



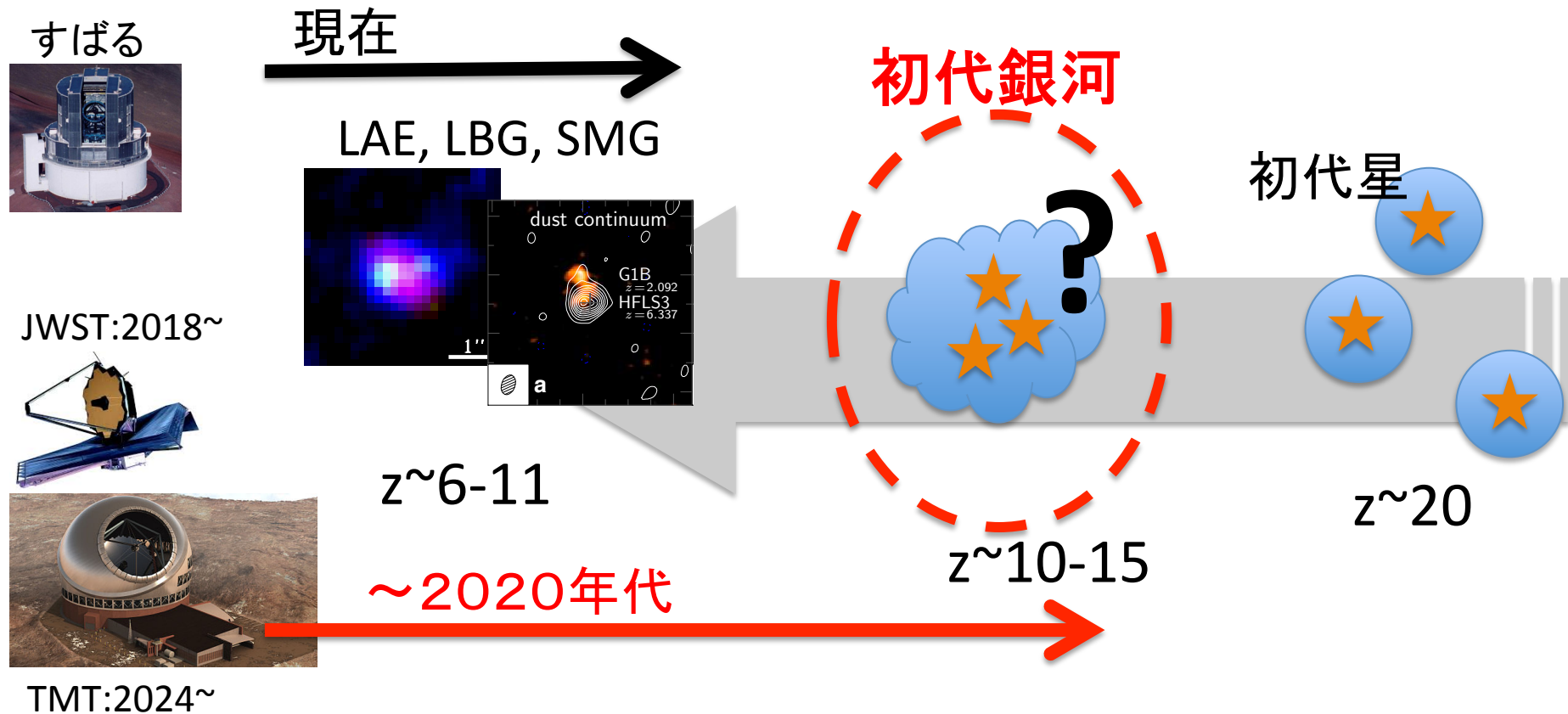
数値シミュレーションで探る 初代銀河形成過程

矢島 秀伸 (東北大学)

長峯 健太郎 (大阪大学)

第3回銀河進化研究会 6/1-6/3@東北大学

初代銀河形成研究の位置づけ



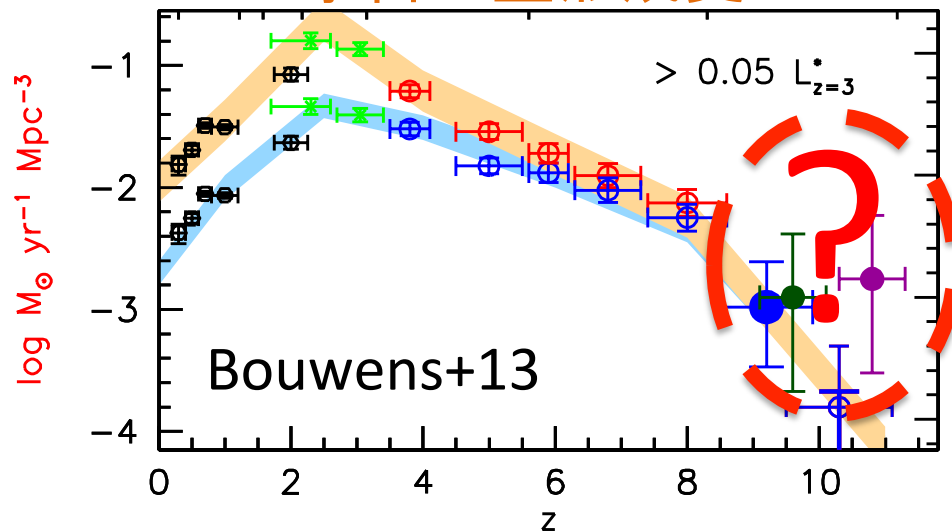
初代銀河はいつ頃どのように形成され、星形成を行うのか？

初代銀河内の物理状態は？

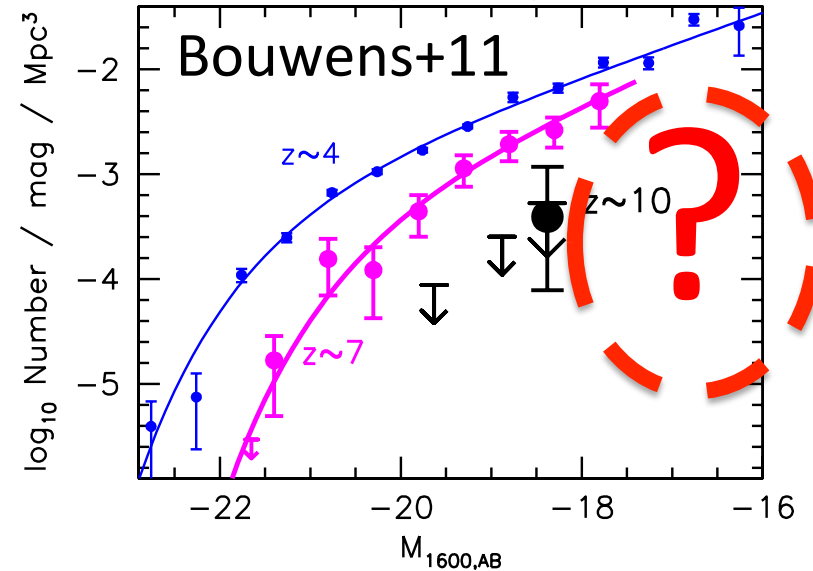
どのように最遠方ライマンアルファ輝線銀河、ライマンブレイク銀河、サブミリ銀河へと進化していくのか？

初代銀河内の星形成

宇宙の星形成史

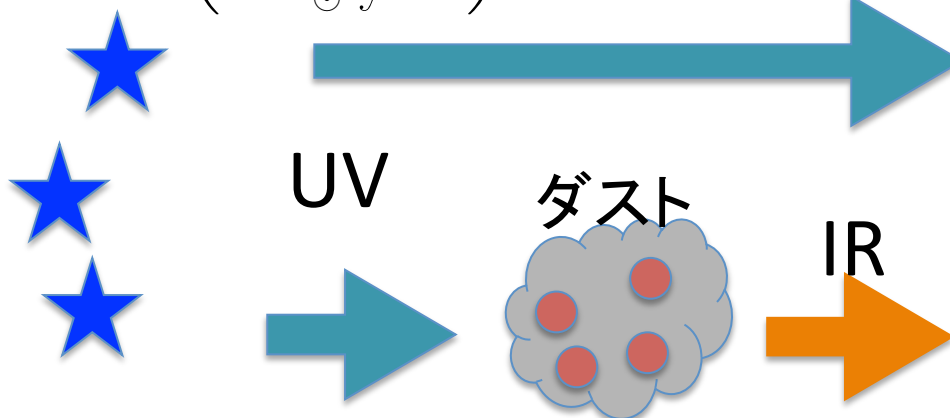


光度関数



Madau+98

$$L_{\nu}^{\text{UV}} = 0.7 \times 10^{28} \left(\frac{\text{SFR}}{1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right) \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$$



JWST, TMT



ALMA



Key: フィードバック

重力(促進) vs. フィードバック(抑制)

基本的に星形成率に比例

(L_{ion} , L_{UV} , SN rate)

$$\rightarrow P = f_{\text{conv}} * \text{SFR}$$

(1SNあたり $M_{\text{out}} \sim 10 M_{\text{sun}}$, $v \sim 3000 \text{ km/s}$)

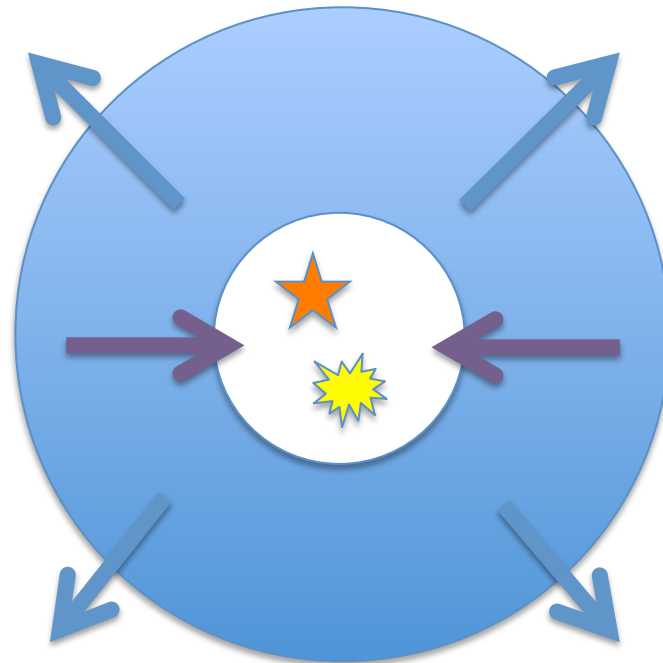
$$f_{\text{conv}}(\text{SN}) \sim 2 \times 10^{33} \text{ dyn/SFR}$$

星形成率がハロー質量に比例するとして
重力と比較してみる

$$\text{SFR} = \epsilon_{\text{SF}} \frac{M_{\text{h}} f_{\text{gas}}}{t_{\text{dyn}}}$$

(通常: $\epsilon_{\text{SF}} \sim 0.1$, バースト: $\epsilon_{\text{SF}} \sim 1$)

$$F_{\text{grav}} \sim \frac{GM_{\text{h}}^2 f_{\text{gas}}}{R_{\text{vir}}^2}$$



非一様効果、星形成効率、フィードバック効率はシミュレーションが必要

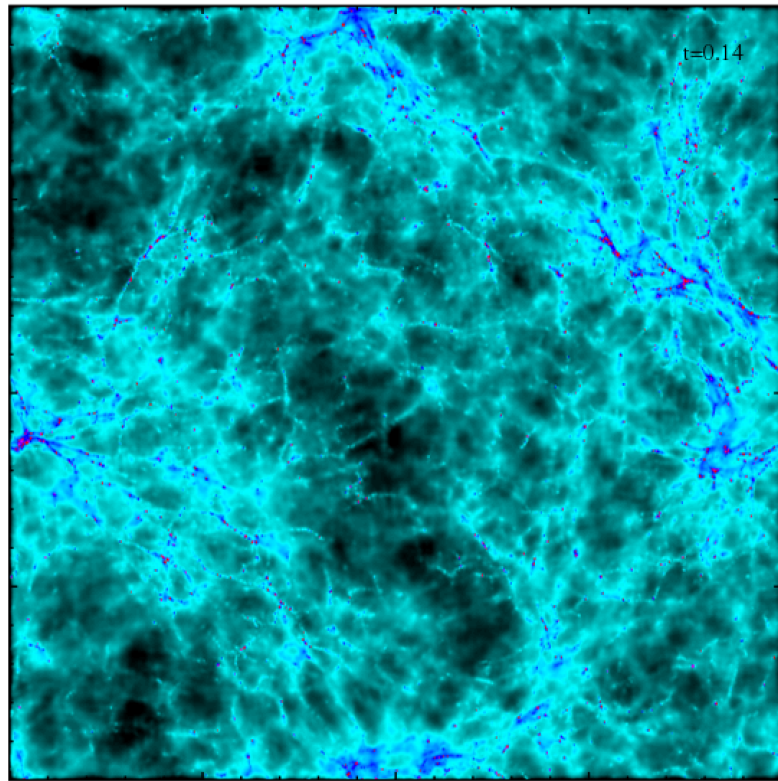
$$M_{\text{crit}} = 4.4 \times 10^{11} M_{\odot} \left(\frac{\epsilon_{\text{SF}}}{0.1} \right)^3 \left(\frac{f_{\text{SN}}}{20} \right)^3 \left(\frac{1+z}{11} \right)^{-3/2}$$

目的

初代銀河の星形成史を調べる

Stellar feedbackがどのように進化に影響を与えるか?

20Mpcの計算ボックスからいくつかのハロー($M_h > 10^{11} M_{\text{sun}}$ at $z \sim 6$)を抜き出して、ズームインを使って高精度計算



20Mpc/h

宇宙論的流体計算

Code: Gizmo (Hopkins 2015)

Zoom-in Initial Condition

(MUSIC: Hahn+2011)

分解能

$M_{\text{gas}} \sim 10^4 M_{\text{sun}}$

$M_{\text{DM}} \sim 10^5 M_{\text{sun}}$

Softening ~ 330 pc (comoving)

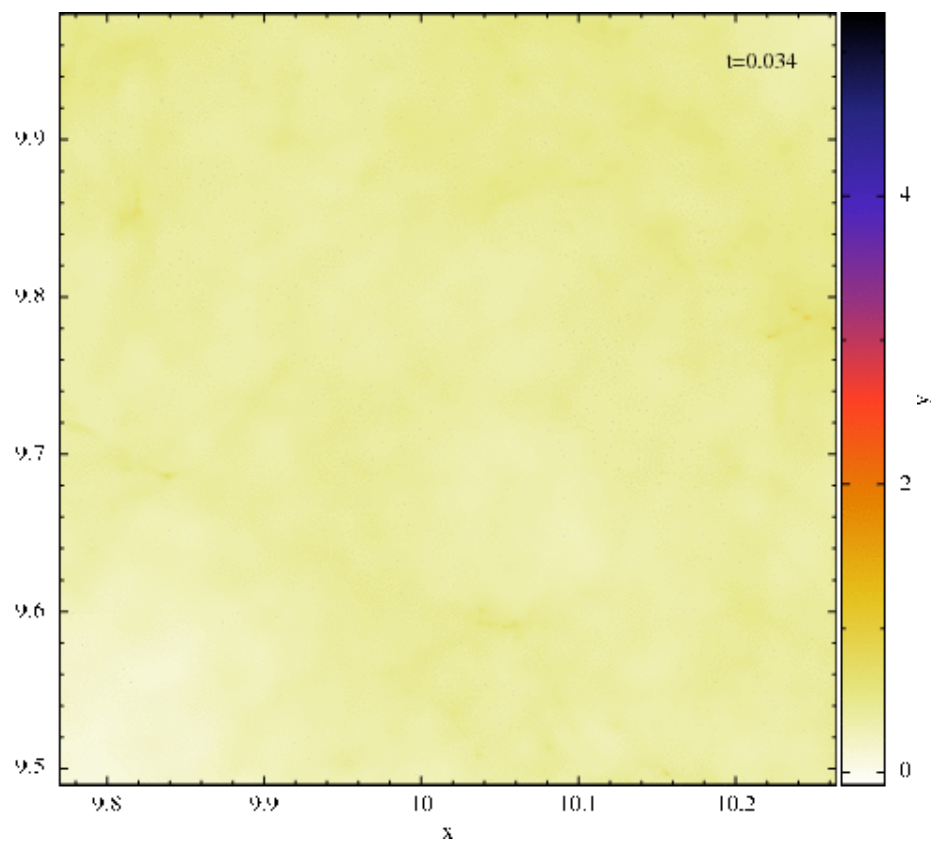
Or minimum ~ 4 pc (physical) using

Adaptive softening

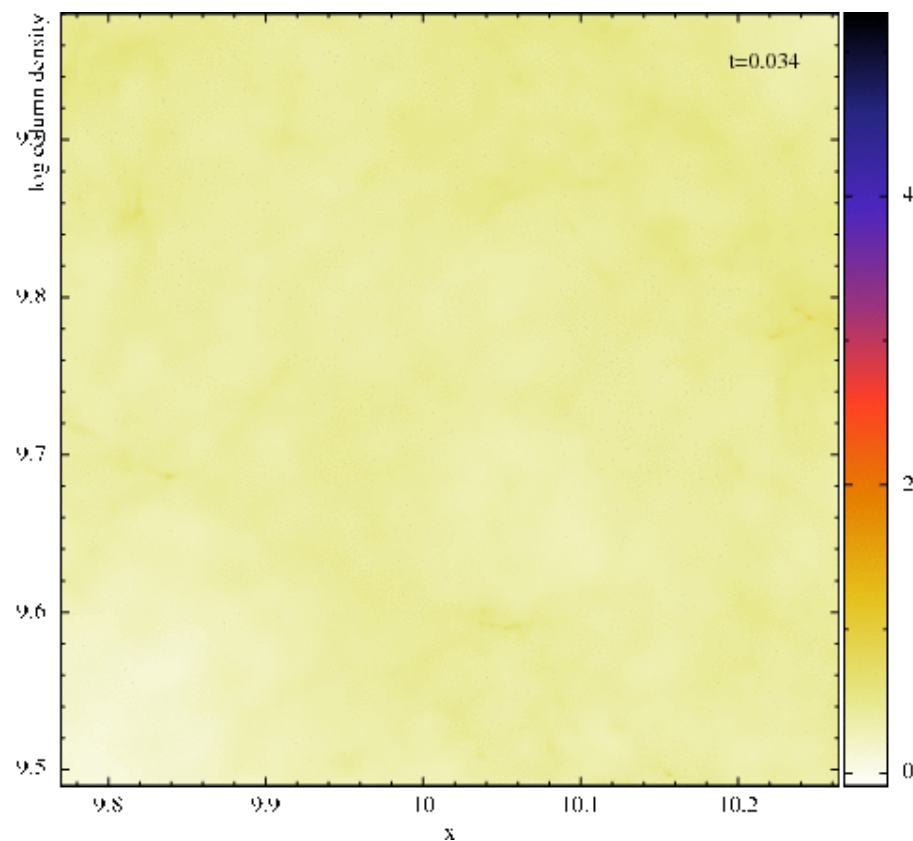
$n_{\text{th,SF}} = 10\text{-}100/\text{cm}^3$

ガスの分布

SNe feedback なし



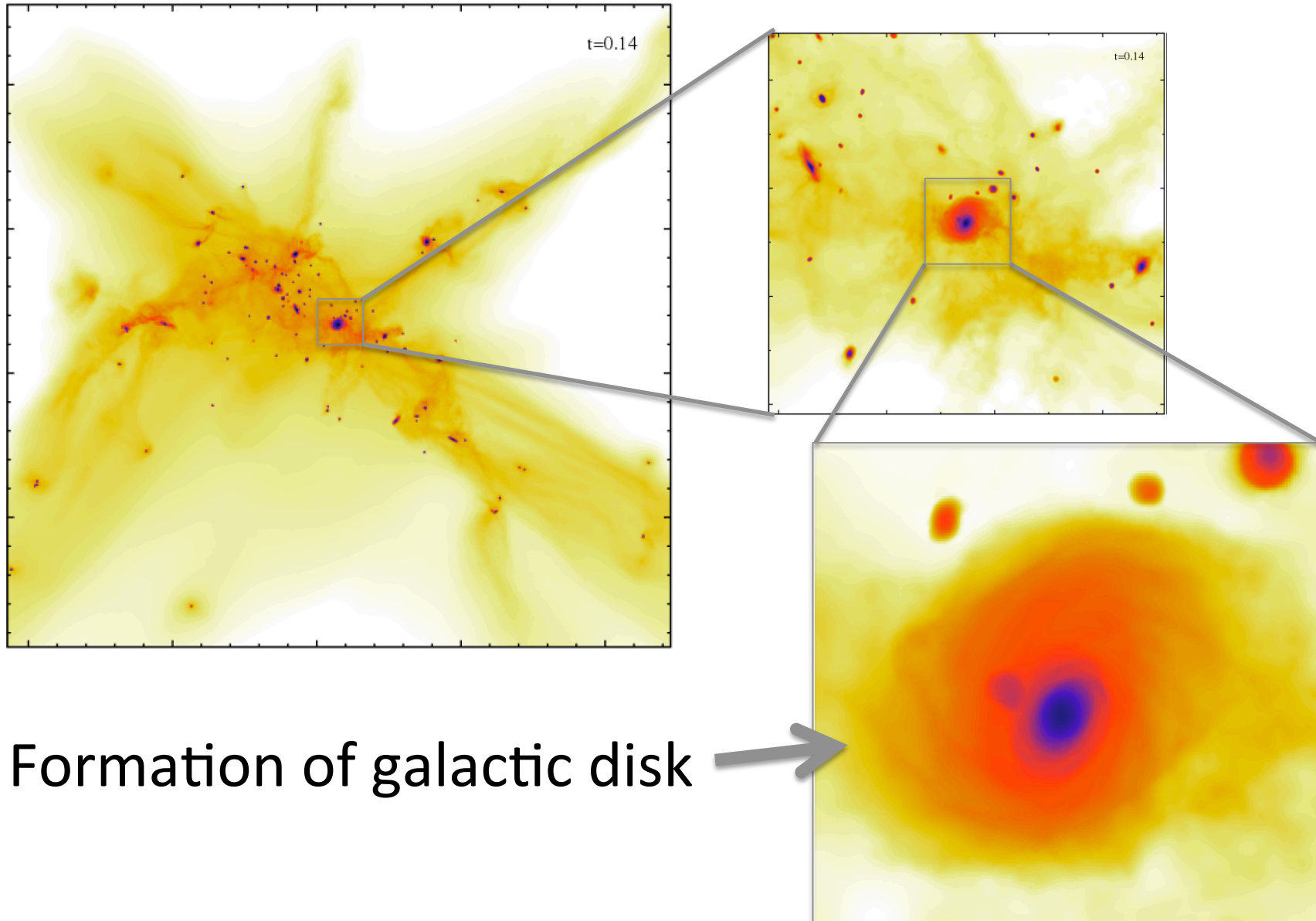
w. SNe feedback



500 kpc (comoving)

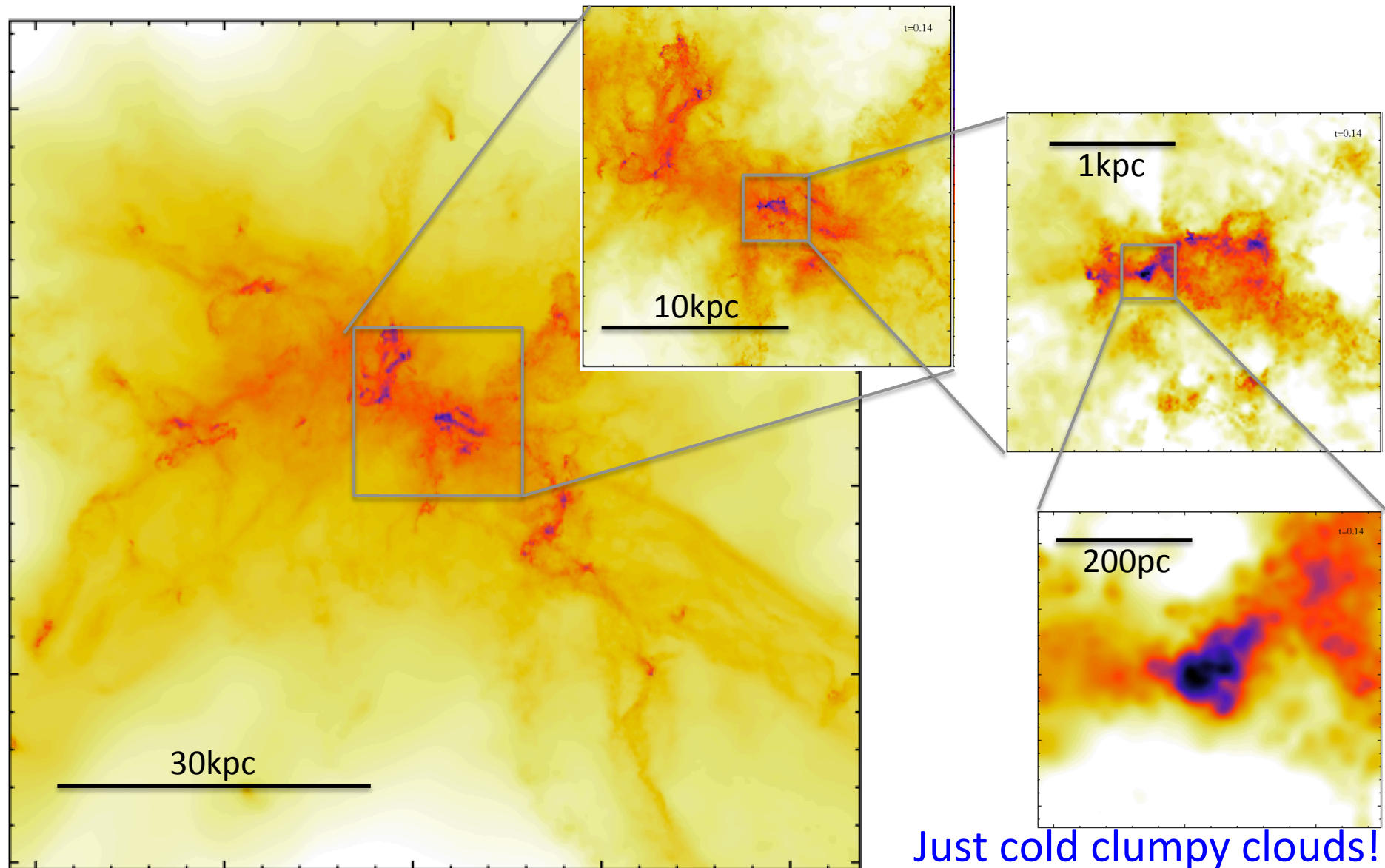
Halo0 ($M_h=2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ at $z=6$)

SNeフィードバックなし

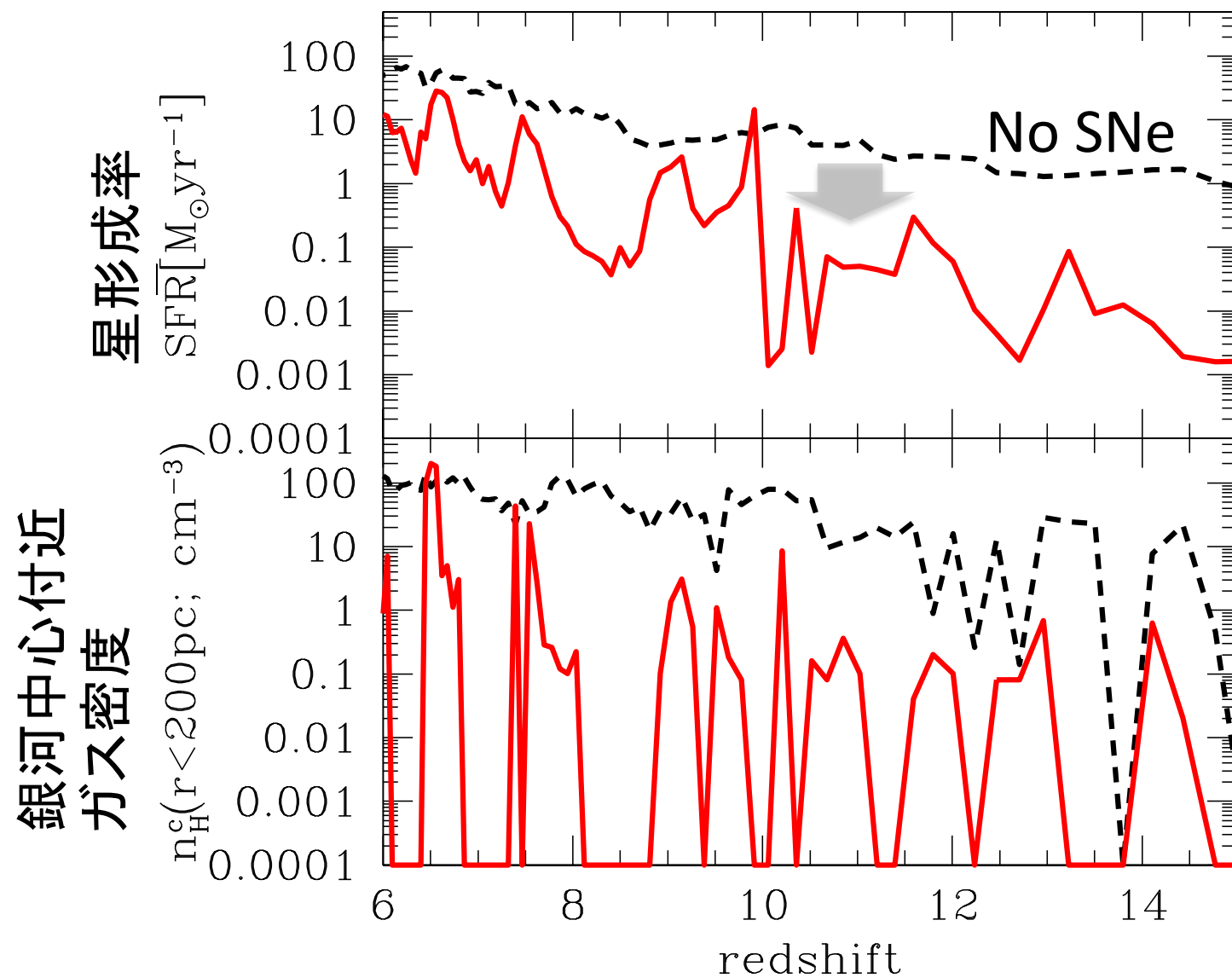


Formation of galactic disk →

SNeフィードバック



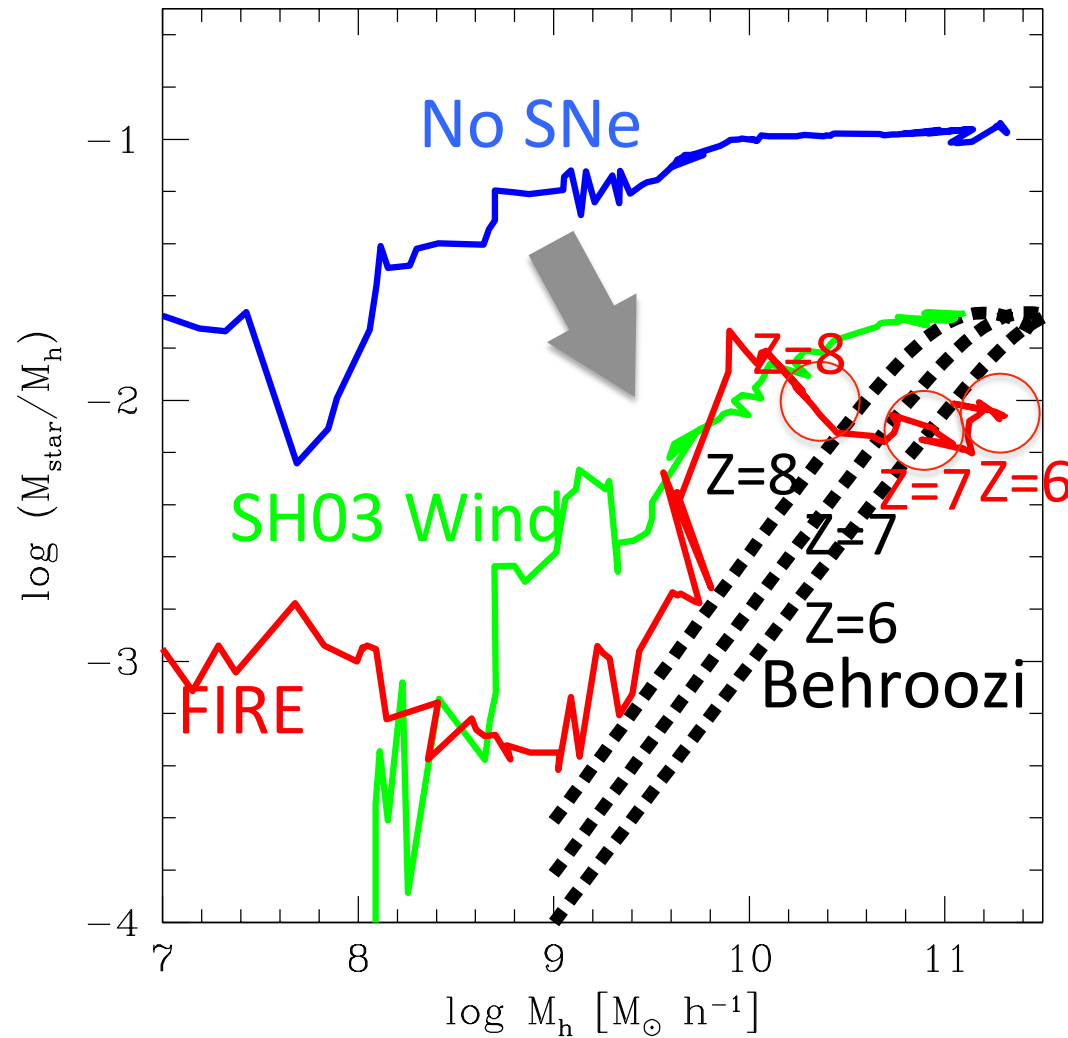
星形成史



フィードバックによりガスが吹き飛ばされる
→星形成が間欠的に

ダイナミカルタイムより短い時間で星形成率が変動する

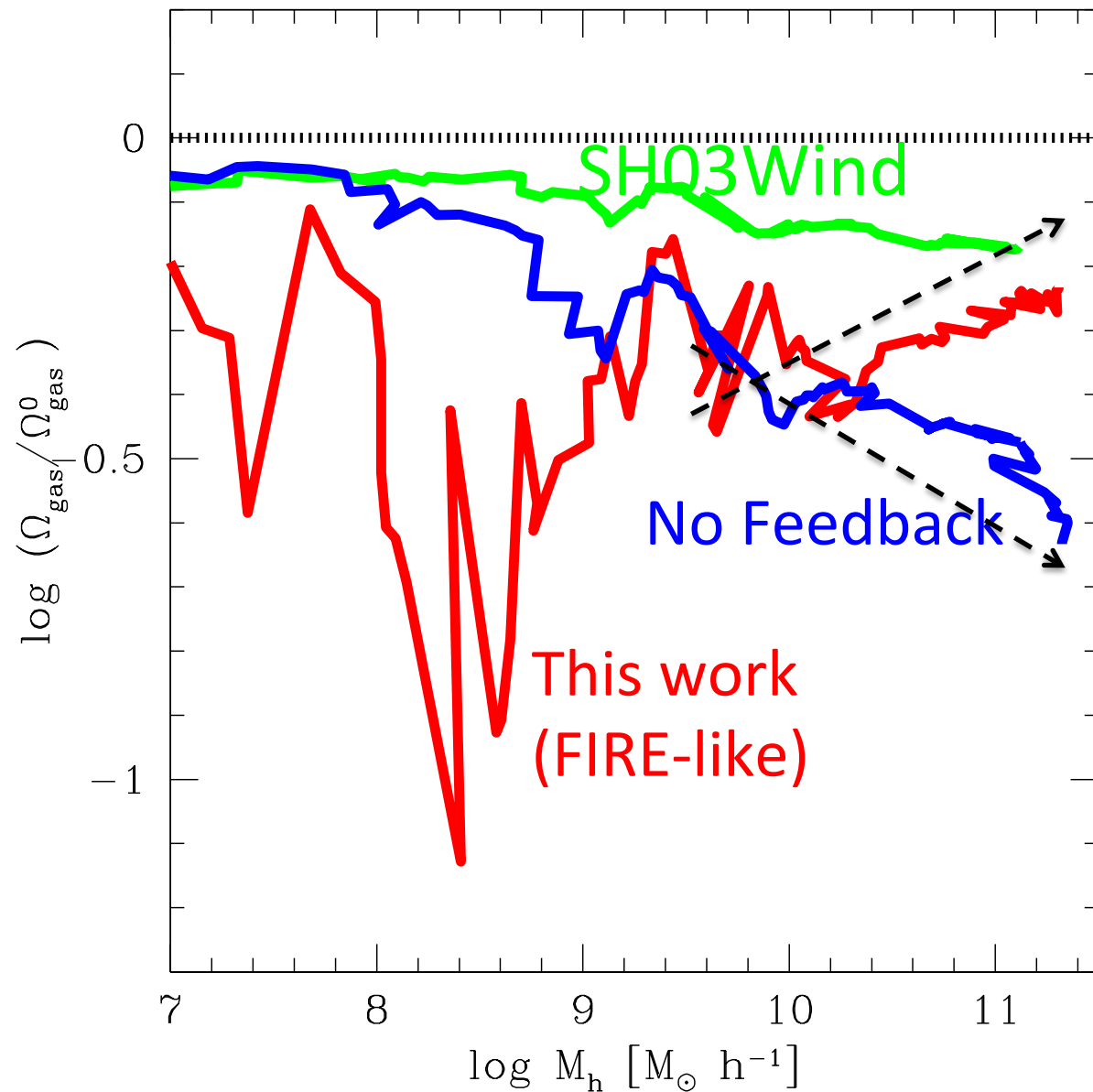
星質量とハロー質量



SNeフィードバックにより
星形成が1桁程度抑制
される

Behrooziらのabundance
matchingによる示唆とコ
ンシステントな値となる

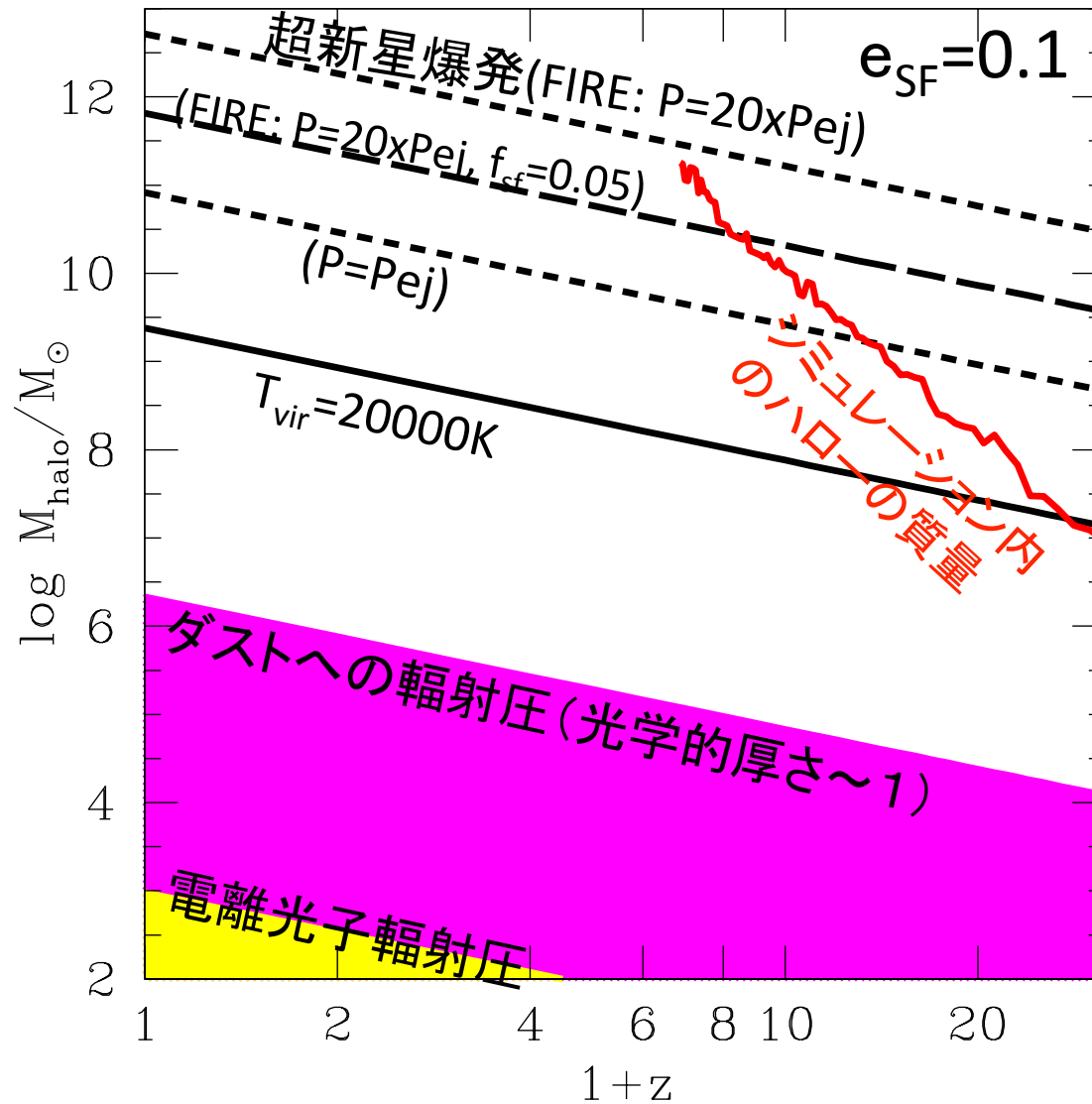
ガスの質量割合 vs. ハロー質量



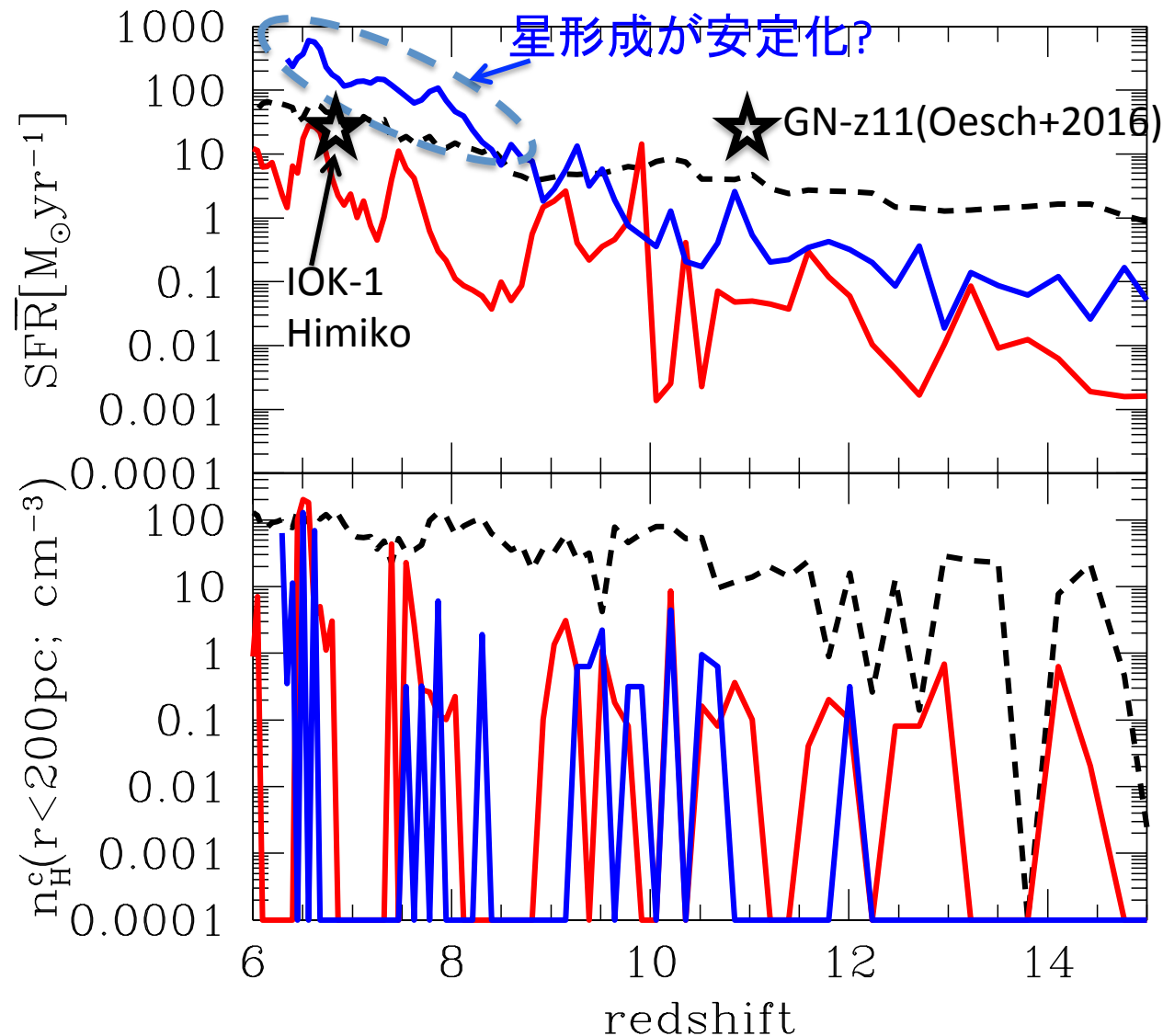
フィードバック:
ハローの成長とともにフィードバックを受けたガスをハロー内にトラップ出来るようになっていく

No フィードバック:
ハローの成長とともに効率的にガスが星にconvertするためにgas fractionが小さくなる

考察



より大きな銀河では



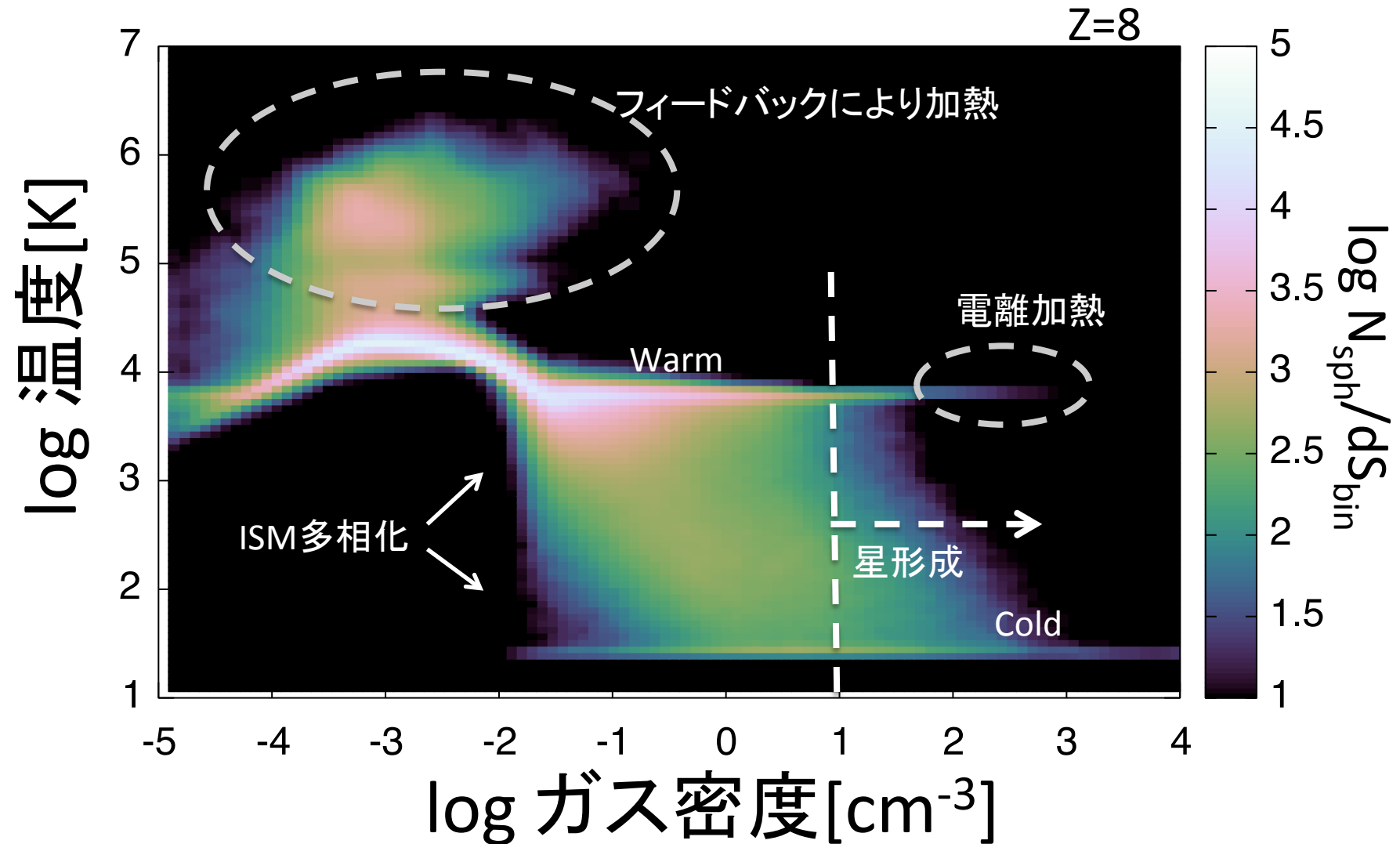
$M_{\text{h}} \sim 10^{12} M_{\text{sun}}$ at $z \sim 6$

$M_{\text{h}} \sim 2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ at $z \sim 6$

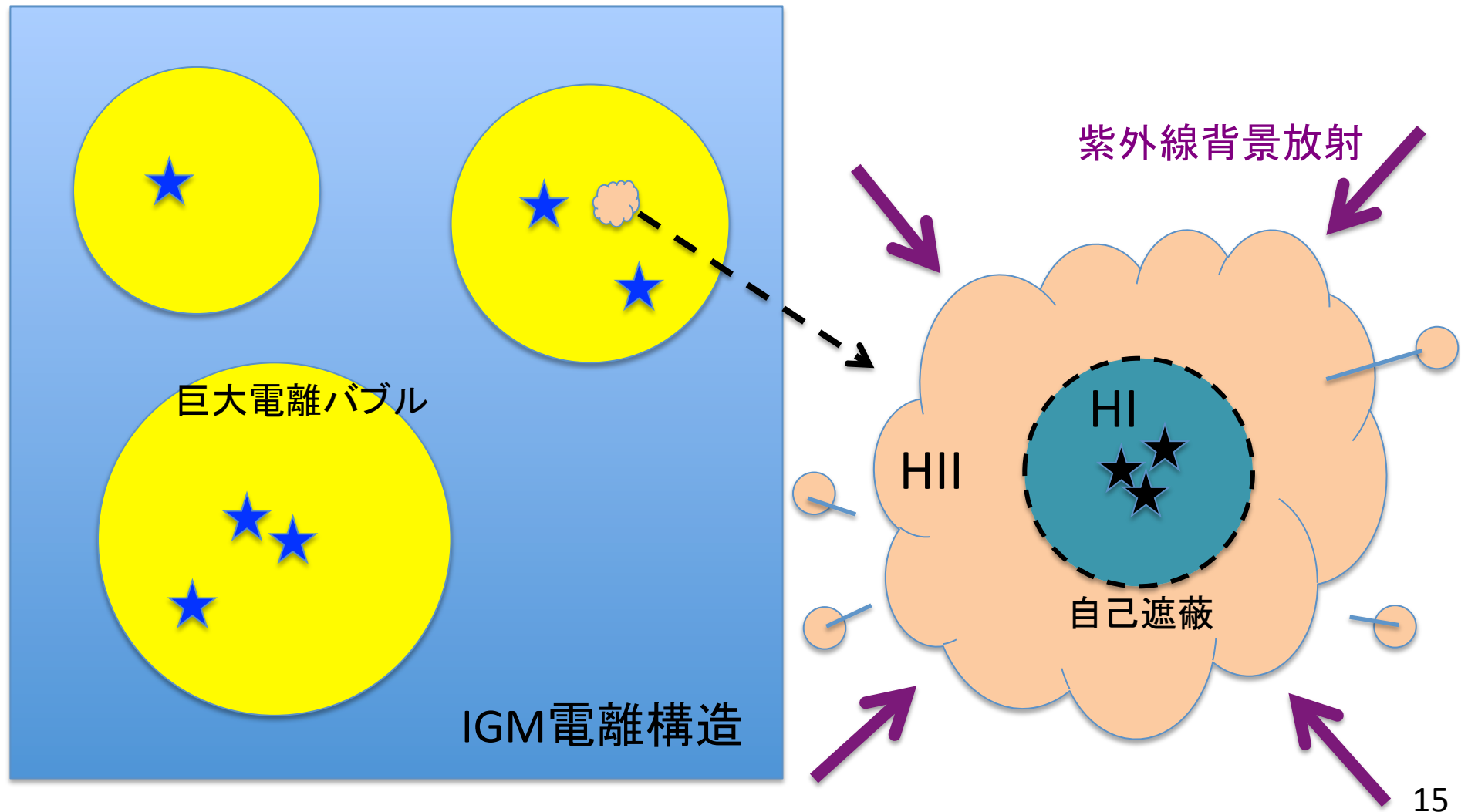
$10^{12} M_{\text{sun}}$ のハローは $z < 9$ で
SFRが安定(ハロー質量が
 $2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$ 程度の時)
ただし、ハロー中心はガス
がフィードバックで除かれる

Massive haloでもGN-z11
の星形成率は作れない

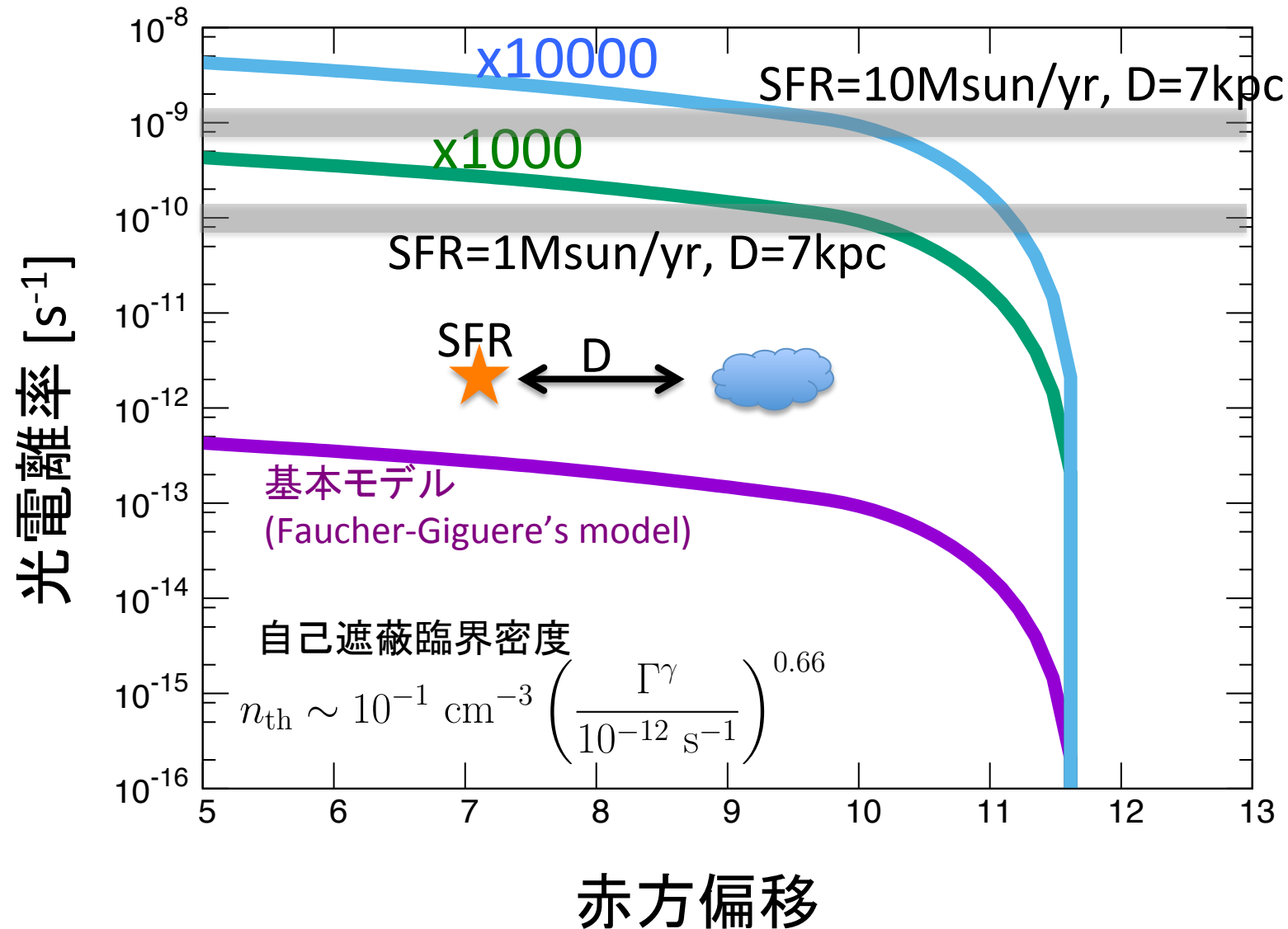
Phase diagram



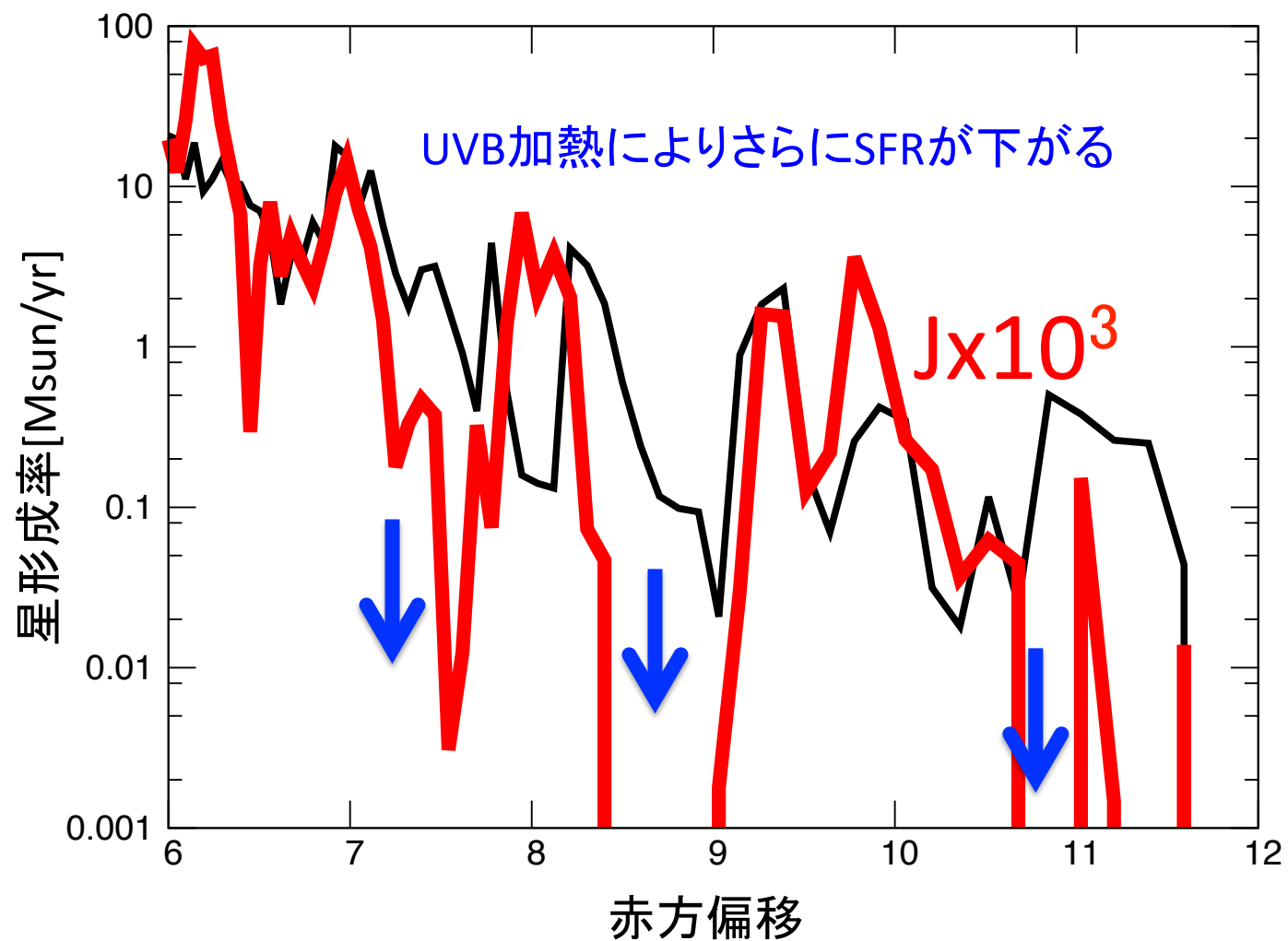
環境効果: UV編



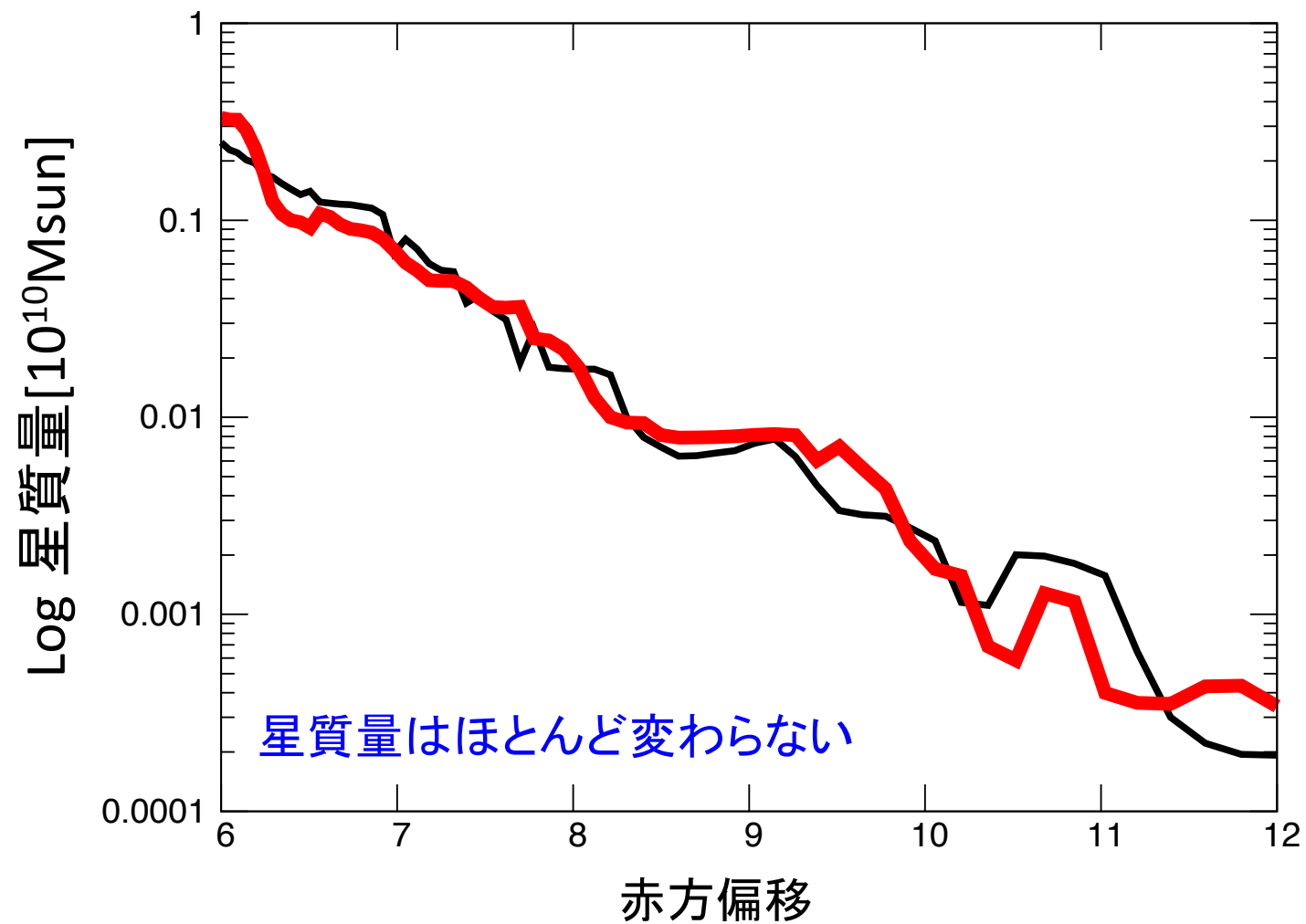
紫外線背景放射



星形成史



星質量



まとめ

宇宙論的流体計算+ズームイン初期条件による高精度シミュレーションで初代銀河の形成、星形成を調べた

- ・超新星爆発によるフィードバックで星形成は大きく阻害され、星形成史は間欠的になる
- ・ハロー質量が $10^{12} M_{\text{sun}}$ 以上になると安定的に星形成が続く
- ・紫外線背景放射が強い環境ではstellar feedbackによりガスが低密度になるとUVBによりさらに加熱が効いて星形成率が下がる

今後の予定

環境の違い、ハロー質量の違いが観測されているLAEs, LBGs, SMGsにどのようにつながっていくのかを多波長輻射輸送計算とサンプル数を増やして調べる