

再電離シミュレーションコードの開発  
とそれを用いた  
再電離期における21cm線分布の計算

長谷川 賢二 (名古屋大)

(11月より筑波大から移りました)

2015年1月19-21日 初代星・初代銀河研究会@東北大片平さくらホール

# もくじ

- ・ Introduction
- ・ 再電離シミュレーションコードの開発
- ・ 計算結果
  - ・ 輻射流体計算との比較
  - ・ 採用するモデルによる計算結果の違い
- ・ 21cm分布の計算(予備的結果)

# Introduction

宇宙再電離： $z \sim 1000$ で一度中性化宇宙が、後に形成される天体からの輻射によって電離される過程

再電離の解明には？

電離を保つ為の条件(Madau '99):

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

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

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

離光子がIGMへ抜け出す割合:escape fraction)

1)-3)は紫外線による影響を受ける(e.g, Pawlik+'09, Wise & Cen '09, Umemura, KH+'12, Finlator+'13, KH, Semelin'13)

# コード開発の動機

再電離計算 & 次世代観測との比較のためには

- 1) 広大な計算領域(少なくとも100Mpcは欲しい)
- 2) 正確な電離史および空間的電離構造

- ・ 輻射流体(RHD)シミュレーション

- IGM, 星形成率, 電離光子脱出確率へのUV feedbackの影響が組み込まれる。

- ✖ 計算量コストが高く、計算領域を広げにくい[最大でも $O(10\text{Mpc})^3$  e.g., KH+ '13, So+'14, Pawlik+'15]

- ・ ポスト处理的輻射輸送シミュレーション

- 大領域での計算が可能(>100Mpcも可能)

- ✖ UV feedbackは考慮できていなかったり、単純なモデルを用いたり

# 本研究

RHD計算結果をモデル化してポスト处理的輻射輸送計算に組み込む新しい「再電離専用コードの開発」

## メリット

- 1) 少ない計算コストで、広い計算領域での電離史をUV feedback効果を考慮しつつ計算できる。
- 2) 作成したモデルは、21CMFAST等の準数値的コード(島袋くんトーク)に組み込む事も可能。
- 3) これまで直接調べられなかった再電離史のモデル( $C$ ,  $SFR$ ,  $f_{esc}$ 等)依存性を調べられる。(他の研究のモデルとの比較も可能)

# 用意するもの

1) 各場所で、セル内平均したダークマター密度

・ ガス密度を得るのに必要(#今回の分解能

$$\Delta x=0.3\text{Mpc} \text{では、} \rho_b \approx \rho_{\text{DM}} \frac{\Omega_b}{\Omega_{\text{DM}}}$$

・ Clumping Factorの関数orテーブルに必要

2) 各場所で、ハロー質量関数

・ 各場所での電離光子放射率計算に必要

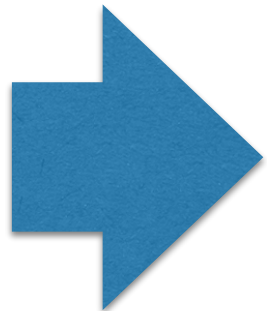
本番では  
N体計算  
から。今  
回はRHD  
計算と同  
じものを  
用意

3) 銀河の電離光子放射率とIGMの

Clumping factorのモデル

# RHD計算の概要

- $\Lambda$ CDM cosmology(WMAP 9-yr)
- ( $N_{\text{SPH}}$ ,  $L_{\text{box}}[\text{Mpc}]$ ,  $M_{\text{h,min}}[M_{\text{sun}}]$ )  
=  $(256^3, 5, \sim 2 \times 10^7)$ ,  $(512^3, 20\text{Mpc}, \sim 10^8)$
- 星形成(Salpeter IMF)
  - 輻射性フィードバック(電離、解離の輻射輸送計算)
  - 超新星フィードバック
    - 熱的エネルギーフィードバック
    - 重元素汚染(Metal cooling, dust[水素分子形成,光吸収])
- 非平衡化学反応(H, H<sub>2</sub>, He関連 9 species)



IGM各地点での電離度、密度、Clumping factor  
銀河の電離光子放射率(w/, & w/o 脱出確率)

# IGM Clumping factorへの輻射の影響(RHD計算より)

w/ UV feedback

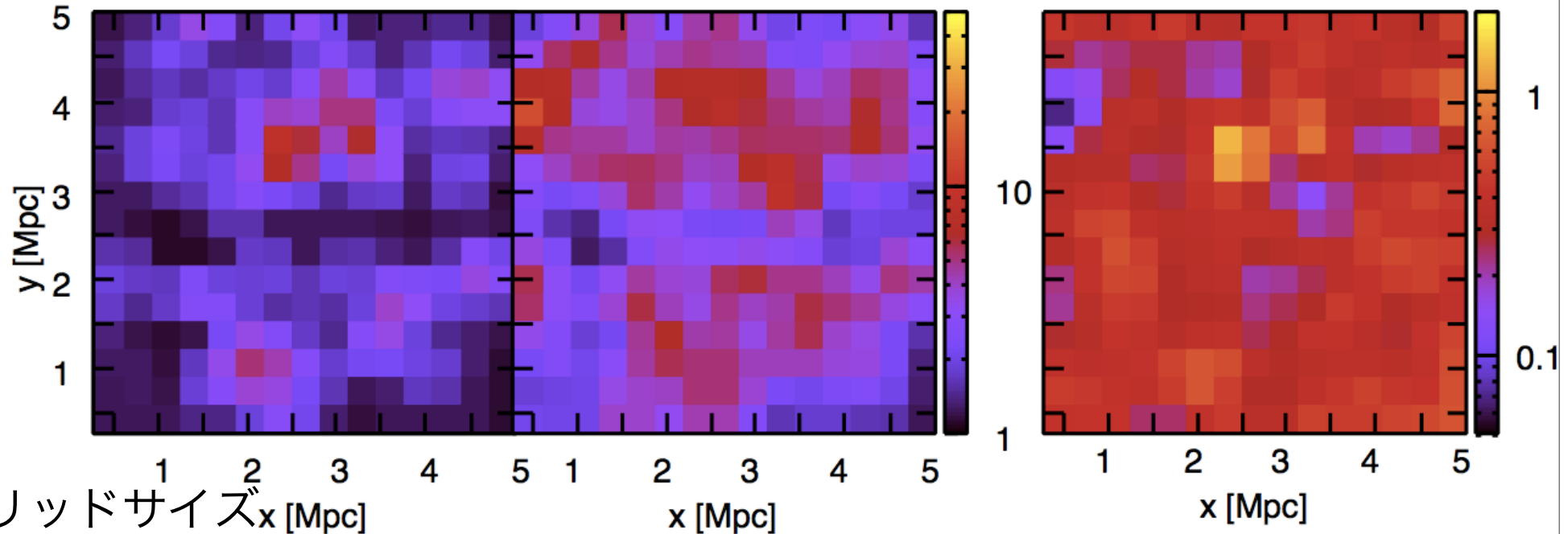
w/o UV feedback

ratio

$C_{UV}$

$C_{noUV}$

$C_{UV}/C_{noUV}$



$\Delta x = 0.3 \text{ Mpc}$  全バリオンガスのclumping factor  $C_b \equiv \frac{\langle \rho_b^2 \rangle}{\langle \rho_b \rangle^2}$

~SKA分解能 (ハローは抜き取り、IGM成分だけ表示)

~Iliev分解能 ポイント

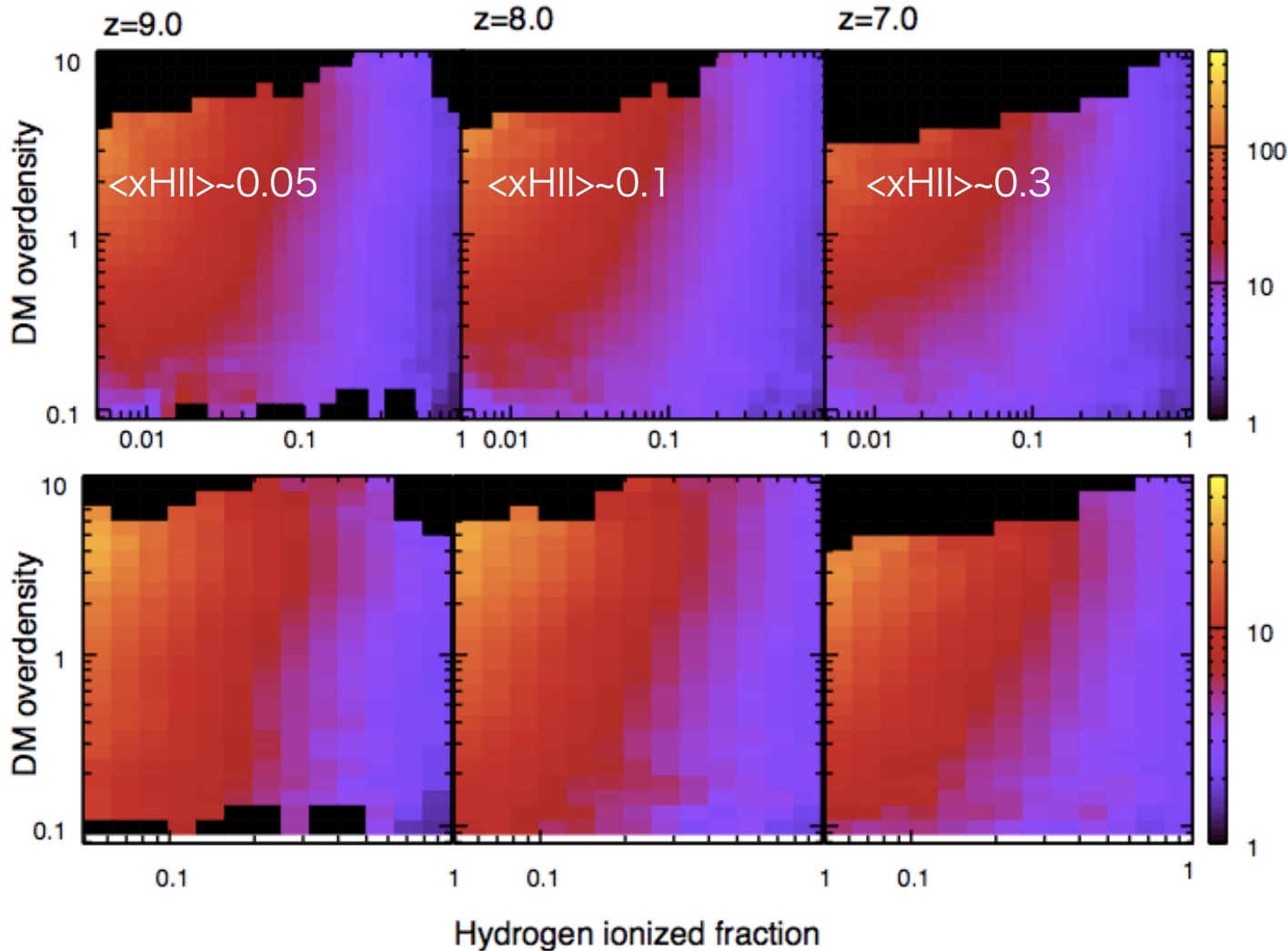
- 光加熱の効果でclumping factorが下がる (see also Pawlik+ '09, Finlator+ '13)
- しばしば、空間的に一様なclumping factorが仮定されるが(e.g., Ilievらの仕事), 実際は、空間的に非一様である。<sub>8</sub>



# 電離ガスのclumping factorを $\delta$ と $x_{\text{HII}}$ の関数で描く

$x_{\text{HII}}=0.005-1$

$x_{\text{HII}}=0.05-1$



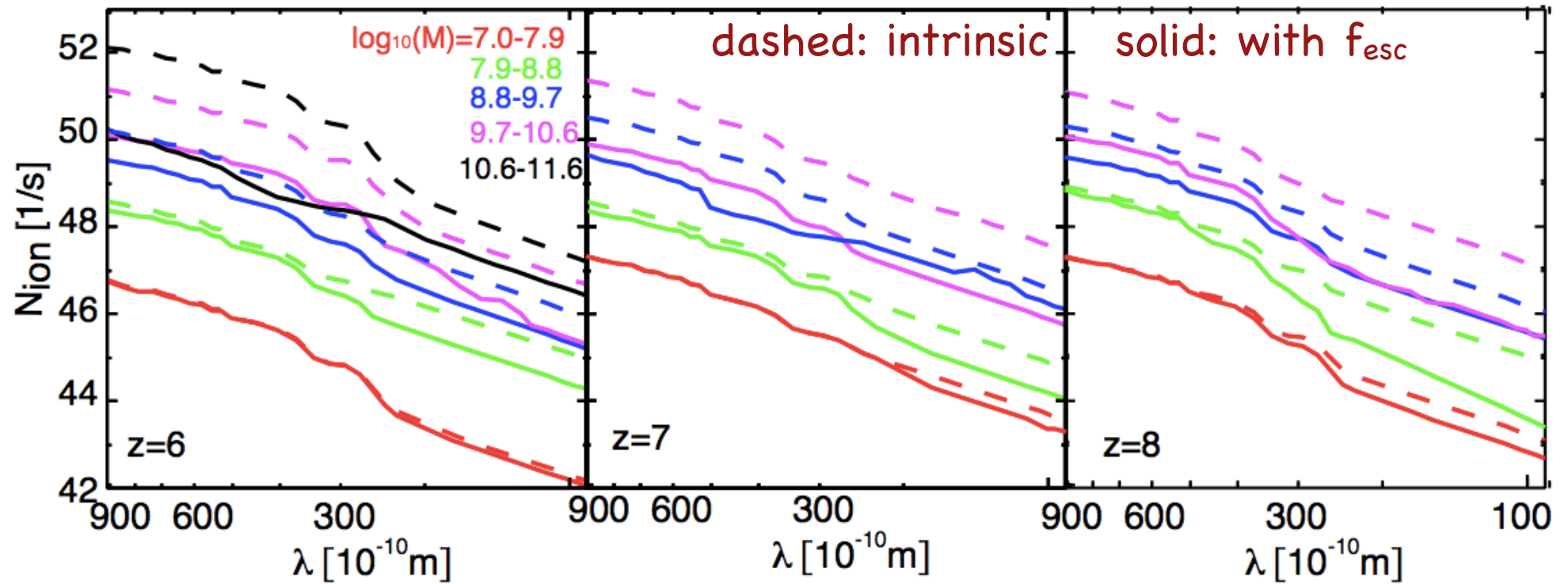
#上下でカラーバーのスケール、  
図示している電離度の範囲が異なる

- ・ 赤方偏移依存性は小さい=>今回は、赤方偏移依存性は無視
- ・ 電離度が高い領域では $C_{\text{HII}} \sim 2-4$ で密度によってfactor 2ほどの違い

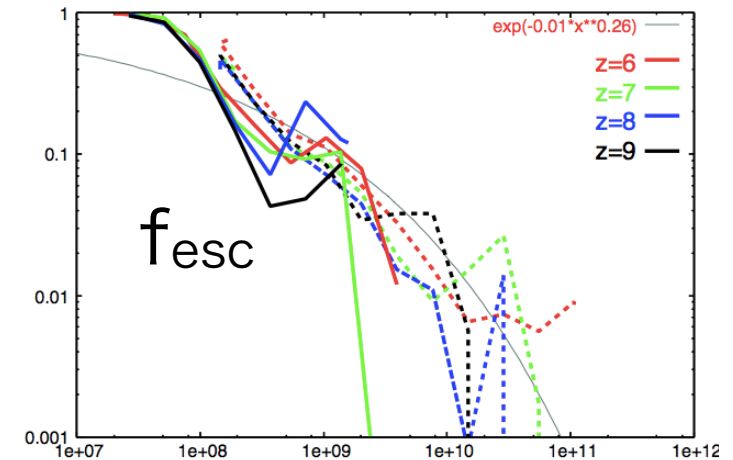
再結合 $=\alpha_B \times C_{\text{HII}}(x_{\text{HII}}, \delta) \times n_{\text{HII, cell}} \times n_{e, \text{cell}}$ として解く

# 各質量、各時代の銀河の電離光子放射スペクトル

RHD計算で得られた銀河の電離光子放射スペクトル



- ・ 大質量銀河はintrinsicな電離光子放射率が高い
- ・ 大質量銀河ほど電離光子脱出割合が小さい(明確な赤方偏移依存性はない).
- ・ 実際の計算では、 $10^7-12 M_{\text{sun}}$ の銀河を15binsで分ける.



# 再電離シミュレーション手順

i) 場所ごとの密度場やハローの質量関数を読み込む(今回の計算では、各スナップショット間隔 $\Delta t_s \sim 10\text{Myr}$ 間隔)

ii) ある時刻 $t$ での各質量のハローの数 $[N(M_{\text{halo}})]$  と銀河間物質数密度 $n_{\text{H}}$ を求める  
二つのN-bodyデータから補間する.  $\text{MIN}[0.05t_{\text{rec,cel}}]$ でアップデート)

iii) 各場所での電離光子放射率を決定

$$\sum_{\text{cell}} L_{\nu}(M_{\text{halo}})N(M_{\text{halo}}) \text{ (もしくは } \sum_{\text{cell}} L_{\nu,\text{int}}(M_{\text{halo}})f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}})N(M_{\text{halo}}) \text{ )}$$

iv) 輻射輸送を解く

=> HとHeの電離の電離率 & 光加熱率を決定

v)  $C_{\text{HII}}(\delta, x_{\text{HII}})$ を変えながらエネルギー方程式+化学反応式を解く

=> 電離度(H & He)とガス温度を得る.

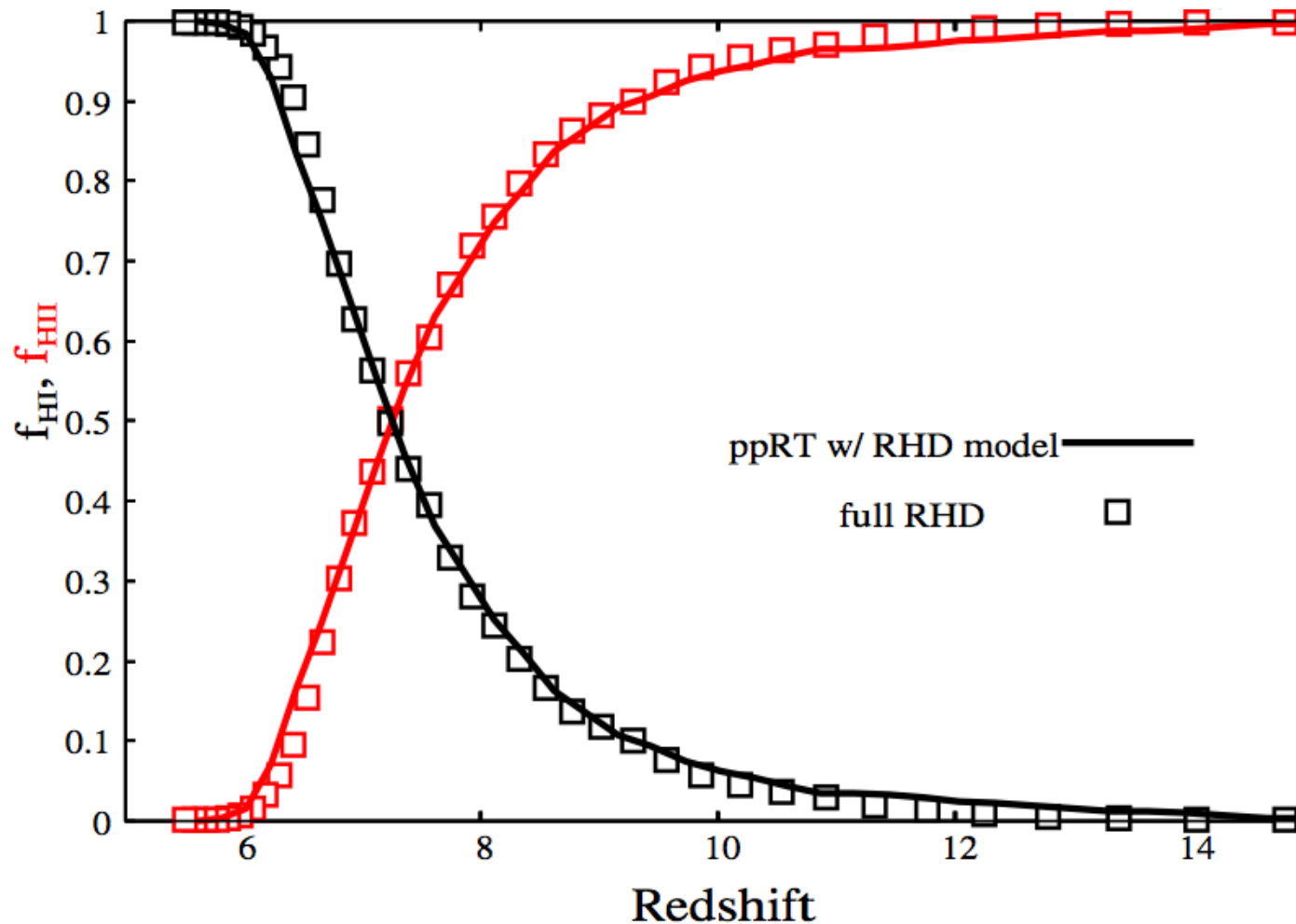
$n\Delta t_s < t < (n+1)\Delta t_s$ の間(ii)-(v)の繰り返し

$t > (n+1)\Delta t_s$ になったら新しいデータを読み込んでまた(ii)-(v)を繰り返し

よくある手順だが、○の部分新しい

## RHDとの比較 I: 平均的電離史

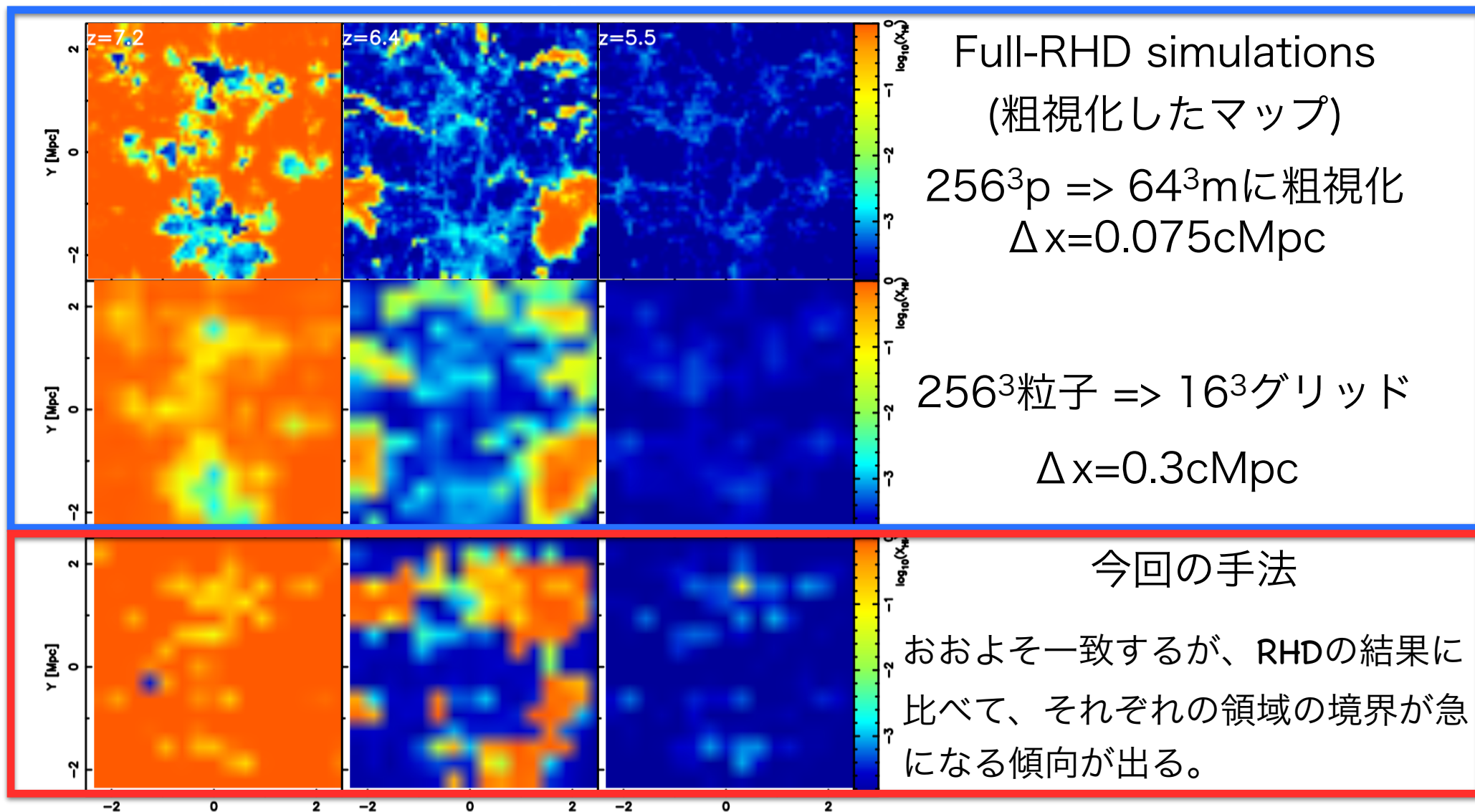
注) 各場所での密度、ハロー質量関数はRHD計算と同じものを用いた



$z \sim 6-7$ くらいで若干のずれはあるものの、大局的な電離進化はfull RHDの結果とよく一致する。

# RHDとの比較 II : 中性水素割合の空間分布

## 中性水素割合



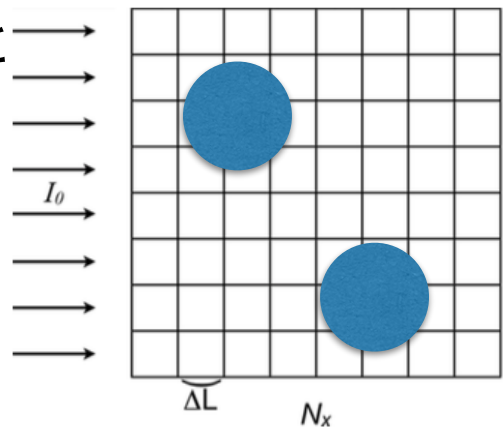
# 空間分布の違いの要因

- \* 平均化したSEDやClumping factorを使っているので本来持つ分散を消してしまった効果? [これだけでは無理だった]

- \* 平均化した密度場で求めた $\tau$ を使った効果

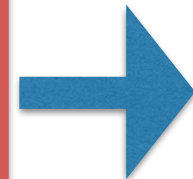
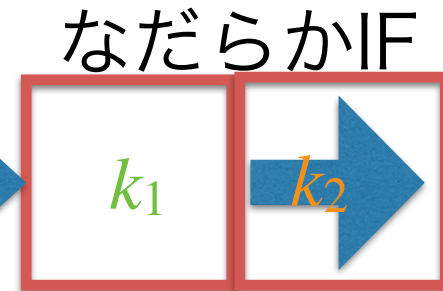
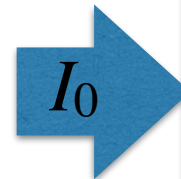
Okamoto+ '11

rayごと  
に $\tau$ が  
異なる



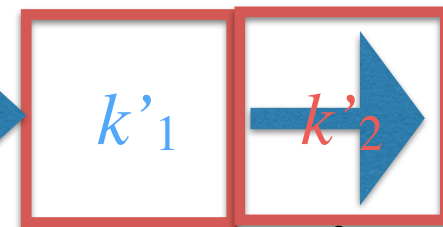
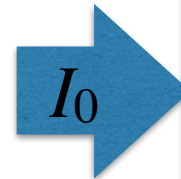
$N_y \langle I_{out} \rangle$

高分解能



電離率

低分解能



$k'_1 > k_1$

$> k_2 > k'_2$

シャープIF

知りたい量 計算している量

$$\langle \exp(-\tau) \rangle \approx \exp(-\langle \tau \rangle) \frac{1 - \langle \tau \rangle + \frac{1}{2} \langle \tau^2 \rangle}{1 - \langle \tau \rangle + \frac{1}{2} \langle \tau \rangle^2} = \exp(-\langle \tau \rangle + A)$$

$$A \equiv \log \left[ \frac{1 - \langle \tau \rangle + \frac{1}{2} \langle \tau^2 \rangle}{1 - \langle \tau \rangle + \frac{1}{2} \langle \tau \rangle^2} \right] \geq 0$$

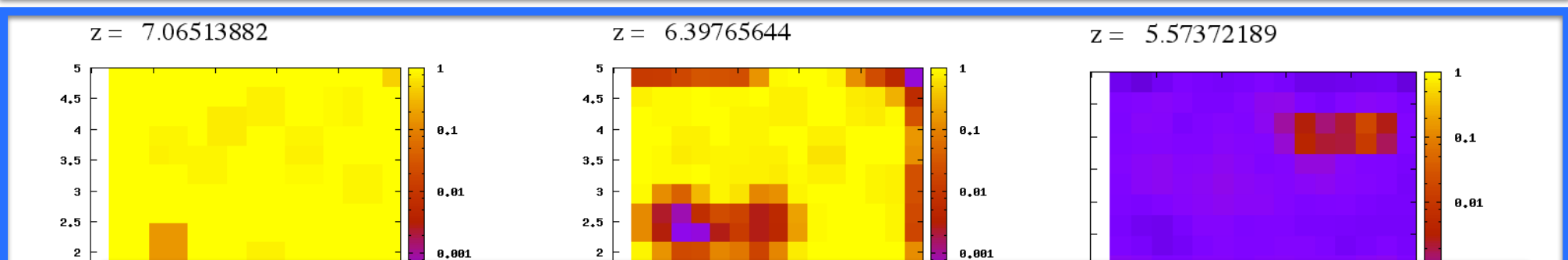
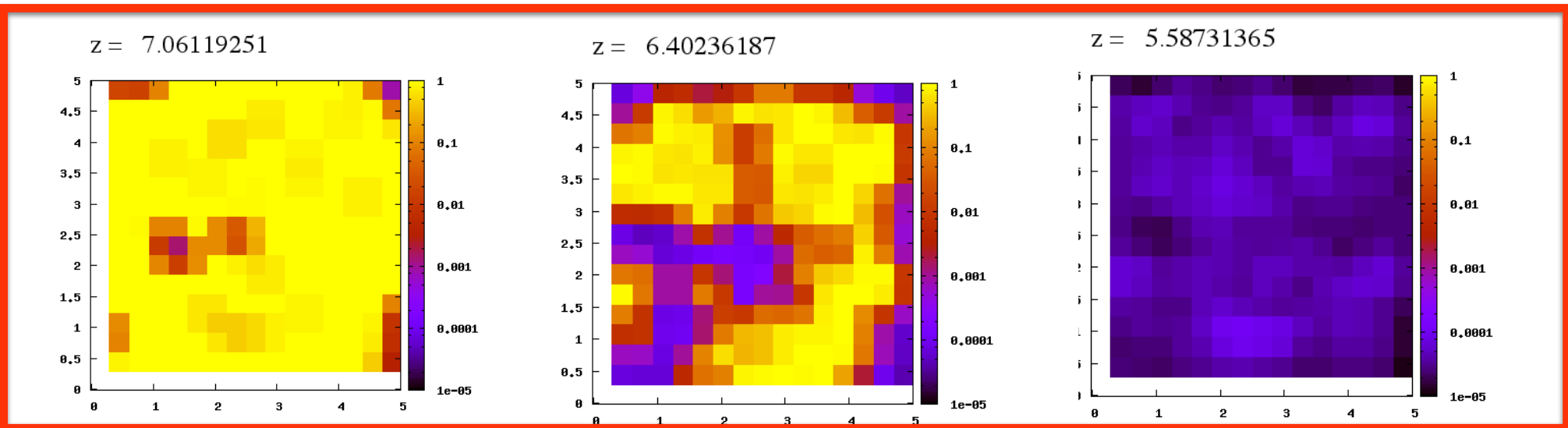
このような $\tau$ を小さくする補正を入れればよい?

# 他のClumping factorモデルとの比較：電離度の空間分布

with our C factor  
(upper)

with Iliev's C factor (Iliev et al. 2007)  
N-bodyからの見積もり (Lower)

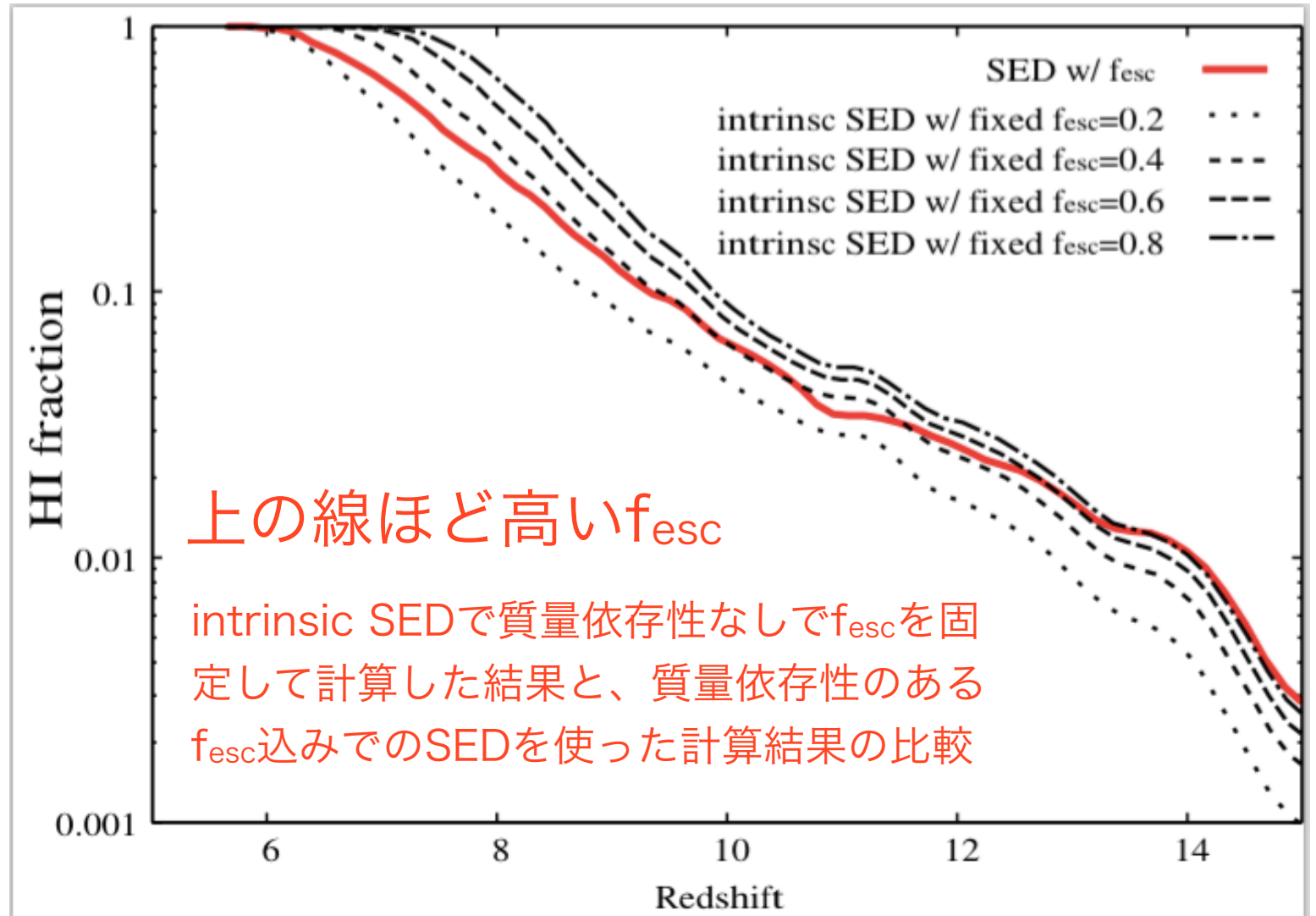
$$C(z) = 27.466 \exp(-0.114z + 0.001328z^2)$$



Ilievのモデルでは、UV feedbackでCが下がる効果が考慮されていない為、電離史が全体的に遅くなる

# 電離光子脱出割合モデルの変更

RHDでは自由に $f_{\text{esc}}$ を変えられないが、今回のシミュレーションでは、 $f_{\text{esc}}$ のモデルを変えた計算も可能



我々のモデルでは、escape fractionの質量依存性は各赤方偏移で大きく変化しないが、ハローの質量関数は高赤方偏移ほど低質量側に寄る。

=> 高赤方偏移ほど平均的には高い $f_{\text{esc}}$  (#この計算では $10^{7-9}M_{\text{sun}}$ ハローのみ)



# 21cmシグナルの計算

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

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

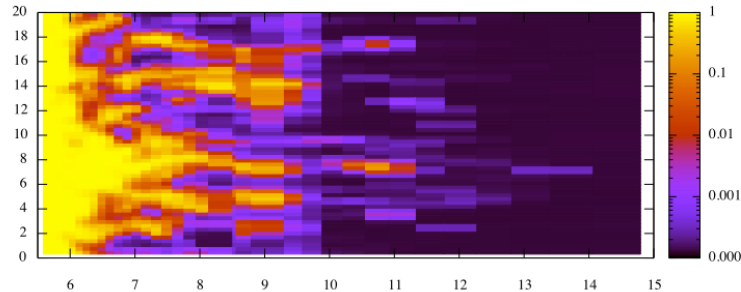
再電離史はこれまでより直接的にわかる！

Strong IGM heating

( $T_s \gg T_{\text{CMB}}$ )



L [cMpc]



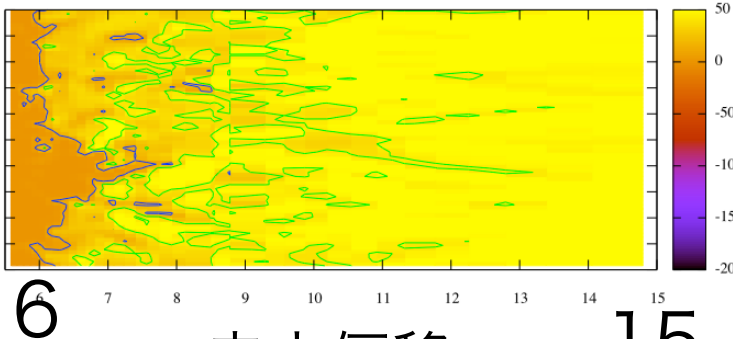
III

Strong Coupling

( $T_s = T_k$ )

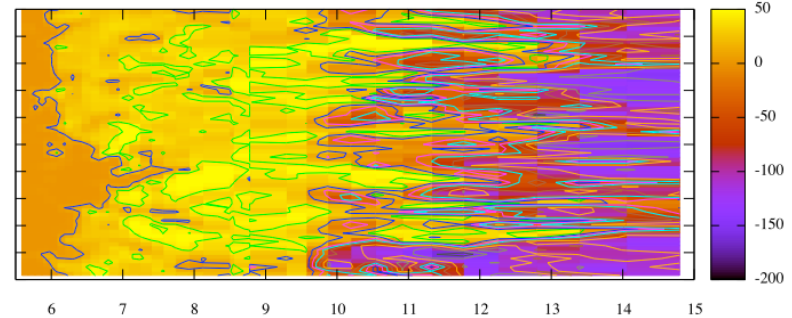


L [cMpc]



赤方偏移

波長=21×(1+z)cm



赤方偏移

波長=21×(1+z)cm

$\delta T_b$  [mK]

# 21cmシグナルの計算

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

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！

21cm線の分布から銀河の情報を取り出せないか？

- ・ 光度関数のfaint-end [Kim+'13, semi-numerical model]
- 電離光子脱出確率の質量依存性
  - ・ 大質量ほど $f_{\text{esc}}$ 大？ (Gnedin+ '08)
  - ・ 低質量ほど $f_{\text{esc}}$ 大？ (e.g., Yajima+ '11他多数)
  - ・ 依存性なし(最も簡単な仮定)

多数の小さな電離領域 or 少数の大きな電離領域

HII領域のサイズ分布に違いが出る？

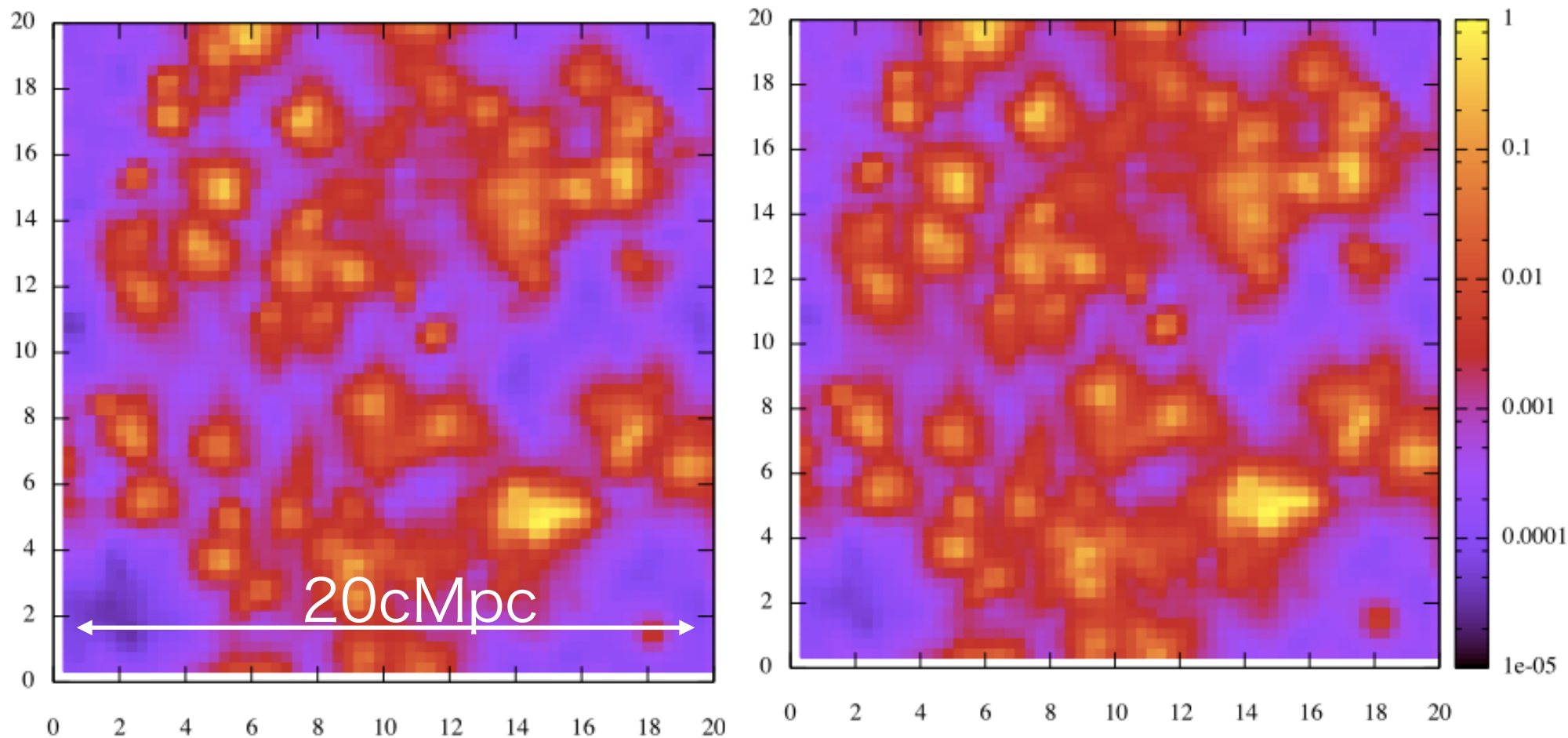
# 電離度マップ

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

$z=8.4$

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

質量依存性なし 電離度は~5% from RHD



$10^{10}M_{\text{sun}}$ を超えるようなものは少なく、電離領域のサイズ分布にそれほど顕著に違いが見えない。

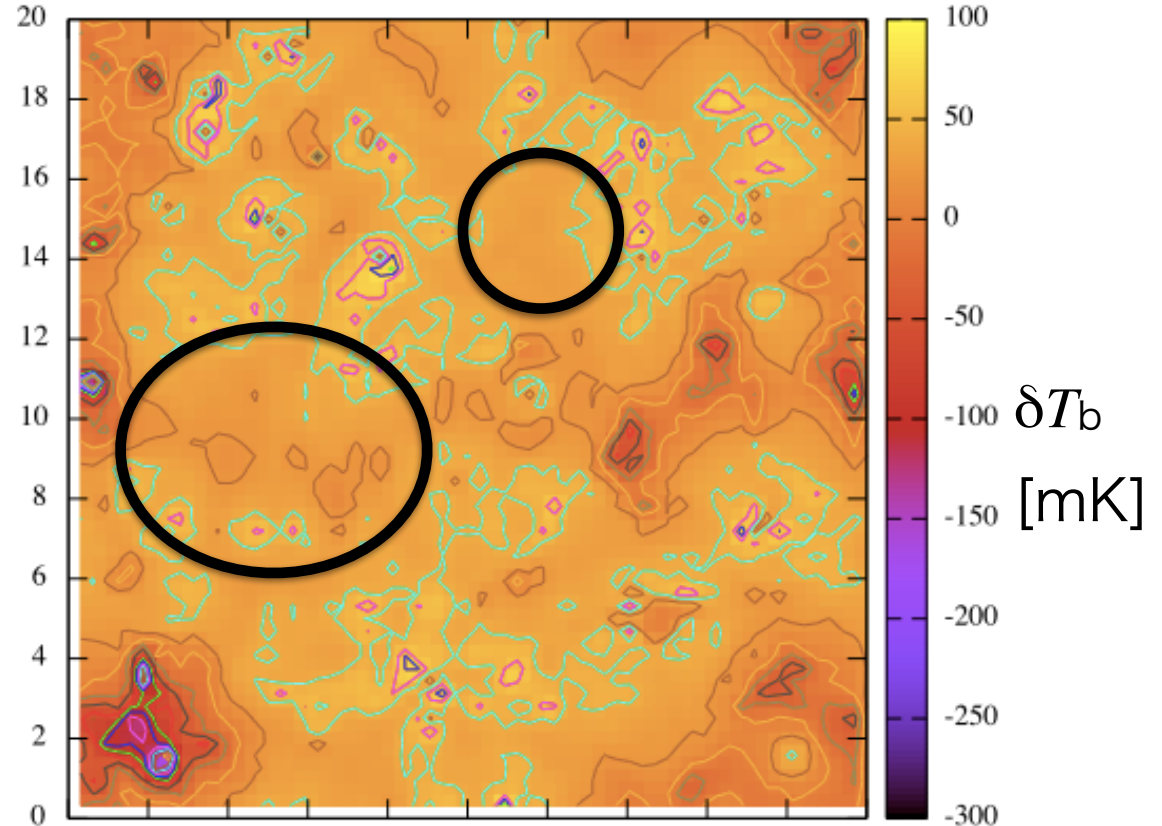
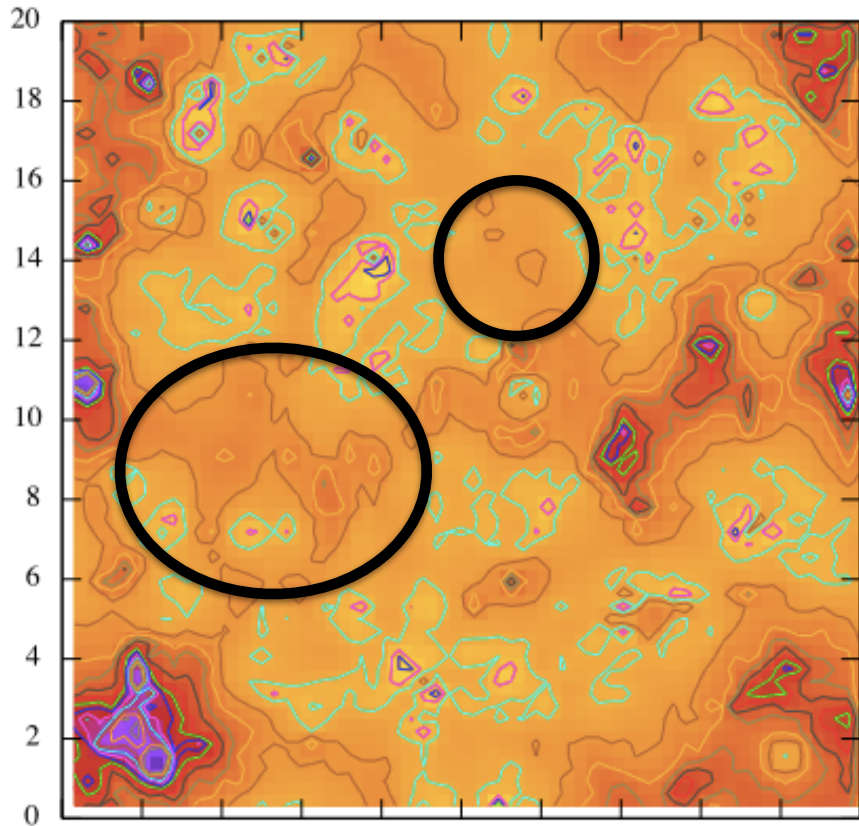
# 21cmマップ ( $T_s = T_k$ )

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

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

質量依存性なし

from RHD



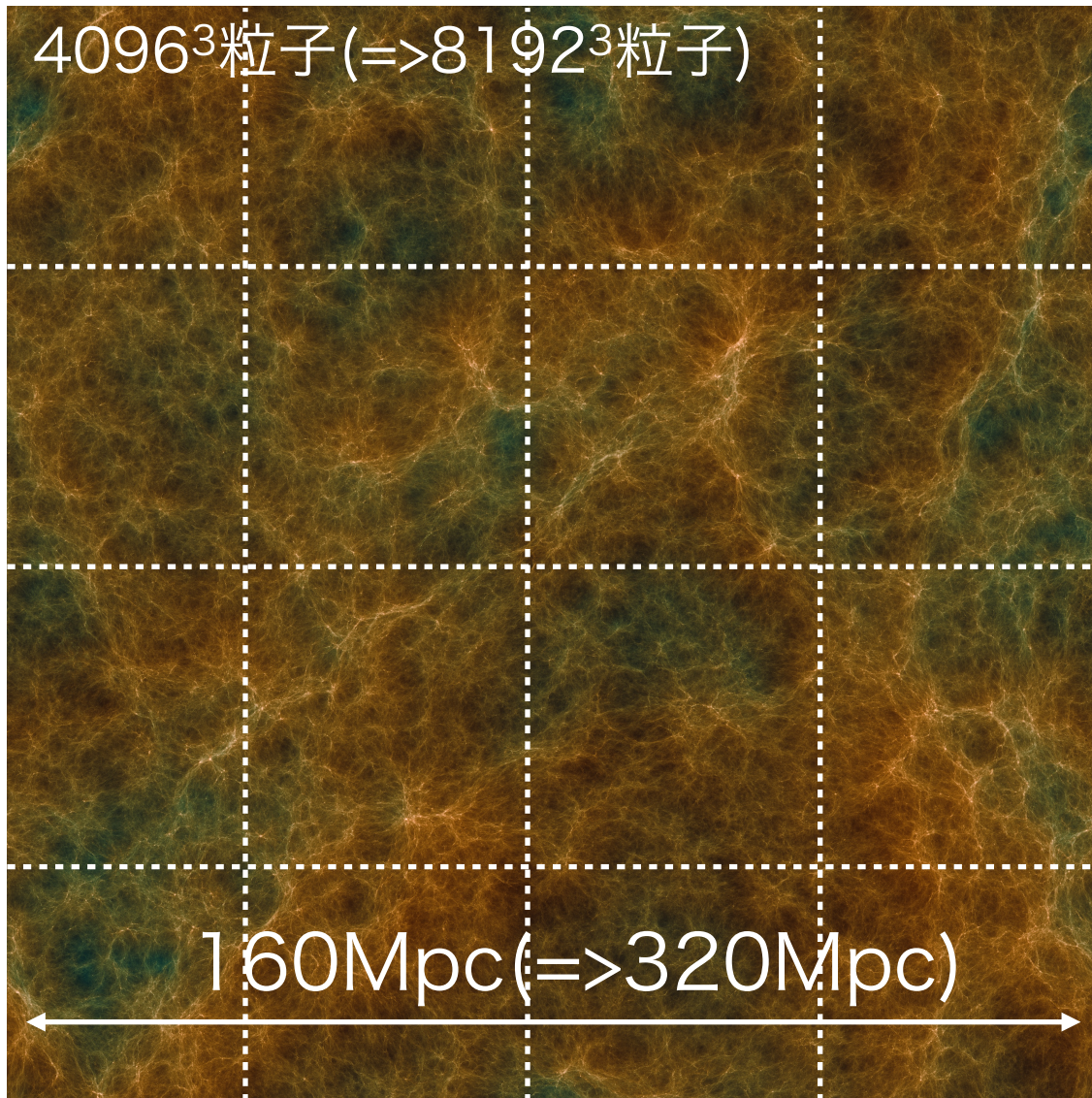
右: 満遍なく分布する程質量銀河がより明るいため、 $\delta T_b < 0$ の領域を減らし若干21cm分布の勾配がゆるくする。これくらいの違いだと、X線源が少しあるだけで違いが見えなくなる可能性が大きい。

# まとめ

- ・ RHD計算結果の解析から、銀河SEDとIGM Clumping factorをモデル化してポスト处理的輻射輸送計算を解く再電離シミュレーションコードを開発した。
- ・ 平均的な電離史は、RHD計算の結果をよく再現する。
- ・ HI空間分布は、おおよそRHD計算結果と合うが、電離・中性領域の境界のシャープさが異なる。(おそらく、supermesh化の時と同様の効果。可能ならモデル化)
- ・ 21cm線からは、電離光子源となる銀河の光度関数、escape fractionの情報を得られる可能性があるが、本当に得られるかどうかは、大計算領域かつSKAのsensitivity, foregroundの効果を考慮した研究が必要。また、どのような観測量が知りたい量にsensitiveかも調べる必要あり。

# 今後

大規模N-bodyシミュレーションの結果を使った大規模大電離シミュレーション(データ提供 石山智明氏)



- 1) 21cm分布の計算とSKA観測の比較(予言)
- 2) IGM減光の効果を含めたLAE分布計算・光度関数とHSC観測と比較

どちらも正確な計算にはLy $\alpha$ 輻射輸送が重要(開発状況は筑波大 鈴木裕行くんのポスターを)

# 21 cm 模擬観測 SKA1-low

SKA EoR国際サイエンスブック  
より [Kim+ in prep.]

