

宇宙初期の ダストに覆われた 星形成銀河

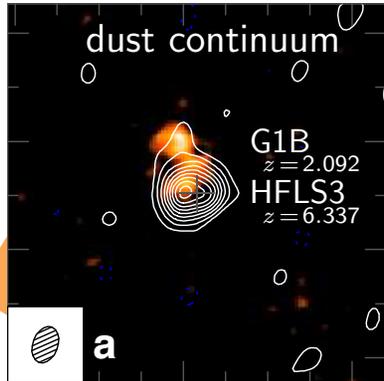
矢島 秀伸

東北大学 学際科学フロンティア研究所

初代星初代銀河研究会2017@呉 2018/2/10-13

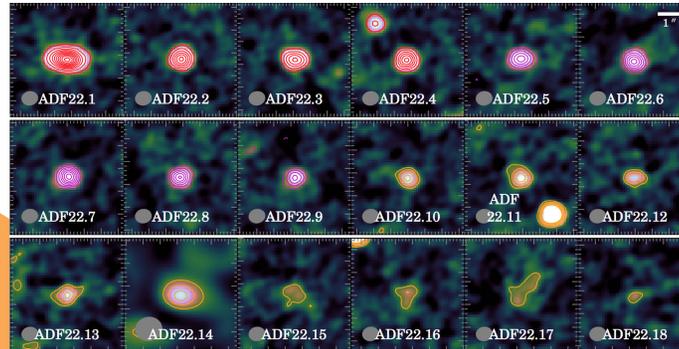
ダストに覆われた星形成銀河

初期宇宙から現在にかけて存在している



Riechers et al. (2013)

Umehata et al. (2017)



赤方偏移
~6

SMGs

赤方偏移
~3

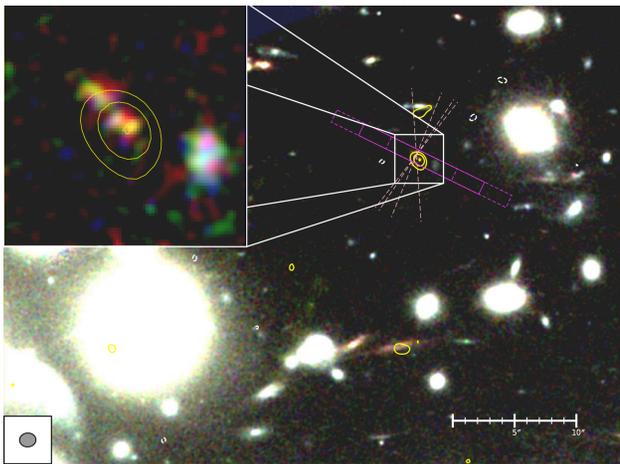


赤方偏移
~0

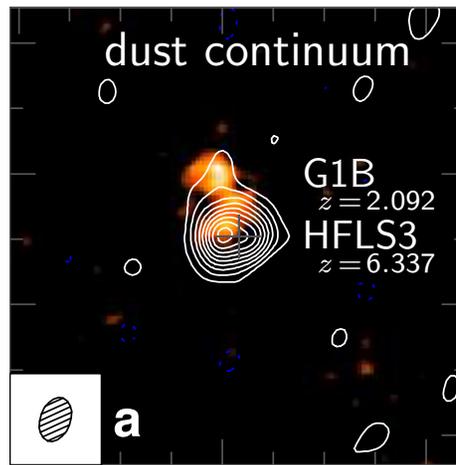
ULIRGs

初期宇宙のサブミリ銀河

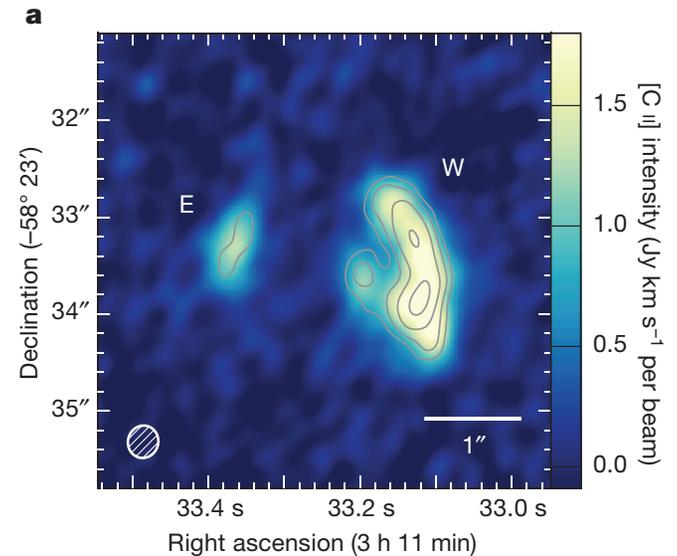
このようなdusty starburst galaxyはどのように形成されたのか？



Watson et al. (2015, Nature)
サブミリ銀河@z=7.5



Riechers et al. (2013, Nature)
サブミリ銀河@z=6.3



Marrone et al. (2018, Nature)
サブミリ銀河@z=6.9

爆発的星形成

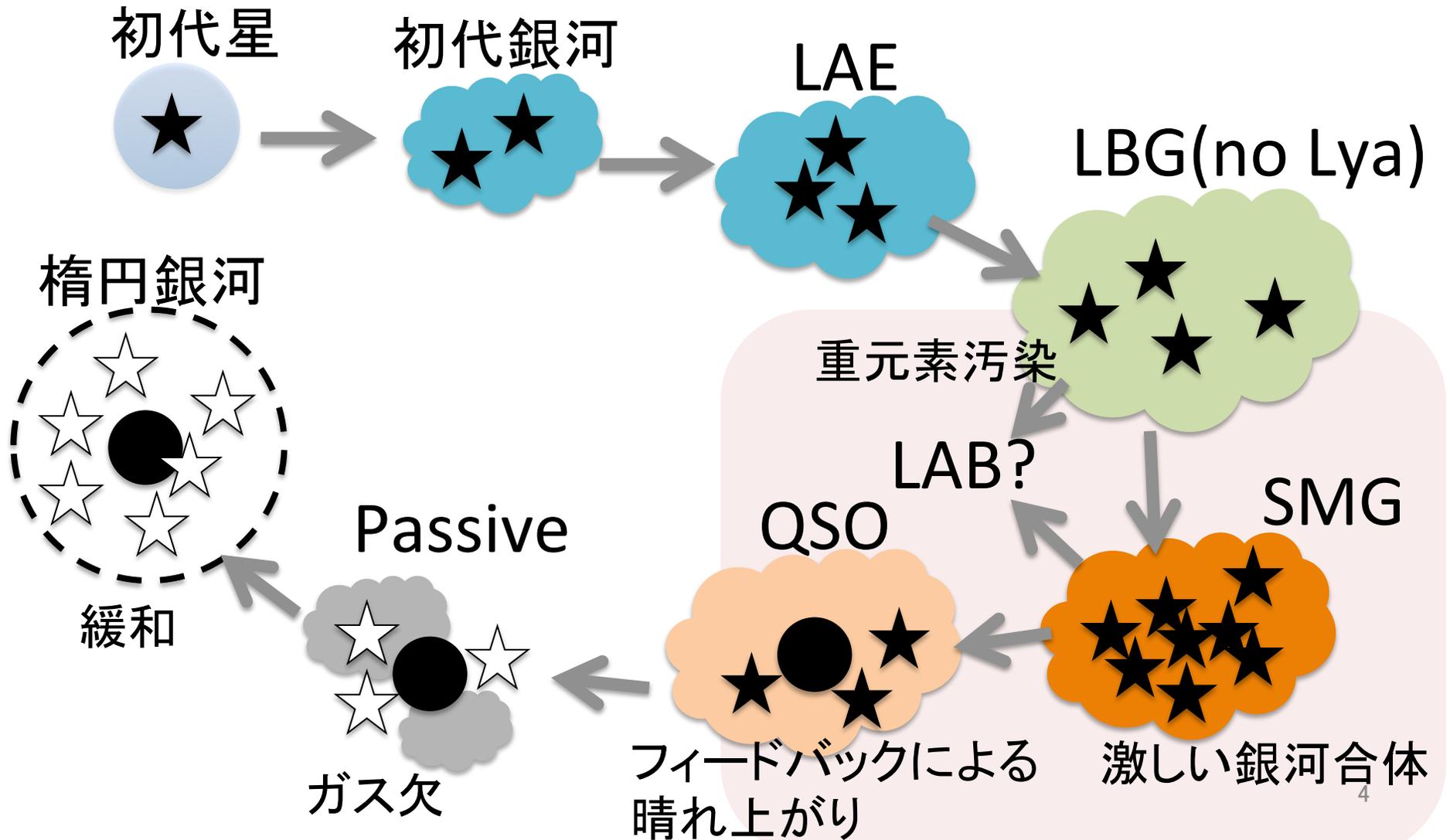
SFR > 1000Msun/yr

+

大量のダストによる
星/AGNの光の遮蔽

初期宇宙銀河進化想像図 (高密度領域)

(私見)



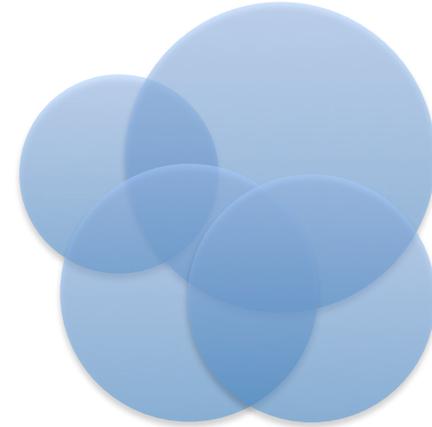
モデルと手法

宇宙論的SPH計算

Gadget-3 (Springel 2005)

+FiBYオプション(Johnson+2013)

+**ダスト**(this work)



非平衡化学計算 (primordial)

+

金属冷却(電離平衡)

C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Ca, Fe

CLOUDY v07.02 (Ferland 2000)より計算

星形成モデル

閾値: 水素ガス数密度 10 cm^{-3} 以上

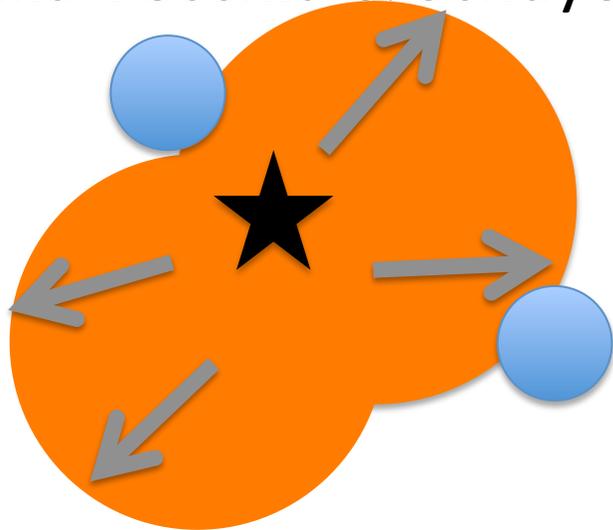
$$\frac{d\rho_*}{dt} = C_* \frac{\rho_{\text{gas}}}{t_{\text{dyn}}}$$

フィードバック

1: 超新星爆発

近傍ガスに高温の熱エネルギー
(温度 $10^{7.5}$ K)を注入

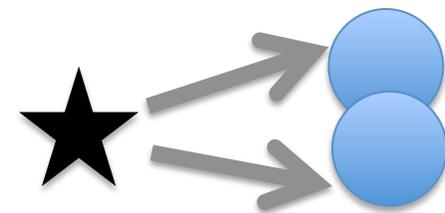
Dalla Vecchia & Schaye (2012)



2: 星からの紫外線

水素分子形成の阻害

Johnson et al. (2013)



H₂, H⁻の破壊

フィードバックが効く臨界密度

$$n_{\text{H}} \sim 100 \text{ cm}^{-3} \left(\frac{T}{10^{7.5} \text{ K}} \right) \left(\frac{m_{\text{g}}}{10^4 \text{ M}_{\odot}} \right)^{-1/2}$$

ダストの物理

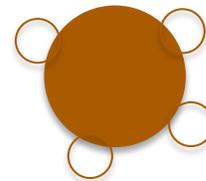
Yajima et al. (in prep.)

1. 超新星爆発による ダスト生成



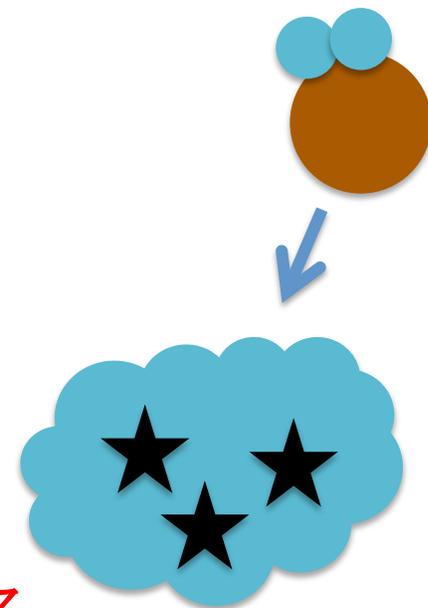
2. 成長 (金属降着)

(Hirashita&Kuo2011)

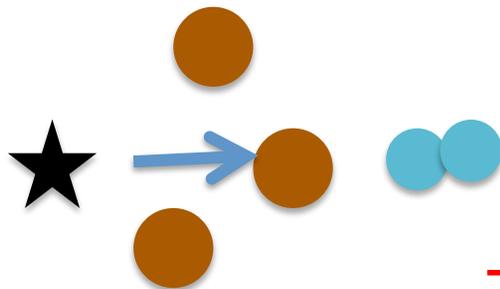


(Cazaux&Tielens2004
Schneider+2006)

4. ダスト表面での 水素分子形成

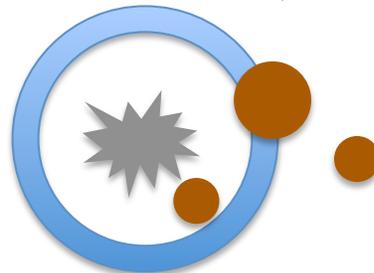


5. 紫外線遮蔽



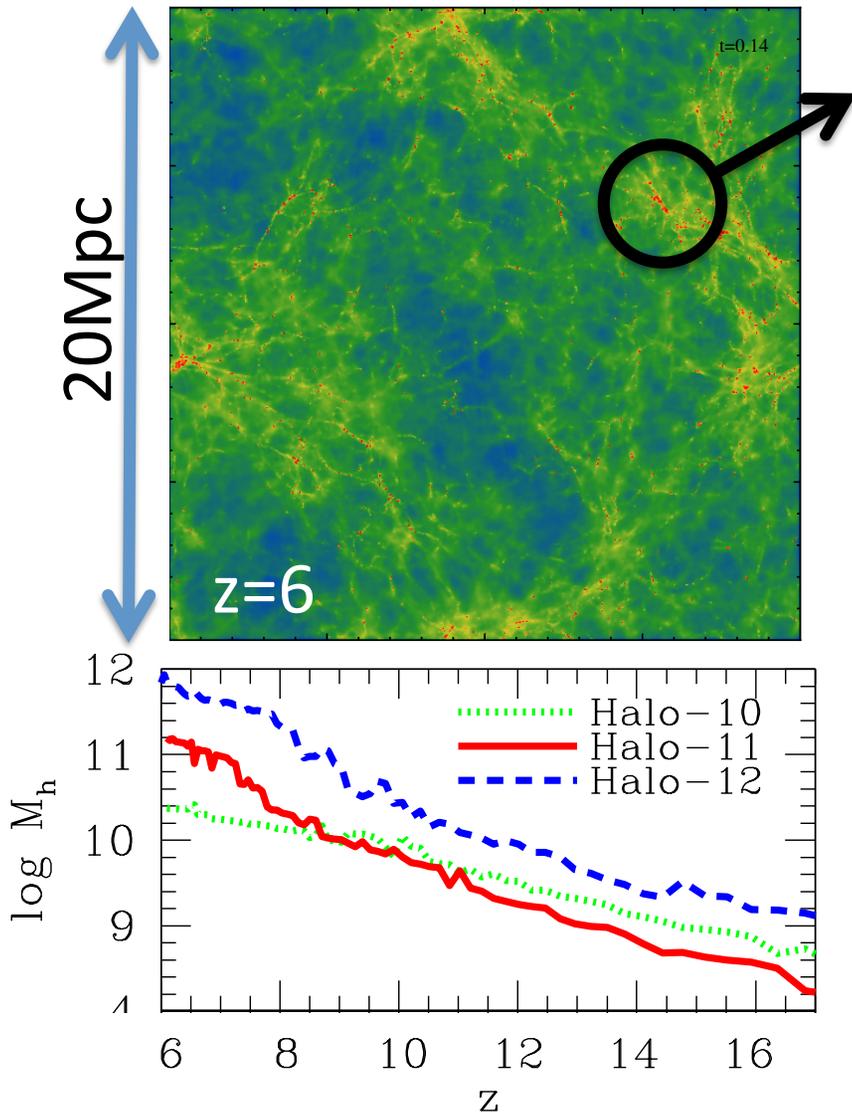
3. 破壊 (スパッタリング)

(Draine&Salpeter1979)



これらの効果を計算にいれる

シミュレーションセットアップ



赤方偏移6で $1.6 \times 10^{11} \text{ Msun}$ のハローズームイン初期条件により高精度計算を行う

$$m_{\text{DM}} = 6.6 \times 10^4 \text{ Msun/h}$$

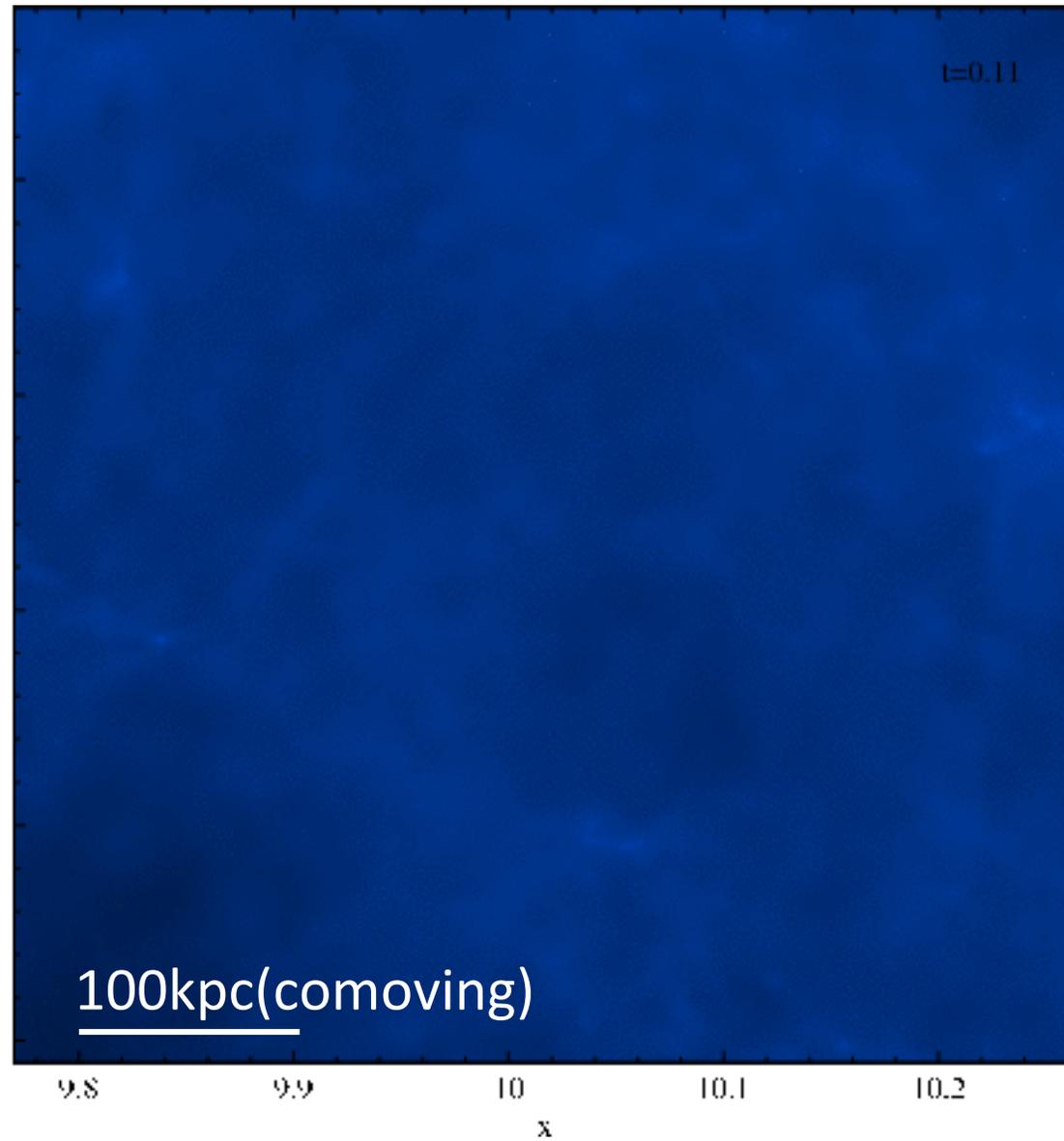
$$m_{\text{gas}} = 1.2 \times 10^4 \text{ Msun/h}$$

softening = 200 pc (comoving)

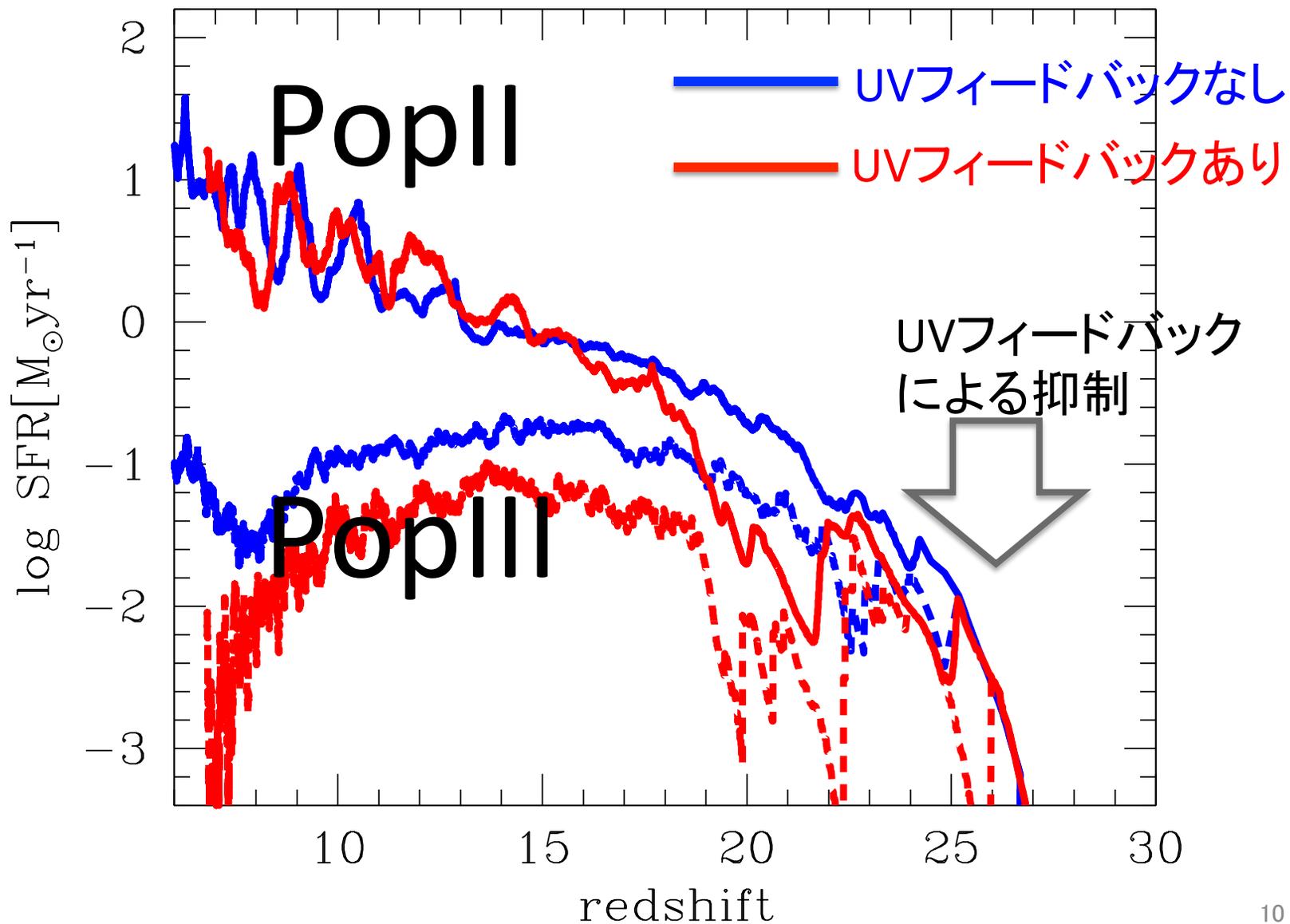
Metallicityが $10^{-4} Z_{\text{sun}}$ 以下では
PopIII星団 (20 – 500 Msun)

$10^{-4} Z_{\text{sun}}$ 以上では
PopII星団にする(0.1 – 100Msun)
IMFのpower-law slopeは両方とも-2.35

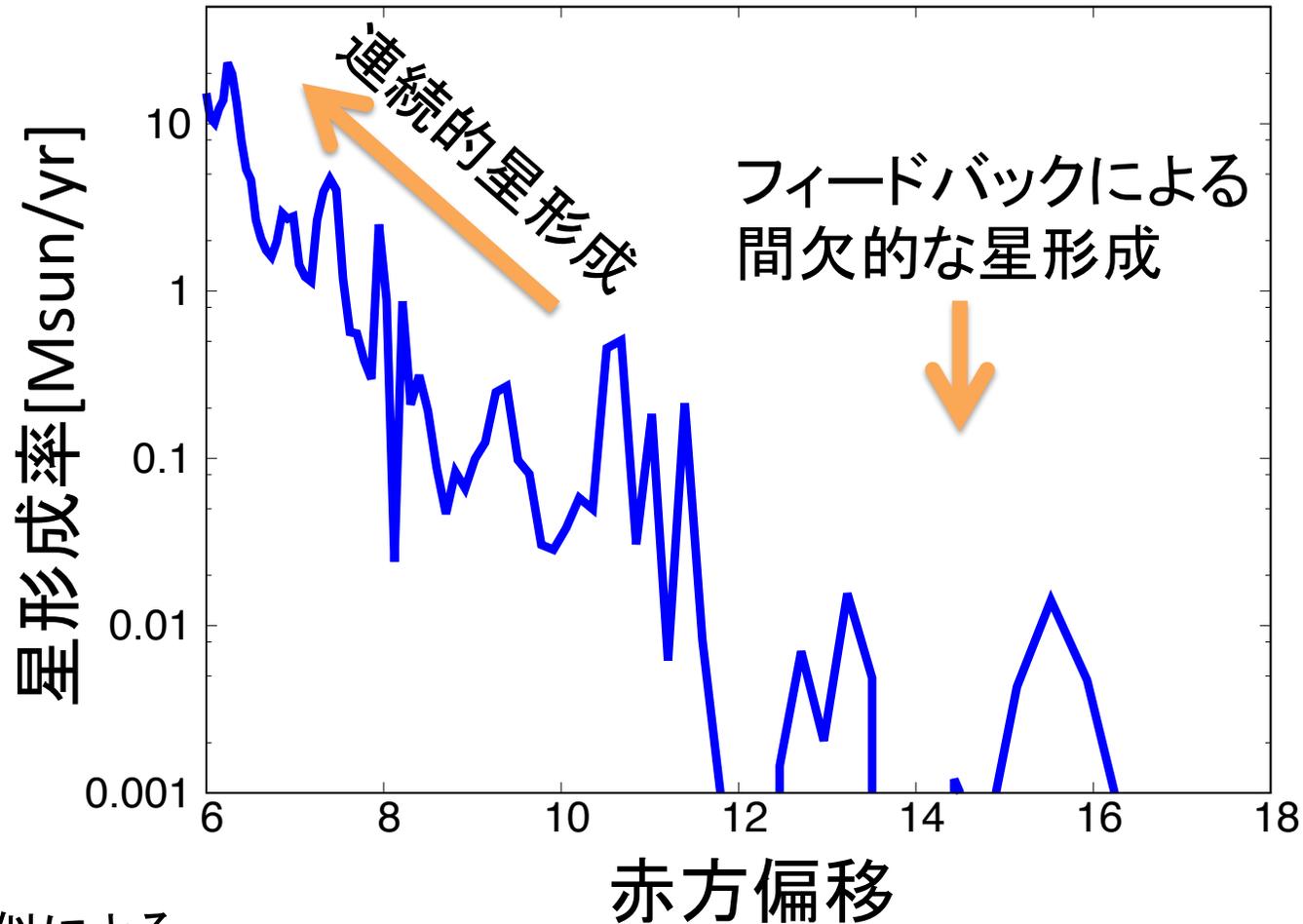
ガスの構造



星形成史



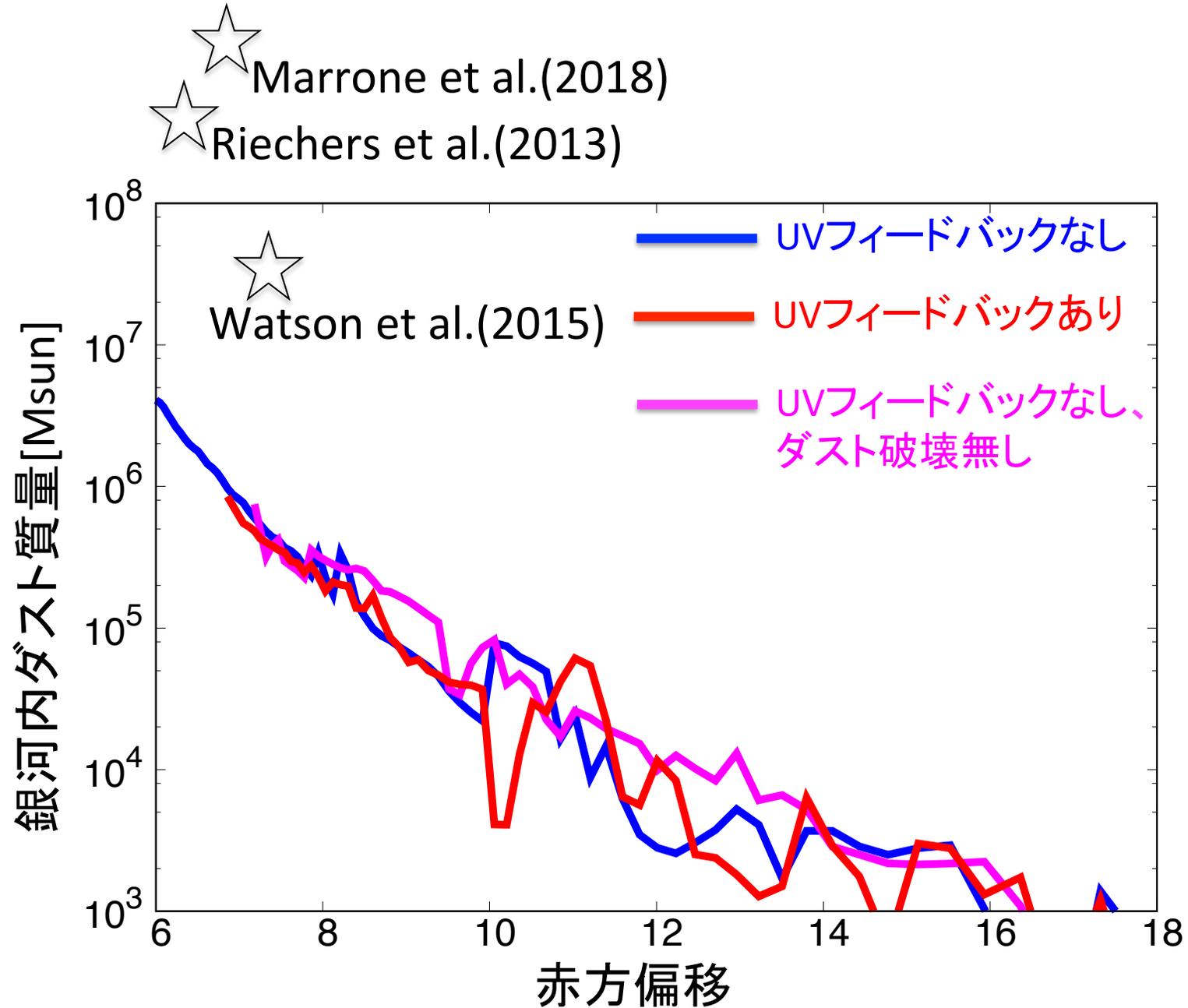
一つのアローの星形成史



球対称近似による
臨界アロー質量

$$\rightarrow M_{h,crit} = 0.7 \times 10^{10} M_{\odot} \left(\frac{\epsilon_{SF}}{0.1}\right)^{3/2} \left(\frac{\eta}{0.5}\right)^{3/2} \left(\frac{1+z}{11}\right)^{-3/2}$$

銀河内のダスト質量



各タイムスケール

星形成 $t_{\text{ff}} \sim 2 \times 10^7 \text{ yr} \left(\frac{n_{\text{H}}}{10 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$

Time delay $\Delta t_{\text{SN}} \sim 10^7 \text{ yr}$

ホットバブル
膨張 $t_{\text{cross}} \sim \frac{h}{c_s} \sim 2 \times 10^4 \text{ yr} \left(\frac{h}{10 \text{ pc}} \right) \left(\frac{T}{3 \times 10^7 \text{ yr}} \right)^{-1/2}$

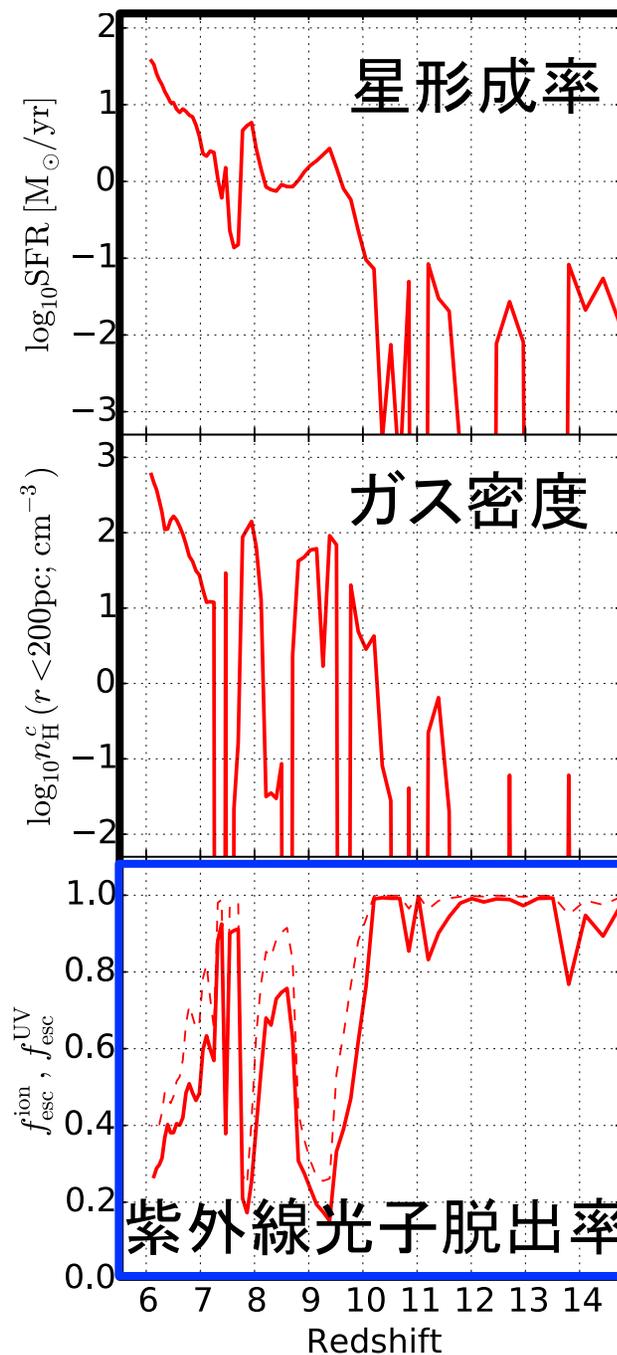
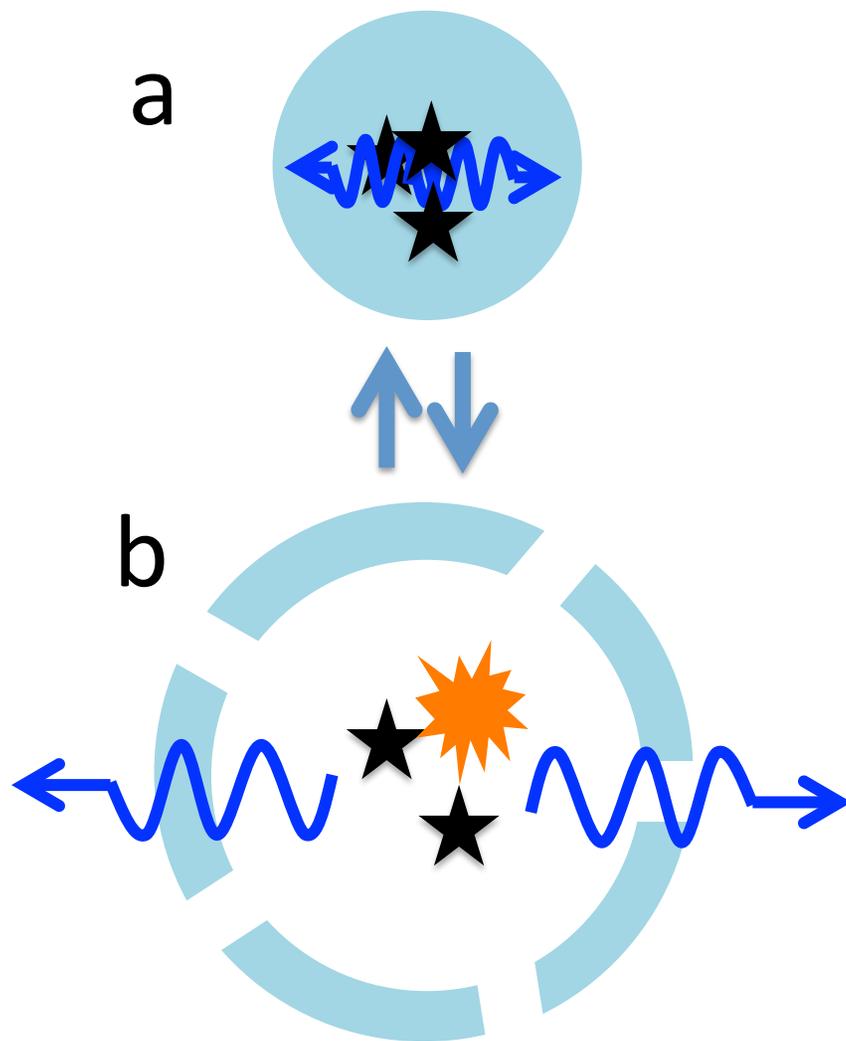
ダスト成長 $t_{\text{grow}} \sim 3 \times 10^8 \text{ yr} \left(\frac{n_{\text{H}}}{10 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{Z}{0.1 Z_{\odot}} \right)^{-1}$

ダスト破壊 $t_{\text{des}} \sim 1 \times 10^4 \left(\frac{a}{0.1 \mu\text{m}} \right) \left(\frac{n_{\text{H}}}{10 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1}$

より高精度シミュレーションで高密度を考える必要がある

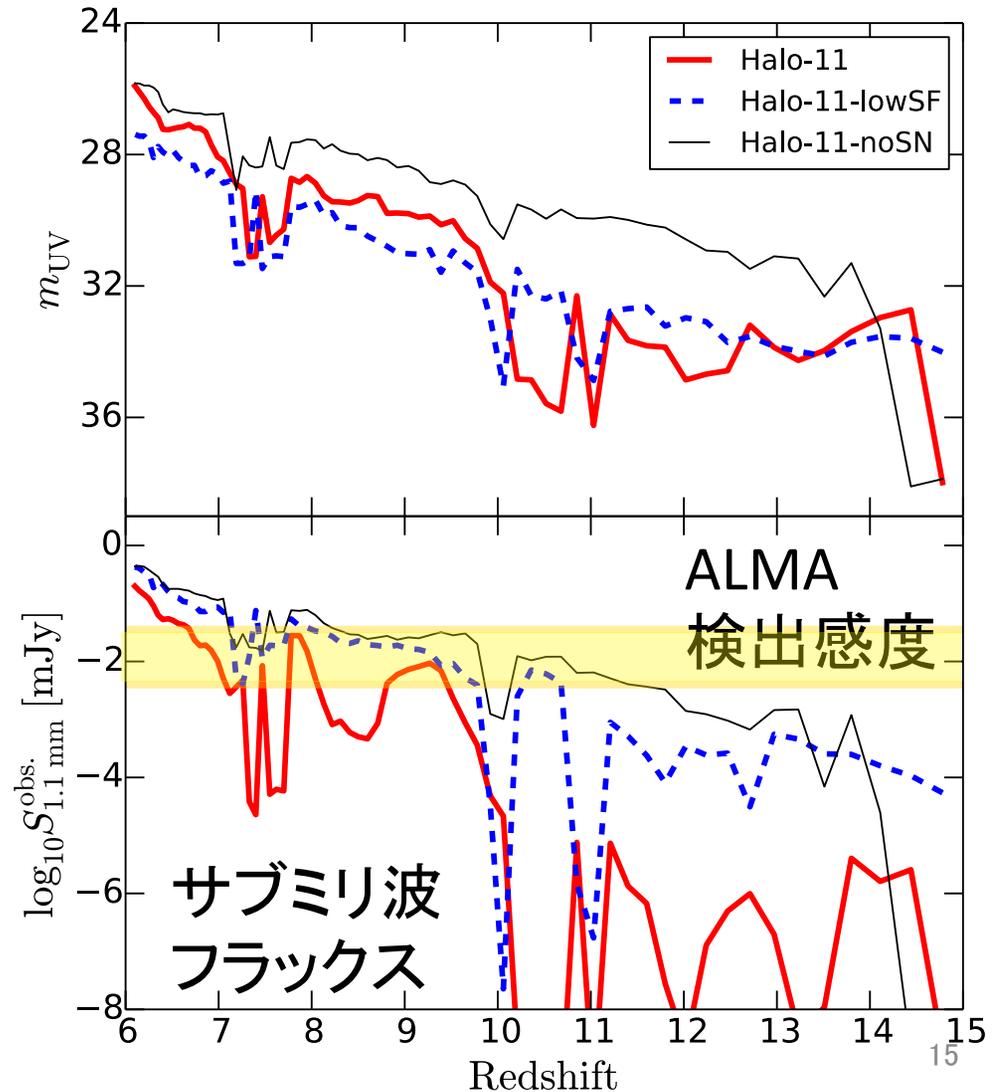
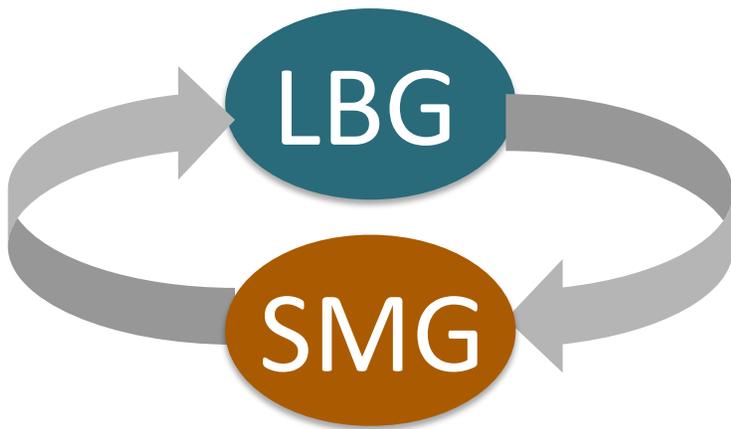
紫外線吸収

多波長輻射輸送計算
With ART² (HY+2012)

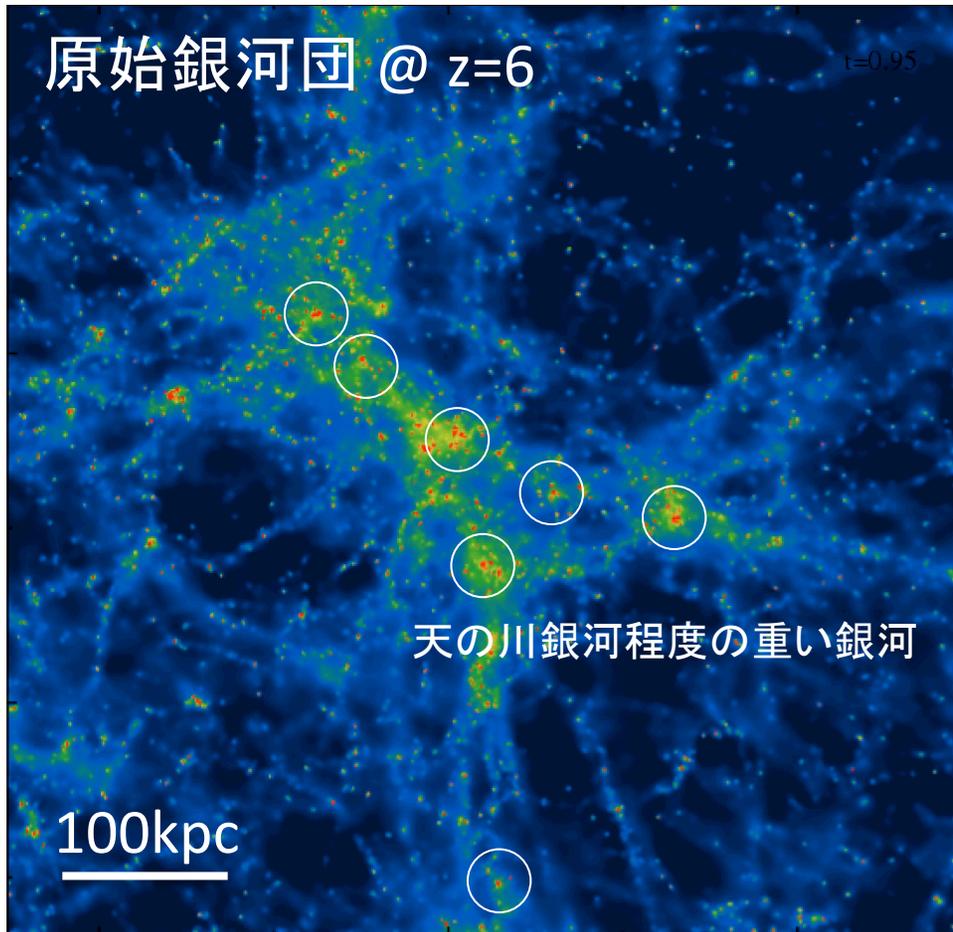


星形成モデルと輻射輸送

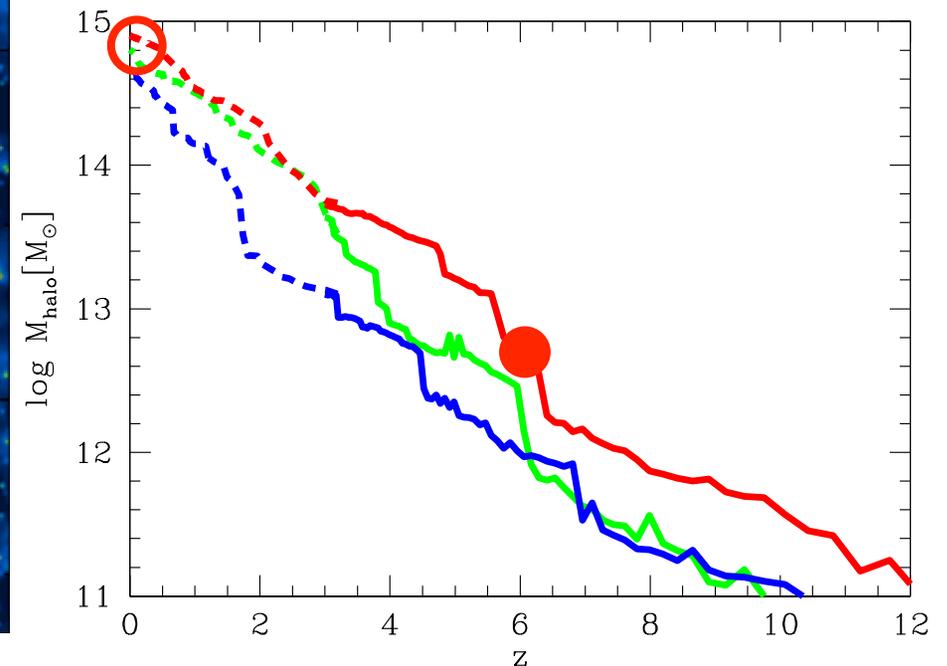
超新星爆発のフィードバックにより光学特性も次々変化



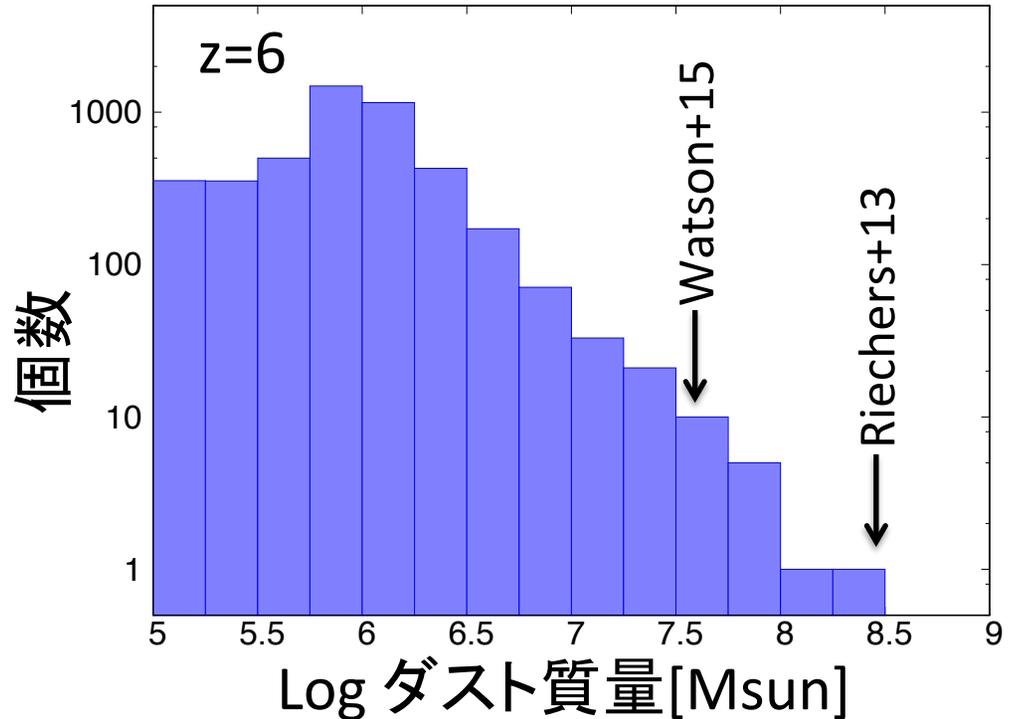
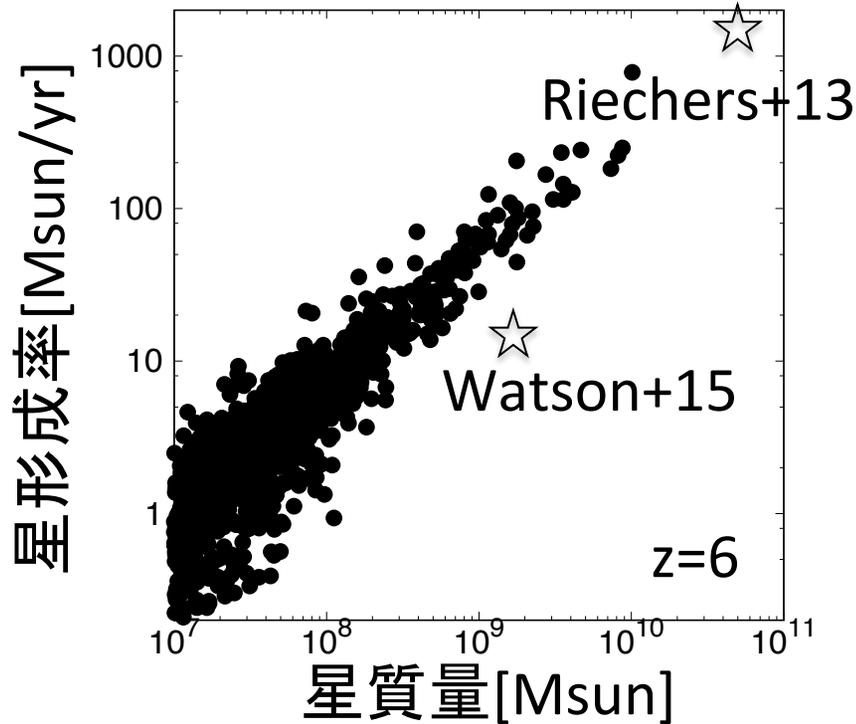
議論: さらに高密度領域ではどうか? 原始銀河団領域で計算してみる



$(500 \text{ Mpc}/h)^3$ のボックスより最終的に銀河団が作られる原始銀河団領域($30 \text{ Mpc}/h$)を選ぶ

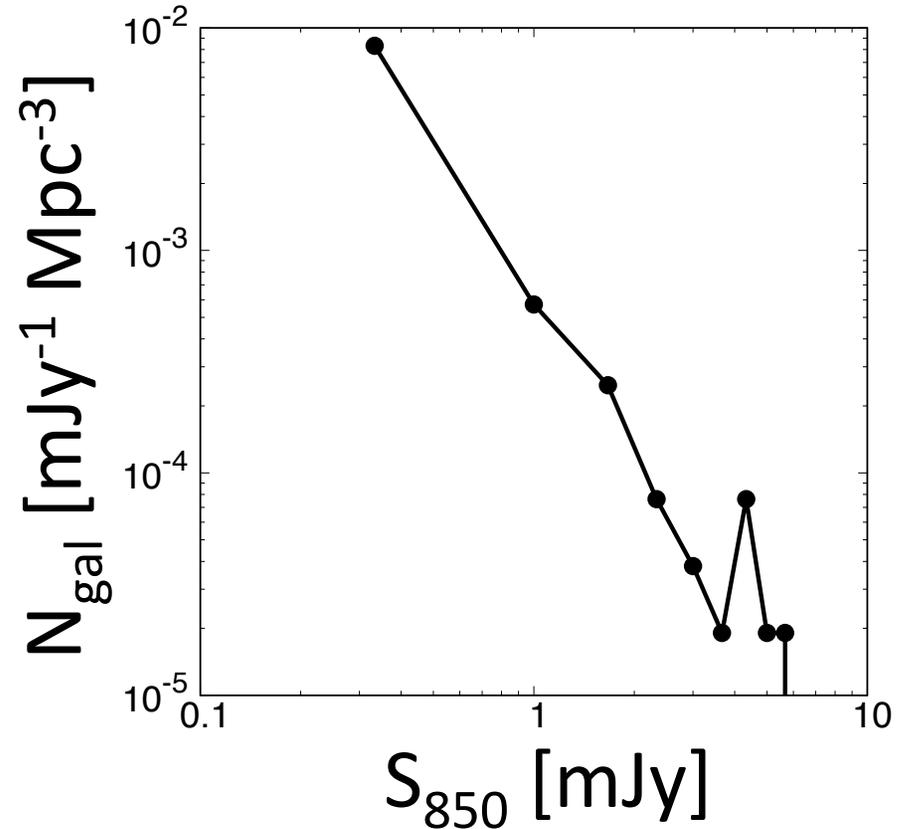
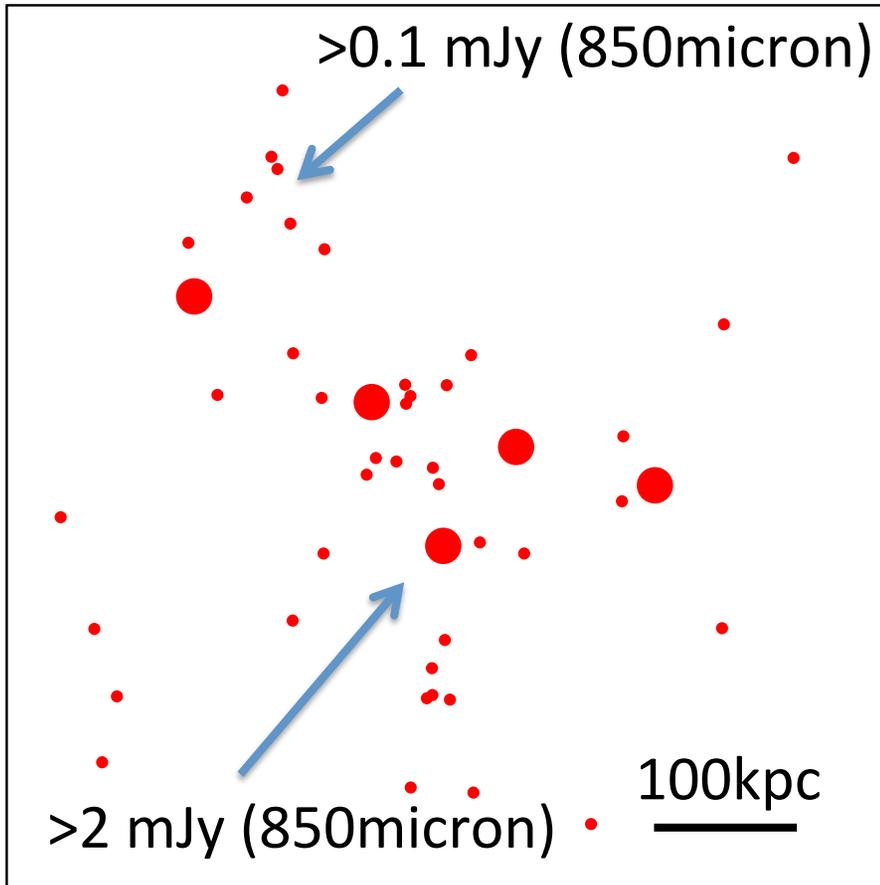


星形成率とダスト質量



原始銀河団のような高密度領域では観測されているような Dusty starburst galaxyが形成

サブミリ銀河群の形成



フィラメント構造に沿ったサブミリ銀河の分布

まとめ

ダスト形成・破壊を考慮した宇宙論的流体計算によって初代銀河の形成・進化を調べた

- 重元素汚染により、宇宙の星形成は赤方偏移15以下でPopII星が支配的になる
- 赤方偏移6で銀河内にダストは $10^6 M_{\text{sun}}$ 程度蓄積される
- 間欠的な星形成モードにより輻射特性も激しく変化
- 原始銀河団ではサブミリ銀河のクラスタリングが $z \sim 6$ で作られる

今後

ダストに覆われた爆発的星形成銀河とクエーサーとの関係をシミュレーションにより調べる