

銀河形成シミュレーション



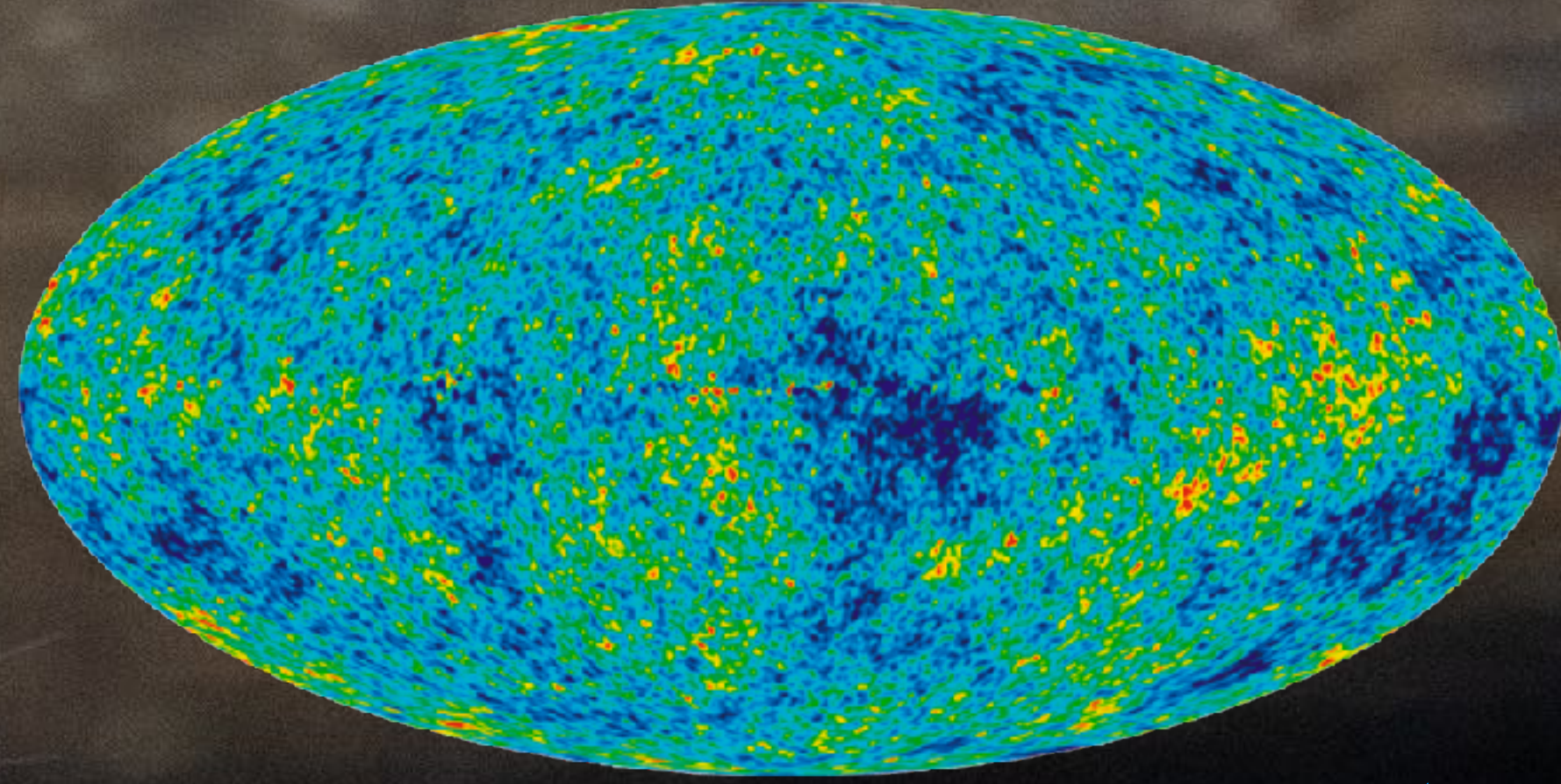
岡本 崇（北海道大学）

Talk Plan

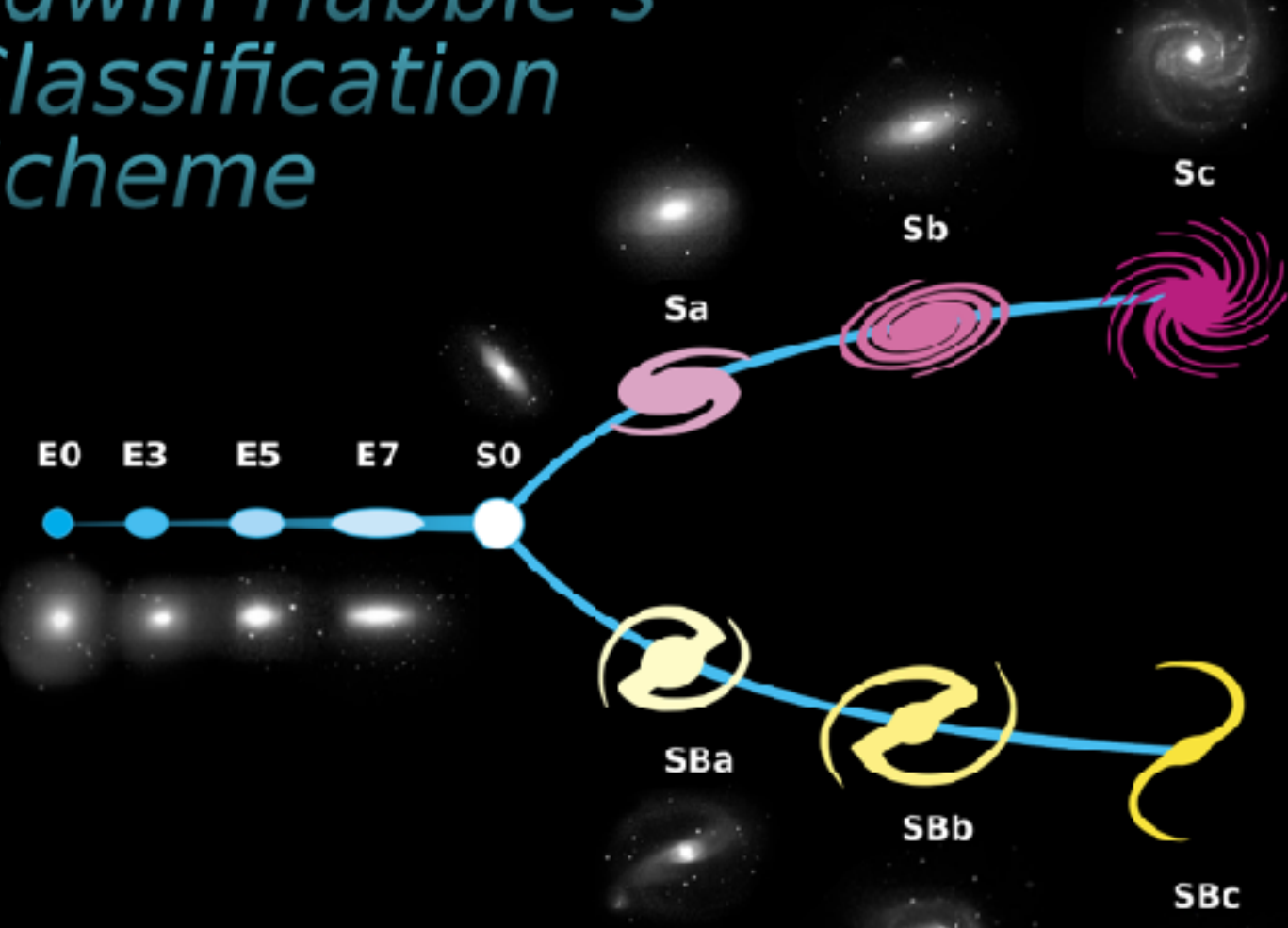
- 銀河形成とは？
- 銀河形成を研究する意義
- 銀河形成シミュレーションの基礎
- 色んなシミュレーション紹介
- まとめ



銀河形成とは



Edwin Hubble's
Classification
Scheme



昔と今

- 昔

- わりと宇宙論的なモチベーションが多かった
- そもそも銀河がちゃんと出来ない
- Small scale crises of CDM

- 今

- 公開コードがたくさん
- 銀河もわりとそれっぽくできる
- CDM で別によさそう
- 何をモチベーションにやってるのか



銀河形成シミュレーションの意義

- ダークマター分布に対するバリオンプロセスの影響の検証
- 様々な銀河の種族やスケーリング則の起源を明らかに
- 観測に対する予言、観測結果の解釈
(シミュレーションに対する信仰心が試される)
- 星や連星形成理論等、銀河形成そのものでないナニカの検証



銀河形成シミュレーションの意義

- ダークマター分布に対するバリオンプロセスの影響の検証
- 様々な銀河の種族やスケーリング則の起源を明らかに
- 観測に対する予言、観測結果の解釈
(シミュレーションに対する信仰心が試される)
- 星や連星形成理論等、銀河形成そのものでないナニカの検証

インフラとしての銀河形成シミュレーション





銀河形成
シミュレーション

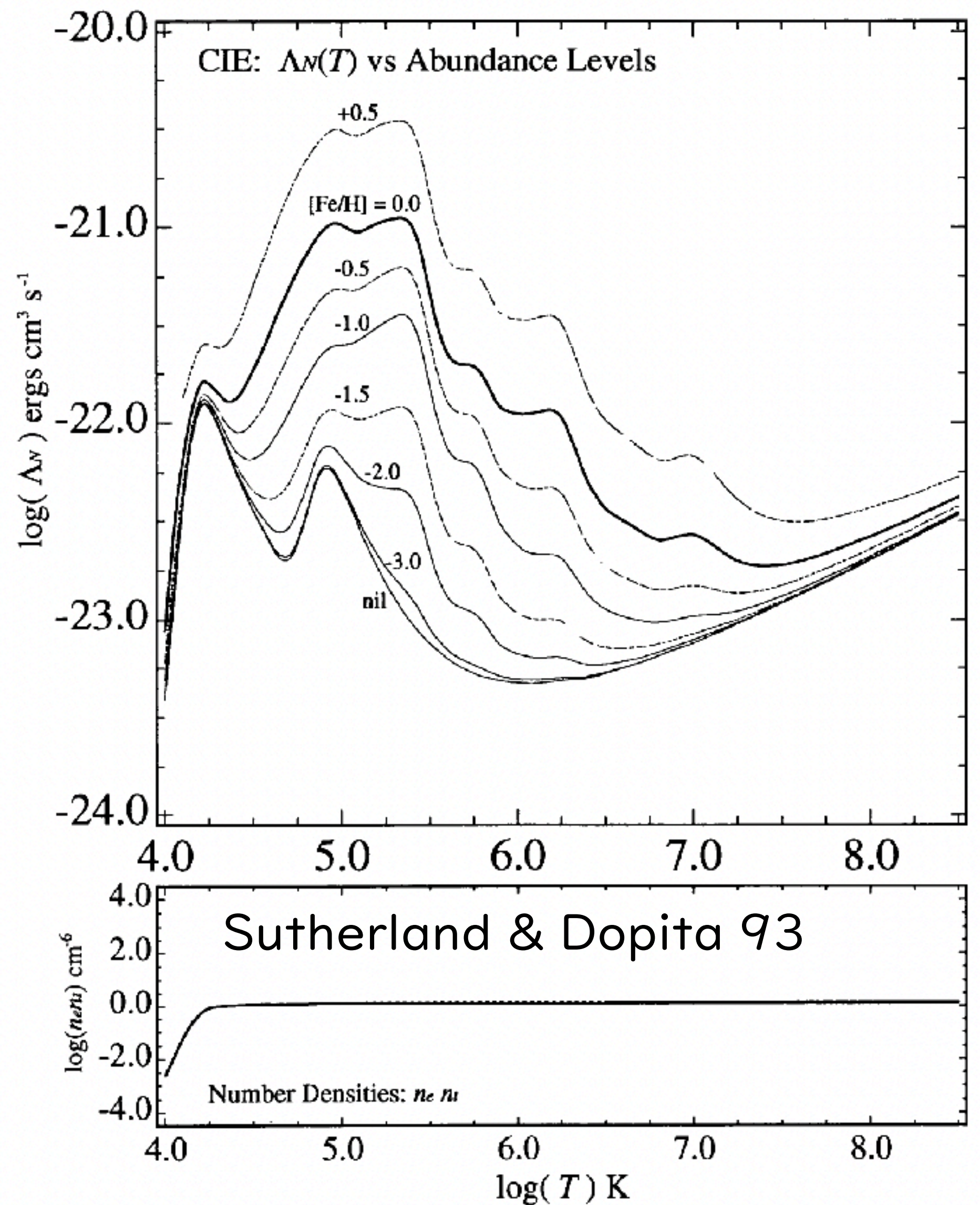
必要なもの

- 初期条件: Λ CDM
- 自己重力: ダークマター、ガス、星
Tree, PM+Tree, Multigrid 法など
- Gas dynamics: ガス
SPH, Mesh-free, moving-mesh, AMR 法など
- **ガスの放射冷却、化学反応**
- **星形成**
- **加熱過程 (フィードバック)**
 - stellar & AGN (SMBH の形成進化)
 - 化学進化 (重元素汚染)

今日の話



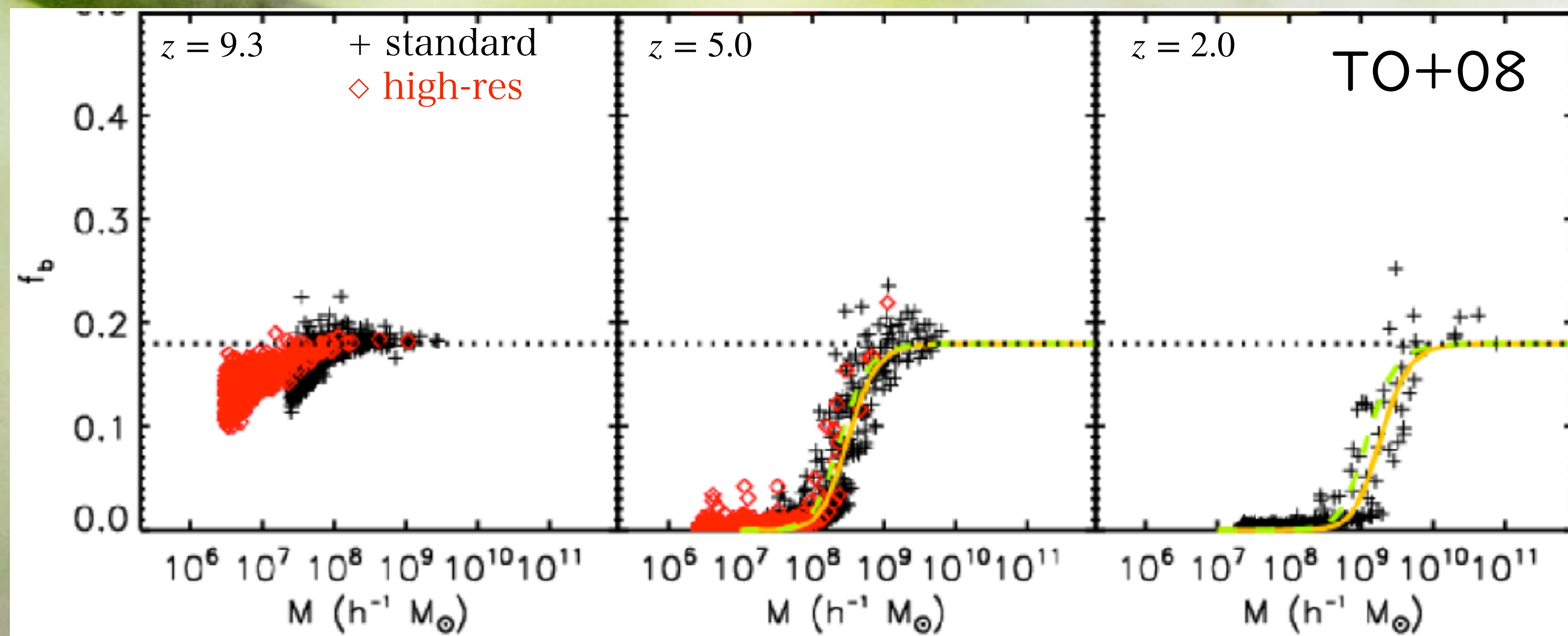
放射冷却



- 初期は Primordial gas の CIE (Katz+96). 最近でもそういう人はいる (Khandai+15, Tremmel+15)
- Sutherland & Dopita の Z-dependent CIE が 2000 年くらいから使われるように (e.g. Okamoto+04)
- Primordial gas だけ non-eq で解いて metal 分を上乗せすることも

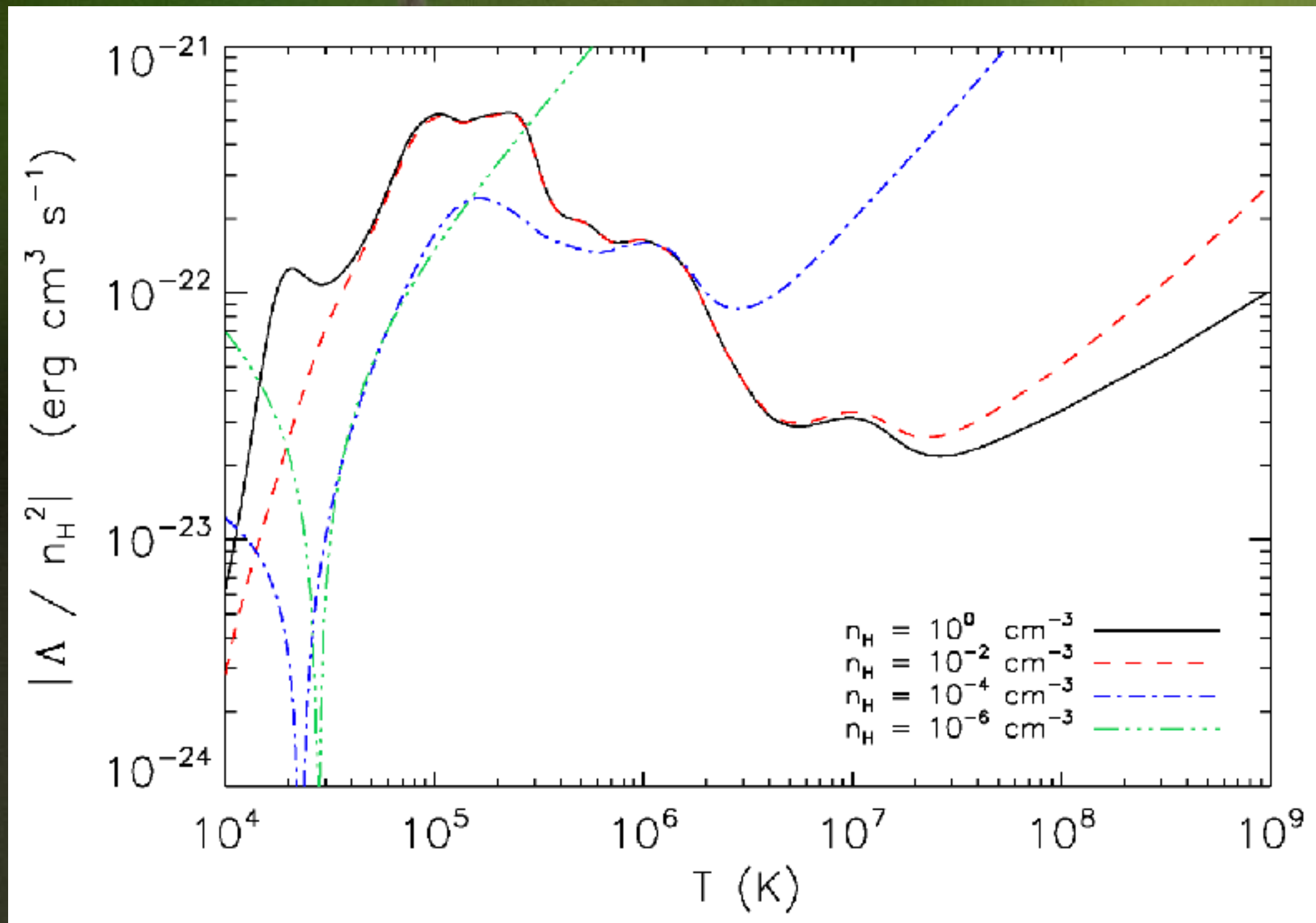


紫外背景放射の効果



- 宇宙再電離後は宇宙背景放射にあぶられることで、baryon-poor な halo と baryon-rich な halo に二分される
- ISM の構造にも影響あり
- 矮小銀河形成にはとても重要

紫外背景放射+金属



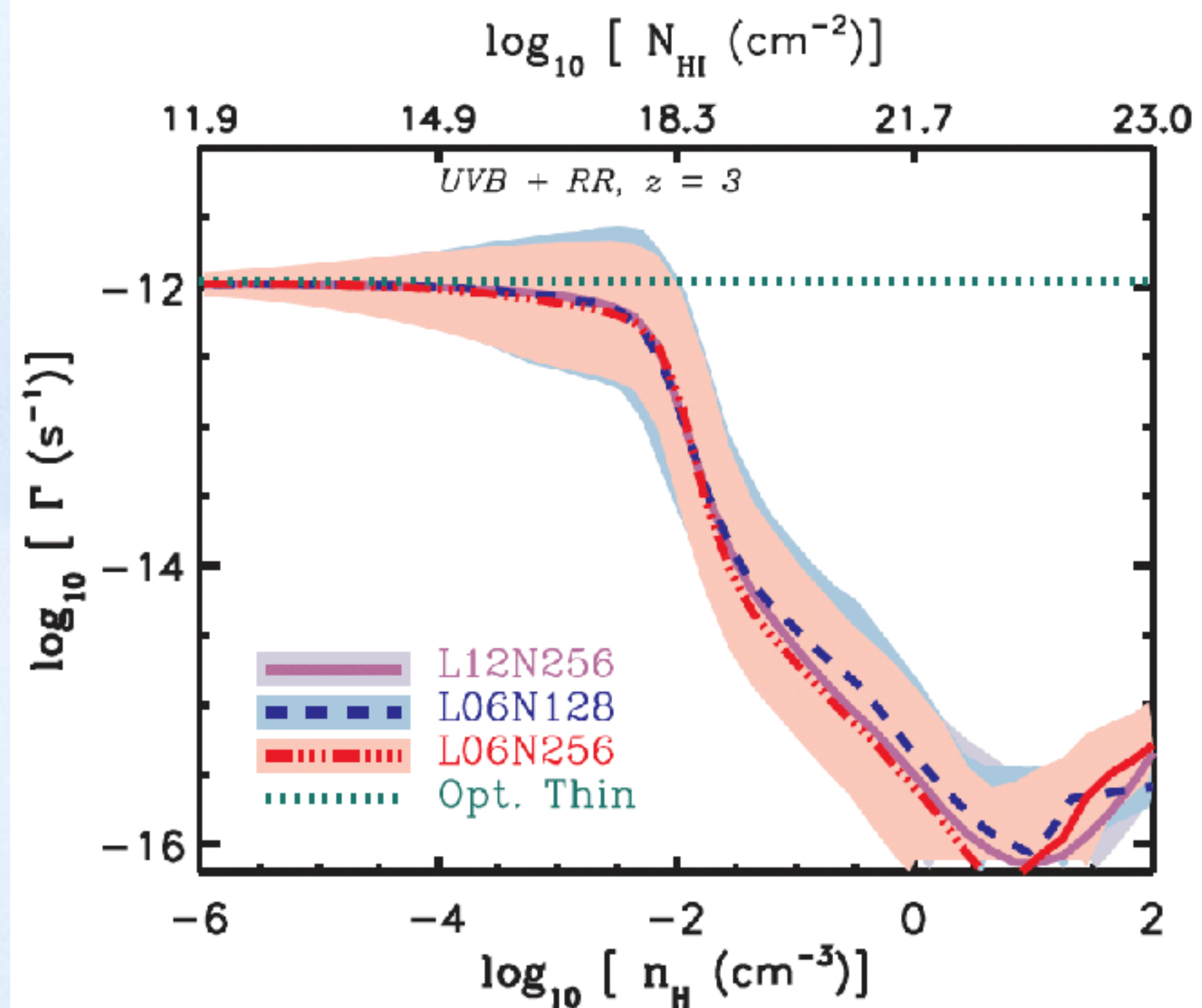
- CLOUDY を使って、Haardt & Madau 12 や Faucher-Giguere+09
- 赤方偏移、密度、温度、金属量の関数として heating と cooling rates を計算しておく (Wiersma+09)



Self-shielding

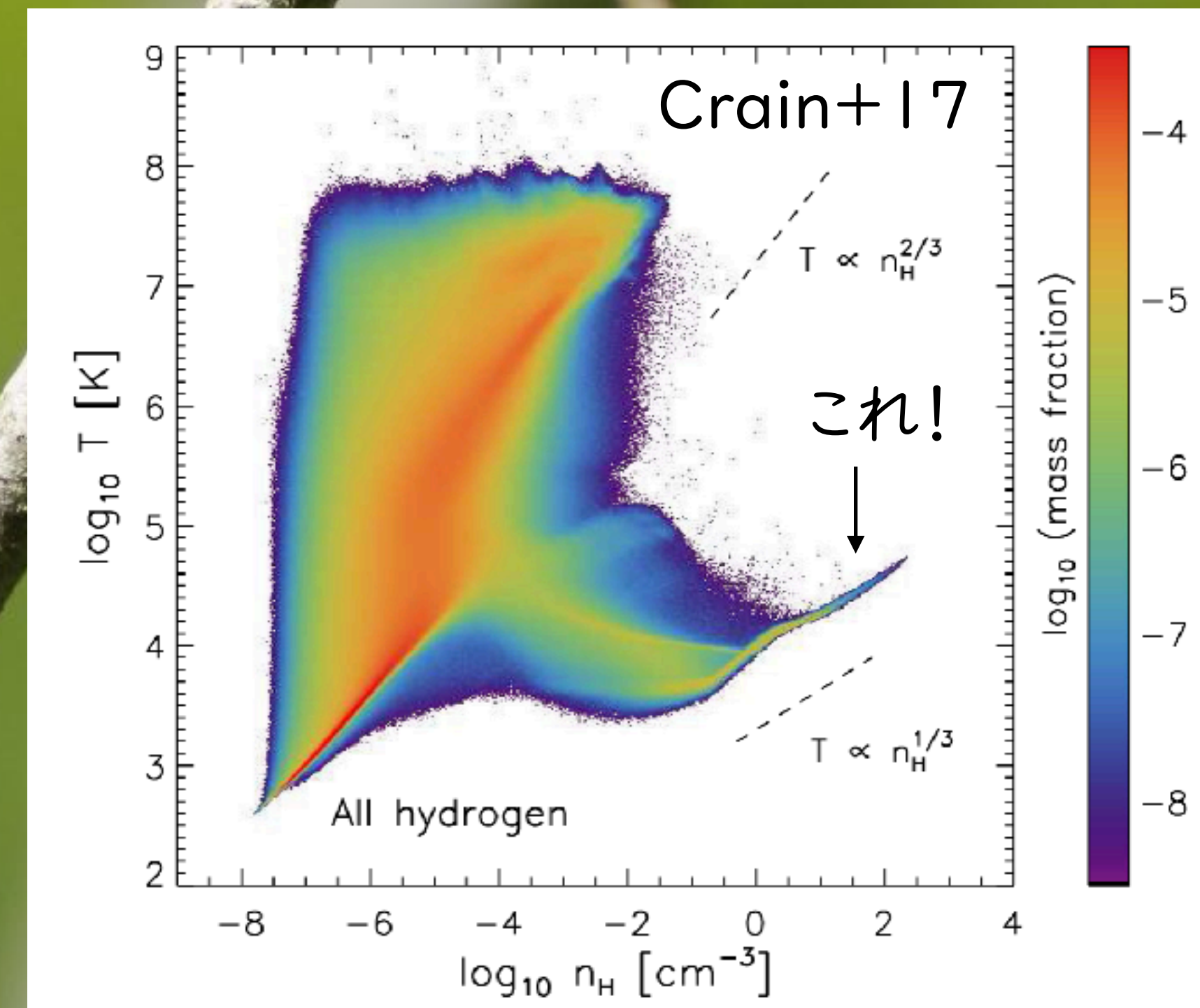
- 輻射輸送計算の結果を使って、赤方偏移と密度の関数として背景放射を減衰させる。
- ダストは考えてない

Rahmati+13



星間ガス

- ほとんどのシミュレーションで cold phase ($T < 100 \text{ K}$ & $n_{\text{H}} \gtrsim 100 \text{ cc}^{-1}$) は分解できない
- 星形成ガスの状態方程式を固くすることが多い (Springel & Hernquist 03, Schaye & Dalla Vecchia 08)
- Truelove condition で pressure floor を入れる場合も (Robertson & Kravtsov 08)



星形成

- $\dot{\rho}_* = \frac{\rho}{t_*} = C_* \frac{\rho}{t_{\text{ff}}} \propto \rho^{1.5}$ where $t_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$
- $C_* = 0.01 \sim 1$ が良く使われる
- 何らかの理由でガスの収縮が止められていない場合、dynamical time で collapse するので C_* の値にはあまり意味がない
 - 何らかの理由: 最小メッシュサイズ、固い状態方程式、non-thermal pressure



超新星爆発

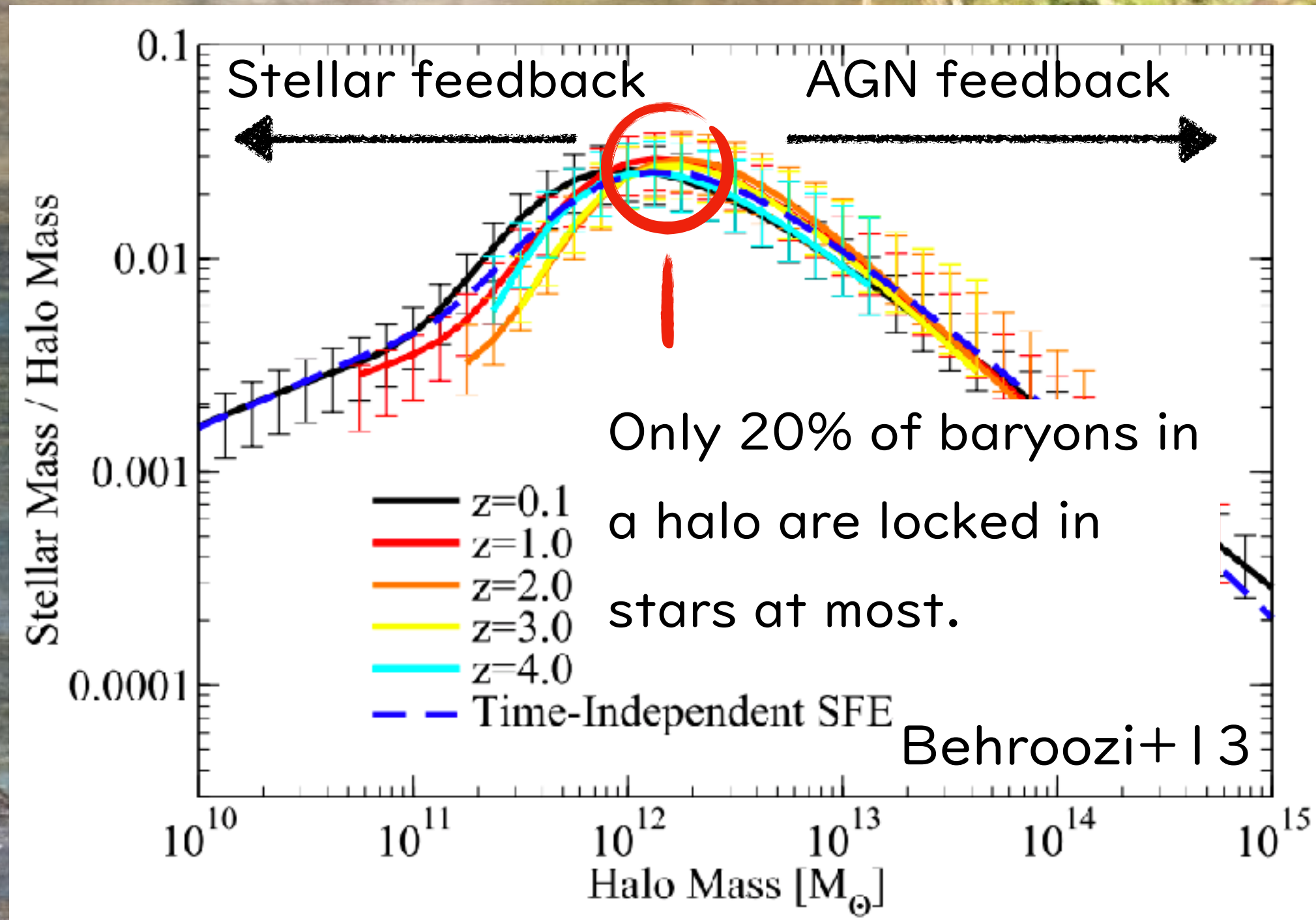
- 一番重要 (結果に与える影響がでかい)
- 単純に SN あたり 10^{51} erg を熱で与えても放射冷却で失われてなにもおこならない (Katz 92)
- 流体要素の質量が $100 M_{\odot}$ 程度になれば、Sedov-Taylor phase が分解できて大丈夫 (Hopkins+18)
- $5 M_{\odot}$ くらいいかないと駄目 (Hu+19)



Subgrid models

- **Delayed cooling:** エネルギーを受け取ったガスの冷却を一定時間止める (Thacker & Couchman 01, Stinson+06)
- **Winds:** スピード v_w の kick を確率的に与える (Springel & Hernquist 03).
 - v_w と確率 (mass loading) は銀河の性質の関数にする (Okamoto+10)
- **Target Temperature:** エネルギーを受け取ったガスの温度を十分に高い温度 ($\sim 10^{7.5}$ K) まで確率的に上げる
- **Mechanical feedback:** 周囲のガスに与える運動量を1次元点源爆発の結果を用いて決める (Kimm+14, 15, Hopkins+18)

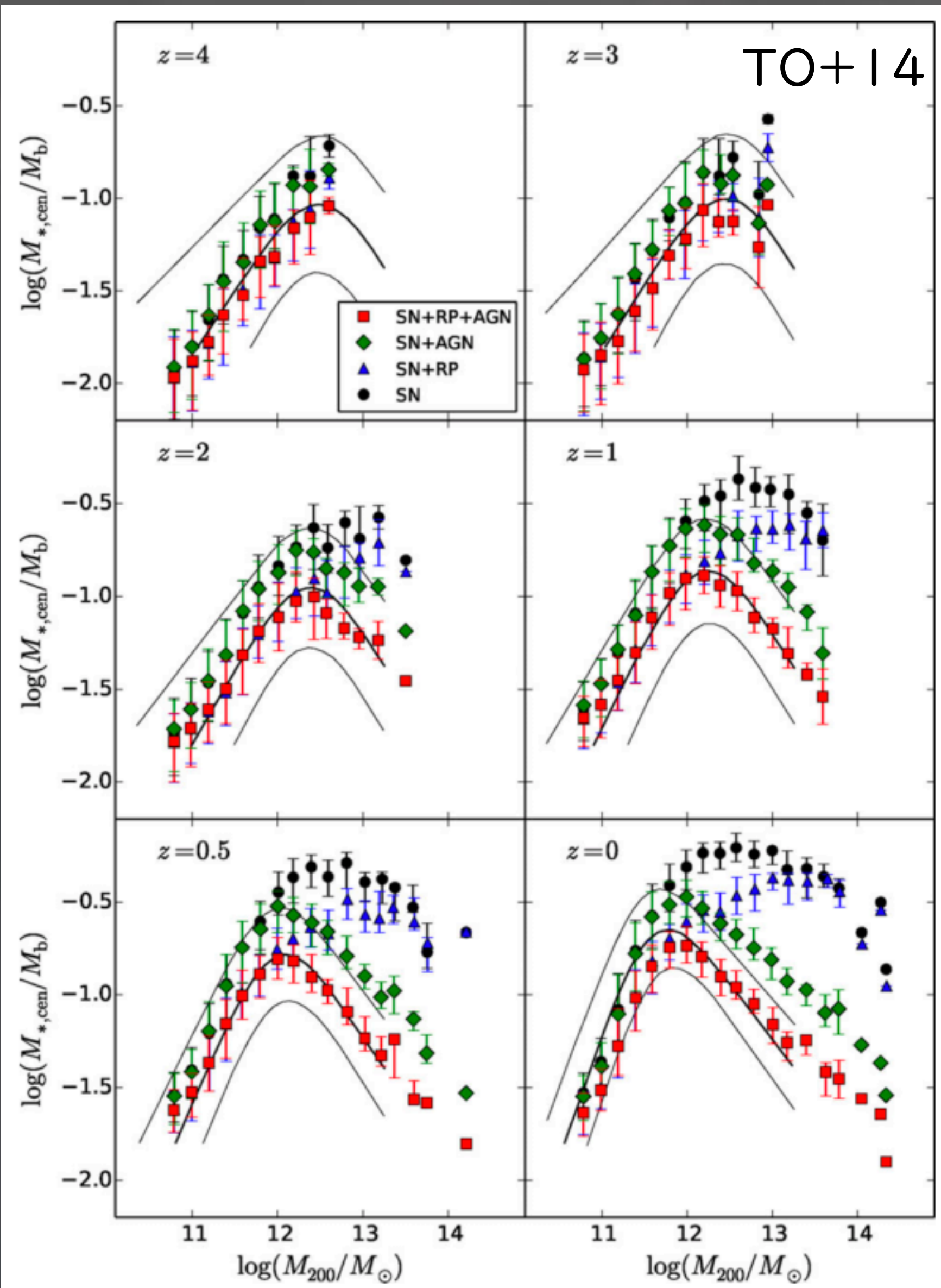
SMBH and AGN feedback



- $M_{\text{vir}} \gtrsim 10^{12}$ のハローでは星起源のフィードバックでは星形成を止めることはできない
- AGN フィードバックがなんかしてると思ってる人が多い



Effects of AGN feedback



● ▲ w/o AGN feedback
◆ ■ with AGN feedback

- Stellar feedback alone cannot explain the stellar mass in massive halos with $M_{\text{vir}} \gtrsim 10^{12} M_\odot$



In these simulations, we mimicked AGN feedback by shutting off cooling in large halos

For self-consistent simulations

- What do we need?
 - Seeding
 - BH-BH merger
 - Gas accretion
 - AGN feedback
- Non of these processes are well-understood and resolved



Seeding



- Put a seed BH when a BH-less halo of some mass is identified (Di Matteo+08, TO+08) or turn gas into a BH when some criteria are satisfied (Tremmel+17)
- A seed mass is typically $10^{5-6} M_{\odot}$



BH-BH mergers

- Dynamical friction is usually not resolved
- BHs are anchored to the local potential minima (Sprigel+05) or add local estimated dynamical friction force (Tremmel+17).
- When two halos with BHs merge, the BHs sink to the centre of the new halo and merge.

Gas accretion

- Gas accretion is often modelled by using the Bondi-Hoyle-Lyttleton rate

- $\dot{M}_{\text{acc}} = \alpha \frac{4\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{(c_s^2 + v^2)^{3/2}}$ ($\alpha \sim 100$ in Springel+05)

- $\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{\text{H}} < n_{\text{th}} \\ (n_{\text{H}}/n_{\text{th}})^\beta & \text{otherwise} \end{cases}$

(with $\beta = 2$; Booth & Schaye 09)

- Gas angular momentum dependent α (Schaye+15)
- Often Eddington limited

$$\dot{M}_{\text{BH}} = (1 - \epsilon_r) \min(\dot{M}_{\text{acc}}, \dot{M}_{\text{Edd}})$$

- Torque-limited rate is also used

$$\frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{M_\odot \text{ yr}^{-1}} = \alpha f_{\text{d}}^{5/2} M_{\text{BH},8}^{1/6} M_{\text{d},9} R_{0,100}^{-3/2} (1 + f_0/f_{\text{gas}})^{-1}$$

(Hopkins & Quataert 11)



AGN feedback

- Some fraction of the radiated energy couples to the surrounding ISM

$$\Delta E_{\text{AGN}} = \epsilon_f \epsilon_r \dot{M}_{\text{acc}} c^2 \Delta t$$

- This energy is coupled to the gas in thermal and/or kinetic form
- Often, two modes of feedback are assumed
 - Quasar-mode
 - Radio-mode



Radio-mode feedback

- At low specific accretion rate

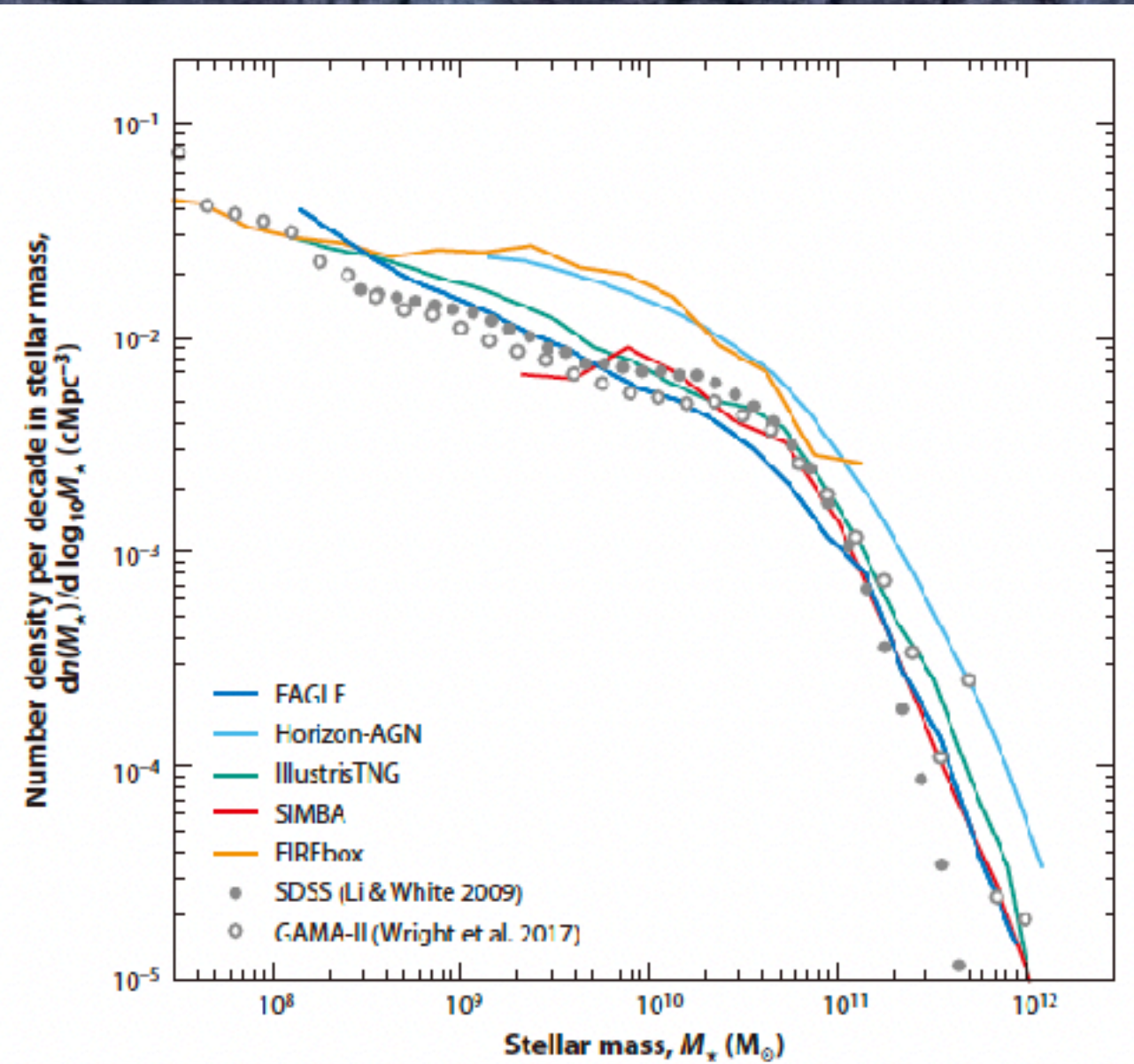
$$\dot{m} = \frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \lesssim 0.01,$$

the radio-mode feedback is switched on (T0+08, Sijacki+08)

- Radio-mode is usually more effective than by quasar-mode by increasing feedback efficiency, outflow speed, or directly heating the hot gas.
- Not all the simulations have the radio-mode, for example, EAGLE only has the quasar-mode.



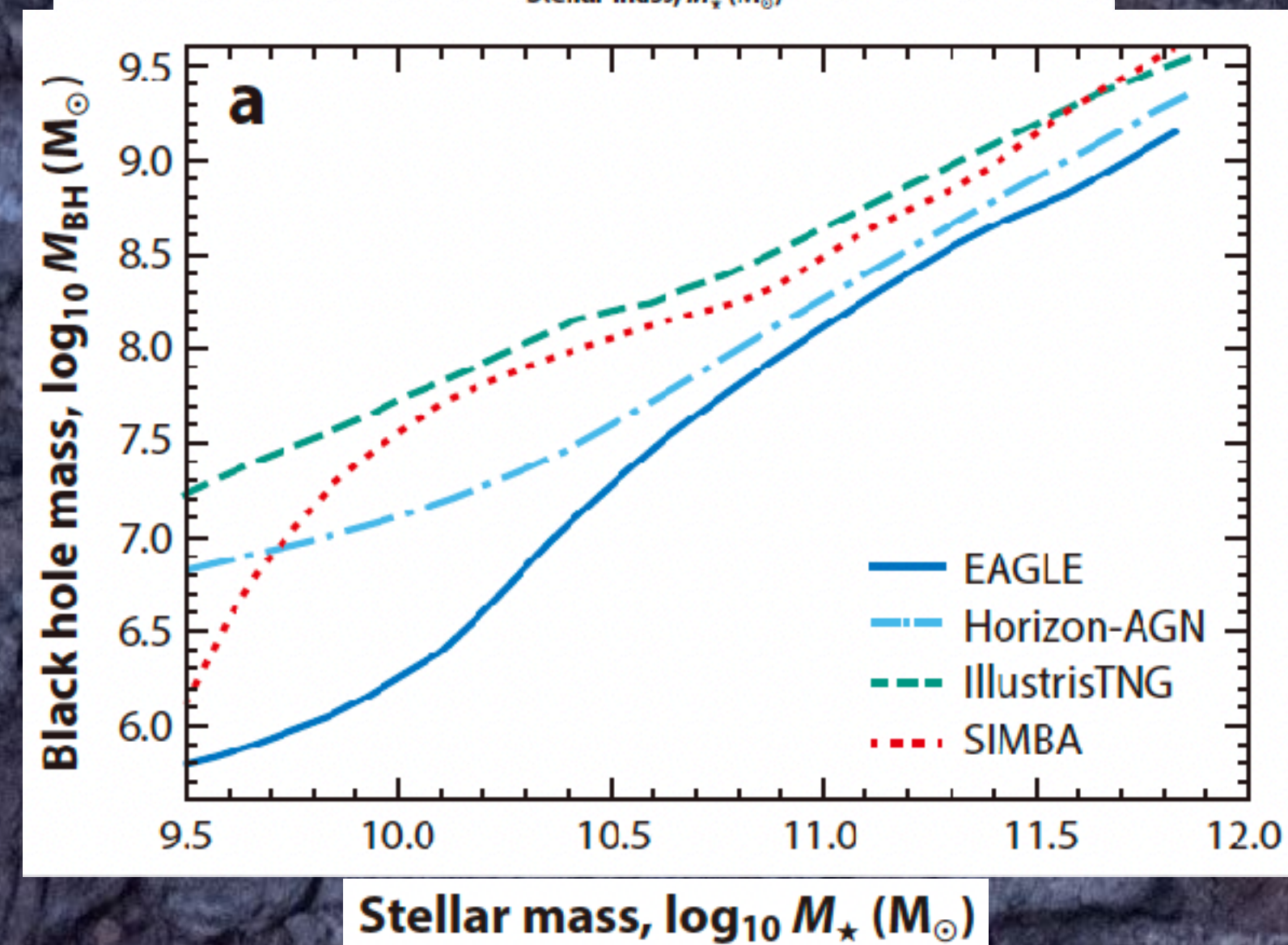
Subgrid models are tuned!



- Horizon-AGN did not adjust stellar feedback
- FIREbox does not have BHs

Taken from Crain & van de Voort 23

- The strength of the stellar feedback and AGN feedback (or accretion efficiency) are tuned to reproduce some key observables, including the stellar mass function and the $M_{\text{BH}}-M_*$ relation
- So these results shouldn't be regarded as predictions



Code comparison



Agora comparison project III

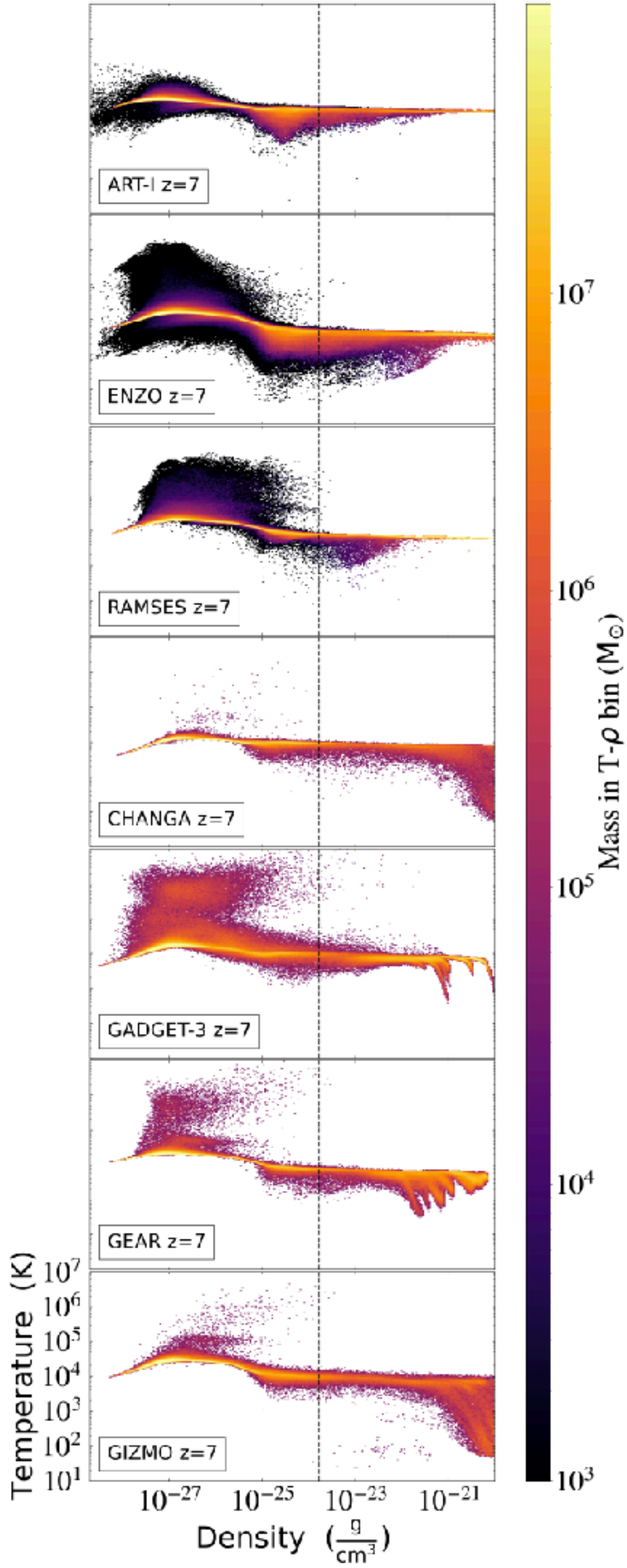
- Roca-Fabregarega+21
 - 異なるコード
 - 同じ初期条件
 - $z = 0$ に $M_{200} \sim 10^{12} M_{\odot}$ になる領域
 - 同じ冷却関数
 - 同じ星形成条件
 - 好みのフィードバックを同じくらいの星が作られるようにチューニング

- Codes

- ART-I
 - ENZO
 - RAMSES
- } AMR (オイラー法)

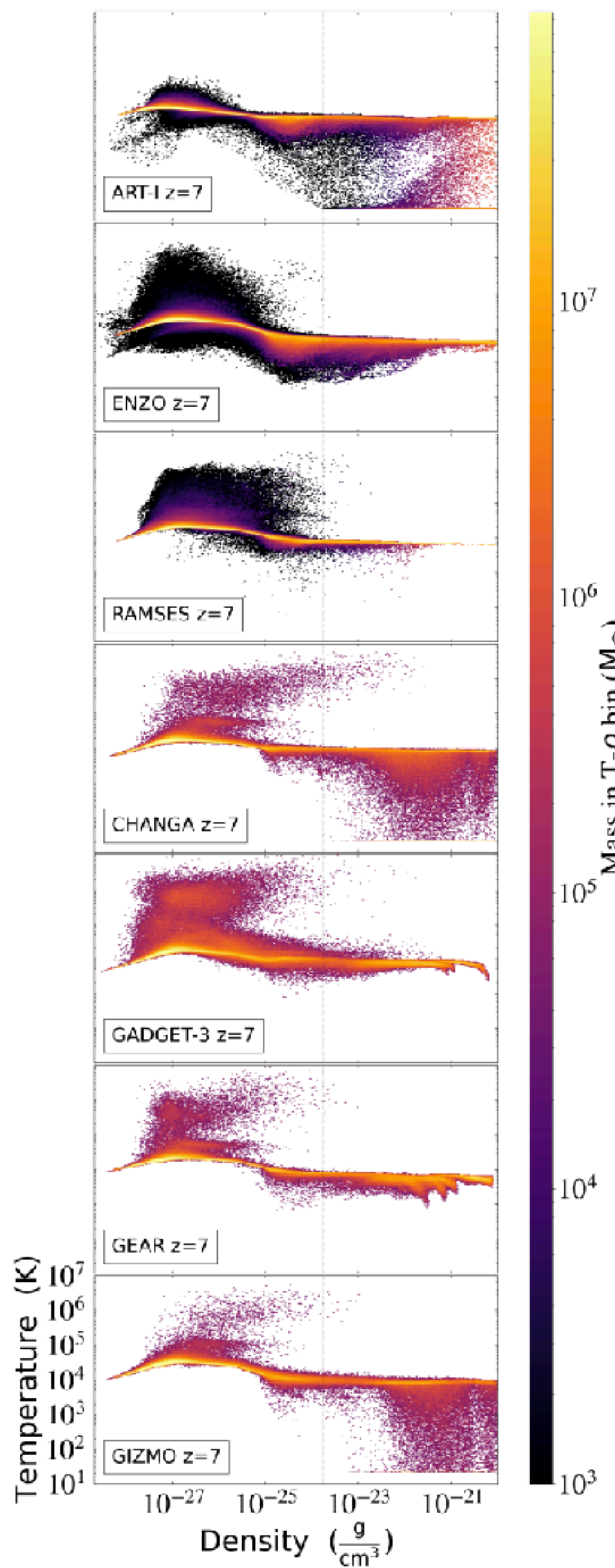
- CHANGA
 - GADGET-3
 - GEAR
 - GIZMO
- } SPH
- } Mesh-free
- } ラグランジュ法

Cooling + photo-heating w/o star formation

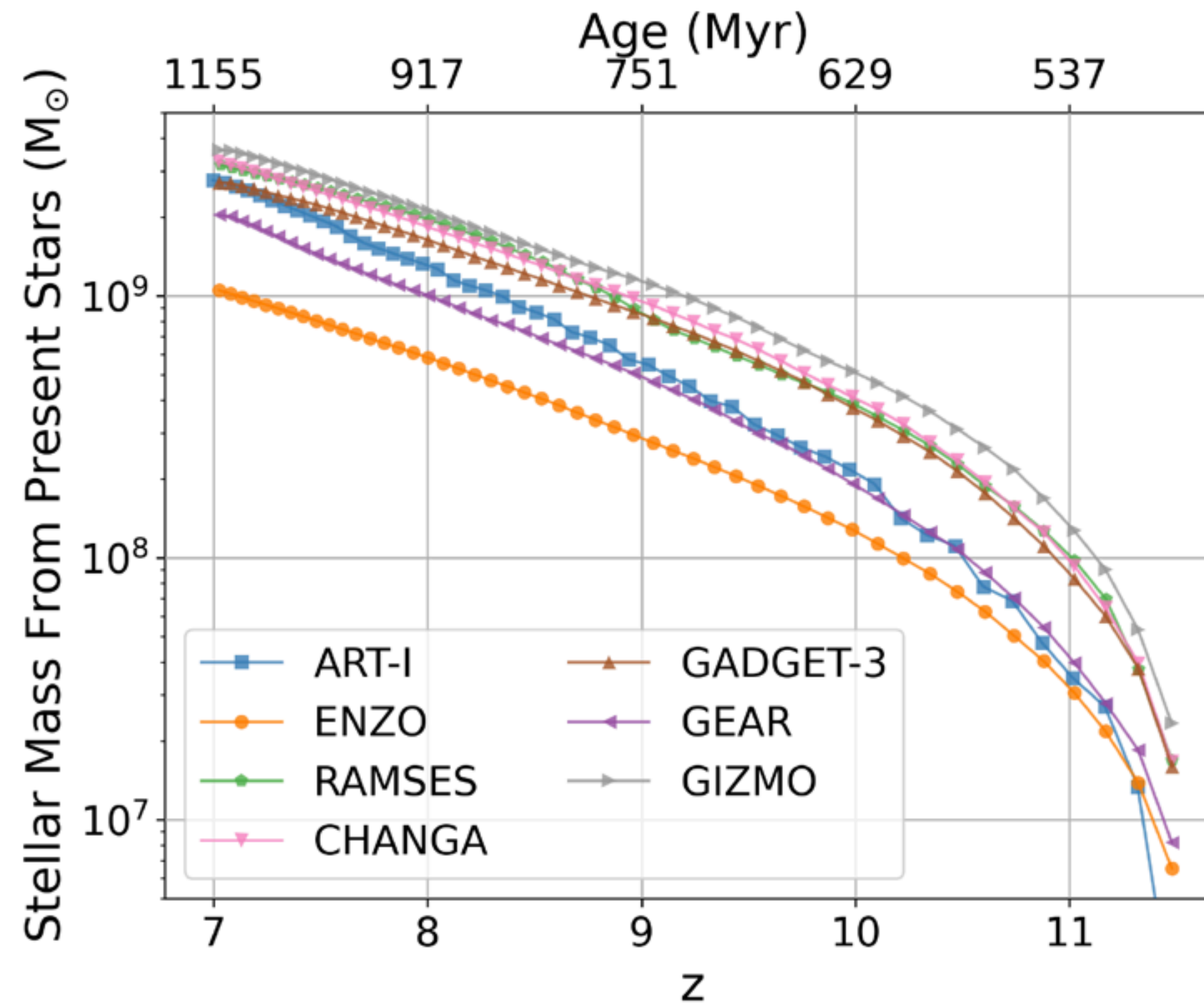


- $z=7$ のハロー中心から 100 kpc 内のガスの温度-密度平面上での分布
- ほとんどのガスは平衡温度に沿って分布
- Low density, high-temperature の部分に主な違いが
 - Riemann solver や artificial viscosity の違い?
 - Cooling の実装の違い?
- Particle-based codes では hot halo gas が存在
- これらの違いはフィードバックを入れると問題にならなくなると書いてある

+ star formation



within 100 kpc



- 温度-密度分布は cooling のみの場合とほとんど同じ
- $z = 7$ までに形成される星の質量もほぼ同じ
- high- z で違いが大きい
- ENZO は tunable parameters が threshold density と星形成効率しかないからと書いてあった。
(他のコードは一体何をいじってるんだ?)

+ “favorite” stellar feedback

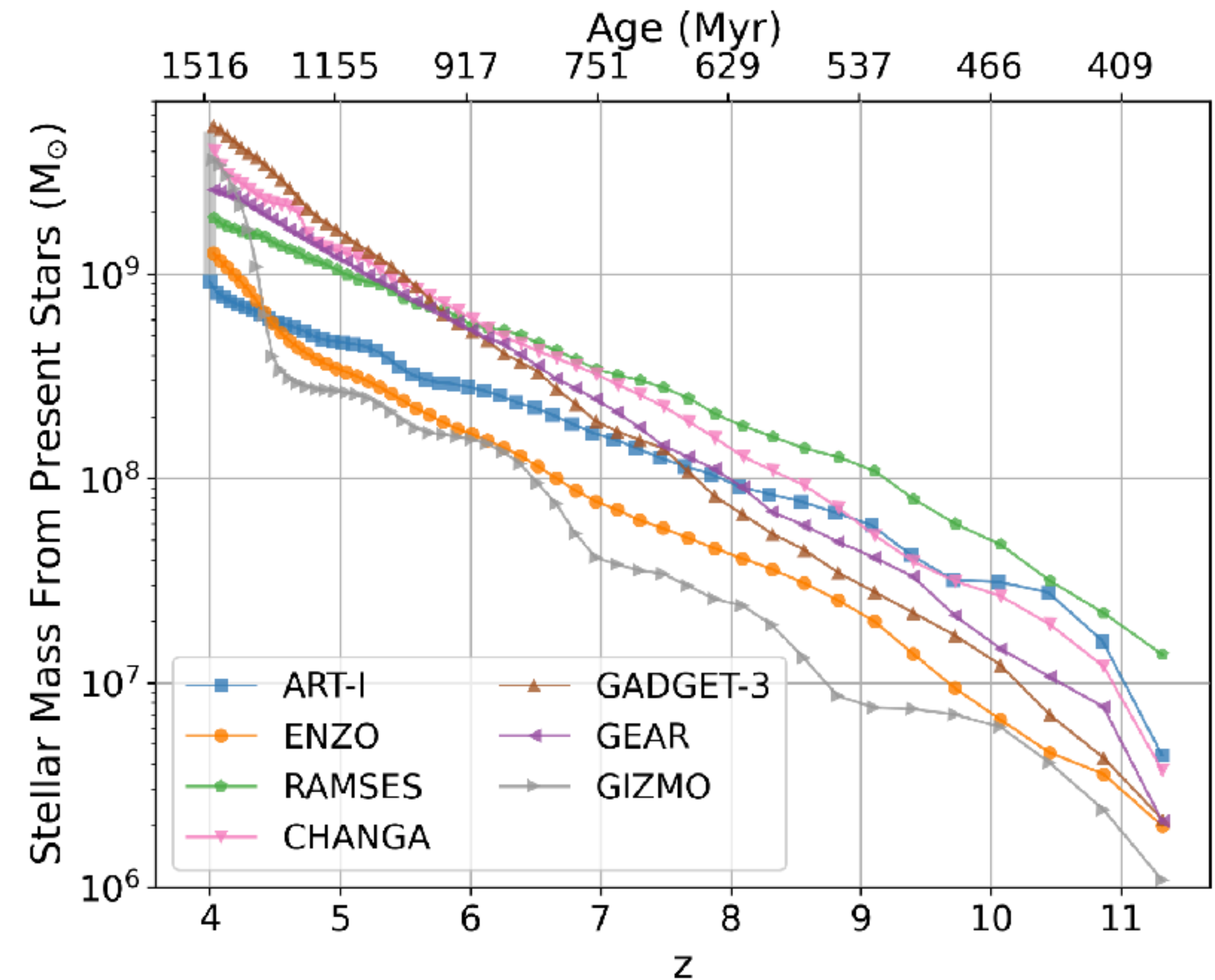
Code	Stellar feedback	SN & metal production model	Effective metal yield	Runtime parameters
ART-I	T+K, RP	SN Type Ia/II, AGB stars*	0.033	$E_{\text{thermal}} = 2 \times 10^{51} \text{ ergs/SN}$, $p = 3.6 \times 10^6 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}/\text{SN}$
ENZO	T	SN Type II	0.032	$E_{\text{thermal}} = 5 \times 10^{52} \text{ ergs/SN}$
RAMSES	T, DC	SN Type II	0.033	$E_{\text{thermal}} = 4 \times 10^{51} \text{ ergs/SN}$, $\sigma_{\text{min}} = 100 \text{ km s}^{-1}$, $T_{\text{delay}} = 10 \text{ Myr}$
CHANGA	T+S	SN Type Ia/II, AGB stars**	0.032	$E_{\text{thermal}} = 5 \times 10^{51} \text{ ergs/SN}$
GADGET-3	T+K, RP, DC	SN Type Ia/II, AGB stars	0.025	$E_{\text{SN}} = 4 \times 10^{49} \text{ ergs}/M_{\odot}$, $T_{\text{delay}} = t_{\text{hot}}$ (see Section 3.2.5)
GEAR	T, DC	SN Type Ia/II	0.024	$E_{\text{thermal}} = 4.5 \times 10^{51} \text{ ergs/SN}$, $T_{\text{delay}} = 5 \text{ Myr}$
GIZMO	T+K	SN Type II	0.033	$E_{\text{SN}} = 5 \times 10^{51} \text{ ergs/SN}$

† T = thermal feedback, K = kinetic feedback, RP = radiation pressure, DC = delayed cooling, S = superbubble, * = only for energy production (not metal), ** = only for metal production (not energy). While the total returned mass via feedback is constrained across the code platforms (Section 3.1), the exact feedback scheme and the metal yield are left to each code group’s discretion to be as close to the most widely-used practice in its community as possible. For more information on the items listed here, see Section 3.2. For more information on the “effective” metal yield by stellar feedback measured in the entire simulation box at $z = 4$ for the CosmoRun suite of simulations (fourth column), see Section 6.2.2.

- Large energy and/or momentum per SN in order to realize stellar mass predicted by abundance matching techniques.

Stellar mass

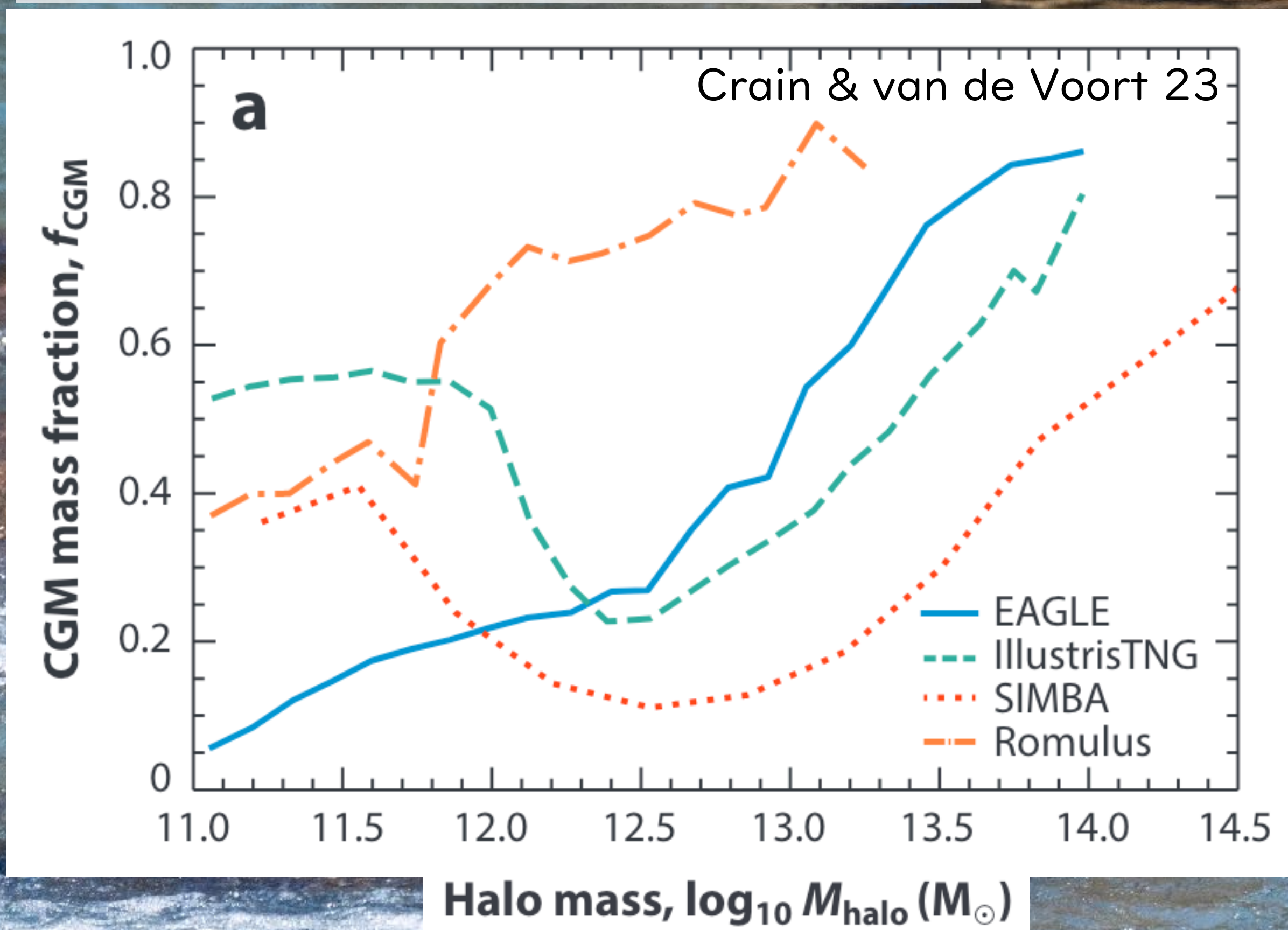
- フィードバックの強さは $z = 4$ の main halo 内の星質量が $10^9 \lesssim M_*/M_\odot \lesssim 5 \times 10^9$ になるように調節
- Abundance matching による範囲は $10^9 \lesssim M_*/M_\odot \lesssim 1.5 \times 10^9$
- 図は $z = 4$ に R_{200} 内にある星の age histogram
- high- z で違いが大きい
- Particle-based code 苦戦



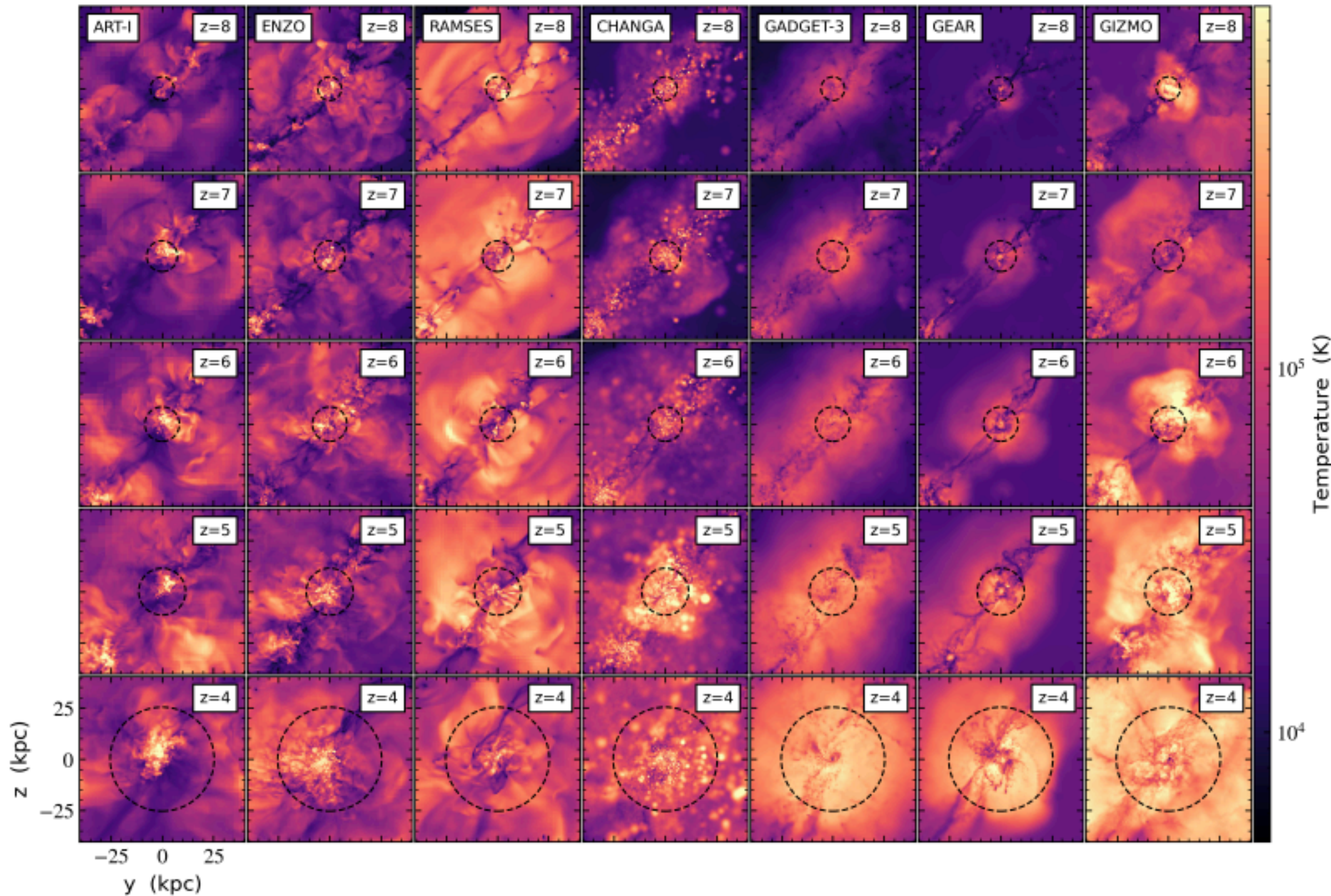
$R_{200} = 25.4$ kpc at $z = 4$

Circumgalactic medium

- 再び cosmological volume



Temperature map



- 粒子法の方が, circumgalactic medium を加熱する
- virial 半径より外側も加熱される

Summary





- $M_{\text{vir}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ を境に、小さいハローでは星起源のフィードバックが、それより大きいハローでは AGN フィードバックが星形成を抑制
- 大事なところはサブグリッド
- コードごとに（解けてる部分の）結果はわりと異なるが、その差はサブグリッドモデルに吸収される
- 現状、シミュレーションごとの差異が大きくなるのは、高赤方偏移とガス (ISM & CGM)
- なるべく物理的な不定性の少ないサブグリッドモデルを作る必要あり（もしくはめっちゃ速い計算機とコード）
- Stellar feedback 強すぎ問題 (variable IMF?)