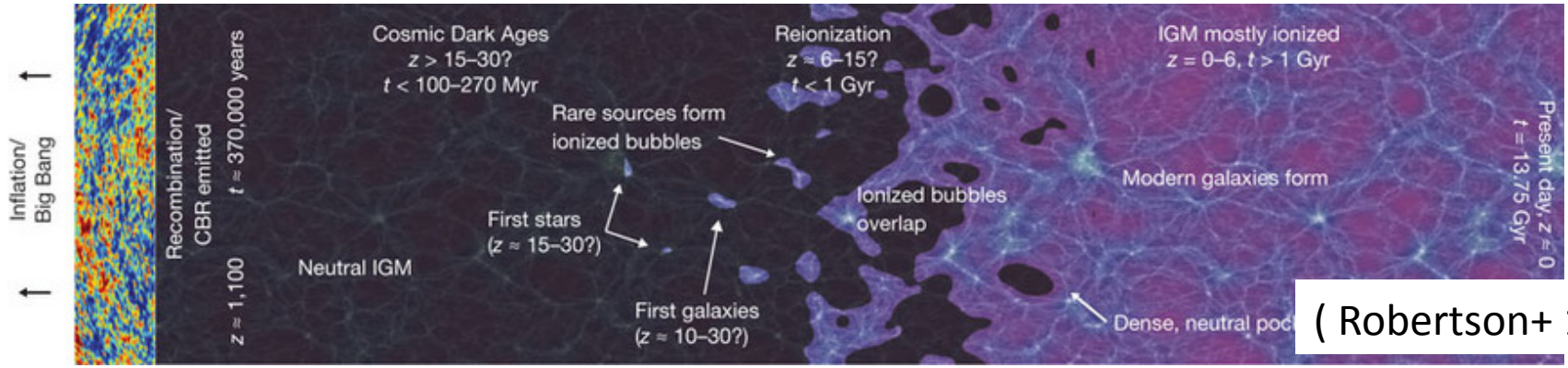
14 / 1 / 23 @ 鹿児島

Pop III-II transition in young galaxies

山澤　大輔
(東北大学)

共同研究者：
平下　博之　(台湾中央研究院)
羽部　朝男　(北海道大学)
小笹　隆司　(北海道大学)
野沢　貴也　(Kavli IPMU, 東京大学)
大向　一行　(東北大学)

Population III 星形成史



(Robertson+ 10)

cosmic recombination
z = 1100
(t = 0.38 × 10^{-3} Gyr)

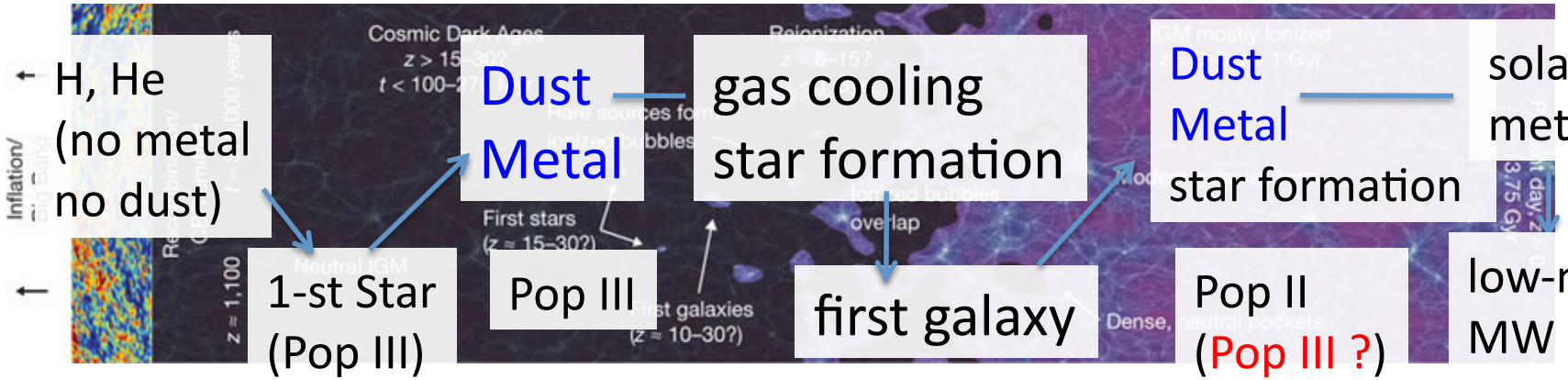
z = 20
(t = 0.19 Gyr)

z : redshift
(time)

z = 6
(t = 0.98 Gyr)

present day
z = 0
(t = 13.7 Gyr)

Population III 星形成史



H, He
(no metal
no dust)

1-st Star
(Pop III)

Dust
Metal

Pop III

gas cooling
star formation

first galaxy

Dust
Metal
star formation

Pop II
(Pop III ?)

solar
metallicity

low-mass stars
MW

cosmic recombination
z = 1100
(t = 0.38 × 10^{-3} Gyr)

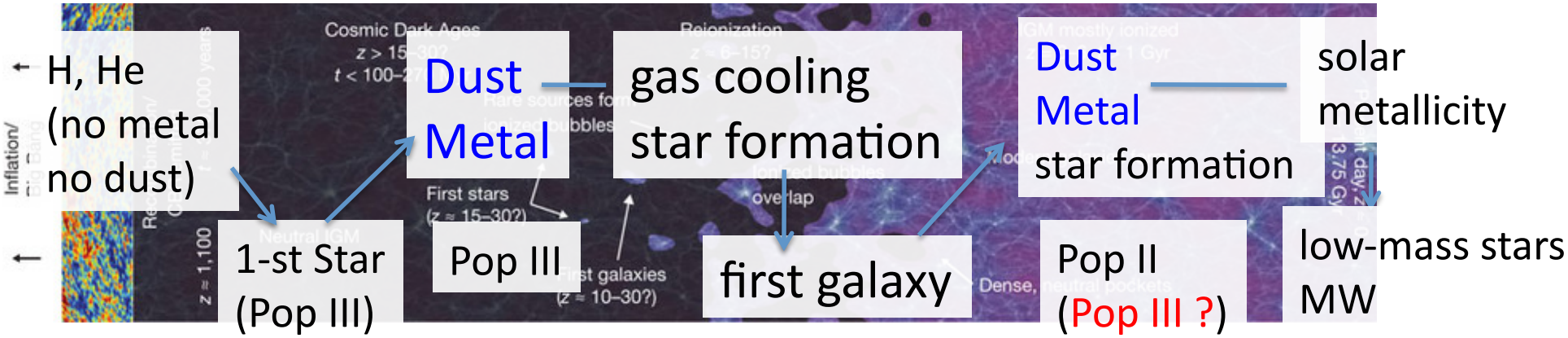
z = 20
(t = 0.19 Gyr)

z : redshift
(time)

z = 6
(t = 0.98 Gyr)

present day
z = 0
(t = 13.7 Gyr)

Population III 星形成史



■ open question :

・Population III 星を形成している銀河(Population III 銀河)は
　どれくらいの質量をもち、どのような時代に存在するのだろうか？
・Population III 銀河はどれくらい存在するのだろうか？

↑ いつどのような環境でPopulation III形成からPopulation I/II星形成へかわるのか？

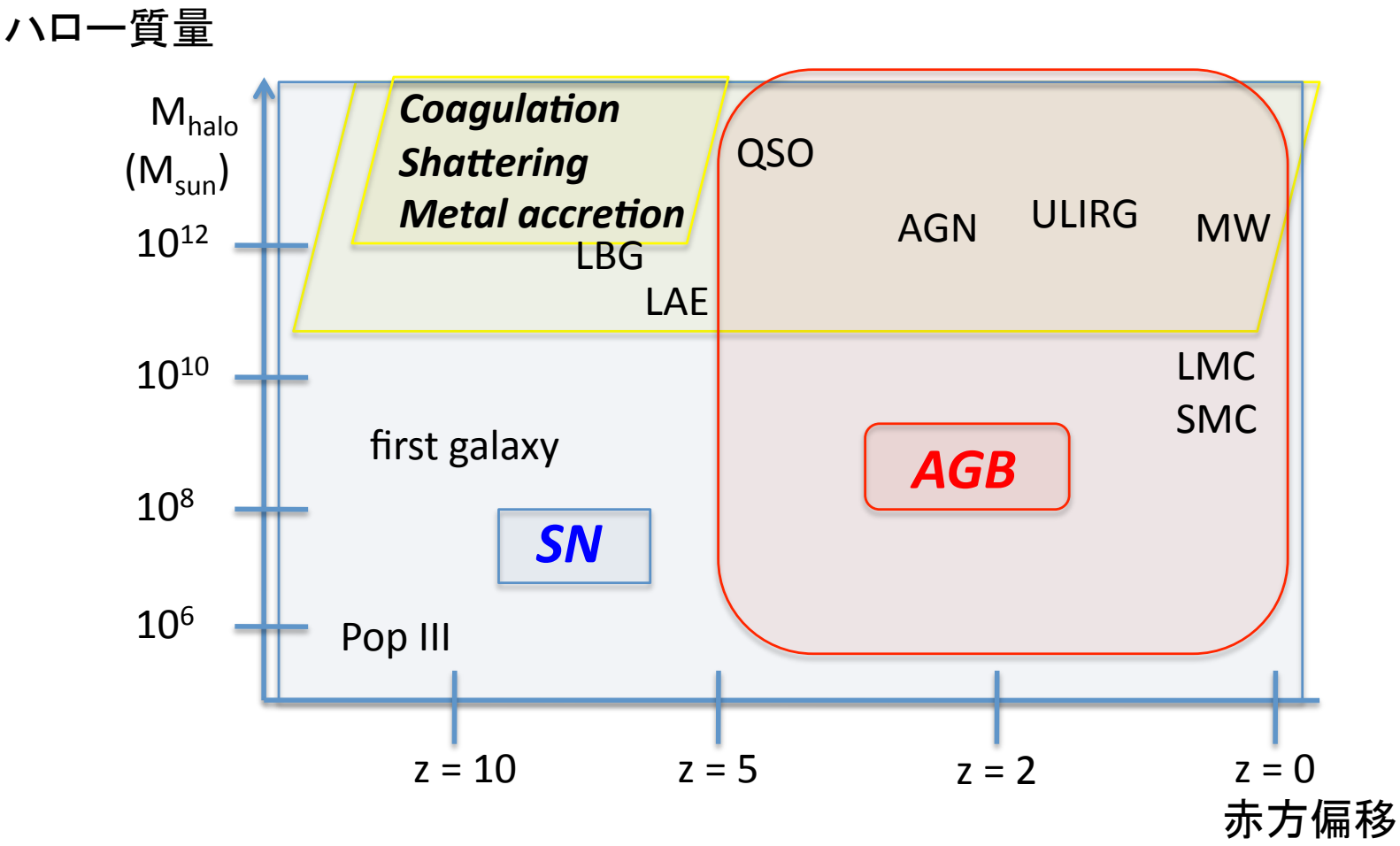
Pop III-II 遷移

■ ダストによるガスの冷却によって Pop III-II 遷移が起こる
(大向さん、千秋さんの講演)。

■ Critical metallicity: $Z_{cr} \sim 10^{-4} - 10^{-6}\ Z_{sun}$

・宇宙初期のダストの不定性

ダスト進化



+ collapse 中のダスト成長（千秋さんの講演）

本研究

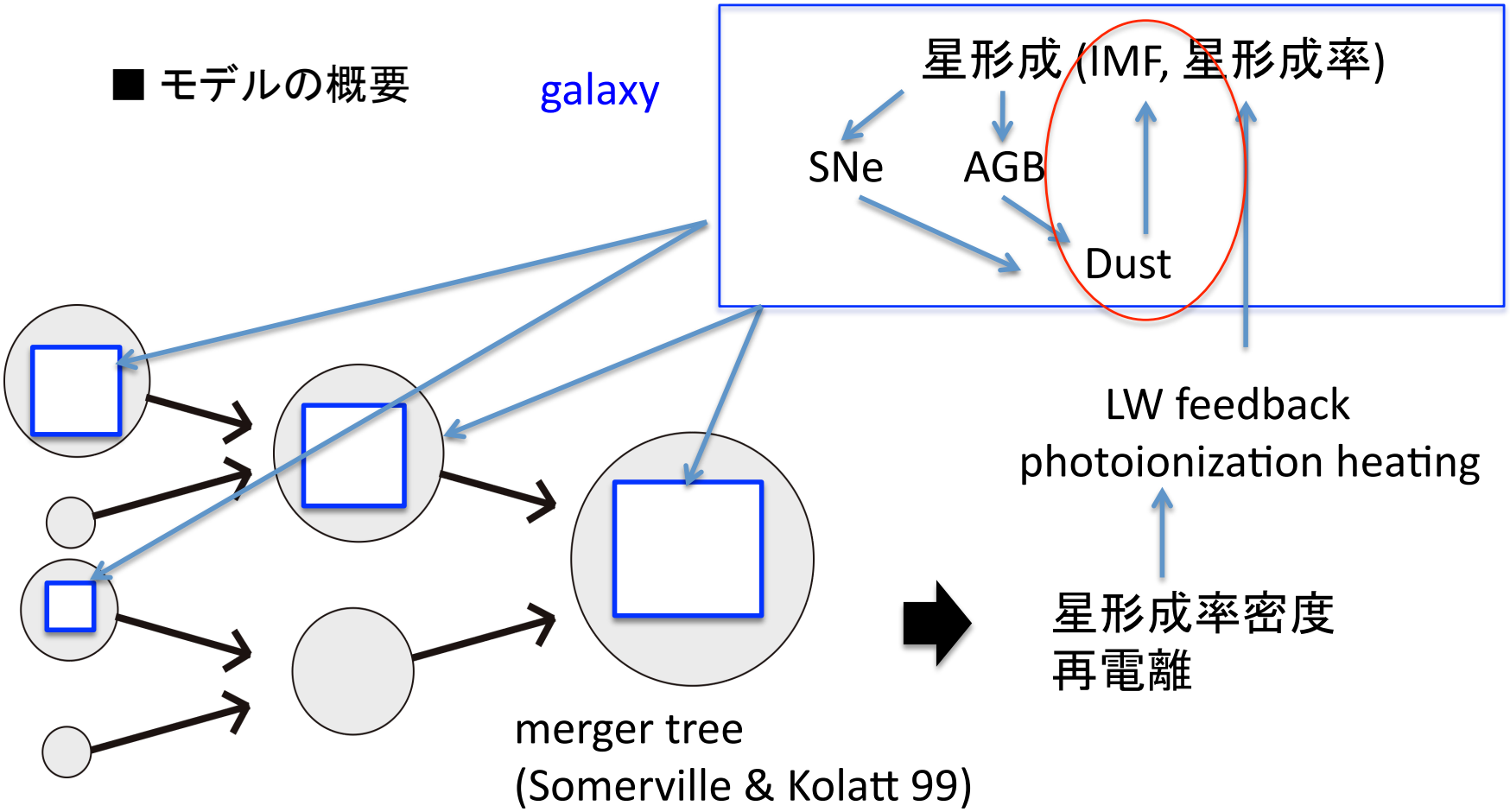
準解析的モデルにダストの進化モデルを組み込み、
Pop III-II 遷移が起こるハロー質量や赤方偏移を調べた。

従来の Z_{cr} で議論されてきた Pop III-II 遷移を critical dust-to-gas mass ratio, D_{cr} , で再考察し、Z_{cr} の妥当性を調べた。

Population III 銀河がどの時代にどれだけ存在するのかを調べた。

準解析的モデル

■ モデルの概要



merger tree : log M_{halo} / M_{sun} = 8.5, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 at z = 2

星形成モデル

■ 星形成率 :

- One Pop III.1 star forms in a mini halo with $T_{vir} < 10^4$ K.
- Pop III.2, Pop I / II : $\psi_0 = f_* \times f_{bary} \times$ (Accretion rate of DM halo)

  $f_{bary} = \Omega_b / \Omega_M$ ↑ merger tree

■ IMF :

Pop	Dust	IMF	DM halo
Pop III.1	$D < D_{cr}$	[30 : 100]	mini halo ($T_{vir} < 10^4$ K)
Pop III.2		[10 : 100]	galaxy ($T_{vir} \geqq 10^4$ K)
Pop I / II	$D \geqq D_{cr}$	[0.1 : 100]	all haloes

(Hosokawa+ 11, 12)

Critical dust-to-gas mass ratio

■ Crutical dust-to-gas mass ratio, D_{cr} (Schneider+ 12) :

$$\mathcal{D}_{\rm cr} \sim 6.4 \times 10^{-8} \left(\frac{S}{2.2 \times 10^4 \ {\rm cm}^2 \ g^{-1}} \right)^{-1}$$

S : the total grain cross-section per unit mass of dust

・各銀河のダストの質量とサイズ分布の進化から、D と S を計算した。

ダストモデル

■ ダスト進化: SNe (DY+ 11), AGB星からのダスト供給を新しく考慮。

(i) SNe からのダスト供給 (Nozawa+ 07)

(ii) SNe forward shocks によるダスト破壊 (Nozawa+ 06)

(iii) AGB星 によるダスト供給
質量 (Zhukovska+ 09)
サイズ分布は、～0.1 μm の log-normal を仮定
(Yasuda & Kozasa 2012; Asano+ 13)

Radiative feedback

■ LW feedback

・H_2 冷却によって冷えることのできる最小のハロー質量
(O'Shea & Norman 08)

$$M_{\rm LW} \simeq 5.0 \times 10^5 + 3.5 \times 10^6 \left(4\pi J_{21}\right)^{0.47}$$

■ Photoionizing feedback

・$T_{vir} < 2.2 \times 10^4$ K のハローでは、星形成が抑制される (Okamoto+ 08)。
・ 星形成率に $(1 - F_{HII})$ のファクターをかける。

F_{HII} : 電離領域の割合
再電離後は $F_{HII} = 1$

Radiative feedback

■ LW feedback

・H_2 冷却によって冷えることのできる最小のハロー質量
(O'Shea & Norman 08)

$$M_{\rm LW} \simeq 5.0 \times 10^5 + 3.5 \times 10^6 \left(4\pi J_{21}\right)^{0.47}$$

星形成率密度から計算

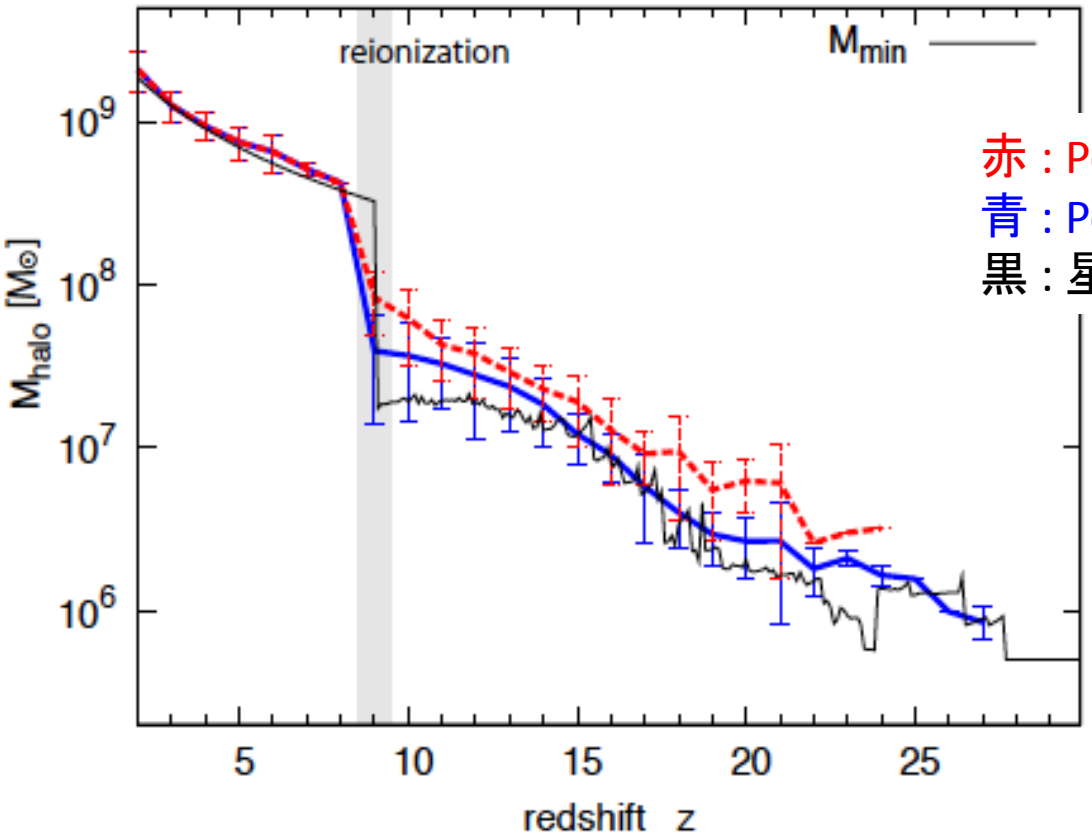
■ Photoionizing feedback

・$T_{vir} < 2.2 \times 10^4$ K のハローでは、星形成が抑制される (Okamoto+ 08)。
・星形成率に $(1 - F_{HII})$ のファクターをかける。

F_{HII} : 電離領域の割合
再電離後は $F_{HII} = 1$

Pop III-II 遷移時の ハロー質量と赤方偏移

■ Pop III-II 遷移がおこるハロー質量と Pop III 星形成が起こるハロー質量の平均



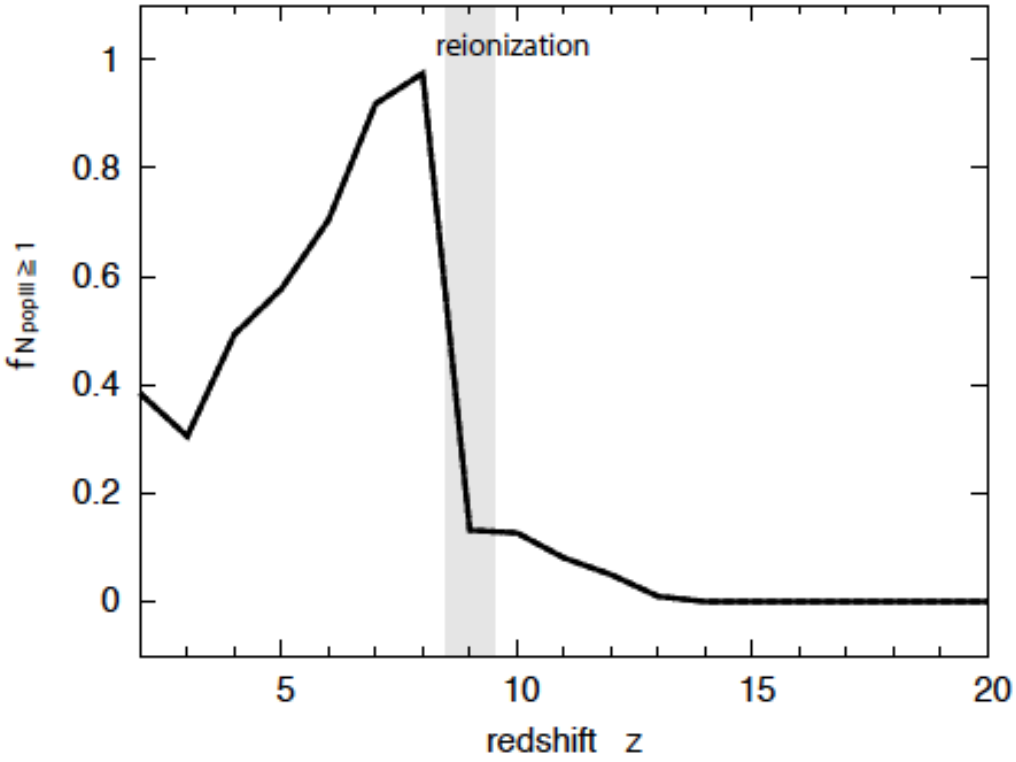
赤 : Pop III-II 遷移を起こすハロー
青 : Pop III 星を形成するハロー
黒 : 星形成を起こす最小のハロー

Pop III-II 遷移を起こすハロー質量は星形成を起こす最小のハロー質量で決まっている。

再電離後も比較的大きな質量（～10^9 M_{sun}）をもつハローで Population III星形成が有意に起こる。

Pop III星形成ハローの過去のダスト汚染

■ Pop III 形成を起こすハローが過去にダスト汚染を受けている割合, $f_{N_{popIII} \geqq 1}$



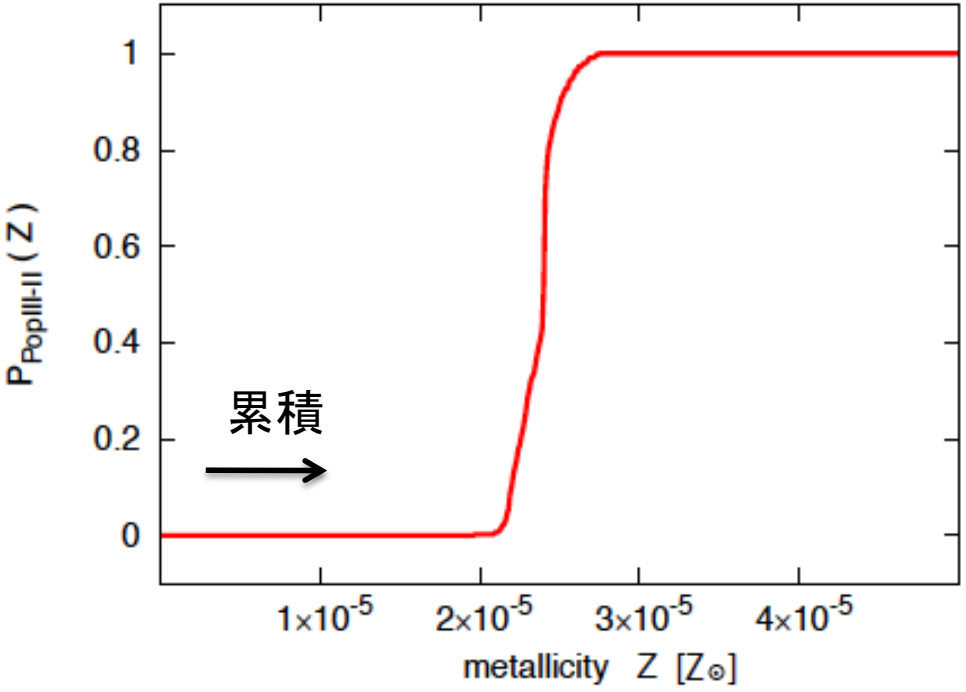
再電離直後はほとんどの Pop III 銀河が過去にダスト汚染を受けている。

この割合, $f_{N_{popIII} \geqq 1}$,は z = 2 まで時間と共に減少する。

Pop III 銀河の数をダスト汚染なしの銀河をもとに評価すると過小評価する。

Critical metallicity

■ Pop III-II 遷移時の金属量の累積分布関数, $P_{popIII\text{-}II}$ (z) :

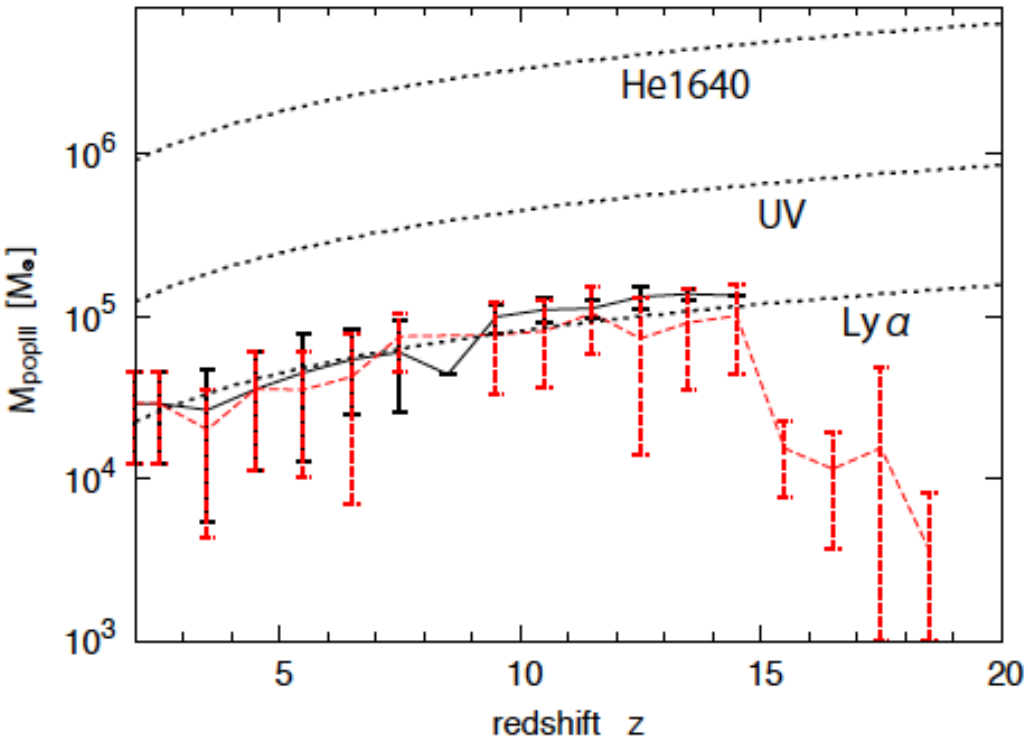


D_{cr} は、どの銀河でもある critical metallicityの値 Z_{cr} ～2.4×10^{-5} Z_{sun} によく対応する。

この対応はSNによるダスト形成時のダスト-金属比やダストの S で決まる。

Population III星の質量

■ Pop III 銀河の Pop III 星の質量, M_{popIII} :



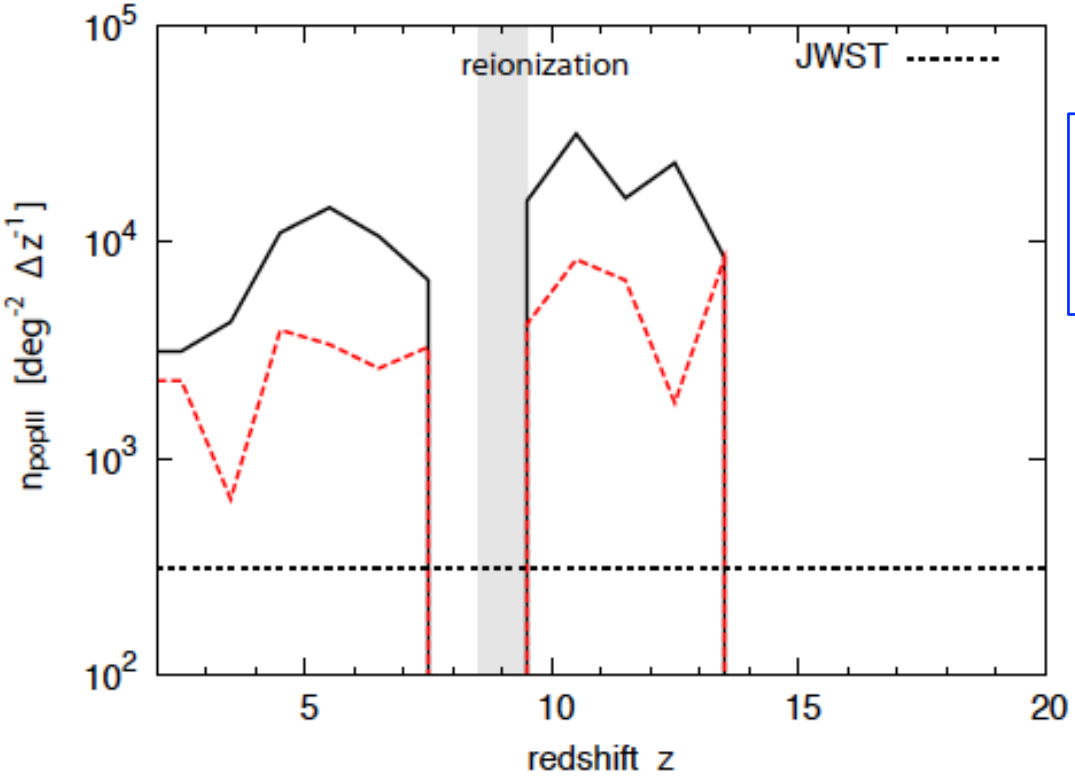
(Pop III 星の寿命)
> (ダスト汚染のタイムスケール)
なので、
M_{popIII} = (SFR) × (Pop III 星の寿命)
と仮定した。

JWST :
$t_{exp} = 10^6$ s
S / N = 10 を仮定した。

Lyα はmarginallyに観測できる。

Population III 銀河の数

■ Lyα を観測できる Pop III 銀河の数 (単位平方度、単位赤方偏移あたり)



Lyα を観測できるPop III銀河が、単位平方度単位赤方偏移あたり～$10^{3\text{-}4}$ 個存在する。

JWSTの１視野あたり～10 - 100個

SUMMARY

・Pop III-II 遷移に必要な最小のダスト-ガス比を D_{cr} として定義し、Pop III-II 遷移が起こる環境を調べた。

・モデルではmerger treeを用いてダークハローの進化を考慮し、銀河進化の解析的モデルにダスト進化モデルを組み込んだ。

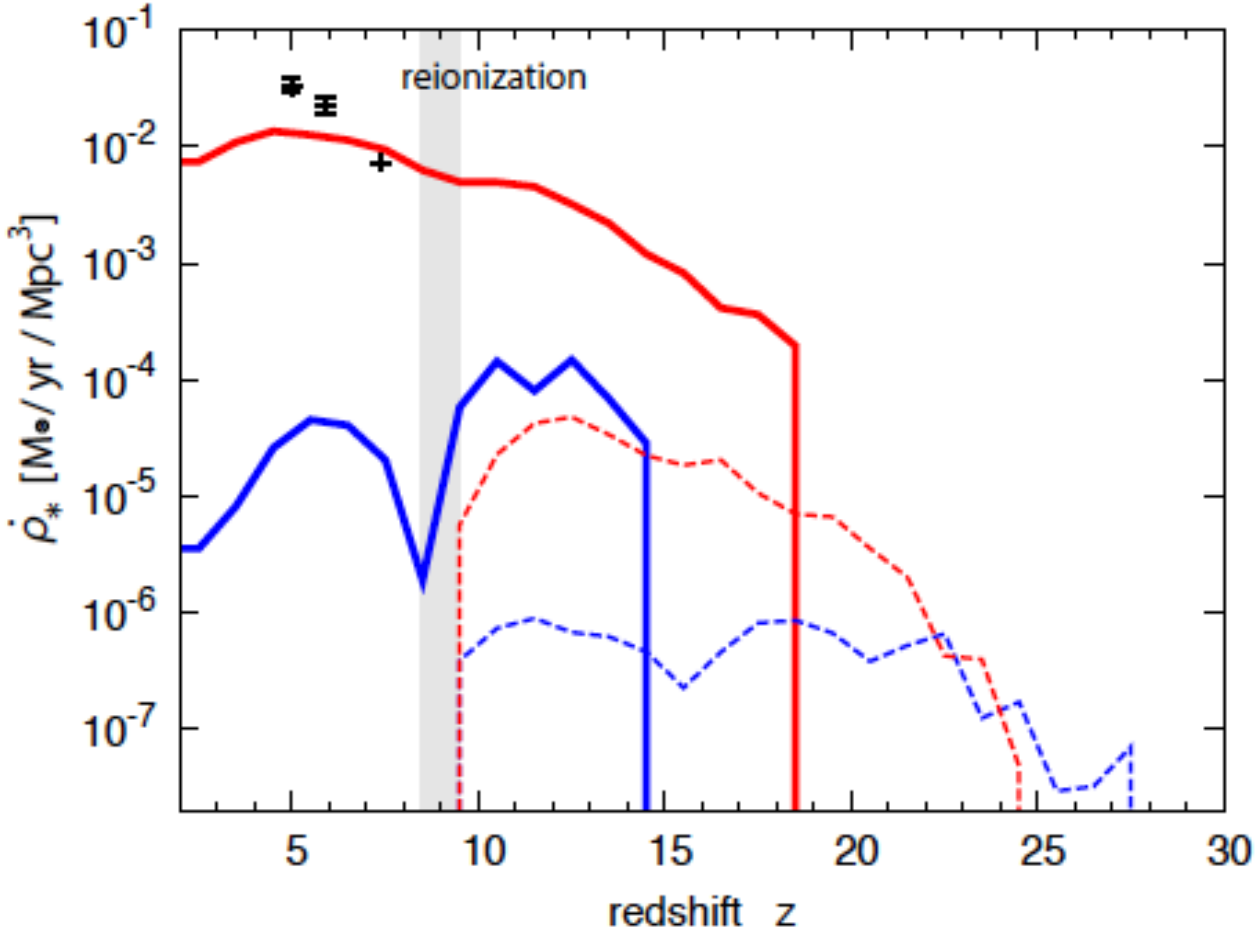
・Pop III-II 遷移が起こるハロー質量は星形成が起こる最小のハロー質量で決まっている。

・再電離後も比較的大きな質量（～10^9 M_{sun}）をもつハローでPopulation III星形成が有意に起こる。再電離後、特に再電離直後のPop III 銀河の数をダスト汚染なしの銀河をもとに評価すると過小評価する。

・ダスト冷却に基づいたPop III-II遷移は、あるcritical metallicityの値、Z_{cr}～2.4×10^{-5} Z_{sun} によってよく記述できる。

・JWSTによってmarginallyにLyα lineを観測できるPop III銀河が単位平方度単位赤方偏移あたり～10^3-10^4 個存在する。

星形成率密度


reionization
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^{-6}
10^{-7}
$\dot{\rho}_*$ [M•/ yr / Mpc^3]
5
10
15
20
25
30
redshift z