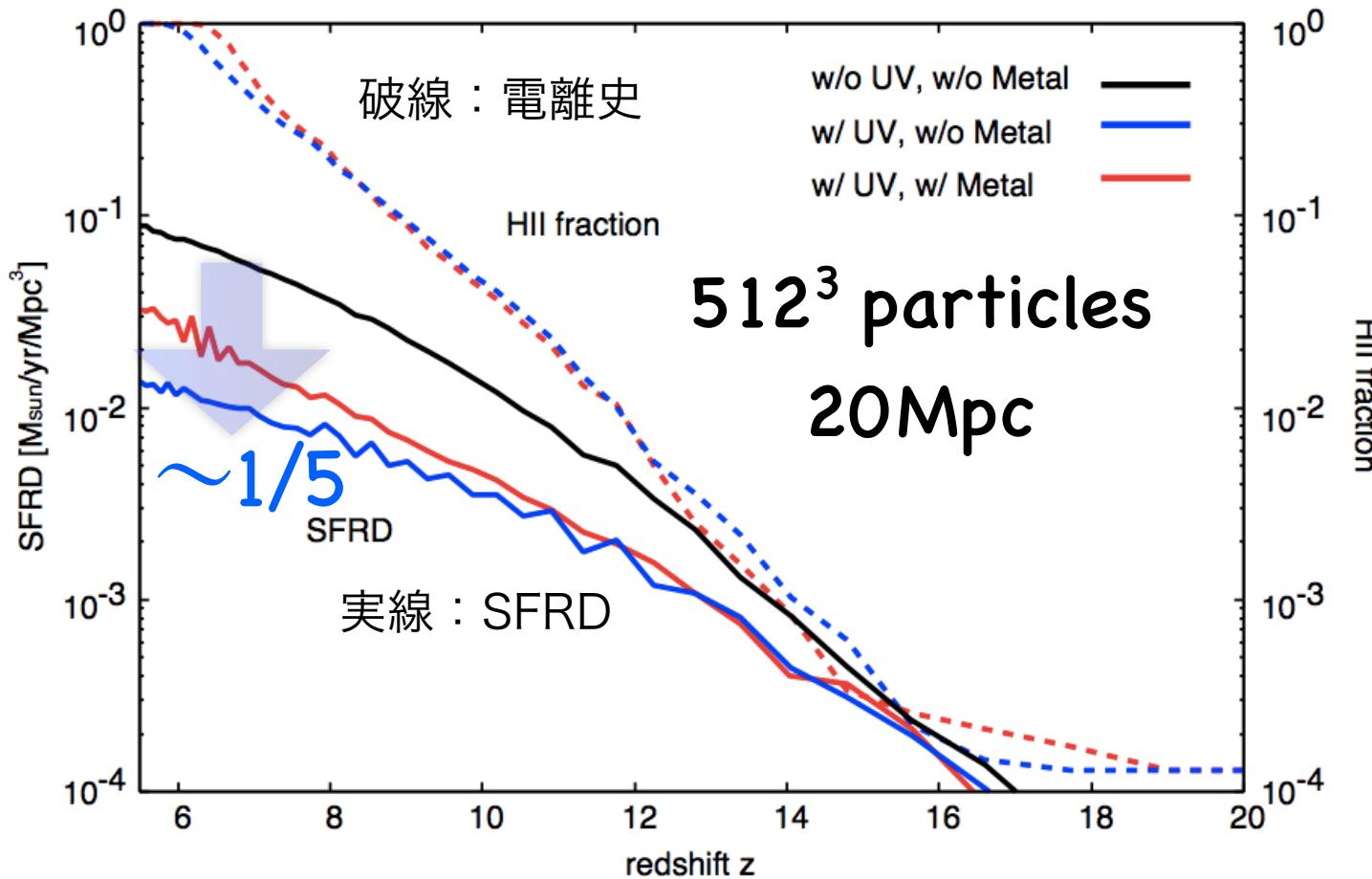
# KH, Semelin '13 (Metalなし)



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

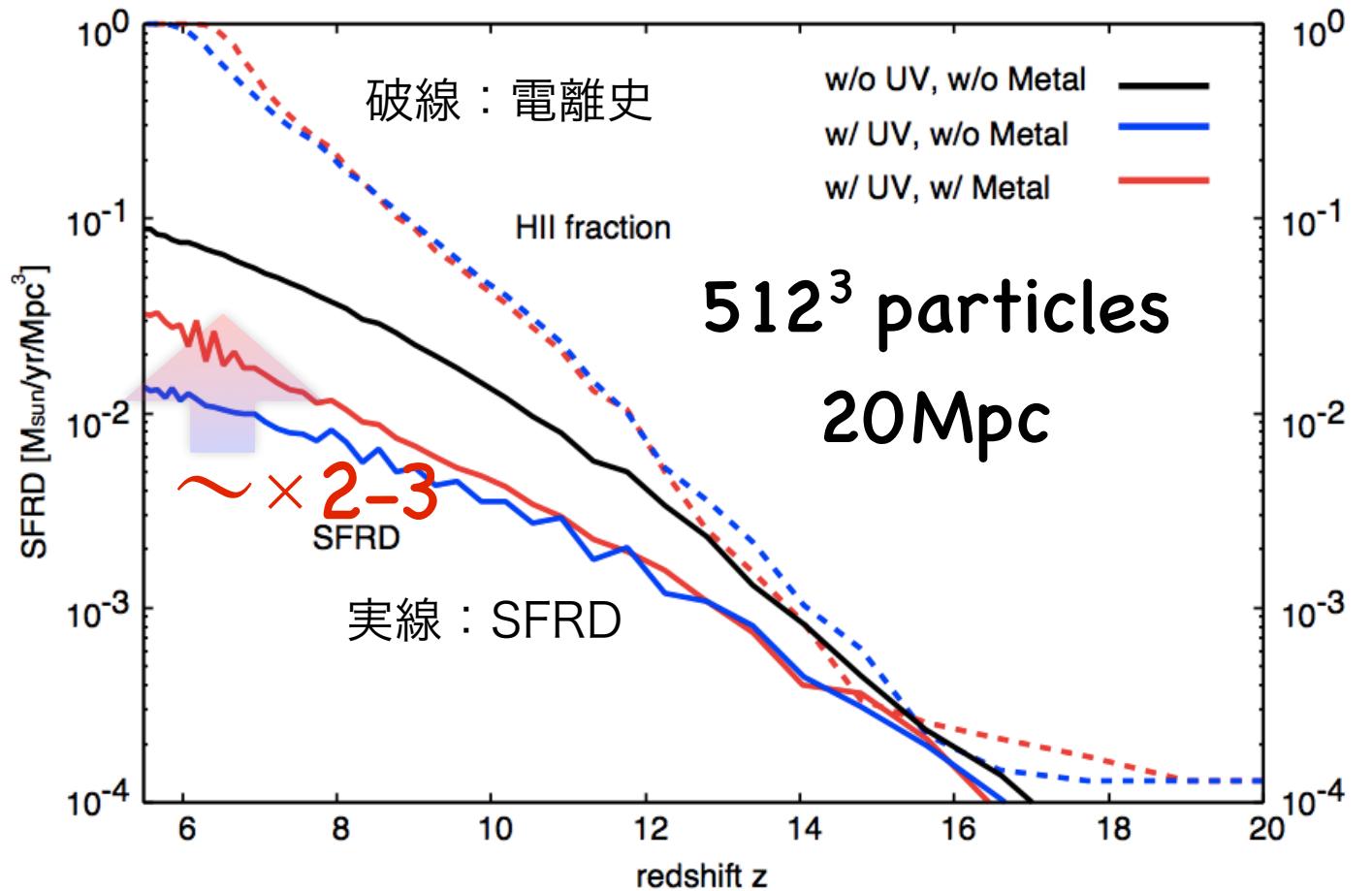
結果：Globalな電離・星形  
成率密度の赤方偏移進化

# Cosmic SFRD and Reionization History



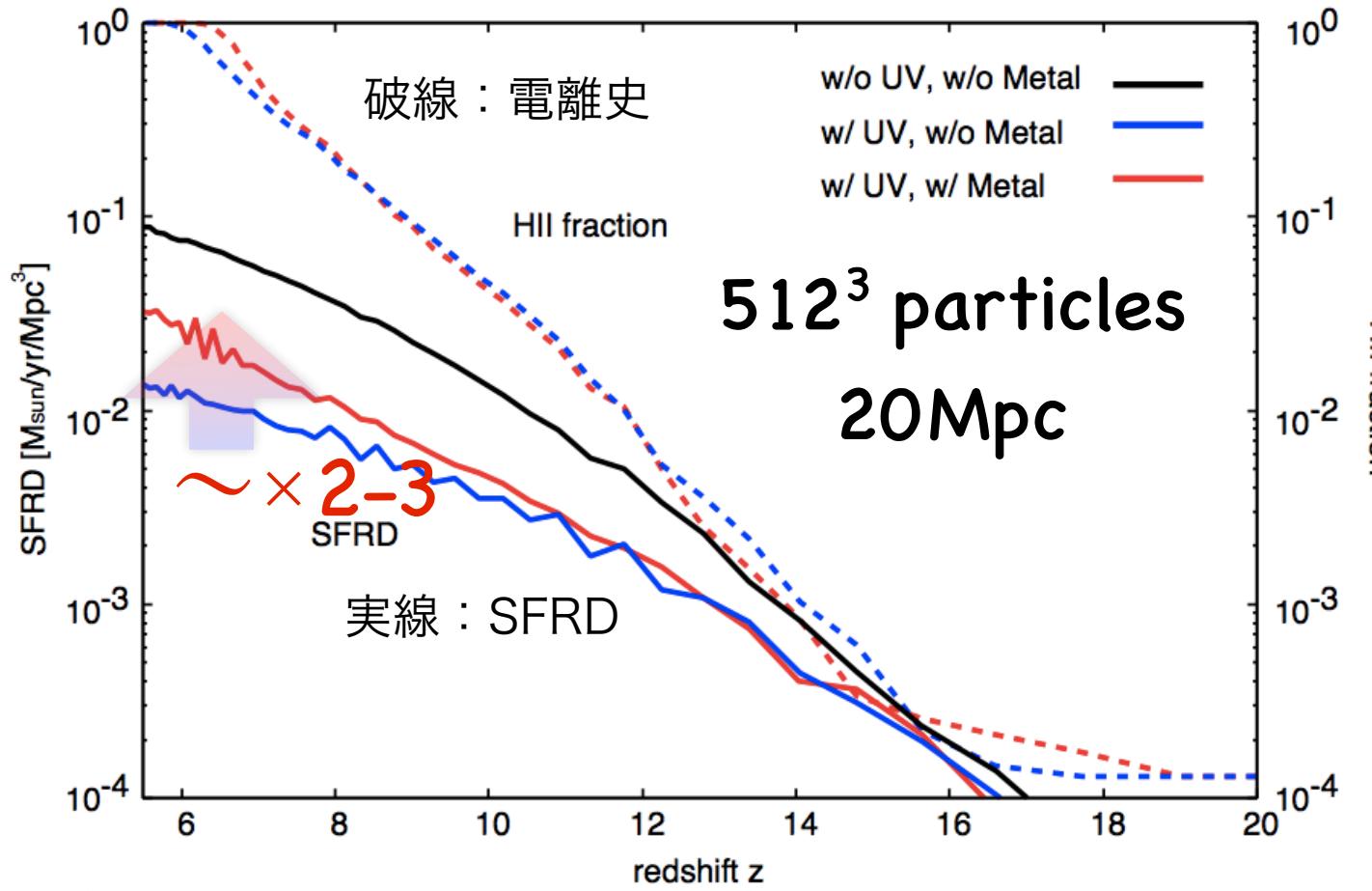
- UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる(黒線と青線の比較).

# Cosmic SFR and Reionization history



- UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる(黒線と青線の比較).
- 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(青線と赤線の比較).

# Cosmic SFR and Reionization history

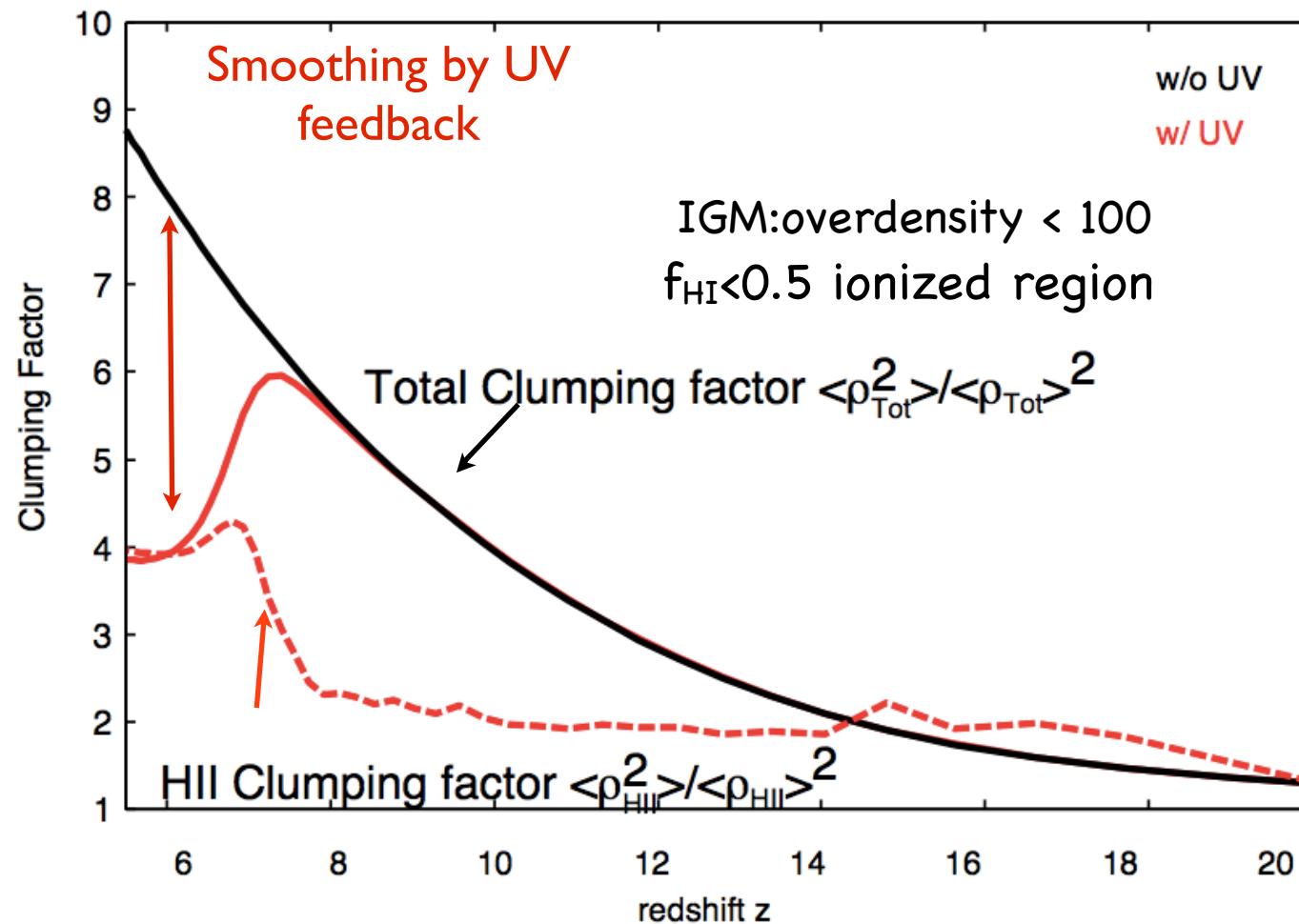


- UV feedbackは星形成率を1/5程度まで下げる(黒線と青線の比較).
- 重元素汚染効果(重元素冷却、ダストでの水素分子形成)はUV negative feedbackを和らげる(青線と赤線の比較).

- ★ 今回のシミュレーションでは、 $z \sim 6$ でほぼ完全電離.
- ★ 重元素汚染効果でSFRが上昇する為、再電離進行が若干早まるが、dustの吸収も(若干)効く事で電離史への影響はそれほど大きくなない。

結果：IGMへのUV feedback

# IGM clumping factorへのUVの影響: Globalな進化

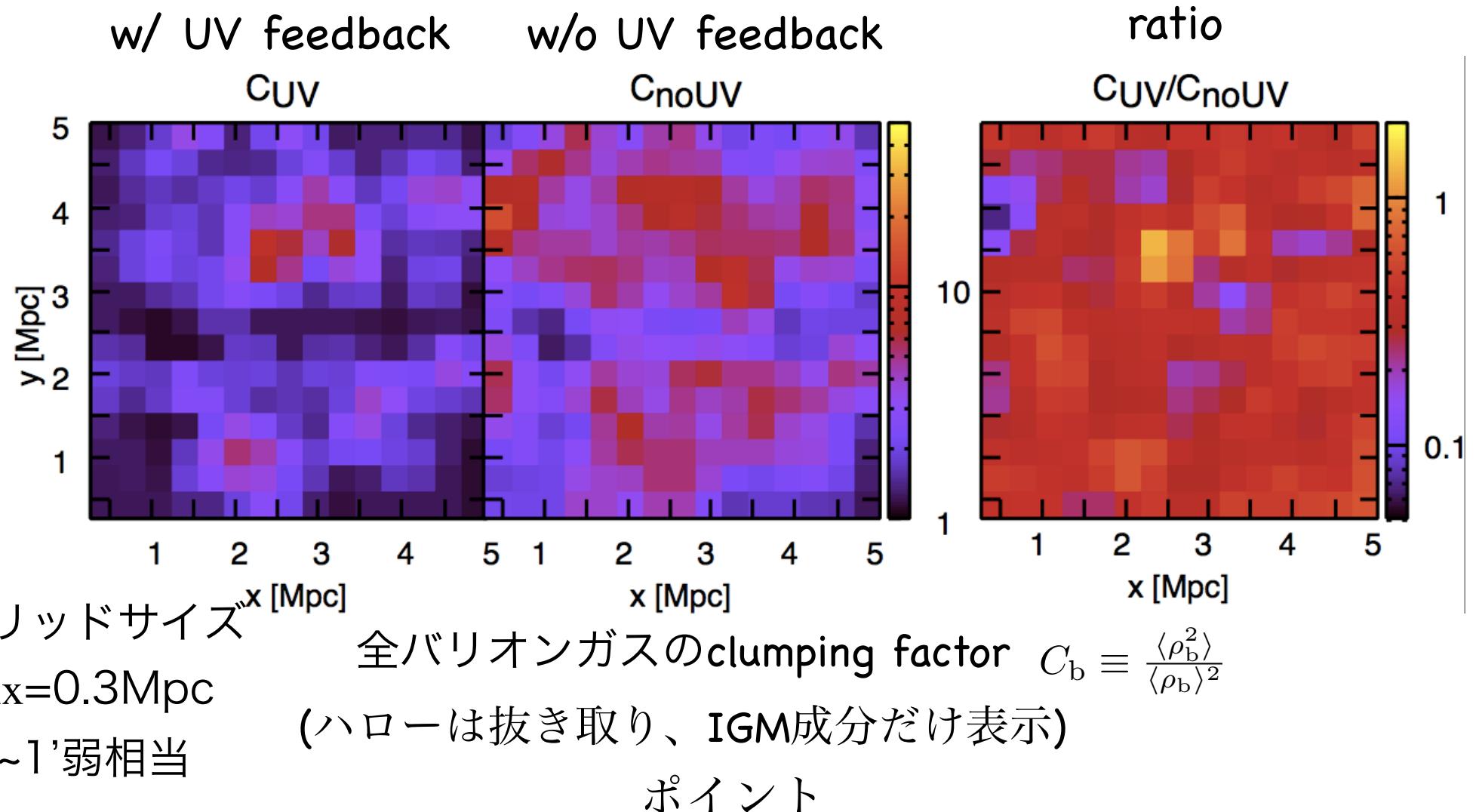


✓ Total IGM clumping factor : 再電離史に非常に敏感

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

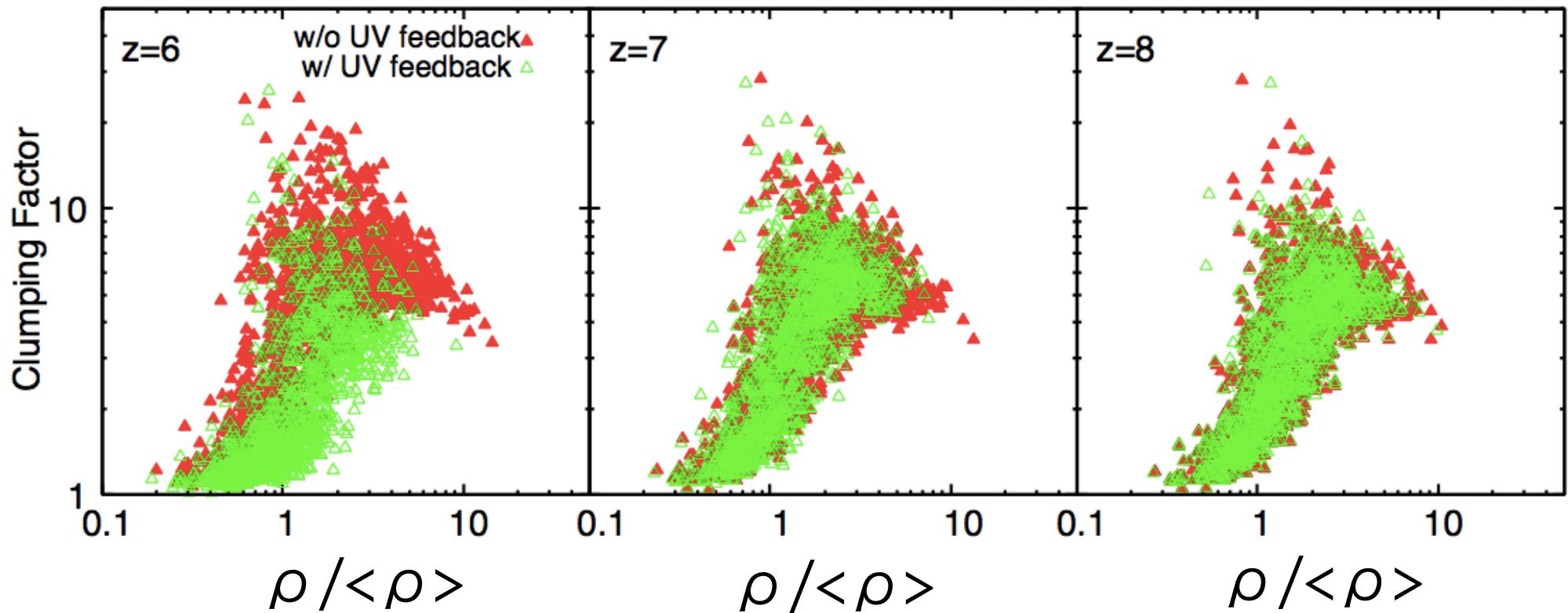
UV feedbackを考慮しない輻射輸送計算と比べて、少ない  
電離光子数で宇宙を電離状態に維持できる。

# IGM Clumping factorへのUVの影響: 空間分布



- 光加熱の効果で **clumping factor** は  $\sim 1/3$  に下がる。平均値は先行研究とほぼ同等。
- しばしば空間的に一様な **clumping factor** が仮定されるが、実際は、空間的に非一様である。

# Clumping factorと密度の関係



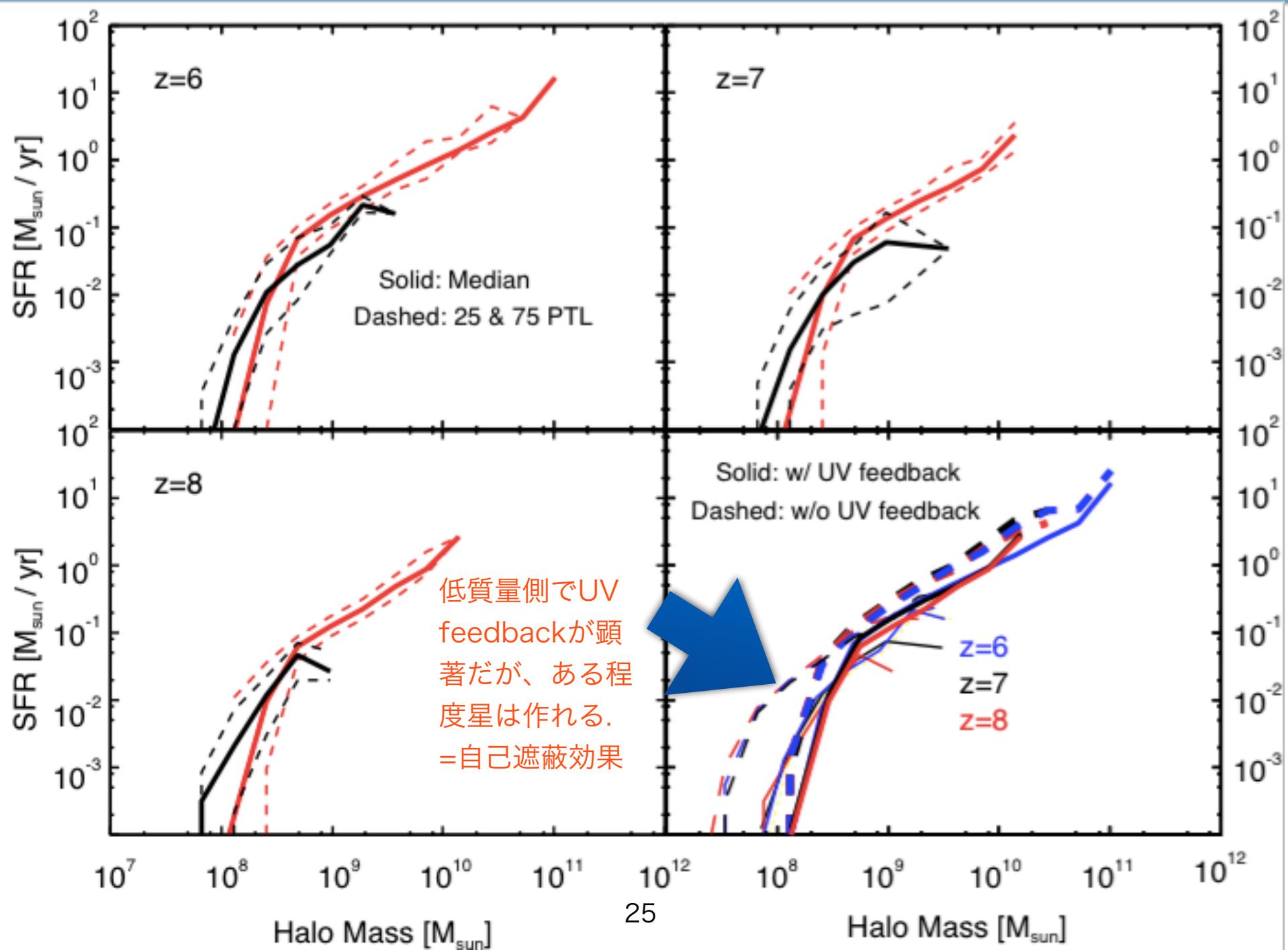
Clumping factorはlocalな密度と良い相関.

$\Rightarrow$  localな密度の関数としてモデル化が可能

Feedbackを考慮しても、Globalな平均値を用いると高密度(低密度)領域でのHII領域サイズを過大(過小)評価

結果：星形成率( $M$ )とUV光度関数

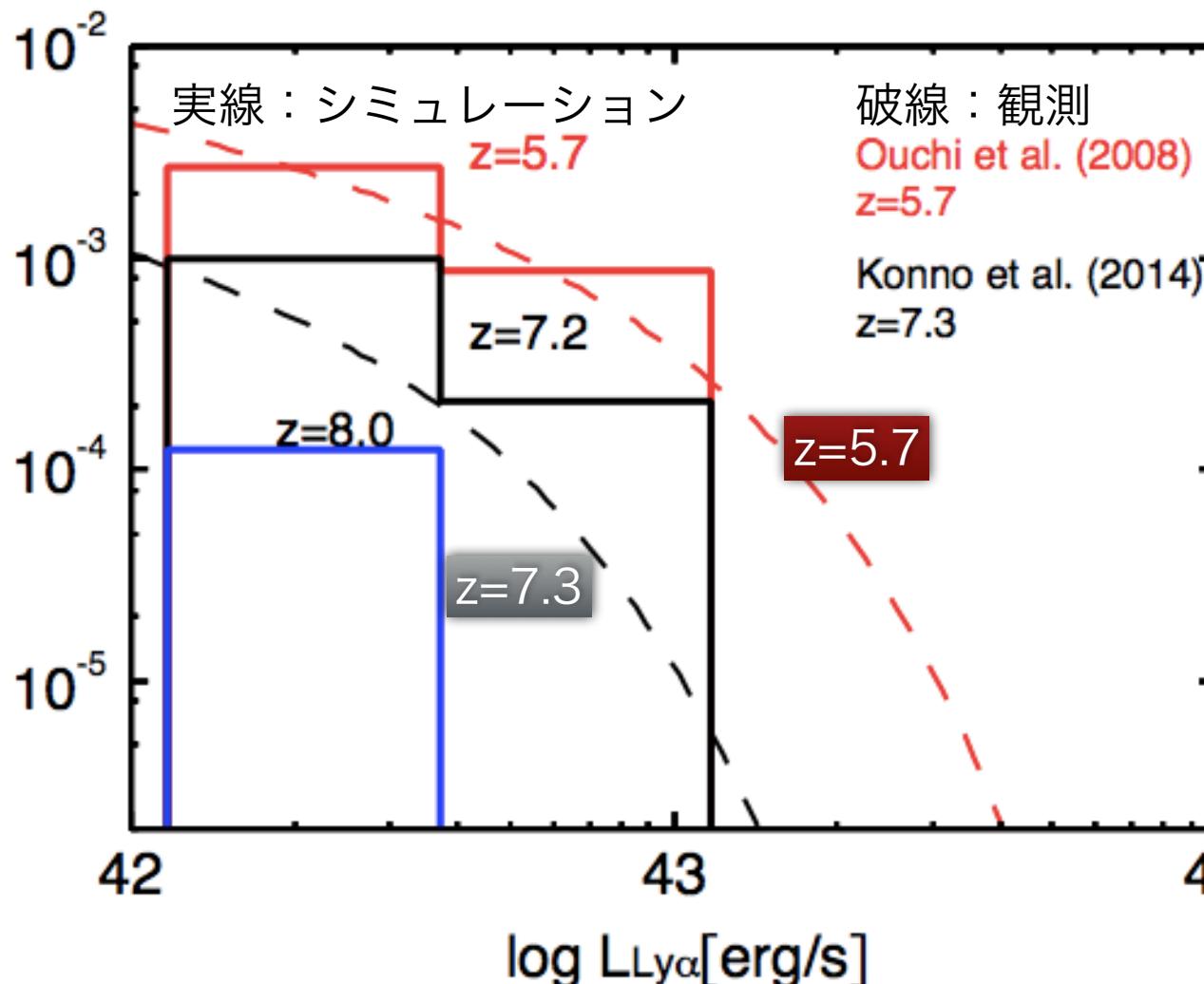
# 銀河の星形成率@ $z=6-8$



# Ly $\alpha$ 光度関数

$f_{e,a} = 0.2$  is assumed. (Ly $\alpha$  Radiative Transferは解いていない)

No IGM extinction.



もし  $f_e$  の赤方偏移進化がないの  
であれば、我々のモデルは  
 $z \sim 7.3$  で LAE を overproduct す  
る。

しかし、シミュレーションでは、  
 $\langle x_{\text{HII}} \rangle \sim 0.3 @ z=7.3$ .  
なので、IGM による減光を考慮  
することで観測と一致する可  
能性はある。

=> Ly $\alpha$  RT & IGM 減光を考慮し  
たモデルを構築中。

結果：

電離光子脱出割合

&

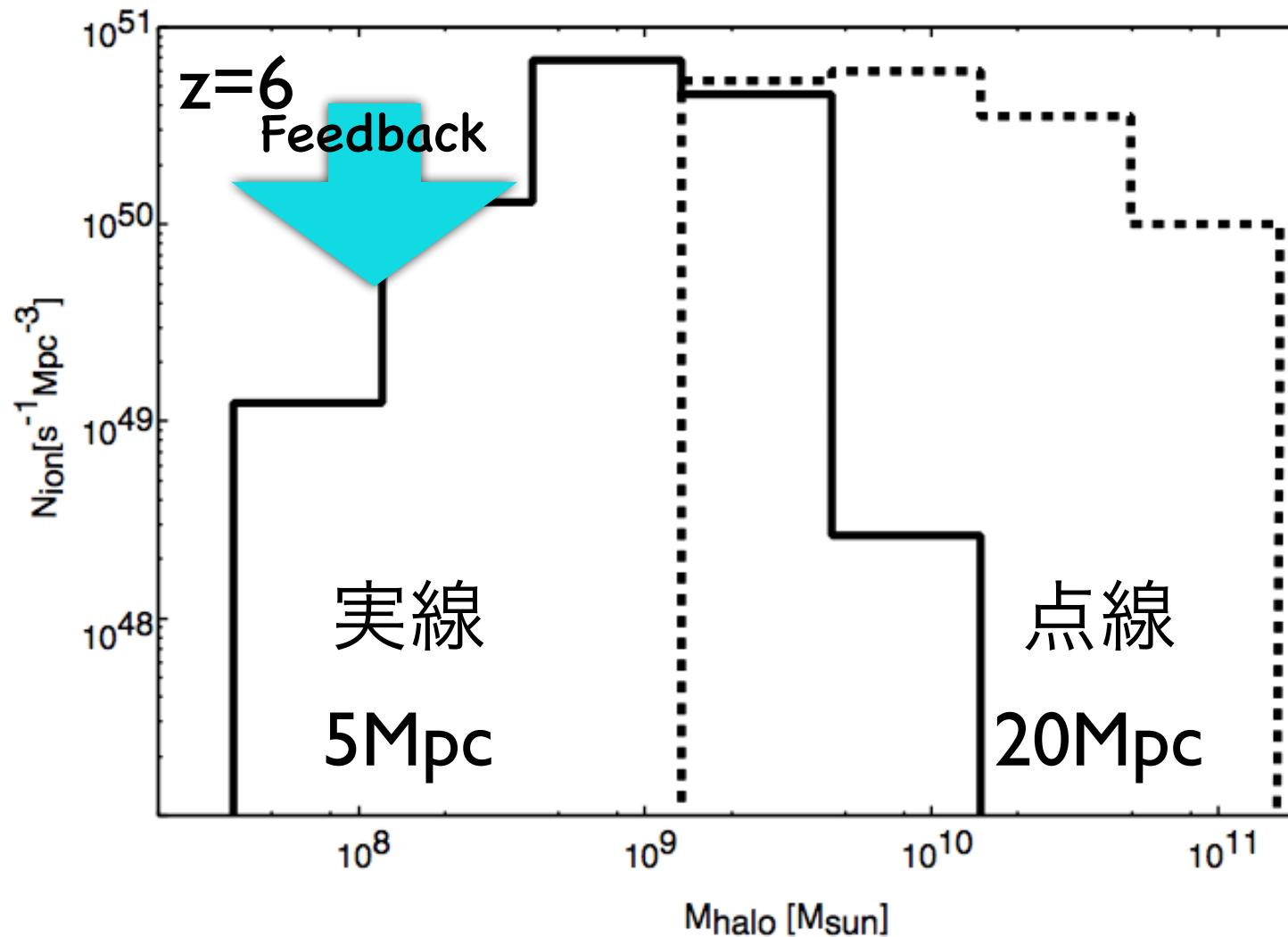
どの質量の銀河が電離光子供給源として  
重要か？

# 電離光子源として支配的なのはどの銀河か?

Intrinsic total emissivity (星が元来放射した電離光子)

Low-mass: UV feedbackで下がる

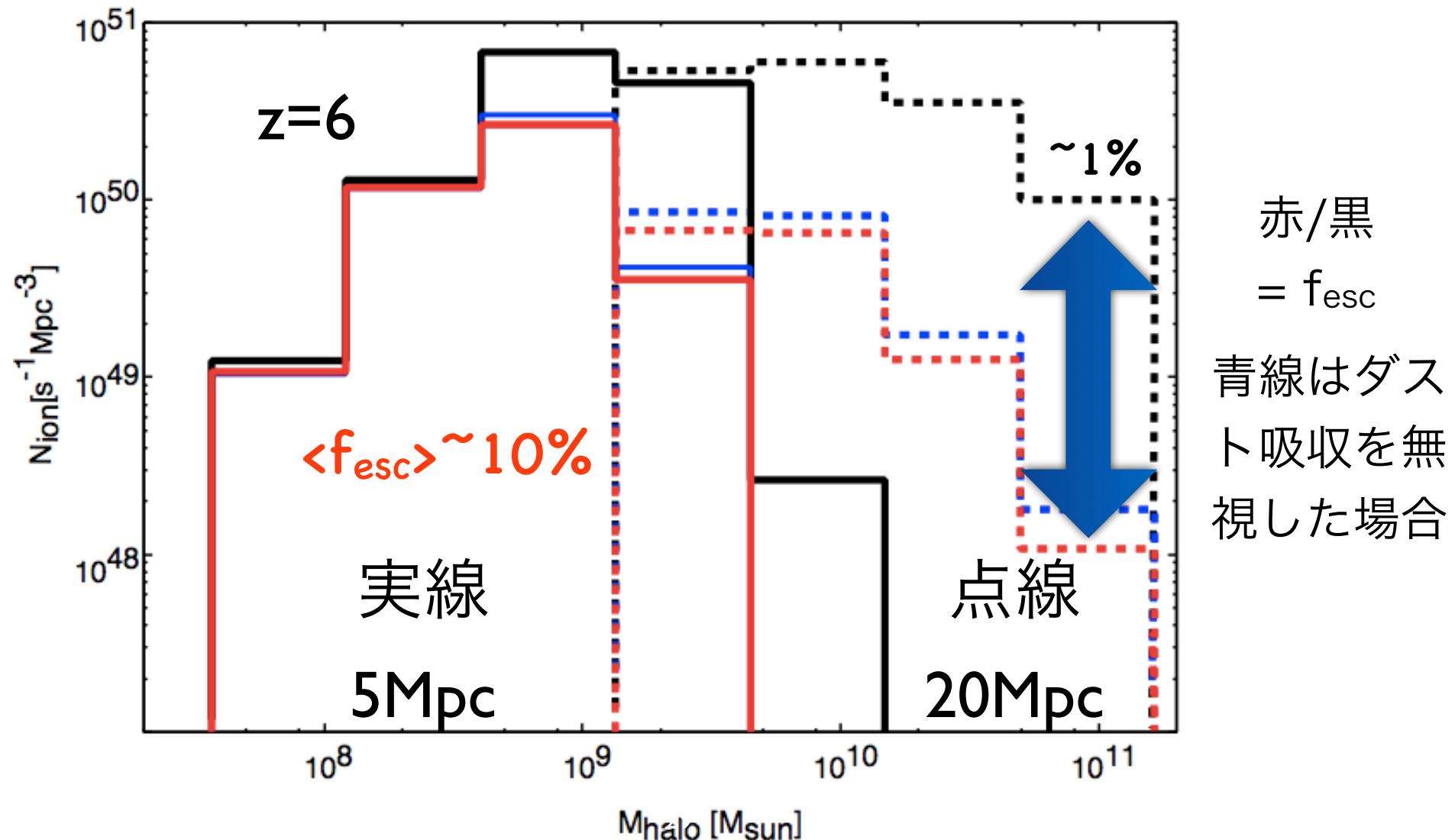
High-mass: 銀河の個数とSFRの質量依存性が相殺する。



# 電離光子源として支配的なのはどの銀河か?

## 電離光子脱出確率を考慮したEmissivity

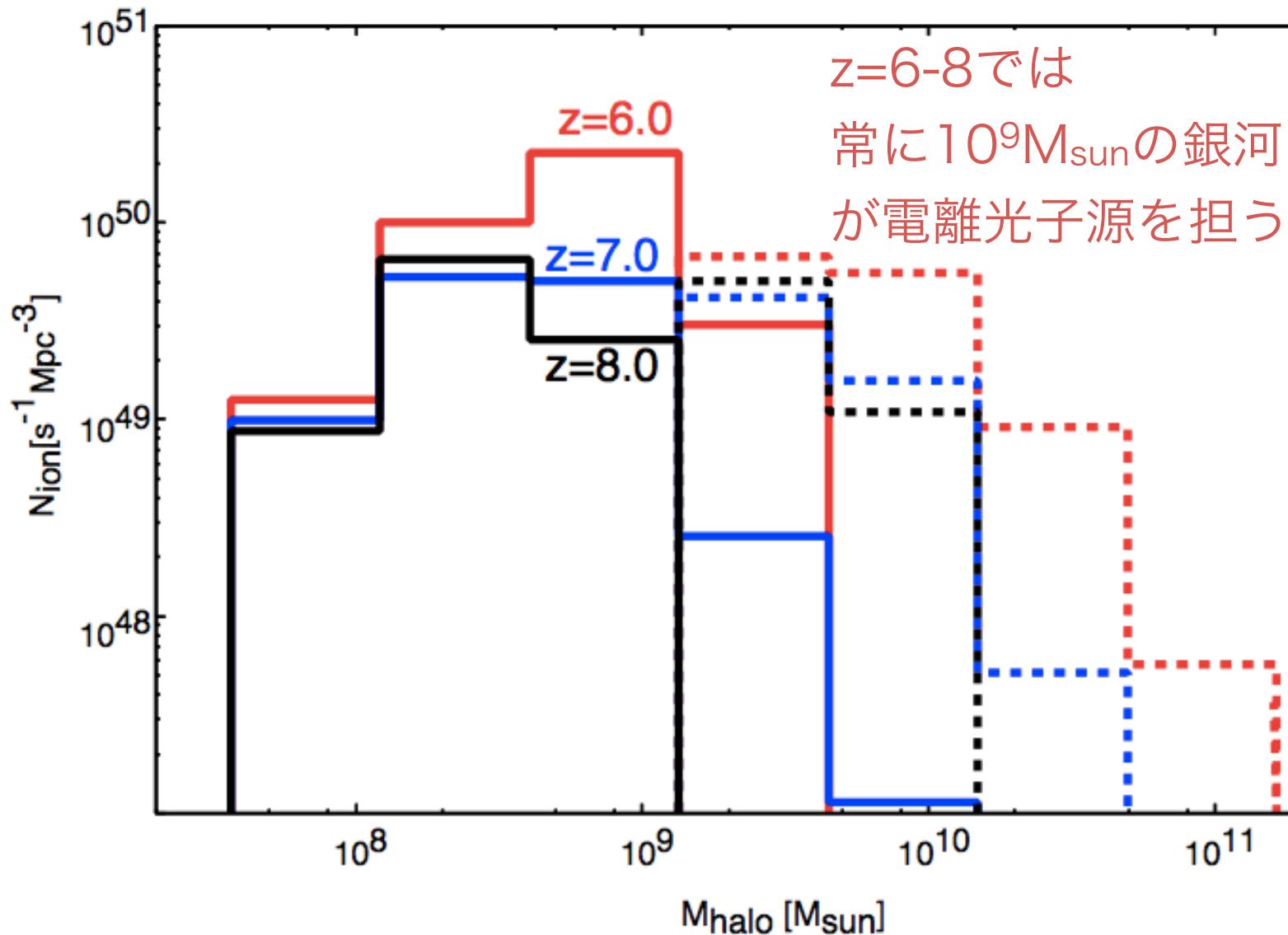
Escape Fractionの質量依存性と合わせると $10^9 M_{\text{sun}}$ (現在の観測限界より一桁程度くらいの銀河)くらいの銀河が再電離にとって最も重要である事が分かる。



# 電離光子源として支配的なのはどの銀河か？

Emissivity w/  $f_{\text{esc}}$  @  $z=6-8$

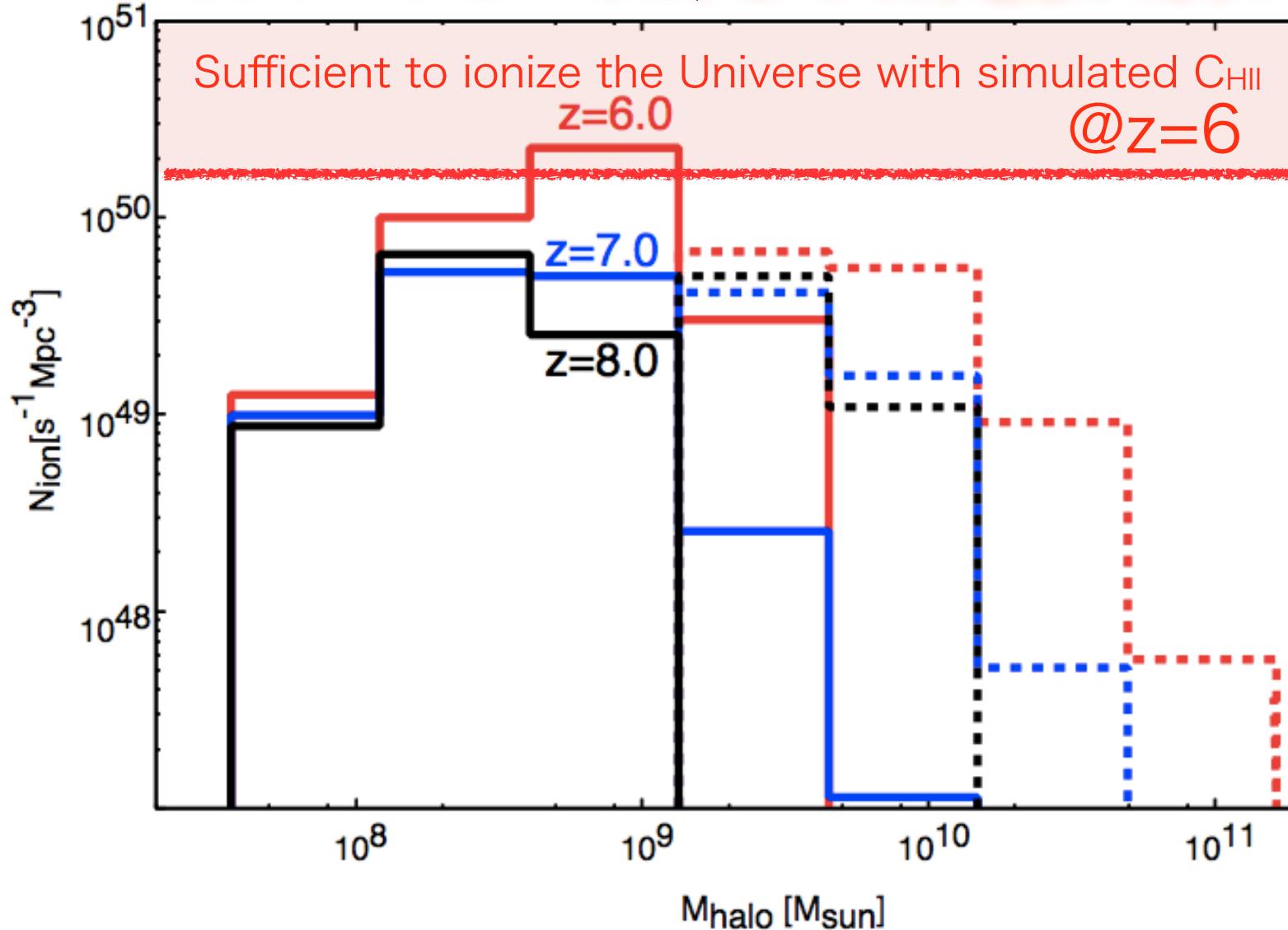
Galaxies with  $10^{8-9} M_{\text{sun}}$  are responsible for reionization



# Photon Budget : 電離光子数と再結合数の比較

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

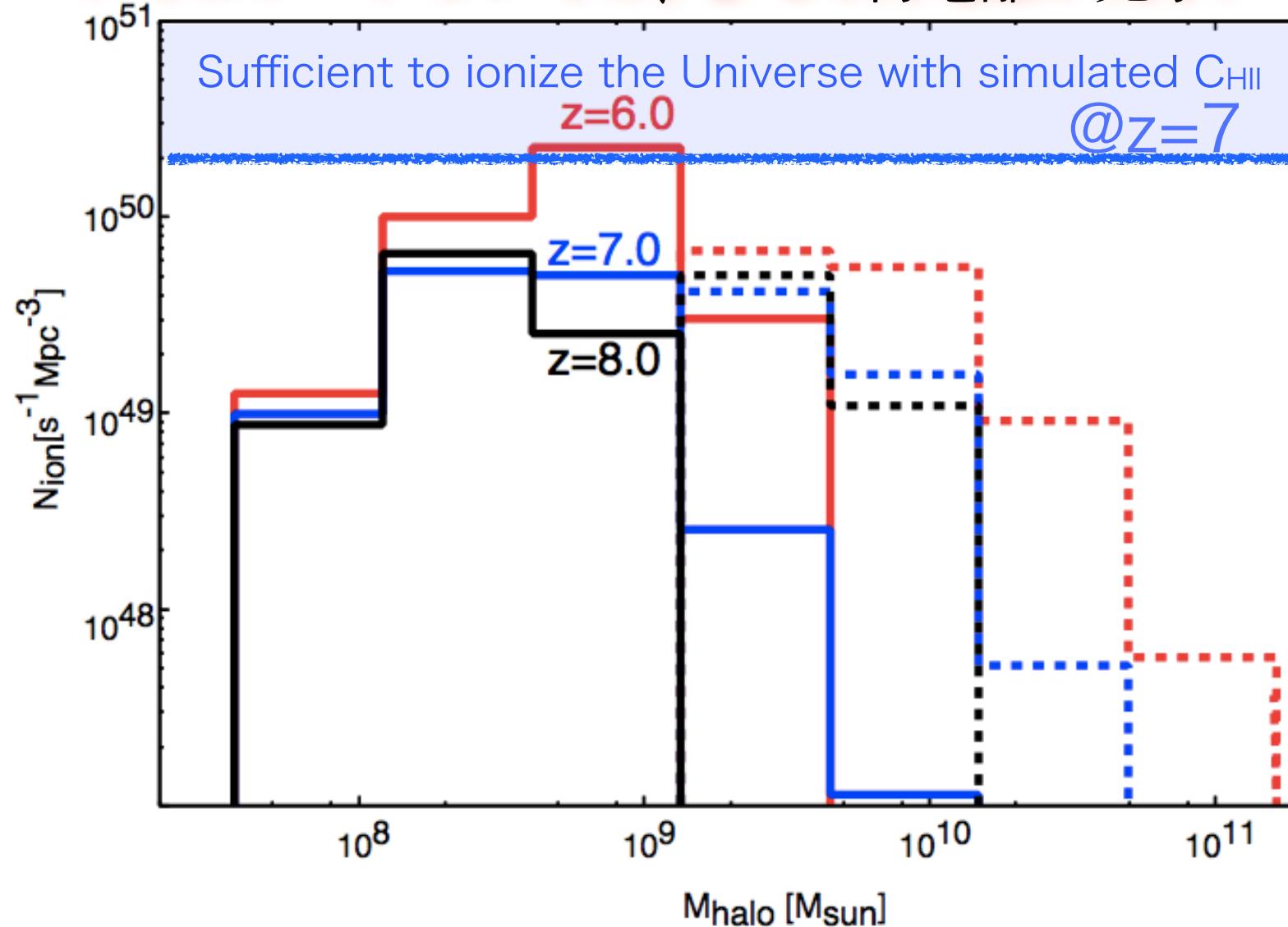
シミュレーションでは、 $z \sim 6$ で再電離が完了。



# Photon Budget : 電離光子数と再結合数の比較

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

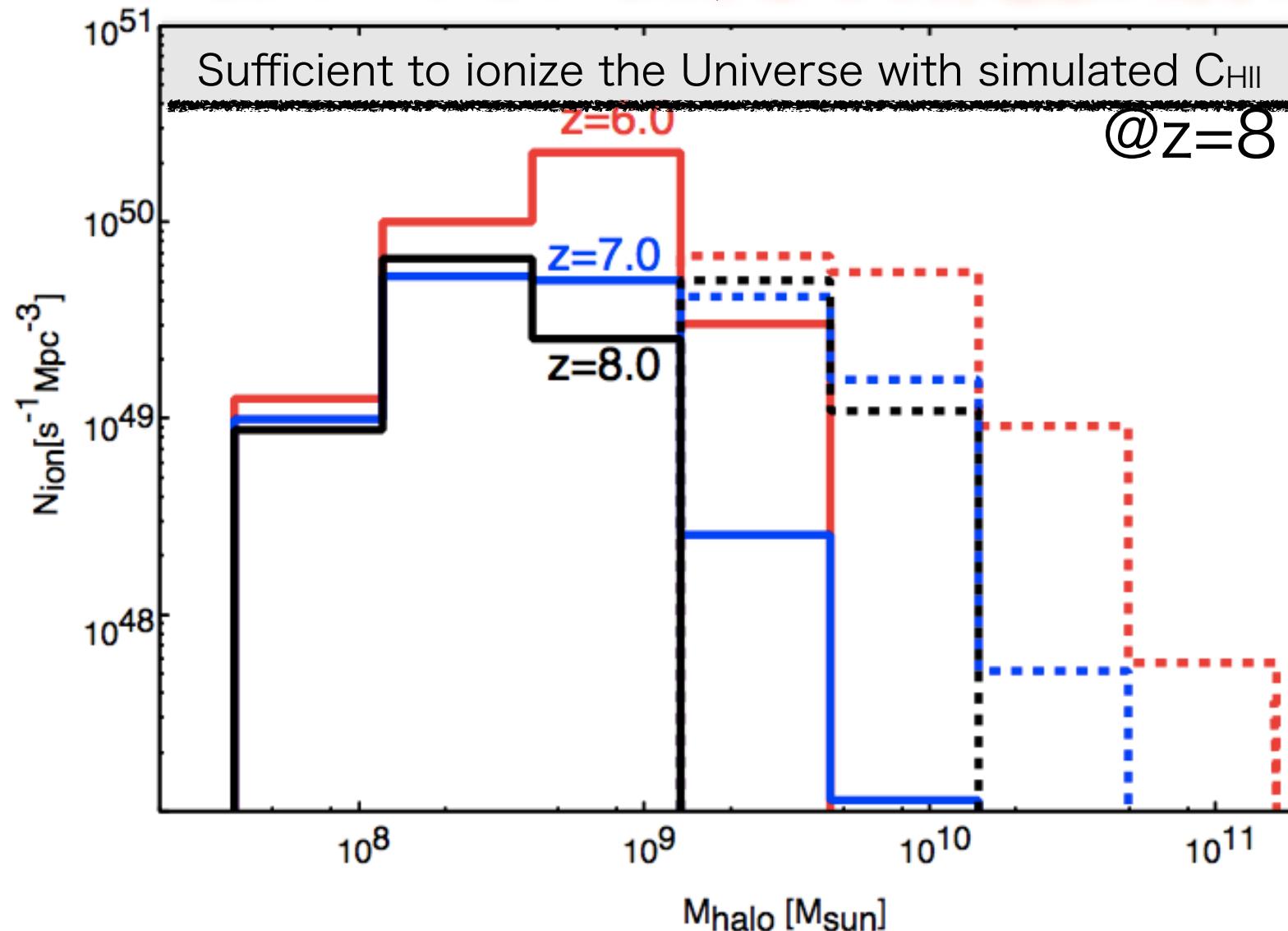
シミュレーションでは、 $z \sim 6$ で再電離が完了。



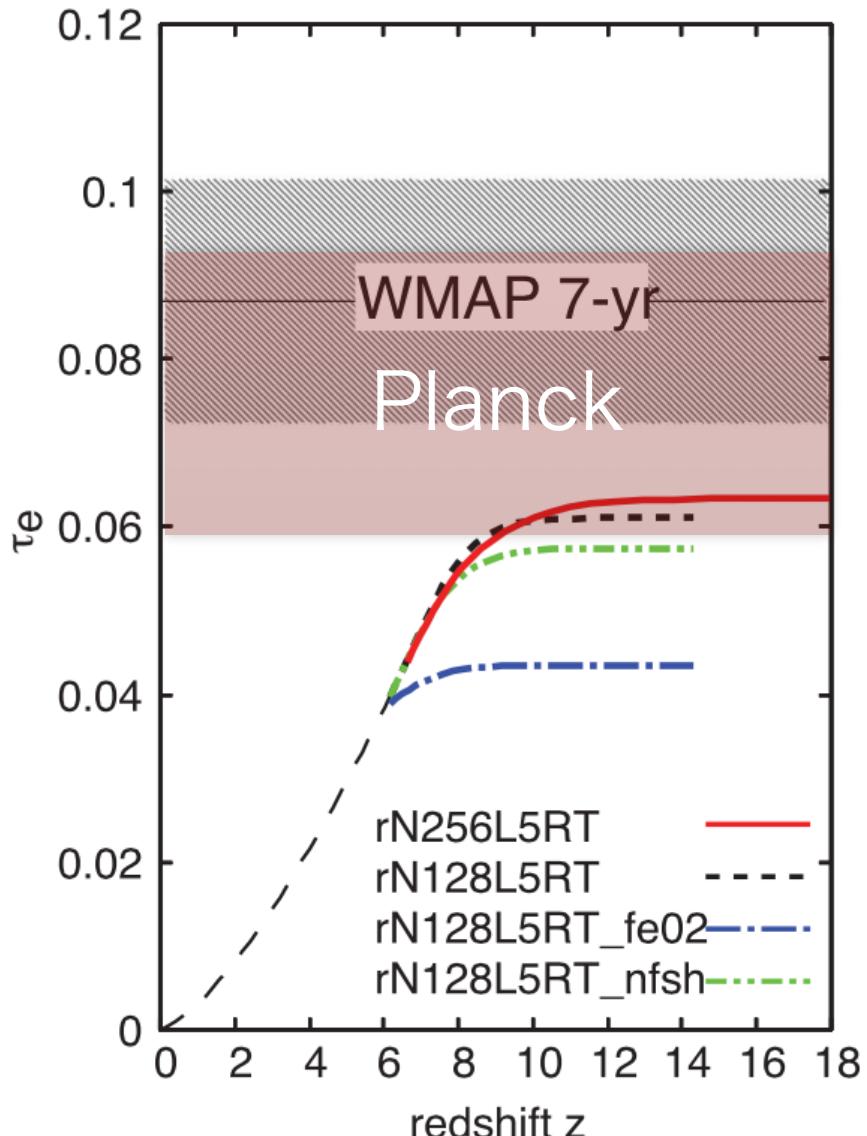
# Photon Budget : 電離光子数と再結合数の比較

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

シミュレーションでは、 $z \sim 6$ で再電離が完了。



# Optical Depth WMAP & Planck



KH+'13

Planckの結果であれば、銀河だけのモデルでも矛盾はしない。

見方を変えると、higher  $z$ で初代星の寄与が強すぎると  
PLANCKの結果と矛盾する可能性がある。

より高赤方偏移での天体形成でも feedback 過程をきちんと理解することが重要。

# まとめ

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、銀河間物質の進化を整合的に解いた

- ◆ UV **feedback** は星形成率( $\downarrow$ )、電離光子脱出割合、IGM **clumping factor**( $\downarrow$ )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 **shallow**な**slope**を予言する。
- ◆ 低質量( $10^{8-9} M_{\text{sun}}$ )銀河は、星形成率は低いが  $f_{\text{esc}}$  が高く、数も多い為、再電離に支配的な働きをしている事を示唆。

# Ongoing Work: 将来観測との比較へ向けて

SKAなどはEoRでの視野数100Mpcに相当し、観測との統計的比較の為にはより広い計算領域のシミュレーションが必要。

# そもそも20Mpcだと典型的な電離史は計算できない

輻射流体計算は計算量が膨大で実現困難

解決策：feedback (on Galaxies and IGM)をモデル化し、計算コストを削減した計算を行う。

- ポスト処理的輻射輸送計算
  - 準数値的(電離計算を簡略化)計算
- コードの作成w/ SKA EoR SWG

完成したコードはコンタクトがあれば提供予定:  
数値計算経験が浅い若手も再電離研究へ参入しやすく

SKAなどの将来観測計画へ向けて研究

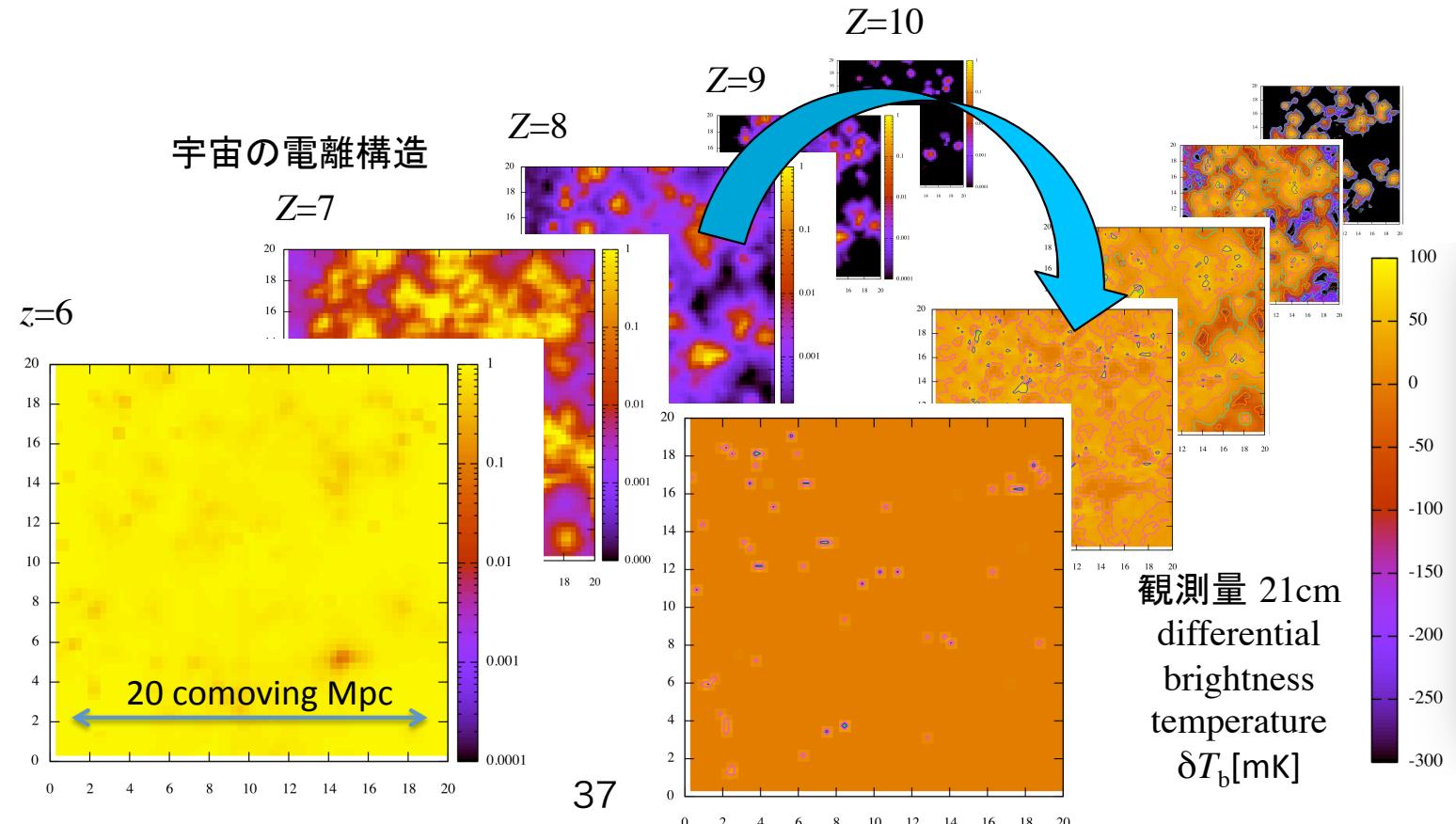
# SKAによるEoR 21cm観測にむけて

$$\delta T_b \approx 28x_{\text{HI}}(1 + \delta) \left( \frac{1 + z}{10} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T_s - T_{\text{CMB}}}{T_s} \text{ [mK]} \quad \text{w/ WMAP-9}$$

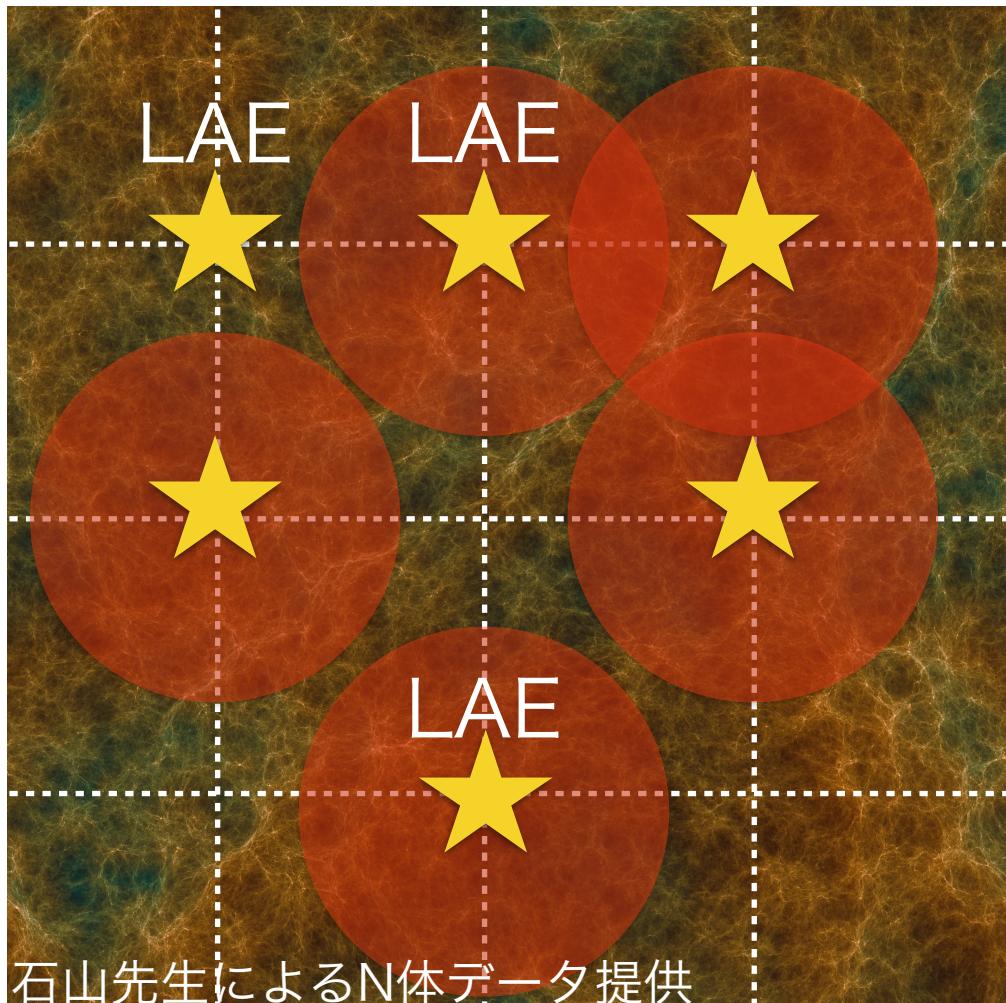
SKA2: 振動数ごとの21cm強度マップ(Tomography)

=各赤方偏移ごとの中性水素分布  
再電離史はこれまでより直接的にわかる！

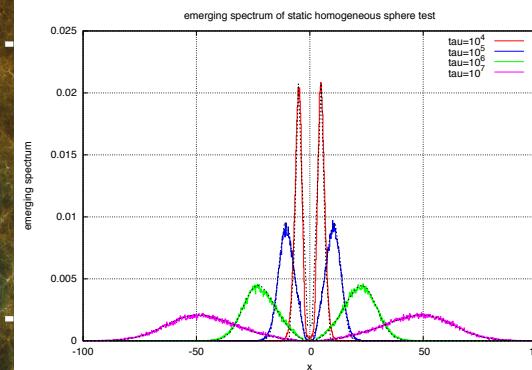
ポスト処理的輻射輸送計算による予備的計算結果の一例



# HSCによるLAE観測との比較



## $\text{Ly}\alpha$ 輻射輸送によるLAEモデリング



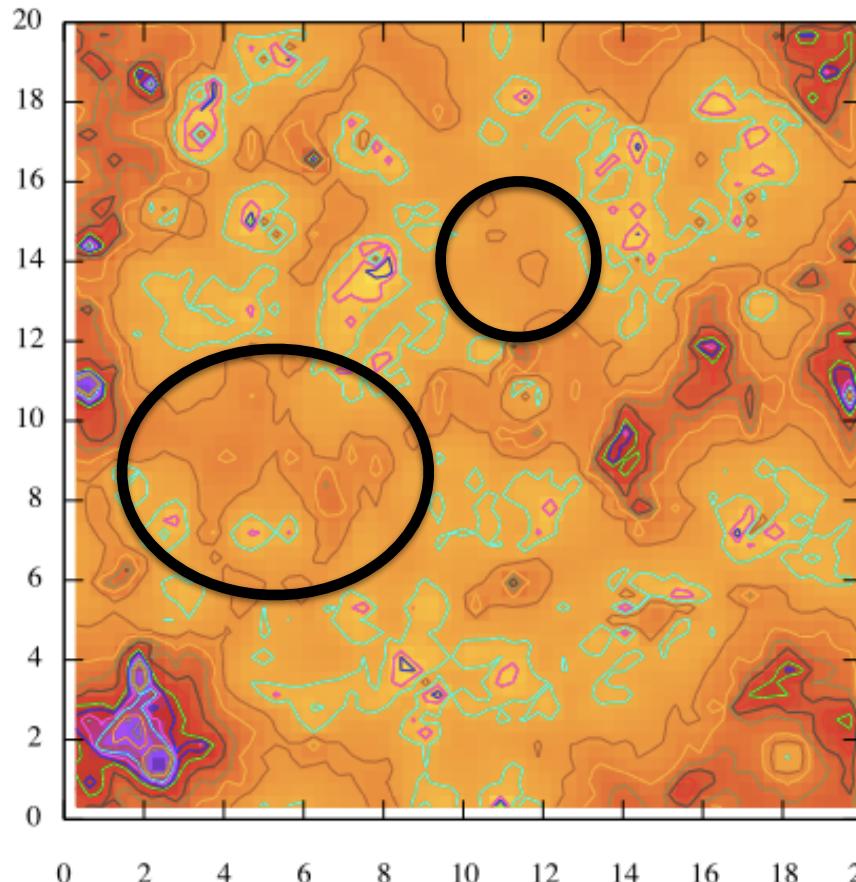
鈴木裕行さん(筑波大)によるテスト計算。銀河を使った計算を実行中。

- ・ 大局的電離構造計算  
RT(長谷川)+大規模N体(石山さん)
- ・ IGMでの $\text{Ly}\alpha$  減光モデリング  
井上昭雄さん(大産大)

# 21cmマップ( $T_s = T_k$ )

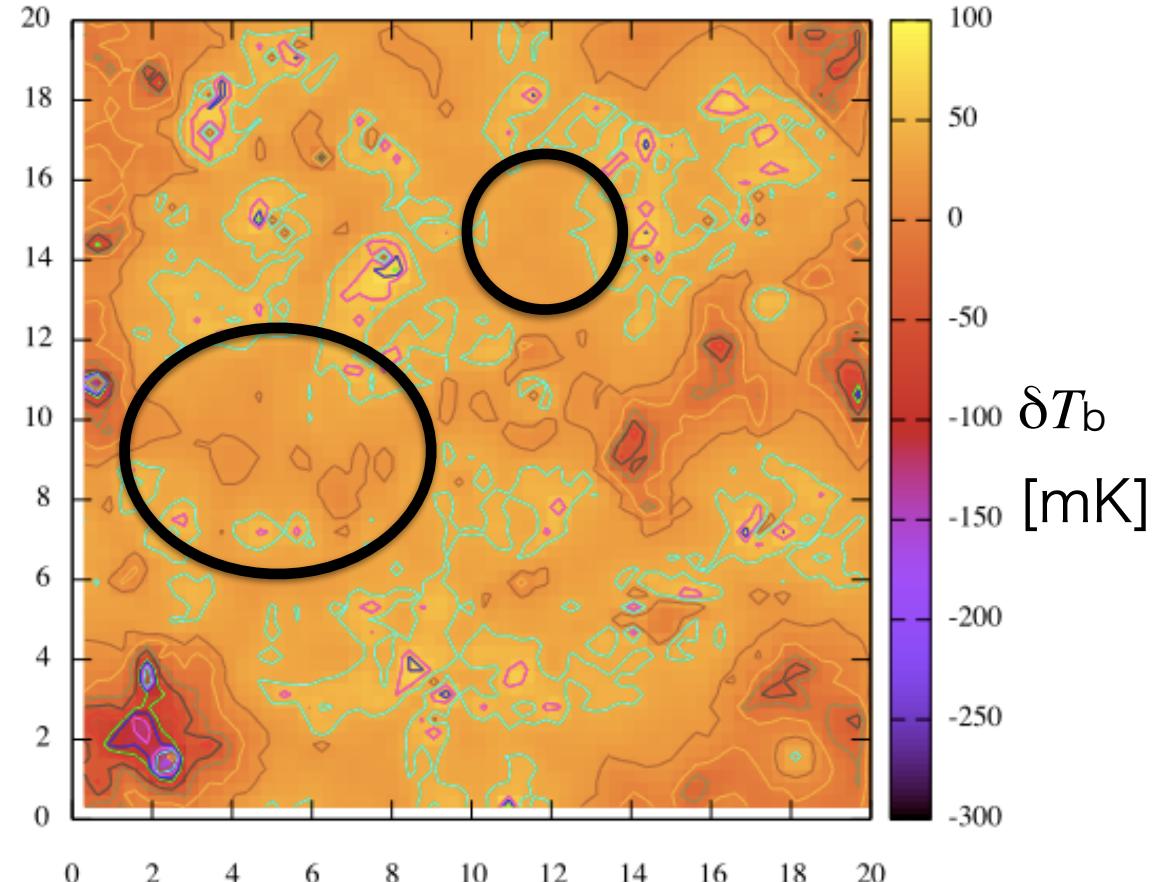
$f_{\text{esc}} = 0.2$

質量依存性なし



$f_{\text{esc}}(M)$

from RHD



右: 満遍なく分布する程質量銀河がより明るいため、 $\delta T_b < 0$ の領域を減らし若干21cm分布の勾配がゆるくする。