

# 大規模再電離シミュレーション：銀河・銀 河間物質モデルの大局的電離構造への影響



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)

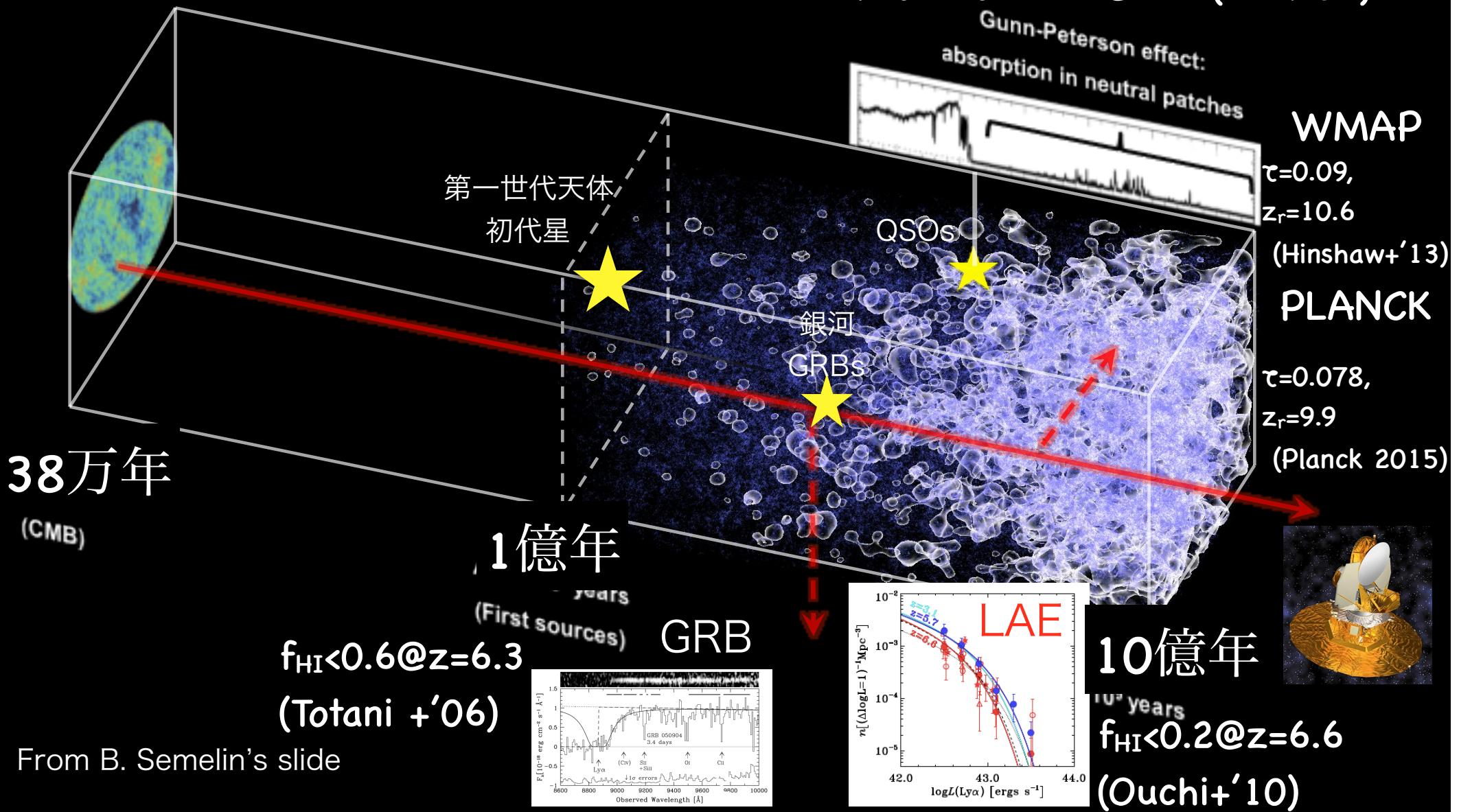


第三回銀河進化研究会 2016年6月1日-3日@東北大学



# 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: escape fraction =  $f_{\text{esc}}$ )  
の情報が必要

# 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 eV光子 (HeI, HeIIは 24.5eV, 54.4eV)

- 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<sup>-</sup>過程)

## 光解離(水素分子):水素分子の破壊

11.2eV-13.6eV 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

# “START”

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

- Hydrodynamics(+ Dark Matter Dynamics)

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) Lagrange的手法

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

辐射輸送を解くことで求める  
(次のページ)

- Non-equilibrium chemistry

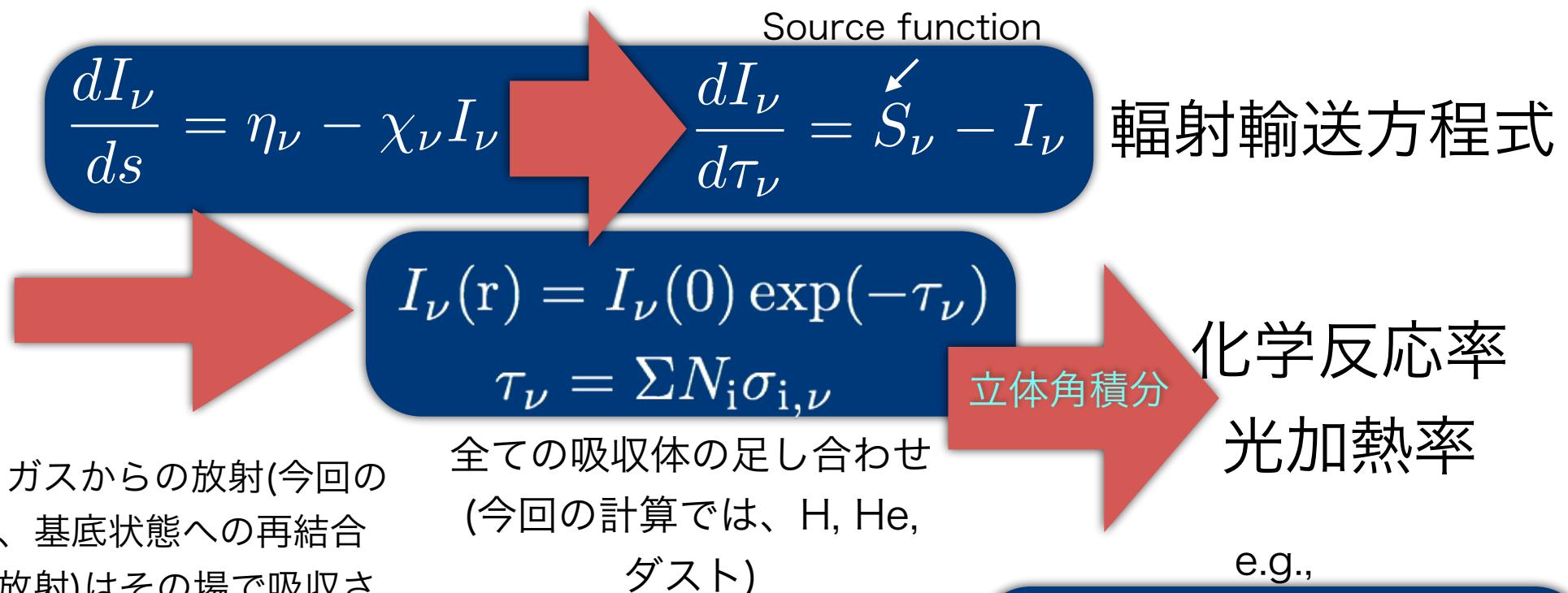
$$\frac{dn_i}{dt} = C_i(T, n_j) - D_i(T, n_j) n_i$$

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

# “START”

## ● Radiative Transfer of UV photons

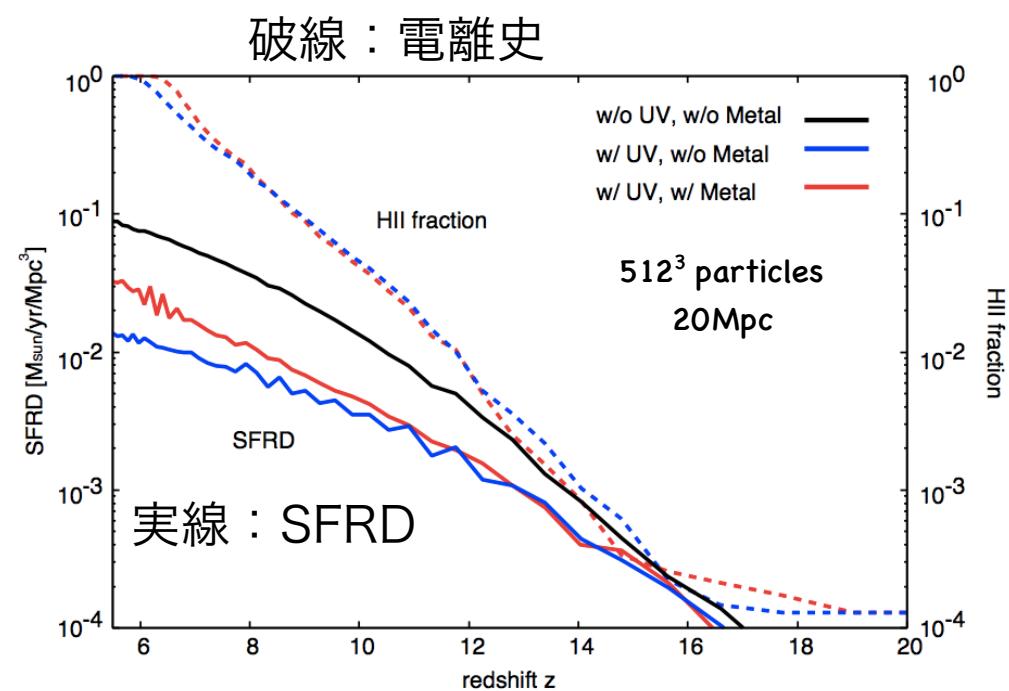
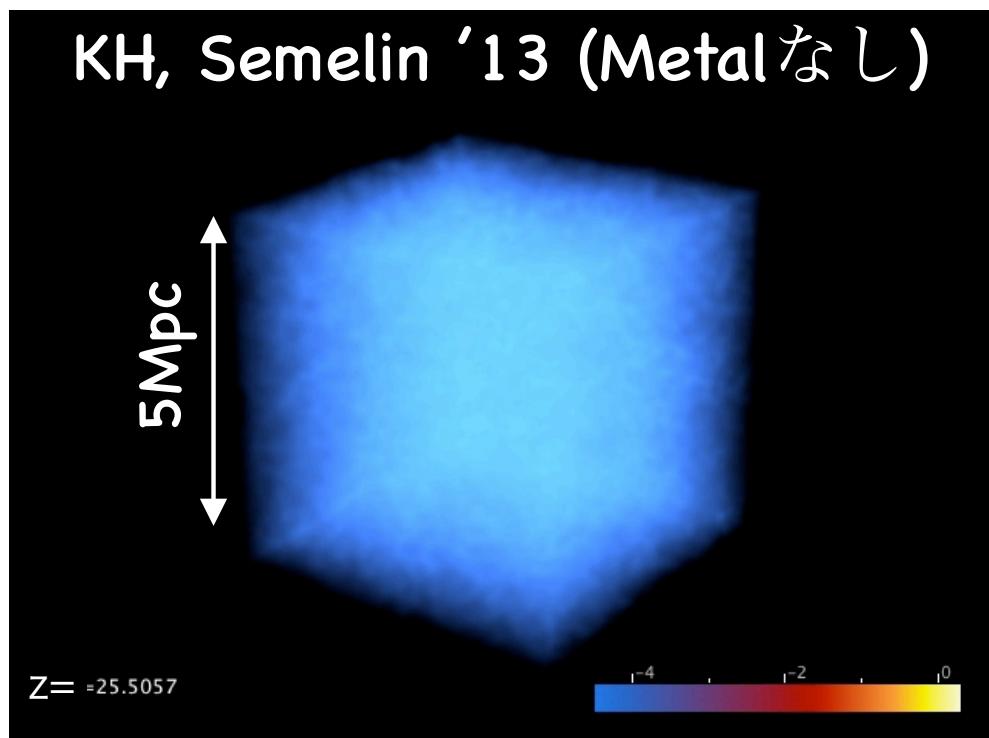
- 主に電離、解離光子の輸送(加熱~ $10^4$ K, 水素分子=ガス冷却剤の破壊)
- SPH粒子をそのままRTグリッドとして用いる事で高密度領域を分解可能



# これまでのあらすじ(昨年のトーク概要)

輻射輸送と化学反応・流体力学を矛盾なく解く輻射流体(Radiation Hydrodynamics: RHD)計算によって、輻射フィードバックが星形成率や

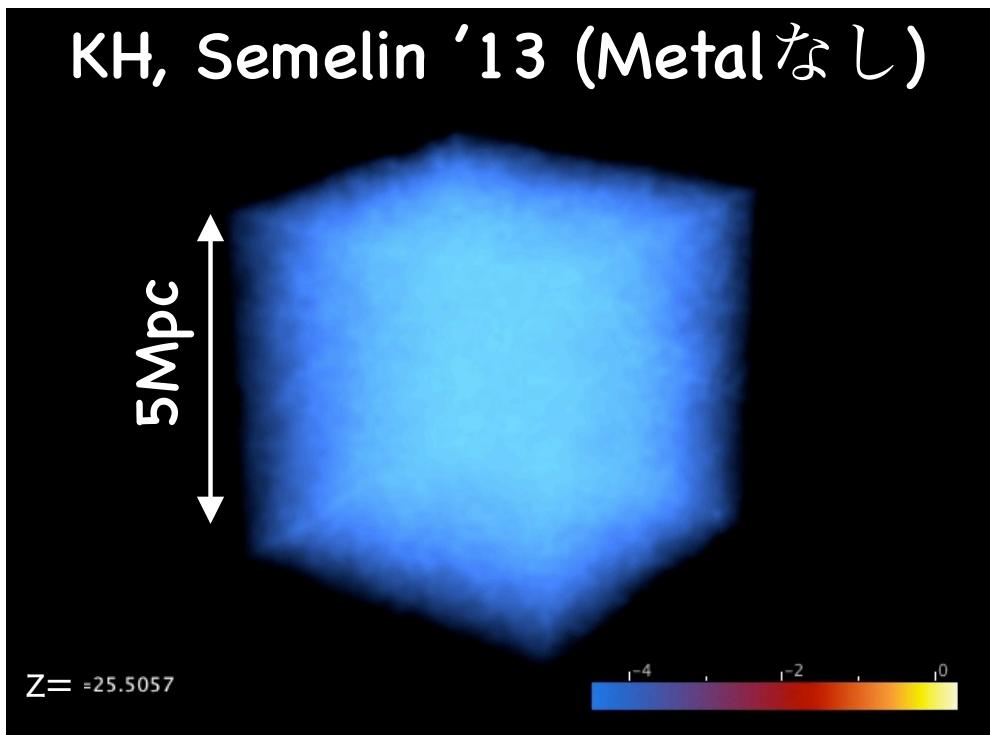
銀河間物質のclumping factorに与える影響を定量的に示した。



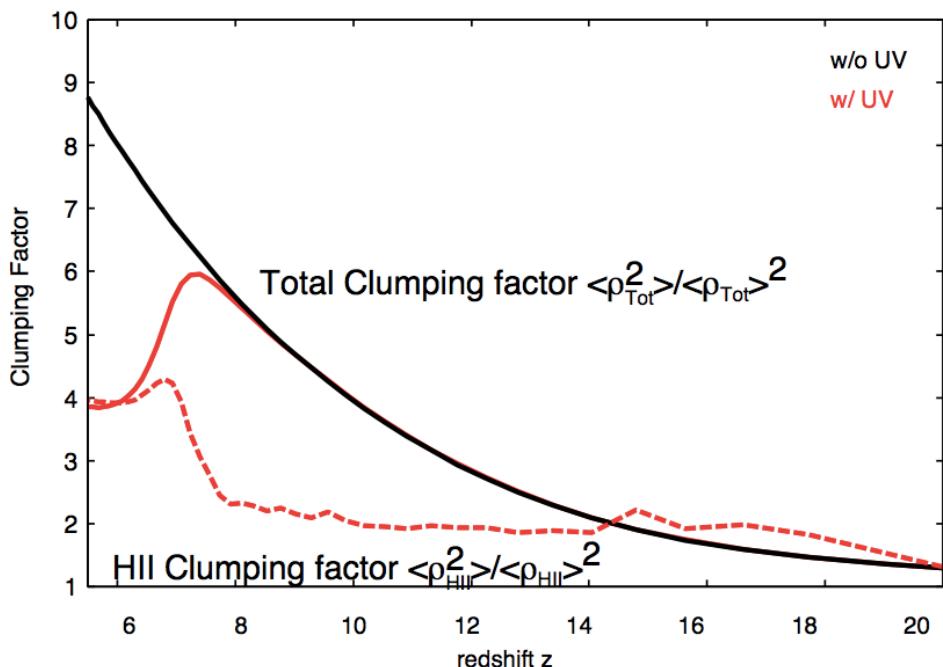
# これまでのあらすじ(昨年のトーク概要)

輻射輸送と化学反応・流体力学を矛盾なく解く輻射流体(Radiation Hydrodynamics: RHD)計算によって、輻射フィードバックが星形成率や

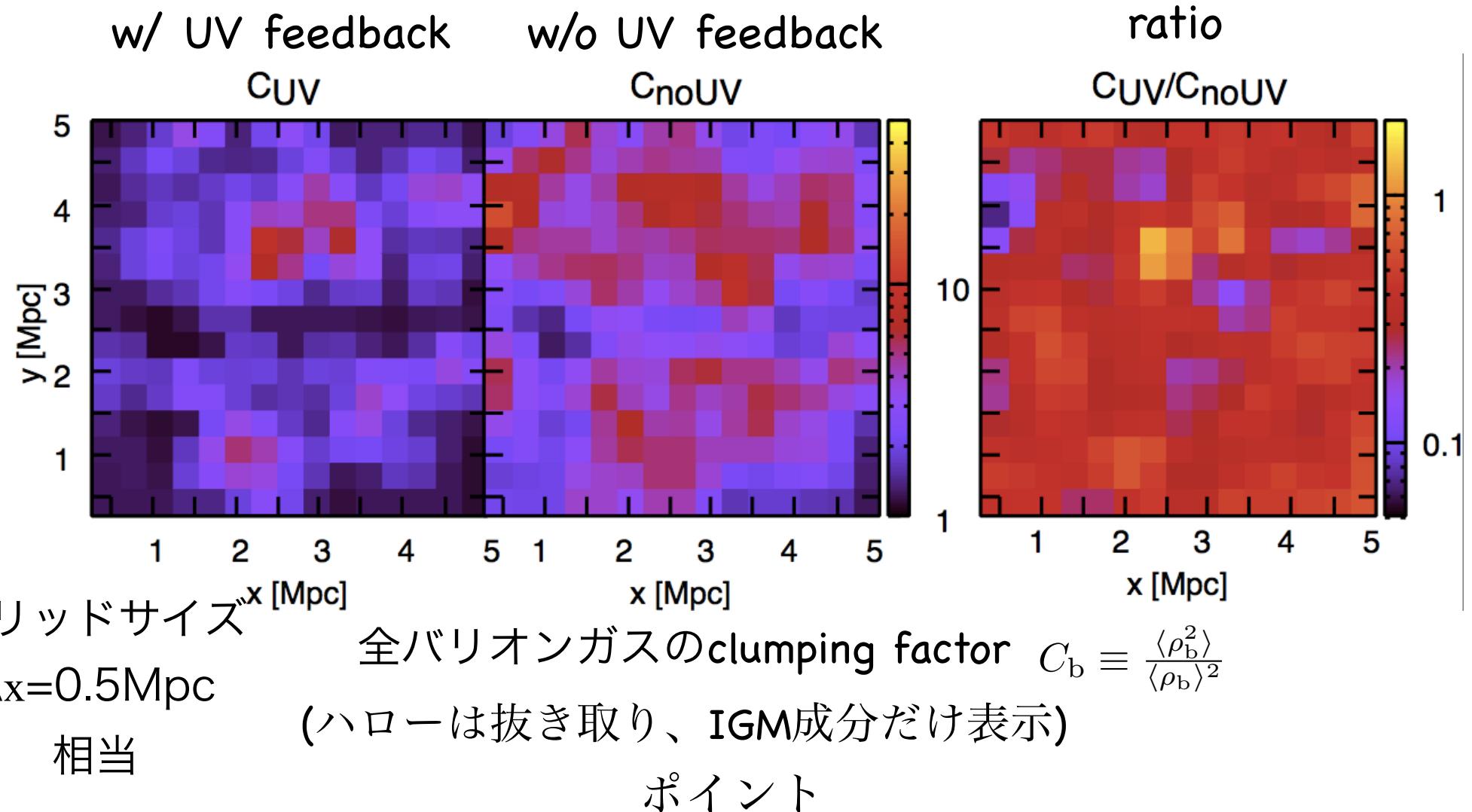
銀河間物質のclumping factorに与える影響を定量的に示した。



平均 IGM clumping factorの進化



# IGM Clumping factorへのUVの影響: 空間分布



- Clumping factorは場所ごとに値が異なり、高密度領域ほど高い値。UV feedbackの影響で値が全体的に下がる。

# 本研究

## これまでの研究の問題点：

- ・計算**Volume**が小さく(20Mpc~予想される最大HIIバブルサイズ)、宇宙の平均的な電離史を計算できない。
- ・**Volume**不足から、SKAやHSCなどの観測との比較も困難
- ・輻射フィードバックは重要だが100Mpc規模で高分解能の計算は不可能  
解決策

RHD計算結果を解析し、大領域ポスト処理的輻射輸送計算のサブグリッドモデルとして用いる。

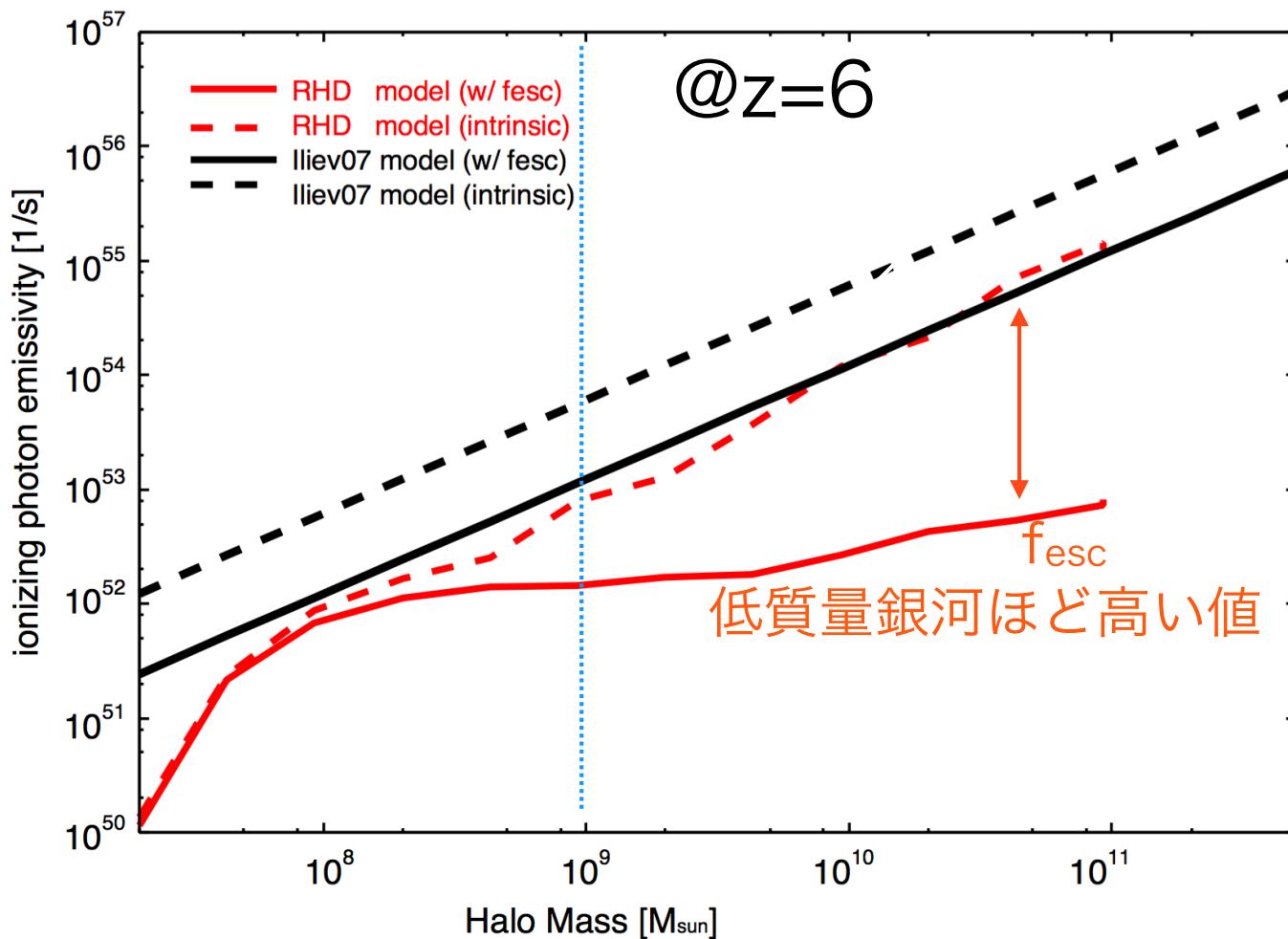
**Feedback**効果を考慮した再電離大領域シミュレーション

今回の内容：コードの試運転を兼ねて先行研究でのモデルと比較

# 電離光子源(銀河)モデル

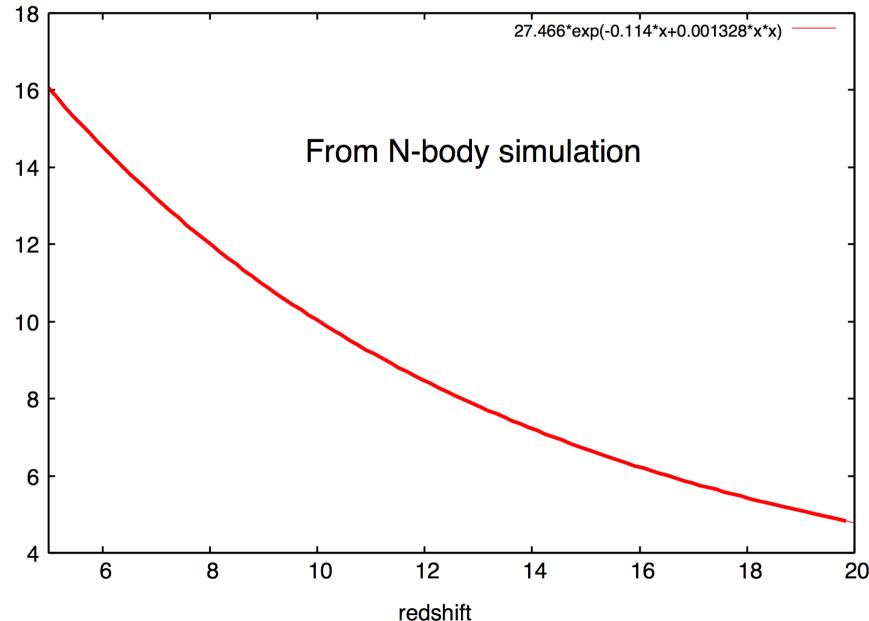
Iliev07 model: 電離光子放射率はハロー質量に比例. 電離光子脱出確率( $f_{\text{esc}}$ )=0.2で質量依存なし.(Iliev et al. 2007)

RHD model: シミュレーションで得られた電離光子放射率+ $f_{\text{esc}}$ (質量依存)  
周囲の電離度と質量に応じて変化 # SEDの形はRHD modelを採用

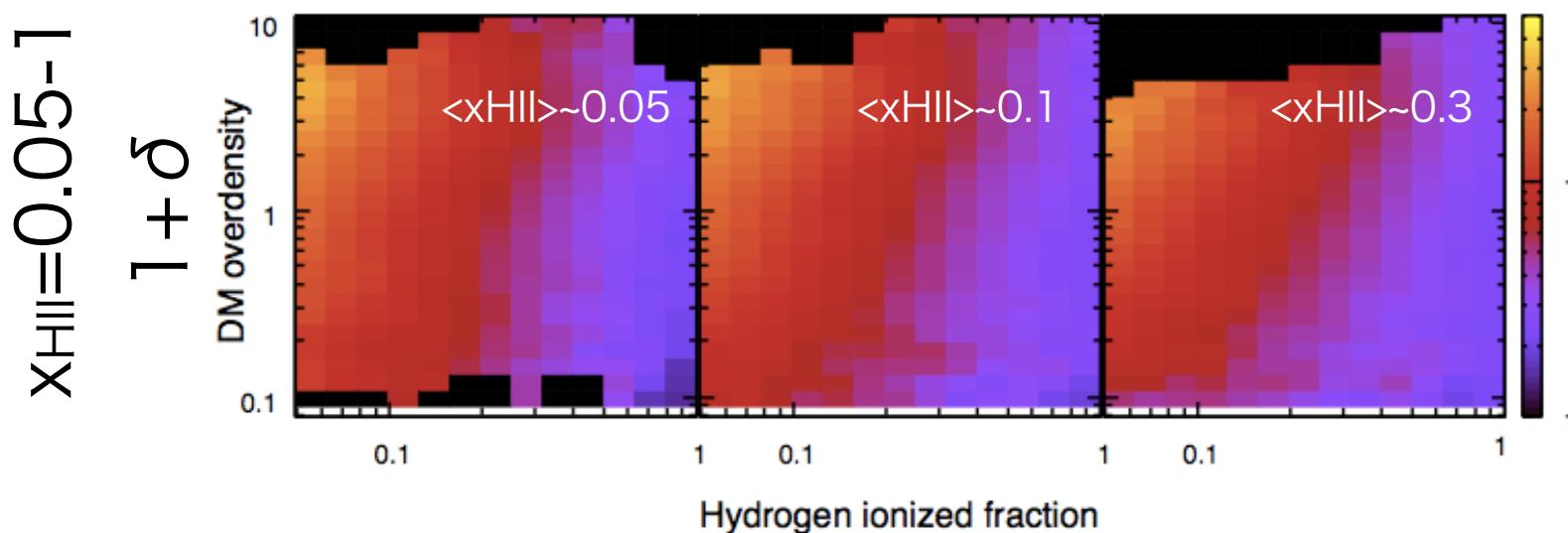


Iliev07 modelは5-10倍程度高い電離光子放射率.一方で電離領域で $10^9 M_{\odot}$ 以下のハロー内の星形成が止まるという強いfeedbackを仮定.  
→ RHD modelの方が軽い銀河の寄与が大きい.

# Clumping factorモデル



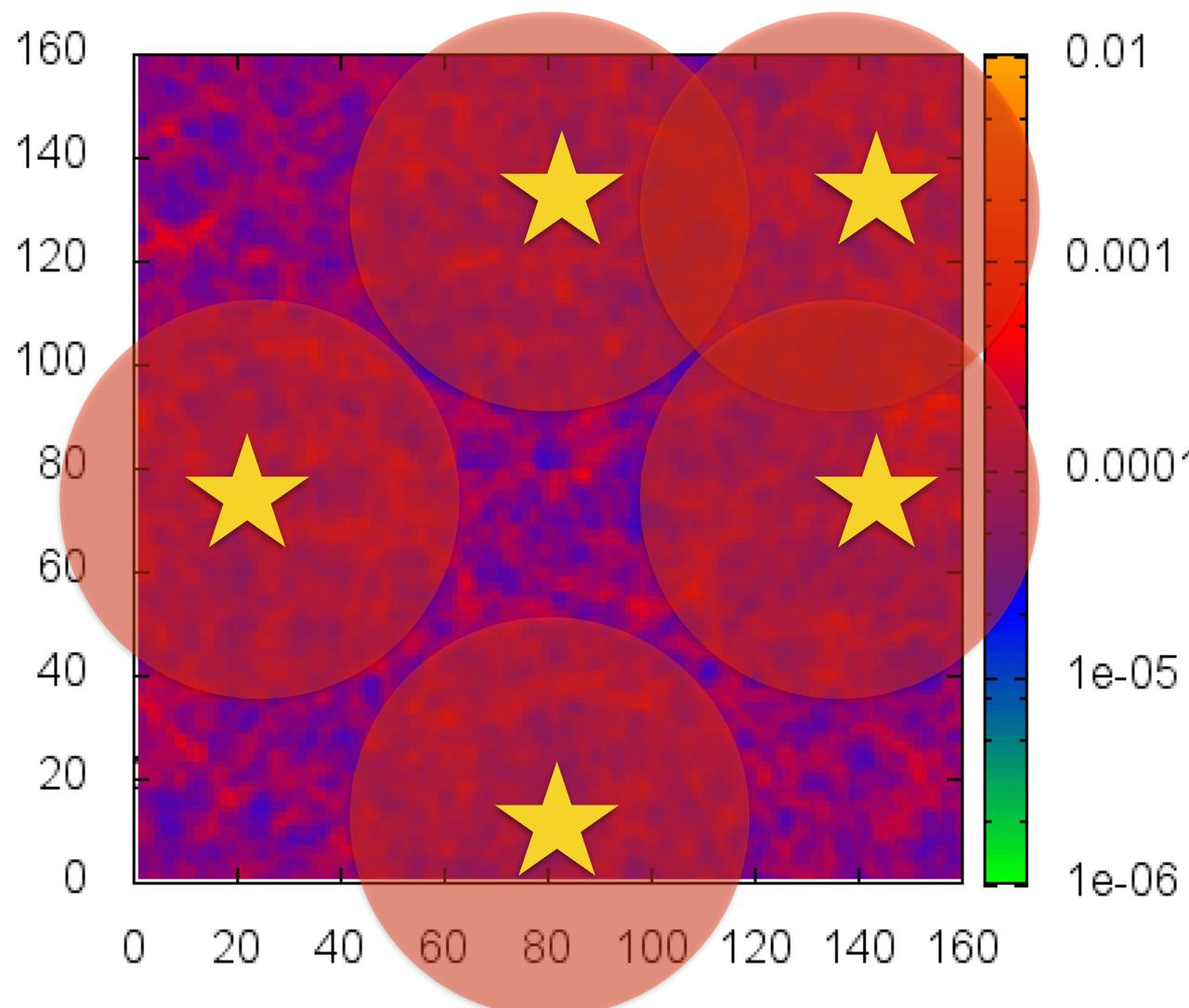
Iliev07 model: 宇宙論的N体計算から導出.  $z=6$ で $C\sim 14$ ,  $z=15$ で $C\sim 5$ . feedback効果(光加熱によるsmoothing)や場所依存性は考慮しない



高密度かつ低電離度の場所ほど高いClumping factor

RHD model : RHD 計算結果の解析から導出. local な密度と電離のを参照して Clumping factor を決める.

# 密度場とハロー分布



石山さん(千葉大)の提供

$N=4096^3$

$L=110/h \text{ Mpc} \sim 160 \text{Mpc}$

最小ハロー質量

$\sim 10^8 M_{\text{sun}}$  (40粒子)

or  $\sim 2.5 \times 10^7 M_{\text{sun}}$  (10粒子)

輻射輸送計算

$256^3$ グリッド(本計算、実行中)

$128^3$  モデル依存性調査用(今回  
はこっちがメイン)

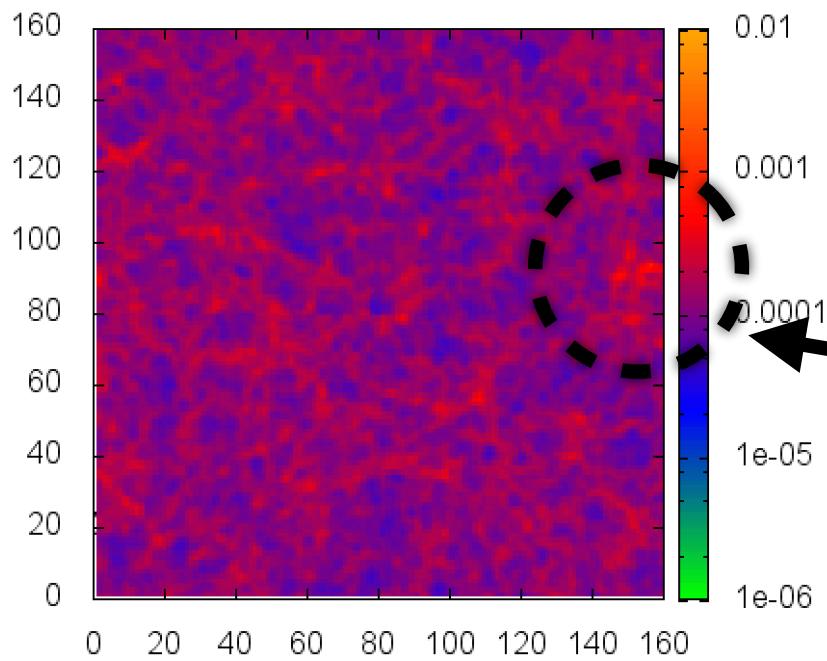
# シミュレーション手順

- i) N-bodyデータ読み込み: 場所ごとの密度場やハローの質量関数を読み込む( $\Delta t_s$  = スナップショット間隔10Myr)
- ii) 各時刻、各場所での $N(M_{\text{halo}})$  and  $n_H$  at  $t$ : 二つのN-body dataから内挿する。(最小再結合時間の1/30で更新)
- iii) 各時刻、各場所のemisivityを計算:  $\sum \text{SED}(M_{\text{halo}}, \underline{x}_{\text{HII}}) \times N(M_{\text{halo}})$
- iv) 辐射輸送を解く(一番頑張った部分だが詳細は割愛): HとHeの電離に関する輻射輸送を $C_{\text{HII}}(\delta, \underline{x}_{\text{HII}})$ を変えながら解く
- v) エネルギー方程式+化学反応式を解く: 電離度(H & He)と $T_{\text{gas}}$ (光加熱, cooling諸々, 宇宙膨張)を得る

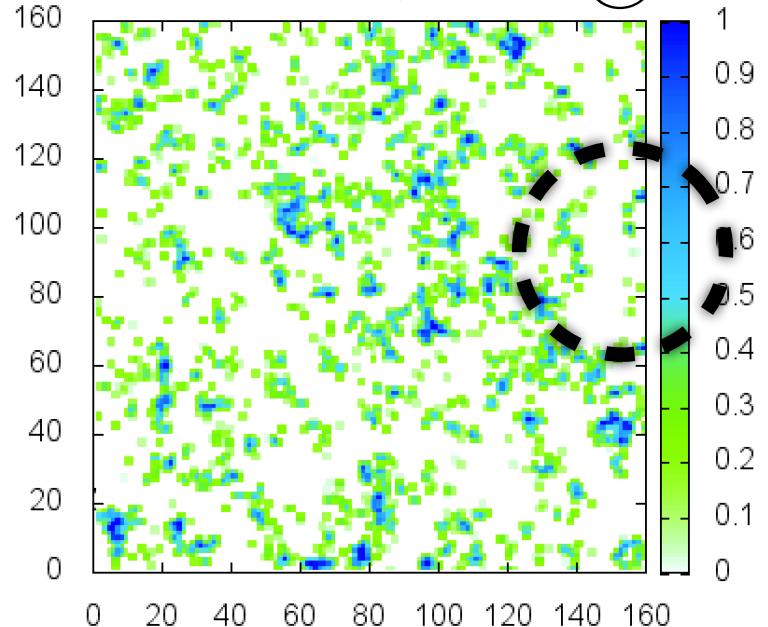
$\Delta t_s$ の間は(ii)-(v)を繰り返し

$\Delta t_s$ を超えたたら新しいデータを読み込んでまた(ii)-(v)を繰り返し

IGMガス密度[1/cc] @ $z \sim 7$



中性水素割合 @ $z \sim 7$



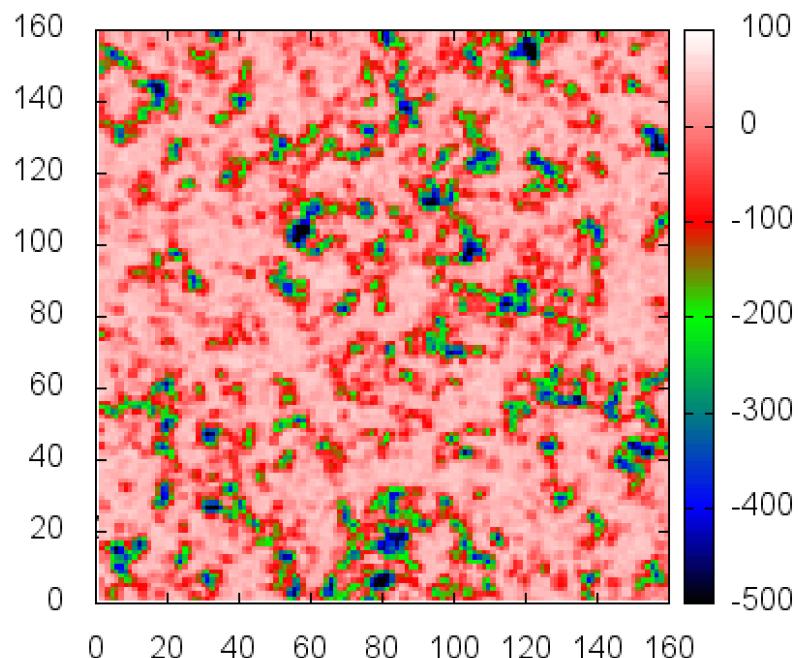
RHD model

$z=20 \rightarrow z=5.5$

$N_{\text{grid}} = 128^3$

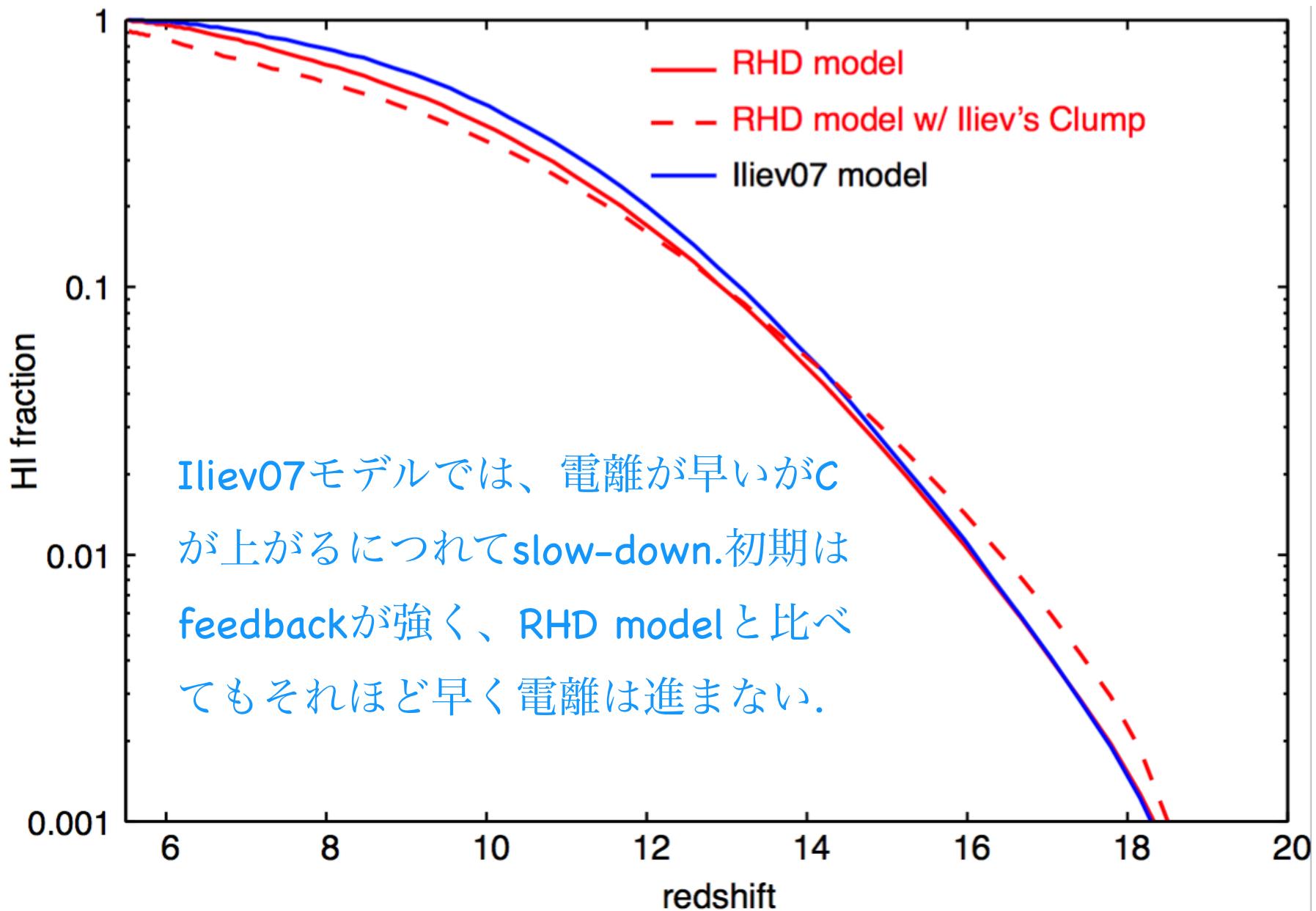
AGNなど考えない限り基本的には  
inside-out型(高密度領域が先に電離)

21cm differential brightness  
temperature @ $z \sim 15$

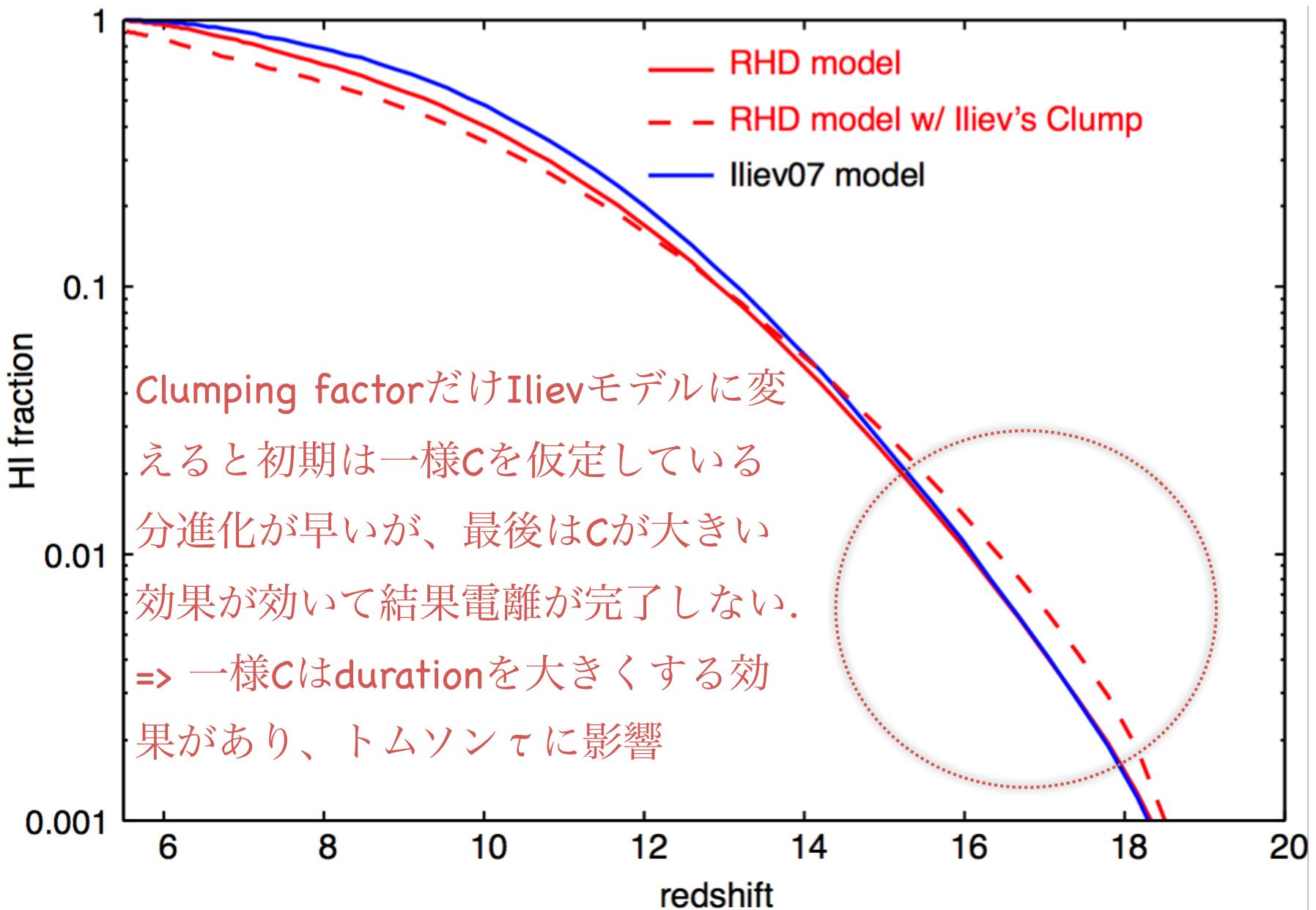


# パート1: 先行研究モデルとの比較

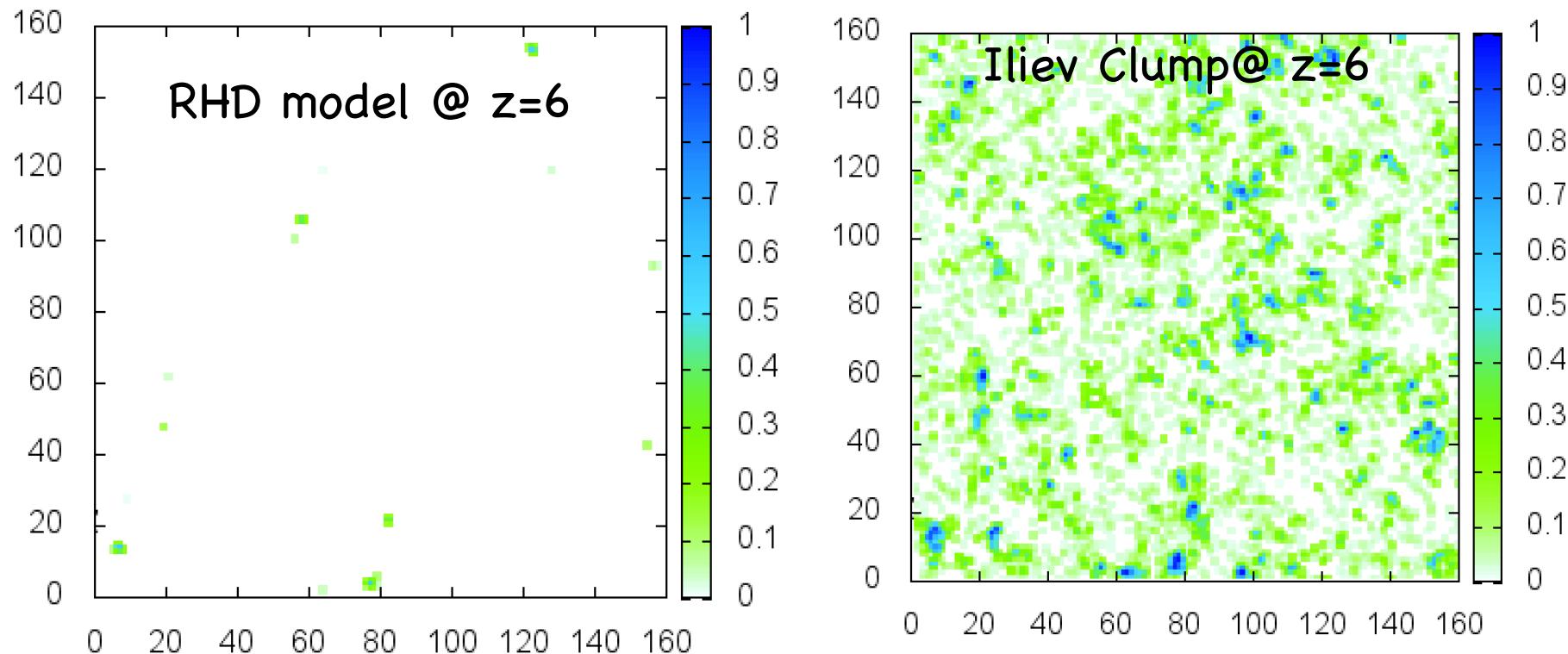
# 電離史の比較



# 電離史の比較

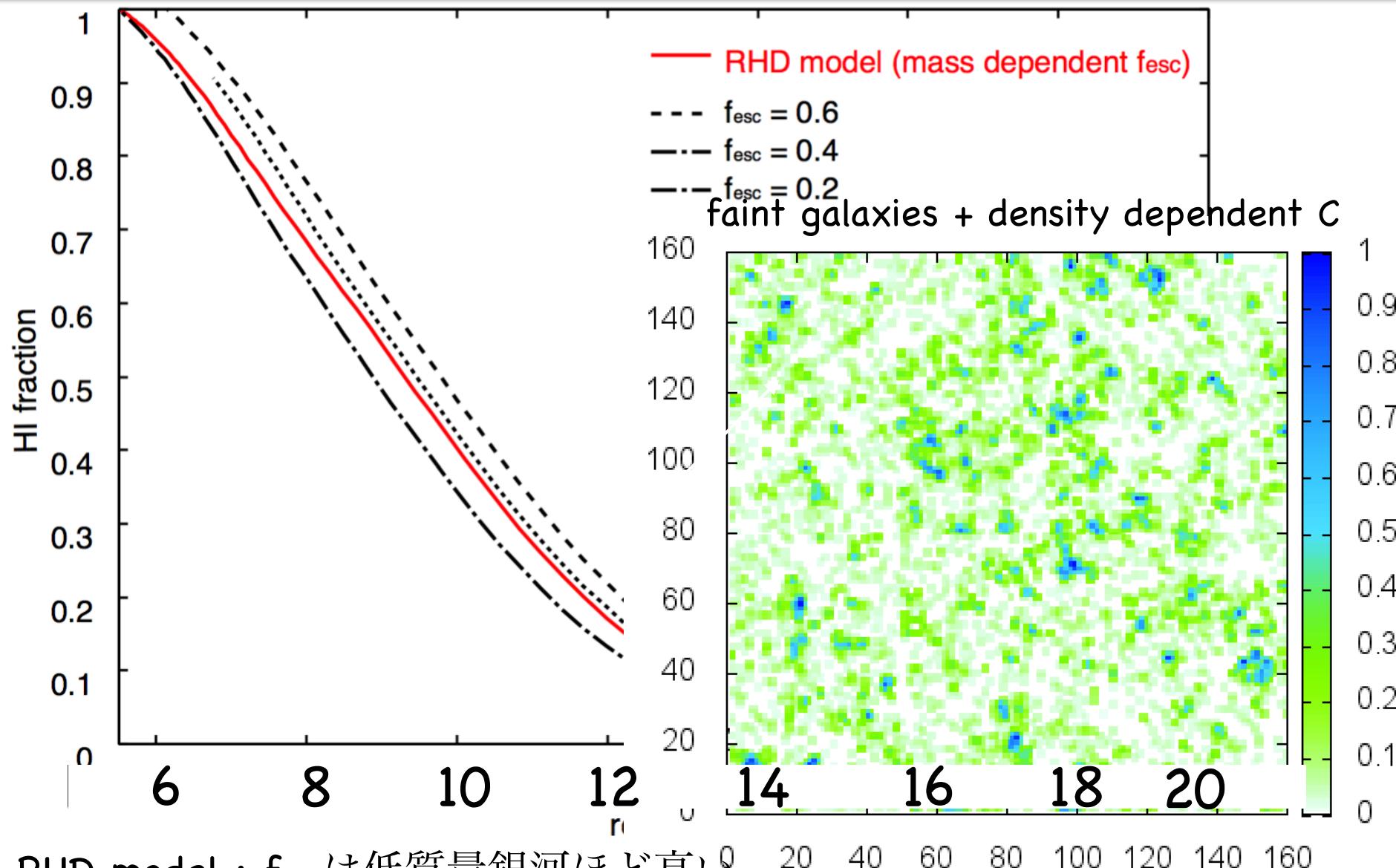


# 電離史の比較(見た目)



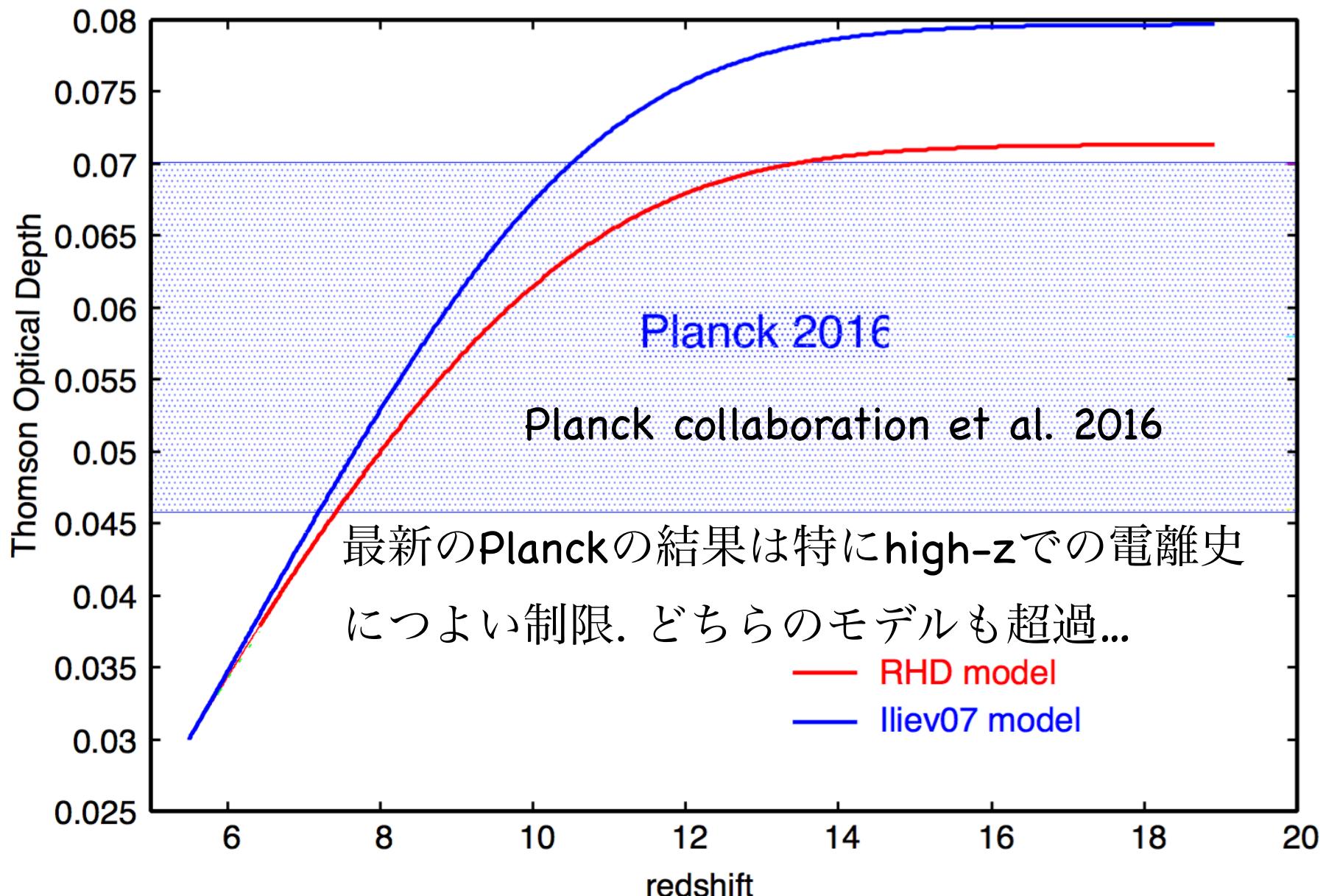
- \*  $f_{\text{HI}} \sim 0.1$ くらいの領域はレアだが存在する。(どのような領域かは今後要調査)
- \* Clumping factor次第で、見た目でも HI 分布が大きく変わる(Ly  $\alpha$  透過率?).
- \* 低質量銀河が電離光子源として支配的だとバブル or HI 領域というより low  $f_{\text{HI}}$  領域が広がっている? (今後定量的に調査)

# 他のモデルとの比較：電離光子脱出割合



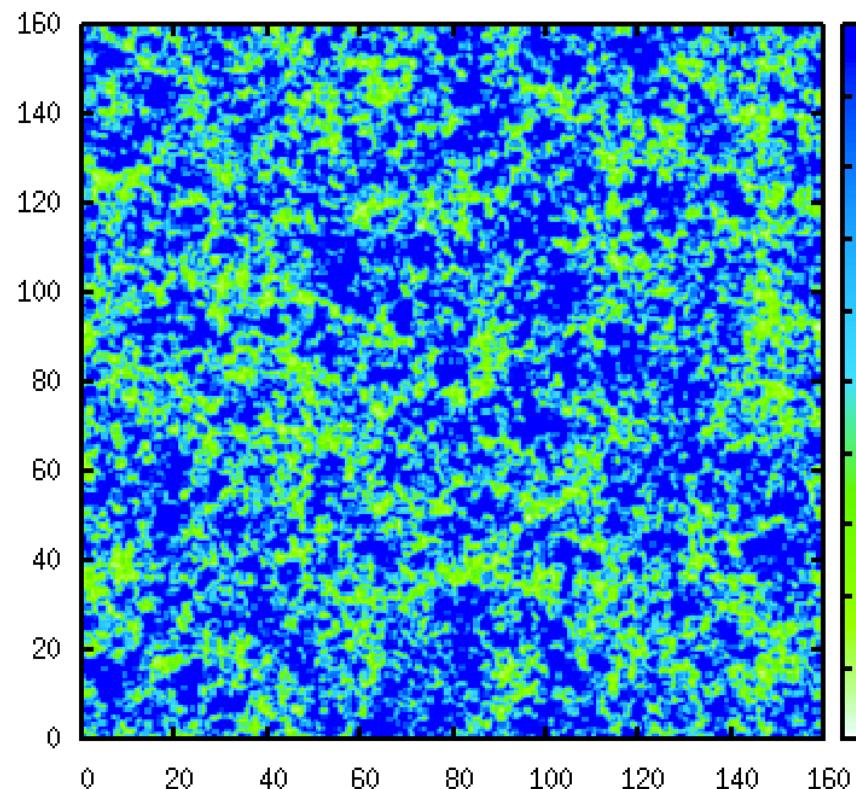
RHD model :  $f_{esc}$ は低質量銀河ほど高い。  
=> 赤方偏移ほど低質量銀河の割合が高く平均的には高い  $f_{esc}$

# トムソン散乱光学的厚み Planckとの比較



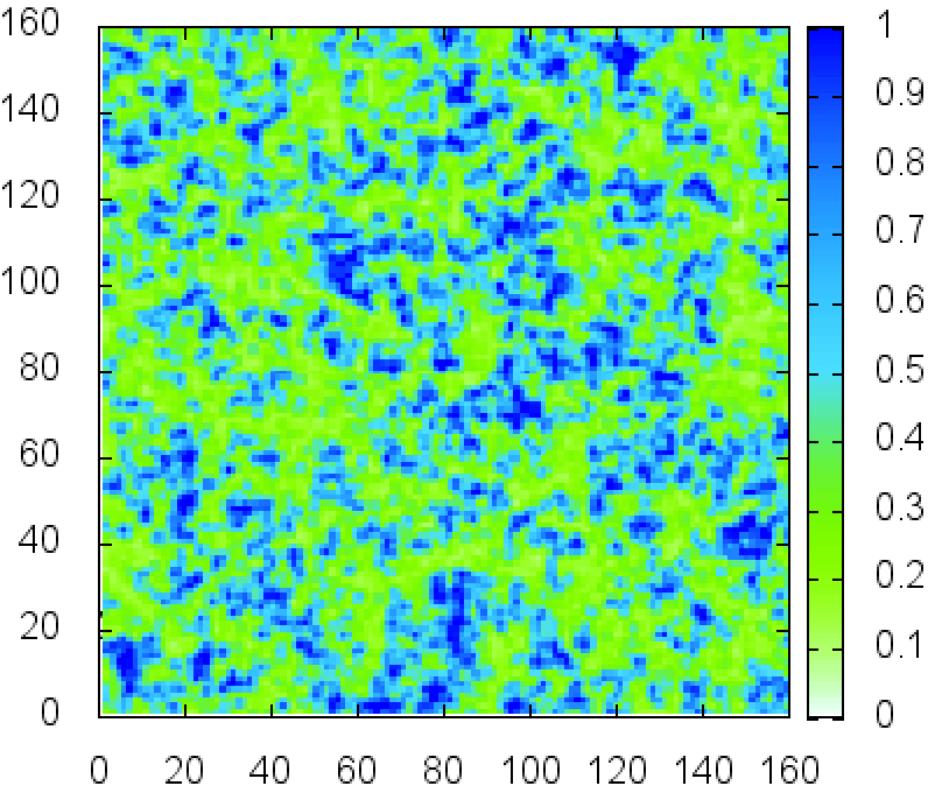
# 光学的厚みが大きすぎる？

高分解能



$$\langle f_{\text{HI}} \rangle \sim 0.7$$

@ $z \sim 8$



$$\langle f_{\text{HI}} \rangle \sim 0.4$$

密度依存のclumping factorを用いている為、分解能依存性が大きい  
高分解能計算(モデル作成と同等の分解能)では $\tau$ は下がると期待

# まとめ

輻射**feedback**を考慮した再電離コードを新たに開発し、先行研究でのモデルとの比較を行った。

- ◆ 放射源数~グリッド数~ $256^3$ でも現実的な時間で計算が終わる (~10 days w/ 512 cores,  $128^3$ は10 hrs w/ 256 cores).
- ◆ Iliev07モデルをそのまま用いると、**emissivity**はかなり高く評価してしまい、**Placnk**の結果再現は非常に難しい。
- ◆ 密度依存の**clumping factor**は高密度領域(再電離初期**phase**)での電離波面進行を遅らせる為、小さな値を説明する為には有利。
- ◆ LAEとの詳細な比較に着手。(来年度の銀河進化研究会ではこの辺の話をします。)
- ◆ 級麗なムービーを作るので完成したら使ってください♪ 皆様