

宇宙の夜明けから再電離が起こるまで：  
これまでの理解と残された課題



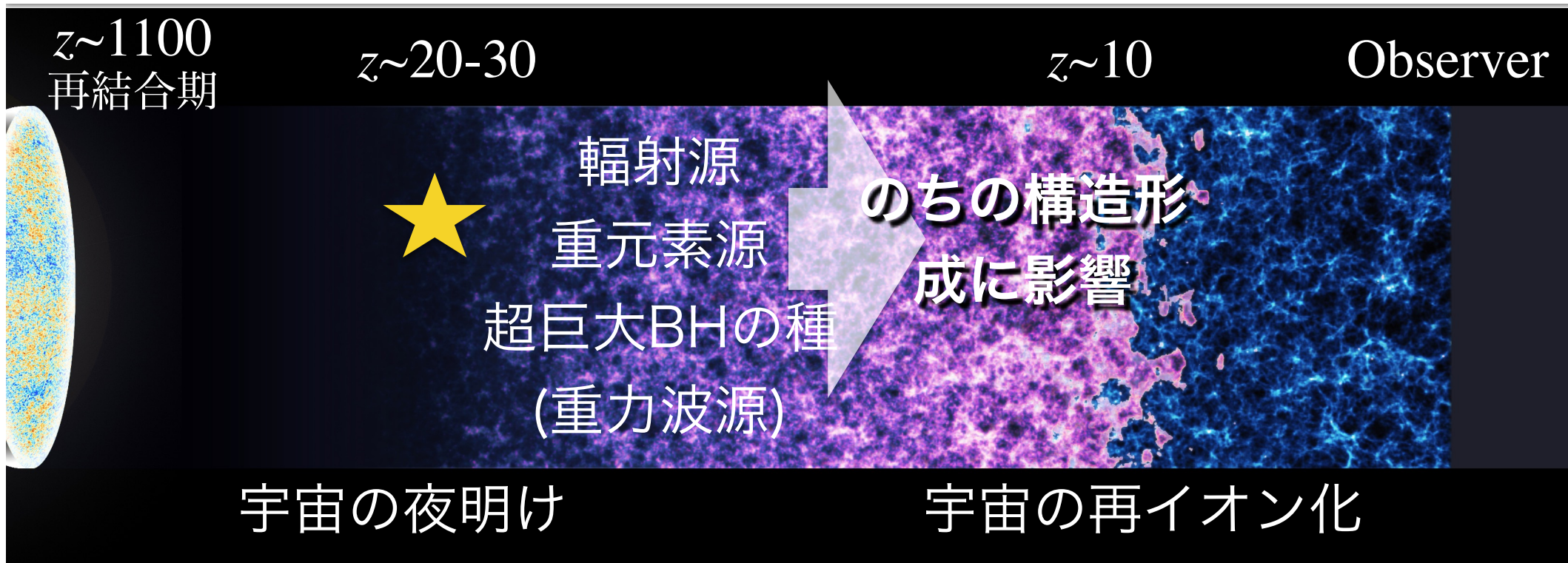
長谷川賢二(名古屋大学)



第31回理論懇シンポジウム「宇宙物理の標準理論:未来へ向けての再考」

@京都大学 2018年12月19日-21日

# OUTLINE



## First Stars

- 初期質量関数
- 単独星 or 連星/複数
- 星形成率

直接観測がなく理論先行  
(初期条件、解くべき物理が明確)

## Cosmic Reionization

- 時間的・空間的發展
- 電離光子源

観測される天体の最遠方  
理論研究との直接比較

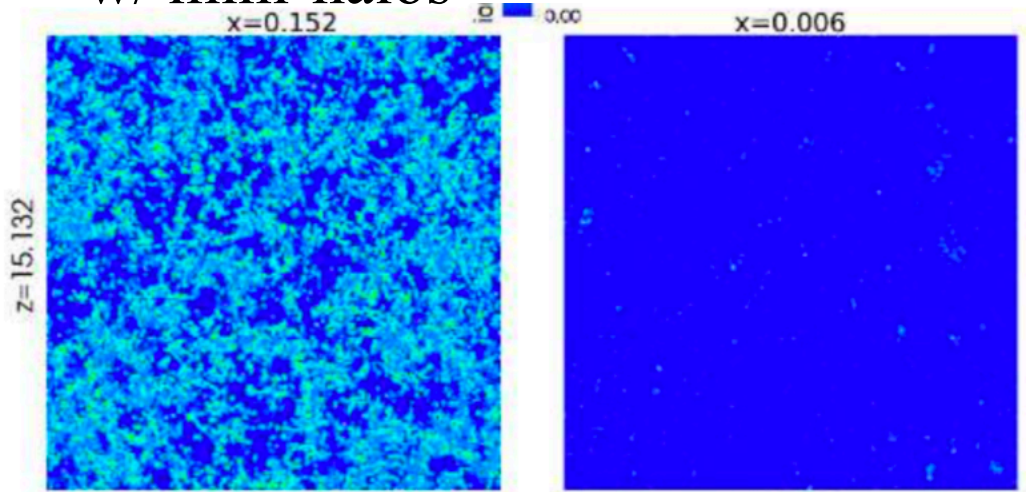
# First Stars

Planck 2018 (arXiv:1807.06209) indicates  $\tau_e = 0.054 \pm 0.007$

$$\tau_e = c\sigma_t \int_{z_r}^0 n_e(z) \frac{dt}{dz} dz$$

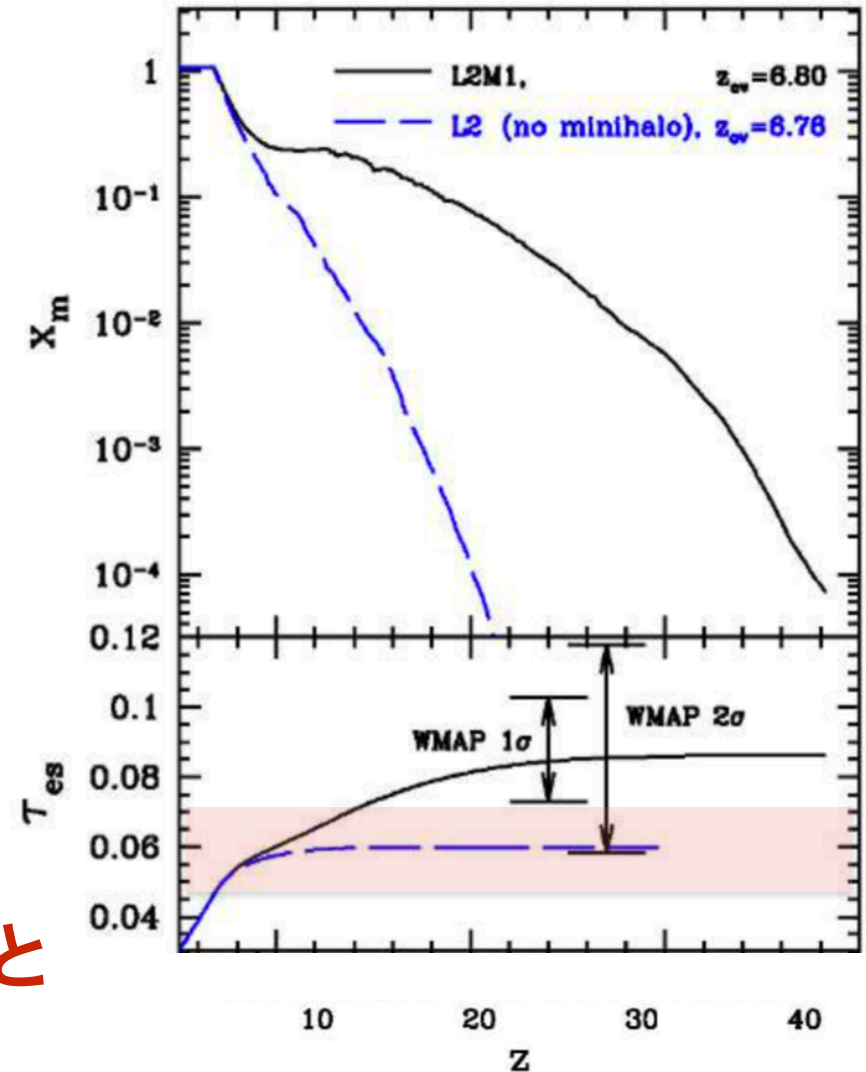
## Ionized fraction at $z \sim 15$

w/ mini-halos      w/o mini-halos



100 Mpc  
Ahn et al. (2012)

初代星の寄与が大きすぎると観測と  
矛盾する可能性あり





# 初代星形成の理解

## 共通理解

## 共通理解

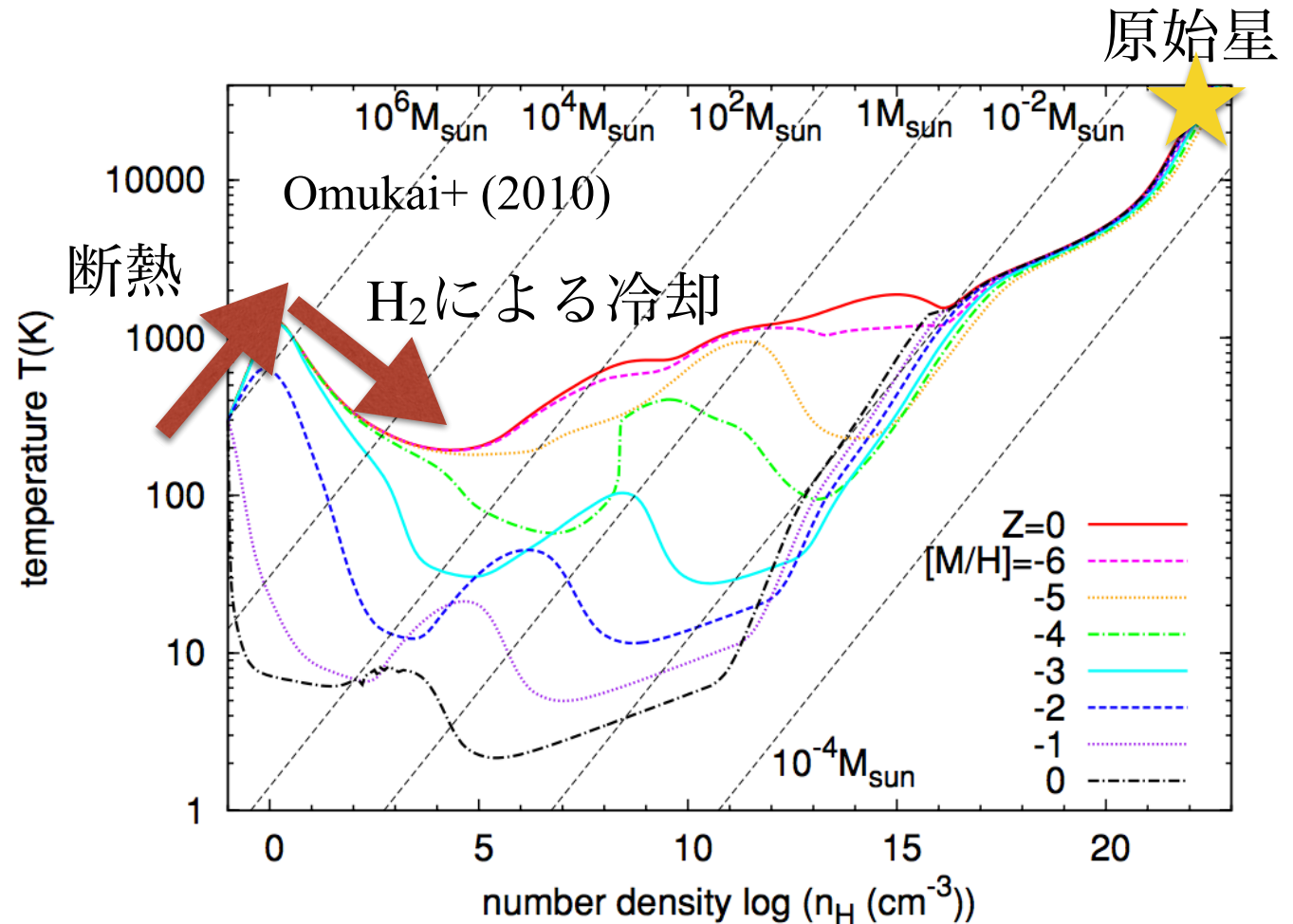
cosmological

始原ガスの熱進化(e.g., Palla+83, Omukai+ 98, Abel+ 02, Yoshida+03)

H-プロセス(電子を触媒)を経て形成するH<sub>2</sub>で冷える.

おおよそビリアル温度~1000Kのハローでないと冷えない.

Present-dayの場合と比べて、ガス降着率( $\propto M_J/t_{\text{ff}} \propto T^{1.5}$ )が高い.



## 共通理解

cosmological

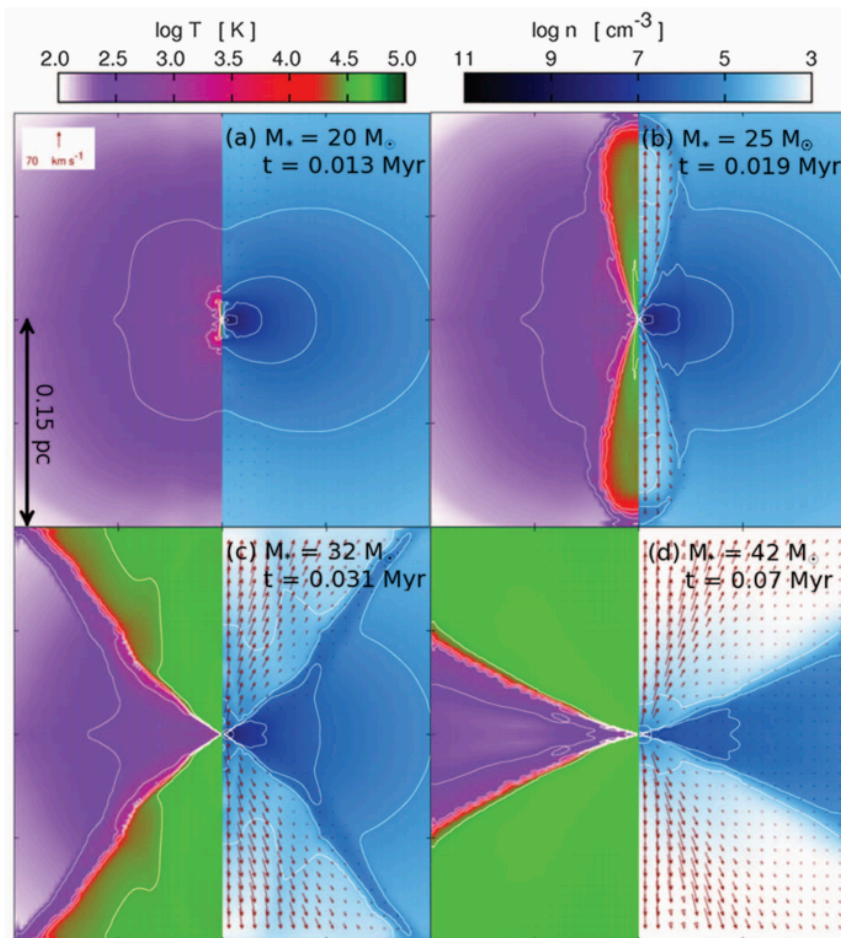
始原ガスの熱進化(e.g., Palla+83, Omukai+ 98, Abel+ 02, Yoshida+03)

星形成可能な最小ハロー質量( ~ several  $10^5 M_{\text{sun}}$ )

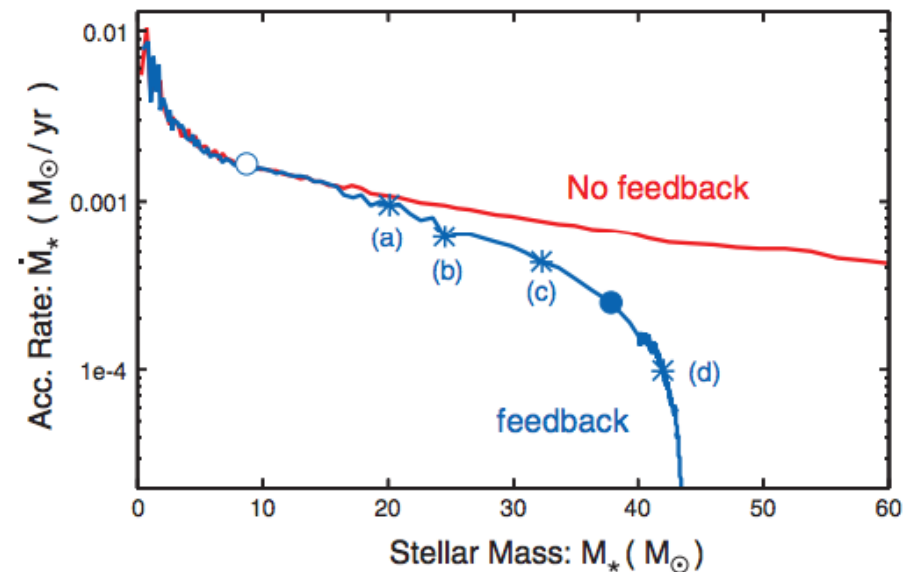
初代星は典型的には大質量である

# 初代星形成の理解

Hosokawa et al. (2011) 質量降着期の輻射流体シミュレーション  
(原始星進化と整合的に解く)



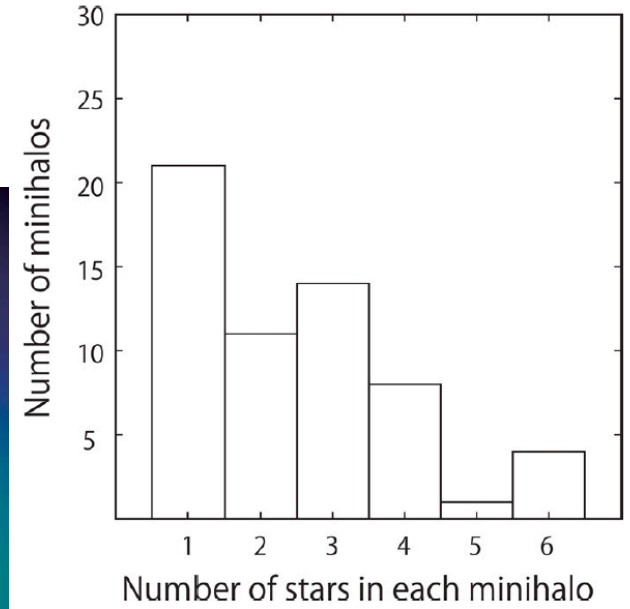
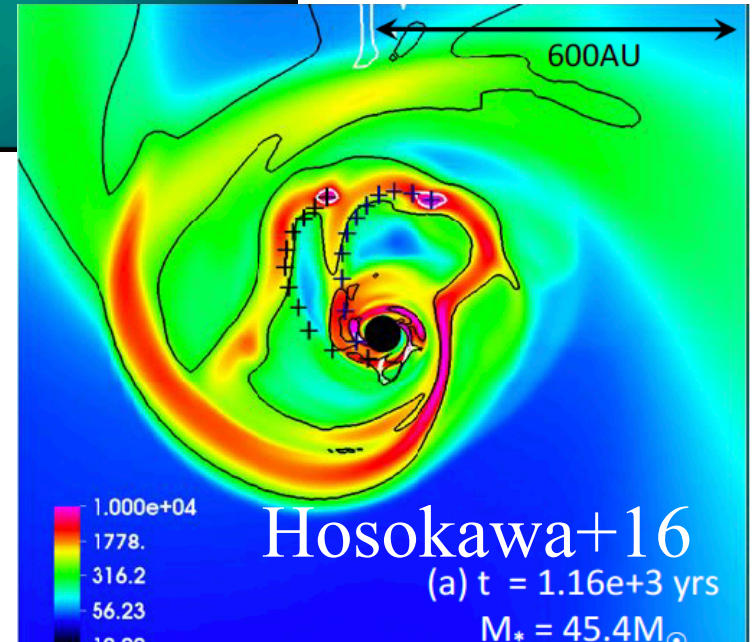
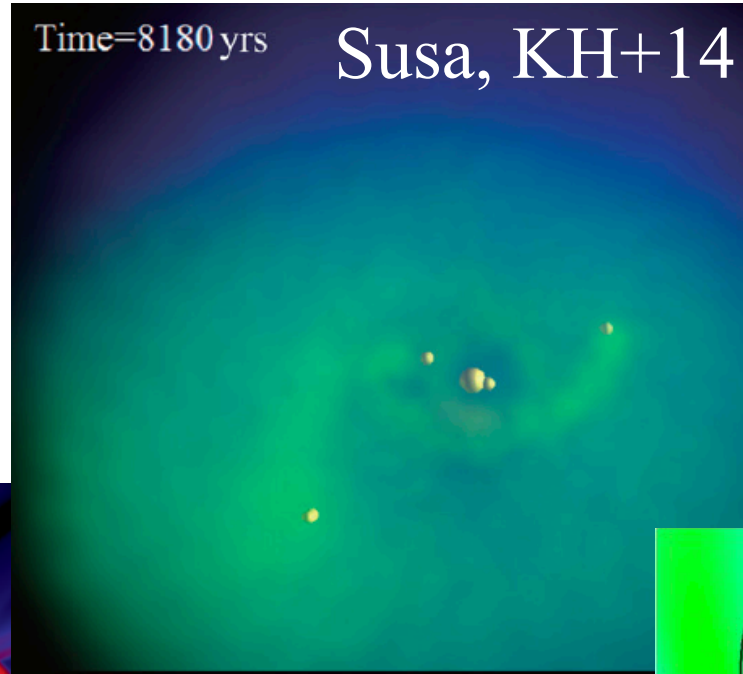
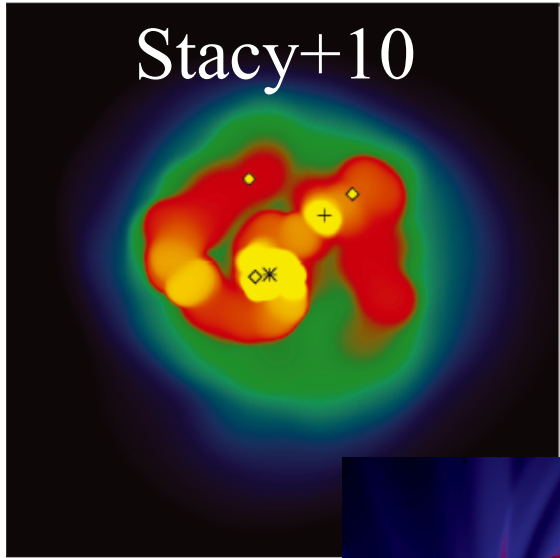
星からの紫外線でガスが光蒸発し、降着が止まる。





# 初代星形成の理解

## 円盤の分裂



## 共通理解

cosmological

始原ガスの熱進化(e.g., Palla+83, Omukai+ 98, Abel+ 02, Yoshida+03)

星形成可能な最小ハロー質量( ~ several  $10^5 M_{\text{sun}}$ )

初代星は典型的には大質量である

輻射による星質量決定(降着率が高い場合その限りでない)

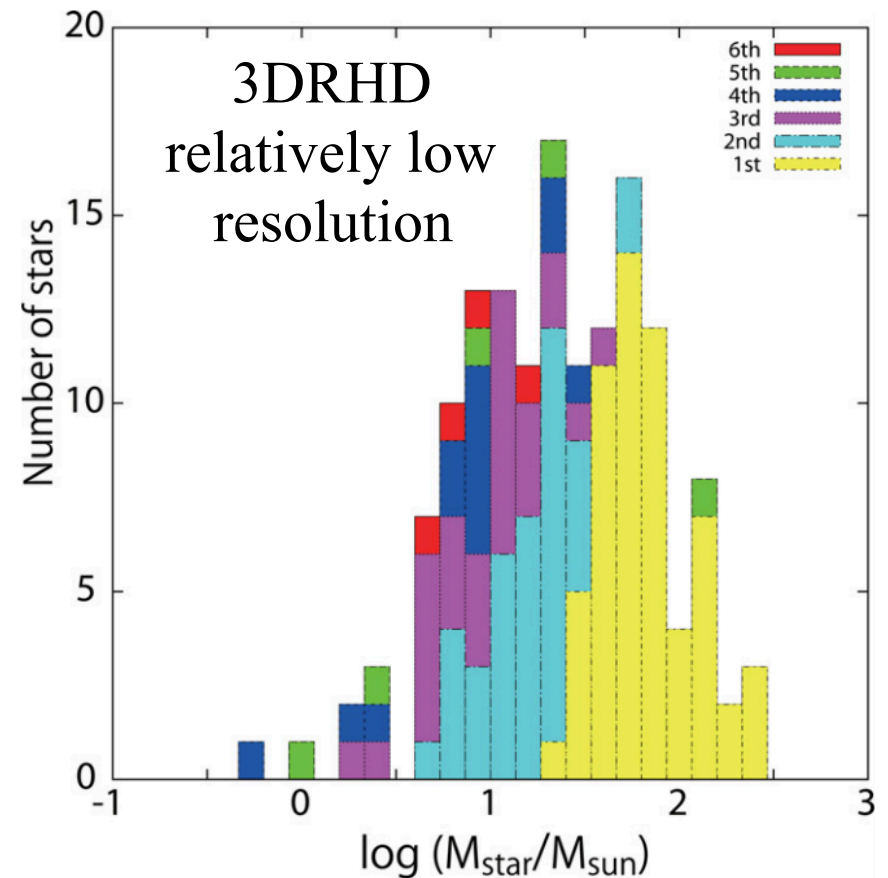
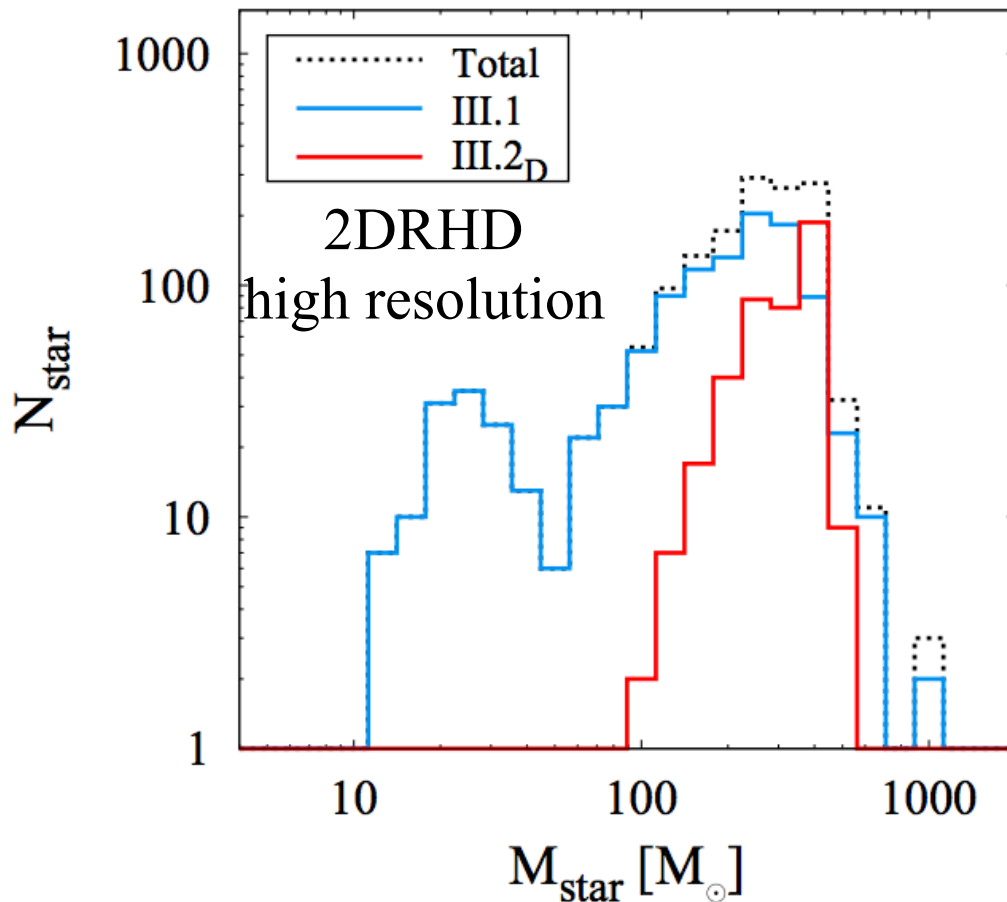
星周円盤は分裂する

# 初代星形成の理解

## 初期質量関数?

宇宙論的流体シミュレーション + 輻射流体による質量降着期の計算

Hirano+14,15, Susa, KH+ 14



すべて解決?

## 共通理解

cosmological

始原ガスの熱進化(e.g., Palla+83, Omukai+ 98, Abel+ 02, Yoshida+03)

星形成可能な最小ハロー質量( ~ several  $10^5 M_{\text{sun}}$ )

初代星は典型的には大質量である

輻射による星質量決定

星周円盤は分裂する

まだコンセンサスが得られていない

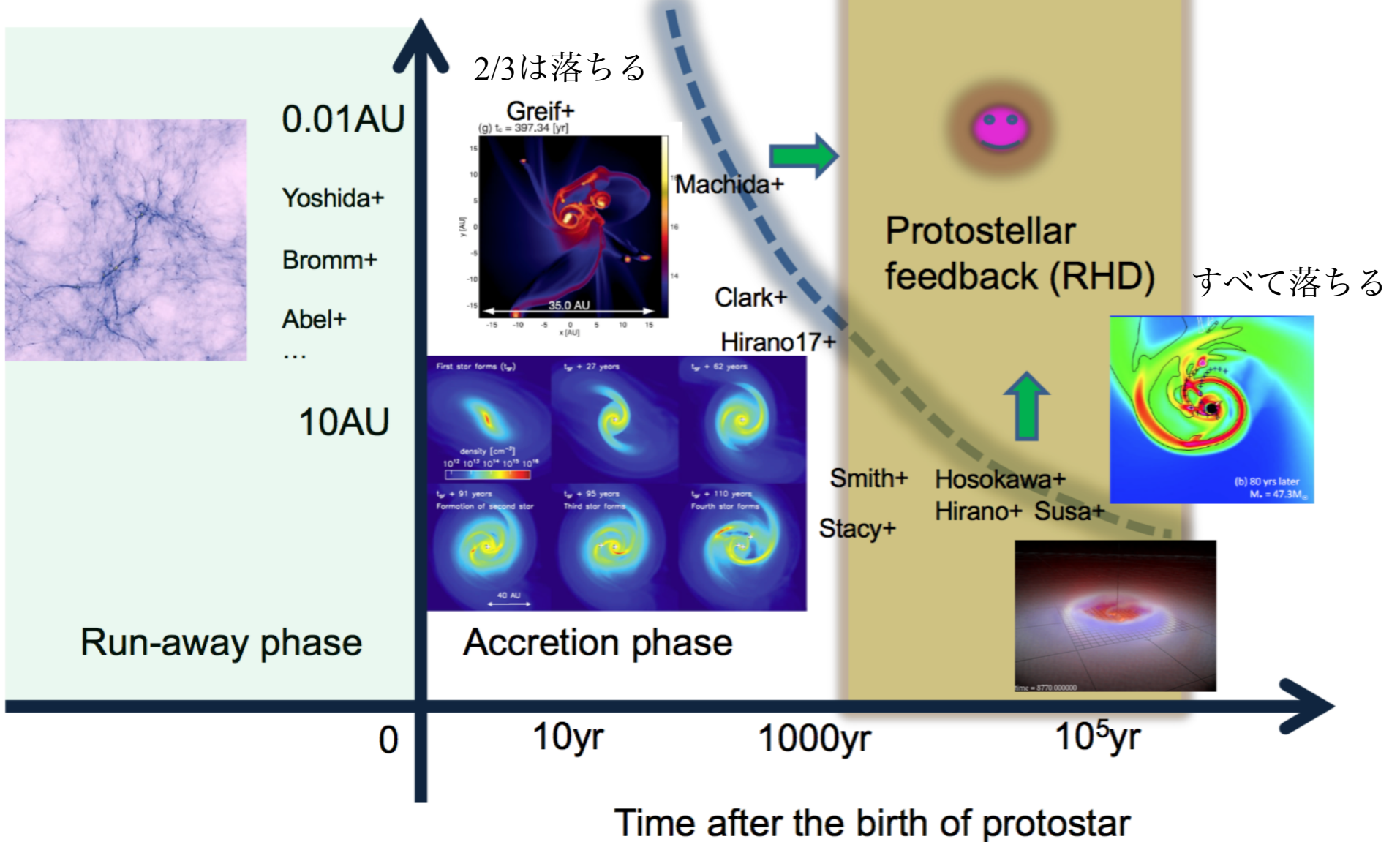
分裂片は生き残って星になるか？

宇宙論的星形成率はどの程度か？ (大スケールfeedbackの重要性)



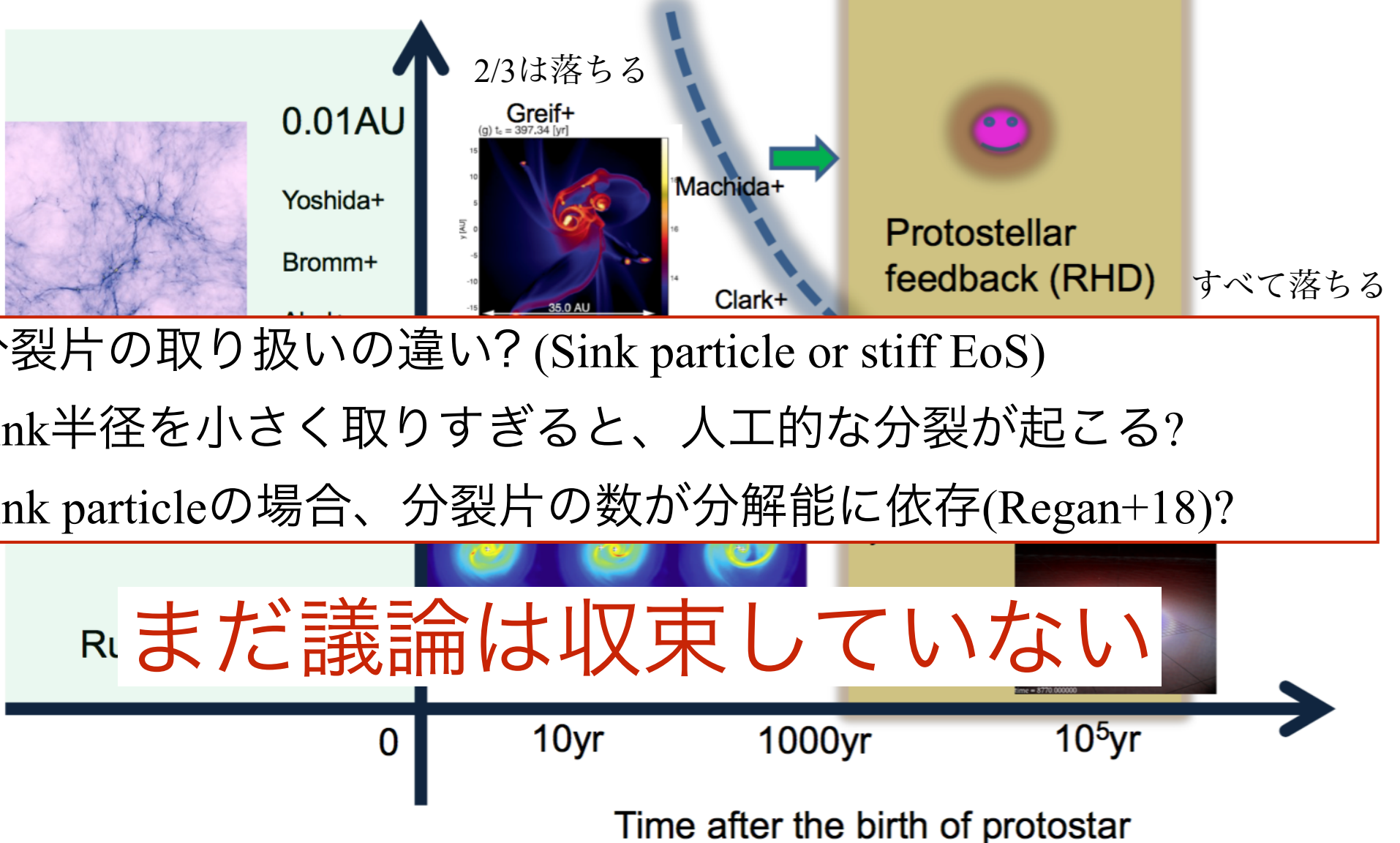
# 分裂片の数、質量、運命?

初代星・初代銀河研究会須佐さんスライド



# 分裂片の数、質量、運命?

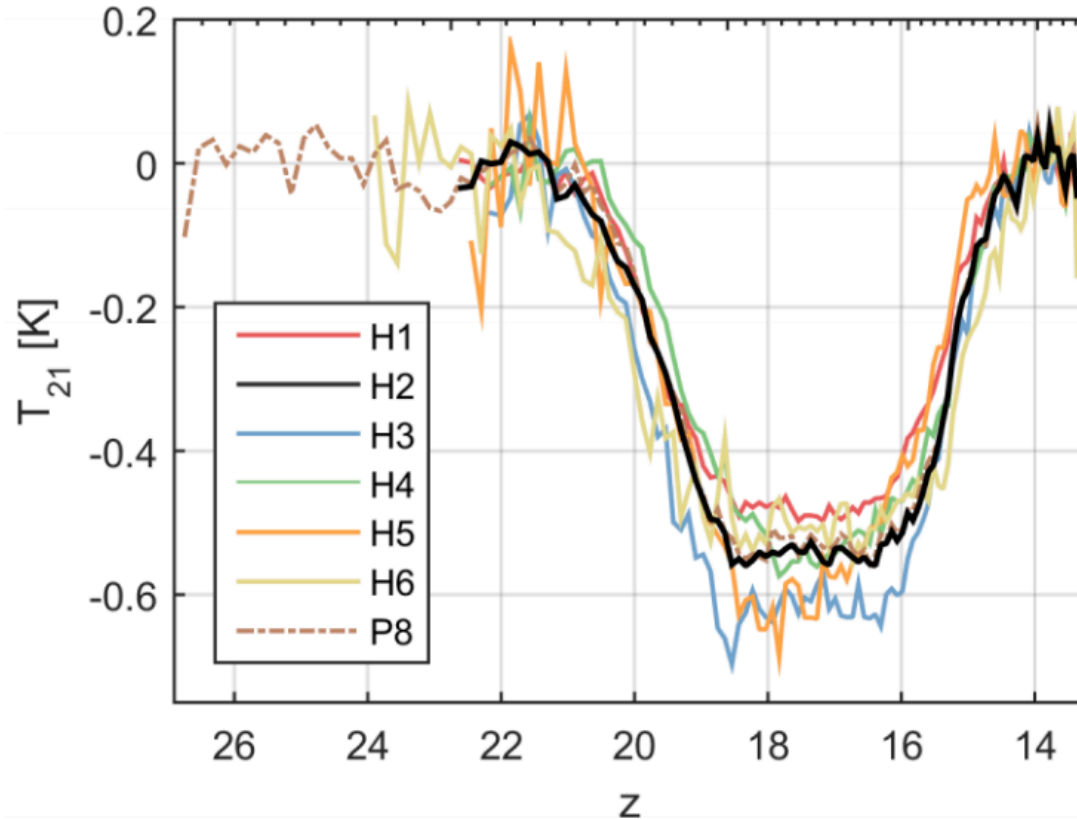
初代星・初代銀河研究会須佐さんスライド



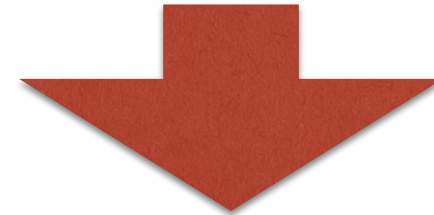
# 宇宙初期の星形成率への制限

EDGES results (Bowman et al. 2018)

Age [Myr] sky-averaged 21cm brightness temperature



- $z \sim 20$ で吸収線が見える  
(#温度の絶対については触れない)

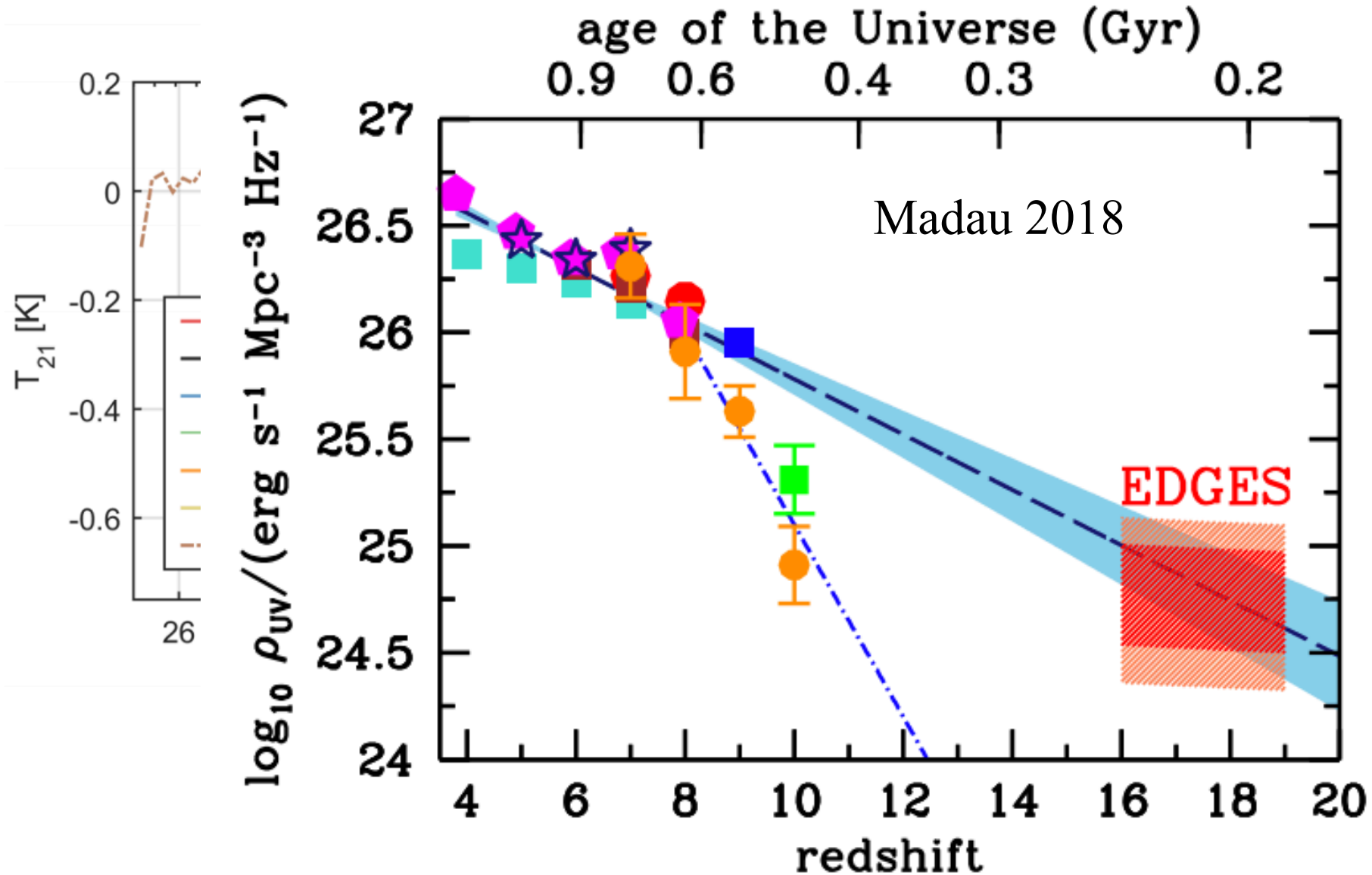


IGMの温度がCMB温度より低く、21cmの励起温度がガス温度に結合している。

結合に必要なLy $\alpha$ 光子数から Cosmic Star Formation Rate Densityに制限が可能.

# 宇宙初期の星形成率への制限

EDGES results (Bowman et al. 2018)



る

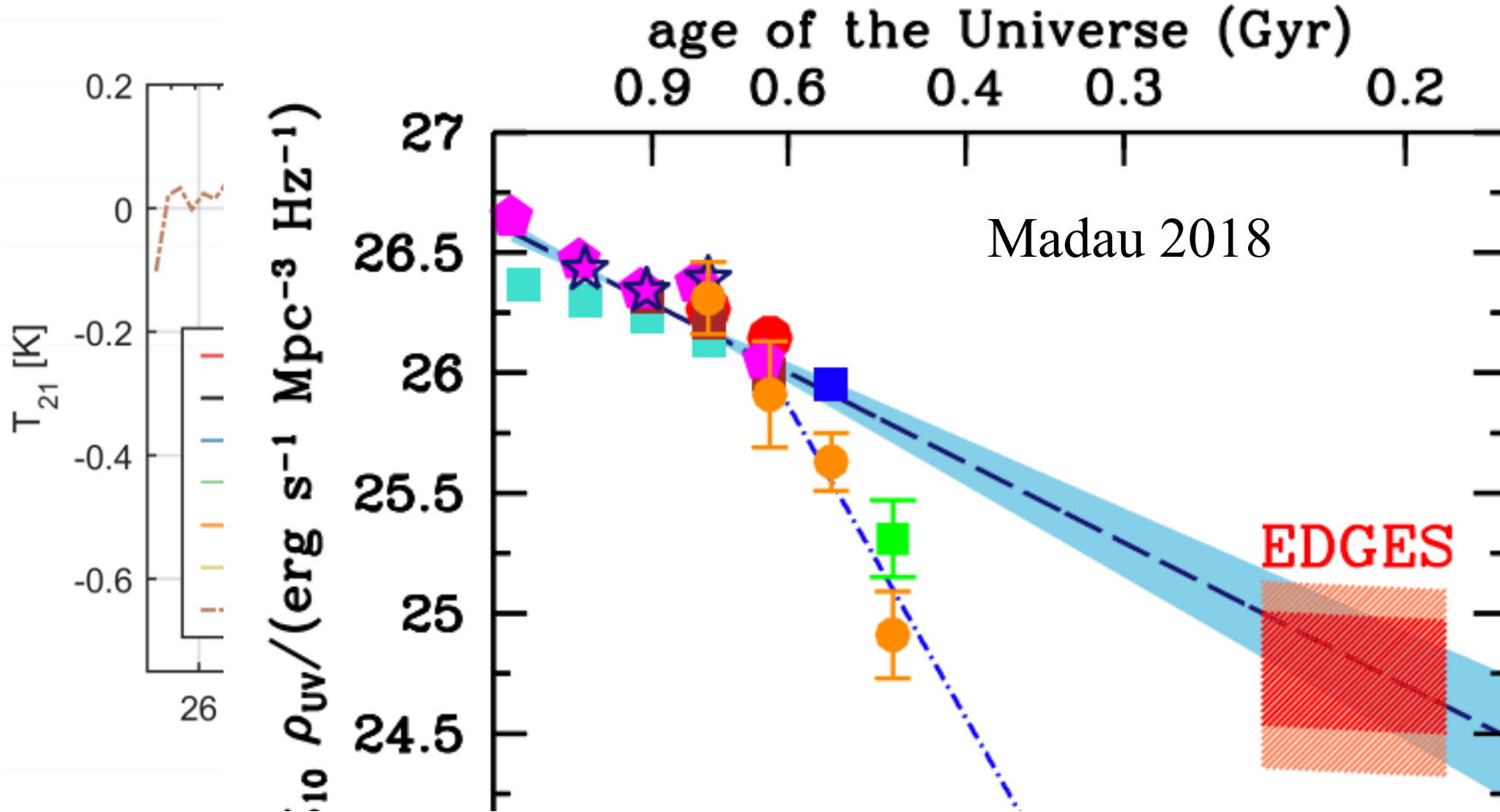
より  
がが

$$\text{SFRD} \sim 10^{-5} - 10^{-4} M_{\text{sun}}/\text{yr}/\text{Mpc}^3$$



# 宇宙初期の星形成率への制限

EDGES results (Bowman et al. 2018)



る  
より  
かが  
.

近い将来、真偽が検証され、 $z=10-30$ でより正確に  
星形成率の制限がつく可能性がある

$$\text{SFRD} \sim 10^{-5}-10^{-4} M_{\text{sun}}/\text{yr}/\text{Mpc}^3$$

## • Radiative Feedback

### • 光電離によるガスの加熱

ガスが剥ぎ取られ、星への質量降着率が下がる (Susa, KH+09)

### • H<sub>2</sub>光解離による冷却剤の減少

冷却時間が長くなり、重力収縮を妨げる (Omukai 01, Susa 07)

## ・Radiative Feedback

### ・光電離によるガスの加熱

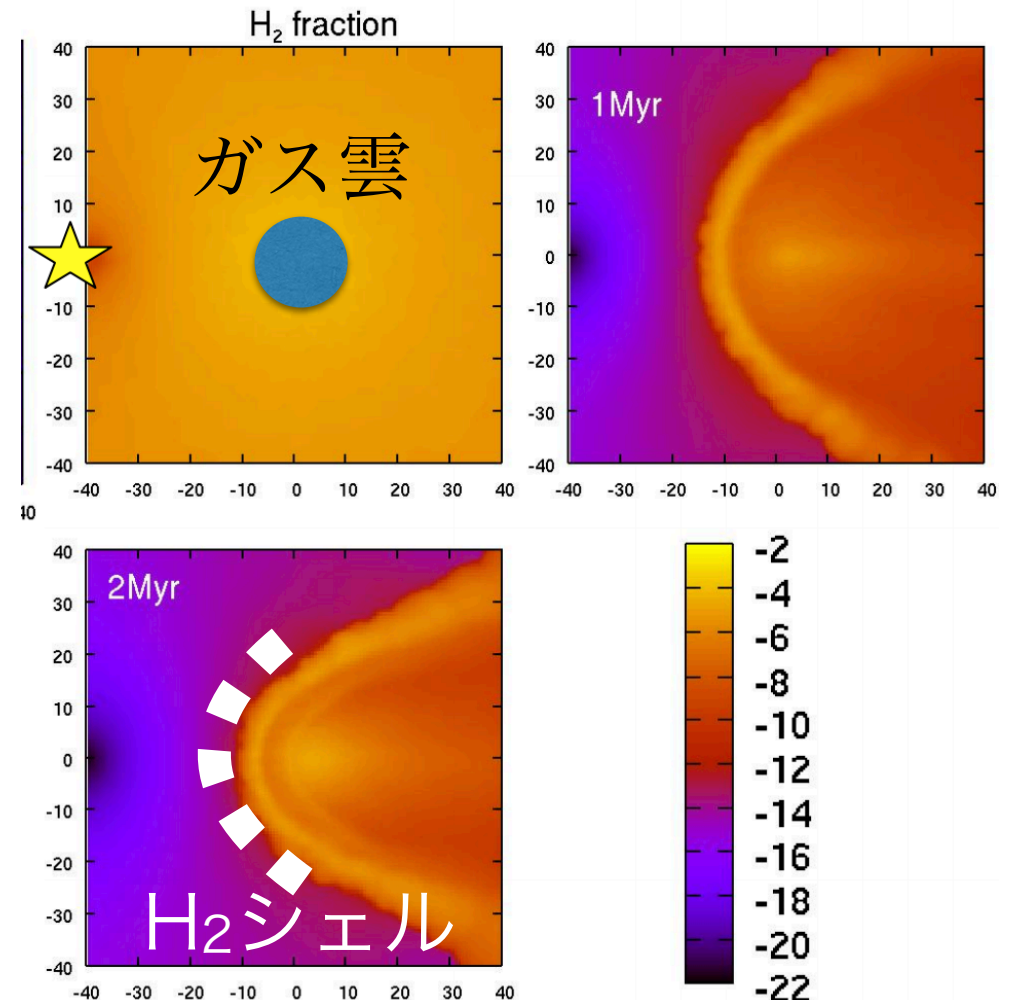
ガスが剥ぎ取られ、星への質量降着率が下がる (Susa, KH+09)

電子を増やし、解離のフィードバックを和らげる。和らげる度合いは、星のスペクル(質量)に依存 (Susa+06, KH+09)

### ・H<sub>2</sub>光解離による冷却剤の減少

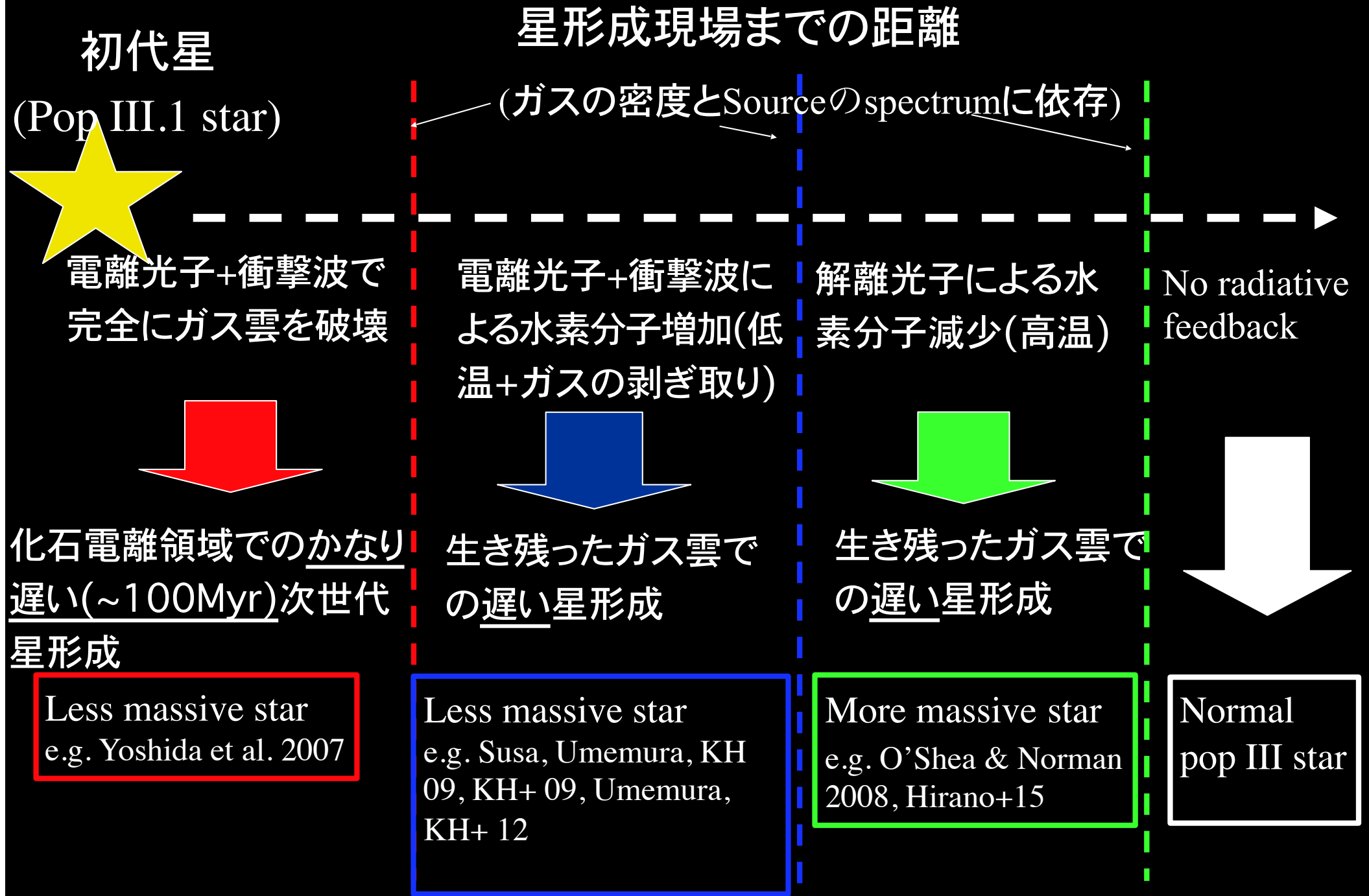
冷却時間が長くなり、重力収縮を妨げる (Omukai 01, Susa 07)

RHD simulation, KH+09



解離光子を遮蔽

# Radiative Feedbackまとめ (長谷川スライド改)



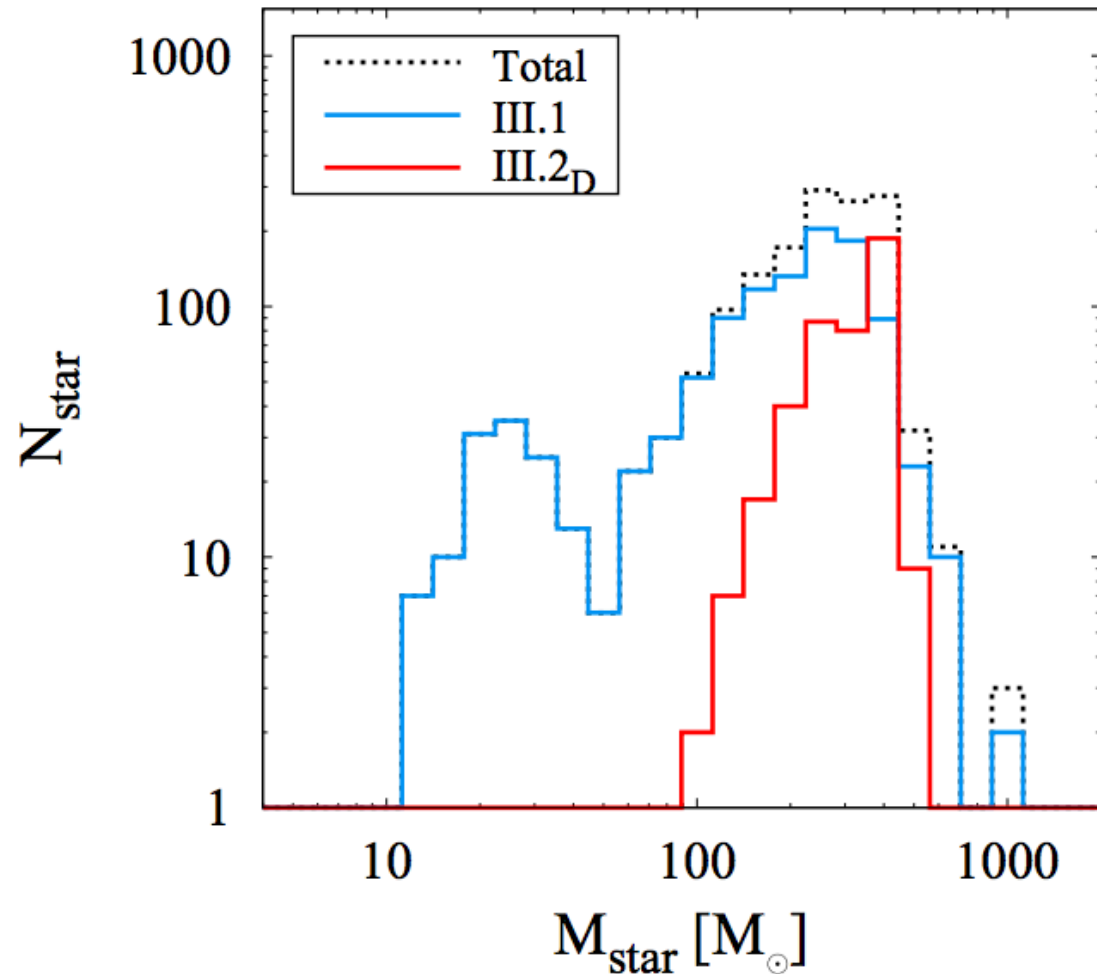


# Radiative Feedbackまとめ (長谷川スライド改)

初代星

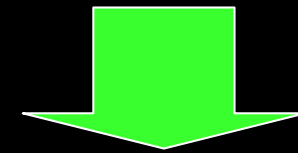
星形成現場までの距離

(P)

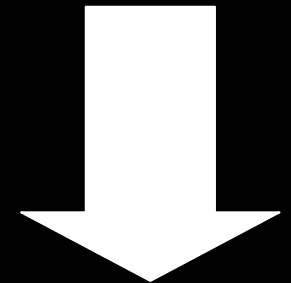


解離光子による水素分子減少(高温)

No radiative feedback



生き残ったガス雲での遅い星形成



More massive star

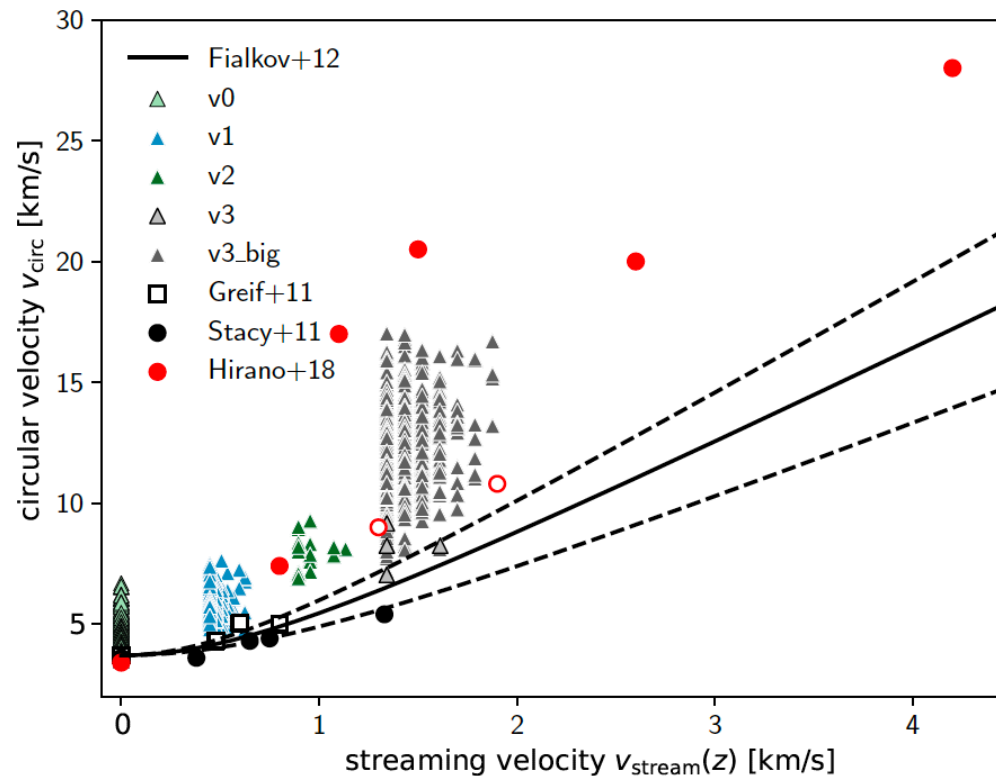
normal

化遅星

Large scale Radiative FeedbackはSFRDだけでなく、IMFにも影響を与える。SFRDは、輻射影響下でのIMFと無矛盾に考える

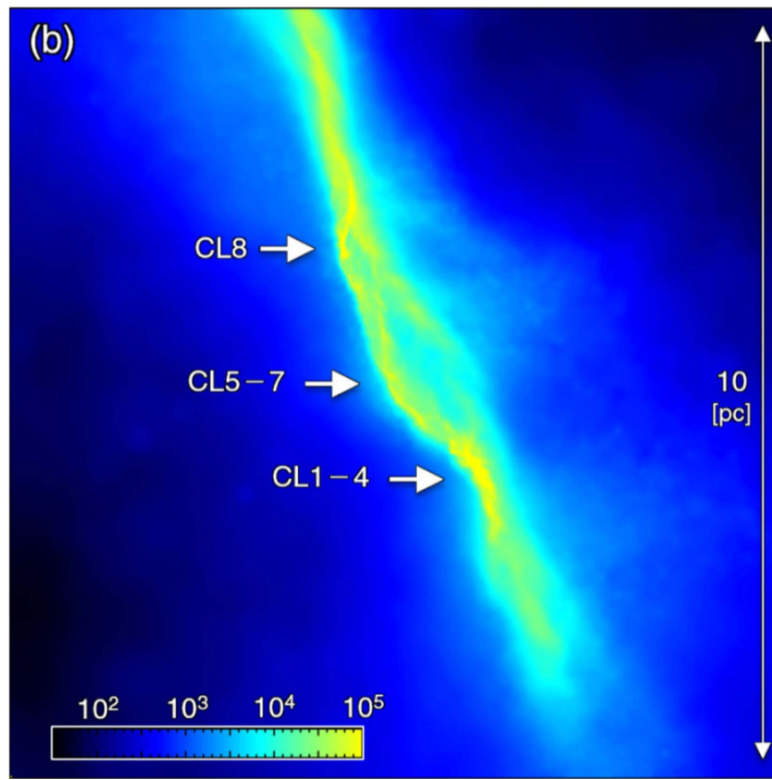
## ・Streaming Velocity

- ・ 晴れ上がり時に ダークマターとバリオンにrms vel.~30km/s程度の相対速度が存在 (Tseliakhovich & Hirata 2010)
- ・ ガスがハローにとどまらず、星形成が遅れる (Stacy+11, Greif+11, Fialkov+12, Naoz+12, Asaba+16, Schauer+18)



## ・Streaming Velocity

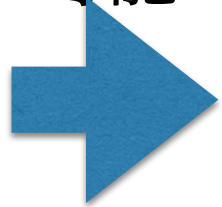
- ・ 晴れ上がり時にダークマターとバリオンにrms vel.~30km/s程度の相対速度が存在 (Tseliakhovich & Hirata 2010)
- ・ ガスがハローにとどまらず、星形成が遅れる (Stacy+11, Greif+11, Fialkov+12, Naoz+12, Asaba+16, Schauer+18)



- ・ 場合によっては、フィラメントの分裂が見えたり、超大質量星ができる (Hirano+17, 18)

# Summary: The First Stars

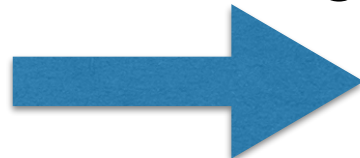
宇宙論的初期条件から、質量降着期のシミュレーションが可能になってきた。



**IMF的なものを理論的に導出**

円盤の分裂とその後の進化はまだわからない

Primary starにmergeする



IMFはよりMassive側へ(e.g.,  
Hosokawa+16)

分裂片が生き残る



IMFは低質量側へ(生き残りの制限  
Ishiyama, KH+16)

- 期待されるSFRDへの観測的制限へ向けて、宇宙論的星形成率の理論的導出：Large ScaleのfeedbackはSFRだけでなくIMFへも影響する

# Cosmic Reionization

電離光子源

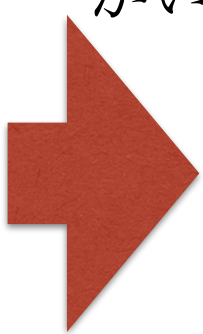
電離史(時間的發展)

- **High-z galaxies**

- たくさんの高赤方偏移銀河が発見されている (LAEs: Ouchi, KH+18, LBGs: Ono+18, OIII: Hashimoto+18)
- 銀河がどの程度再電離に寄与するかは、電離光子脱出割合に強く依存

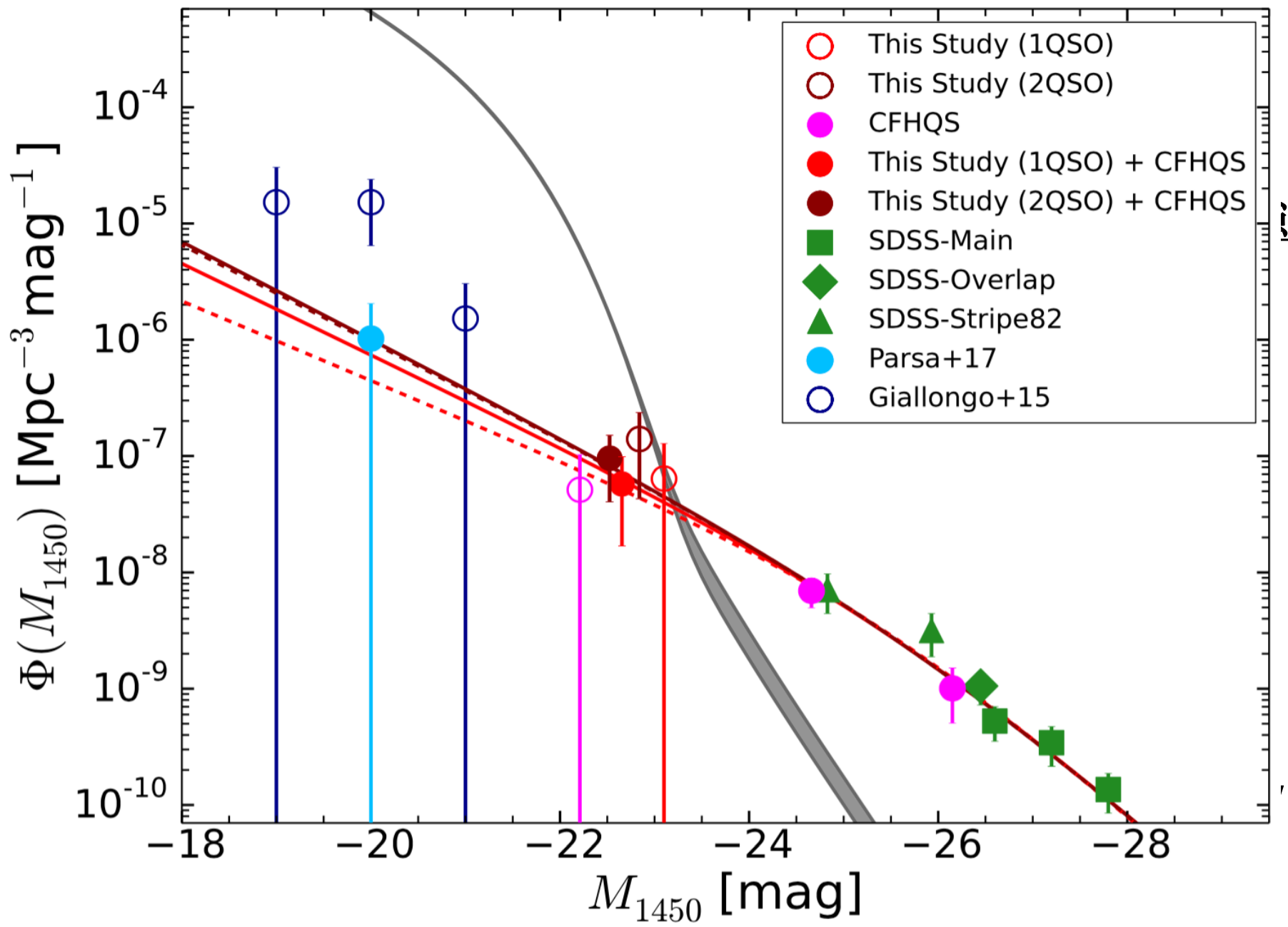
- **暗いAGNs**

- Giallongo et al. (2015)がAGNs at  $z > 4$ に予想より多くの暗いAGNがいることを示す。



仮にAGNのみで再電離を起こしても、X線背景放射、HeII再電離を含む現状の観測的制限を矛盾なく満たす(e.g., Madau & Haardt 2015, Yoshiura, KH+ 2016)

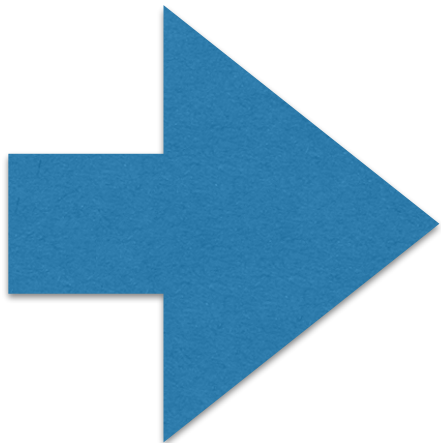




高赤方偏移銀河の電離光子はIGMの吸収が強く直接検出できない

=>シミュレーションの予言が重要

- これまでのシミュレーションのほとんどが、大質量ほど $f_{\text{esc}}$ が小さい傾向(e.g., Razoumov+10, Yajima+12, Wise+14, KH+16, Xu+16)
- 絶対値は、一桁以上のばらつきがあり、高分解能の計算ほど $f_{\text{esc}}$ が小さい傾向



$f_{\text{esc}}$ の計算には銀河内小スケールな物質の非一様性が重要で、SN/Radiative feedback 効果、分解能などに敏感

(Wise+09Umemura, KH+12, Sumida, KH+18)

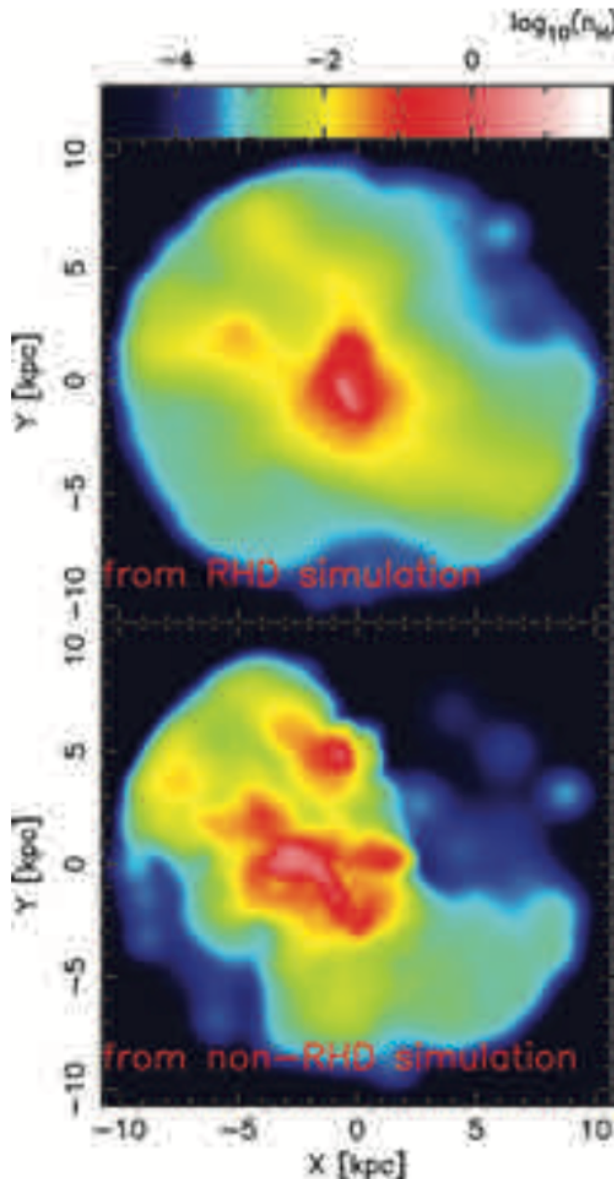
# 再結合率は密度の自乗に比例

# 銀河からの電離光子脱出確率: $f_{\text{esc}}$

宇宙論的流体シミュレーションで形成された  $M^{\text{halo}} \sim 10^9 M_{\text{sun}}$  の銀河の  $f_{\text{esc}}$

w/ Radiative Feedback 31%

w/o Radiative Feedback 15%

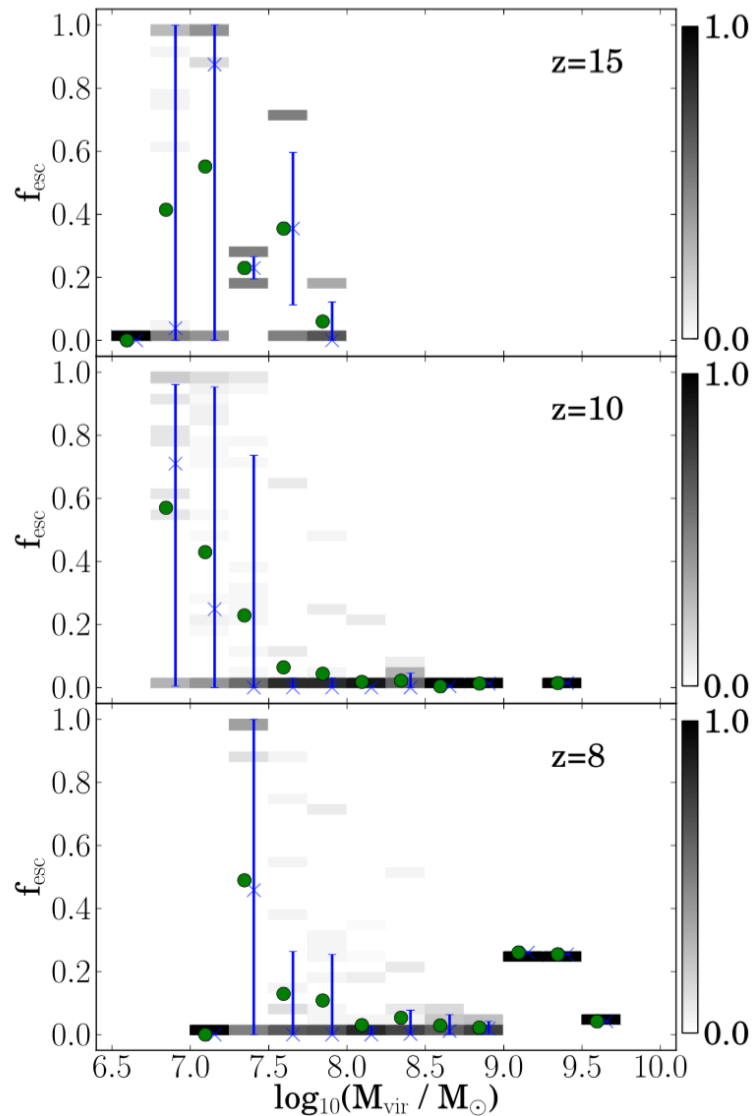


$f_{\text{esc}}$  の計算には銀河内小スケールな物質の非一様性が重要で、SN/Radiative feedback 効果、分解能などに敏感

(Wise+09, Umemura, KH+12, Sumida, KH+18)

# Radiative feedbackによるガス分布の平滑化はIGMでも重要(Pawlik+, Finlator+, KH+)

ENZOによる高分解能宇宙論的輻射流体シミュレーション  
(Xu+16, spatial resolution  $\sim$ physical 1pc)



- 平均値としては10%程度で、再電離を起こすには十分な値.
- 高い分解能を実現するため、より Massiveな銀河の  $f_{\text{esc}}$  はわからない(外挿すると再電離には効かない?)
- low- $z$ の観測では、10%程度の値がよく示唆されるが、見てるハロー質量スケールが一声  $10^{11} M_{\text{sun}}$  以上(e.g.,  $M_* \sim 10^9 M_{\text{sun}}$ ,  $Z=1/8-1/5$ の銀河で6-13% Izotov+16)

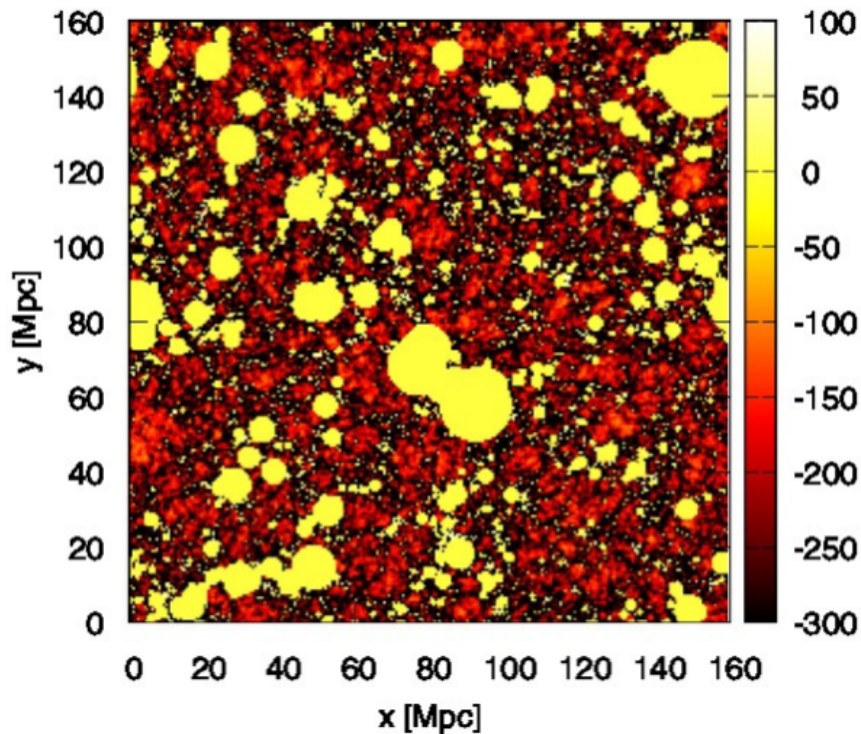


# 電離バブルサイズ分布からの $f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}})$ 予想

Sumida, Yoshiura, KH in prep. (see also Kim+13)

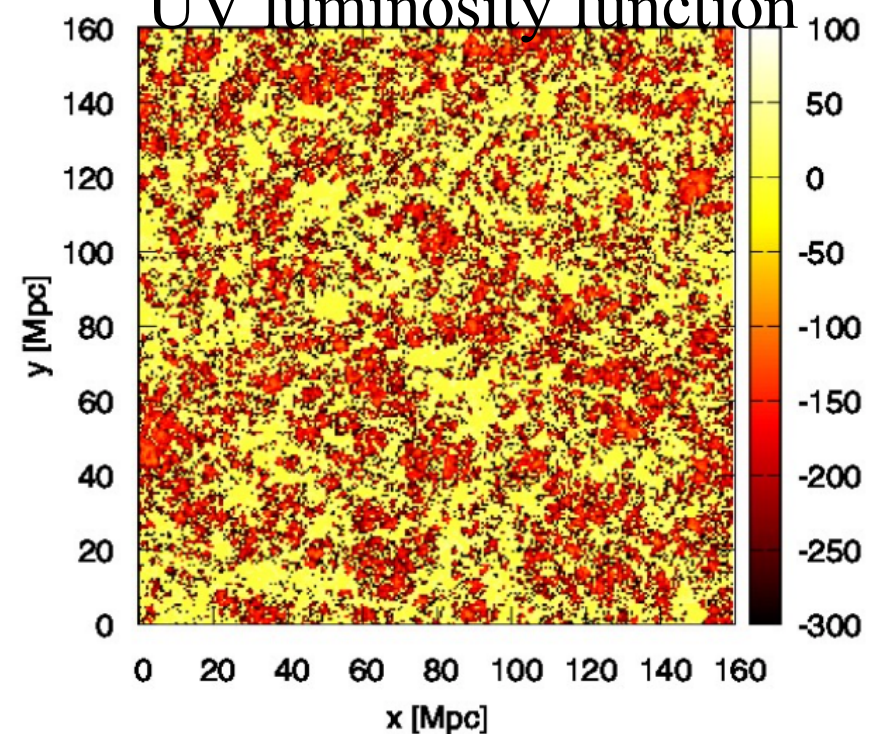
中性水素割合を揃えて作成した21cmの輝度温度分布

Massive galaxies dominate



Faint galaxies dominate

$f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}})$  & steep faint-end slope of UV luminosity function

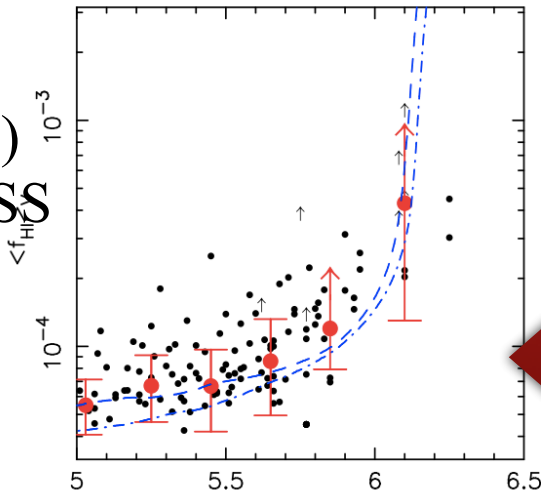


電離バブルサイズ分布は”ionizing luminosity function”の情報を保持

SKAの時代では、 $f_{\text{esc}}(M_{\text{halo}})$ の検証が可能かもしれない

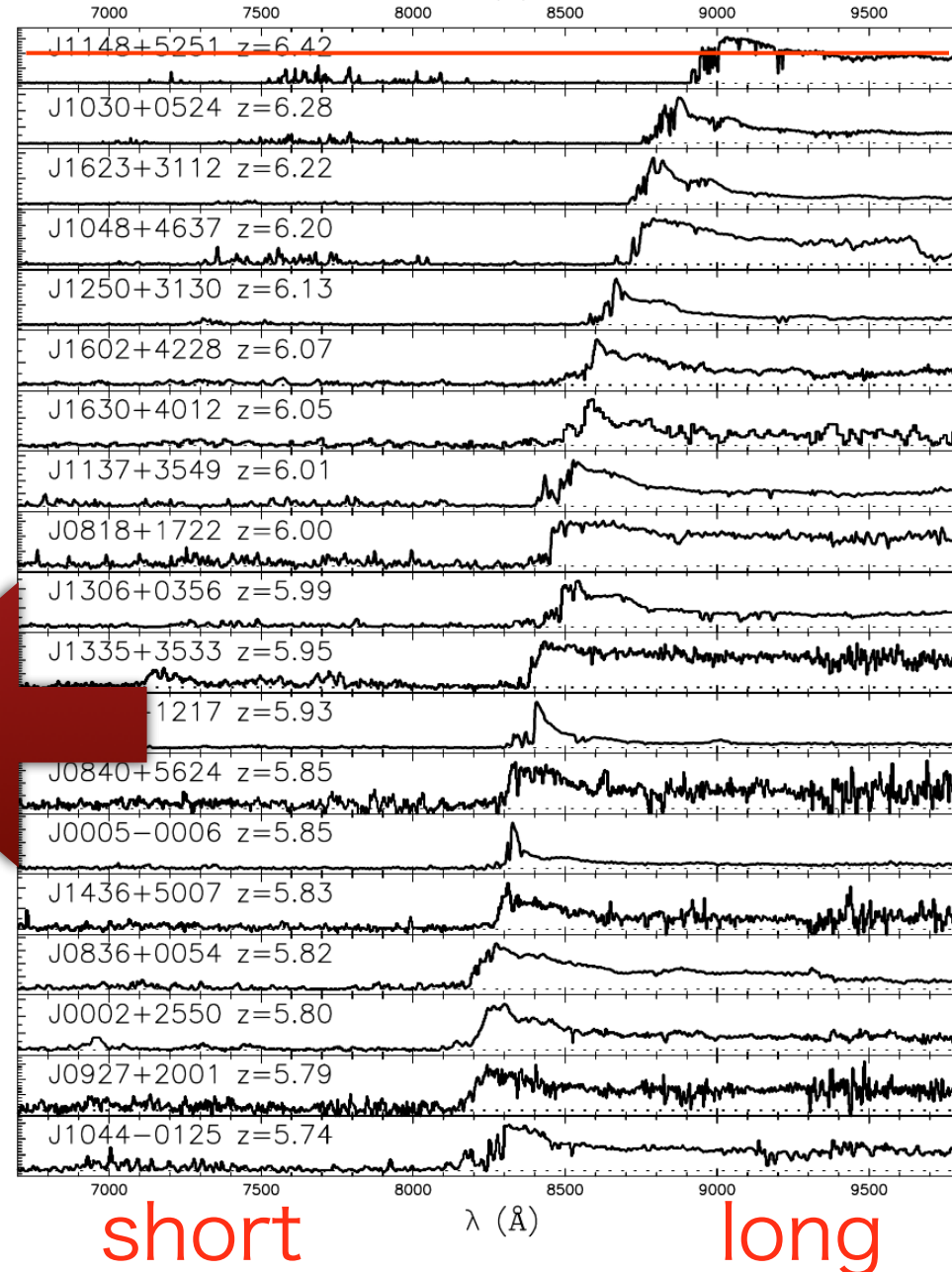
- Ly $\alpha$  absorption lines imprinted on QSO spectra. (Gunn, Peterson 1965)

Fan+(2006)  
from 19 SDSS  
QSOs



- HeIIでも同様のアプローチで  $z_{\text{HII}} > 2.8$  (Worseck et al. 2014) (weakly constrained)

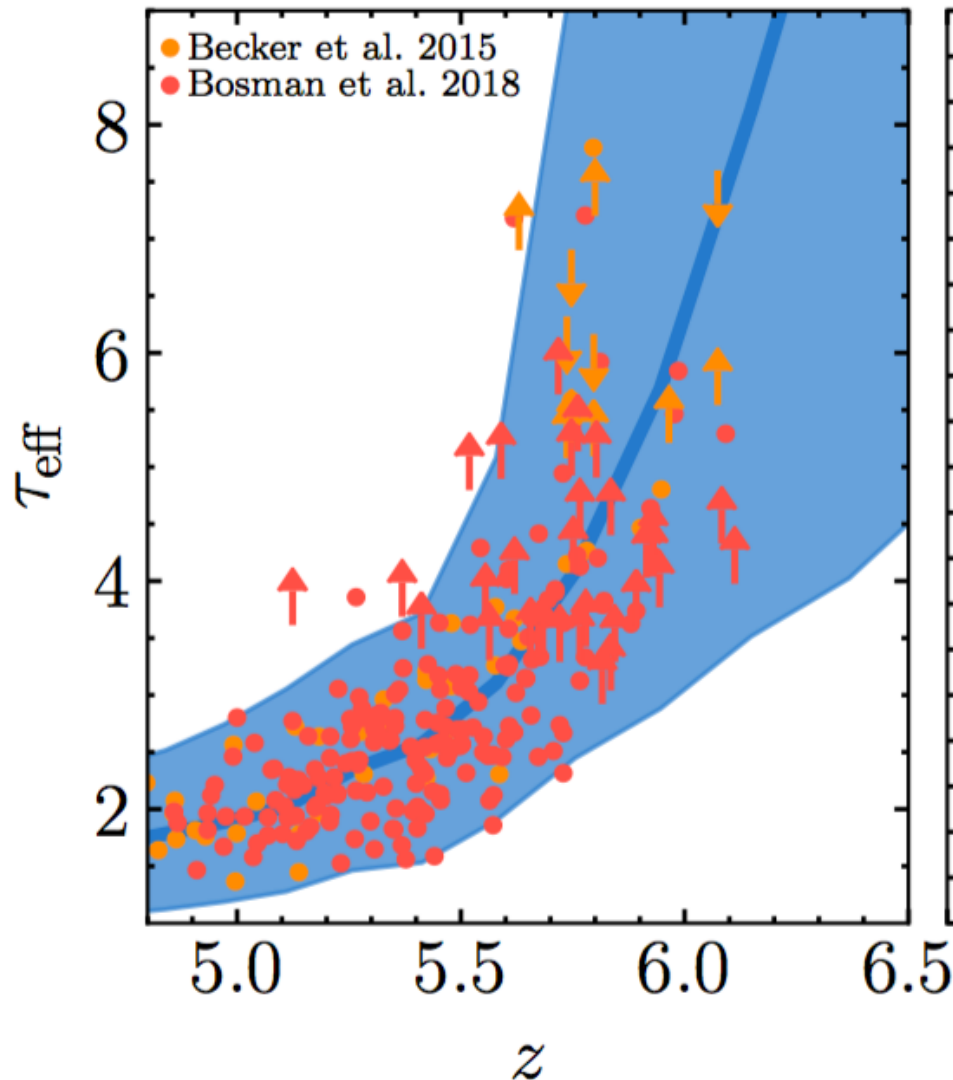
$$\lambda = 1216 \text{ \AA} \times (1+z)$$





視線ごとのLy $\alpha$  optical depthに大きなばらつき

z<6でも100Mpc以上のスケールで中性領域が残っている可能性(Becker+15)



再結合率

$$n_{\text{HI}} \propto \frac{\alpha(T)n_e n_{\text{HIII}}}{\Gamma_{\text{HI}}}$$

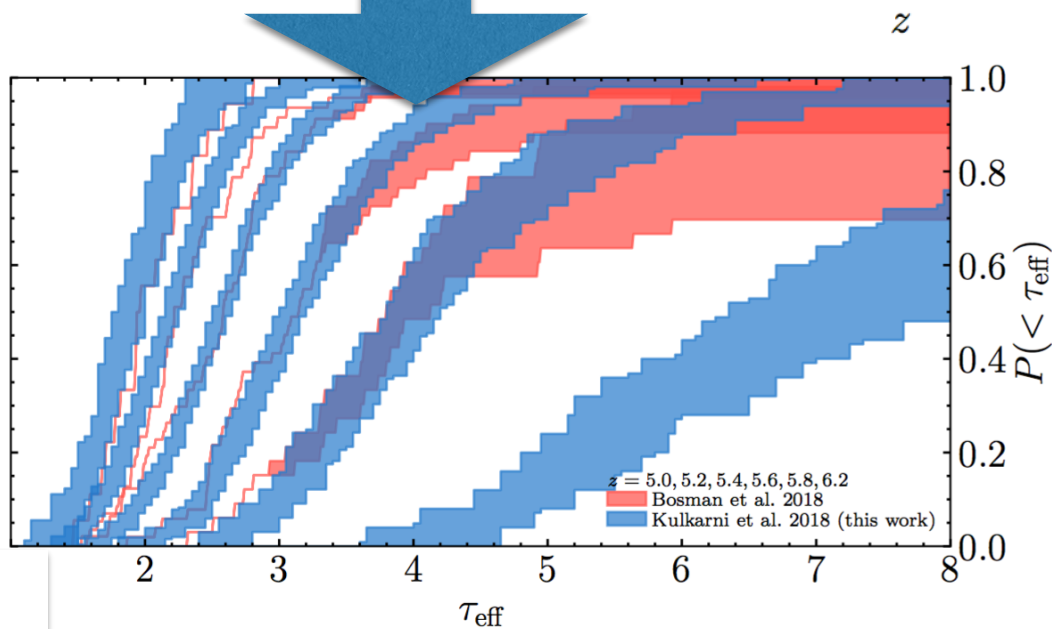
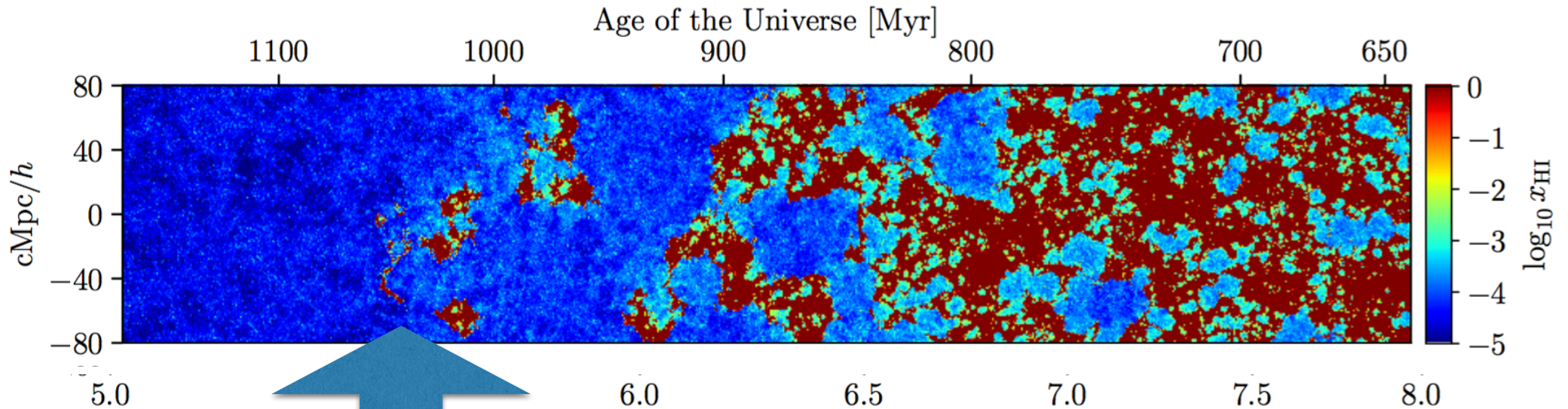
光電離率

z<6でも光電離率 and/or 温度にlarge scaleでの非一様性が残っていることを示唆

# 電離史：QSO吸収線系

Kulkarni+18: Post-processing radiative transfer simulation

再電離がこれまで考えていたより遅い時期に完了していれば観測と整合的



$z=5.0-6.2$ での光学的厚  
みの頻度分布

シミュレーション(青)

観測(赤)

## ■ Lyman Alpha Emitter (LAE)

\* 高赤方偏移銀河の一種でLy $\alpha$ で明るい

\* Ly $\alpha$ 光子は、銀河内の再結合とHI衝突励起に起因

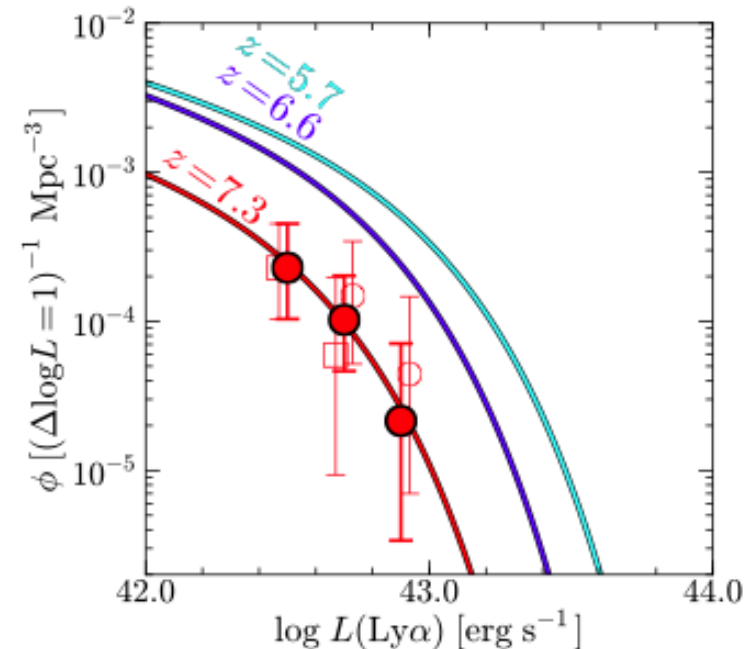
## ■ LAEの数がhigh-zで減少

=>IGMによる減光と解釈できる

$f_{\text{HI}}$ の赤方偏移進化に焼き直すためには、進化LAEのintrinsicな赤方偏移進化とを切り分ける必要がある

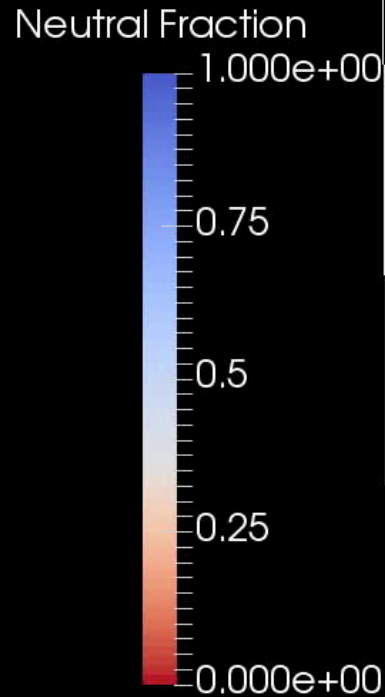
**目的：最新のHSCの観測結果とシミュレーションとの比較から $f_{\text{HI}}$ に制限をつける**

Ly $\alpha$  Luminosity functions  
@  $z=5.7, 6.6,$  and  $7.3$



# Cosmic Reionization

From  $z=20$  to  $z=6$



$4096^3$  particles for  $N$ -body  
( $M_{h,\min}=2.5 \times 10^7 M_{\text{sun}}$ )  
 $256^3$  grids for RT  
( $dx=0.6 \text{ Mpc}$ )

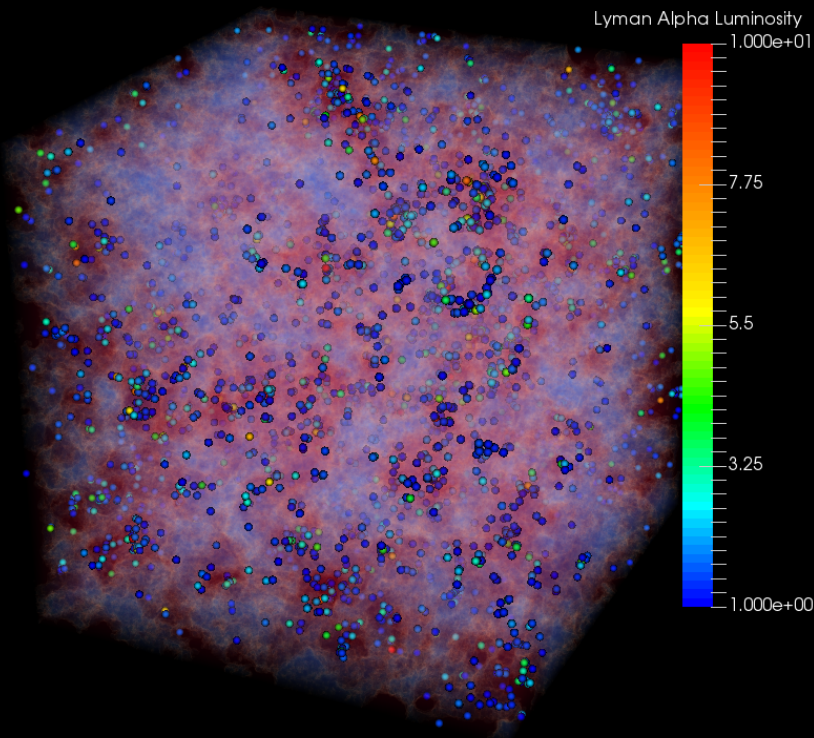
銀河が光源であると仮定

160 Mpc

電離光度や  $f_{\text{esc}}$  は cosmological RHD から採用 (see KH+13, KH+16)

# Distribution of Observable Ly $\alpha$ Emitting Galaxies

Intrinsic LAEs at  $z=7.3$



From RHD simulation

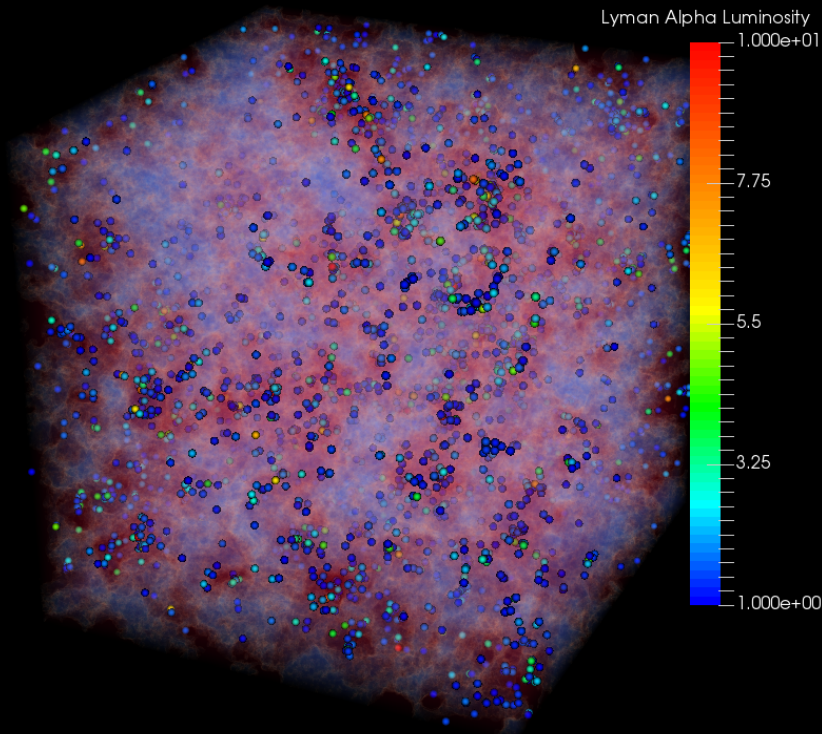
$$L_{\alpha,\text{int}} \approx 10^{42} \left( \frac{M_{\text{h}}}{10^{10} M_{\odot}} \right)^{1.1} [\text{erg/s}],$$

+ scatter

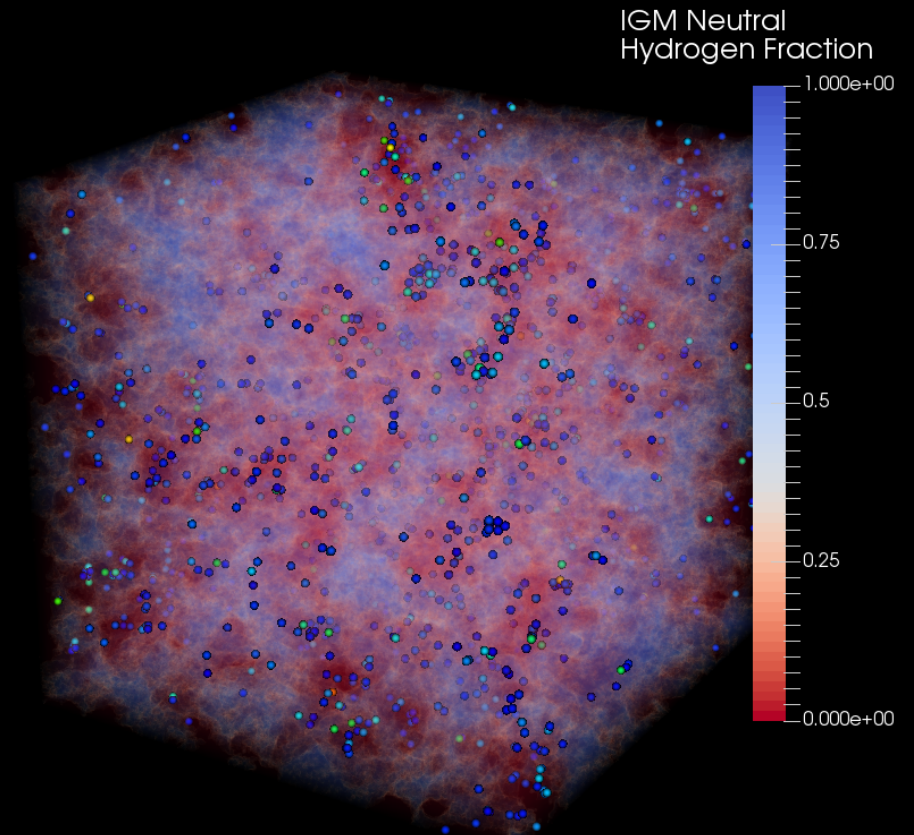


# Distribution of Observable Ly $\alpha$ Emitting Galaxies

Intrinsic LAEs at  $z=7.3$



Observable LAEs at  $z=7.3$



From RHD simulation

$$L_{\alpha, \text{int}} \approx 10^{42} \left( \frac{M_h}{10^{10} M_{\odot}} \right)^{1.1} [\text{erg/s}],$$

+ scatter

$\langle \tau \rangle \propto M_{\text{halo}}^{1/3}$   
Ly $\alpha$  escape fraction : Parameter

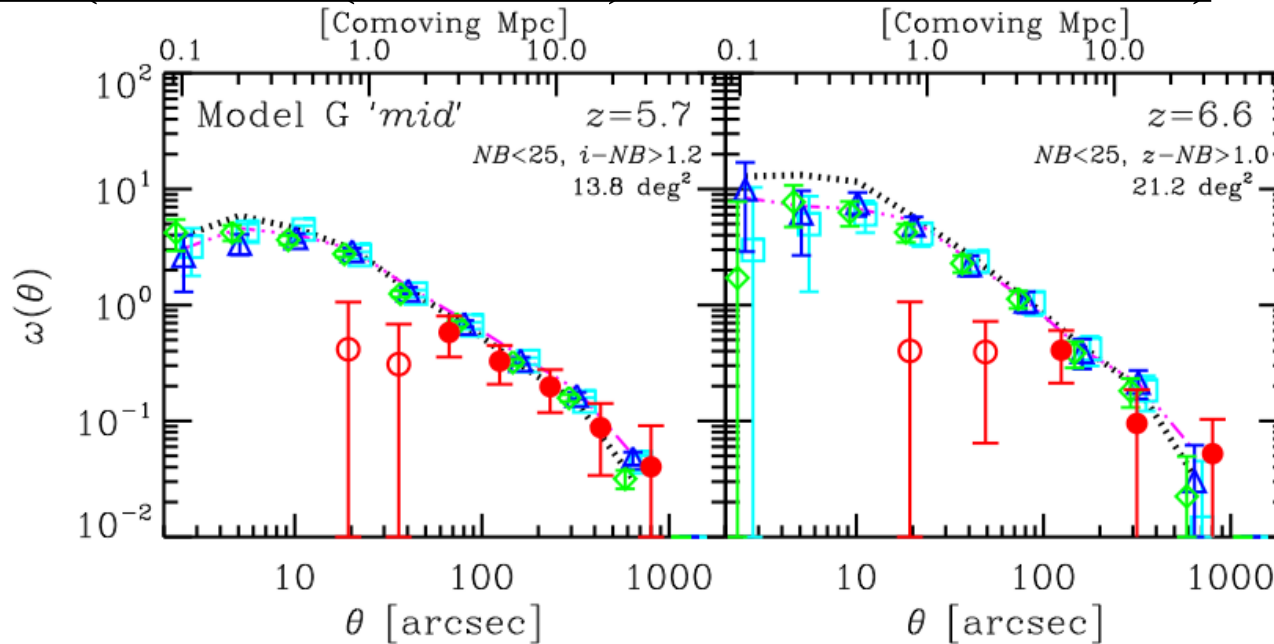
$$L_{\alpha, \text{obs}} = f_{\text{esc}, \alpha} T_{\alpha, \text{IGM}} L_{\alpha, \text{int}}.$$

Ray-tracing through the IGM  
(Yajima, Sugimura, KH+, 2018)



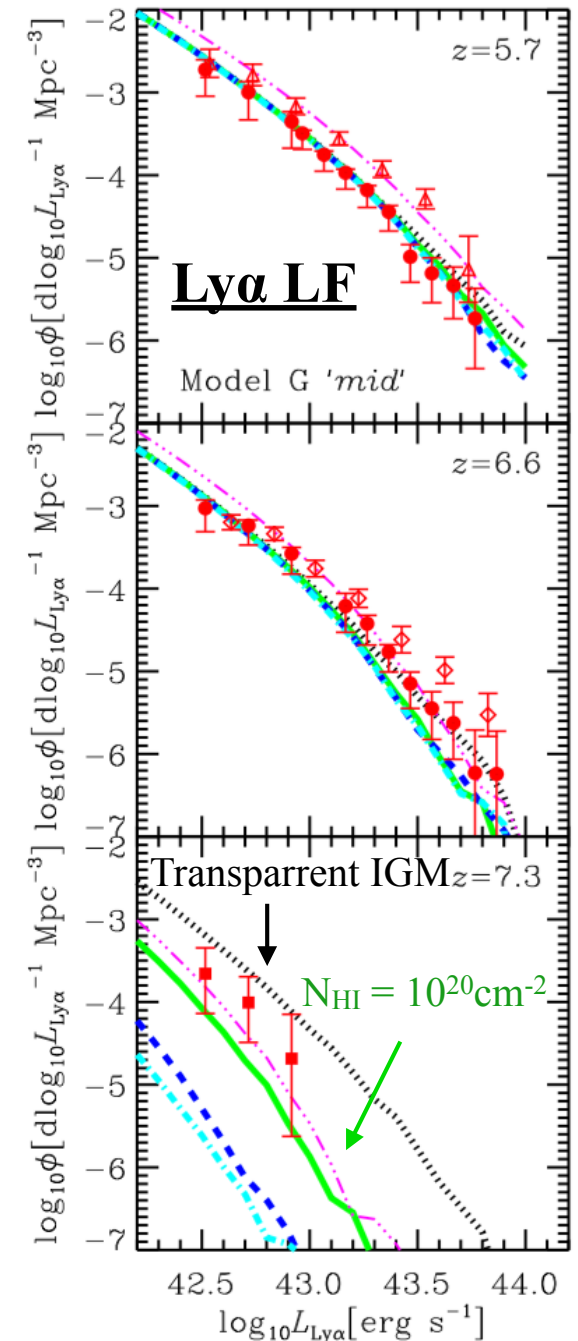
- 観測されるLAEの高度関数、角度相関を再現

## ACF (Obs data (red circles) from Ouchi et al. 2018)



$$f_{\text{HI}} = 0.5^{+0.1}_{-0.3}$$

@ $z=7.3$  Inoue, KH+ (2018),  
from the comparison between the latest HSC data and Our simulation



## 電離光子源

- やはり銀河という意見が優勢.
    - Escape Fractionの研究は進んでおり、理論・観測的に~10%(再電離を維持できる)値が示唆れる.しかしお互いみて質量スケールは異なる
- ➡ 21cm線の観測では、 $f_{\text{esc}}$ の質量依存性もわかるかも.

## 電離史

- $z < 6$ でもHI fractionに大きなスケールで非一様性  
再電離の完了時期はこれまで考えていたより遅いか  
もしれない
- 最新のHSCの観測結果と大規模シミュレーションとの比較から、 $f_{\text{HI}} = 0.5^{+0.1}_{-0.3}$  @ $z=7.3$ の制限