

輻射流体的フィードバックを考慮した 新しい再電離シミュレーション

長谷川 賢二 (名古屋大)

2015年3月3-5日SKA-Japan WS EoRセッション@国立天文台

もくじ

- ・ Introduction
 - ・ UV Feedback
 - ・ これまでの再電離計算
- ・ 新しい再電離シミュレーションコードの開発
- ・ 計算結果
 - ・ UV Feedbackが再電離史、電離構造に与える影響
 - ・ Clumping factor
 - ・ 電離光子脱出割合
- ・ まとめと今後の予定
- ・ 21cm線強度分布計算(時間があれば)

Introduction

再電離を理解するために重要な量

電離を保つ為の条件: 電離光子放射率 > 再結合率

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

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

Clumping Factor

1) 銀河間物質(Intergalactic medium: IGM) clumping factor

2) 銀河の個数密度

3) 個々の銀河から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: 電離光子脱出割合)

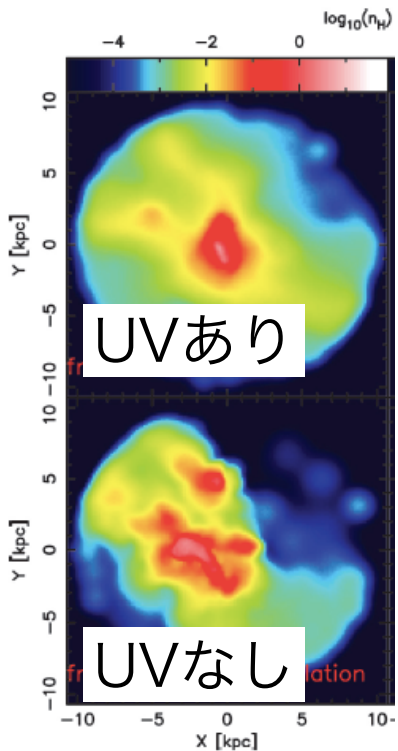
これらの量は紫外線による影響を受ける(UV feedback)

(e.g, Pawlik+'09, Wise & Cen '09, Umemura, KH+'12, Finlator+'13, KH, Semelin'13)

UV feedback on galaxies and IGM

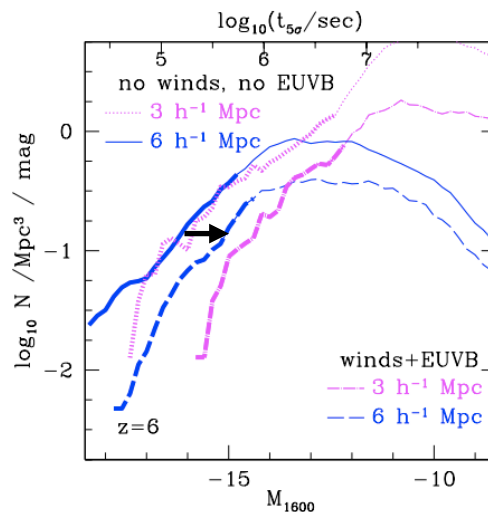
中性ガスの電離 => 加熱($T \sim 10^4 K$) => ガスの分布へ影響

銀河への影響



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

UV光度関数



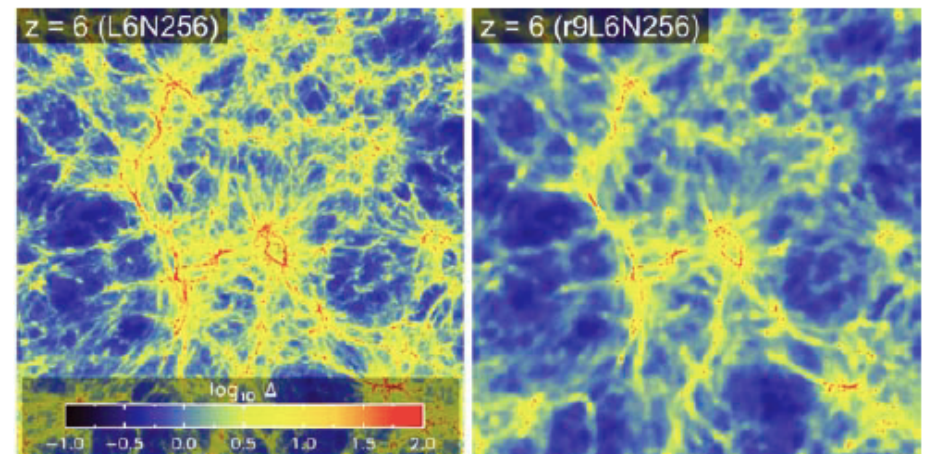
Finlator+ '13: 暗い銀河の個数減少

IGMへの影響

電離加熱

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
=> $z \sim 6$ で平均のClumping factorは10->3に減少

電離構造の計算手法

準数値的(semi-numerical)シミュレーション

Wyitheらのグループ(オーストラリア)

Mesingerらのグループ(イタリア、21cmFAST) など
(詳細は次の島袋くんのトーク)

計
算
量

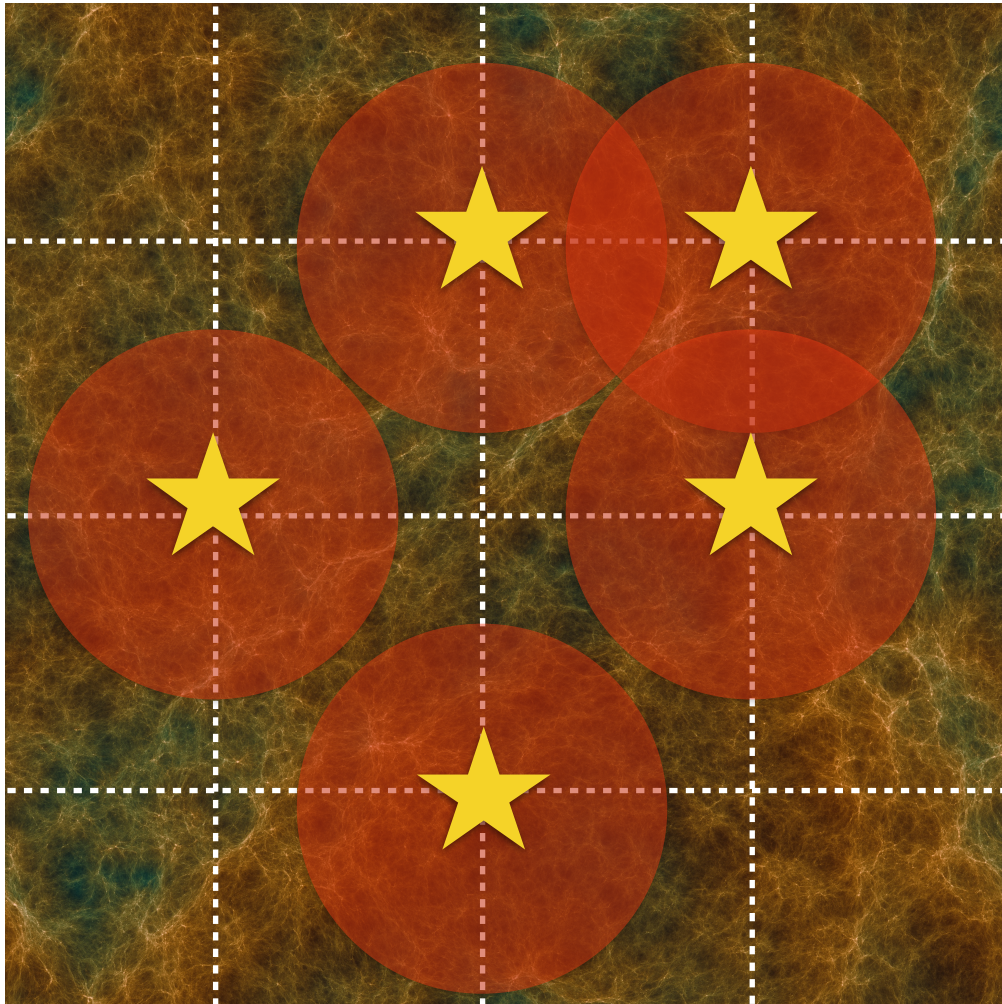
輻射輸送(Radiative Transfer: RT)シミュレーション

Iliev, Mellema, Shapiro, Ahnらのグループ(テキサス起源)
など

輻射流体(Radiation Hydrodynamics: RHD)シミュレーション

世界的に見ても実現例は少ない。日本では、長谷川らが行っている。

準数値的 & 輻射輸送(RT)シミュレーション



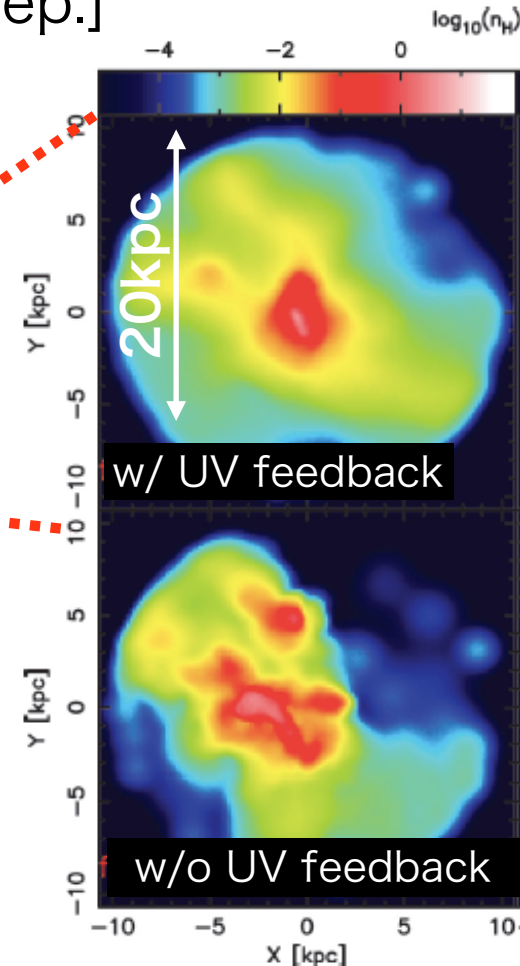
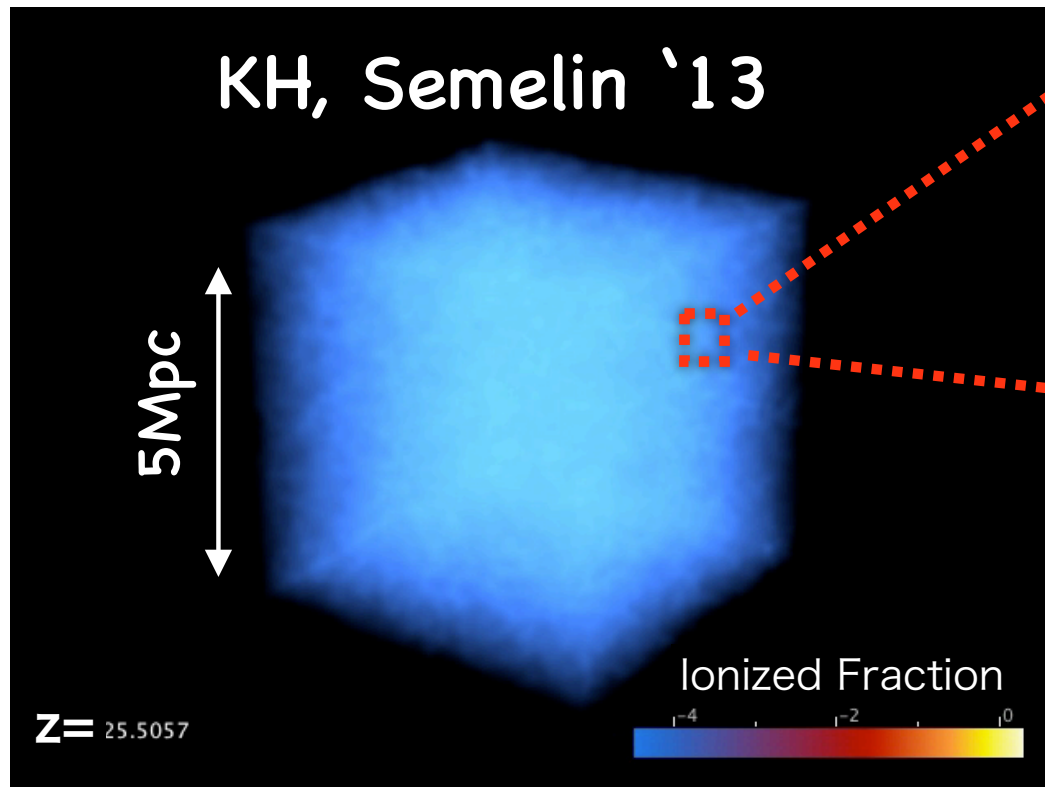
主に大領域での計算(>100Mpc)を目的とする。その為、一般的に空間分解能は高くない(~sub Mpc>>銀河スケール)。

- 1) N体 or 流体 or 摂動論などで密度場を計算(これらは高分解能)。
- 2)各グリッドで、分解できていない銀河モデル(emissivity, 電離光子脱出割合)やclumping factorのモデル(サブグリッドモデル)を仮定。
- 3)電離光子数の勘定(準数値的)や輻射輸送方程式を解く(RT)ことで電離構造を得る。(post-processing)

通常、UV feedbackの効果は自動的に含まれない為、適切なサブグリッドモデルを用いることが重要。しかし、現状は信頼性の高いモデルはない。

輻射流体(RHD)シミュレーション

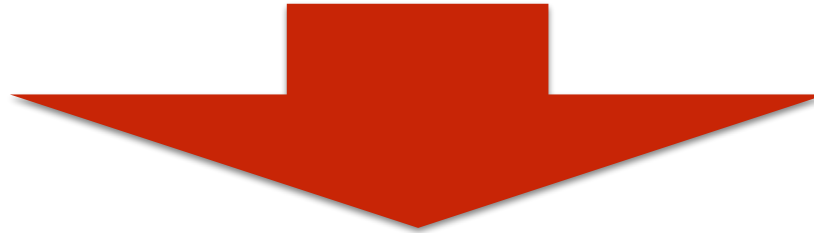
- 流体力学(星形成)と輻射輸送、それに伴うfeedbackを矛盾なく解く為、IGM, 星形成率, 電離光子脱出割合へのUV feedbackの影響が自然と組み込まれる。
- ✖ 計算量コストが高く、計算領域を広げにくい[最大でも $O(10\text{Mpc})^3$ e.g., So+'14, Pawlik+'15, KH in prep.]



紫外線輻射が銀河内部構造に影響し、この銀河 ($M \sim 10^9 M_{\text{sun}}$ では、星形成率が $1/3$ 、電離光子脱出割合:fesc) が2倍程度になる。

本研究

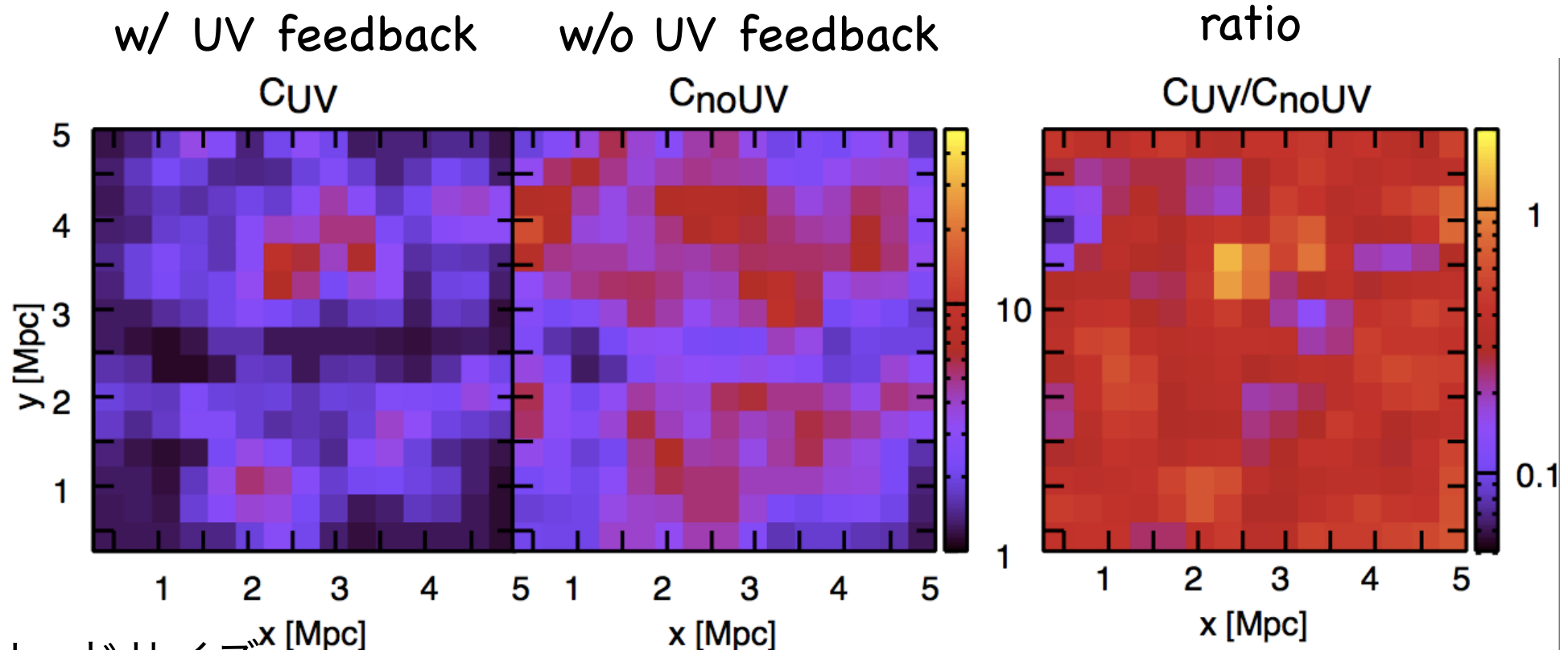
RHDはUV feedbackを自動的に考慮できる反面、宇宙の典型的な電離史が計算できない。。



RHDシミュレーション結果を解析してモデル化して、ポスト処理的RTシミュレーションのサブグリッドモデルとして組み込む新しい「再電離専用コードの開発」

- ・ UV feedbackを考慮した大局的再電離シミュレーションを可能とする。
- ・ これまでの単純なサブグリッドモデルを用いた計算と比べて再電離過程に違いがでるのかを調べる。

IGM Clumping factorへの輻射の影響(RHD計算より)



グリッドサイズ^x [Mpc]

$\Delta x = 0.3 \text{ Mpc}$

~1'弱相当

全バリオンガスのclumping factor $C_b \equiv \frac{\langle \rho_b^2 \rangle}{\langle \rho_b \rangle^2}$

(ハローは抜き取り、IGM成分だけ表示)

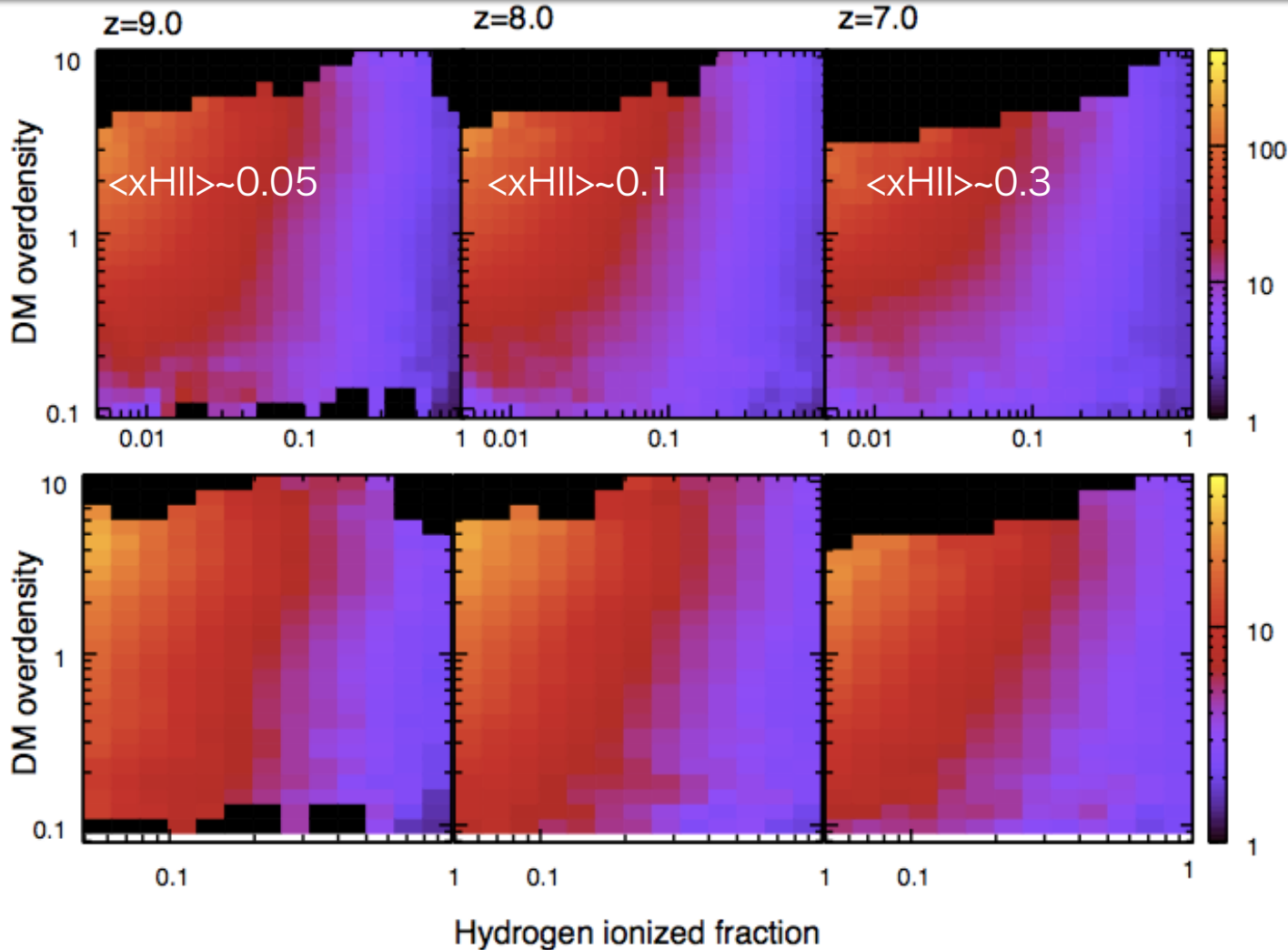
ポイント

- ・ 光加熱の効果でclumping factorは~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(e.g., Ilievらの仕事), 実際は、空間的に非一様である。

Clumping factorを「密度」と「電離度」の関数でテーブル化

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

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



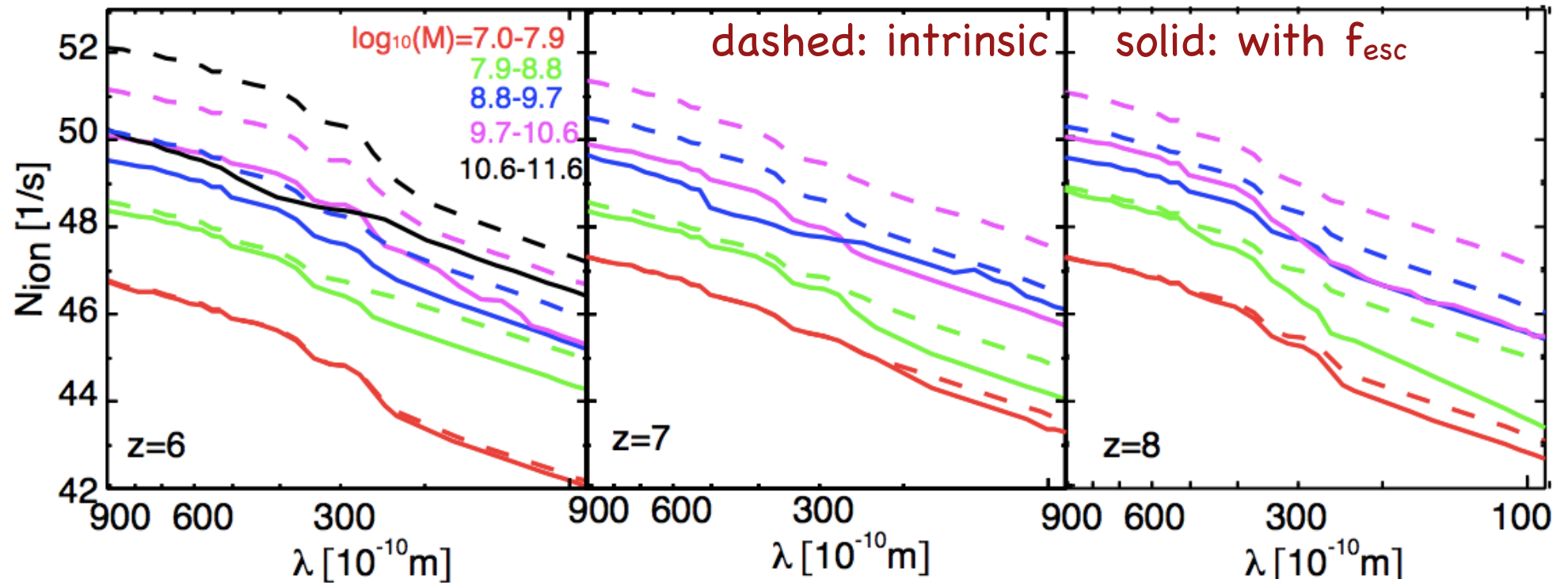
#上下でカラーバーのスケール、
図示している電離度の範囲が異なる

- ・ 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密度によってfactor 2ほど値が異なる

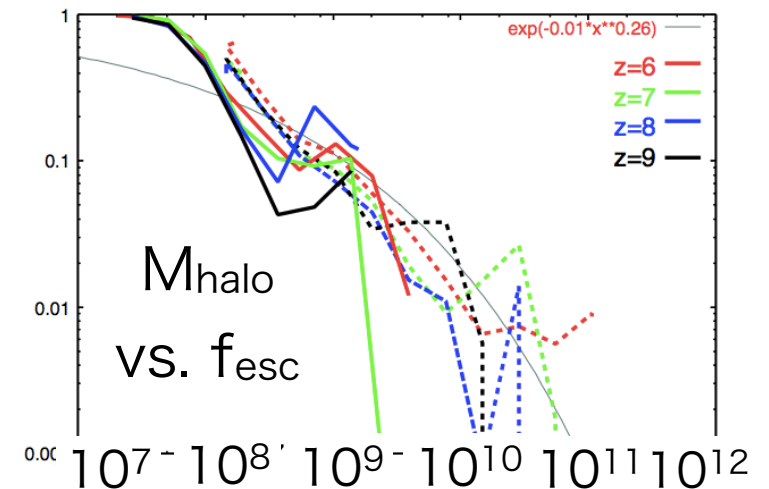
再結合 = $\alpha_B \times C_{\text{HII}}(X_{\text{HII}}, \delta) \times n_{\text{HII, cell}} \times n_{e, \text{ cell}}$ (α_B : 第一励起状態以上の状態への再結合係数)

銀河のモデル化(SED, f_{esc})

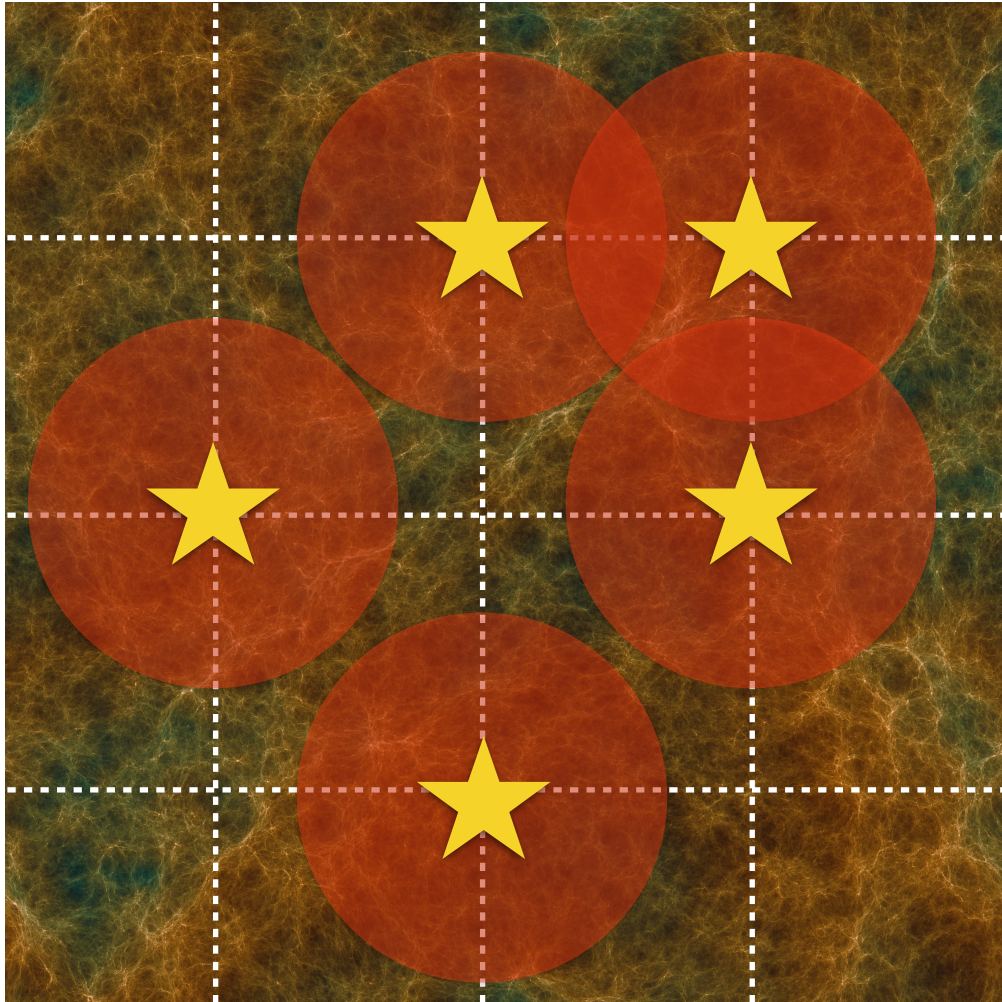
RHD計算で得られた銀河の電離光子放射スペクトル



- ・ 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、 $10^7\text{-}10^{12} M_{\text{sun}}$ の銀河を15binsで分ける.



シミュレーション手順



1) N体計算で、各場所の密度場、ハロー質量関数のスナップショットを計算しておく。

2)各グリッドに作成した銀河・IGMのモデルを密度・電離度に応じて適用する。

3)輻射輸送方程式を解いて電離構造を計算する

一定の時間間隔で新しいスナップショットを読み込み上記を繰り返す。

最終的には、大領域の計算を行うが、今回は $(20\text{Mpc})^3$ の計算領域で、UV feedbackが電離史に与える影響を調査。

UV feedbackの影響 : Clumping factorの影響

UV feedbackあり C factor

UV feedbackなしのC factor (Iliev et al. 2007)

(上段)

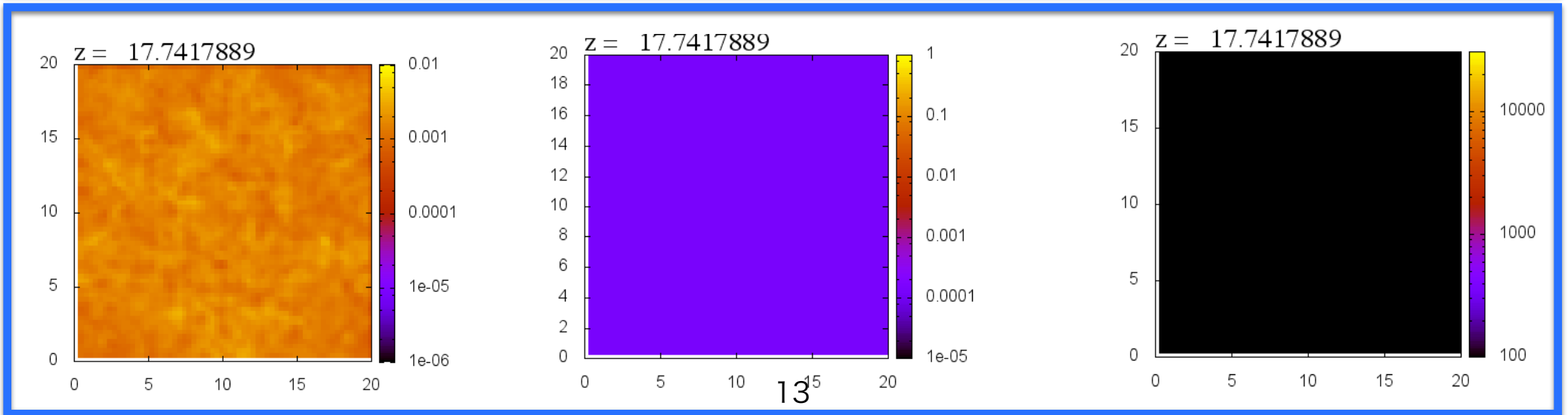
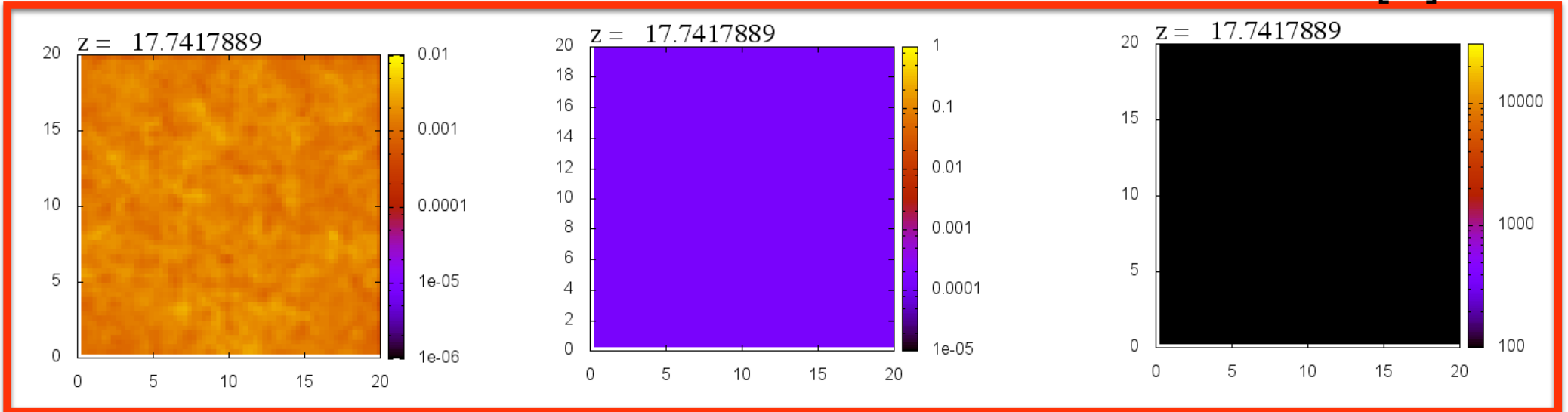
N-bodyからの見積もり(下段)

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

密度[cm⁻³]

水素電離度

ガス温度[K]



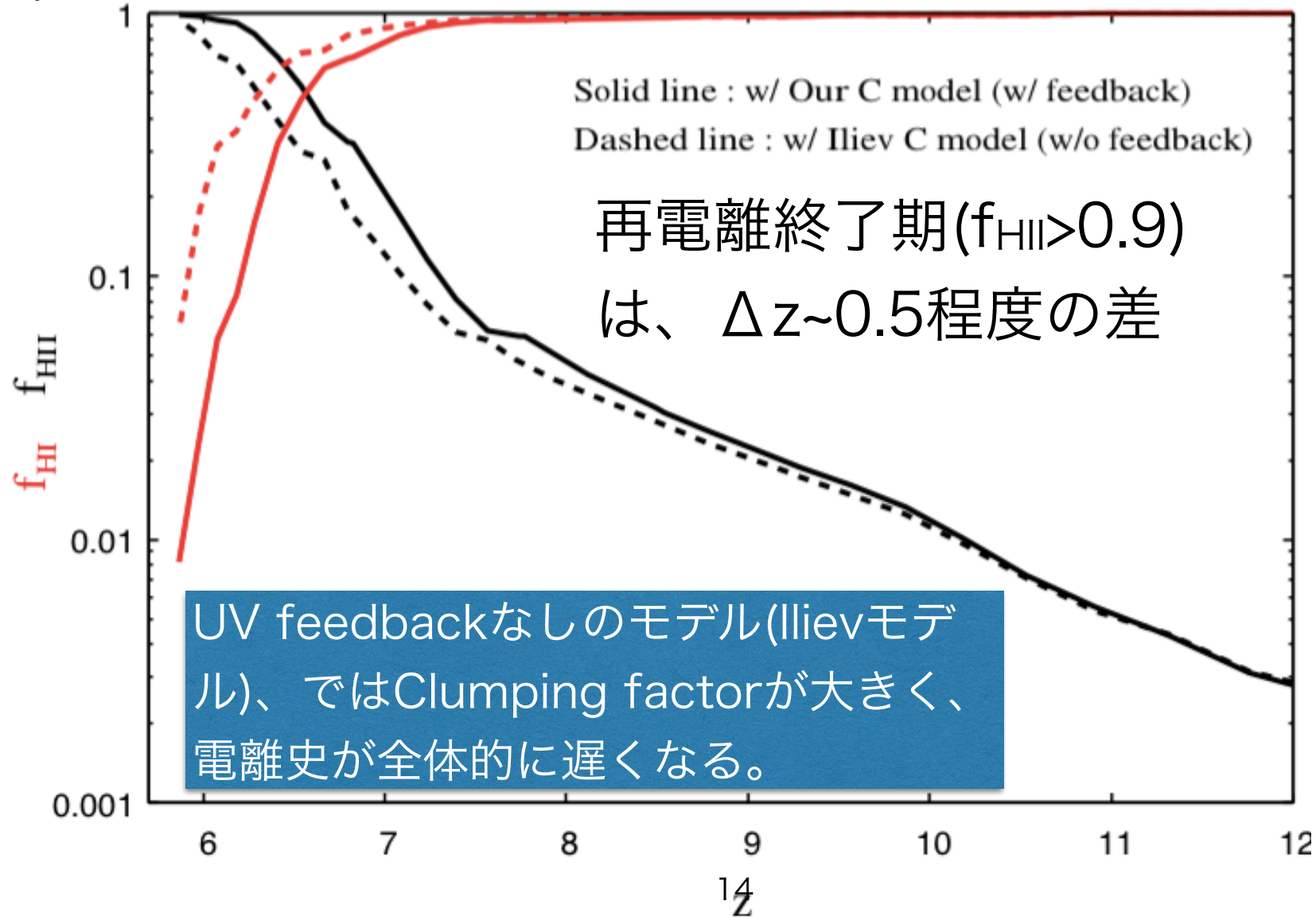
UV feedbackの影響：Clumping factorの効果

実線：Feedbackを考慮したClumping factor

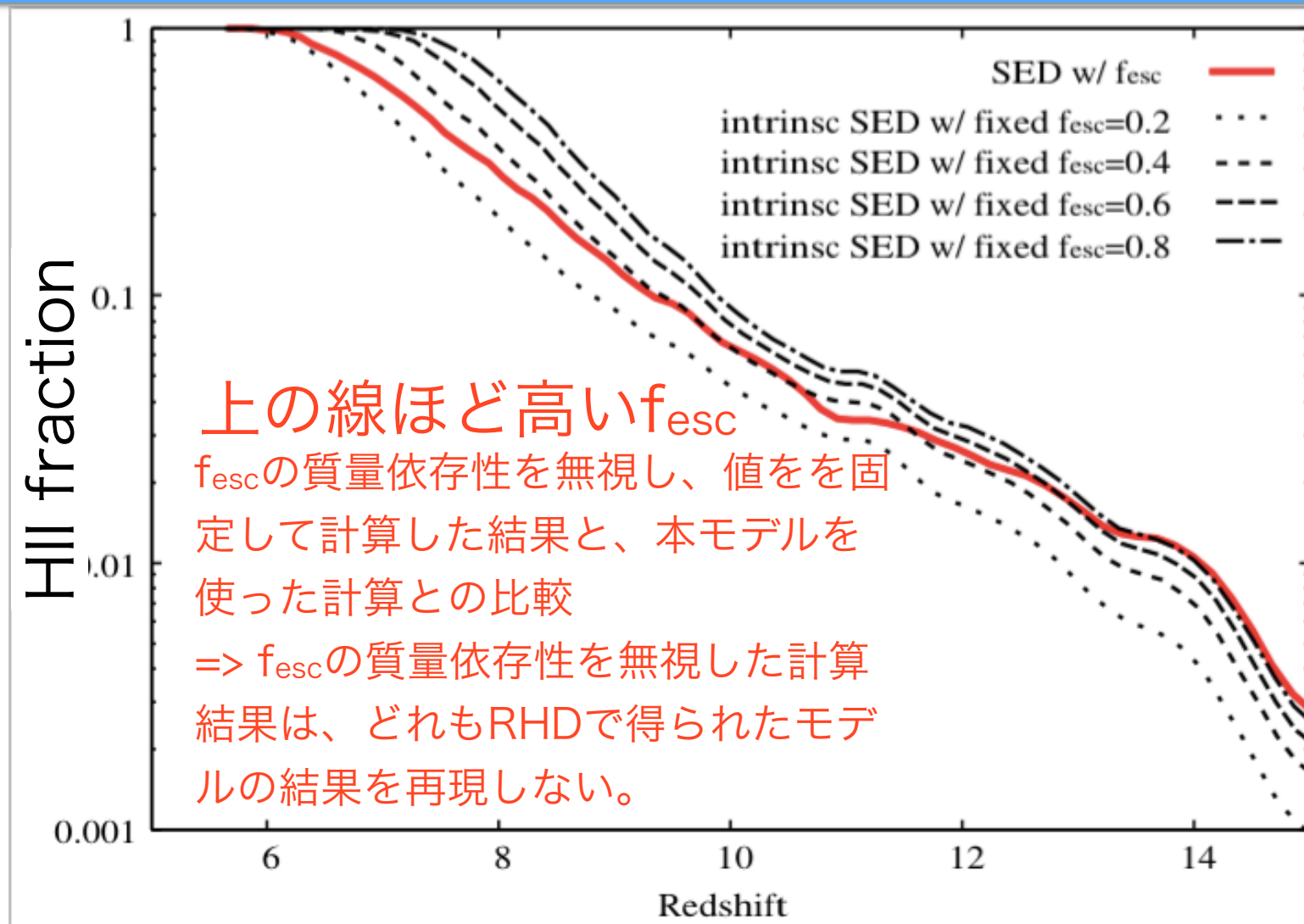
破線：UV feedbackを考慮しない場合のC factor (from Iliev et al. 2007)

$L_{\text{box}}=20\text{Mpc}$

N-bodyからの見積もり $C(z) = 27.466 \exp(-0.114z + 0.001328z^2)$



UV feedbackの影響：電離光子脱出割合



これまでのサブグリッドモデル: 質量依存性は考えないことが多い
本計算でのサブグリッドモデル: f_{esc} は低質量銀河ほど高い.

=> 赤方偏移ほど低質量銀河の割合が高く平均的には高い f_{esc}

まとめと今後

- ・ RHD計算結果を解析することで、UV feedbackの効果を考慮した銀河・IGMサブグリッドモデルを作成した。
- ・ 作成したモデルをポスト処理的RTコードに組み込んだ新しい再電離コードを開発した。
- ・ 「UV feedback込みのモデル」と「これまで用いられてきた単純な(feedbackなしの)モデル」の比較から、UV feedbackは再電離過程に大きな影響を与える事を確認した。

今後

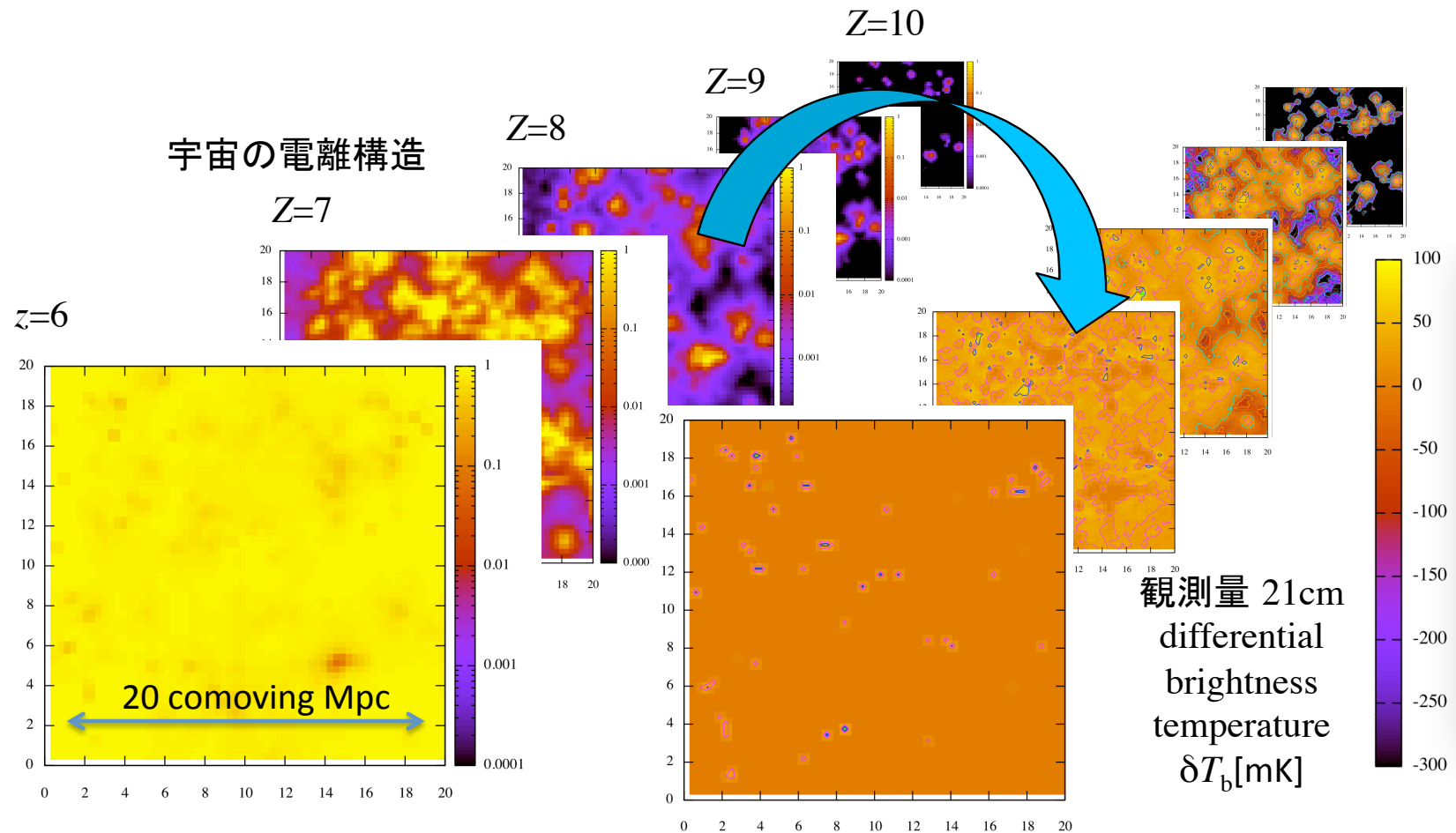
- ・ より大きな計算領域(160Mpc, 320Mpc)での計算
- ・ 21cm線強度分布計算(時間があれば次のスライド)
- ・ ミニハロー(初代星)のサブグリッドモデル作成 & 実装
- ・ X-rayの効果の組み込み
- ・ 準数値的計算法の改良(サブグリッドモデル、電離計算) : GYUDON

SKAへ向けて：21cmシグナルの計算

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

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！



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

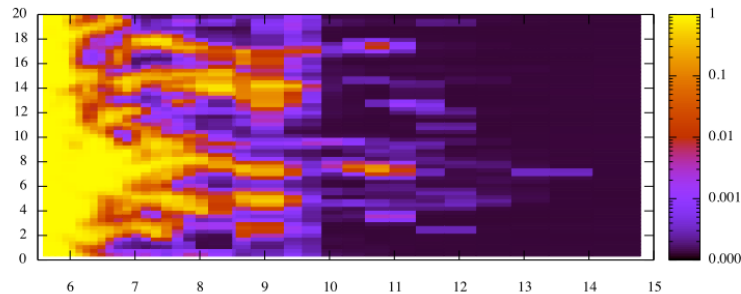
再電離史はこれまでより直接的にわかる！

Strong IGM heating

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



L [cMpc]



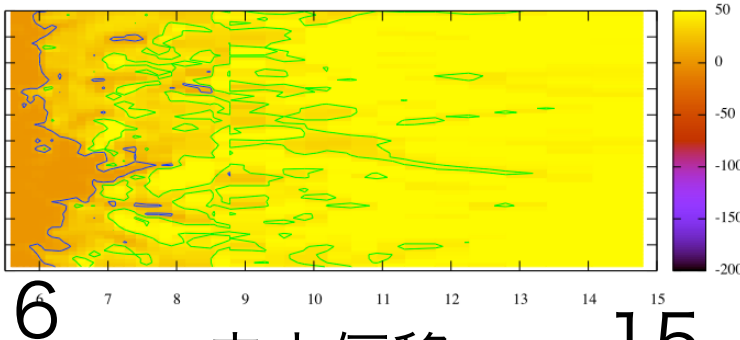
III

Strong Coupling

($T_s = T_k$)

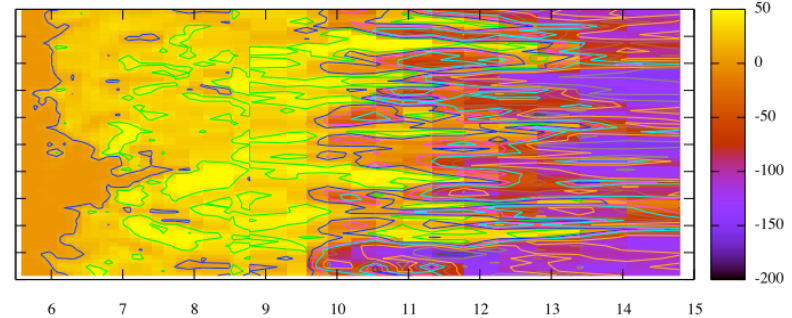


L [cMpc]



赤方偏移

波長=21×(1+z)cm



赤方偏移

波長=21×(1+z)cm

δT_b [mK]

SKAへ向けて：21cmシグナルの計算

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

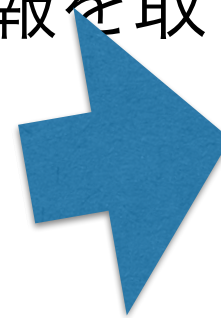
SKA2: 振動数ごとの21cm強度マップ(Tomography)

=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！

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
- ・ 電離光子脱出確率の質量依存性
 - ・ 大質量ほど f_{esc} 大？ (Gnedin+ '08)
 - ・ 低質量ほど f_{esc} 大？ (e.g., Yajima+ '11他多数)
 - ・ 依存性なし(最も簡単な仮定)



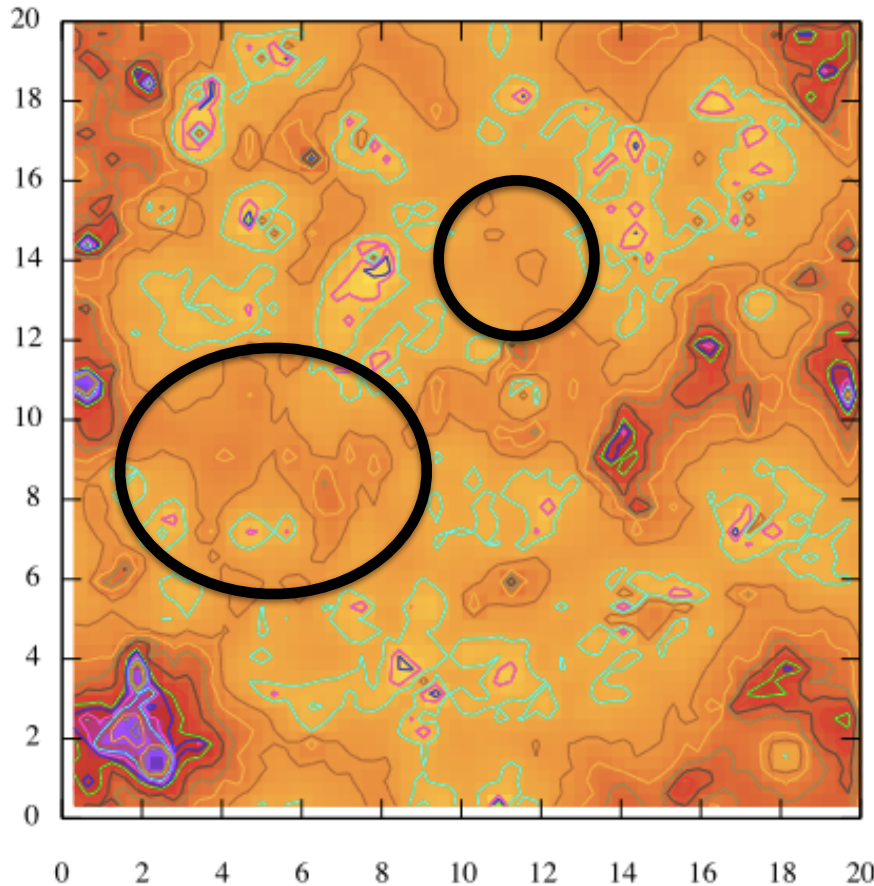
電離史のみならず、
HIIバブルのサイズ
分布に影響

イメージングが可能となれば、電離光子源の情報が詳細にわかる

21cmマップ($T_s=T_k$)

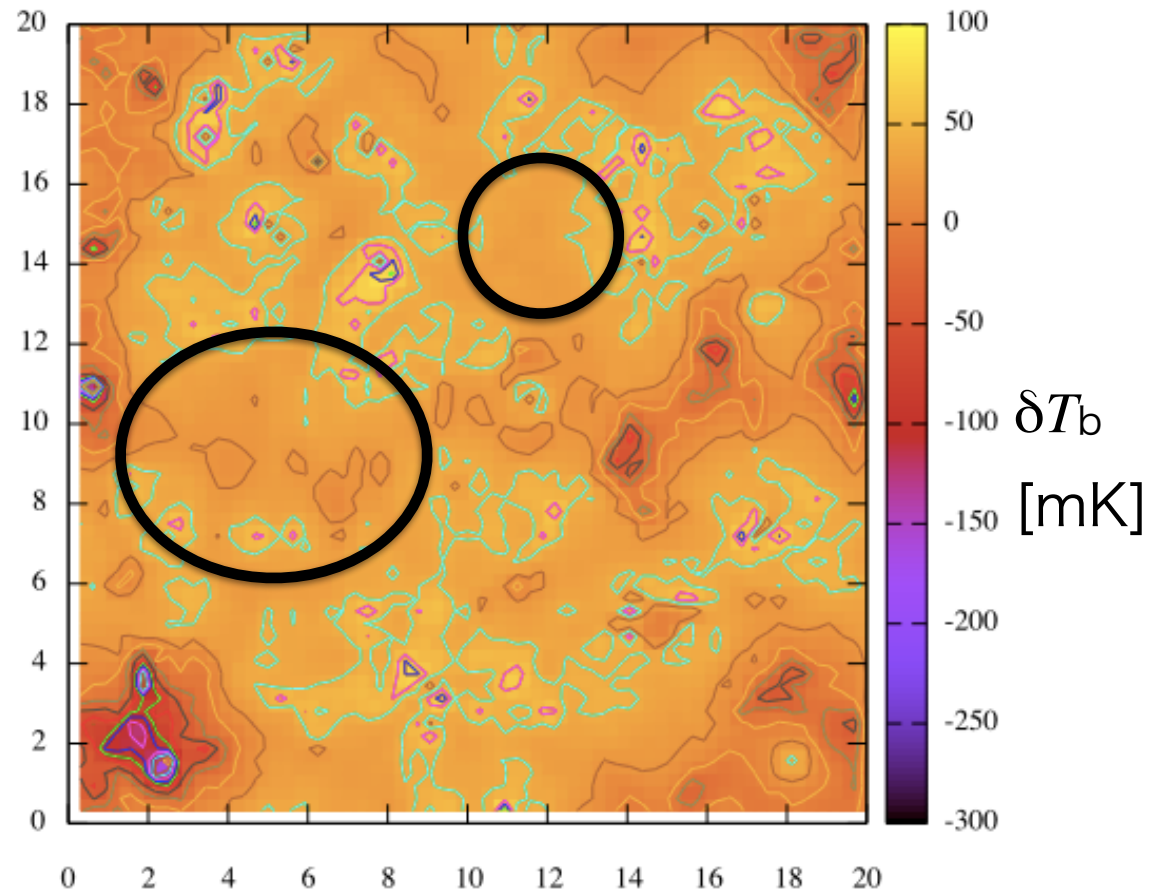
$f_{\text{esc}}=0.2$

質量依存性なし



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

from RHD

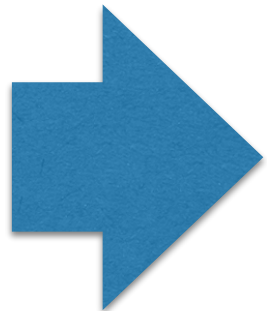


右: 満遍なく分布する程質量銀河がより明るいため、 $\delta T_b < 0$ の領域を減らし若干21cm分布の勾配がゆるくする。

以下予備スライド

RHD計算の概要

- Λ CDM cosmology(WMAP 9-yr)
- (N_{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, H₂, 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)

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_{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.

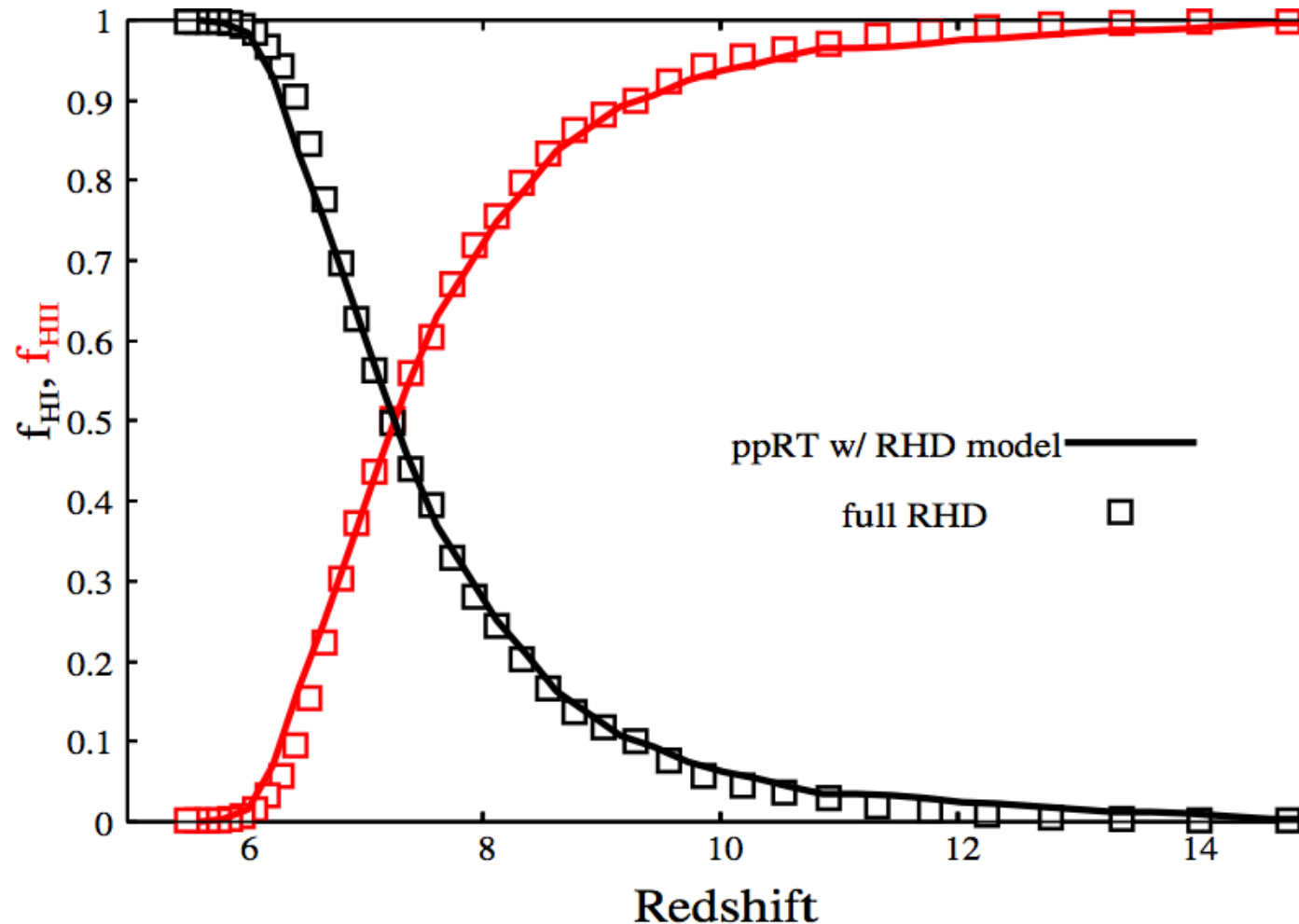
$n\Delta t_s < t < (n+1)\Delta t_s$ の間(ii)-(v)の繰り返し

$t > (n+1)\Delta t_s$ 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

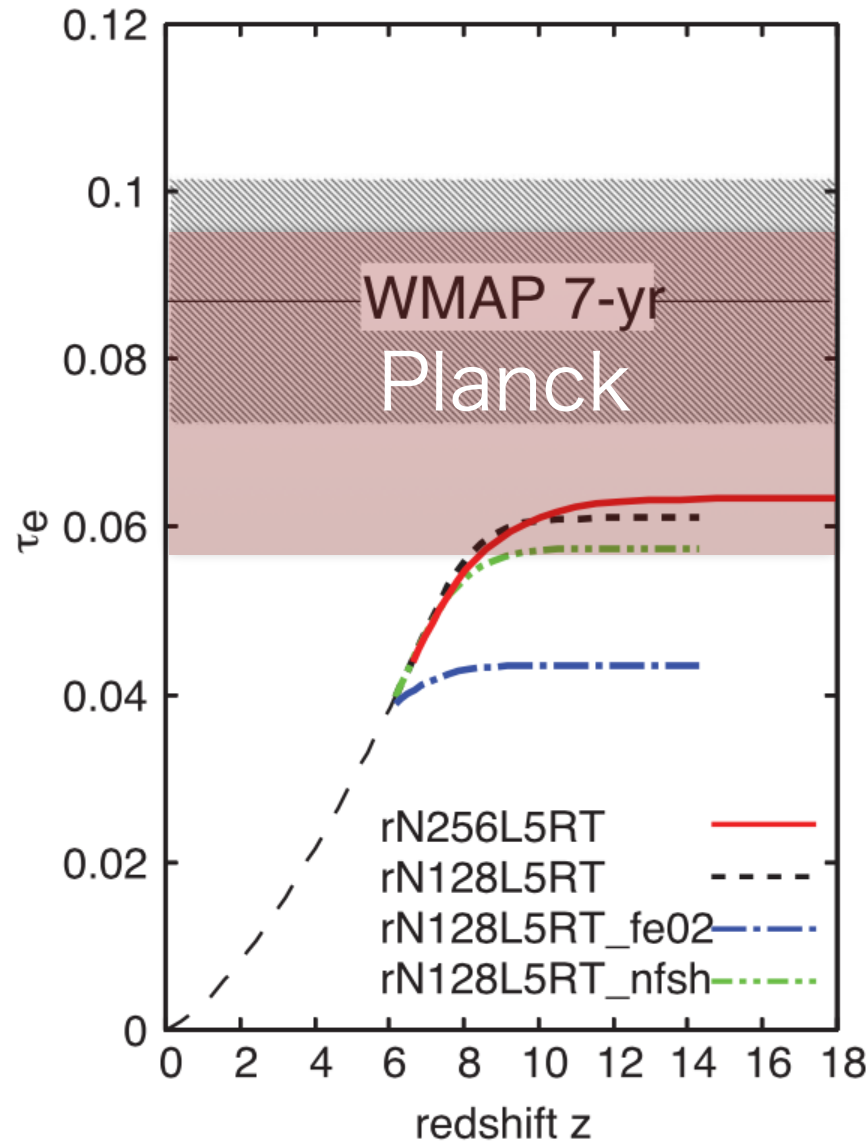
RHDとRTwSGMとの比較 I：平均的電離史

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~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。

Optical Depth WMAP & Planck



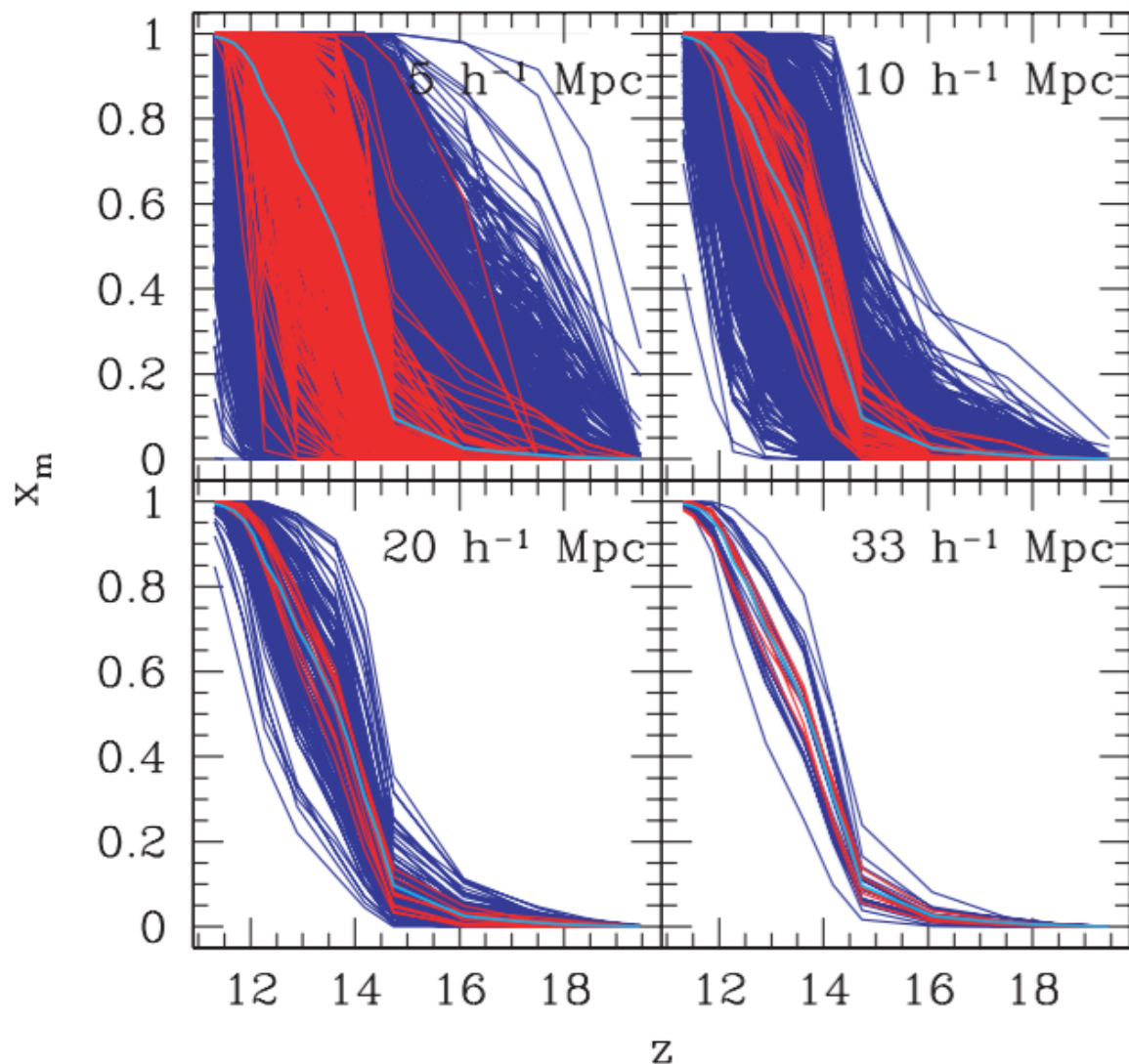
Planckの結果であれば、銀河だけのモデルでも矛盾はしない。

見方を変えると、ミニハロー内で初代星を作りすぎるとまずい。

feedback (解離、超音速流など)をきちんと理解することが重要

KH+'13

計算領域をより大きく

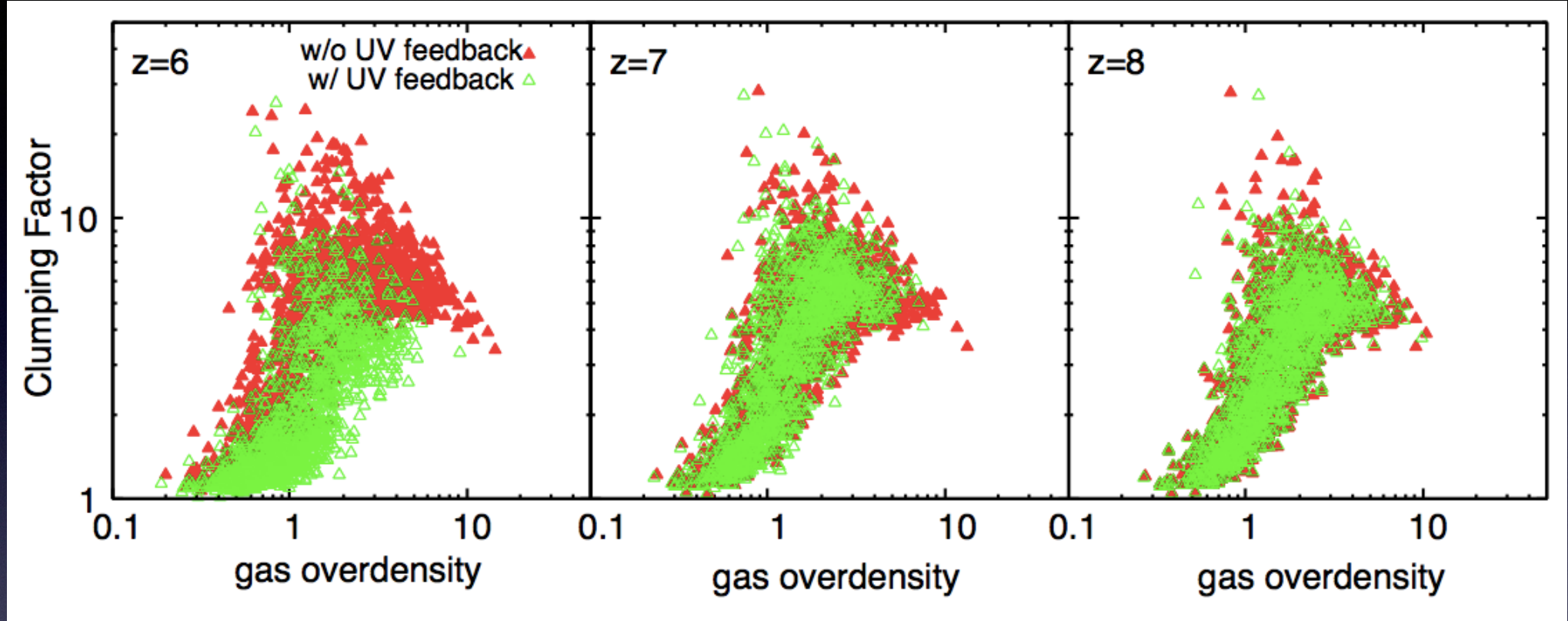


Iliev+ '06: 計算領域のサイズによる電離史の違い

全volume(100 Mpc)³からsub-volumeを持ってくる.赤は、sub-volume内の密度ばが平均密度場と等しい場合.

平均密度が同じでもVolumeが小さいと電離史が異なる.

Clumping factor



Clumping factorはlocalな密度と良い相関.

=>local 密度の関数としてモデル化

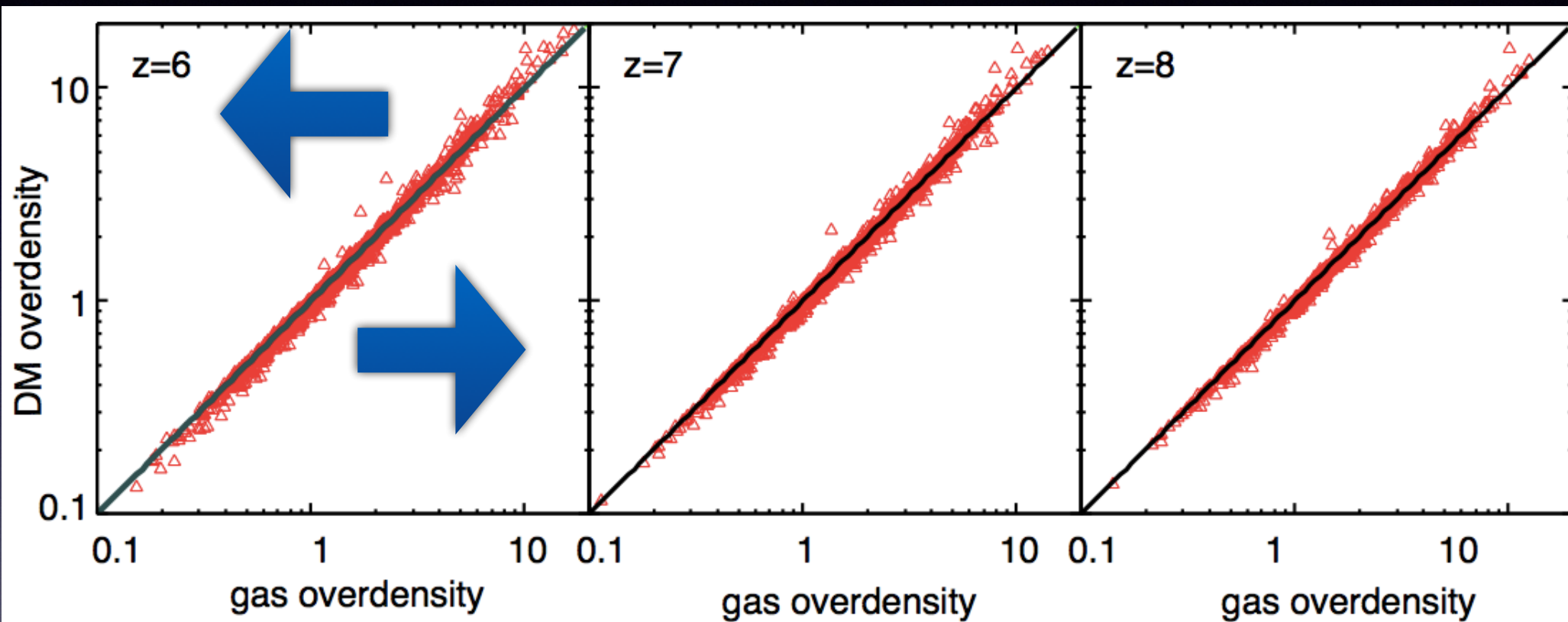
Globalな平均値を用いると高密度(低密度)領域でのHII領域サイズを過大(過小)評価

より精密には、電離度の関数として用いるのが良さそう.

(例えば、長谷川モデルと異なる電離史を計算する場合)

ガスとDMの密度の相関

UV feedbackは、高密度領域のvolume fractionを減少させるため、baryonとDMのIGM密度分布にずれが生じる。



期待される効果は見えるものの、それほど大きくはない。

この効果を考慮するなら、DM密度 \Rightarrow ガス密度に変換した上で、前述の clumping factorを各gridにあてはめるのがよい。