
A New Simulation of 21-cm Signal in the Epoch of the First Stars: The model of escape fraction

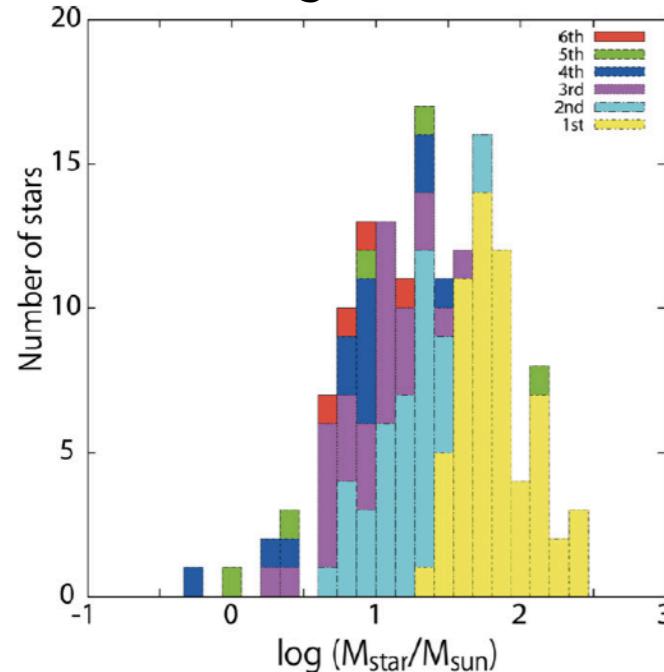
名古屋大学C研 田中 俊行

共同研究者: 長谷川賢二 (名古屋大学)

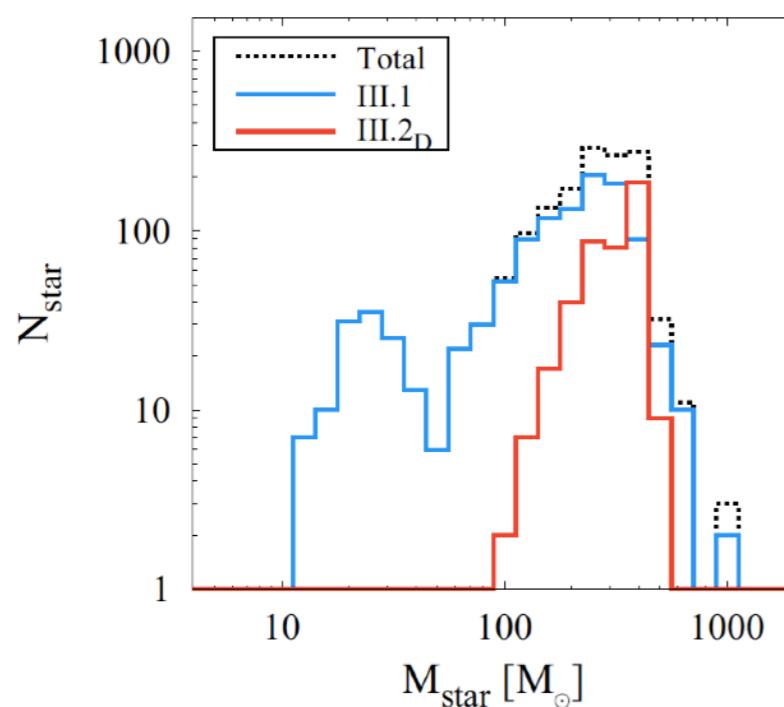
Introduction

初代星の星質量関数には不定性がある

Susa, Hasegawa+2014



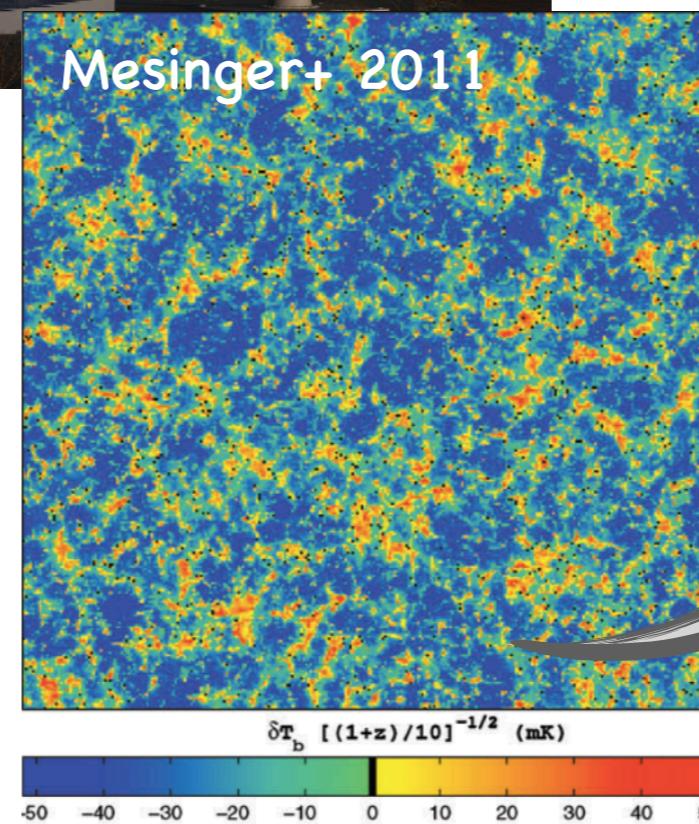
Hirano+ 2015



SKAによる空間分解21-cm線観測の見込み



星質量関数に関する情報を取り出せないか？



Information
on the IMF

21cmFAST

Mesinger+ 2011

21-cm線の空間分布を計算できる準数値的計算コード

問題点：初代星質量依存性を持つパラメータが定数として扱われている。

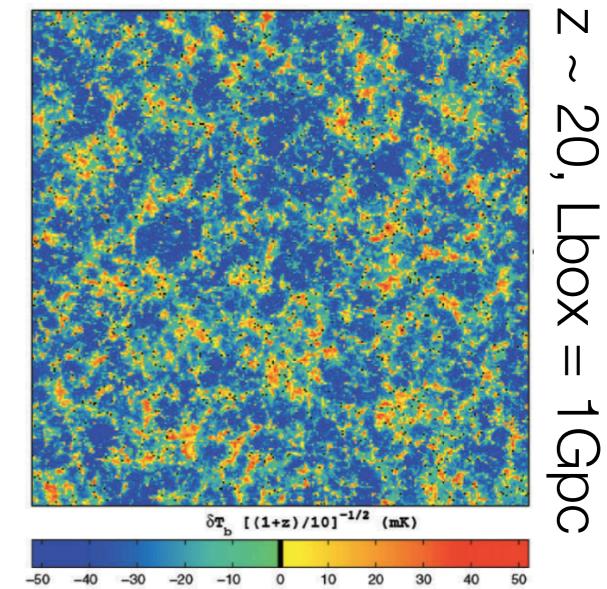
- 21cmFASTでは、
電離の判定にイオン化効率という定数を用いている：

$$f_{\text{coll}}(x, z, R) \geq \zeta^{-1}$$

f_{coll} ：半径Rの球内の全質量に対する崩壊した割合

- しかし本来、このイオン化効率は電離光子脱出率に比例する。
また、電離光子脱出率は初代星質量に依存するはず。

$$\zeta \propto f_{\text{esc}}(M_{\text{star}})$$



本研究では、電離光子脱出率の初代星質量依存性に着目して
初代星質量関数の依存性込みの21-cm線空間分布を計算する。

Modeling method for fesc

- 個々のmini-haloに対する電離光子脱出率

$$f_{\text{esc}}(M_{\text{star}}, M_{\text{halo}})$$

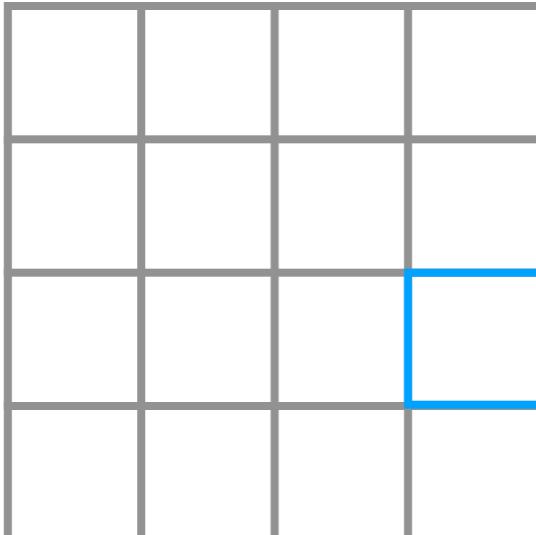
1



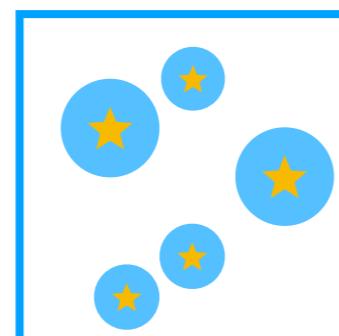
mini-halo

- 個々の計算グリッド内mini-haloesの平均の電離光子脱出率

simulation grids



a grid



モデル化したいのは、
グリッドのHMFで重み付き平均したもの:
 $f_{\text{esc}}(\text{IMF}, \text{local HMF}(\delta))$

2

3

この先、簡単のため、

- 全ての初代星は単一のある星質量 M_{star}
 - 赤方偏移 $z = 20$
- を考える。

3

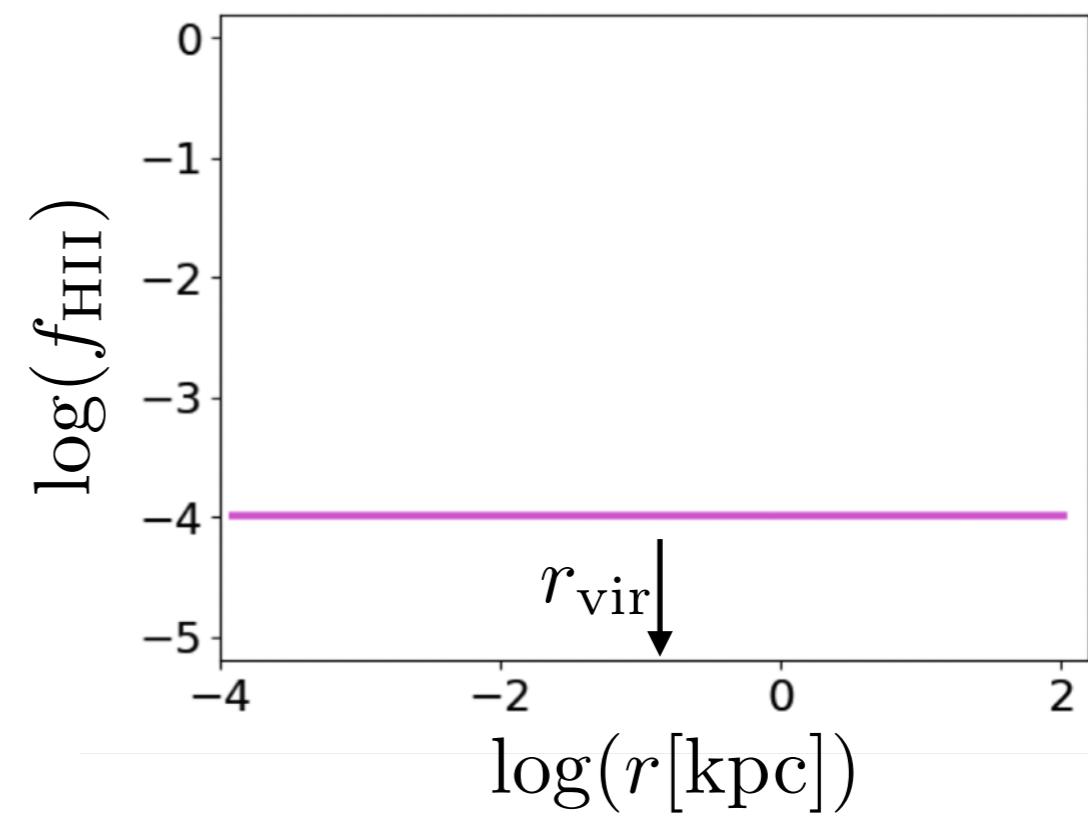
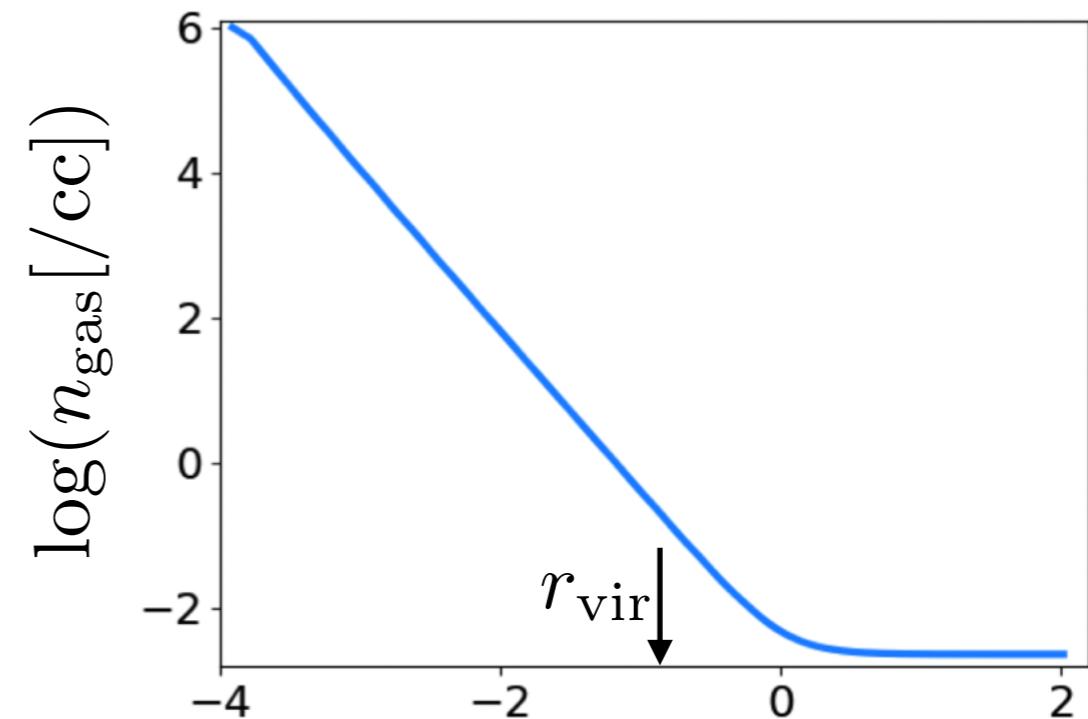
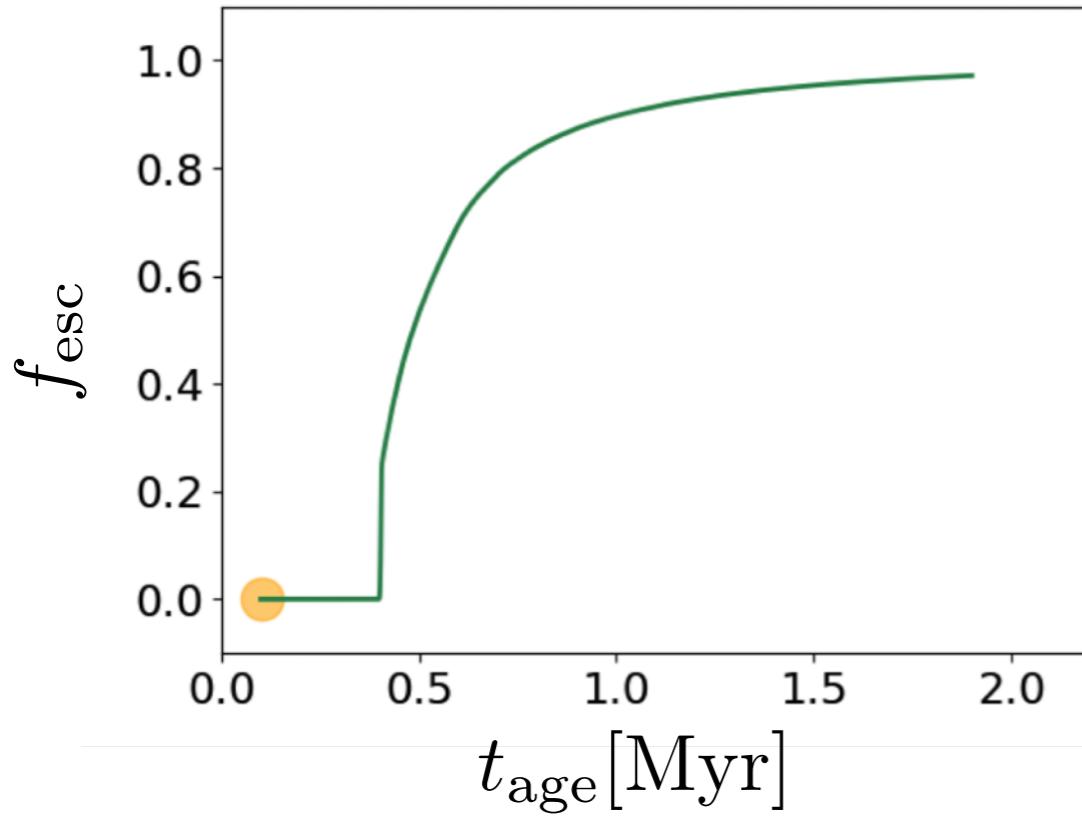
Step1: 個々のmini-haloに対する電離光子脱出率

- 1次元球対称輻射流体計算



$$\rho_{\text{gas}} \propto r^{-2.2}$$

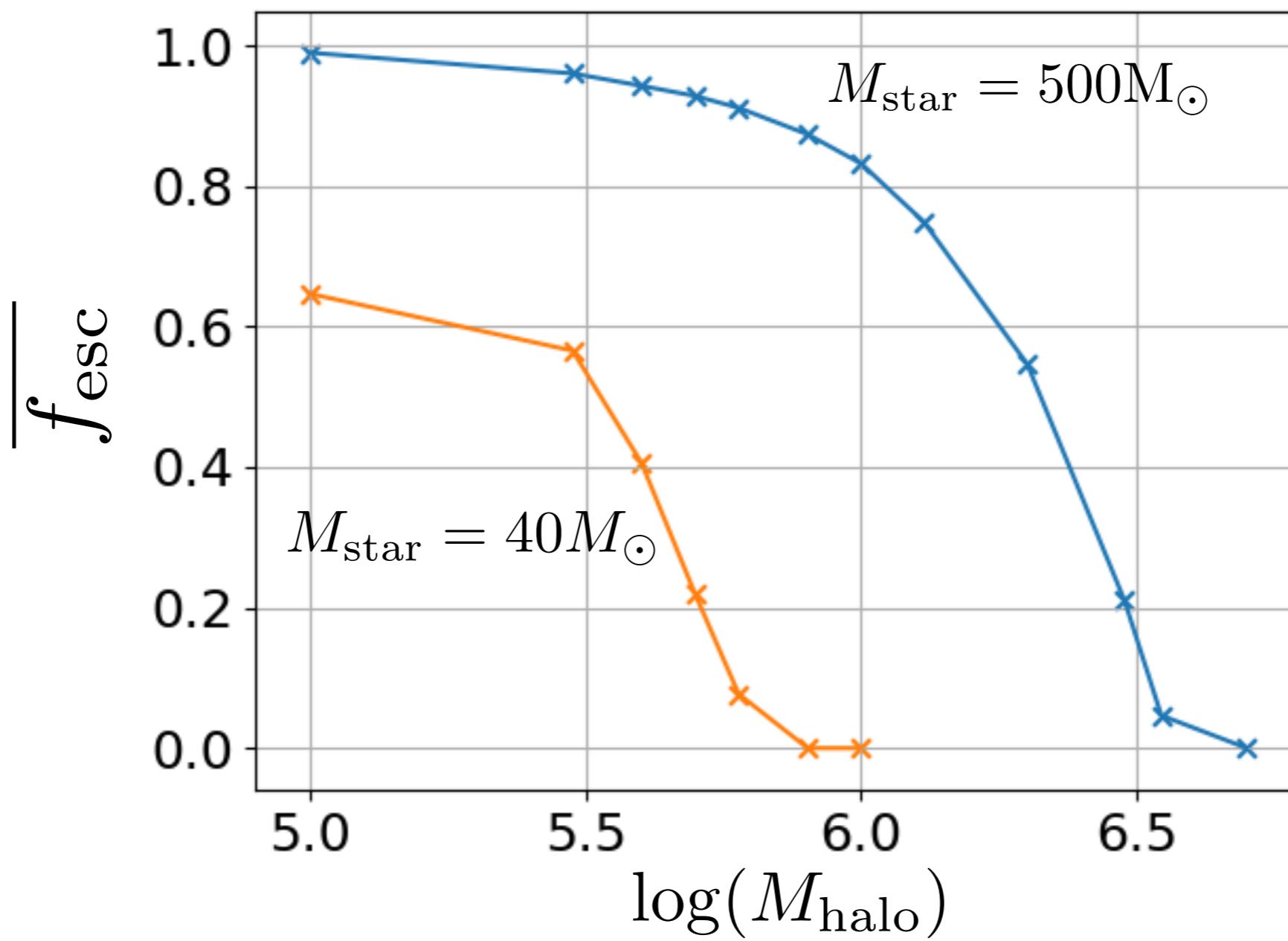
$$f_{\text{esc}} = \frac{\int_{\nu_{\text{HI,L}}}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} e^{-\tau_{\nu}(r_{\text{vir}})} d\nu}{\int_{\nu_{\text{HI,L}}}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} d\nu}$$



Step1: 個々のmini-haloに対する電離光子脱出率

- 時間平均した電離光子脱出率のハロー一質量依存性

$$\overline{f_{\text{esc}}} = \int_0^{t_{\text{life}}} dt f_{\text{esc}}(t) / t_{\text{life}}$$



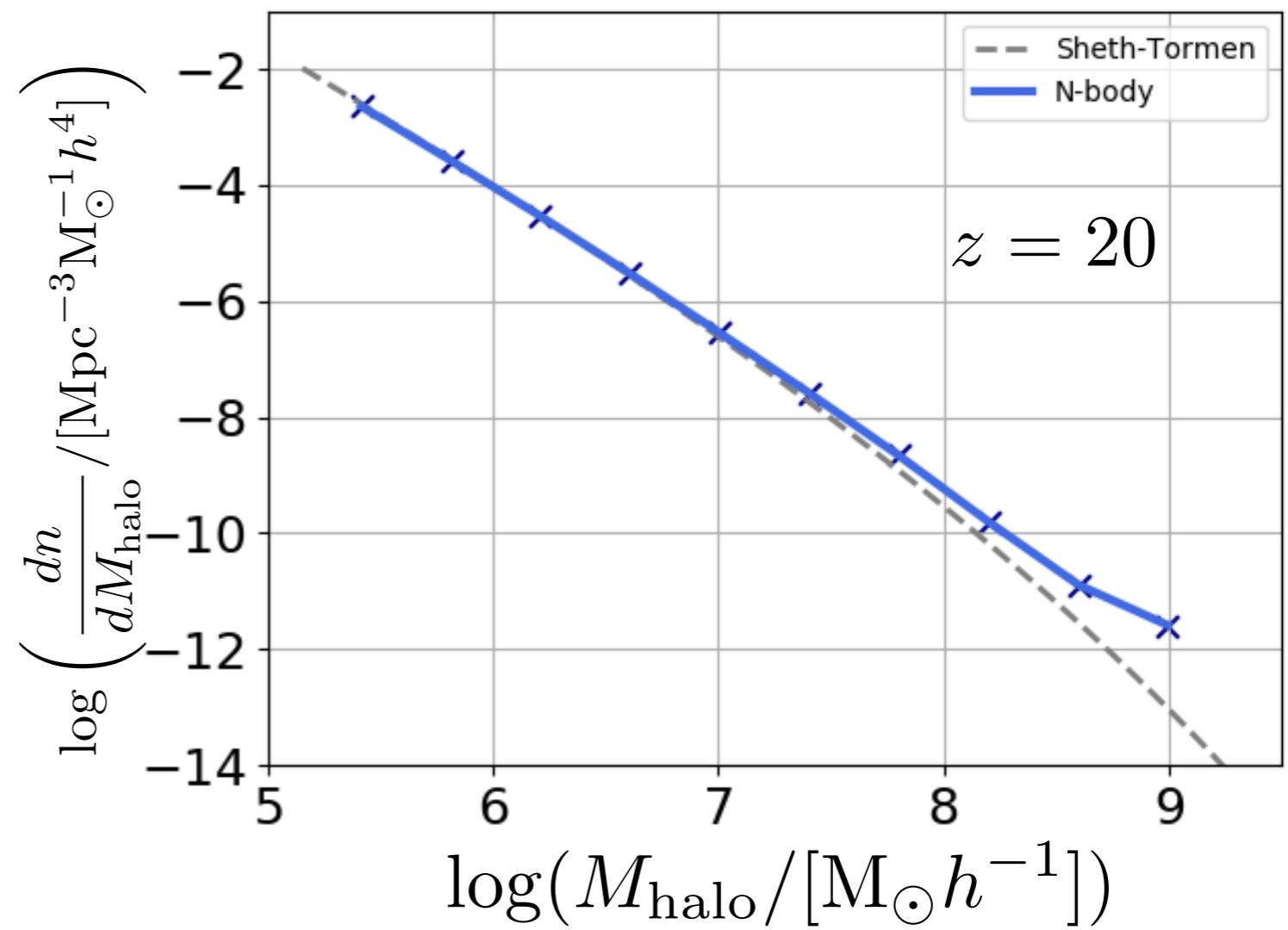
Step2: local halo mass function

- N-body simulation data Ishiyama+ 2016

ボックスサイズ $(16\text{Mpc}/h)^3$

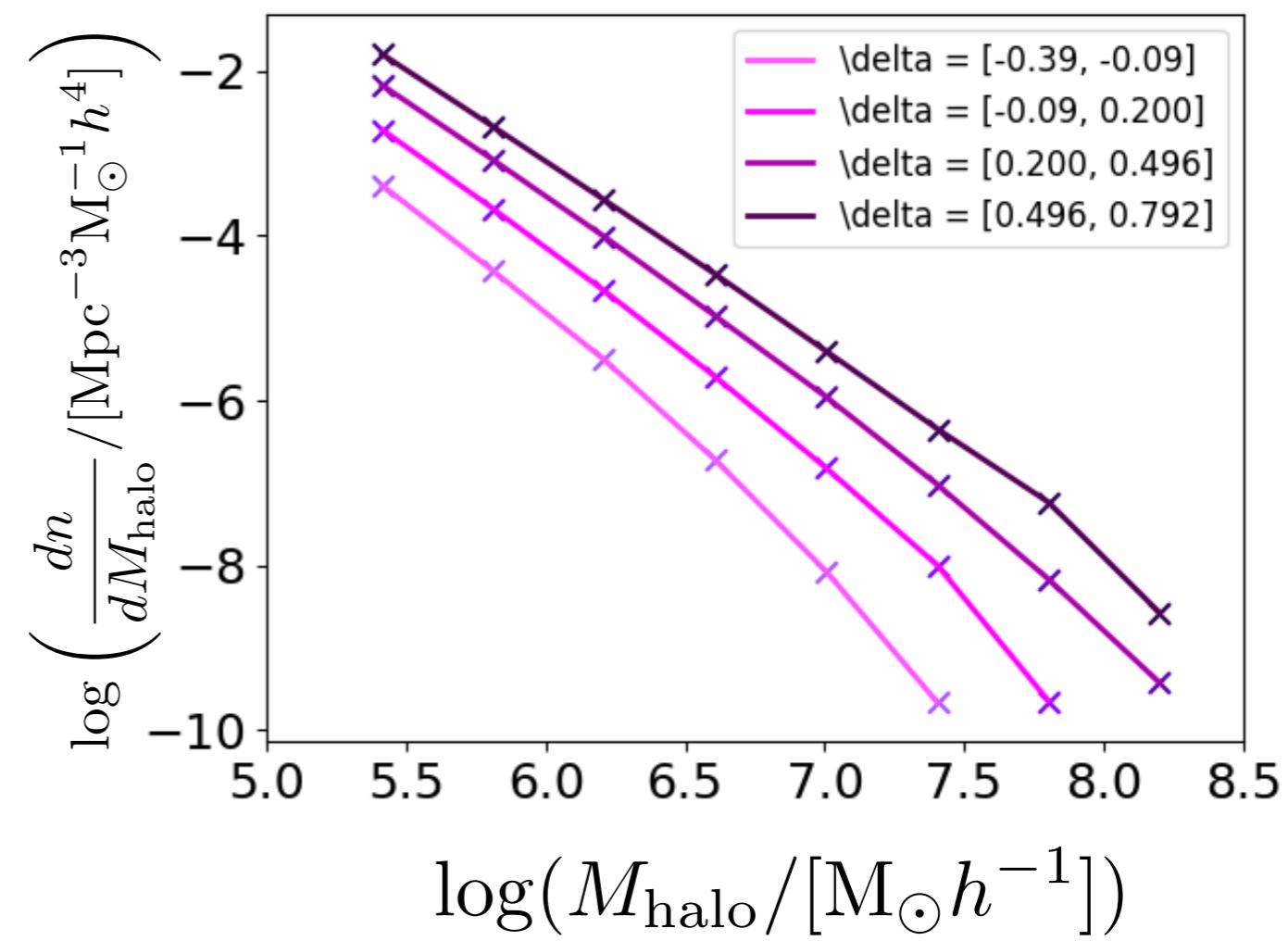
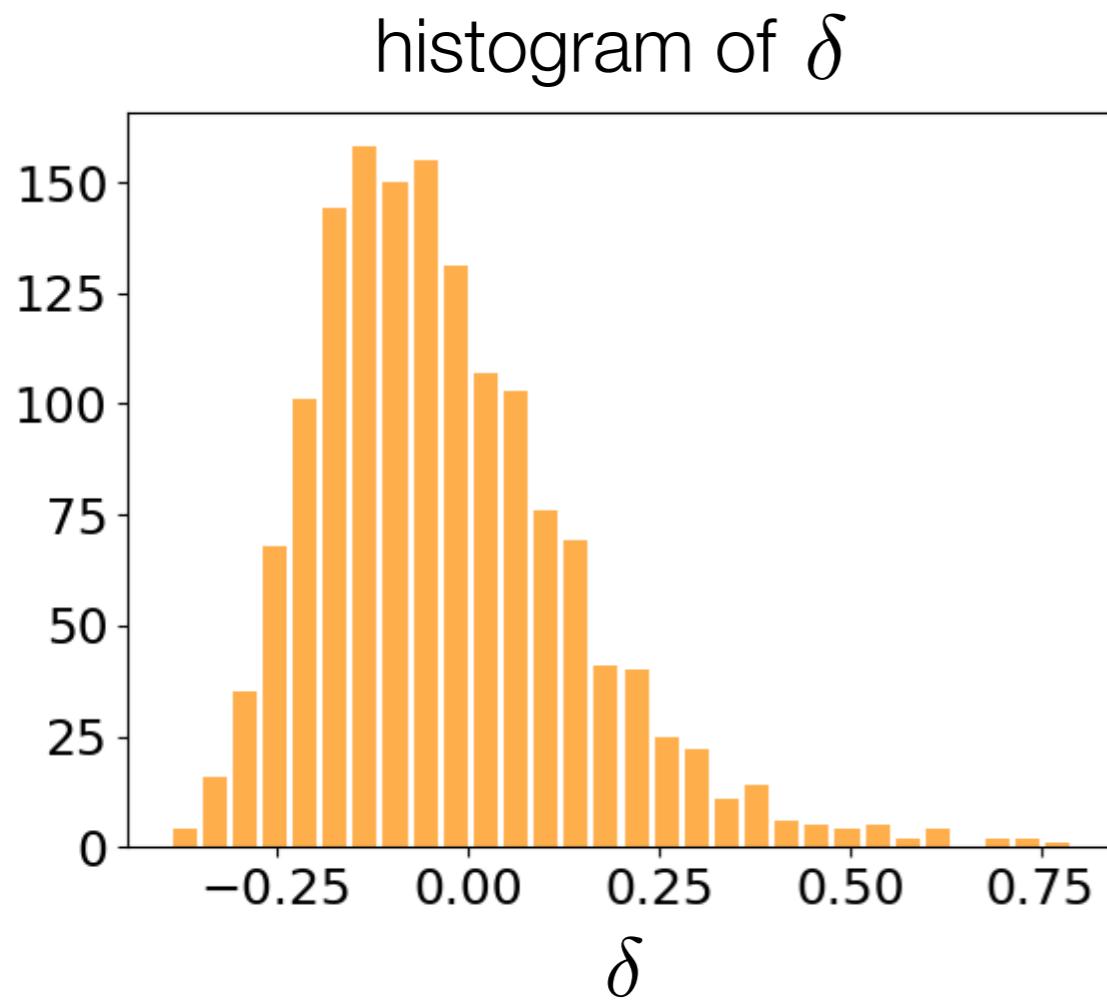
粒子数 = $(4096)^3$

最小ハロ一質量 = $10^{5.21} [\text{Msun}/h]$

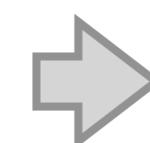
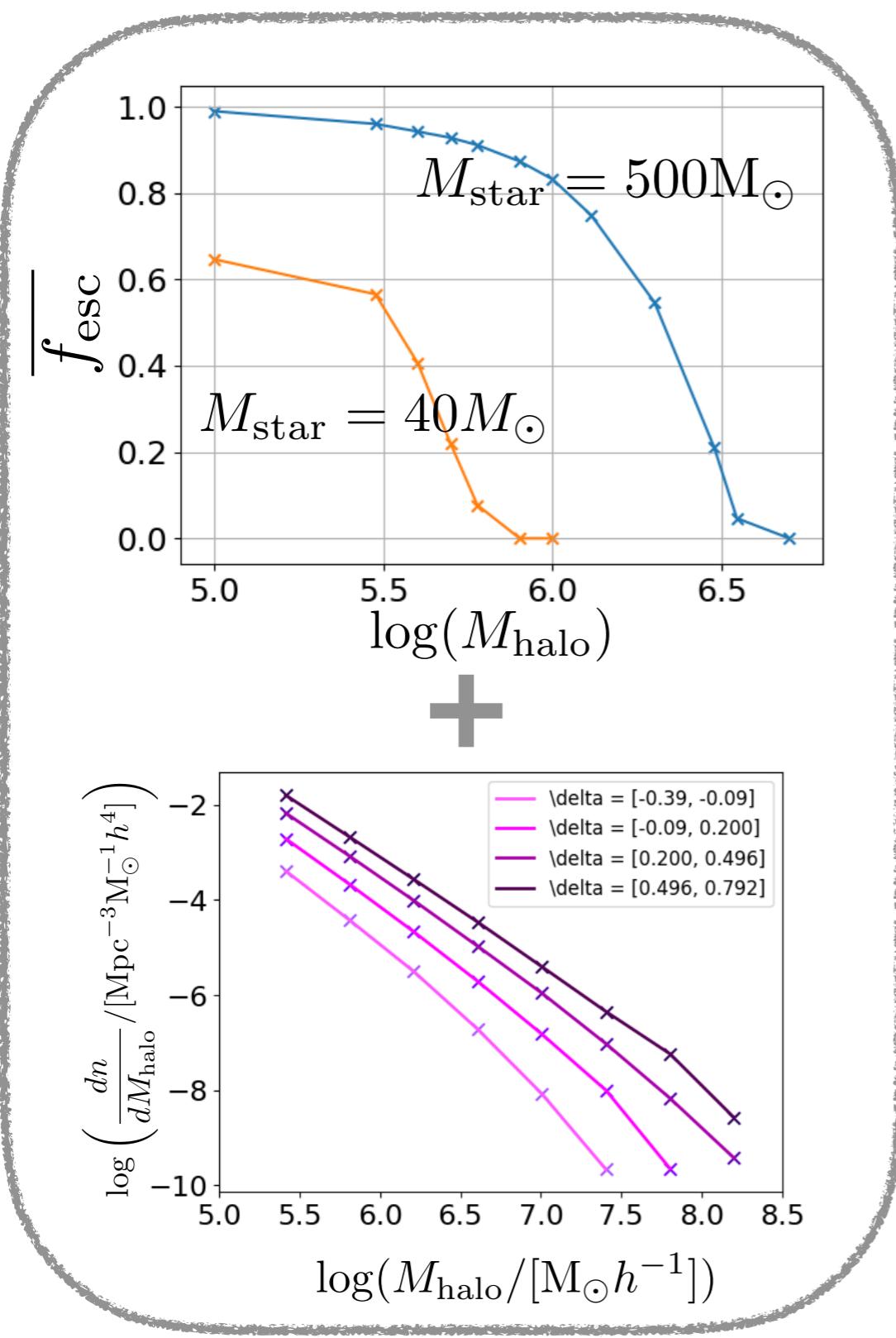


Step2: local halo mass function

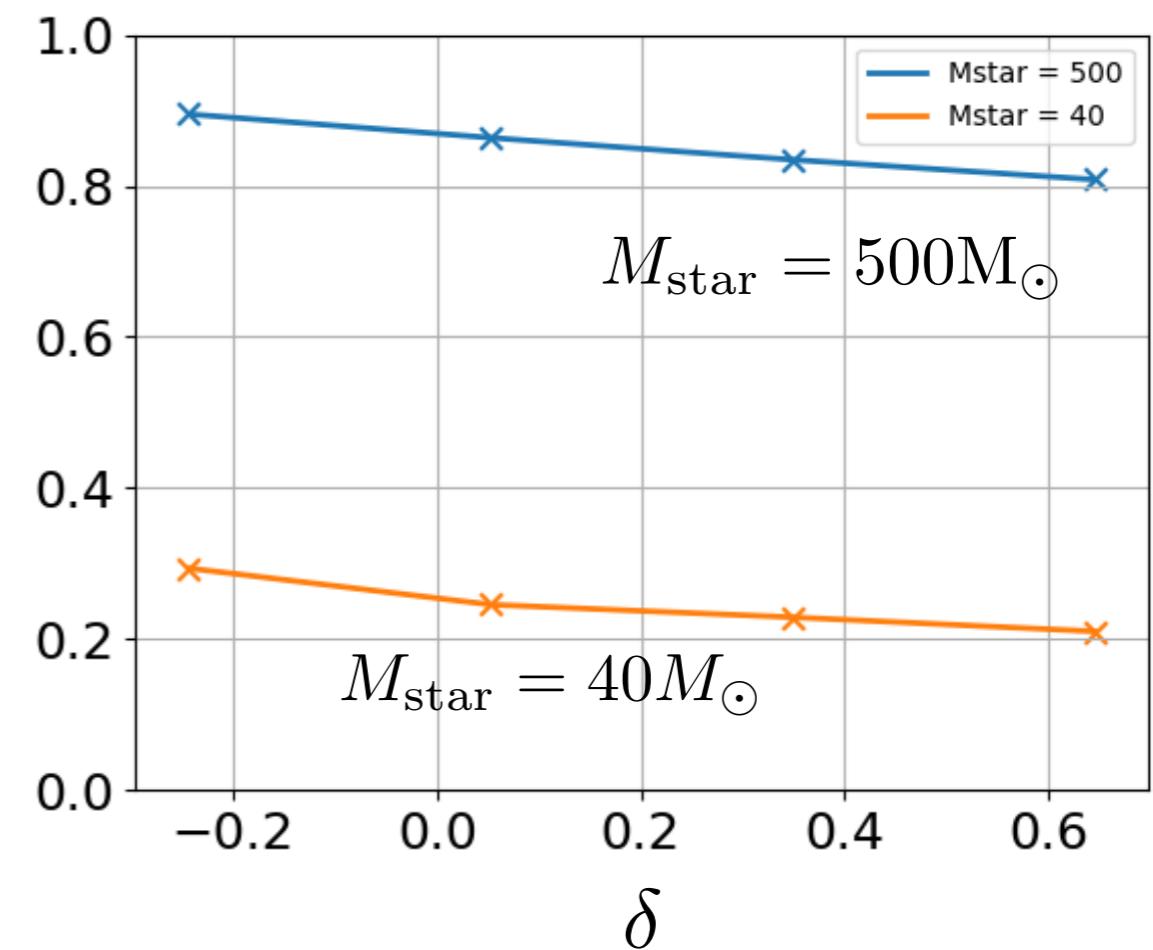
- 計算ボックスを $(1\text{Mpc}/h)^3$ の小領域に分割。
- 各小領域の δ を計算し、4つのビンに分割。
- 各 δ ビンの小領域に存在するハローを用いてHMFを計算。



Step3: local HMFで重み付き平均



$f_{\text{esc}}(M_{\text{star}}, \text{local HMF}(\delta))$



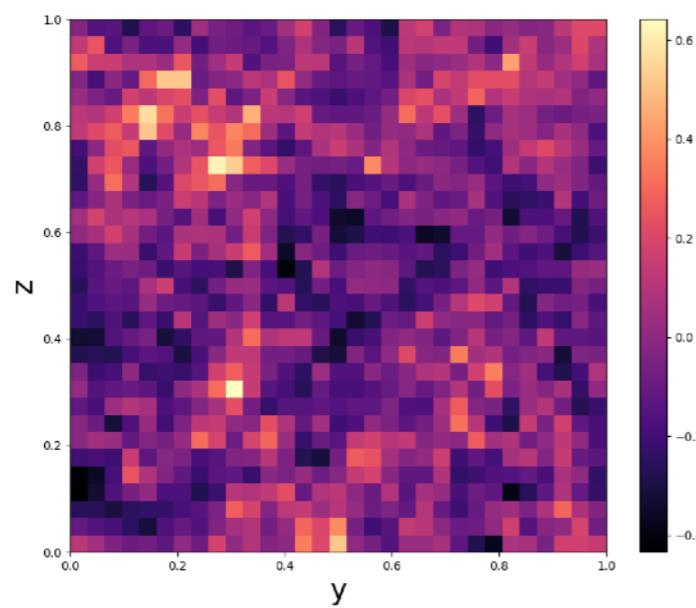
電離度分布のテスト計算

- 各計算グリッドにて電離平衡の仮定のもと、以下の式を解く

$$\frac{df_{\text{HI}}}{dt} = -\frac{\dot{n}_{\text{ion}}(\delta)}{n_{\text{H}}(\delta)} + \alpha_B n_{\text{H}}(\delta) f_{\text{HII}}^2$$

\dot{n}_{ion} : 単位時間、単位体積あたりに放射される電離光子数
 n_{H} : 水素原子の数密度
 f_{HII} : 電離水素割合
 f_{HI} : 中性水素割合
 α_B : 再結合率 (case B)

- 密度分布は公開コードのMUSICを用いる



ボックスサイズ (32 comoving Mpc/h)³
グリッド数 32³
 $z=20$

電離度分布のテスト計算

$$\dot{n}_{\text{ion}} = \dot{\rho}_*(\delta) N_{\text{ion}}(M_{\text{star}}) f_{\text{esc}}(M_{\text{star}}, \delta)$$

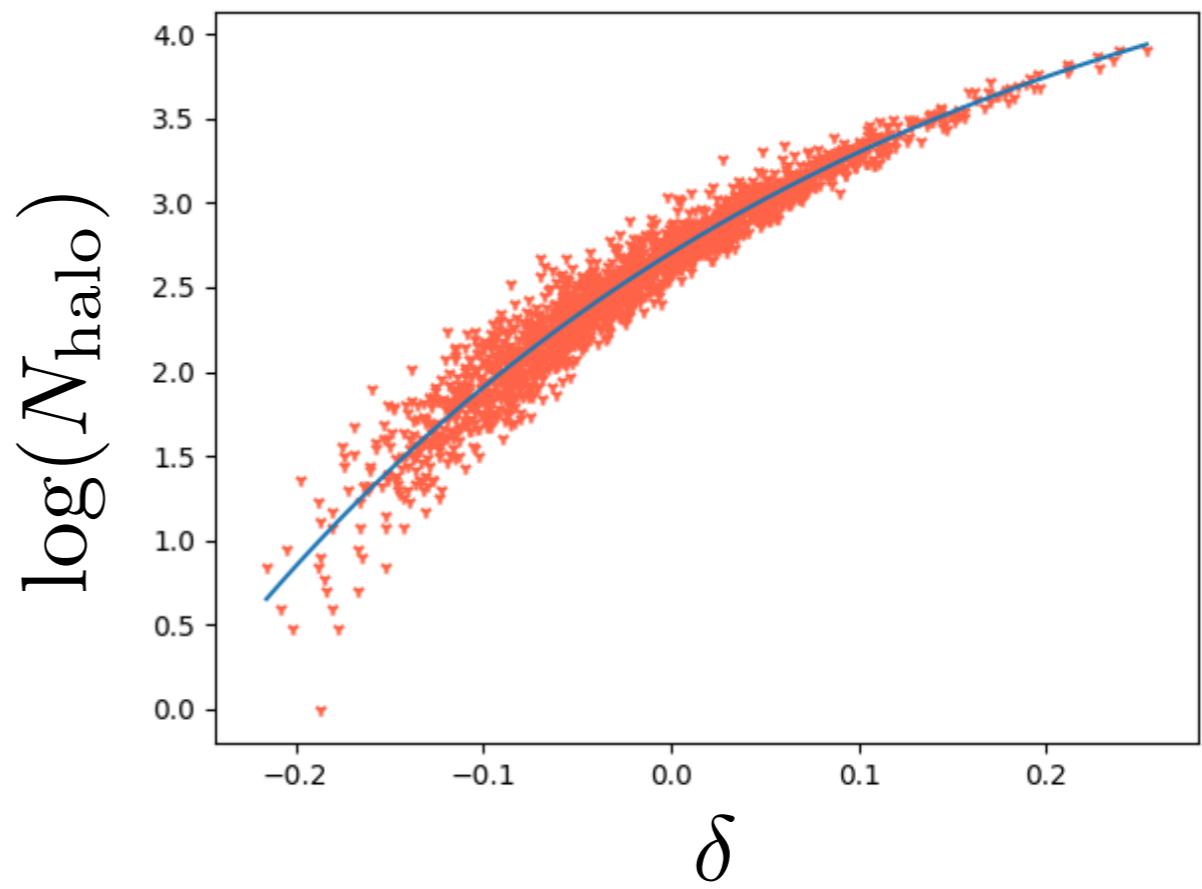
\dot{n}_{ion} : 単位時間、単位体積あたりに放射される電離光子数

$\dot{\rho}_*$: 星形成率密度

N_{ion} : 単位星質量あたり生成される電離光子数 (Schaerer 2002)

- 星形成率密度はハローの数に比例すると仮定

$$\dot{\rho}_*(\delta) \propto N_{\text{halo}}(\delta)$$

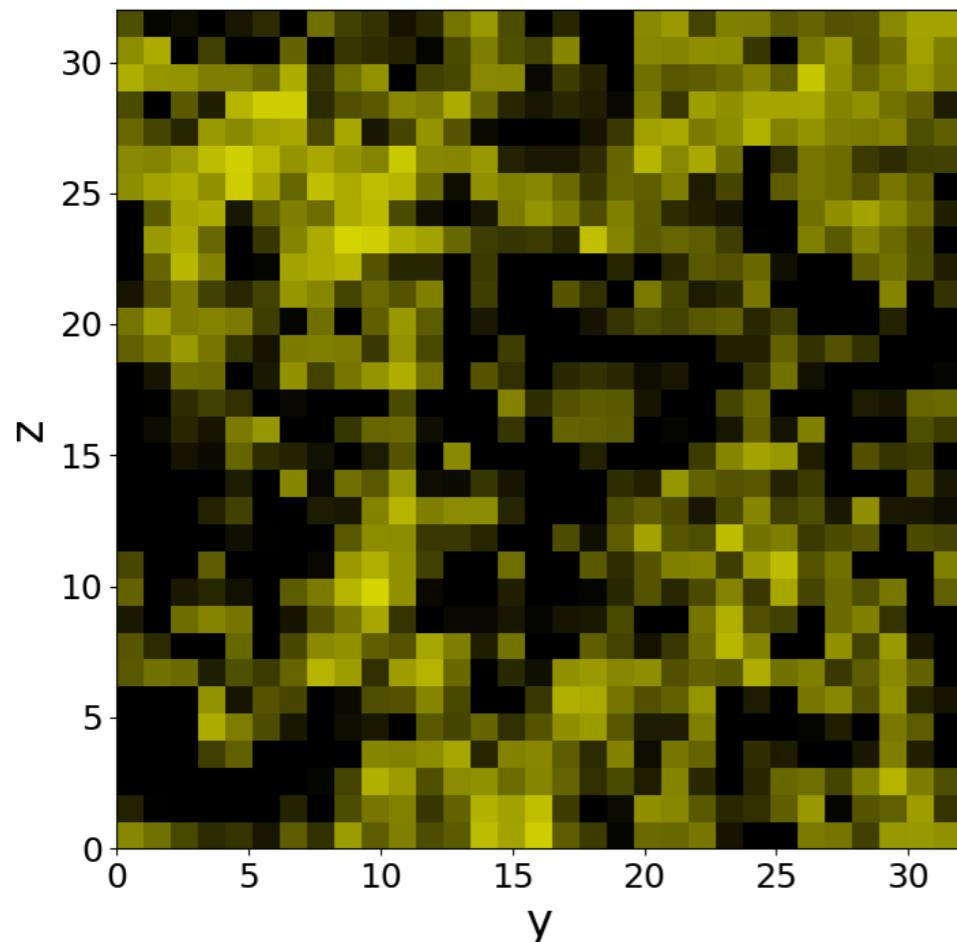


電離度空間分布: 一様fescと\delta依存fescの比較

Box全体で電離に効く電離光子数($\sum_i \dot{n}_{\text{ion}}(x_i)$)を固定。

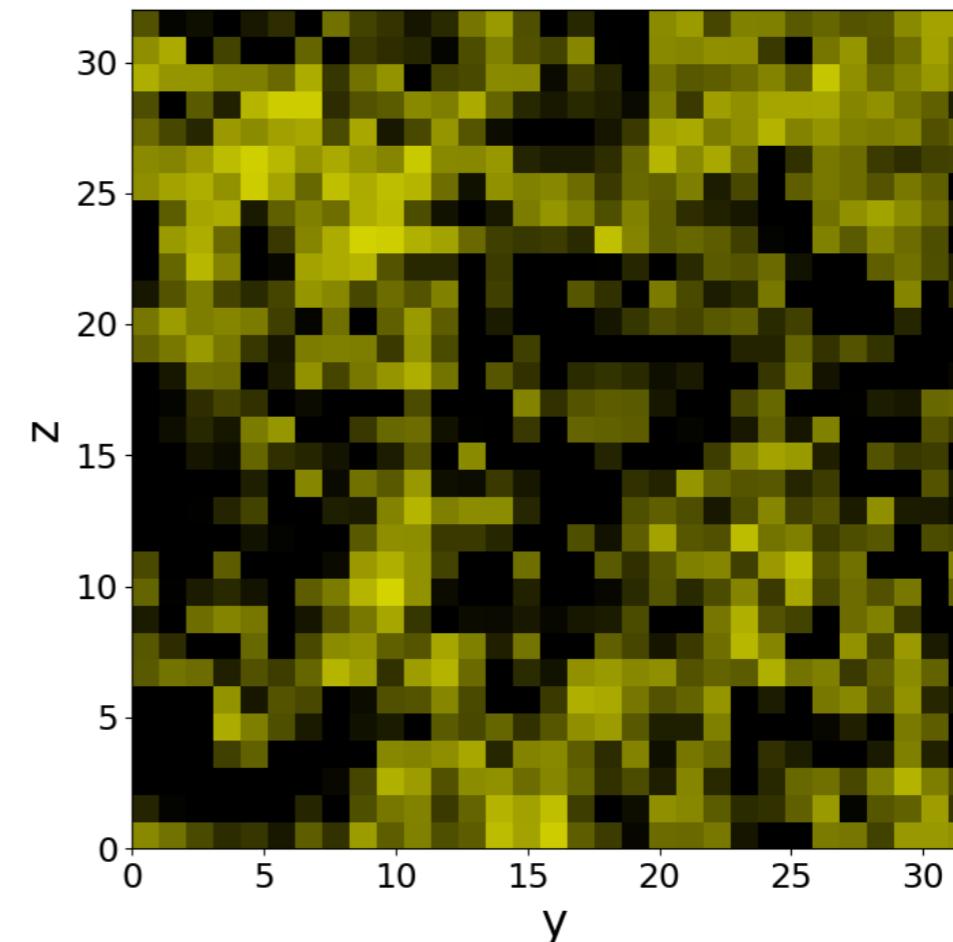
$$\dot{\rho}_* = 5 \times 10^{-4} [\text{M}_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}] , 500 \text{Msun}$$

空間的に一様 $f_{\text{esc}} = 0.84$



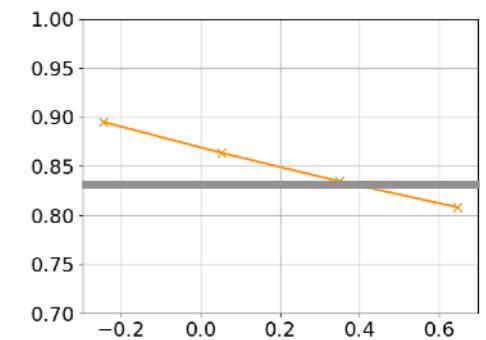
$$\overline{f_{\text{HII}}} = 0.273\%$$

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

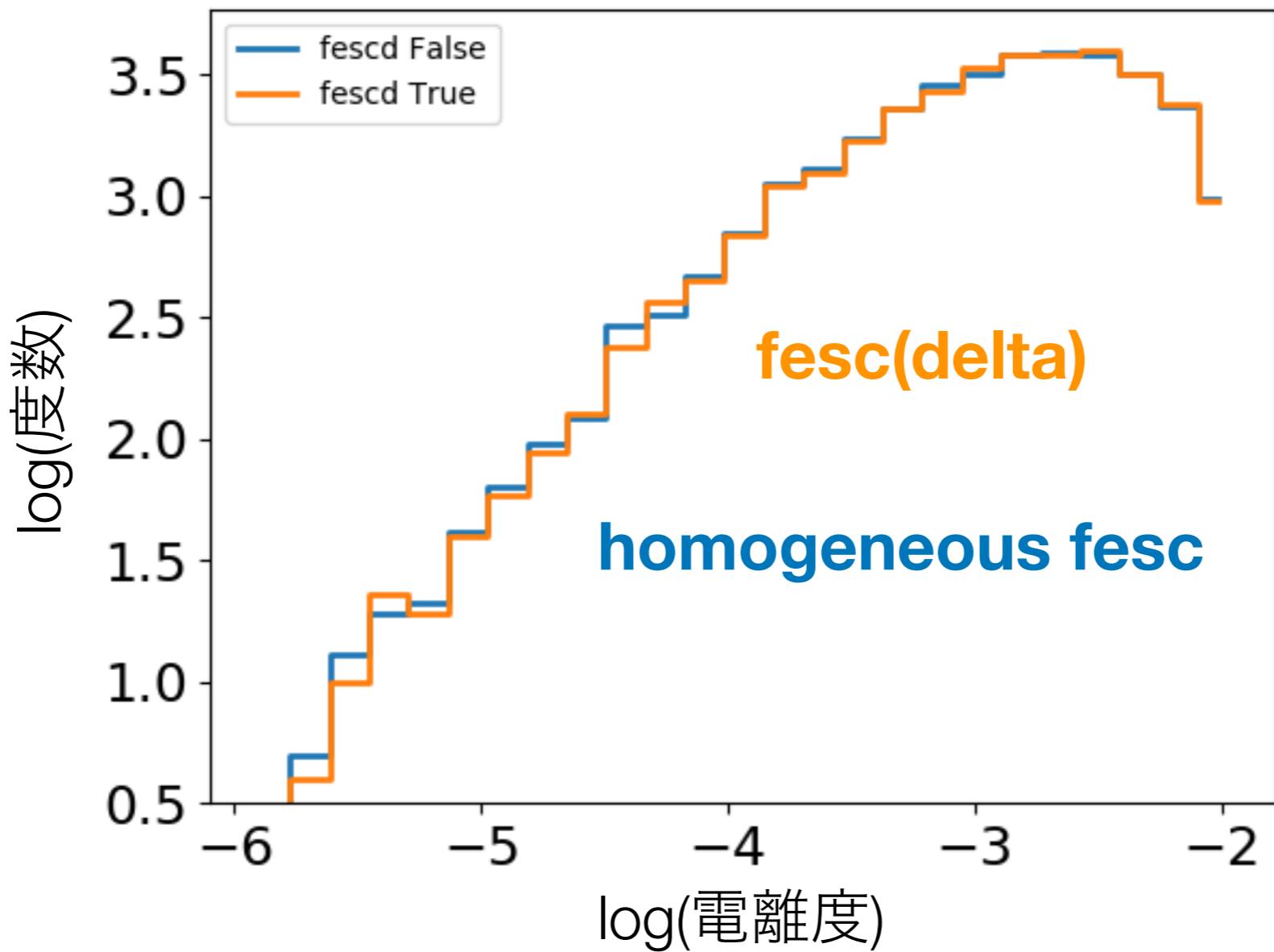


$$\overline{f_{\text{HII}}} = 0.276\%$$

電離光子脱出率のdelta依存性が小さいため、見た目には変わらない。
計算ボックス全体での空間平均電離度もほぼ同じ。



電離度のヒストグラム

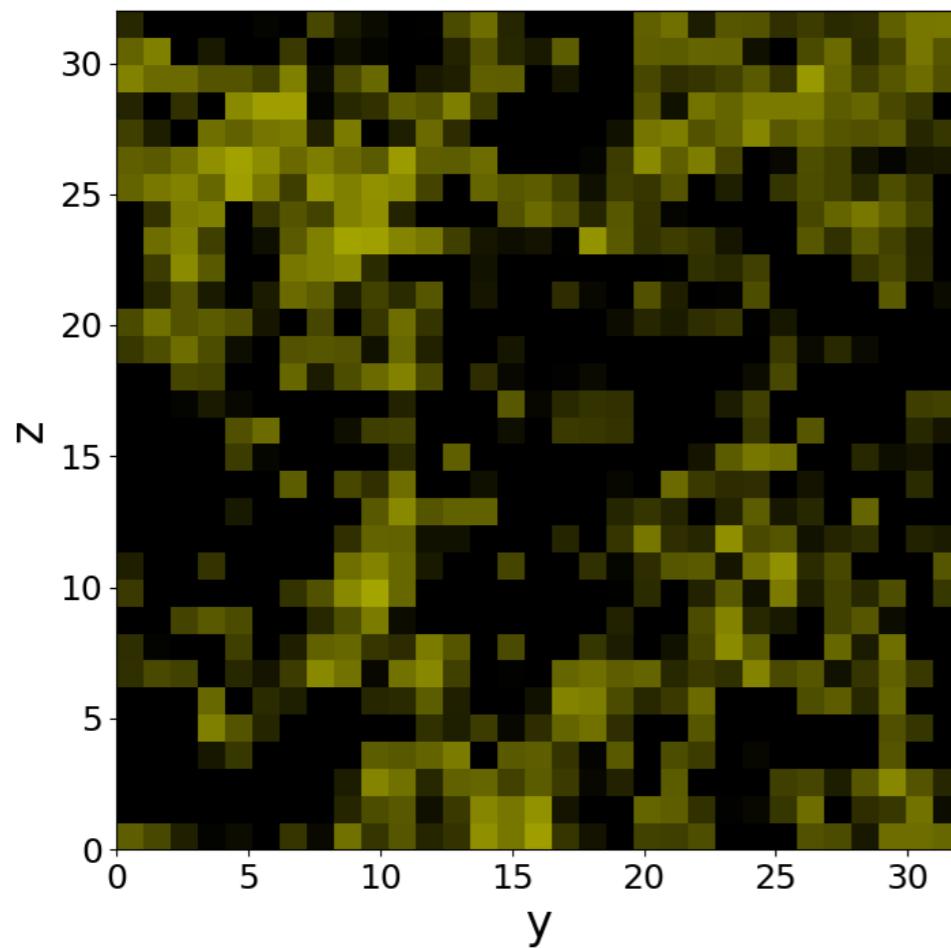


ヒストグラムもそれほど変わらない。

電離度空間分布: 40Msunと500Msun starの比較

$$\dot{\rho}_\star = 5 \times 10^{-4} [\mathrm{M}_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}]$$

40Msun

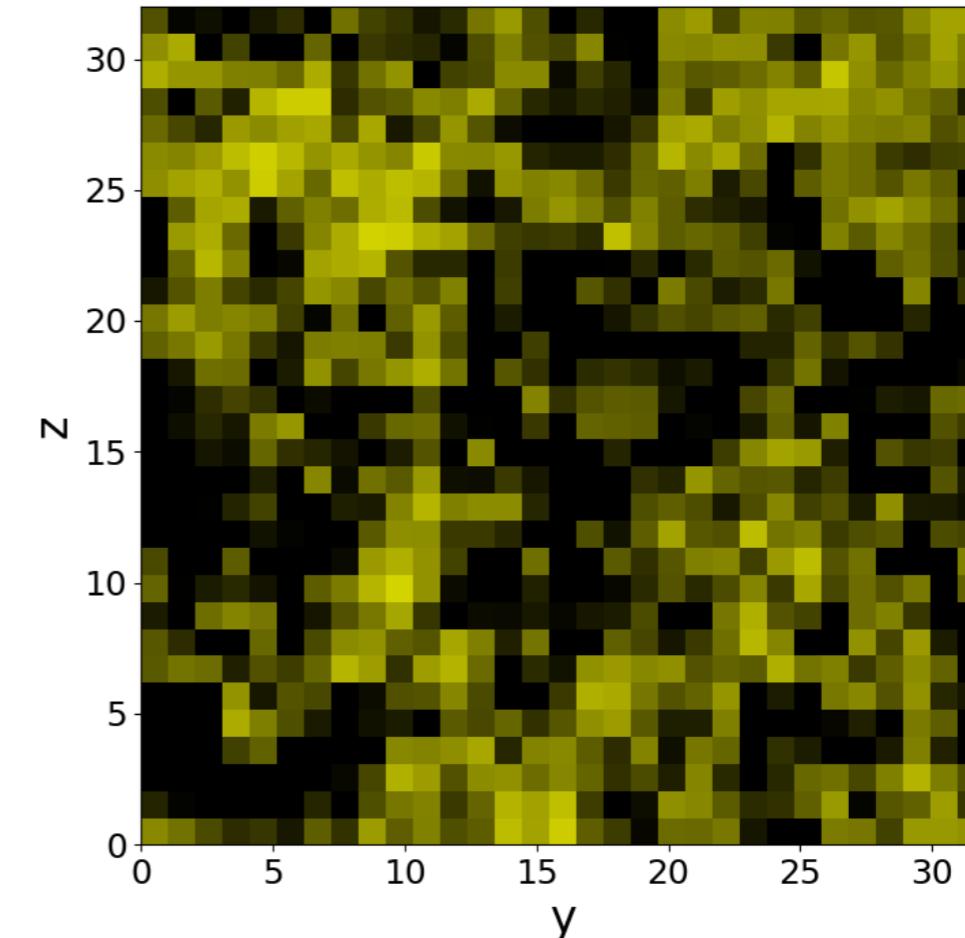


$$\overline{f_{\text{esc}}} = 0.26$$

$$\overline{f_{\text{HII}}} = 0.14\%$$

$$f_{\text{HII}} \propto \dot{n}_{\text{ion}}^{0.5} \propto f_{\text{esc}}^{0.5}$$

500Msun



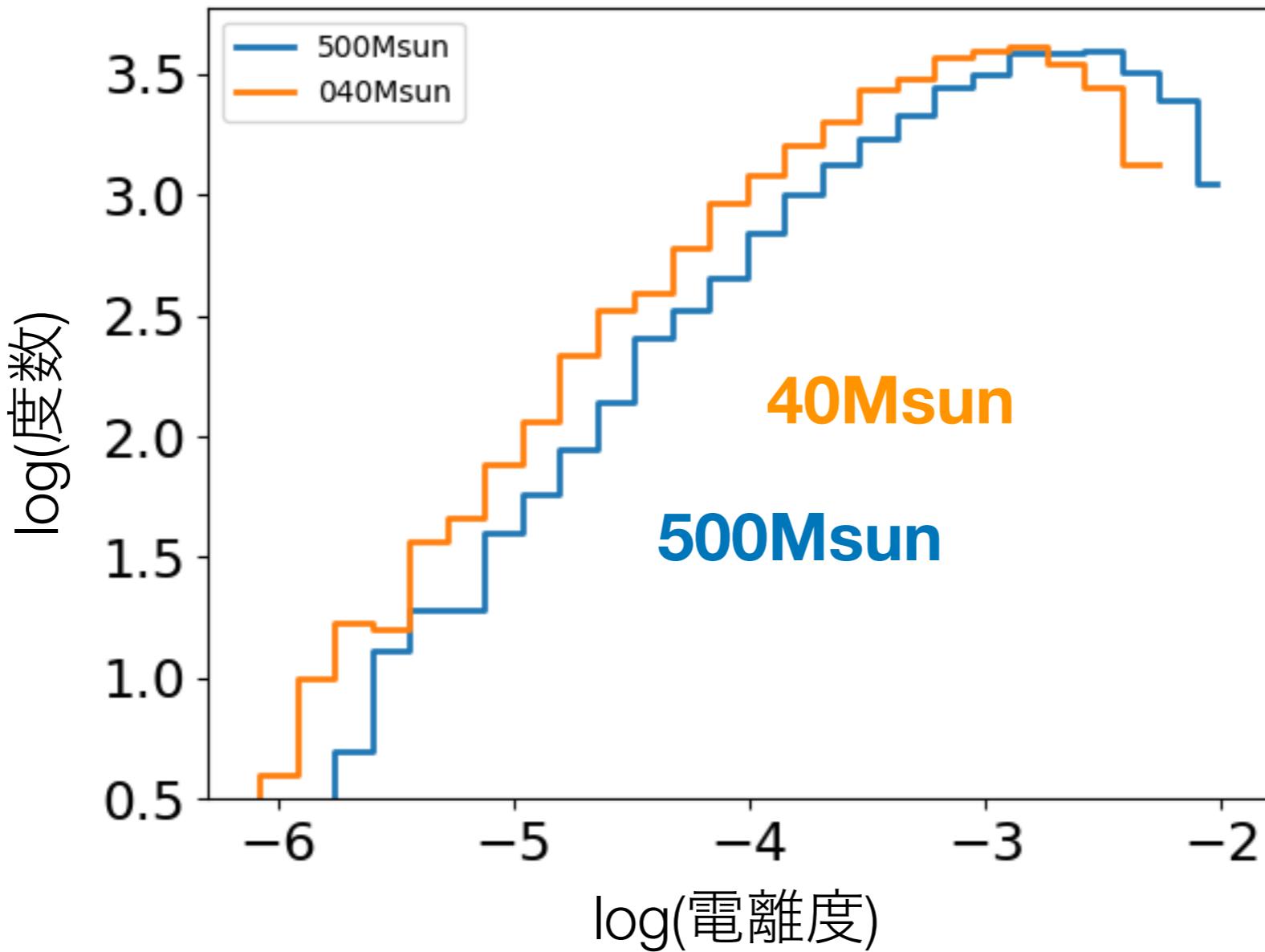
$$\overline{f_{\text{esc}}} = 0.87$$

$$\overline{f_{\text{HII}}} = 0.28\%$$

$$\frac{df_{\text{HI}}}{dt} = -\frac{\dot{n}_{\text{ion}}(\delta)}{n_{\text{H}}(\delta)} + \alpha_{\text{B}} n_{\text{H}}(\delta) f_{\text{HII}}^2$$

$$\dot{n}_{\text{ion}} = \dot{\rho}_\star(\delta) N_{\text{ion}}(M_{\text{star}}) f_{\text{esc}}(M_{\text{star}}, \delta)$$

fhii histogram



星質量が大きいと電離光子脱出率が大きくなり、
電離度が大きくなる。

まとめ

- 初代星質量依存性を考慮した電離光子脱出率モデルを作成した
- 電離度空間分布の見積もりを行なった
 - Local overdensity依存性の効果は、電離度にあまり強く影響しないことがわかった: 電離度の平均値はほぼ変わらない。
 - 一方、星質量依存性の電離度分布に対する影響はある: 電離度の空間平均 = 0.14 for 500Msun, 0.28 for 40Msun.
 $(\dot{\rho}_\star = 5 \times 10^{-4} [\mathrm{M}_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}])$

Future works

- fescのモデルを拡張: 異なるMstarやIFM。赤方偏移依存性。
- 21cmFASTに組み込み、21-cm線分布を計算。
- Power spectrum等、統計量を見積もりIMFがどのように影響するかを考察する。