

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)

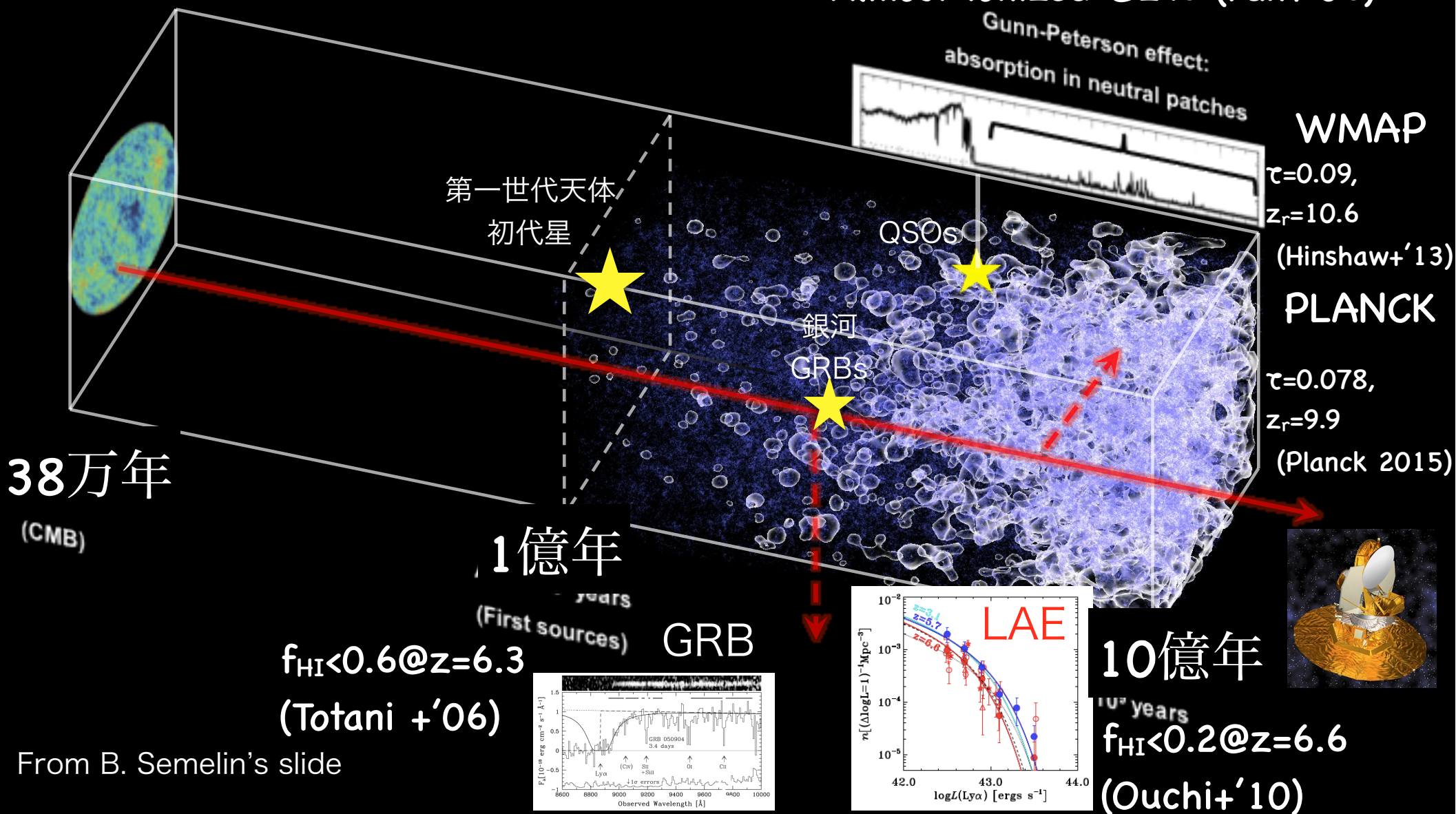
第三回銀河進化研究会 2016年6月1日-3日@東北大学



Reionization

様々な観測から制限がついている

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



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')

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

α_B 再結合係数

$$C \equiv \frac{\langle n^2 \rangle}{\langle n \rangle^2} \quad \text{Clumping factor}$$

再電離史を調べる為には、

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

2) 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 \times 電離

光子がIGMへ抜け出す割合: escape fraction= f_{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 10^4K 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 10^4K 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 $\sim 10^{8-9}M_{\text{sun}}$ 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

11.2eV–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

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

N-body

輻射輸送を解くこ
とで求める
(次のページ)

- Non-equilibrium chemistry

$$\frac{dn_i}{dt} = \overset{\text{Creation}}{\boxed{C_i(T, n_j)}} - \overset{\text{Destruction}}{\boxed{D_i(T, n_j)}} n_i$$

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 $\sim 10^4\text{K}$, 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

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \eta_\nu - \chi_\nu I_\nu$$

Source function

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \check{S}_\nu - I_\nu$$

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
(今回の計算では、H, He,
ダスト)

立体角積分

化学反応率
光加熱率

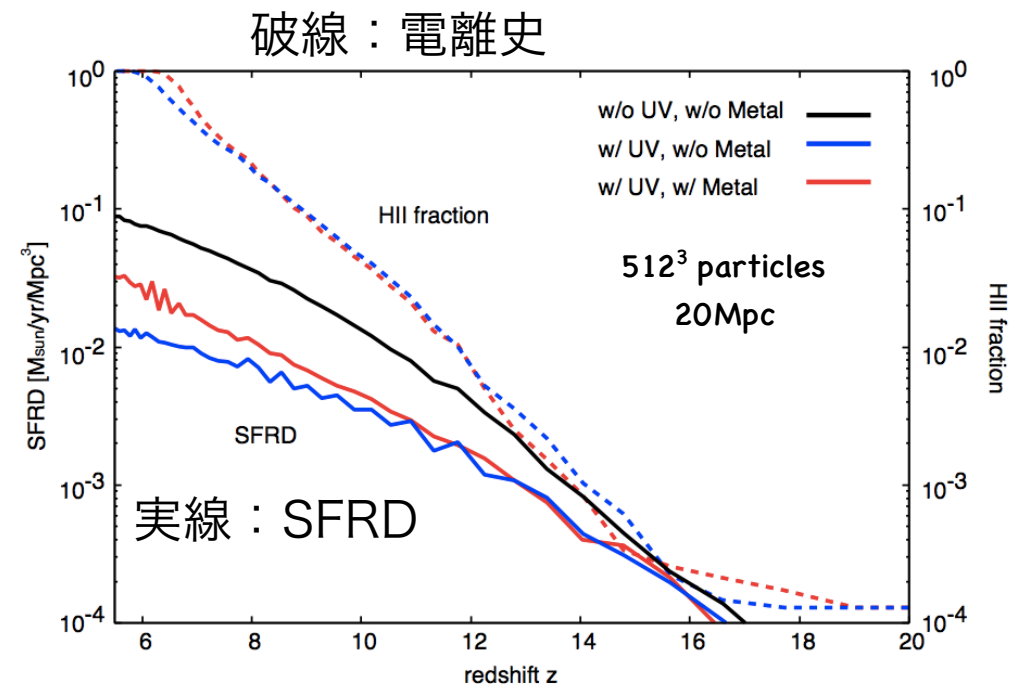
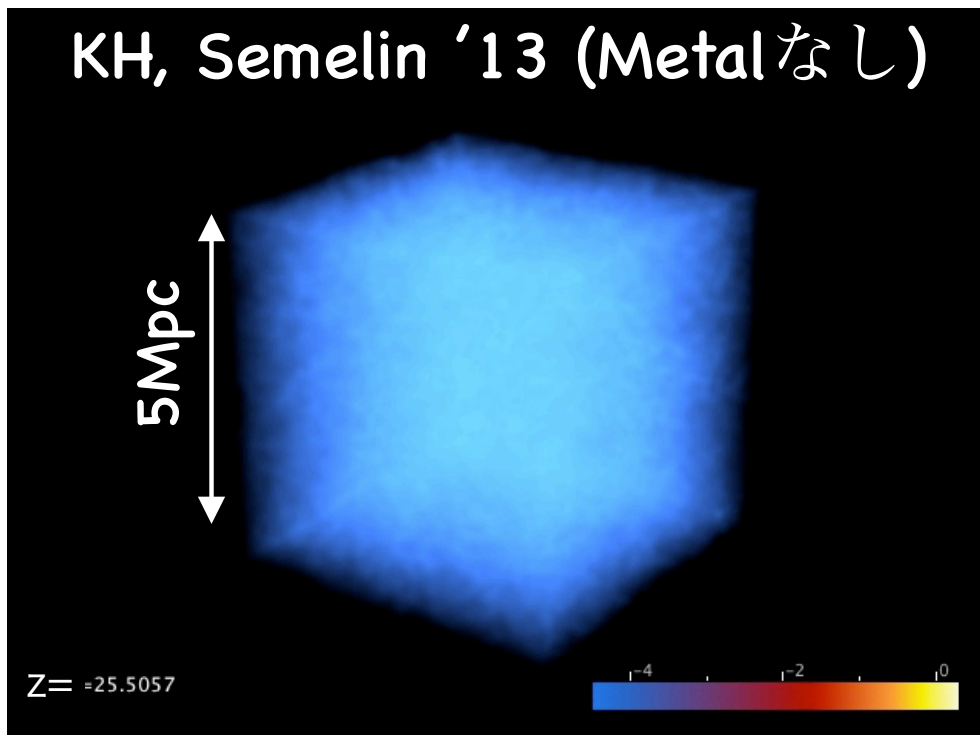
近似2: ガスからの放射(今回の場合は、基底状態への再結合による放射)はその場で吸収される(On the spot 近似)

e.g.,

$$k_{\text{ion}} = \int \int_{\nu_L}^{\infty} \frac{I_\nu}{h\nu} \sigma_\nu d\nu d\Omega$$

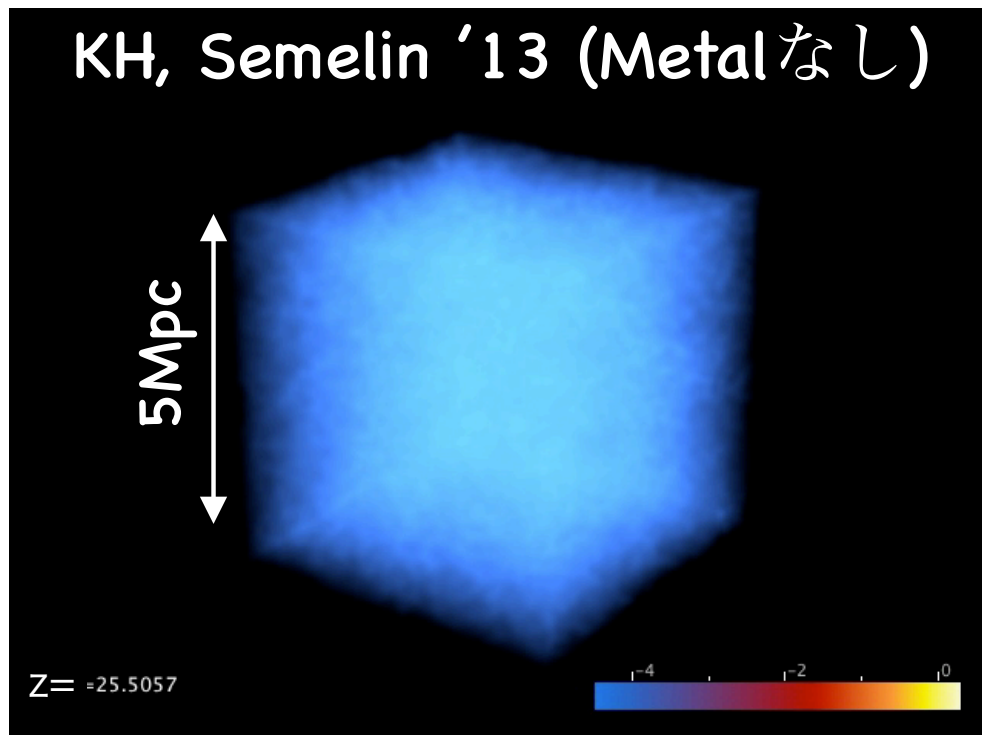
これまでのあらすじ(今年のトーク概要)

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。

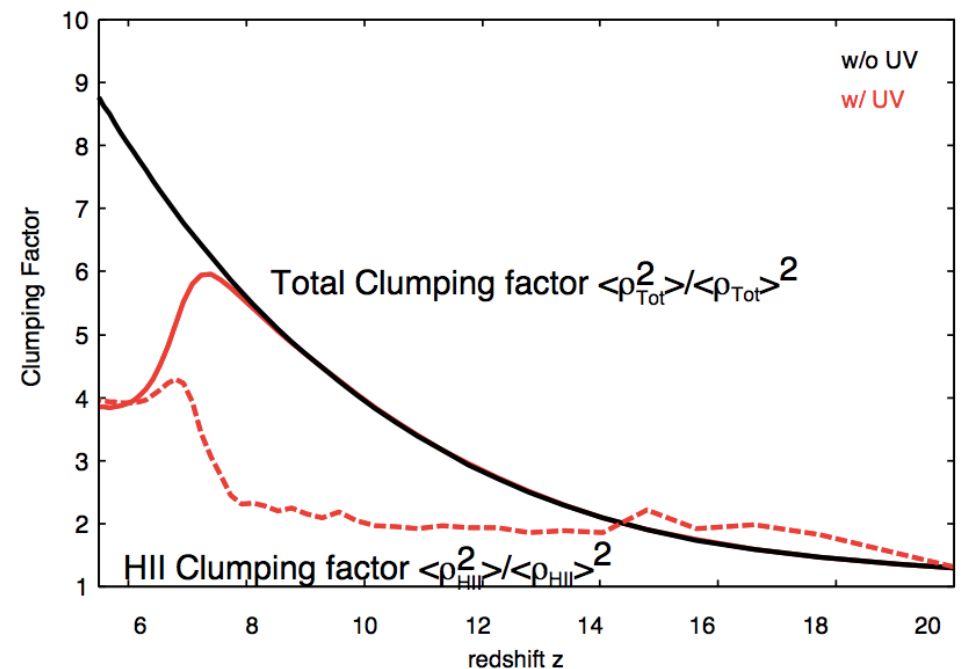


これまでのあらすじ(今年のトーク概要)

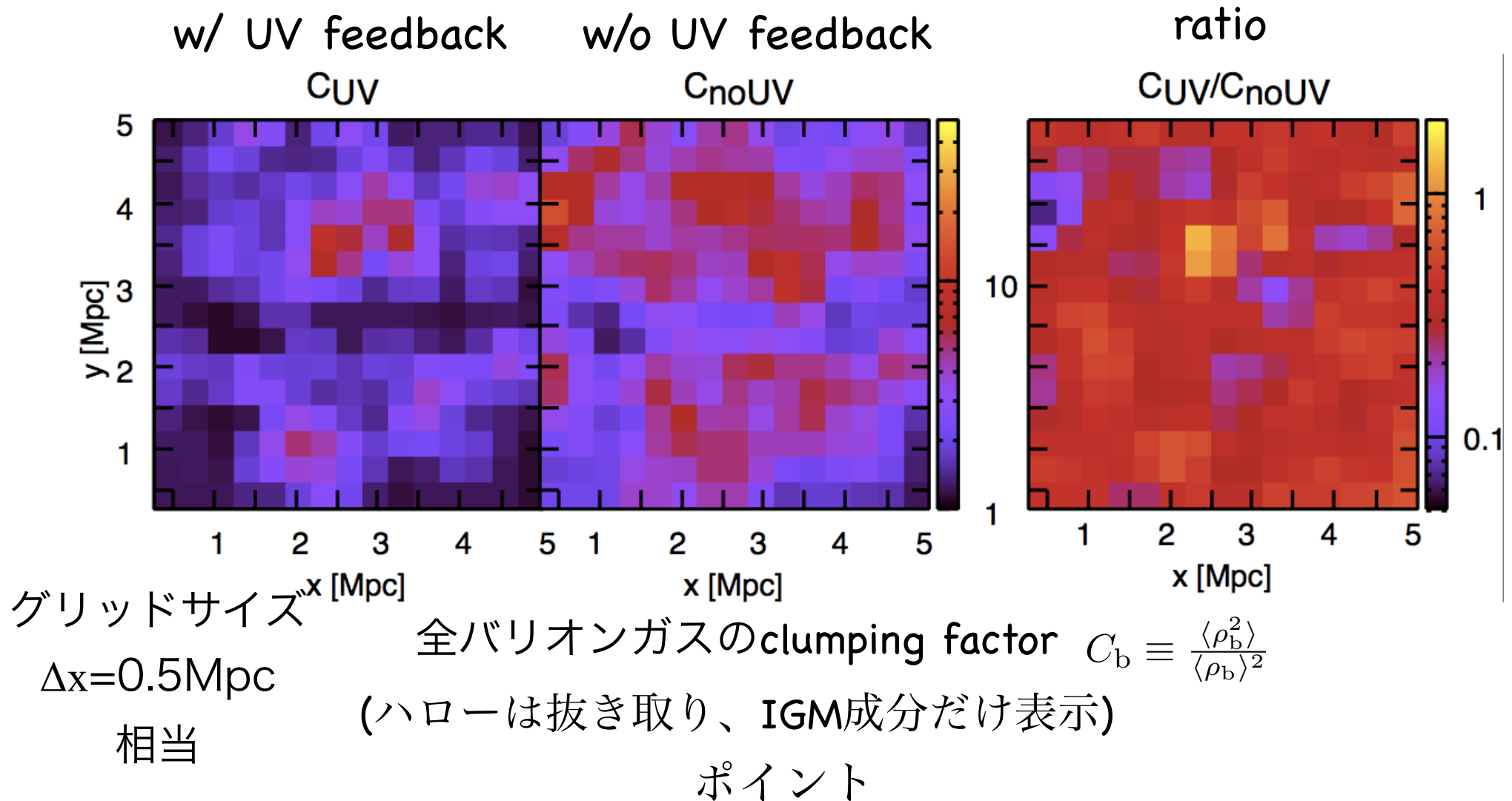
輻射輸送と化学反応・流体力学を矛盾なく解く 輻射流体(Radiation Hydrodynamics: RHD)計算によって、輻射フィードバックが星形成率や銀河間物質のclumping factorに与える影響を定量的に示した。



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、大領域ポスト处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

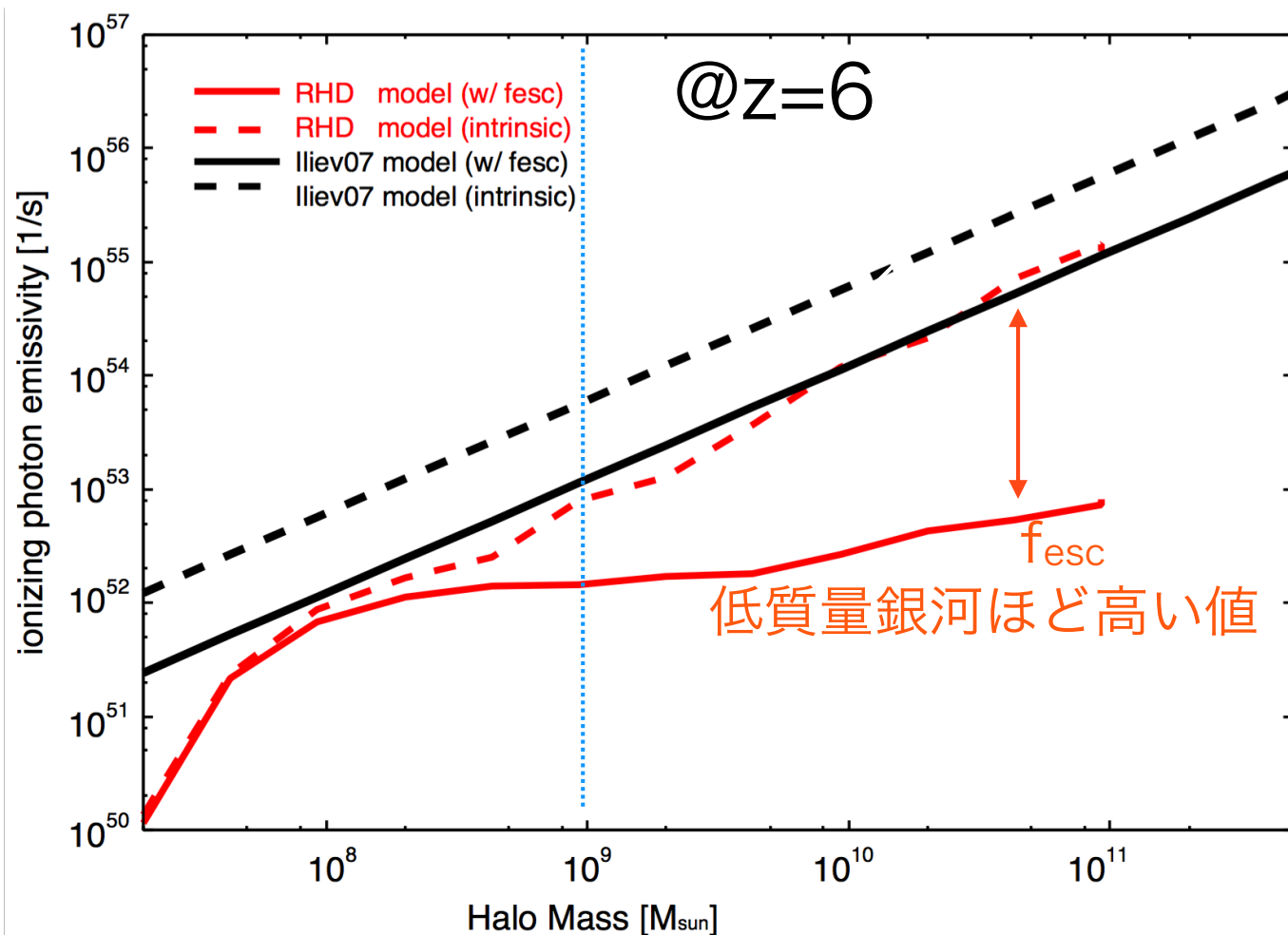
今回の内容：コードの試運転を兼ねて先行研究でのモデルと比較

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_{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_{esc} (質量依存)

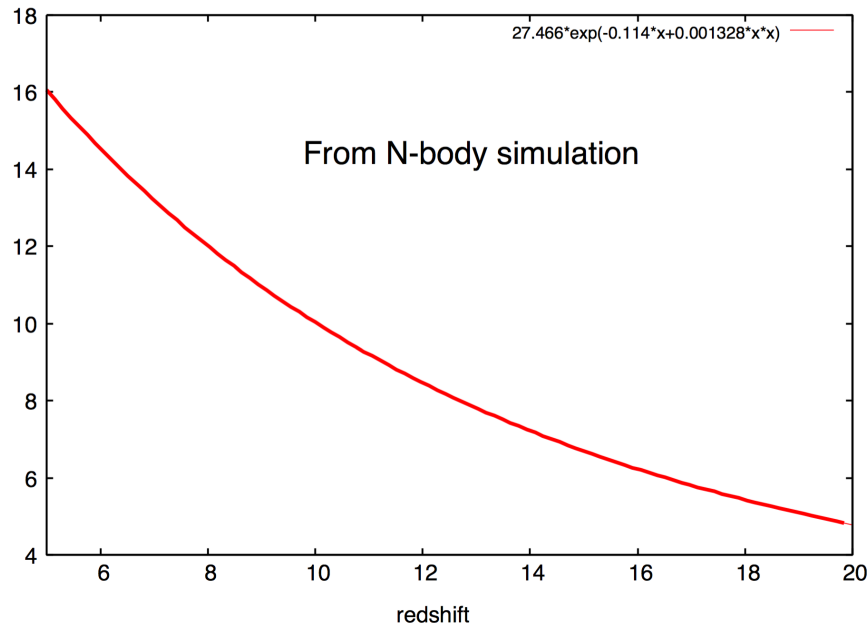
周囲の電離度と質量に応じて変化 # SEDの形はRHD modelを採用



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 $10^9 M_{\text{sun}}$ 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

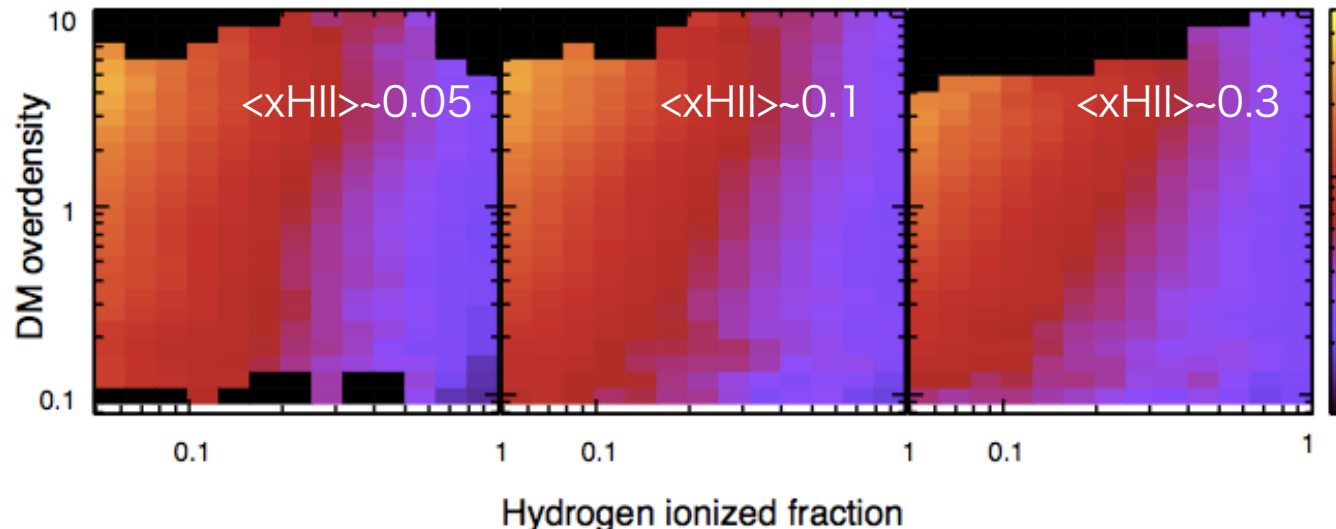


Iliev07 model:宇宙論的N体計算から
導出. $z=6$ で $C \sim 14$, $z=15$ で $C \sim 5$.

feedback効果(光加熱による
smoothing)や場所依存性は考慮しな
い

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

$$1 + \delta$$

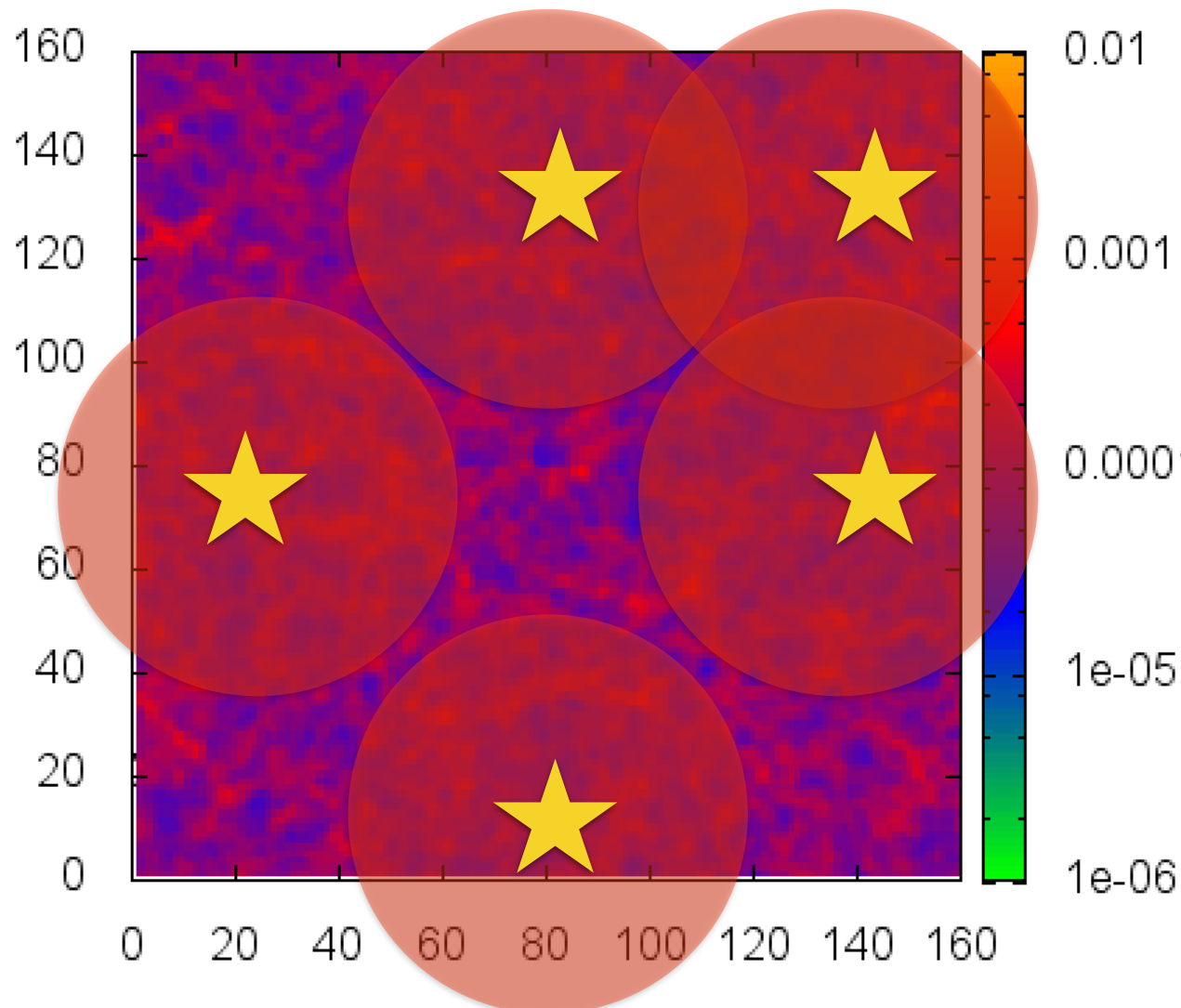


高密度かつ低電離度の場所ほど高いClumping factor

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

$N=4096^3$

$L=110/h$ Mpc ~ 160 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)

$1e-05$ 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)

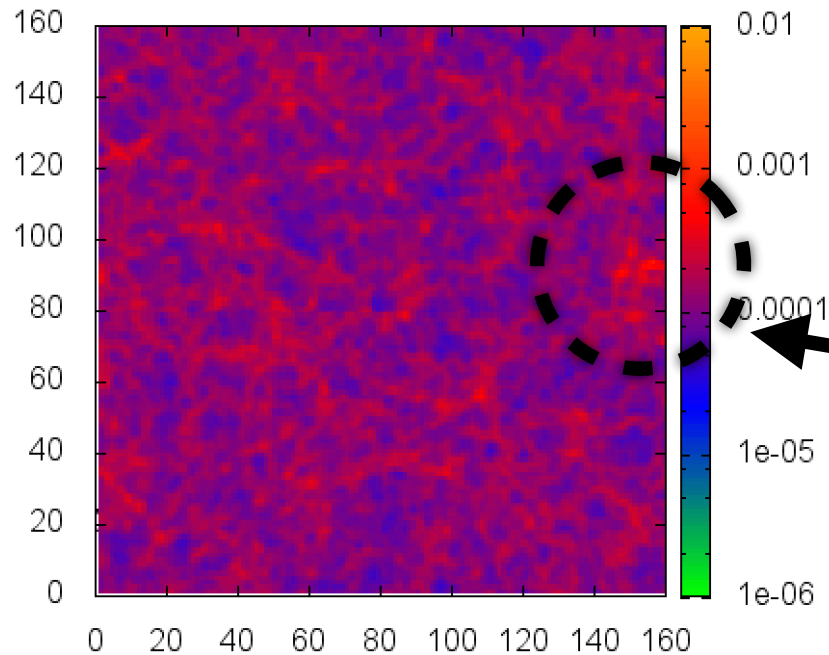
シミュレーション手順

- 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(Δt_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: $\Sigma \text{SED}(M_{\text{halo}}, \underline{x_{\text{HII}}}) \times N(M_{\text{halo}})$
- iv) 輻射輸送を解く (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_{gas} (光加熱, cooling諸々, 宇宙膨張)を得る

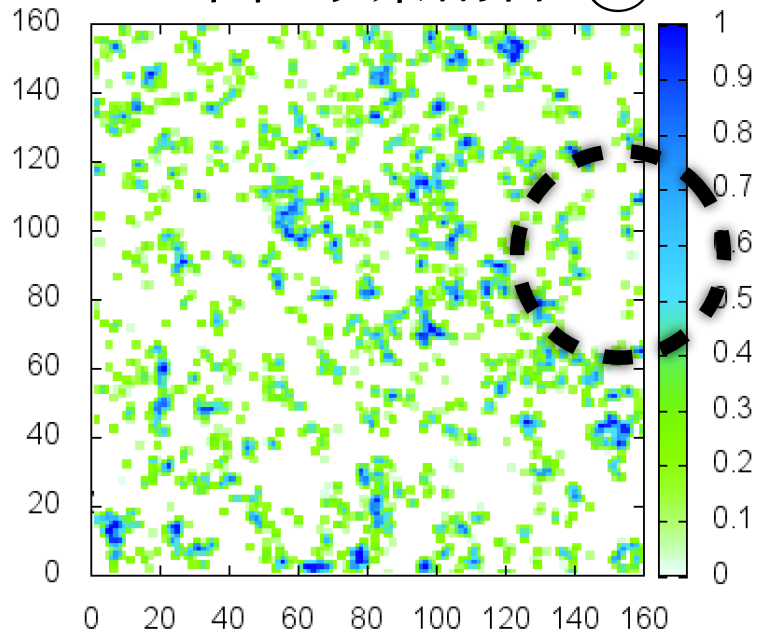
Δt_s の間は(ii)-(v)を繰り返す

Δt_s を超えたら新しいデータを読み込んでまた(ii)-(v)を繰り返す

IGMガス密度[1/cc] @ $z \sim 7$



中性水素割合 @ $z \sim 7$



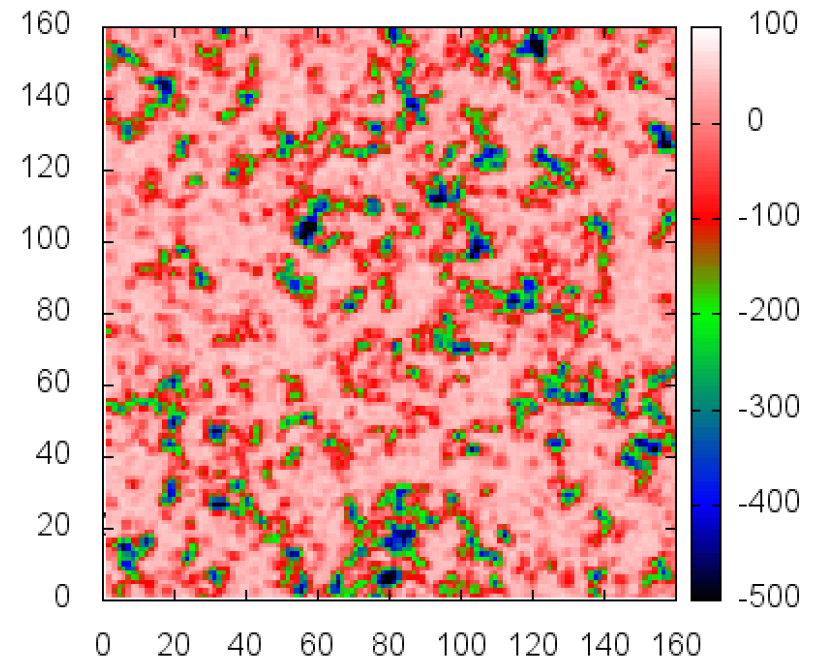
RHD model

$z=20 \rightarrow z=5.5$

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

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)

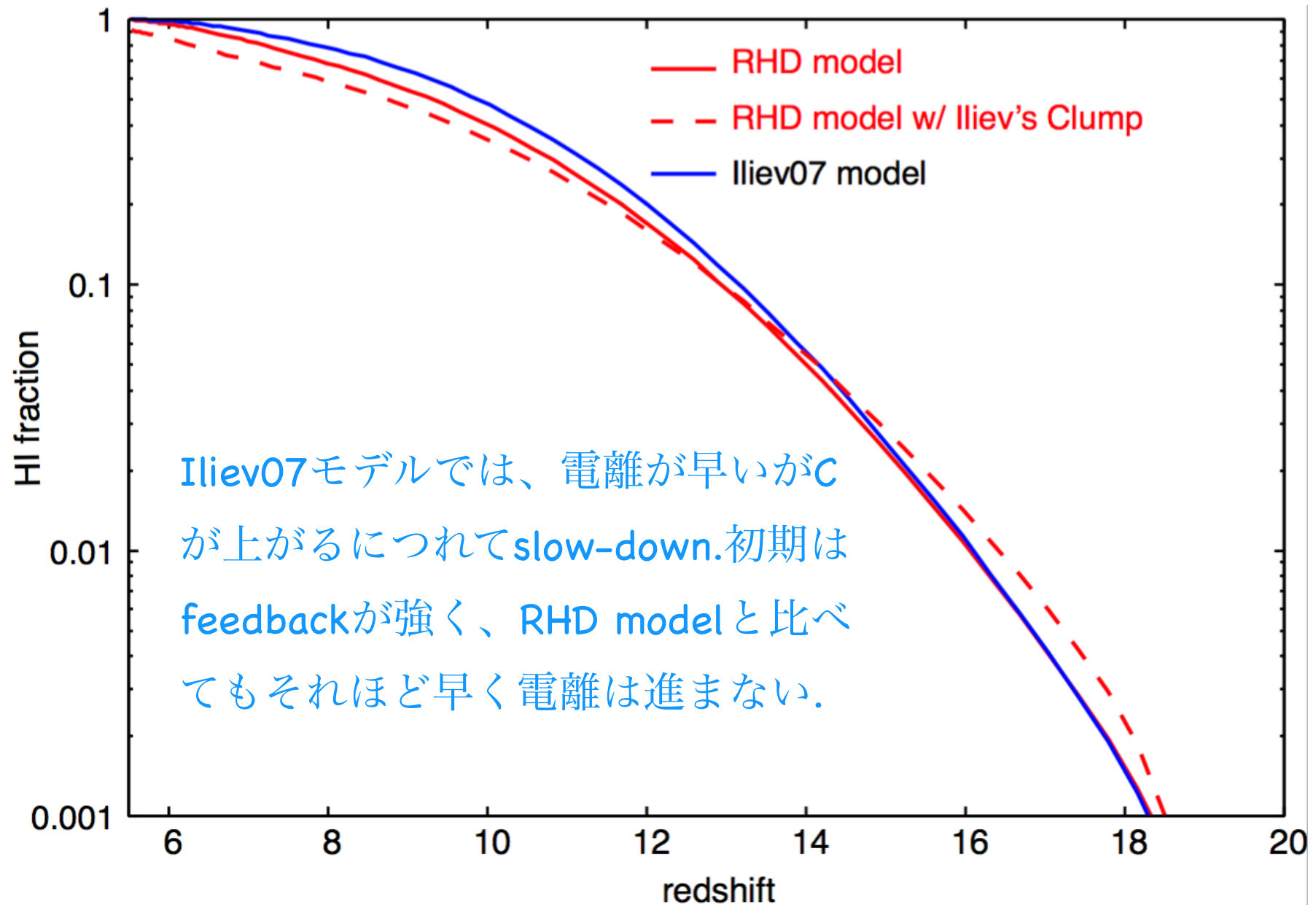
21cm differential brightness
temperature @ $z \sim 15$



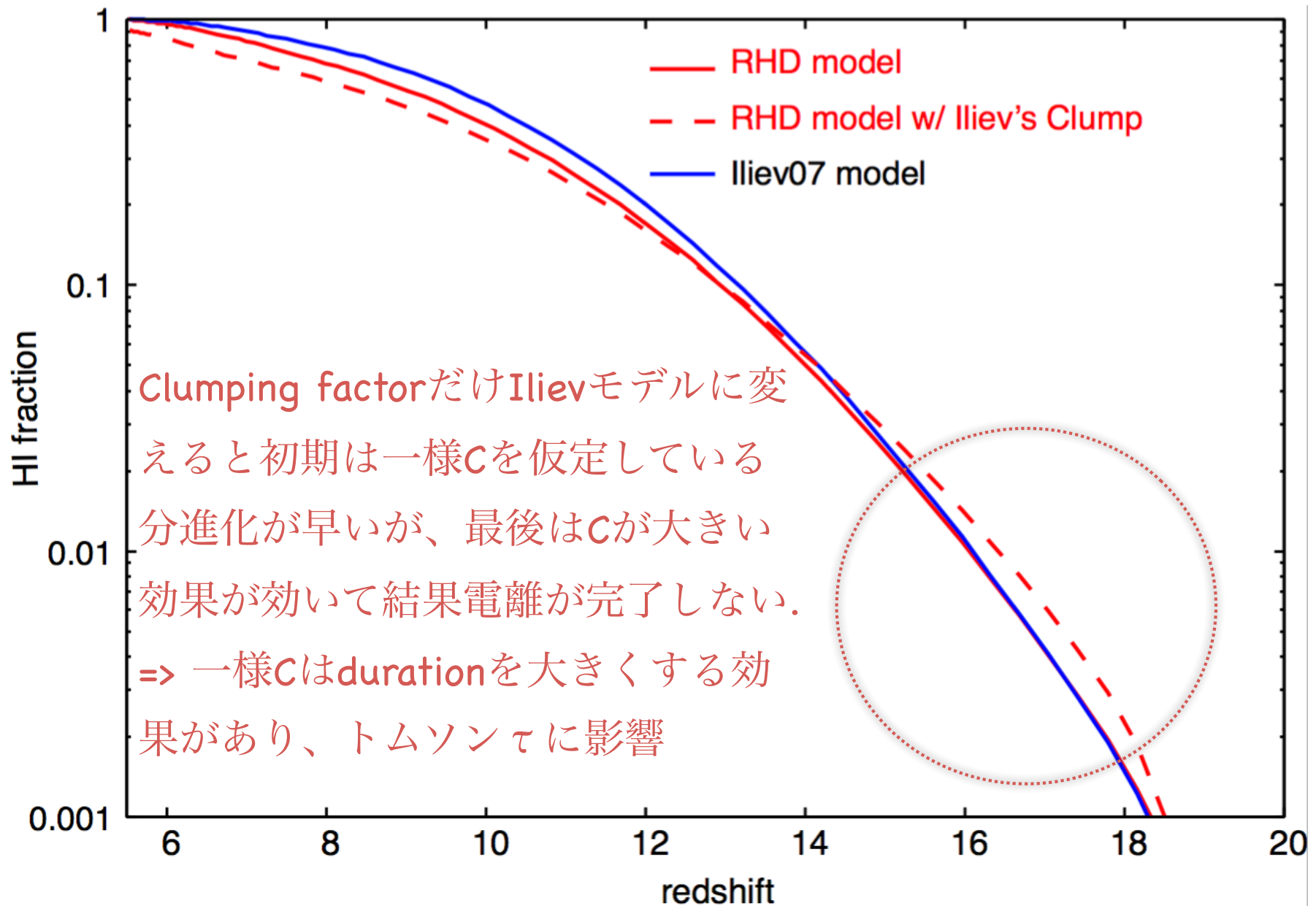
パート 1:

先行研究モデルとの比較

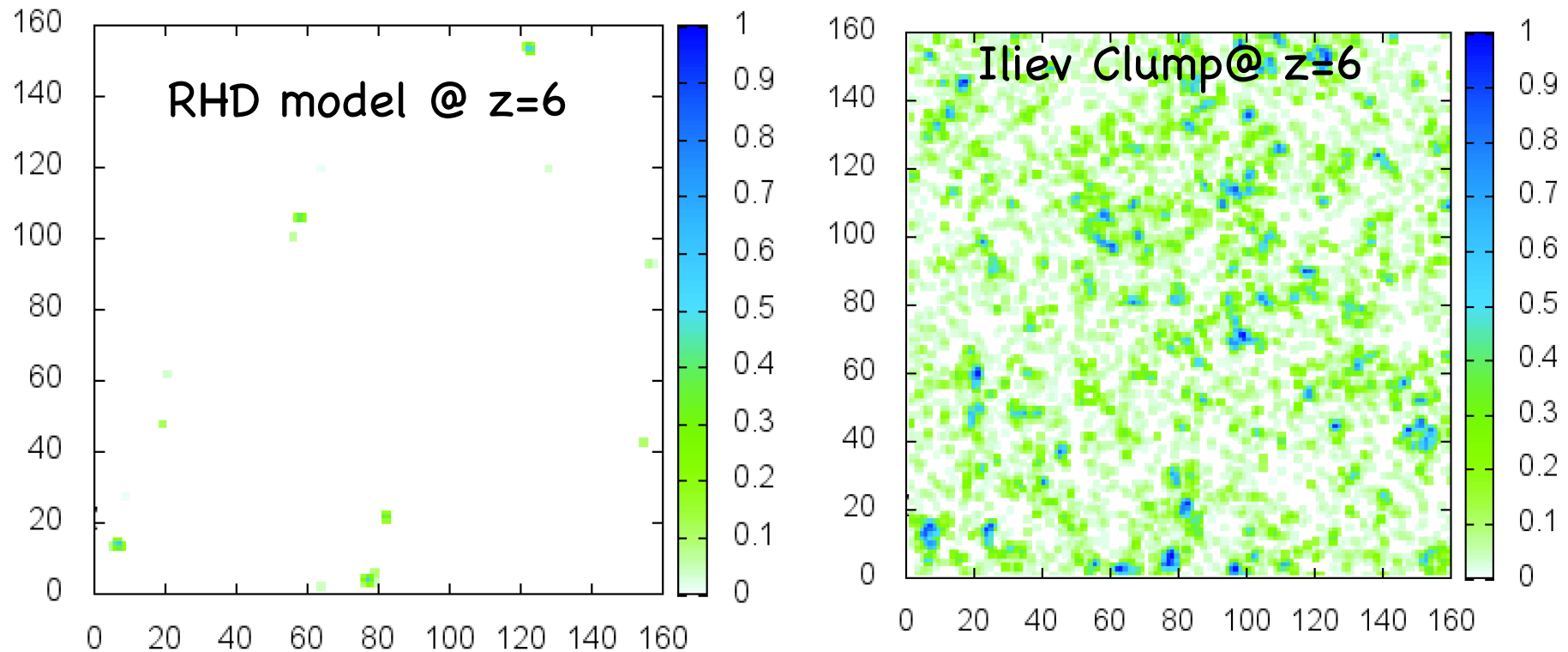
電離史の比較



電離史の比較

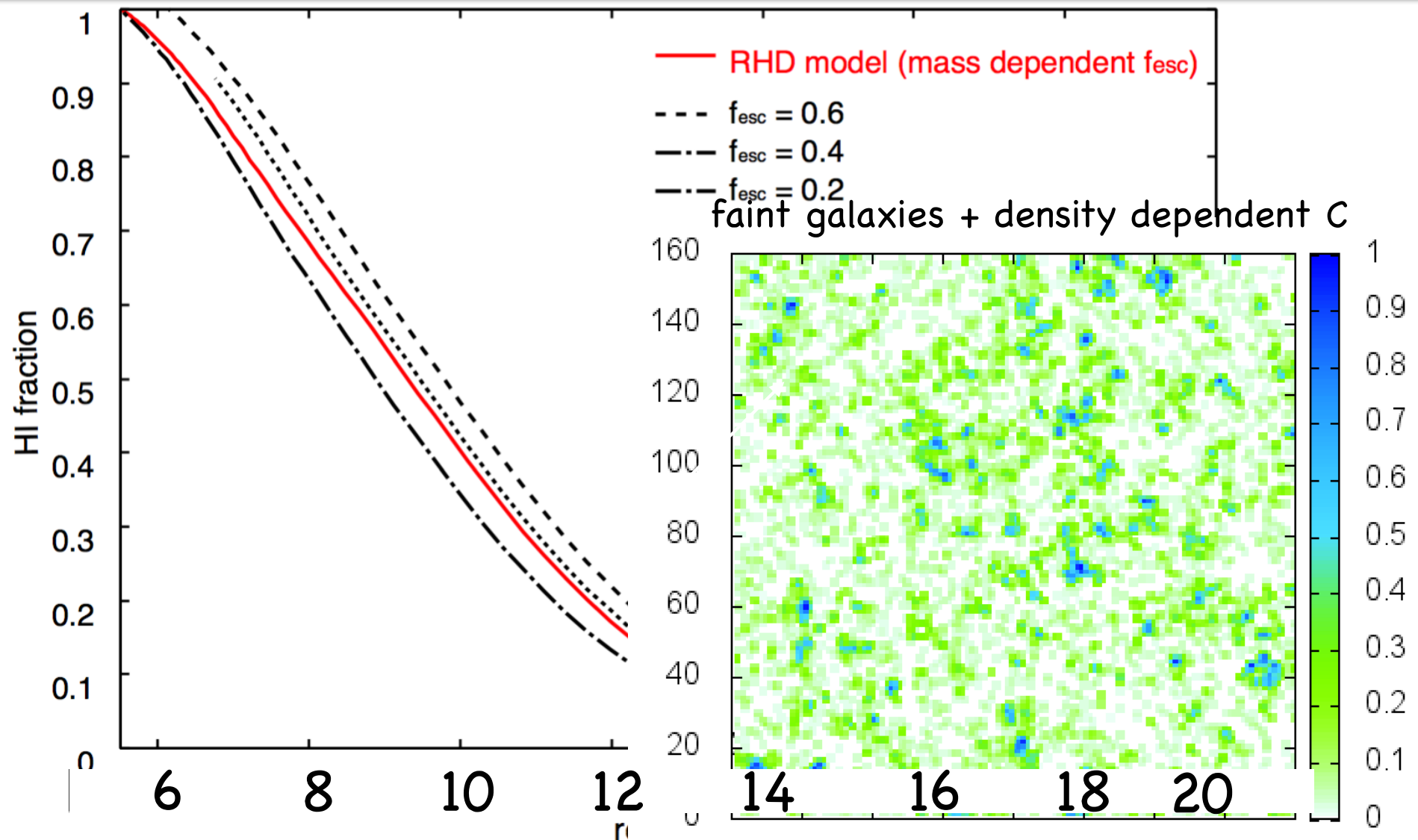


電離史の比較(見た目)



- * $f_{\text{HI}} \sim 0.1$ 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($\text{Ly}\alpha$ 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_{HI} 領域が広がっている? (今後定量的に調査)

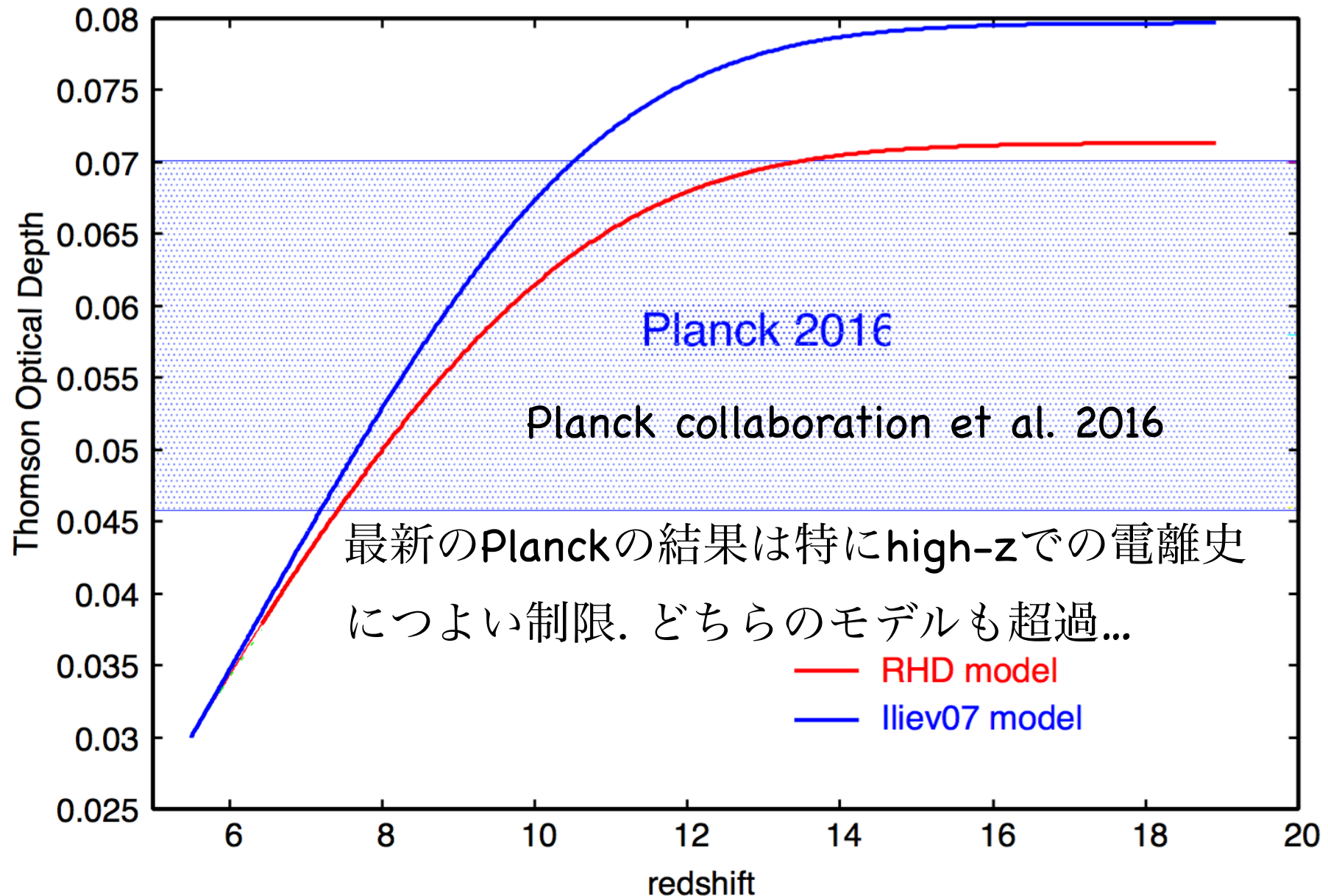
他のモデルとの比較：電離光子脱出割合



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

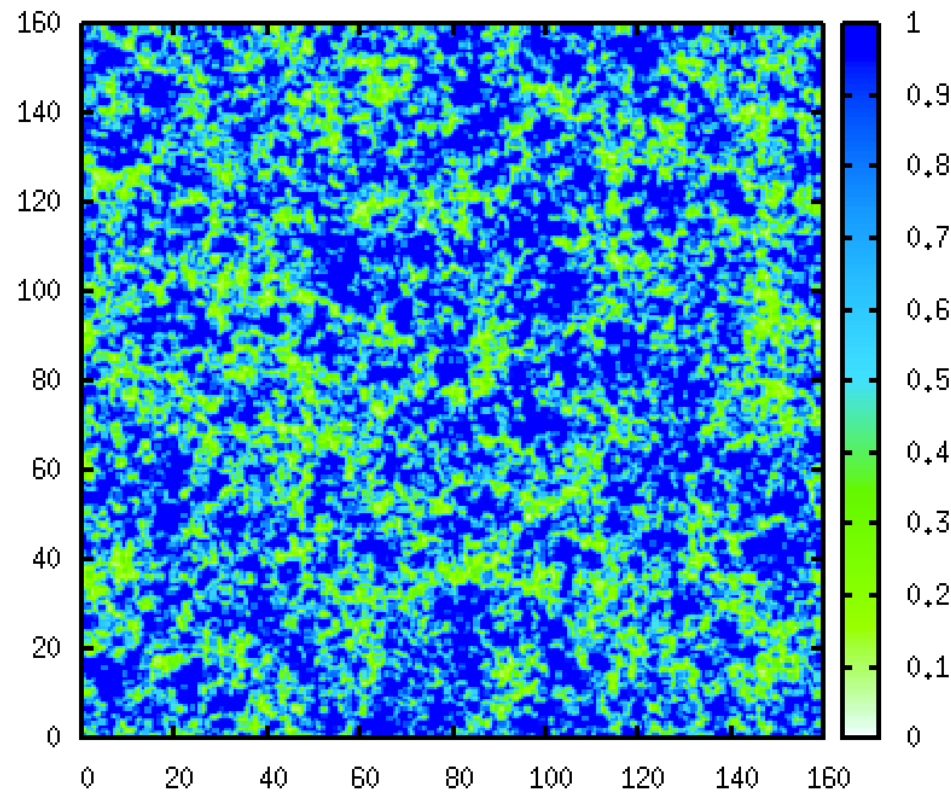


光学的厚みが大きすぎる？

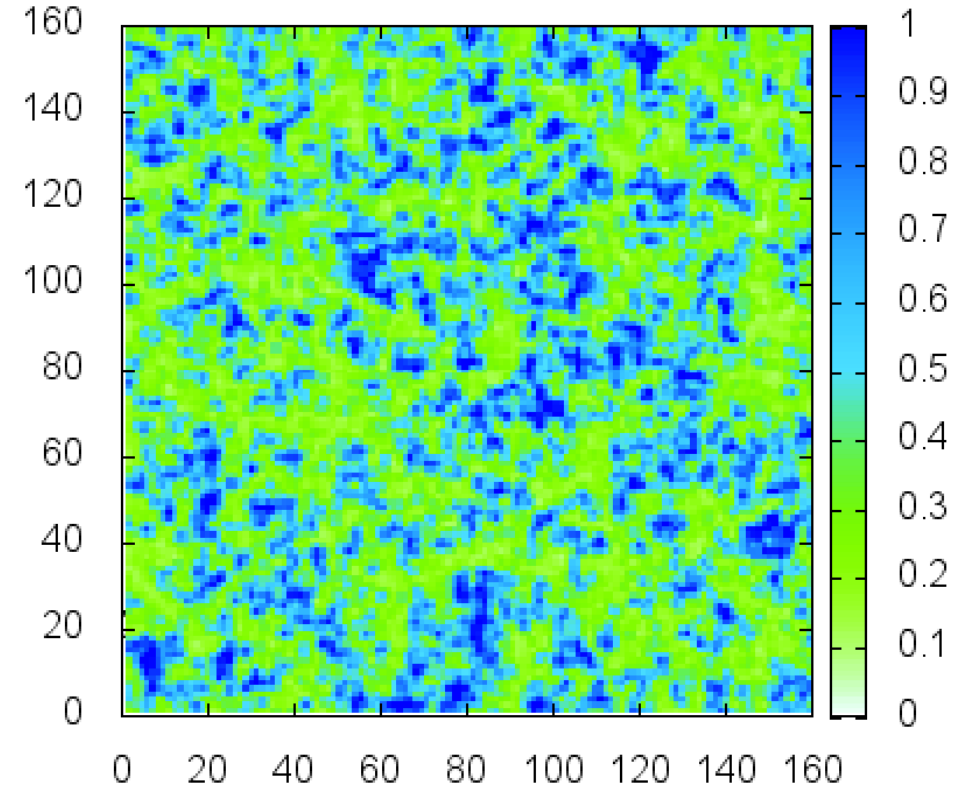
高分解能

@z~8

今回の計算



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



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

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 τ 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、**Planck**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 τ の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てします.)
- ◆ 綺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