

New SNII feedback treatment in a SPH simulation of galaxy formation

清水一紘 (大阪大学)

共同研究者

長峯健太郎 (大阪大学)

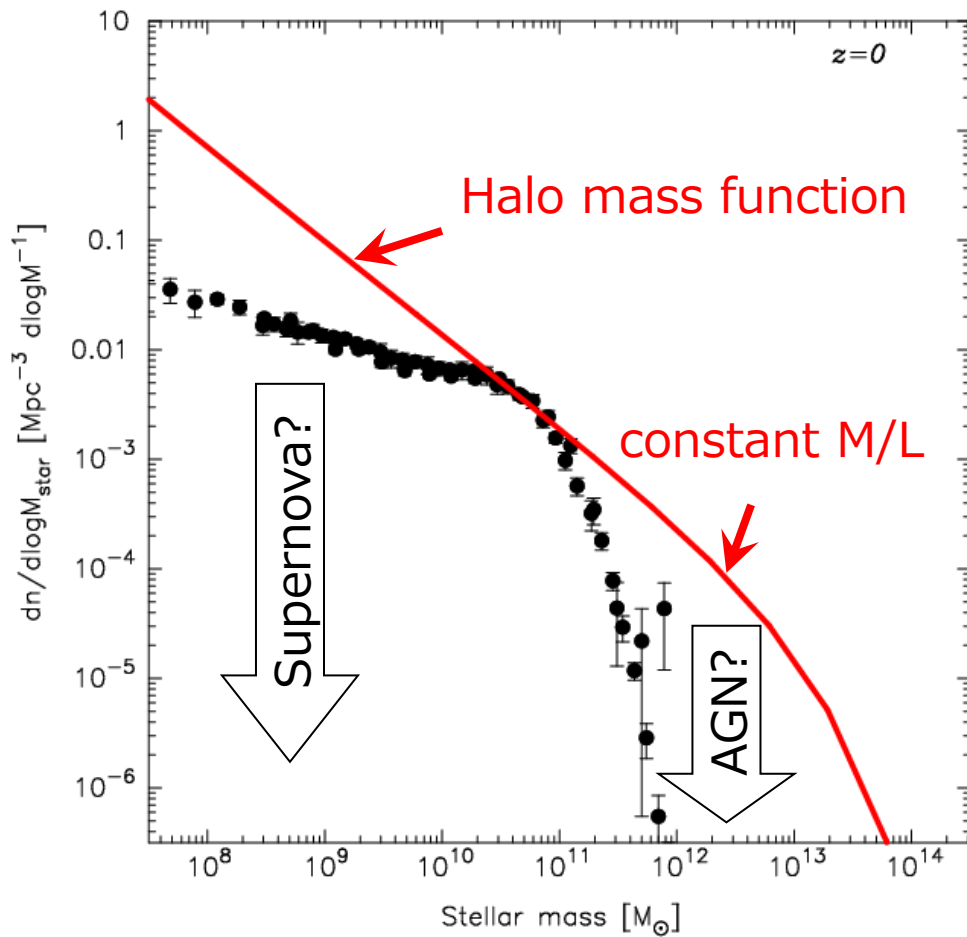
青山尚平 (大阪大学)

Keita Todoroki (University of Kansas)

Jun-Hwan Choi (University of Texas Austin)

Quenching star formation activity

Stellar mass function at $z=0$



Li+'09, Baldry+'11

観測を再現するには、星形成を抑制する何らかのメカニズムが必要

- ✓ Stellar feedback
 - photoionization, heating
 - radiation pressure
 - stellar wind
- ✓ SN feedback
 - SNII, SNIa feedback
- ✓ AGN feedback
 - Quasar mode, radio mode

今回は、**SN feedback** に注目！

SN Feedback in Numerical Simulations

SN feedback の一般的な取り扱い

●Thermal Feedback

SN エネルギーを熱エネルギーとして星周りのガスに与える

問題点: 星周りのガスの密度が高すぎて、冷却が効率的に効きすぎる

⇒ 放射冷却でインプットした熱エネルギーがすぐに出ていき、他のガスに与える
feedback の影響が弱くなる

処方箋: 熱エネルギーを受けたガスの冷却を一定時間切る

e.g., Cen & Ostriker '99, Thacker+'01, Stinson+'06

●Kinetic feedback

SN エネルギーを運動エネルギーとして星周りのガスに与える

- ✓Energy driven wind model
- ✓Moment driven wind model
- ✓Constant wind model

問題点: 星周りのガスの密度が高すぎて、星形成領域から出ていくのが難しい

処方箋: 一定時間運動エネルギーをもらったガスの流体相互作用を切る

e.g., Springel+'03, Oppenheimer+'06, Okamoto+'10, etc

Energy-driven Winds

仮定すること

1. Winds velocity は virial velocity に比例させる
2. エネルギー保存則を満たすようにする

$$v_w \propto V_{\text{vir}}$$

$$\dot{E}_w = \frac{1}{2} \dot{M}_w v_w^2$$

$$\dot{E}_{\text{SN}} = \epsilon_{\text{SN}} \zeta \dot{M}_* E_{\text{SN}}$$



$$\eta = \eta_0 \left(\frac{V_{\text{vir}}}{200 \text{ km/s}} \right)^{-2}$$

Mass loading rate は質量の大きい銀河で小さくなる

mass loading rate η の定義

$$\eta = \frac{\dot{M}_w}{\dot{M}_*}$$

\dot{M}_w = winds mass per unit time

\dot{M}_* = star formation rate

Momentum-driven Winds

仮定すること

1. Winds velocity は virial velocity に比例させる
2. 運動量保存則を満たすようにする

$$\begin{array}{l} v_w \propto V_{\text{vir}} \\ \dot{M}_w v_w \propto \frac{E_{\text{rad}}}{c} \propto \dot{M}_* \end{array} \quad \longrightarrow \quad \eta = \eta_0 \left(\frac{V_{\text{vir}}}{200 \text{ km/s}} \right)^{-1}$$

ガスが星から受ける radiation pressure でガスが駆動される
描像を考えている

Stellar mass function の low mass 側は energy driven-winds model に比べてより steep な形になる。

Constant Speed Winds Models

仮定すること

1. Winds velocity は一定
2. Mass loading rate も一定

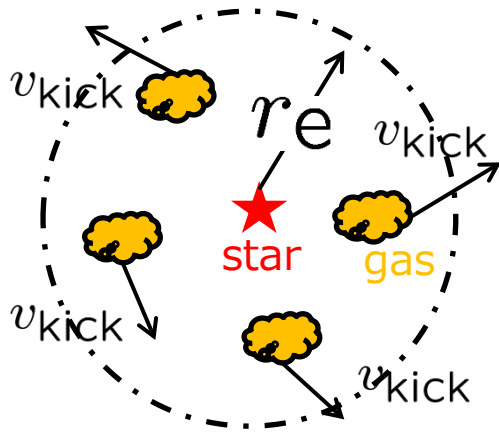
例えば Springel+'03 の場合、



~50% of SN energy は wind を駆動するのに使われる。

SN Feedback が効かなくなる臨界ハロー質量がどこかに現れる。

Traditional SNII scheme



- i. Kick velocity (v_{kick}) を星粒子から近い順にアサイン
← 運動量 or エネルギーどちらか保存するようにアサイン
← kick 速度はすべての粒子で同じ
SN の影響を受ける有効半径は、計算の解像度に依存

- ii. Kicked particle がキックされてからある程度時間がたつと、kicked particle の周りの密度がある程度低くなるまで、流体相互作用と cooling を切る。

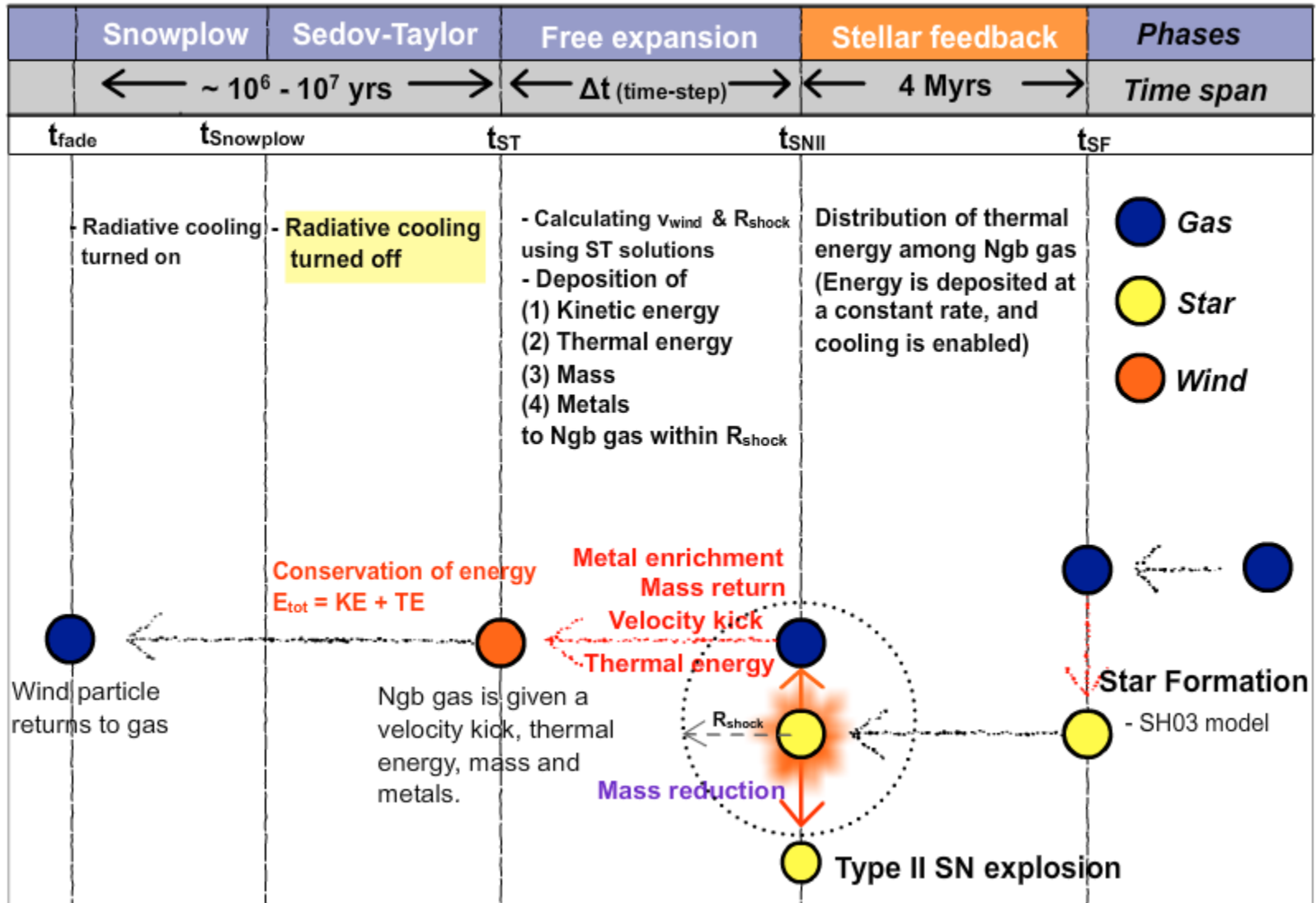
$$n_{esc} \sim 0.1 n_{SF}$$
$$t_{esc} \sim l_{esc} / v_{wind} : l_{esc} \sim 10 \text{ kpc}$$

- iii. Kicked particle が ii の条件を満たしたら、流体相互作用と cooling を on にする。

New SNIi feedback treatment

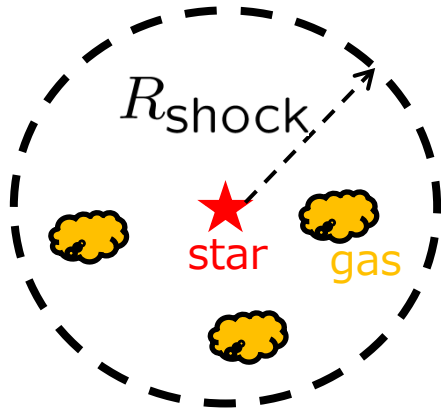
概念図

Based on master thesis of Todoroki 2014



New SNIi feedback treatment

SN bubble 進化の解析解に基づいた、SNIi kick velocity の決定



1. 星粒子周りの shock radius (R_{shock}) を計算
(星粒子周りの、密度、圧力は星粒子周りのガス粒子から推定)

$$R_{\text{shock}} = 10^{1.74} E_{51}^{0.32} n_0^{-0.16} P_{04}^{-0.20} \text{pc}$$

$$E_{51} = E_{\text{SN}} / 10^{51} \text{erg/s}$$

$$P_{04} = 10^{-4} P k^{-1}$$

Chevalier 1974, Stinson et al.2006

2. R_{shock} 内の particle に SNIi のエネルギー (熱エネルギー、運動エネルギー) を与える。
エネルギーは SPH kernel weight の重みをつけて与える

$$\Delta A_i = \frac{m_i W(|r_s - r_i|, h_s)}{\sum_{j=1}^N m_j W(|r_s - r_j|, h_s)}$$

kinetic energy、thermal energy の割合は任意 (fiducial model : $E_K=0.3$, $E_T=0.7$)
(Metal, SN ejecta の与え方も上式を利用)

New SNII feedback treatment

3. Kick velocity (v_{shock}) はエネルギー保存則から求める。

$$v_{\text{shock}} = \sqrt{\frac{2E_K}{m}}$$

Sedov-Taylor 期の shock velocity の解析解

$$v_{\text{shock}}^{\text{ana}} = 188 \left(\frac{E_K}{10^{51}} \right)^{0.07} n^{0.14} \text{km/s}$$

現在の simulation の解像度では、個々の SN bubble をできないため、 R_{shock} 内のすべての粒子を解析解の速度で飛ばすと、エネルギー保存則を満たさなくなる。

4. Kick されてから T_{ST} (Sedov-Taylor phase: adiabatic phase) 間だけ、cooling のみを切る (流体相互作用は常に on)。

$$T_{\text{ST}} = 4.93 \times 10^4 \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51}} \right)^{0.22} n^{-0.55} \text{yr}$$

Early stellar feedback treatment

SN feedback が効くまでに 10^6 Myr 程度、feedback が働いていない時期がある。

⇒ 星形成の初期フェーズに星を作りすぎる

⇒ SN が起きる前に何らかの Pre-SN feedbacks が必要

- Stellar Radiation
- Stellar winds

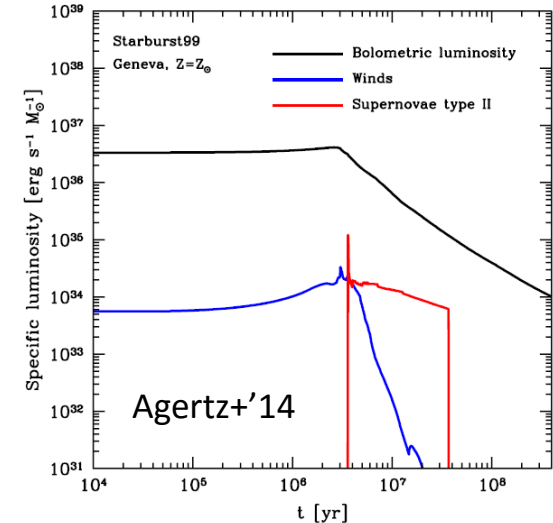
Stinson+13, Agertz+13, Okamoto+14

今回は、Stellar Radiation による加熱を採用

各タイムステップごとに、熱エネルギーとしてガス粒子に与える

$$\Delta E_{\text{SFB}} = E_{\text{SFB}} \frac{t - t_{\text{deposited}}}{t_{\text{explode}}}$$

Cooling は on、流体相互作用も on



E_{SFB} : total stellar radiation energy
 t : 現在の時刻
 $t_{\text{deposited}}$: 前回のタイムステップの時刻
 t_{explode} : SN が起こるまでの時間 (= 4 Myr)

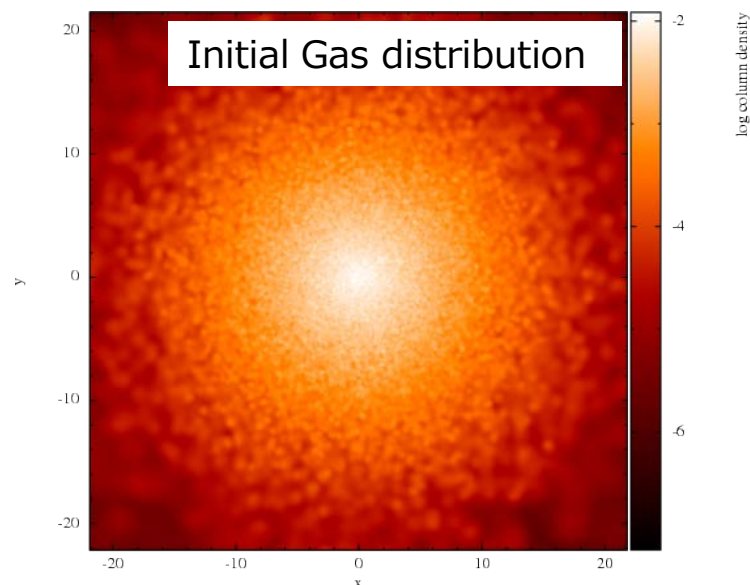
Test for Isolated disk galaxy

Simulation code: Osaka-Gadget3

radiative cooling (grackle package)/heating, Star formation (AGORA),
SNII feedback, early stellar feedback, metal yield (SNII only: AGORA),
DISPH法ベースに改良 (Saitoh & Makino '13, Hopkins'13)

AGORA project (Isolated disk galaxy initial condition)

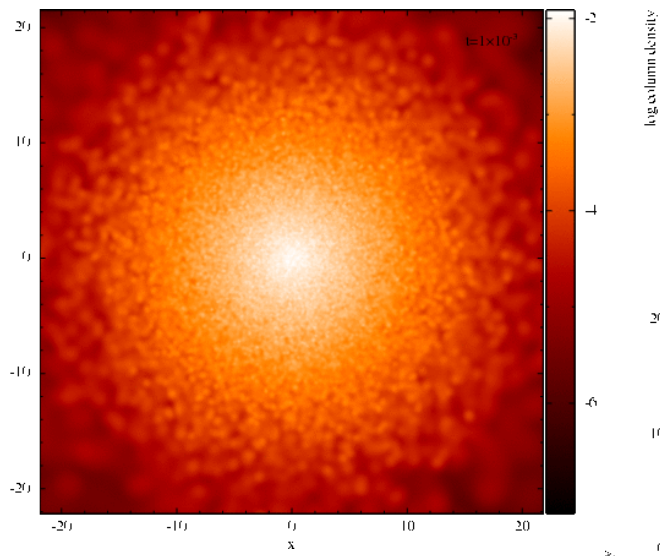
Parameter	Value
Gas mass	$8.59 \times 10^{10} M_{\odot}$
Dark matter mass	$1.25 \times 10^{12} M_{\odot}$
Disk mass	$4.30 \times 10^9 M_{\odot}$
Bulge mass	$3.44 \times 10^{10} M_{\odot}$
Total mass	$1.3 \times 10^{12} M_{\odot}$
Number of gas particle	1.00×10^5
Number of dark matter	1.00×10^5
Number of disk particle	1.00×10^5
Number of bulge particle	1.25×10^4
Gas particle mass	$8.59 \times 10^4 M_{\odot}$
Dark matter particle mass	$1.25 \times 10^7 M_{\odot}$
Disk particle mass	$3.44 \times 10^5 M_{\odot}$
Bulge particle mass	$3.44 \times 10^5 M_{\odot}$
Softening length	80 pc



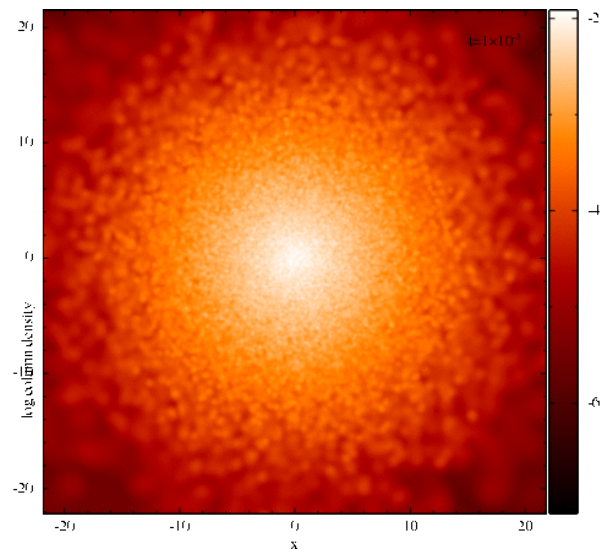
Kim et al. 2014

Gas density evolution

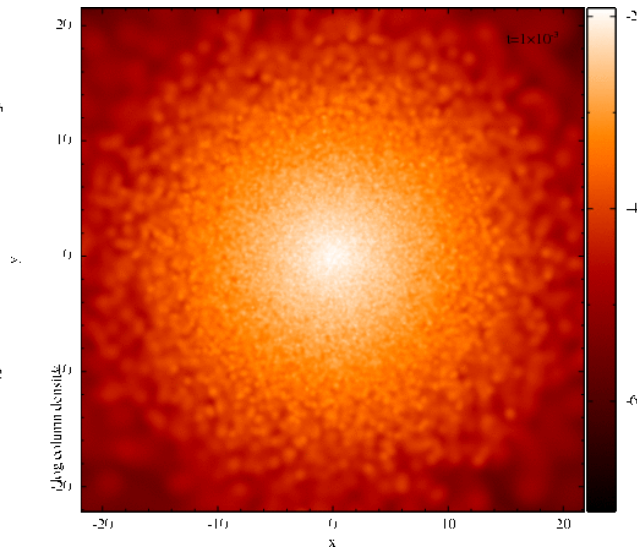
No feedback



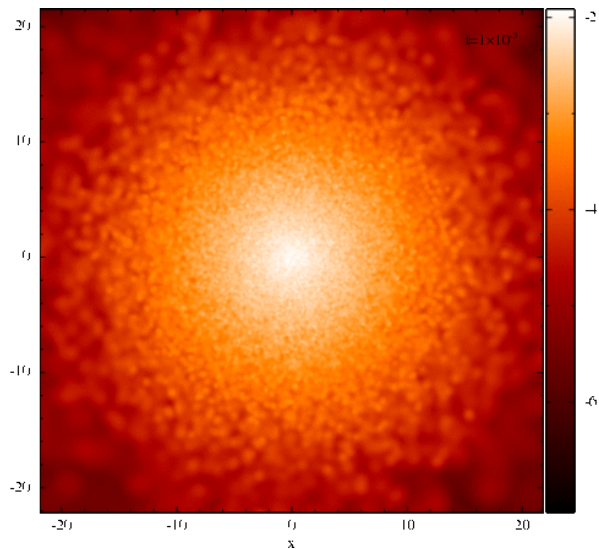
SNII only



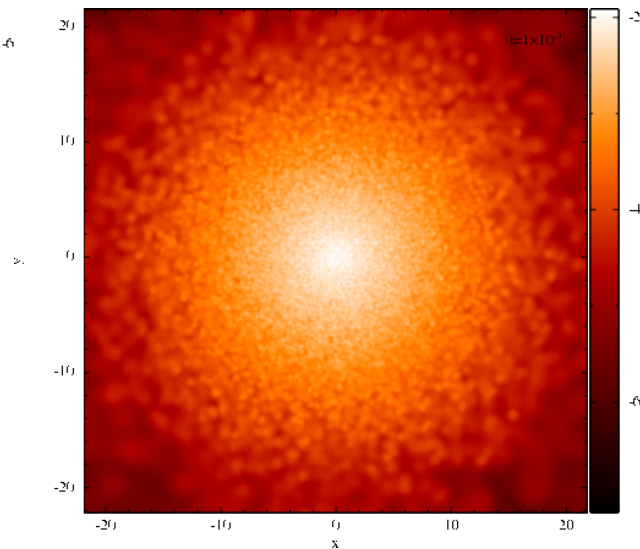
SNII + SFB



SFB only

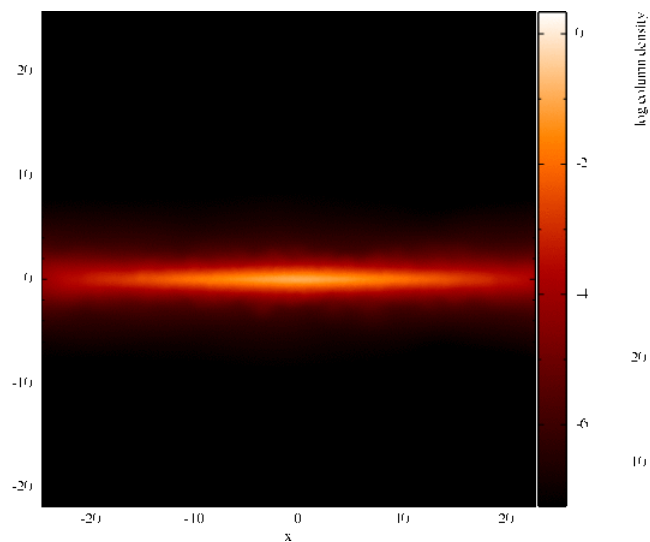


Const. Wind (SH03)

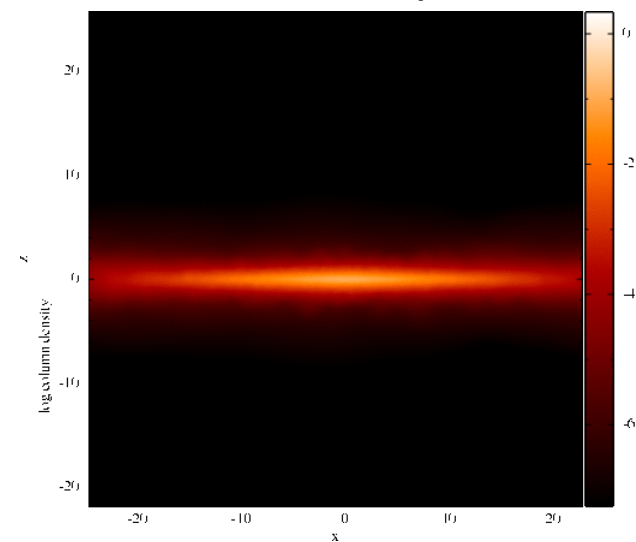


Gas density evolution

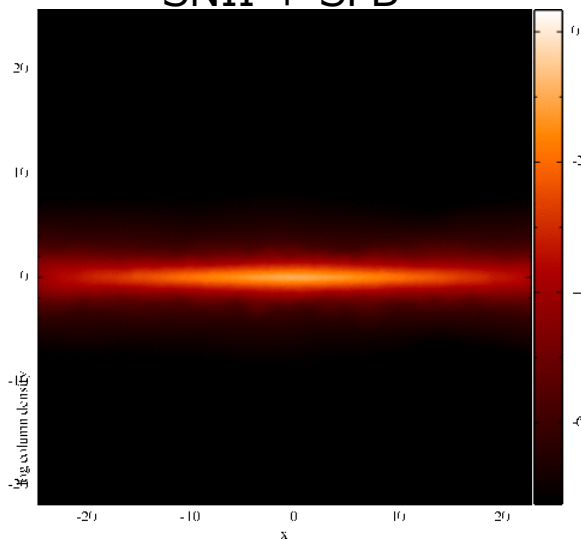
No feedback



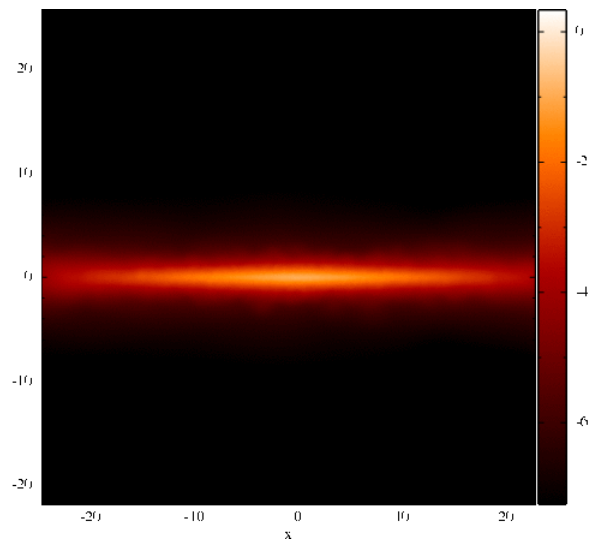
SNII only



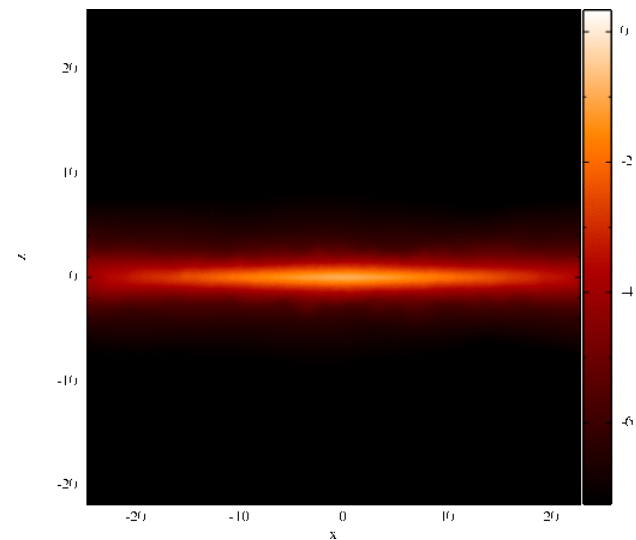
SNII + SFB



SFB only

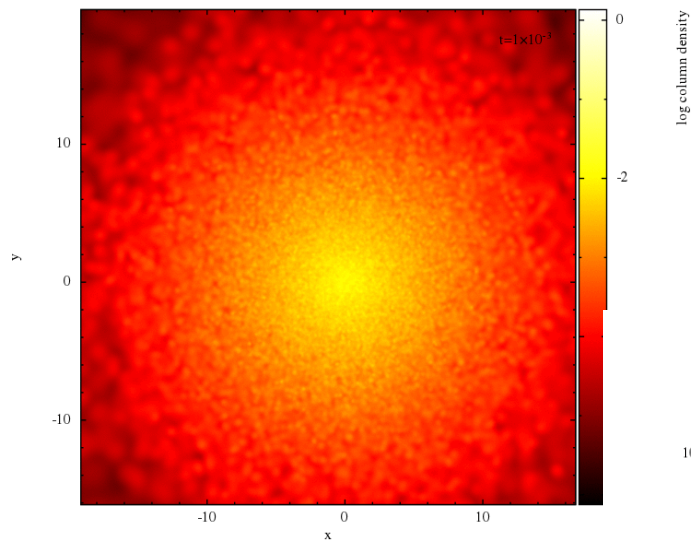


Const. Wind (SH03)

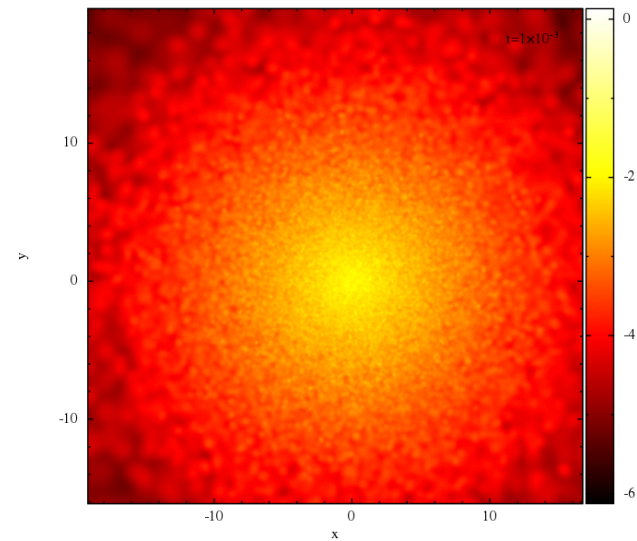


Stellar evolution

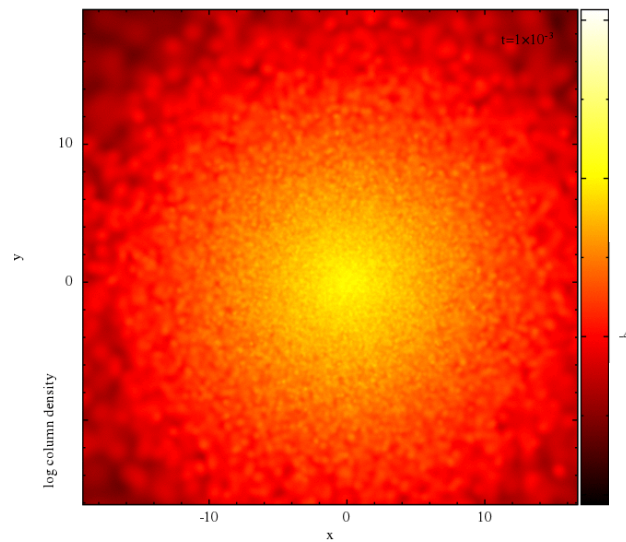
No feedback



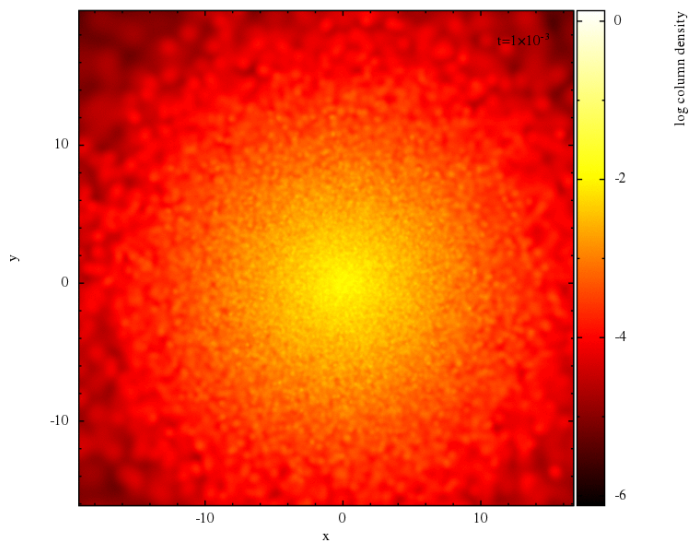
SNII only



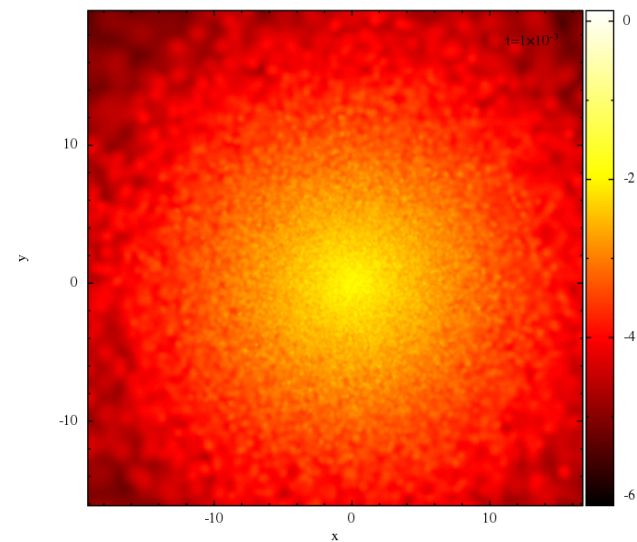
SNII + SFB



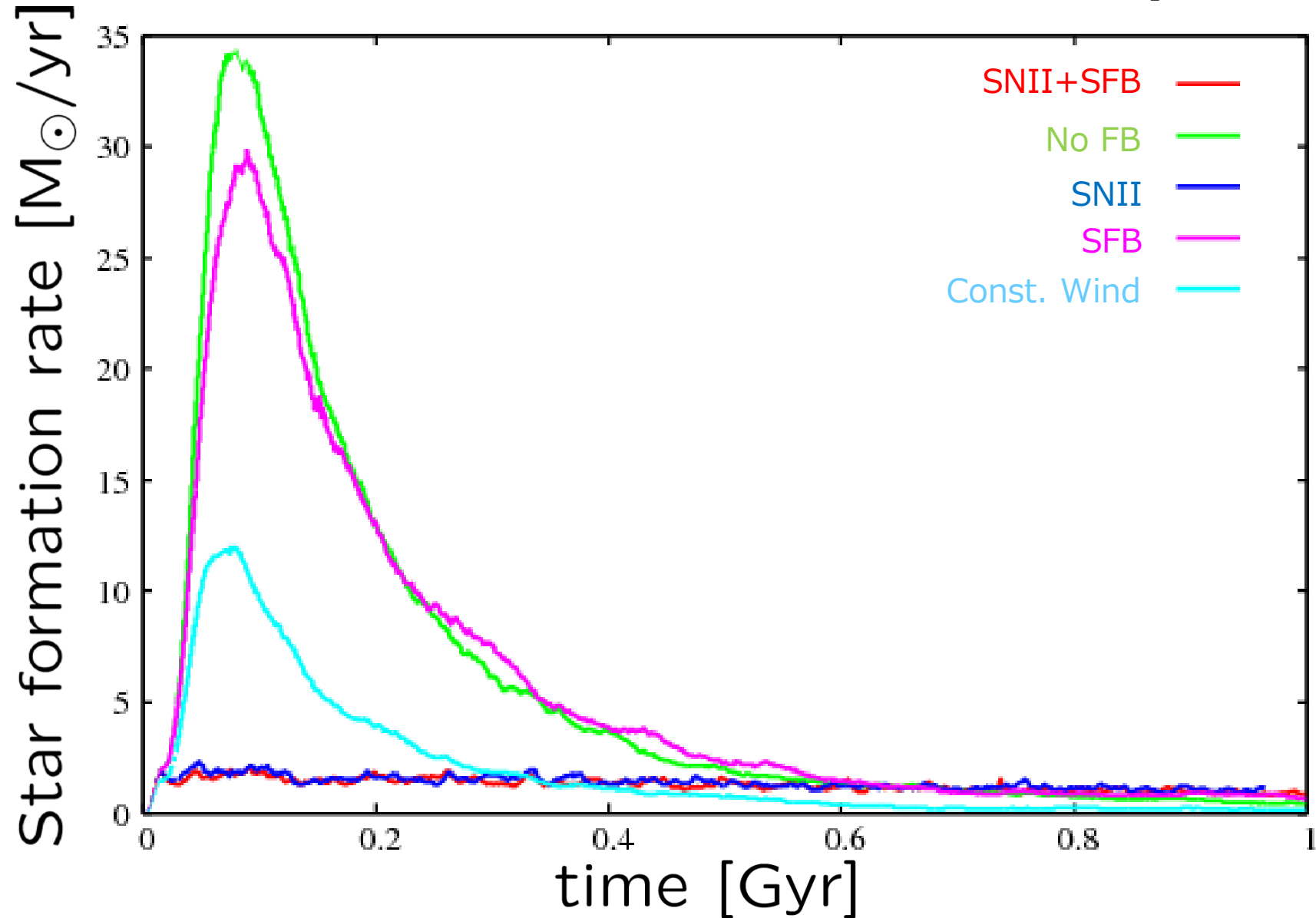
SFB only



Const. Wind (SH03)

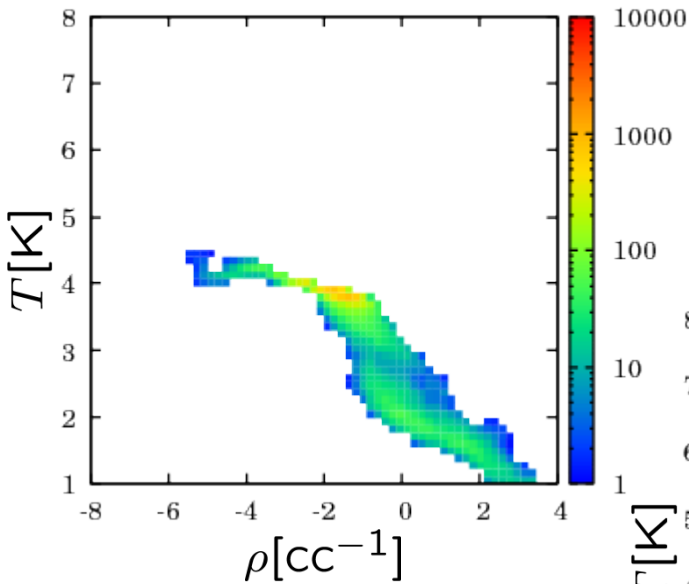


Star formation history

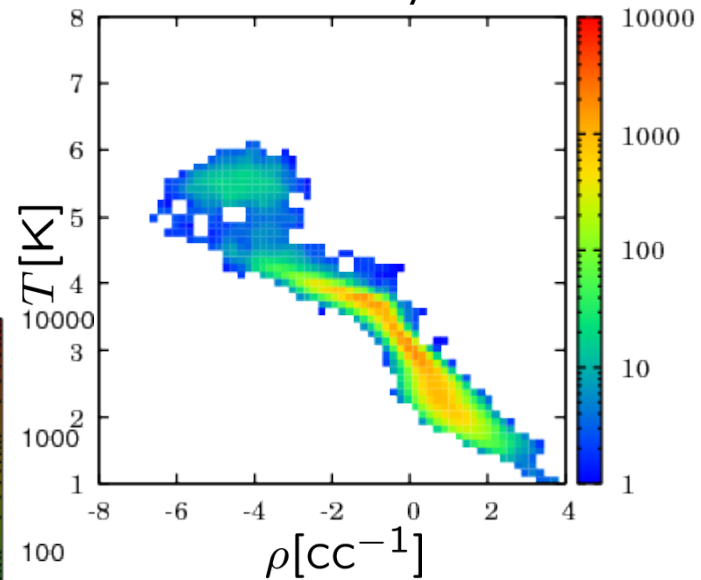


ρ -Temperature plane(t=1Gyr)

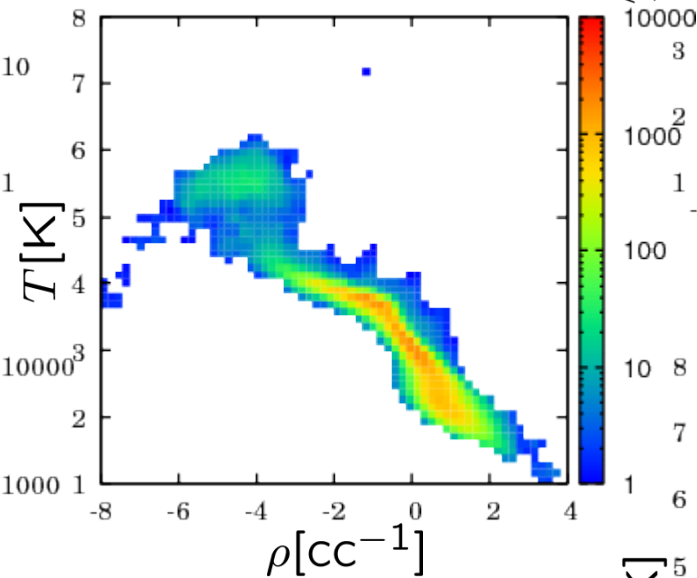
No feedback



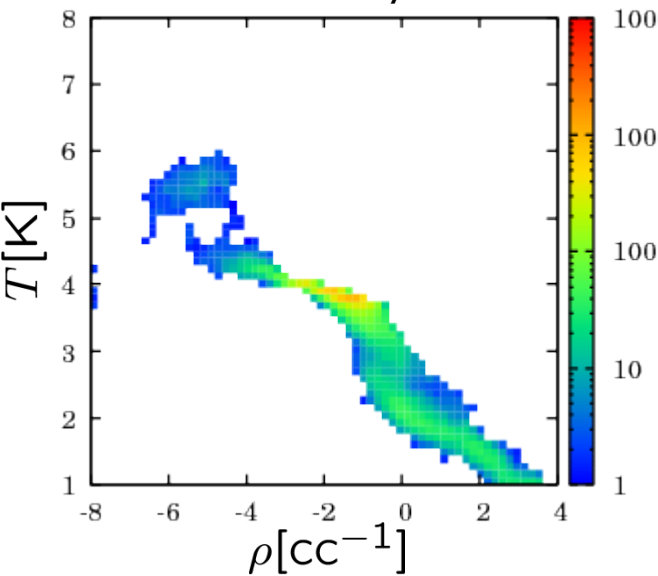
SNII only



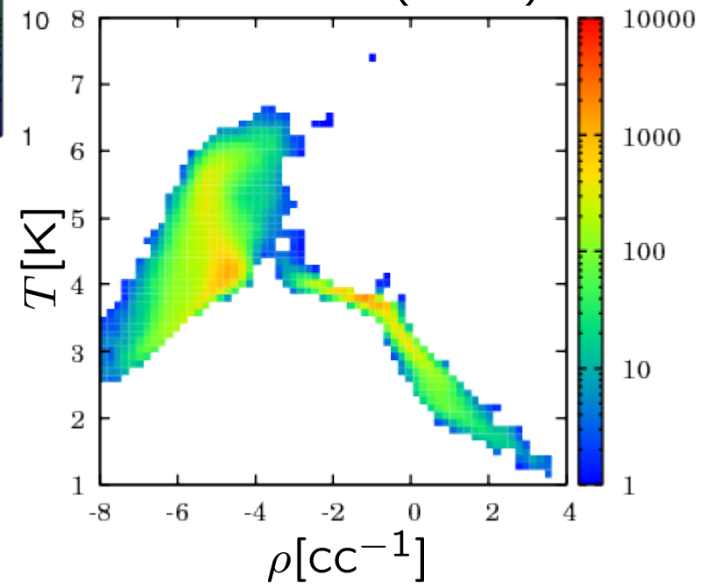
SNII + SFB



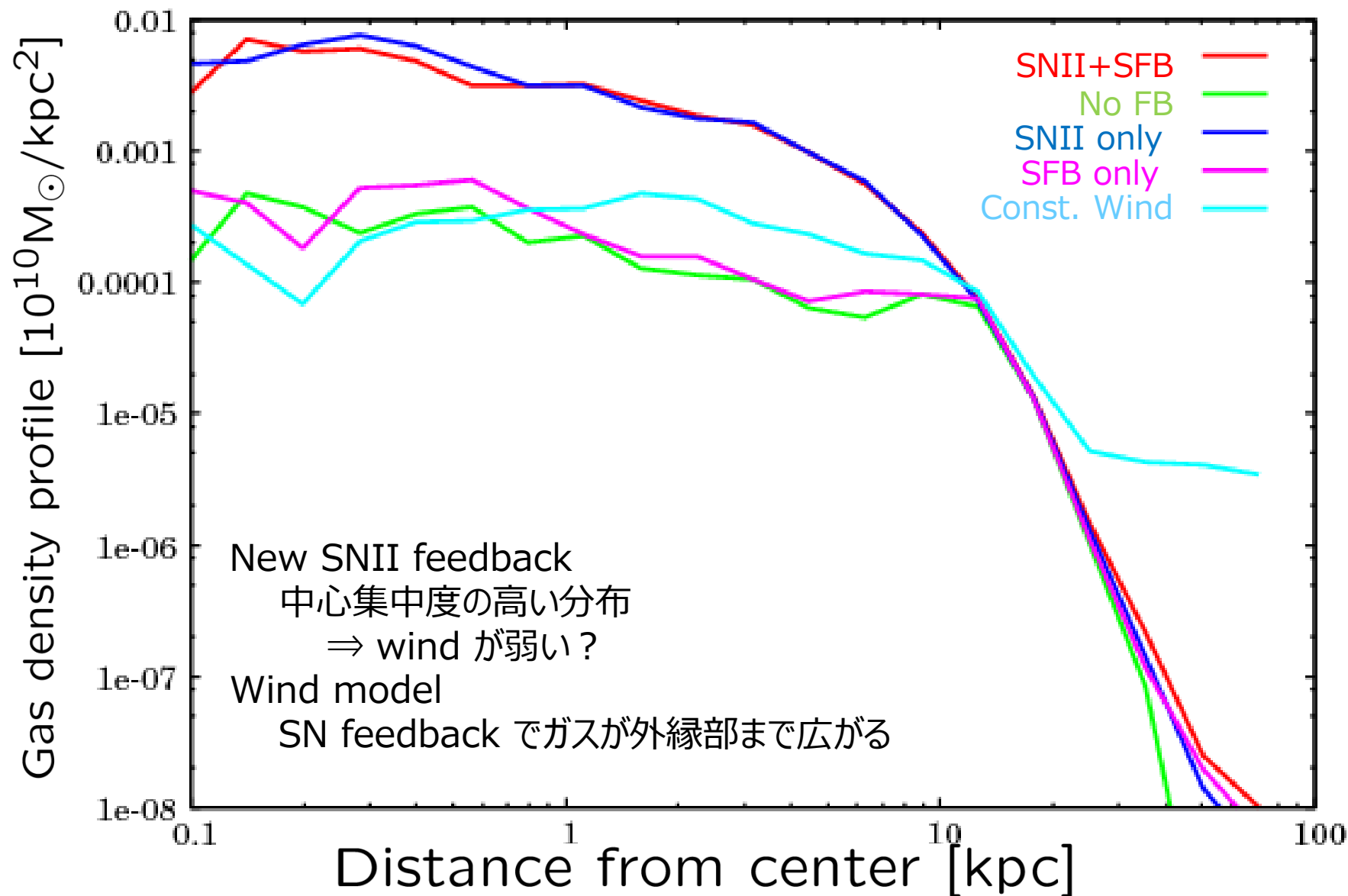
SFB only



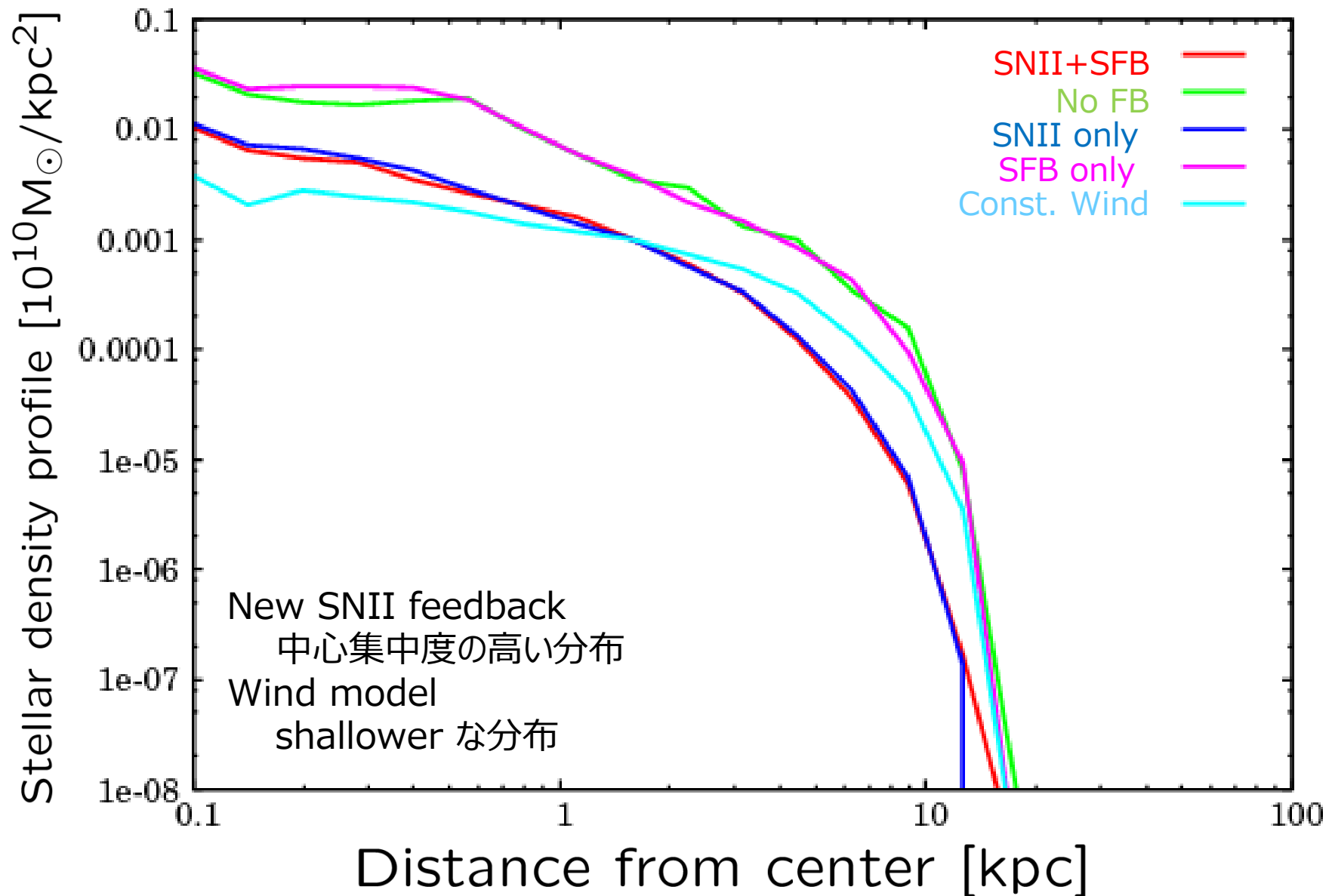
Const. Wind (SH03)



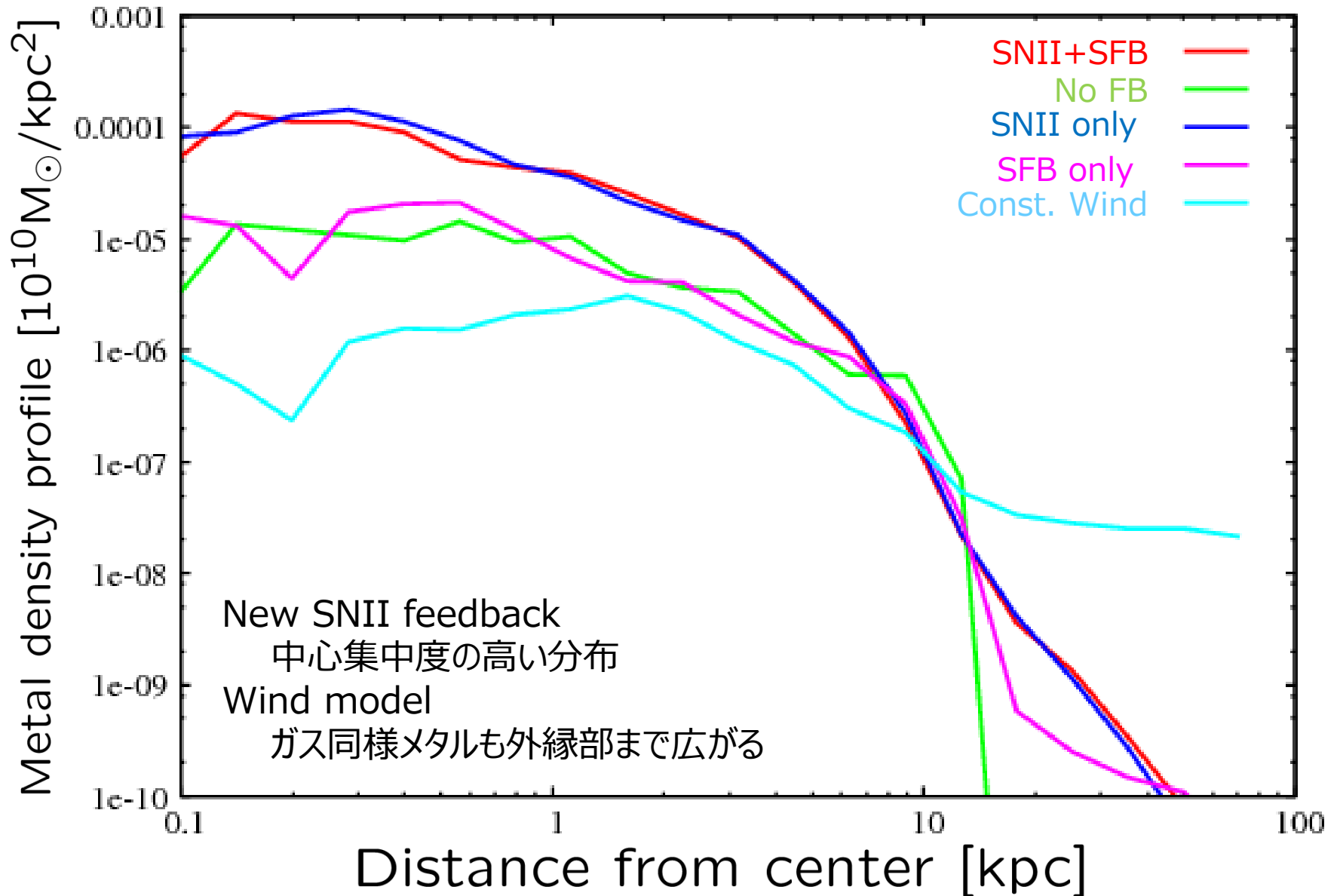
Gas radial profile (1Gyr)



Stellar radial profile (1Gyr)



Metal mass radial profile (1Gyr)



Cosmological simulation

Cosmology (Planck 1st year)

$$(\Omega_m \Omega_\lambda, \Omega_b, h, \sigma_8) = (0.3175, 0.6825, 0.049, 0.6711, 0.8344)$$

Simulation setup

Boxsize : 50Mpc³/h³

Number of particles : 2×256^3

M_{dm} : $5.5 \times 10^8 M_{\text{sun}}$

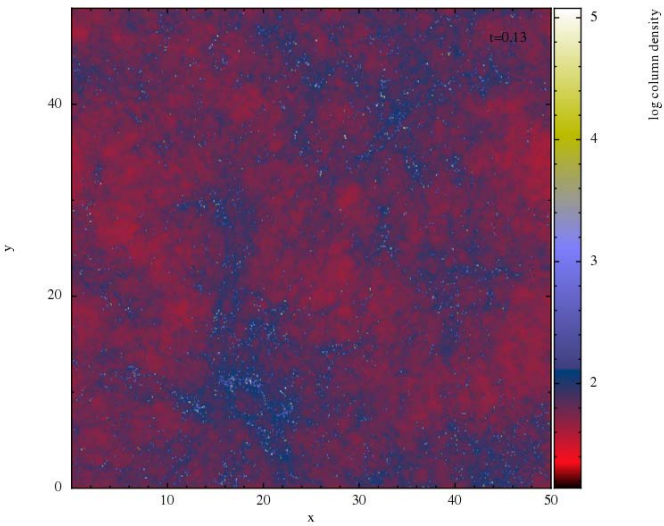
M_{gas} : $1.0 \times 10^6 M_{\text{sun}}$

Minimum halo mass: $\sim 10^{10} M_{\text{sun}}$

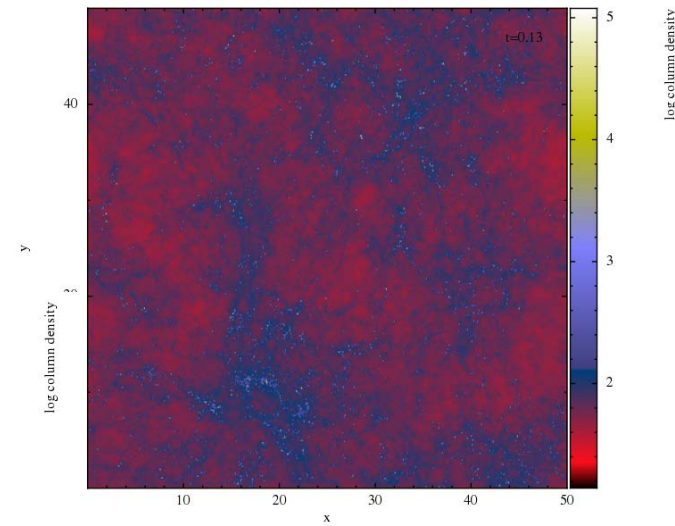
Minimum stellar mass: $\sim 10^8 M_{\text{sun}}$

Gas distribution at $z \sim 6$

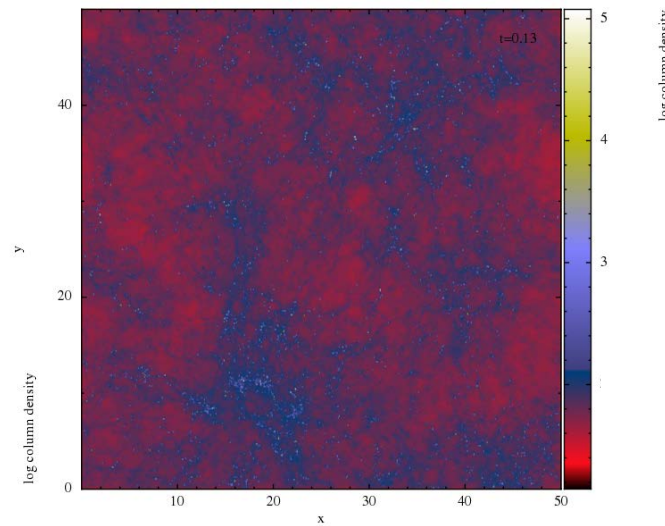
No feedback



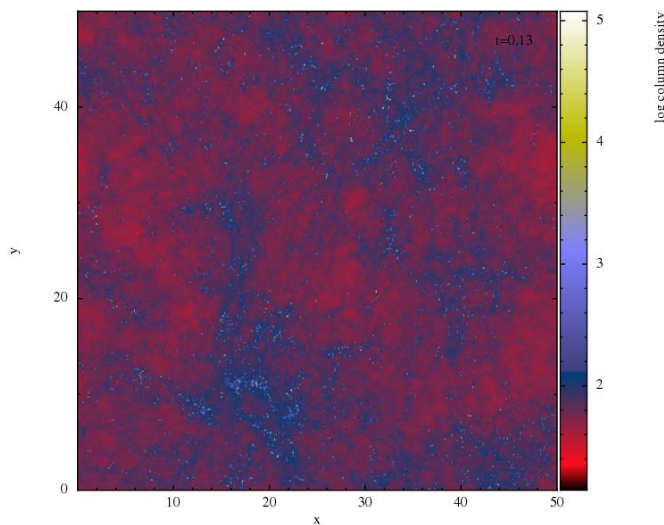
SNII only



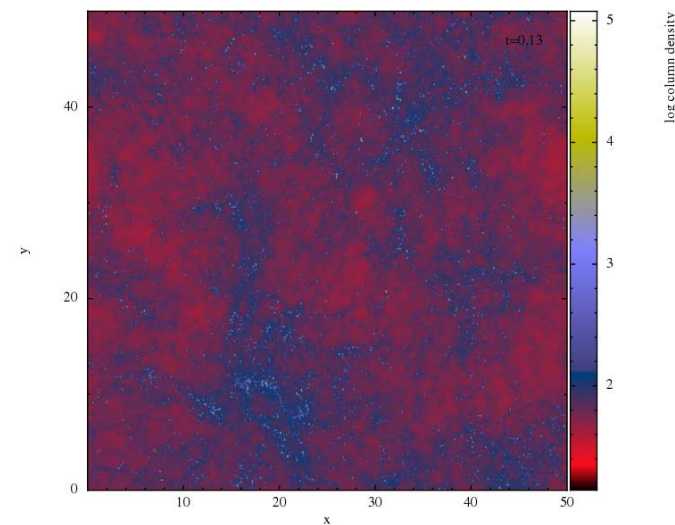
SNII + SFB



SFB only

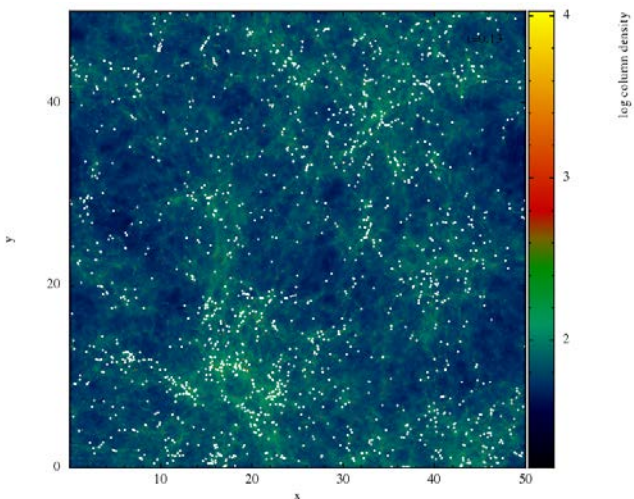


Const. Wind (SH03)

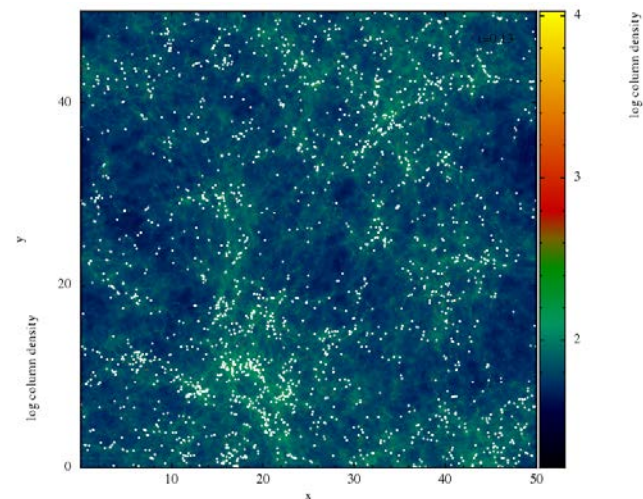


Stellar distribution at $z \sim 6$

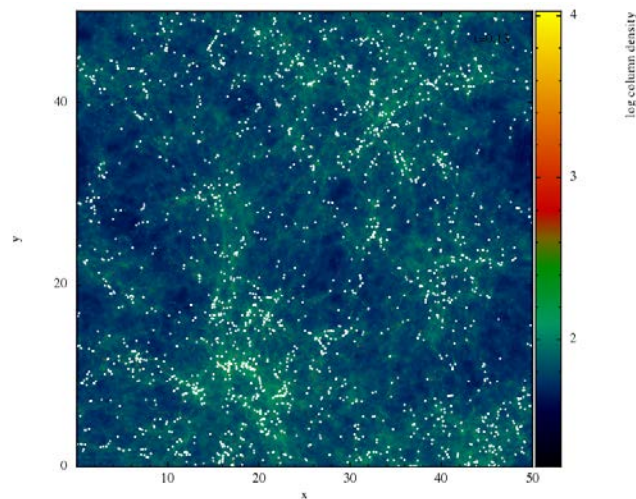
No feedback



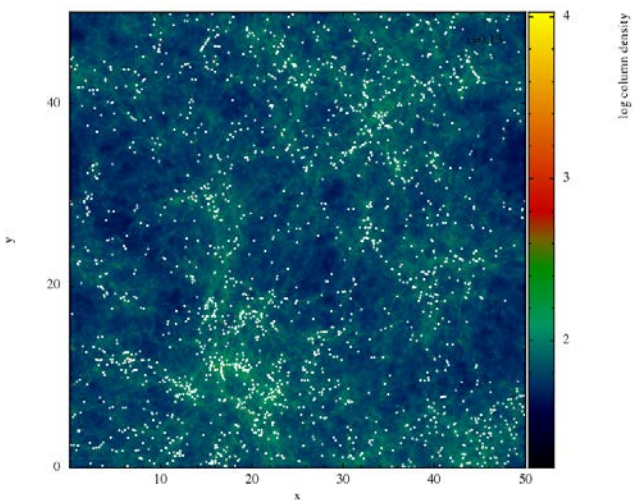
SNII only



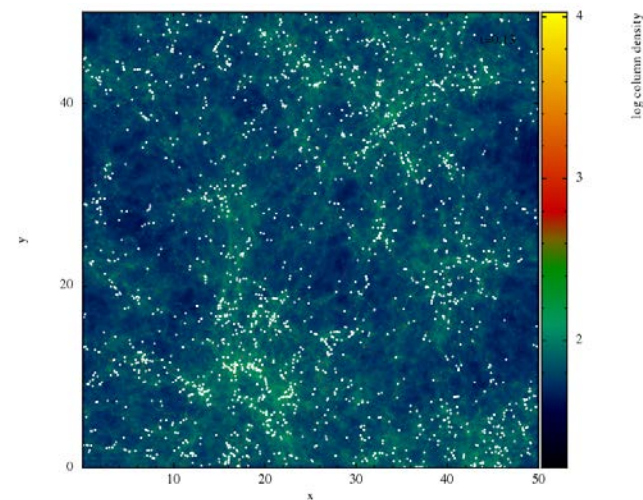
SNII + SFB



SFB only

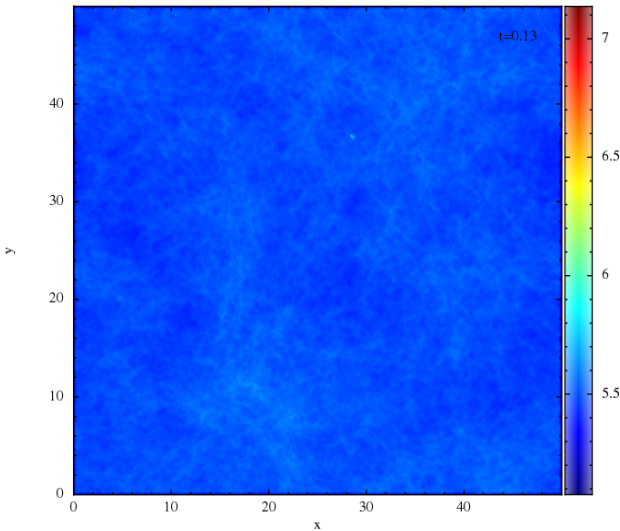


Const. Wind (SH03)

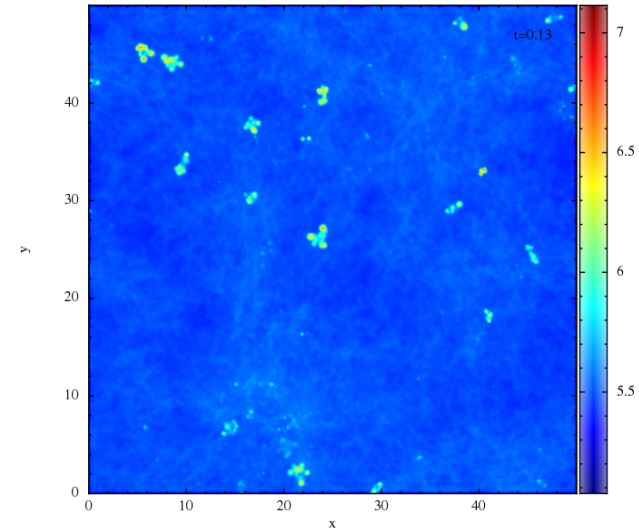


Temperature distribution at $z \sim 6$

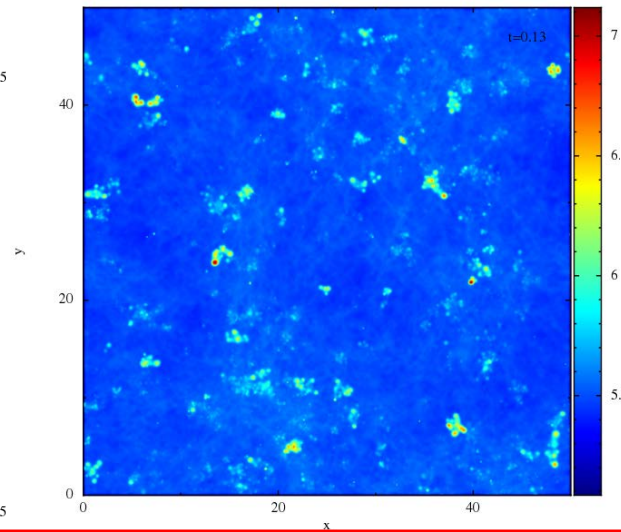
No feedback



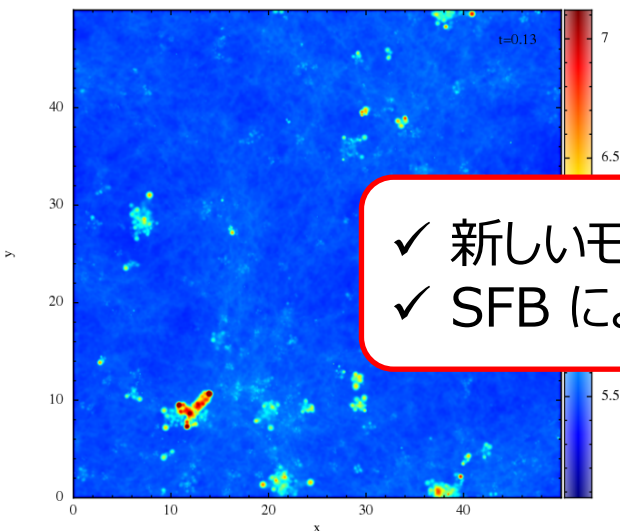
SNII only



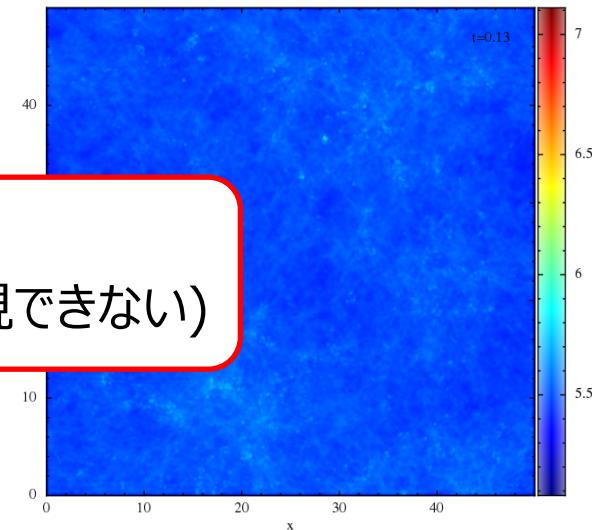
SNII + SFB



SFB only



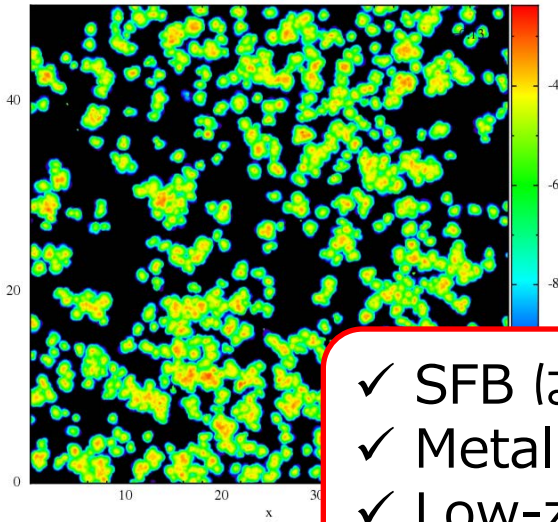
Const. Wind (SH03)



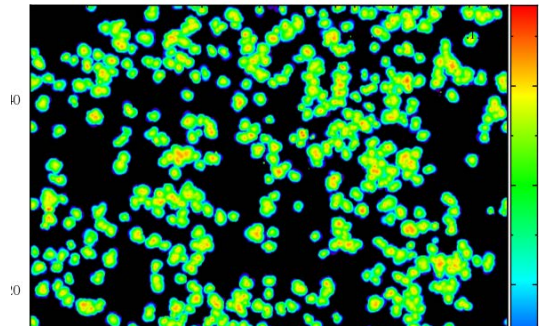
- ✓ 新しいモデルは局所的にIGMを加熱
- ✓ SFB による加熱もそれなりに効く (無視できない)

Metal distribution

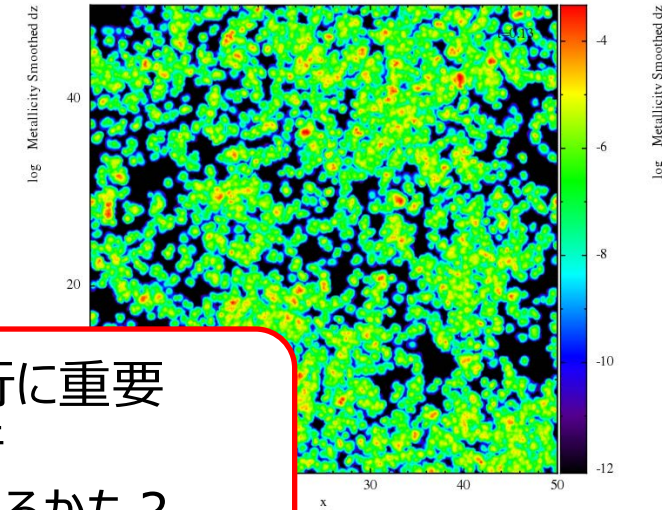
SNII + SFB @z=7



SNII @z=7

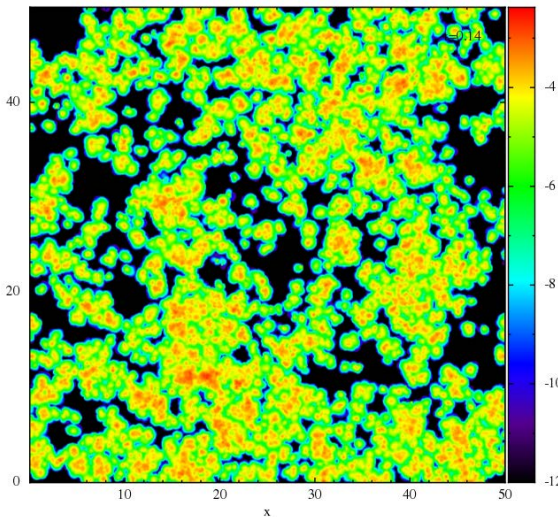


Const. Wind @z=7

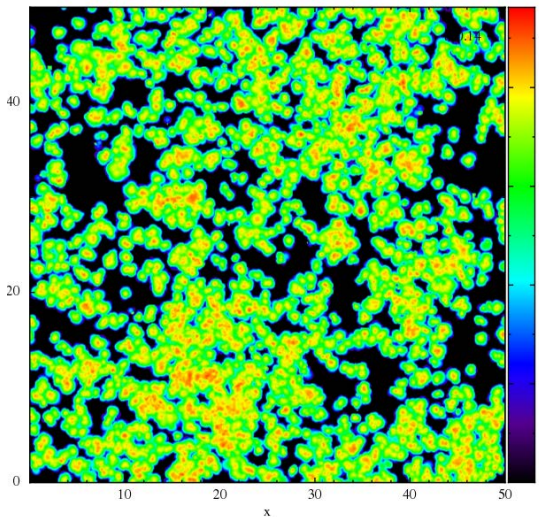


- ✓ SFB は metal enrichment の進行に重要
- ✓ Metal Enrichment はゆっくりと進行
- ✓ Low-z で POPIII を含んだ銀河がいるかも？

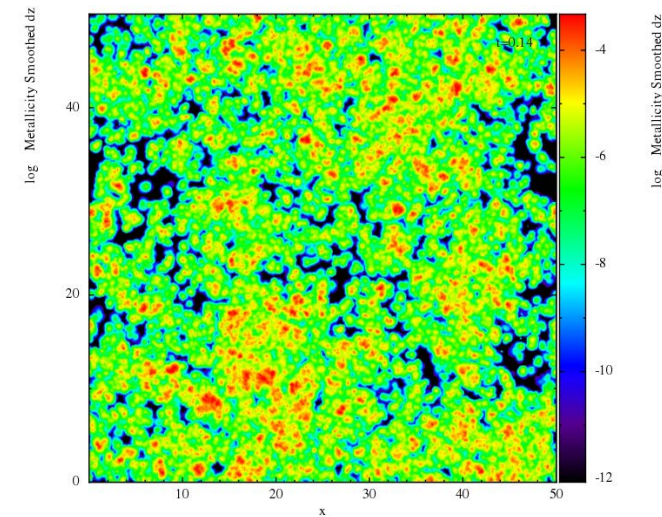
SNII + SFB @z=6



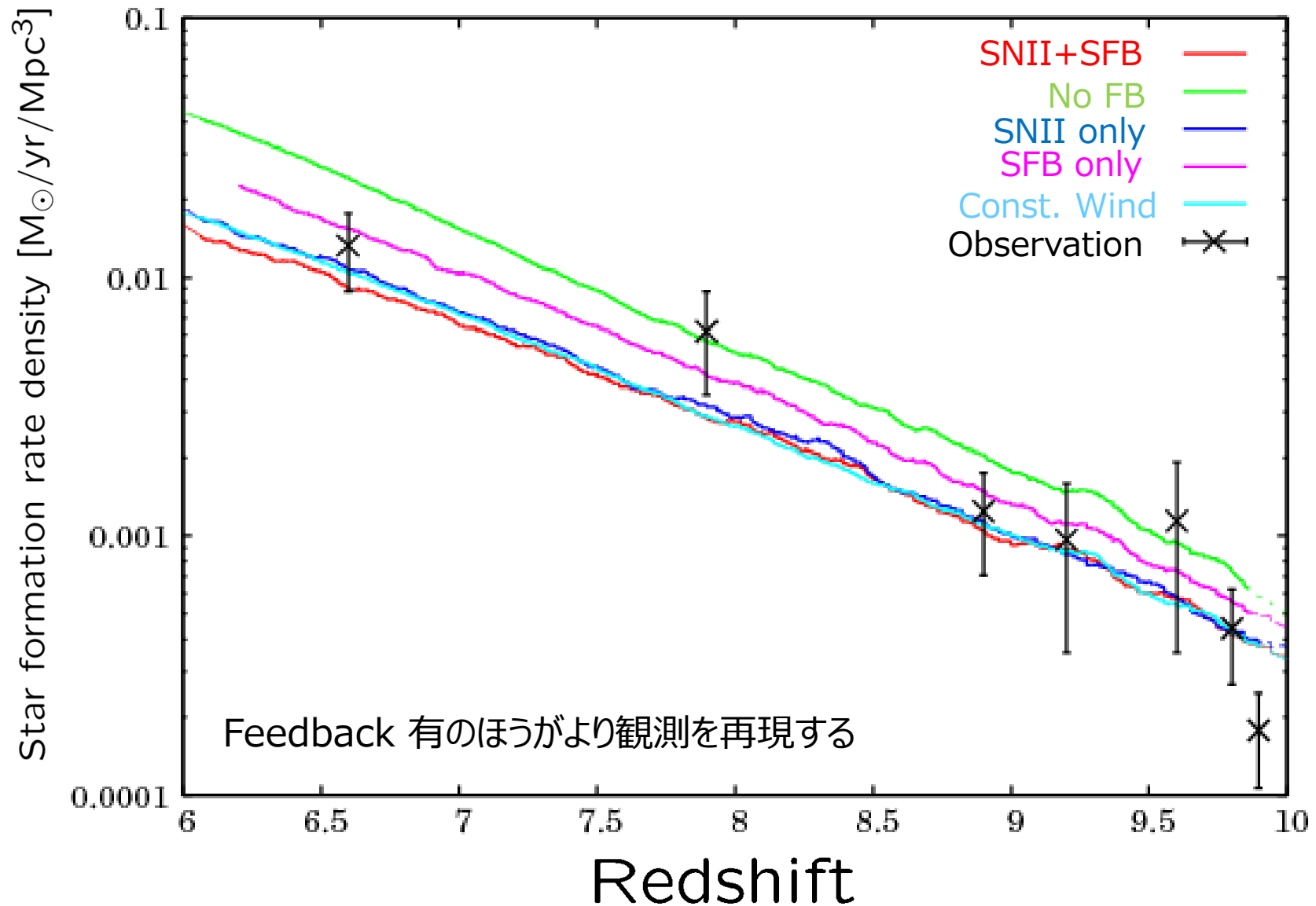
SNII @z=6



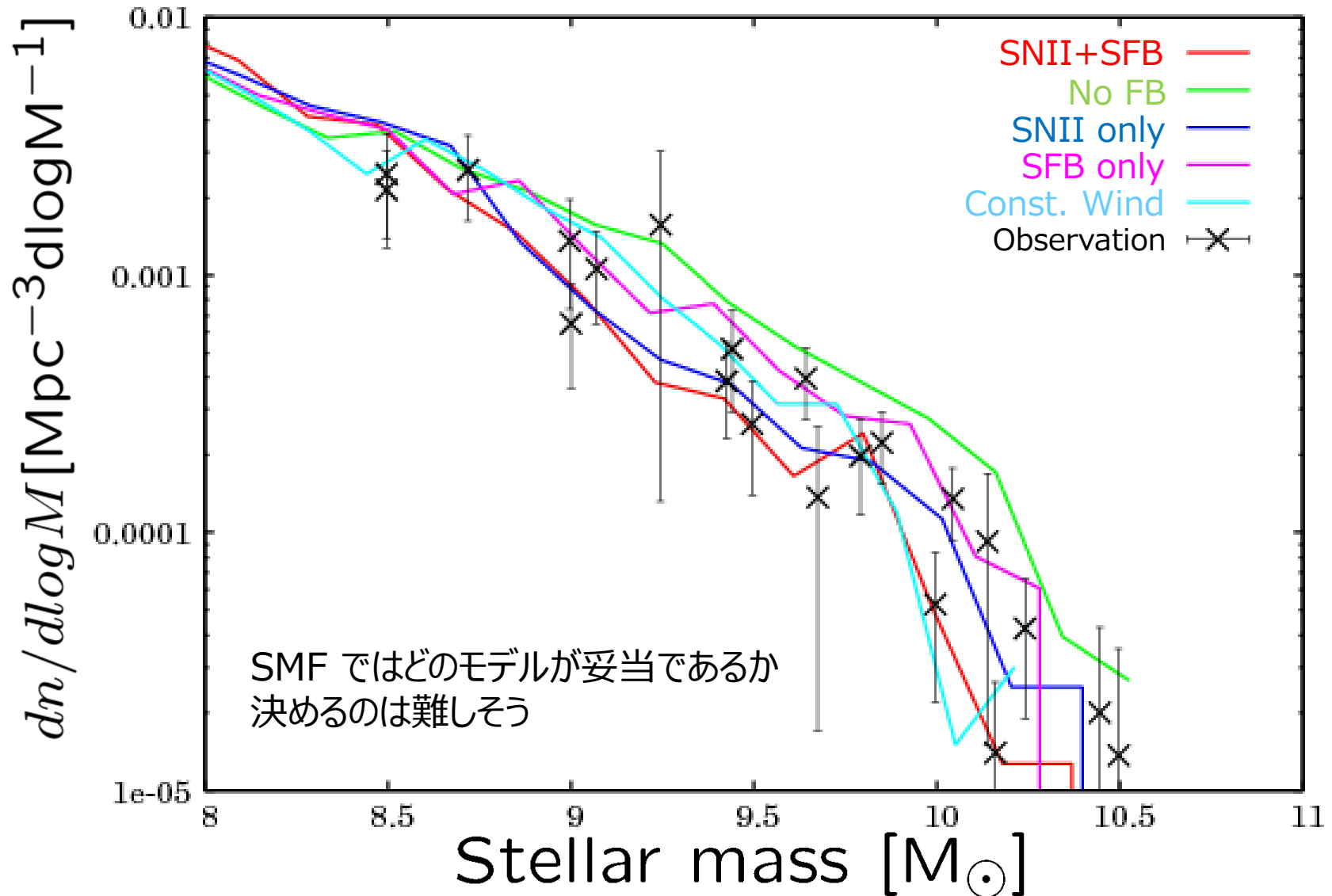
Const. Wind @z=6



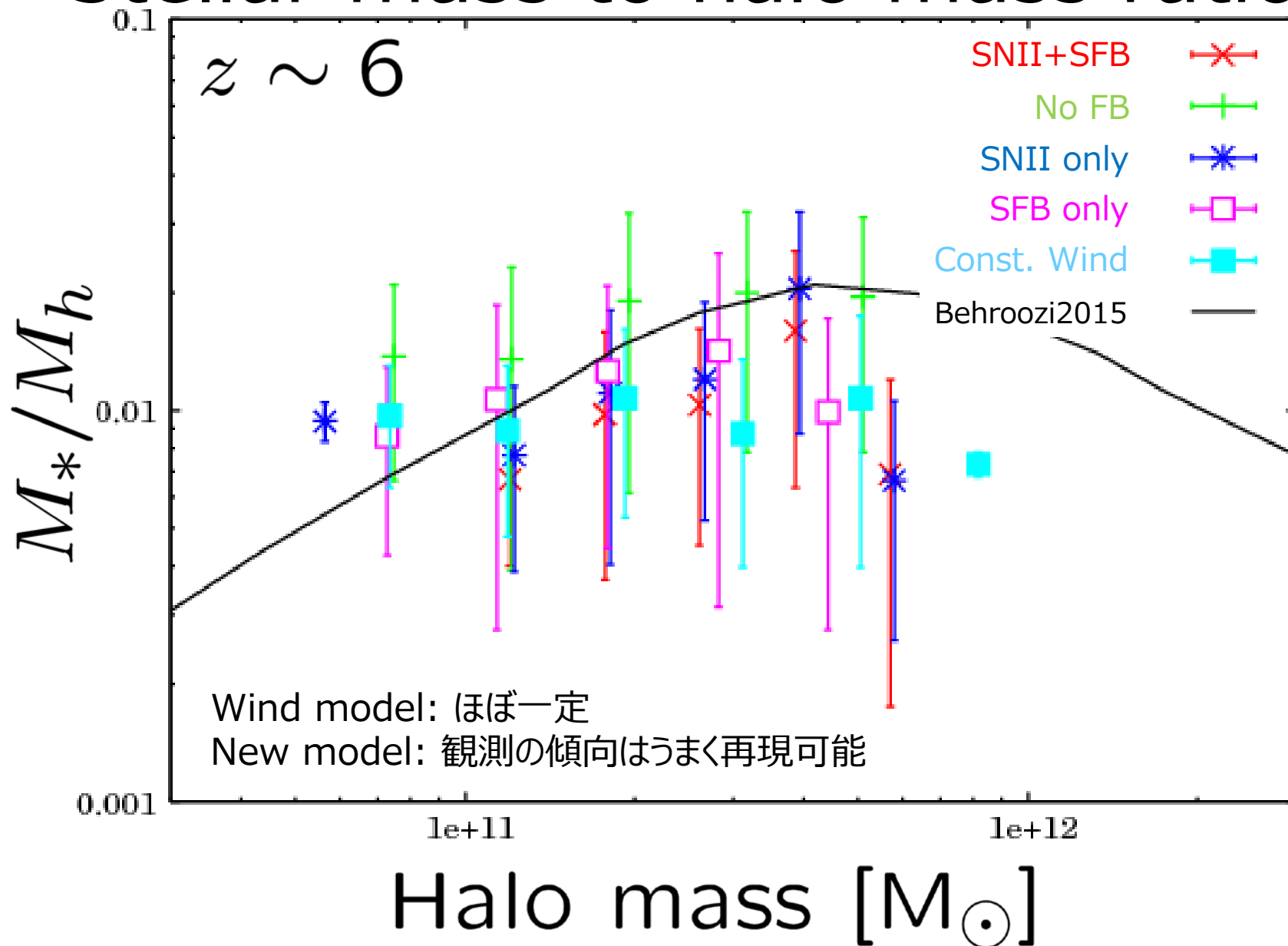
Star formation History



Stellar mass function at $z \sim 6$



Stellar mass to halo mass ratio



Summary

- SN feedback は星形成を抑制するメカニズムとして重要
- SN bubble の解析解をベースにした SNII feedback のモデリングを行った
 - ✓ Isolate disk simulation
 1. wind モデルに比べて、滑らかなガスの構造を作る
 2. 星形成率がほぼ一定
 3. 中心集中度の高い構造(gas, star, metal)
⇒ あまりガスが銀河外に出て行っていない？
 4. SFB は構造を滑らかにするように働く
 - ✓ Cosmological simulation
 1. どちらのモデルも SFH は再現可能
 2. SMF もどちらのモデルでも再現可能
 3. Star formation efficiency は wind モデルでは再現が難しそう
新しい SN モデルは傾向をうまく再現できるかもしれない。
 4. 新しいモデルは Metal enrichment はゆっくりと進む。
⇒ low- z でも POPIII star を含む銀河が形成可能？
 5. SFB によるIGM加熱も重要

High- z ではモデルと比較しうる観測量が少ないので、観測量の多い、low- z もしくは、local universe の銀河と比較することで、新しいモデルの妥当性を議論する必要あり。