

# ダストのサイズ分布進化を考慮した 初代銀河形成モデルと 宇宙再電離

★ 山澤 大輔 (北海道大学, 宇宙物理学研究室)

<共同研究者>

羽部 朝男 (北海道大学)

小笹 隆司 (北海道大学)

野沢 貴也 (東京大学 IPMU)

平下 博之 (台湾中央研究院)

## 1. INTRODUCTION

高赤方偏移 ( $z > 5$ ) のダスト  
SNeによるダストの生成と破壊  
ダストと水素分子の形成効率  
ダスト量と低質量星形成  
研究目的

## 2. MODEL ①

one-zone 銀河モデル  
ダストモデル

## 3. RESULTS ①

銀河進化へのダスト破壊の影響  
SN 周りのガス密度への依存性

galaxy

## 4. MODEL ②

primordial gas 星形成モデル  
再電離モデル

## 5. RESULTS ②

星形成率と再電離過程  
 $Z_{\text{crit}}$  の値は？

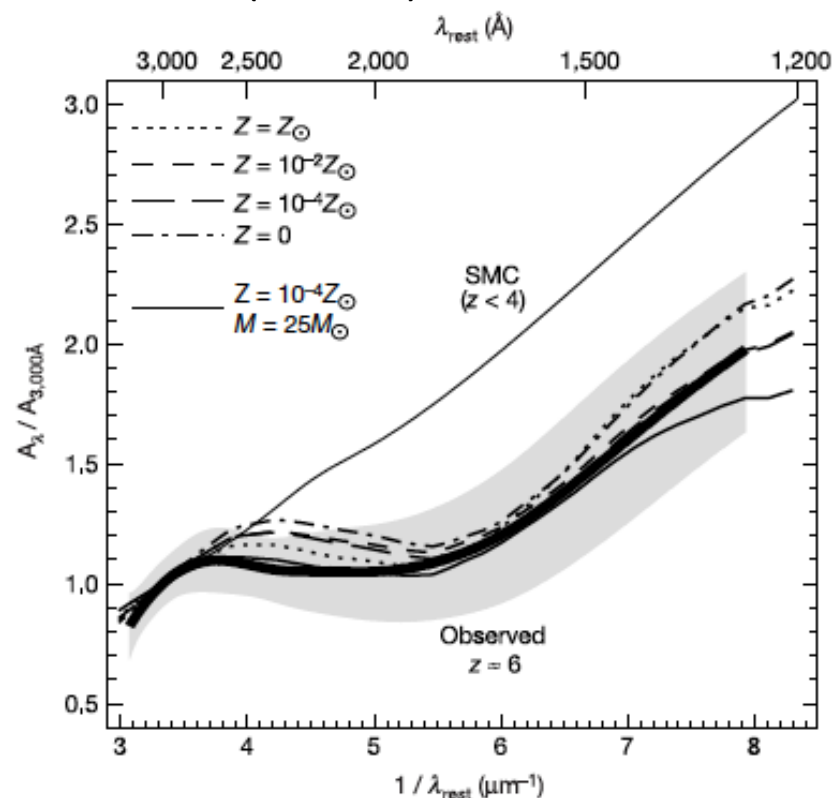
reionization

## 6. CONCLUSION

# 高赤方偏移 ( $z > 5$ ) のダスト

- $z > 4.9$  の QSO で、  
 $10^8 - 10^9 M_{\text{sun}}$  のダストが  
 観測されている。  
 ( Maiolino+ 04 )
- ダストの生成
  - ・ 高赤方偏移 ( $z > \sim 5$ )  $\rightarrow$  SNe  
 high mass stars
  - ・  $z < 5$  では、AGB からの  
 寄与が大きくなる。
- ダストの重要性
  - ① 水素分子の形成効率
  - ② 低質量星の形成過程
  - (③ 銀河の SED)

<QSO ( $z = 6.2$ ) の減光曲線>



Maiolino+ 04

→ SNe II のダストモデルによく合う

# SNe によるダストの生成と破壊

## ■ SN II, PISN によるダスト生成

Nozawa+ 03 , Schneider+ 04

## ■ forward shock によるISM中のダスト破壊

Nozawa+ 06

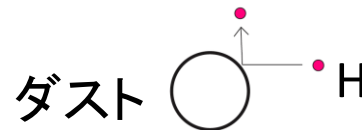
## ■ reverse shock によるダスト破壊

1-D : Bianchi and Schneider 07

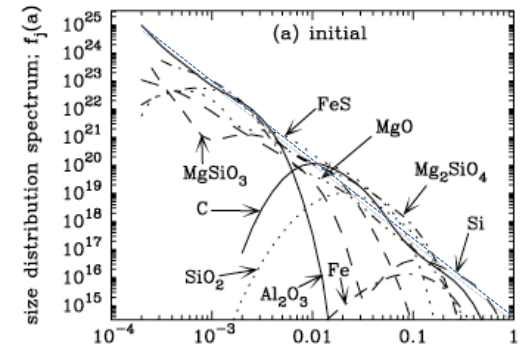
Nozawa+ 07

Nath+ 08

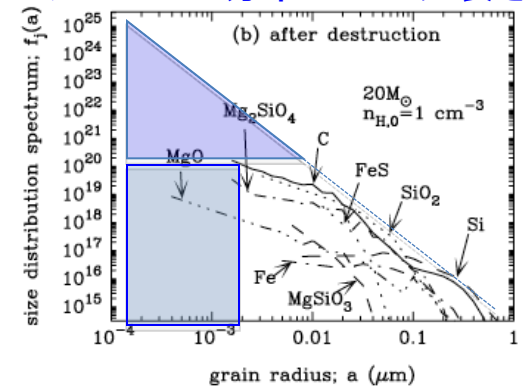
3-D : Silvia+ 10



sputtering



小さいサイズのダストが効果的に破壊される



Nozawa+ 07

focus !

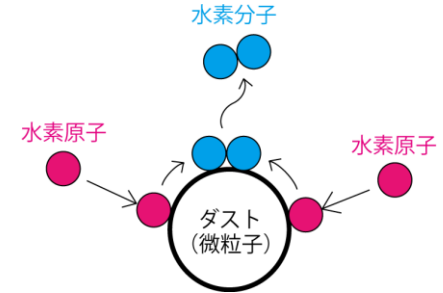
水素分子の形成効率ダストのサイズ分布に依存する

→ 破壊によるダストのサイズ進化を考慮することが重要 !

# ダストと水素分子の形成効率

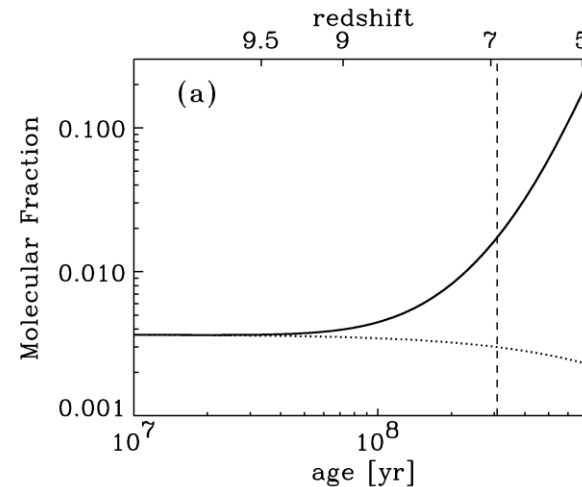
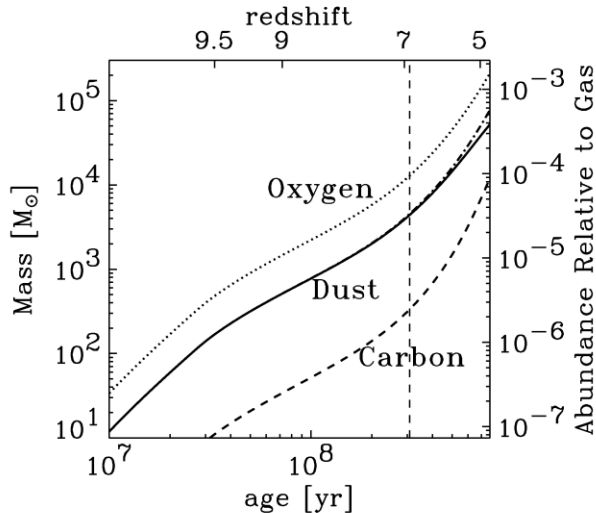
## ■ 水素分子形成

ダスト上のほうが、気相反応より効率がよい。



## ■ ダストを考慮した高赤方偏移 ( $z > 5$ ) の銀河形成

★ ダストサイズ  $a = 0.03 \mu\text{m}$  を仮定



→ 星形成

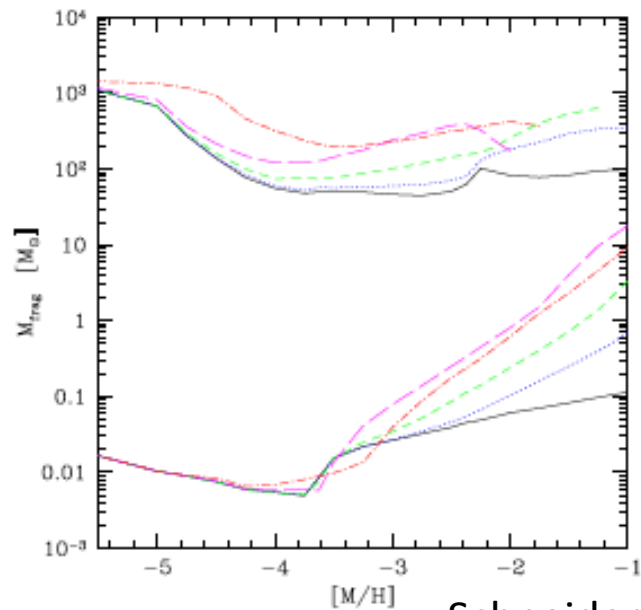
Hirashita and Ferrara 02

→ ダストの増加と共に、molecular fraction も急激に増加

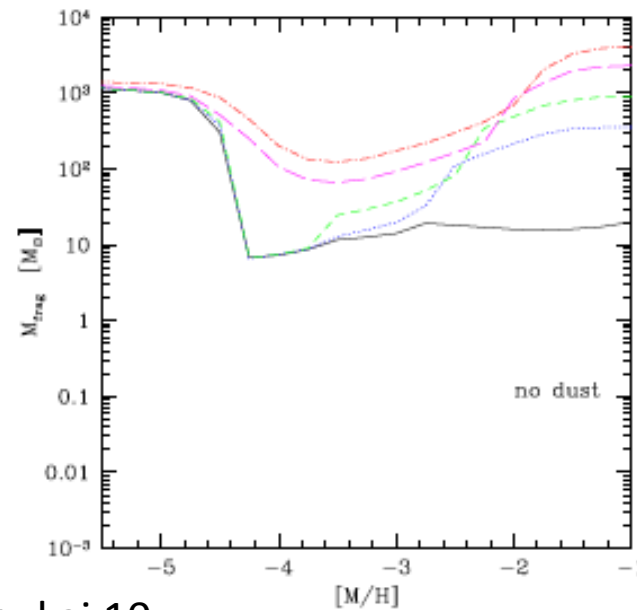
# ダスト量と低質量星形成

## ■ ダストの cooling による低質量星形成

( Schneider+ 03 , Omukai+ 05 , Schneider+ 06 , Schneider and Omukai 10 )



Schneider and Omukai 10



→ Pop III から Pop II の遷移は、dust による cooling に依存

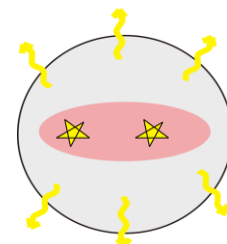
★ ダストは、Schneider+ 04 のモデル

$$Z_{\text{crit}} \sim > 10^{-6} Z_{\text{sun}}$$

# 研究目的

- ① ダストのサイズ進化を考慮して、  
銀河の進化(水素分子形成と星形成)モデルを構築する。
  
- ② ダストの進化、水素分子形成を考慮した、  
銀河の星形成モデルで、再電離過程を調べる。

# one-zone 銀河モデル



## ■ 星形成 ( Pop II )

$$\Psi(t) = \frac{f_{\text{H}_2}(t) M_{\text{gas}}(t)}{t_{\text{cir}}(z_{\text{vir}})}$$

- Salpeter IMF:  $0.1 - 60 M_{\text{sun}}$   
→ SN II (  $8 - 40 M_{\text{sun}}$  )

## ■ 熱的・化学的進化

- 気相における、 $\text{H}_2$  形成の化学反応ネットワーク
- 熱的進化 = cooling (  $\text{H}_2, \text{H}, \text{C}_I, \text{C}_{II}, \text{O}_I$  ) + heating ( 星からの光子 )

## ■ ダストのサイズ分布の進化を考慮した、ダスト上の水素分子形成

$$\left[ \frac{df_{\text{H}_2}}{dt} \right]_{\text{dust}} = 2R_{\text{dust}} \mathcal{D} n_{\text{H}} f_0$$

$$= \int f_0 f_j(a) \pi a^2 \bar{v} S da \quad \mathcal{D} \equiv \int \frac{4\pi a^3 \rho_j f_j(a)}{3n_{\text{H}} m_{\text{H}}} da$$

反応係数  $\underline{R_{\text{dust}}(a)} \mathcal{D} = \int \left( \frac{3m_{\text{H}} \bar{v} S}{8a\rho_j} \right) \left( \frac{4\pi a^3 \rho_j f_j(a)}{3n_{\text{H}} m_{\text{H}}} \right) da,$

$a$  : grain size



# ダストモデル

## ■ 超新星 (SN) によるダストのサイズ進化

$$\frac{dM_{d,j}(a,t)}{da} = \overline{m_{d,j}(a)}\gamma_{\text{SN}}(t) \quad \text{生成}$$

$$- \frac{M_{\text{swept}}}{M_{\text{ISM}}(t)}\gamma_{\text{SN}}(t) \times \left\{ M_{d,j}(a,t) - \frac{d}{da} \int_0^{\infty} da' \eta_j(a,a') f_j(a',t) \rho_j \frac{4\pi}{3} a'^3 \right\} \quad \text{ISMでの破壊}$$

$$- \Psi(t) \frac{M_{d,j}(a,t)}{M_{\text{ISM}}(t)} \quad \text{星になる}$$

$a$  : grain size

$j$  : grain species

$f_j(a,t)$  : size distribution function

$M_{d,j}(a,t)$  ( $M_{d,j}(a) = \rho_j \frac{4\pi}{3} a^3 f(a)$ )

: dust mass distribution

$\overline{m_{d,j}(a)}$  : typical dust mass produced in a SNe II

$\gamma_{\text{SN}}$  : SN rate

$M_{\text{swept}}$  : gas mass swept up by a shock

$M_{\text{ISM}}$  : total mass of gas and dust in the ISM

## ■ ダストの生成 : $m_{d,j}(a)$ は、Nozawa+ 03

## ■ ダストの破壊

▪ reverse shock あり :  $m_{d,j}(a)$  は、Nozawa+ 07

▪ forward shock :  $\eta_j(a, a')$  は、Nozawa+ 06 のモデルで計算

(初期サイズ分布への依存なし)

## ■ $n_{\text{ISM,SN}}$ : パラメーター、 $E_{51} = 1$ を仮定

$$f_{\text{fin}}(a)da = \eta(a, a') f_{\text{ini}}(a')da'$$

# 銀河進化へのダスト破壊の影響

■  $(M_{\text{vir}}, z_{\text{vir}}) = (10^9 M_{\text{sun}}, 10)$  の銀河の進化

reverse

×

×

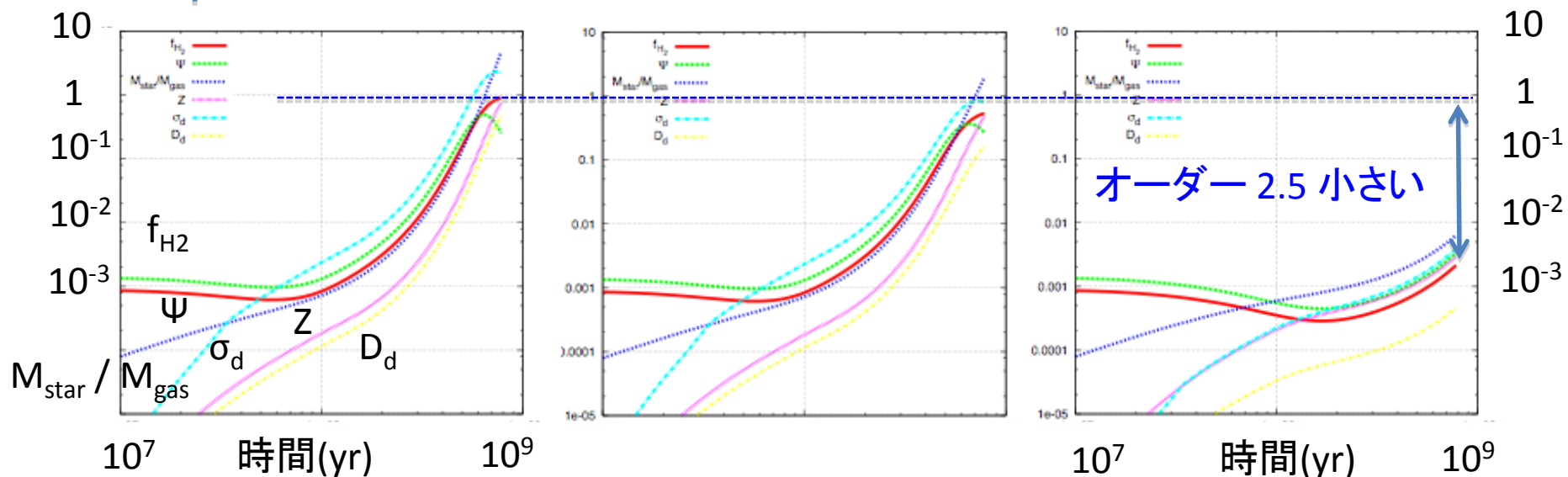
○

forward

×

○

○

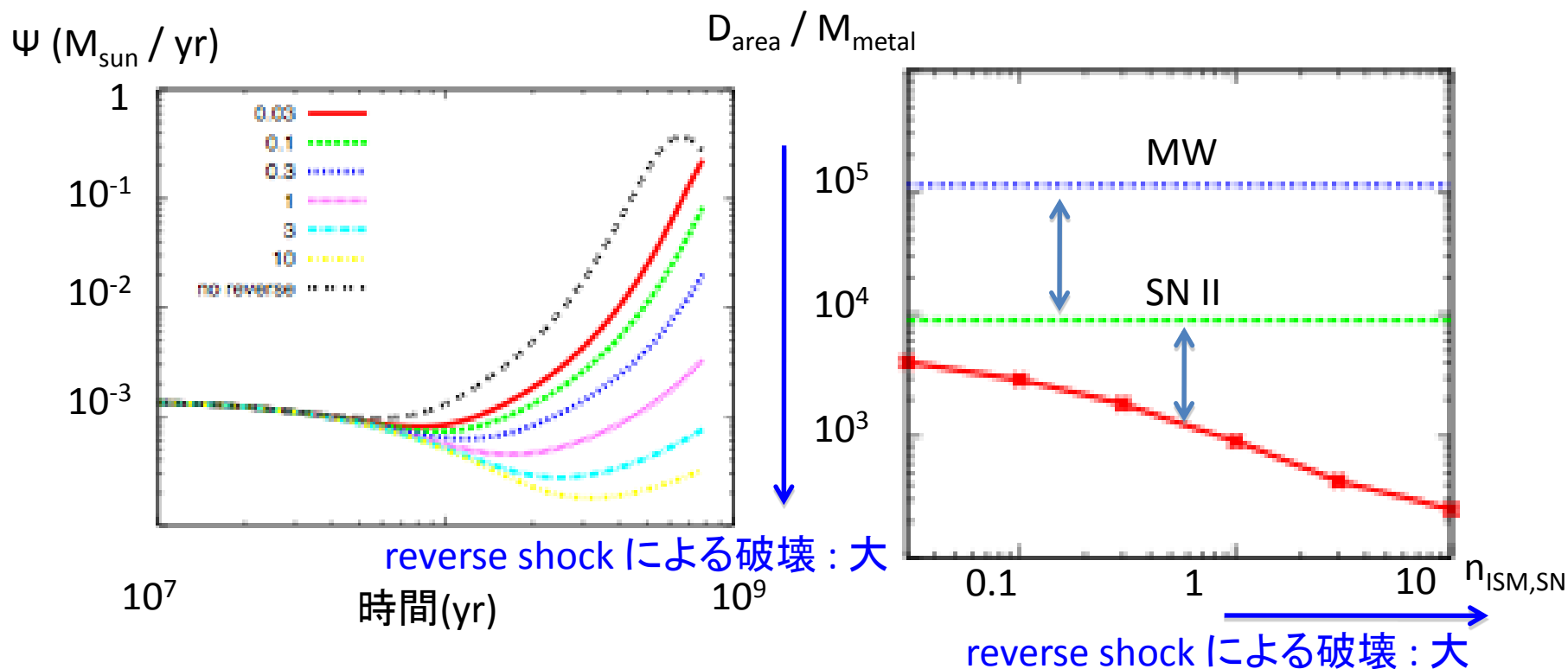


■ 銀河の年齢  $\sim 1\text{Gyr}$  で比較:

- 衝撃波によるダストの破壊を考慮すると、ダストによる水素分子形成が進まない。
- 星形成率が小さい。

# SN 周りのガス密度への依存性

■  $(M_{\text{vir}}, z_{\text{vir}}) = (10^9 M_{\text{sun}}, 10)$  の銀河の進化



- reverse shock によるダスト破壊効率は、SN 周りのガス密度  $n_{\text{ISM,SN}}$  に強く依存。
- $n_{\text{ISM,SN}}$  によって、 $D_{\text{area}} / M_{\text{metal}}$  は、大きく異なる  $\rightarrow$  星形成率に大きく影響

# primordial gas での星形成モデル

## ■ critical metallicity : $Z_{\text{crit}}$

金属量  $Z < Z_{\text{crit}}$  のときに、Pop III.1 や Pop III.2 ができる。

## ■ Pop III.1 ( e.g. Yoshida+ 06 )

1000 K  $< T_{\text{vir}} < 10000$  K の DM halos

→ Pop III.1 ( 100- 500  $M_{\text{sun}}$ , Salpeter IMF ) → PISN ( 140- 260  $M_{\text{sun}}$  )

- Pop III.1 の星形成率 ( Trenti and Stiavelli 09 ) : cooling タイムスケールから評価  
( LW feedback を考慮 : Machacek+ 03 の fitting formula )

## ■ Pop III.2 ( HD cooling ) ( e.g. Nakamura and Umemura 02 , Yoshida+ 07 )

10000 K  $< T_{\text{vir}}$  の DM halos

→ Pop III.2 ( 10- 100  $M_{\text{sun}}$ , Salpeter IMF ) → SN II ( 10- 40  $M_{\text{sun}}$  )

- Pop III.2 の星形成率

$$\Psi(t) = \frac{f_{\text{H}_2}(t)M_{\text{gas}}(t)}{t_{\text{cir}}(z_{\text{vir}})}$$

# 再電離モデル

## ■ 電離光子 ( Greif and Bromm 06 )

$$\frac{1}{n_b} \frac{dn_{\text{ion}}(z)}{dz} = \frac{1}{\rho_m} \frac{\Omega_m}{\Omega_b} f_{\text{esc}} \eta_{\text{ion}} \Psi_*(z) \left| \frac{dt}{dz} \right|$$

宇宙論的星形成率

$n_{\text{ion}}$  : comoving density of ionizing photons

$f_{\text{esc}}$  : escape fraction

$\eta_{\text{ion}}$  : number of ionizing photons  
emitted per stellar baryon

$\eta_{\text{ion}}$  は、Schaerer 02 のモデルをIMFで重み付け

## ■ escape fraction : $f_{\text{esc}}$ ( e.g. Abel+ 07 , Yoshida+ 07, Gnedin+ 08 , Wise+09, Yajima+09 )

パラメータ :  $f_{\text{esc,popIII.1}}=0.7$  ,  $f_{\text{esc,popIII.2}}=0.3$  ,  $f_{\text{esc,popII}}=0.1$  を仮定

## ■ 電離領域の方程式 ( Wyithe and Loeb 03 )

$$\frac{dQ_{\text{ion}}(z)}{dz} = \frac{1}{n_b} \frac{dn_{\text{ion}}(z)}{dz} - \alpha_B n_b C(z) Q_{\text{ion}}^2(z) (1+z)^3 \left| \frac{dt}{dz} \right|$$

電離

再結合

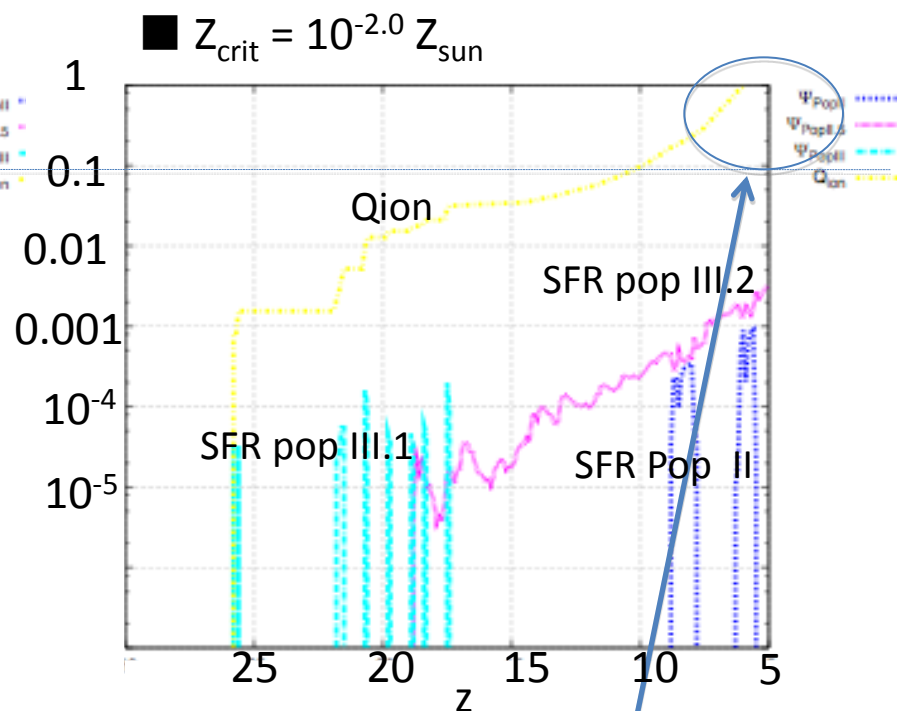
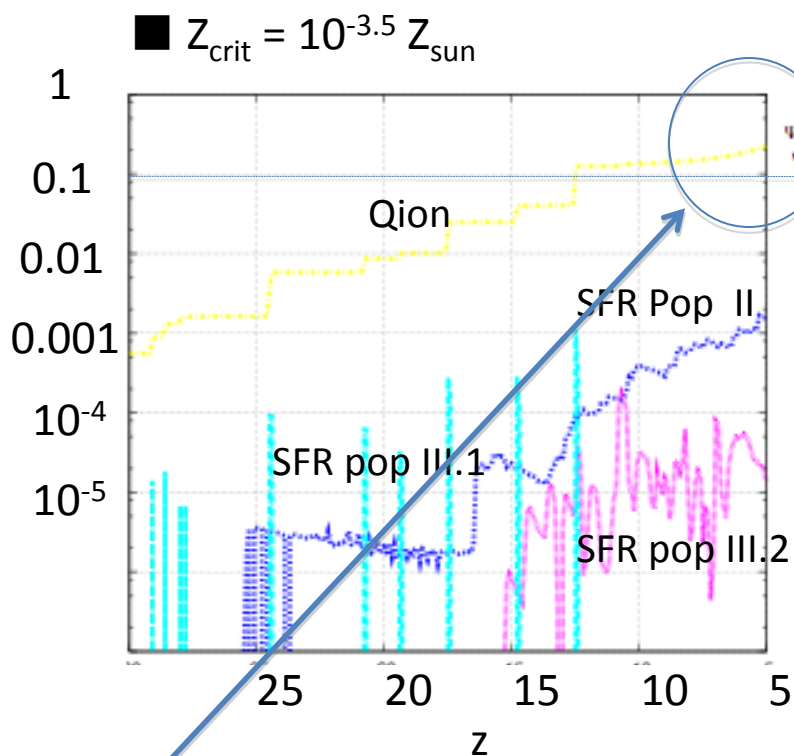
$Q_{\text{ion}}$  : volume fraction of ionizing regions

$\alpha_B$  : recombination coefficient

$C(z)$  : clumping factor

# 星形成率と再電離過程

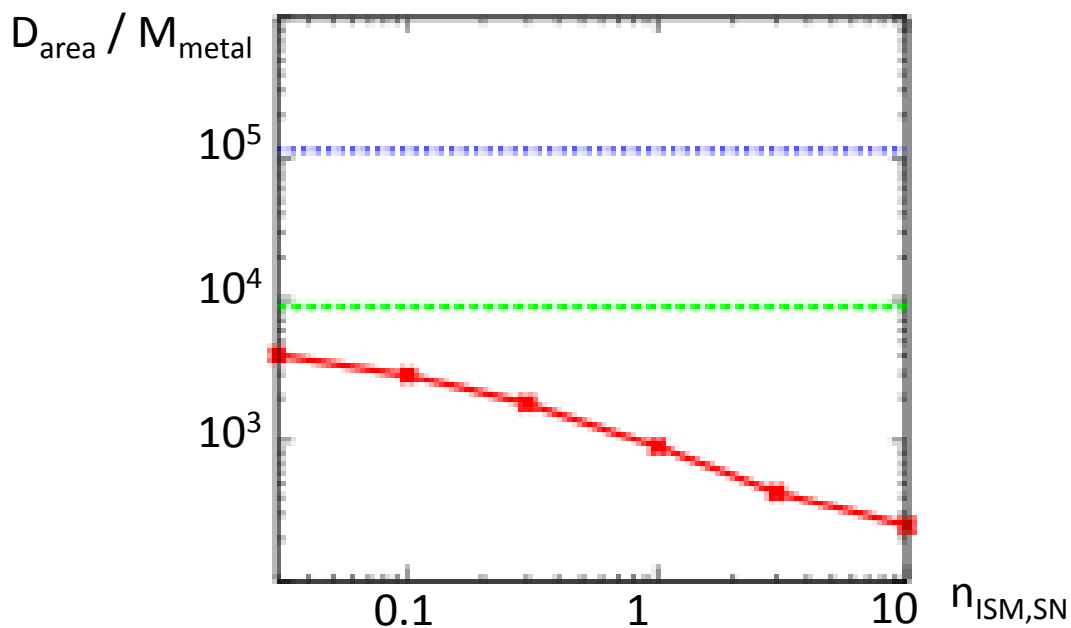
- $1 \text{ Mpc}^{-3}$  の星形成率 ( $10^7 M_{\text{sun}} < M_{\text{halo}} < 10^{10} M_{\text{sun}} : z_{\text{fin}} = 5$ ),  $n_{\text{ISM,SN}} = 1 \text{ cm}^{-3}$



■  $z_{\text{crit}} = 10^{-3.5} z_{\text{sun}}$  なら、 $z=5$  で  $Q_{\text{ion}} \sim 0.2$   
再電離に必要な電離光子には、足りない。

■  $z_{\text{crit}} = 10^{-2} z_{\text{sun}}$  なら  
 $z \sim 6$  で  $Q_{\text{ion}} \sim > 1$

# $Z_{\text{crit}}$ の値は？



破壊を考慮すると、ダストの平均サイズは大きくなる。

↓

ダストによる cooling が小さくなって、

$Z_{\text{crit}} = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$  まで低質量星形成への遷移が起こらない可能性を調べる。

# CONCLUSION

- ① 銀河進化モデルの結果 ( $n_{\text{ISM,SN}} = 1 \text{ cm}^{-3}$  の場合)  
ダストの破壊を考慮すると、  
水素分子の割合がオーダー 2.5、星形成率がオーダー 2、  
低下する。  
→ ダストの破壊はきちんと考慮すべき！  
(+ どういう環境で SN が爆発するか調べる必要あり。)



- ② 宇宙論的再電離モデルの結果  
ダストの破壊の効果により、宇宙再電離は大きく影響を受ける。  
 $Z_{\text{crit}} = 10^{-3.5} Z_{\text{sun}}$  の場合、 $z = 5$  で、 $Q_{\text{ion}} < 0.2$ 、  
 $Z_{\text{crit}} = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$  なら、 $z \sim 6$  で、 $Q_{\text{ion}} \sim > 1$  まで電離できる。



## 1. INTRODUCTION

高赤方偏移 ( $z > 5$ ) のダスト  
SNeによるダストの生成と破壊  
ダストと水素分子の形成効率  
ダスト量と低質量星形成  
研究目的

## 2. MODEL ①

one-zone 銀河モデル  
ダストモデル

## 3. RESULTS ①

銀河進化へのダスト破壊の影響  
SN 周りのガス密度への依存性

galaxy

## 4. MODEL ②

primordial gas 星形成モデル  
再電離モデル

## 5. RESULTS ②

星形成率と再電離過程  
 $Z_{\text{crit}}$  の値は？

reionization

## 6. CONCLUSION

おわり