

# 近年の大規模シミュレーションについて

大阪大学  
清水 一紘

I. これまでの simulation の復習

II. EAGLE project

Schaye et al. 2015, Crain et al. 2015

III. Illustris, IllustrisTNG project

Vogelsberger et al. 2014a, 2014b, Pillepich et al. 2017

IV. FIRE-1, FIRE-2 project

Hopkins et al. 2014, 2017a, 2017b

V. 今後の課題

zoom-in simulation でしかできなかった銀河の内部構造の研究が、large cosmological box ( $L \sim 100$  Mpc) でも可能になり始めた。

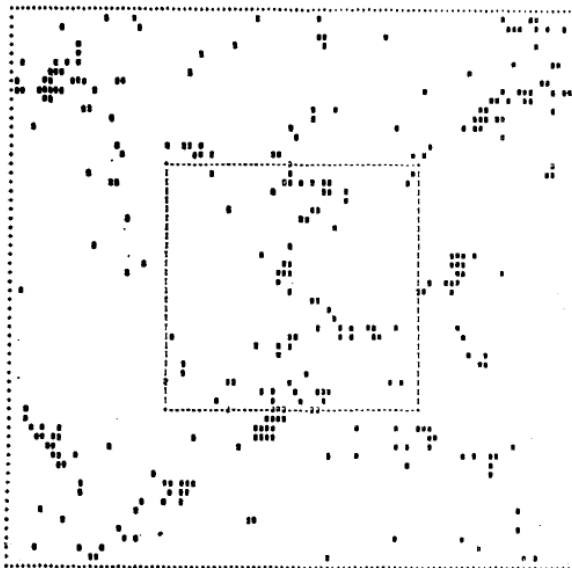
= 銀河は点の時代から、銀河は構造を持った天体の時代への偏移

← とはいっても依然としてほとんどの物理現象は subgrid

= cosmological simulation の大規模化

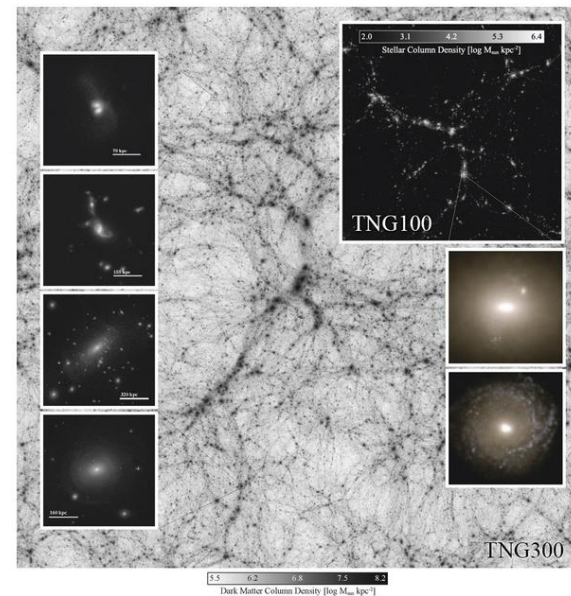
⇒ 段々と日本において個人で可能な規模でなくなっている？

400 particles



Miyoshi & Kihara 1975

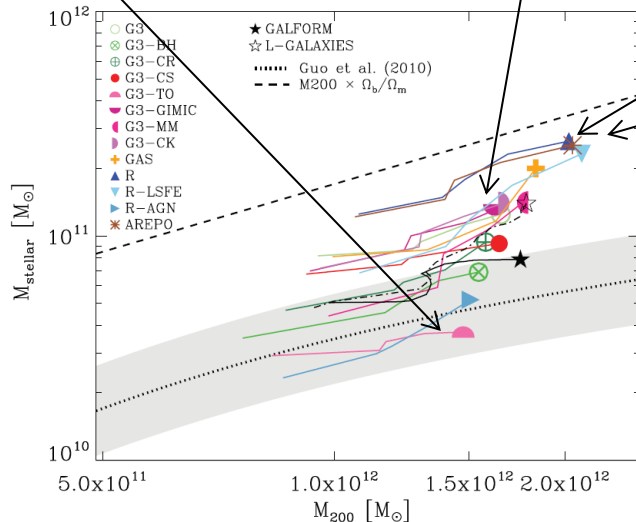
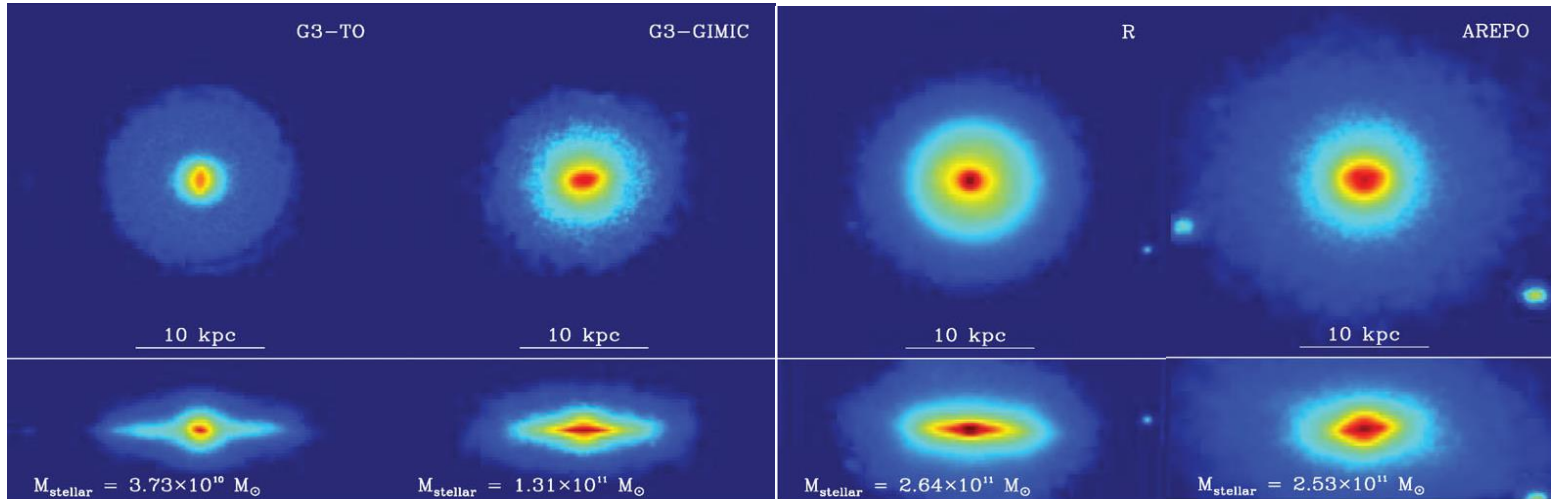
$2 \times 1820^3$  particles



IllustrisTNG

# Subgrid physics の重要性

同じ初期条件(MW size zoom-in simulation)、異なるコードで実行した結果



流体ソルバーのスキームも重要だが、  
バリオン物理の取り扱いはもっと大事

Aquila comparison project  
Scannapieco et al. 2012

# Cosmological Simulation で (少なくとも) 考えている物理過程

基本どの simulation でも入っているもの

- ✓ Gravity
- ✓ Cooling/heating with UV background
- ✓ Star formation with a certain IMF
- ✓ SN feedback
- ✓ Metal yield (from SNII, SNIa, AGB + NSM)  
⇒ 最近だと CELib (Saitoh 2017) が便利で使いやすい

その他の物理過程

- ✓ AGN feedback
- ✓ Radiative feedback  
(photoionization, radiation pressure, etc)
- ✓ Magneto-hydrodynamics (MHD)

# 再現すべき観測量

## 統計的観測量

- ✓ Star formation history
- ✓ Stellar mass function
- ✓ Stellar to halo mass ratio
- ✓ Mass-metallicity relation
- ✓ Galaxy size evolution
- ✓ Star formation rate function
- ✓ Star forming galaxy main-sequence
- ✓ Down-sizing for galaxy
- ✓ Co-evolution between galaxy and SMBH
- ✓ etc

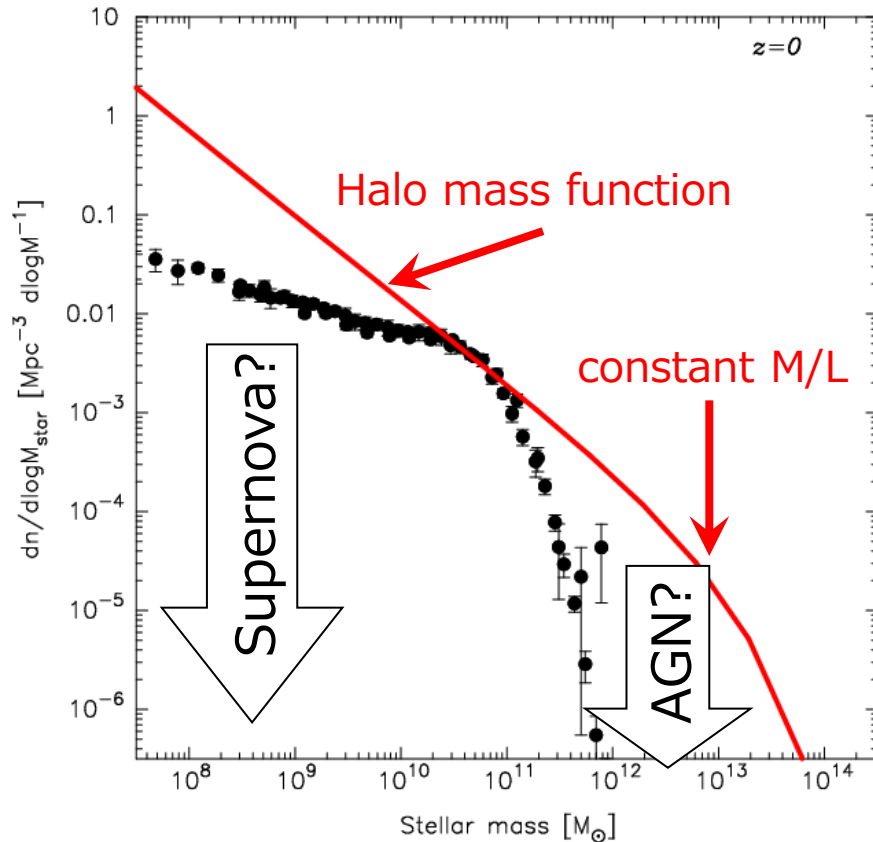
## 個々の銀河内の観測量

- ✓ Kennicutt-schmidt law
- ✓ Morphology
- ✓ Structure (velocity, gas, etc)
- ✓ Radial profile (stellar, gas, metallicity)
- ✓ Phase-diagram
- ✓ etc

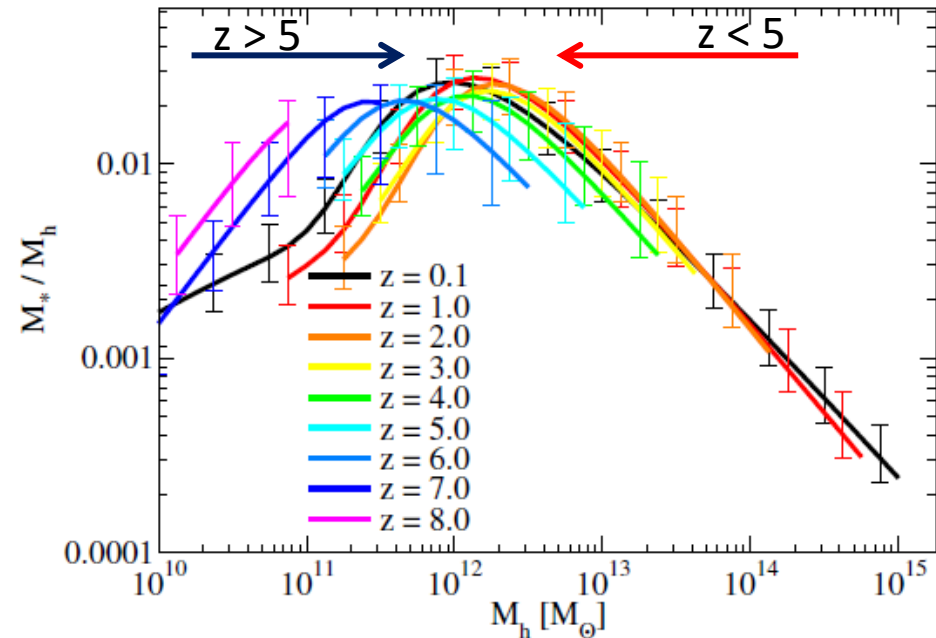
最近の simulation の現状を紹介する前に、  
Feedback の取り扱いを少しだけ復習

# Feedback の重要性

Stellar mass function at  $z=0$



Stellar to halo mass ratio



Observation data: Li+'09, Baldry+'11

Behroozi+'13

各 halo mass に対する、星形成効率が違う  
⇒ feedback の重要性を示唆している！

# (標準的?) simulation における SN Feedback の取り扱い

## ● Thermal Feedback

SN energy を熱エネルギーとして、周りのガスに与える

問題点: 星形成領域の密度が高い (=cooling time 短い) ために、  
熱エネルギーを与えてもあっという間に冷えてしまう

解: 一定期間、cooling を切る      e.g., Thacker+'01, Stinson+'06

## ● Kinetic feedback

SN energy を運動エネルギーとして、周りのガスに与える

問題点: 星形成領域の密度が高いために、簡単に星形成領域から  
ガスが逃げるが出来ない

解: 一定期間、流体相互作用を切る

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



# (古典的?) Kinetic SN feedback の扱い

説明の前に一つ重要なパラメーター (Mass loading factor) を紹介

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

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

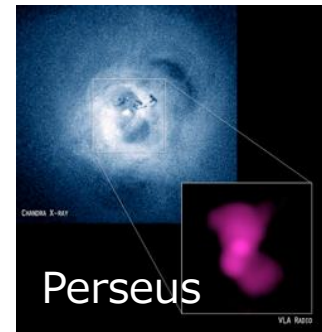
$\dot{M}_*$  = star formation rate

これまで、主に以下の3つのモデルが使われている

	winds velocity	Mass loading rate
Energy-driven winds	$v_w \propto V_{\text{vir}}$	$\eta \propto V_{\text{vir}}^{-2}$
Momentum-driven winds	$v_w \propto V_{\text{vir}}$	$\eta \propto V_{\text{vir}}^{-1}$
Constant winds models	$v_w = \text{const.}$	$\eta = \text{const.}$

wind velocity は、ハローのビリアル速度 (グローバルな値) を使って決められていることに注意。

# AGN Feedbacks



SMBH への降着率に応じて、2つのモードがある

## ●Quasar mode feedback (standard disk的)

- ✓ AGN 周りのガスを直接加熱
- ✓ このモードは降着率が高い場合 ( $\dot{M}_{\text{BH}} \sim \dot{M}_{\text{Edd}}$ )

## ●Radio mode feedback (ADAF, RIAF的)

- ✓ Halo 内のガスを直接加熱 (ANG Jet/outflow)
- ✓ このモードは降着率が低い場合 ( $\dot{M}_{\text{BH}} \ll \dot{M}_{\text{Edd}}$ )
- ✓ 降着率は低いが、エネルギー変換効率が高い

観測的に AGN feedback が星形成を抑制している  
直接的な証拠は少ない (ない?)。

# BH gas accretion のモデル化

- BH の置き方

- ✓銀河の質量が  $10^{10}M_{\odot}$  を超えたら、 $10^5M_{\odot}$  の BH を銀河中心に置く (よく使われている条件)

- Bondi accretion rate (+ Eddington limited)

- ✓BH への降着率を計算するために必要な物理量 ( $\rho, c_s, v$ ) は、BH 周りのガスの情報から計算する

- ✓ Springel+'05, Hopkins+'06, Li+'07, Booth+'09, etc

- Radiation drag model (Kawakatu & Umemura'02)

- ✓BH への降着率は、バルジの成長率に比例させる  
⇒ 星形成領域 ( $\sim\text{kpc}$ ) の光度

- ✓Okamoto+'07

# AGN Feedback のモデル化

## ●Quasar mode feedback

- ✓ BH の周りを直接加熱 (入力エネルギー:  $L_{\text{fb}} = \eta_{\text{fb}} M_{\text{BH}} c^2$ )
- ✓ 典型的なエネルギー効率:  $\eta_{\text{fb}} = 0.005 \sim 0.01$
- ✓ Springel+'05, Hopkins+'06, Li+'07, Booth+'09, etc

## ●Radio mode feedback

- ✓ 降着率が低い場合に働くモード ( $\dot{M}_{\text{BH}} / \dot{M}_{\text{Edd}} < 0.01$ )
- ✓ halo ガスを直接加熱 ( $L_{\text{fb}} = \eta_{\text{fb}} M_{\text{BH}} c^2$ )
- ✓ 典型的なエネルギー効率:  $\eta_{\text{fb}} \simeq 0.1$
- ✓ Okamoto+'07, Sijacki+'07, '08, '09

SN feedback と違って現状でも、これらの取り扱いは、よく使われている

# 3つのプロジェクトに共通するもの

- ✓ 複数人で構成されているが、各研究者への仕事の割り当てがよく考えられている。
- ✓ 立派な HP が作ってある
  - きれいな図、ムービーがいっぱいある
  - 研究者に限らず、様々な人に使ってもらえる
    - ⇒ 社会への還元？
- ✓ Simulation data がオープンアクセス
  - ⇒ いろんな研究者に使ってもらえる
- ✓ 赤方偏移  $z=0$  まで (ちゃんと?) 計算している
  - ⇒ モデルの妥当性が一目瞭然 (たぶん)

# EAGLE project

**The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments**

Joop Schaye,<sup>1★</sup> Robert A. Crain,<sup>1</sup> Richard G. Bower,<sup>2</sup> Michelle Furlong,<sup>2</sup>  
Matthieu Schaller,<sup>2</sup> Tom Theuns,<sup>2,3</sup> Claudio Dalla Vecchia,<sup>4,5</sup> Carlos S. Frenk,<sup>2</sup>  
I. G. McCarthy,<sup>6</sup> John C. Helly,<sup>2</sup> Adrian Jenkins,<sup>2</sup> Y. M. Rosas-Guevara,<sup>2</sup>  
Simon D. M. White,<sup>7</sup> Maarten Baes,<sup>8</sup> C. M. Booth,<sup>1,9</sup> Peter Camps,<sup>8</sup>  
Julio F. Navarro,<sup>10</sup> Yan Qu,<sup>2</sup> Alireza Rahmati,<sup>7</sup> Till Sawala,<sup>2</sup>  
Peter A. Thomas<sup>11</sup> and James Trayford<sup>2</sup>

MNRAS, 446, 521 (2015)

Eagle HP: <http://icc.dur.ac.uk/Eagle/>

# EAGLE project

## Simulation set-up

Name	$L$ (cMpc)	$N$	$m_g$ ( $M_\odot$ )	$m_{\text{dm}}$ ( $M_\odot$ )	$\epsilon_{\text{com}}$ (comoving kpc)	$\epsilon_{\text{prop}}$ (pkpc)
L025N0376	25	$376^3$	$1.81 \times 10^6$	$9.70 \times 10^6$	2.66	0.70
L025N0752	25	$752^3$	$2.26 \times 10^5$	$1.21 \times 10^6$	1.33	0.35
L050N0752	50	$752^3$	$1.81 \times 10^6$	$9.70 \times 10^6$	2.66	0.70
L100N1504	100	$1504^3$	$1.81 \times 10^6$	$9.70 \times 10^6$	2.66	0.70

## Cost for simulations

### L100N1504の場合

- ✓ Memory: 32 TB
- ✓ CPU time: 4.5 Million CPU hour  
⇒ 1000 cpu 並列 (xc30 で可能かもしれない) で約 2 0 0 日
- ✓ Data size: 数 100 TB

日本で個人でやるにはちと厳しい?

# Feedbacks Treatment for EAGLE

✓ Thermal feedback (SN, AGN: Dalla Vecchia+'12)

□ SN feedback、AGN feedback とともに同じ手法

□ Feedback により加熱されるとききの温度をパラメータとして決める

⇒ Cooling が非効率な場所まで加熱

⇒ SN feedback:  $\Delta T_{\text{SN}} = 10^{7.5} \text{K}$

⇒ AGN feedback:  $\Delta T_{\text{AGN}} = 10^9 \text{K}$

⇒ 加熱されたガスのCooling は切らない

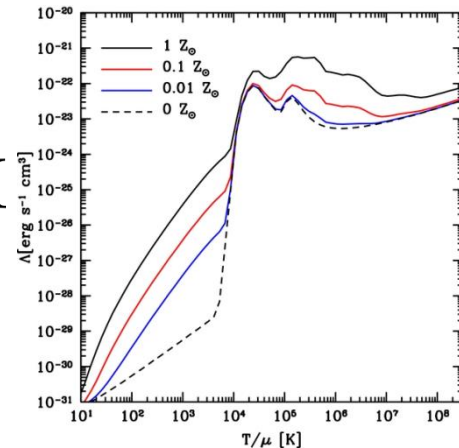
✓ 一発の SN で加熱できるガス粒子の個数

$$\langle N_{\text{heat}} \rangle \approx 1.3 \left( \frac{\Delta T}{10^{7.5} [\text{K}]} \right) \quad (M_* = M_{\text{gas}} \text{ の場合})$$

⇒ 実際の simulation では、近傍粒子に確率論的に分ける

⇒ 欲しいエネルギーがもらえない時がある

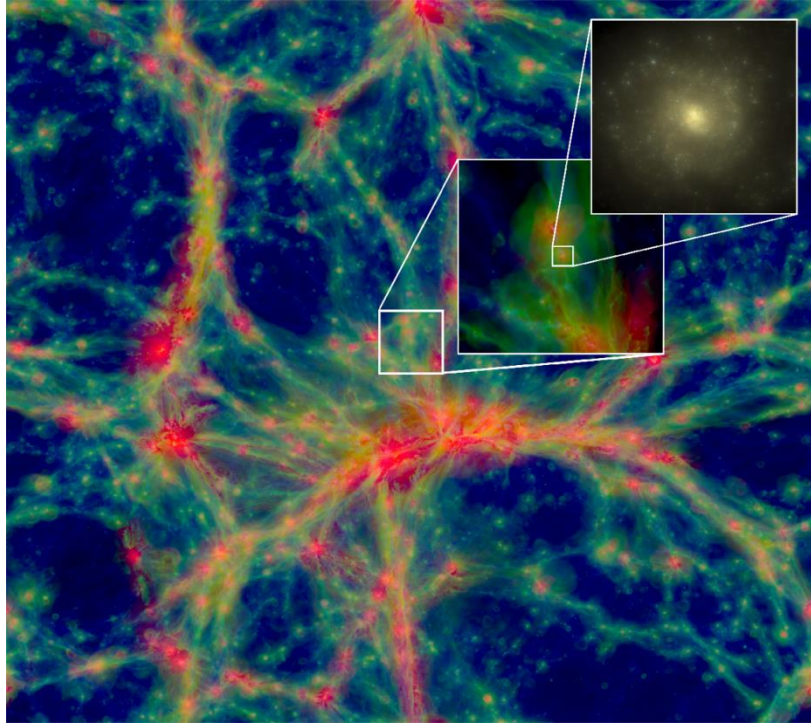
⇒ 加熱するために必要なエネルギーが貯まるまで何もしない



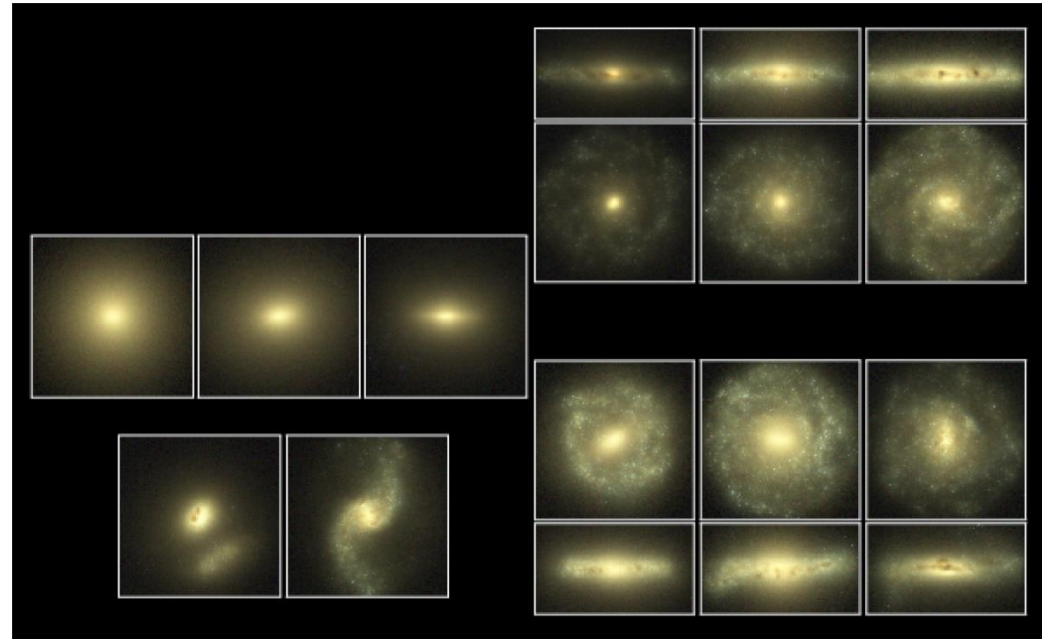
Agartz+'14



# EAGLE project

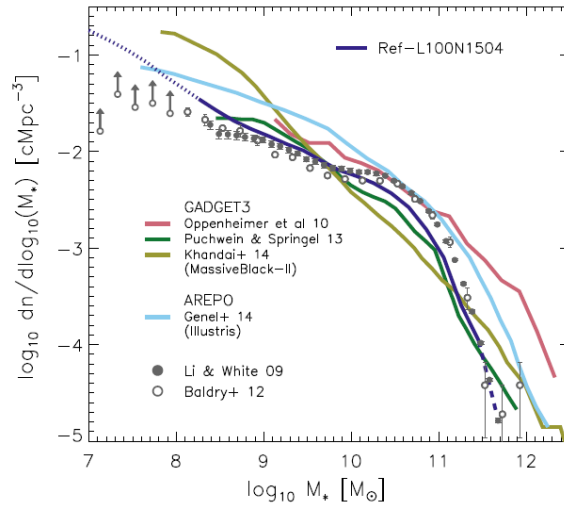


ハッブルの音叉図

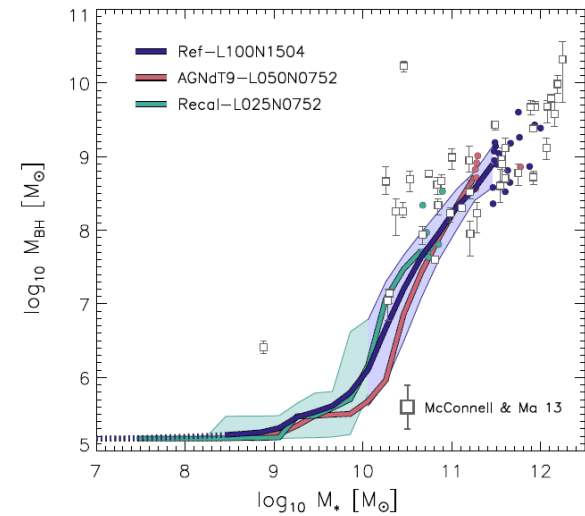


# EAGLE project

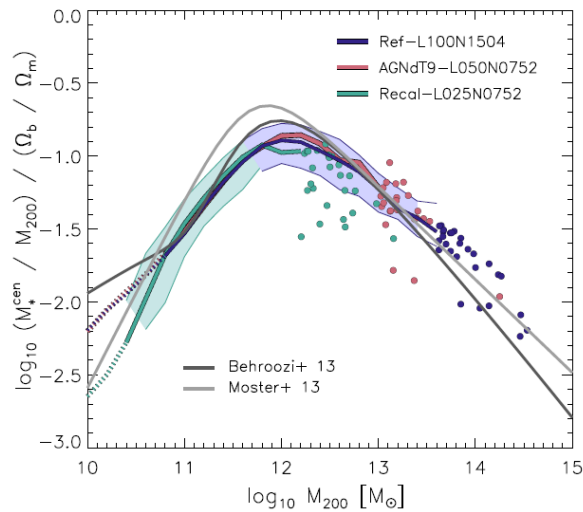
## Stellar mass function



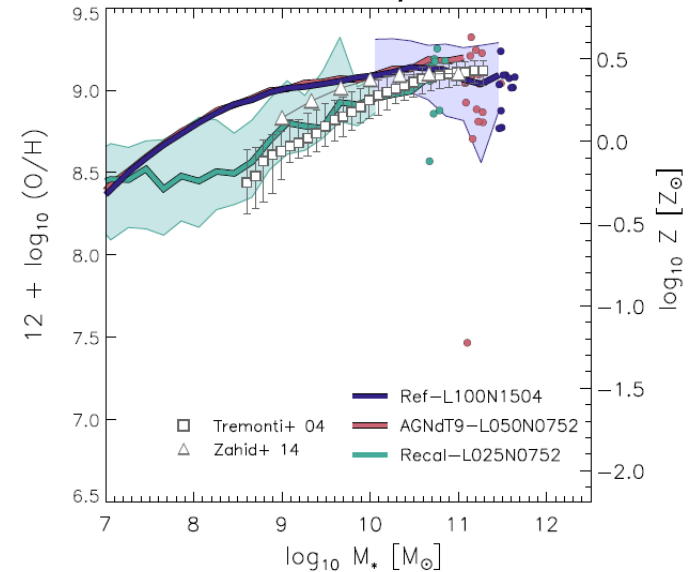
## Stellar mass-BH mass relation



## Stellar to halo mass ratio



## Mass metallicity relation



# Illustris project

**Introducing the Illustris Project: simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe**

Mark Vogelsberger,<sup>1★</sup> Shy Genel,<sup>2</sup> Volker Springel,<sup>3,4</sup> Paul Torrey,<sup>2</sup> Debora Sijacki,<sup>5</sup> Dandan Xu,<sup>3</sup> Greg Snyder,<sup>6</sup> Dylan Nelson<sup>2</sup> and Lars Hernquist<sup>2</sup>

MNRAS, 444, 1518 (2014)

# IllustrisTNG project

**Simulating galaxy formation with the IllustrisTNG model**

Annalisa Pillepich,<sup>1,2★</sup> Volker Springel,<sup>3,4</sup> Dylan Nelson,<sup>5★</sup> Shy Genel,<sup>6,7</sup> Jill Naiman,<sup>2</sup> Rüdiger Pakmor,<sup>3</sup> Lars Hernquist,<sup>2</sup> Paul Torrey,<sup>8</sup> Mark Vogelsberger,<sup>8†</sup> Rainer Weinberger<sup>3</sup> and Federico Marinacci<sup>8</sup>

MNRAS, 473, 4077 (2018)

Illustris HP: <http://www.illustris-project.org/>  
IllustrisTNG HP: <http://www.tng-project.org/>

# Illustris project

## Simulation set-up

Name	Volume (Mpc) <sup>3</sup>	DM particles/hydro cells/ MC tracers	$\epsilon_{\text{baryon}}/\epsilon_{\text{DM}}$ (pc)	$m_{\text{baryon}}/m_{\text{DM}}$ ( $10^5 M_{\odot}$ )	$r_{\text{cell}}^{\text{min}}$ (pc)	$m_{\text{cell}}^{\text{min}}$ ( $10^5 M_{\odot}$ )	Description
Illustris-1	$106.5^3$	$3 \times 1820^3 \cong 18.1 \times 10^9$	710/1420	12.6/62.6	48	0.15	Full physics
Illustris-2	$106.5^3$	$3 \times 910^3 \cong 2.3 \times 10^9$	1420/2840	100.7/501.0	98	1.3	Full physics
Illustris-3	$106.5^3$	$3 \times 455^3 \cong 0.3 \times 10^9$	2840/5680	805.2/4008.2	273	15.3	Full physics
Illustris-Dark-1	$106.5^3$	$1 \times 1820^3$	710/1420	-/75.2	-	-	DM only
Illustris-Dark-2	$106.5^3$	$1 \times 910^3$	1420/2840	-/601.7	-	-	DM only
Illustris-Dark-3	$106.5^3$	$1 \times 455^3$	2840/5680	-/4813.3	-	-	DM only
Illustris-NR-2	$106.5^3$	$2 \times 910^3 \cong 1.5 \times 10^9$	1420/2840	100.7/501.0	893.8	6.6	No cooling/SF/feedback
Illustris-NR-3	$106.5^3$	$2 \times 455^3 \cong 0.2 \times 10^9$	2840/5680	805.2/4008.2	2322.8	39.4	No cooling/SF/feedback

## Cost for simulations

### Illustris-1の場合

- ✓ Memory: 25 TB with 8192 pu
- ✓ CPU time: 19 Million CPU hour  
⇒ 1000 cpu 並列 (xc30 で可能かもしれない) で約 8 0 0 日
- ✓ Data size: 230 TB (1.5 TB/snapshot)

# IllustrisTNG project

## Simulation set-up

Series	Run	Boxsize		$N_{\text{gas}}$	$N_{\text{dm}}$	$N_{\text{tracer}}$	$m_b$ [ $h^{-1}M_{\odot}$ ]	$m_{\text{dm}}$ [ $h^{-1}M_{\odot}$ ]	$\epsilon$ [ $h^{-1}\text{kpc}$ ]
		[ $h^{-1}\text{Mpc}$ ]	[Mpc]						
TNG300	TNG300(-1)	205	302.6	$2500^3$	$2500^3$	$2500^3$	$7.44 \times 10^6$	$3.98 \times 10^7$	1.0
	TNG300-2	205	302.6	$1250^3$	$1250^3$	$1250^3$	$5.95 \times 10^7$	$3.19 \times 10^8$	2.0
	TNG300-3	205	302.6	$625^3$	$625^3$	$625^3$	$4.76 \times 10^8$	$2.55 \times 10^9$	4.0
	TNG300-DM(-1)	205	302.6		$2500^3$			$4.73 \times 10^7$	1.0
	TNG300-DM-2	205	302.6		$1250^3$			$3.78 \times 10^8$	2.0
	TNG300-DM-3	205	302.6		$625^3$			$3.03 \times 10^9$	4.0
TNG100	TNG100(-1)	75	110.7	$1820^3$	$1820^3$	$2 \times 1820^3$	$9.44 \times 10^5$	$5.06 \times 10^6$	0.5
	TNG100-2	75	110.7	$910^3$	$910^3$	$2 \times 910^3$	$7.55 \times 10^6$	$4.04 \times 10^7$	1.0
	TNG100-3	75	110.7	$455^3$	$455^3$	$2 \times 455^3$	$6.04 \times 10^7$	$3.24 \times 10^8$	2.0
	TNG100-DM(-1)	75	110.7		$1820^3$			$6.00 \times 10^6$	0.5
	TNG100-DM-2	75	110.7		$910^3$			$4.80 \times 10^7$	1.0
	TNG100-DM-3	75	110.7		$455^3$			$3.84 \times 10^8$	2.0

## Cost for simulations

### TNG300の場合

- ✓ Memory: 40 TB with 24000 pu
- ✓ CPU time: 34.9 Million CPU hour  
⇒ 1000 cpu 並列 (xc30 で可能かもしれない) で約1500日
- ✓ Data size: 数百 TB

# Subgrid physics の取り扱い

## Star formation

- ✓ 従来の取り扱いと同等 (springel & Hernquist '03)

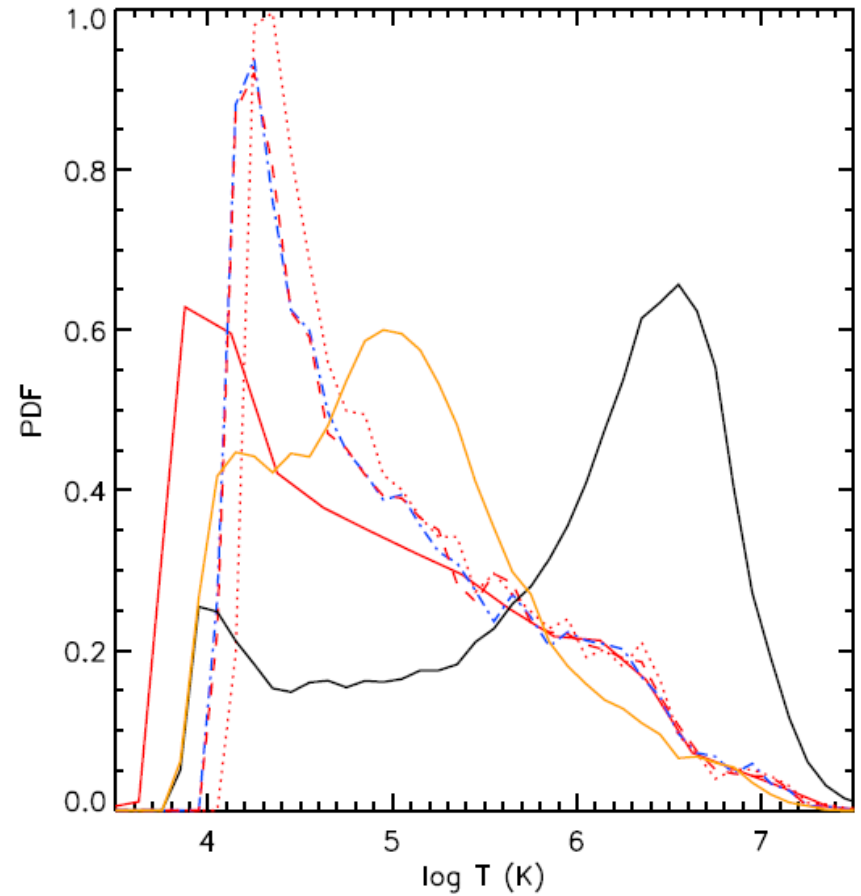
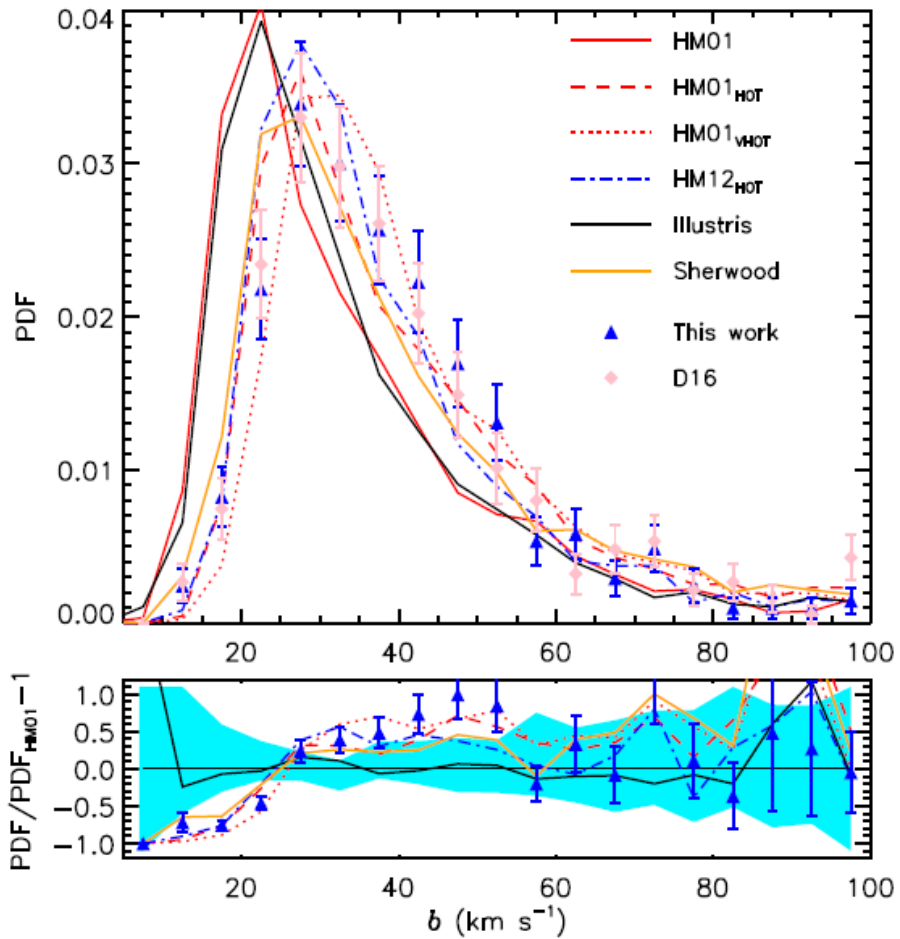
## SN feedback

- ✓ 従来の取り扱いと同等 (energy driven wind 的)
- ✓ Metallicity dependence

## AGN feedback

- ✓ 従来の取り扱いと同等
  - Illustris: quasar mode, radio mode
  - IllustrisTNG: High/Low Accretion State
    - ⇒ low mode では kinetic feedback

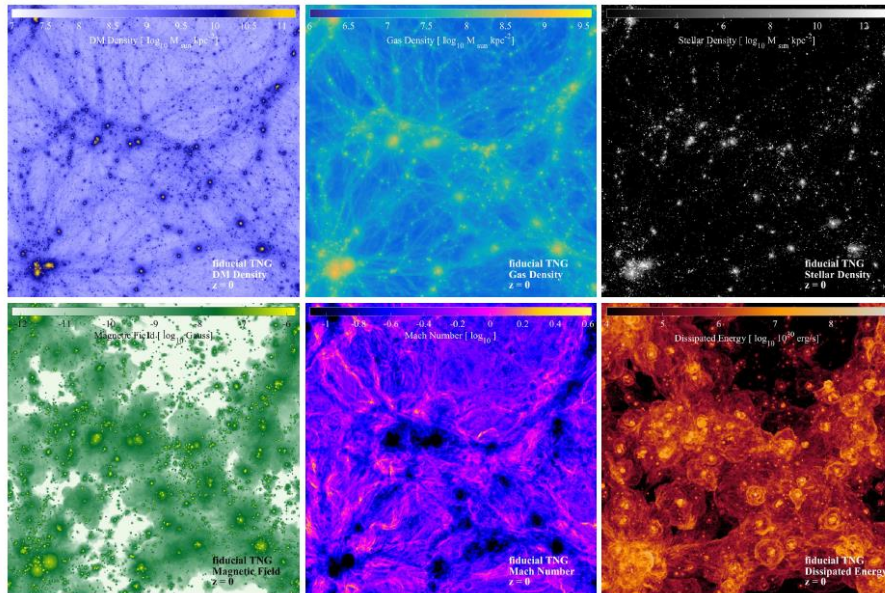
# Illustris (not TNG) の問題点



IGMを加熱しすぎている (AGN feedback が強すぎる)



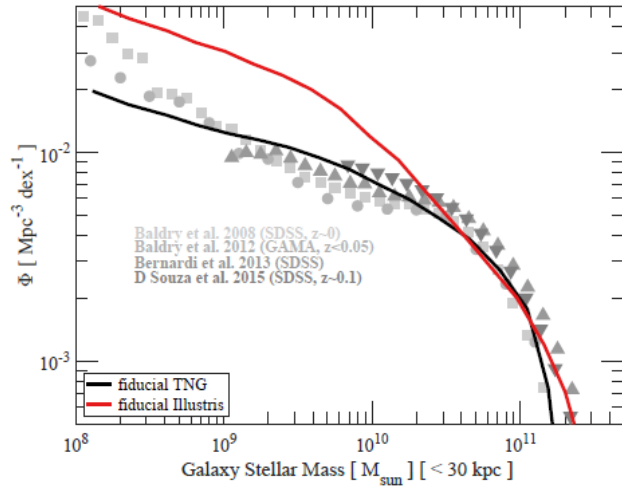
# IllustrisTNG project



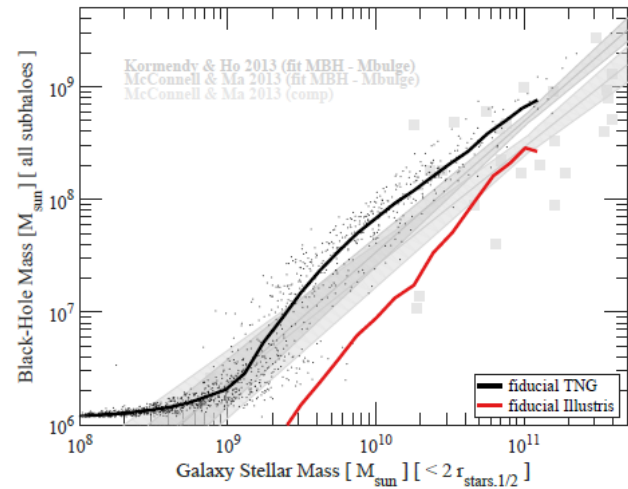


# IllustrisTNG project

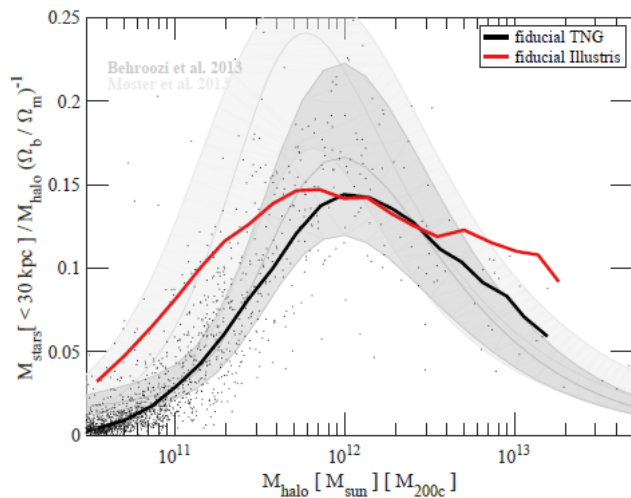
## Stellar mass function



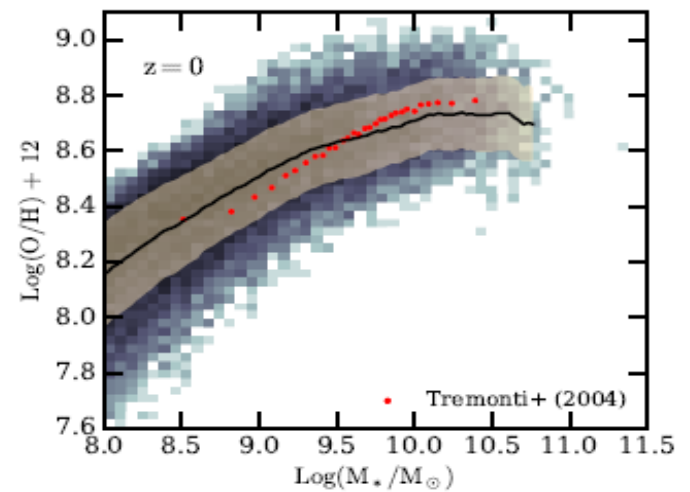
## Stellar mass-BH mass relation



## Stellar to halo mass ratio



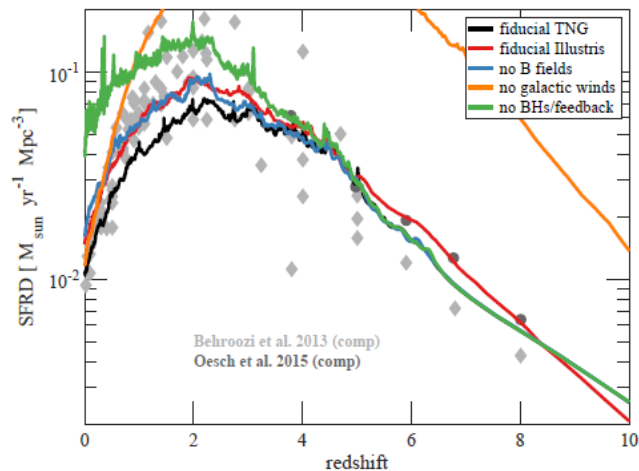
## Mass metallicity relation



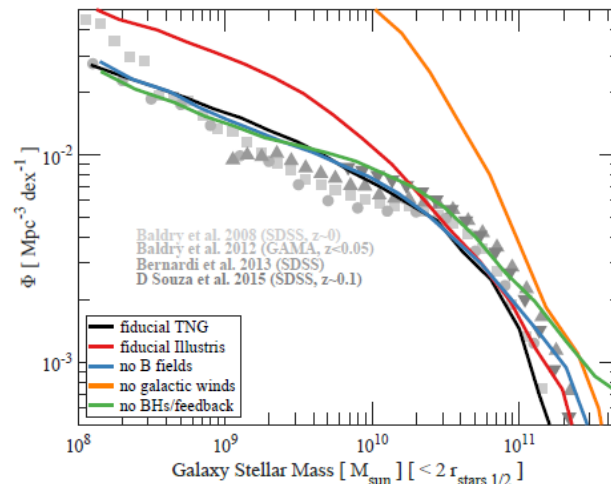
# IllustrisTNG project

Interesting result (磁場の重要性?)

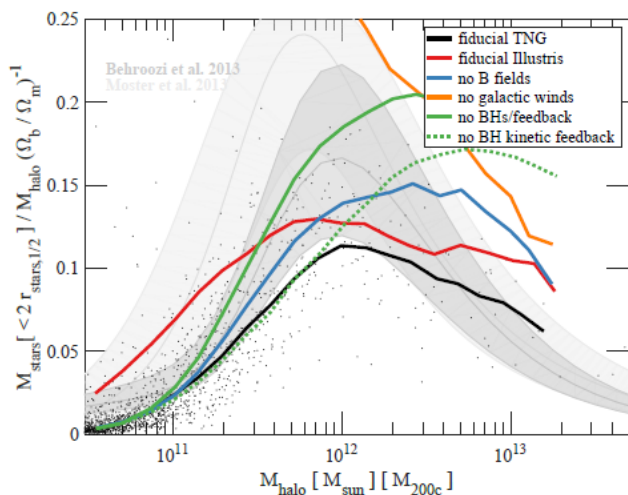
Star formation history



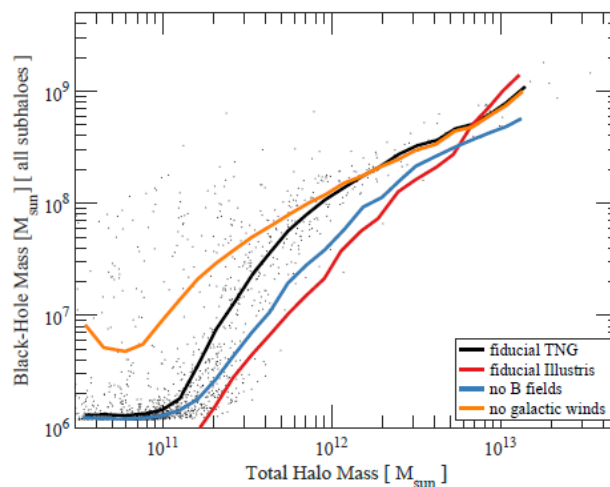
Stellar mass function



Stellar to halo mass ratio



Stellar Mass-BH mass relation



# FIRE project

## **Galaxies on FIRE (Feedback In Realistic Environments): Stellar Feedback Explains Cosmologically Inefficient Star Formation**

Philip F. Hopkins\*<sup>1,2</sup>, Dušan Kereš<sup>3</sup>, José Oñorbe<sup>4</sup>, Claude-André Faucher-Giguère<sup>2,5</sup>, Eliot Quataert<sup>2</sup>, Norman Murray<sup>6,7</sup>, & James S. Bullock<sup>4</sup>

MNRAS, 445, 581 (2014)

# FIRE-2 project

## **FIRE-2 Simulations: Physics versus Numerics in Galaxy Formation**

Philip F. Hopkins\*<sup>1</sup>, Andrew Wetzel<sup>1,2,3†</sup>, Dušan Kereš<sup>4</sup>, Claude-André Faucher-Giguère<sup>5</sup>, Eliot Quataert<sup>6</sup>, Michael Boylan-Kolchin<sup>7</sup>, Norman Murray<sup>8</sup>, Christopher C. Hayward<sup>9</sup>, Shea Garrison-Kimmel<sup>1</sup>, Cameron Hummels<sup>1</sup>, Robert Feldmann<sup>6,10</sup>, Paul Torrey<sup>11</sup>, Xiangcheng Ma<sup>1</sup>, Daniel Anglés-Alcázar<sup>5</sup>, Kung-Yi Su<sup>1</sup>, Matthew Orr<sup>1</sup>, Denise Schmitz<sup>1</sup>, Ivanna Escala<sup>1</sup>, Robyn Sanderson<sup>1</sup>, Michael Y. Grudić<sup>1</sup>, Zachary Hafen<sup>5</sup>, Ji-Hoon Kim<sup>12</sup>, Alex Fitts<sup>7</sup>, James S. Bullock<sup>13</sup>, Coral Wheeler<sup>1</sup>, T. K. Chan<sup>4</sup>, Oliver D. Elbert<sup>13</sup>, Desika Narayanan<sup>14</sup>

FIRE, FIRE-2 HP: <https://fire.northwestern.edu/>

# FIRE, FIRE-2 project

## Simulation set-up

Simulation Name	$M_{\text{halo}}^{\text{vir}}$ [ $M_{\odot}$ ]	$R_{\text{vir}}$ [kpc]	$M_*$ [ $M_{\odot}$ ]	$R_{1/2}$ [kpc]	$m_{i,1000}$ [ $1000M_{\odot}$ ]	$\epsilon_{\text{gas}}^{\text{MIN}}$ [pc]	$r_{\text{DM}}^{\text{conv}}$ [pc]	Notes
Ultra-Faints ( $M_{\text{halo}} \lesssim 10^{10} M_{\odot}$ ):								
m09	2.4e9	35.6	9.4e3	0.29	0.25	1.1	65	early-forming, ultra-faint field dwarf
Low-Mass Dwarf ( $M_{\text{halo}} \sim 10^{10} M_{\odot}$ ) Survey:								
m10q	8.0e9	52.4	1.8e6	0.63	0.25	0.52	73	isolated dwarf, early-forming halo
Intermediate-Mass Dwarfs ( $10^{10} M_{\odot} \lesssim M_{\text{halo}} \lesssim 10^{12} M_{\odot}$ ):								
m10z	3.5e10	85.6	3.5e7	2.1	0.26	0.21	130	ultra-diffuse galaxy
m11a	4.1e10	90.5	1.2e8	2.7	2.1	4.3	310	diffuse, large core
m11b	4.3e10	92.2	1.1e8	2.4	2.1	2.9	250	intermediate-forming
Milky Way-Mass “Latte” ( $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ ) Halos:								
m12i	1.2e12	275	6.5e10	2.9	7.0	0.38	150	“Latte” primary halo
m12f	1.6e12	306	8.0e10	4.0	7.0	0.51	130	MW-like halo
m12m	1.5e12	301	1.2e11	5.6	7.0	0.27	180	earlier-forming halo, boxy bulge

\*ここに出したものは、FIRE simulation で行ったすべてではないことは注意

## Features of FIRE, FIRE-2 simulation

### Zoom-in simulation

- ✓ Resolution (質量、空間) が他と比べて無茶苦茶高い  
⇒ 銀河形態や銀河内のガスの構造等の詳細な議論ができる
- ✓ 統計量の議論をするのは厳しい
- ✓ IMF weighted な値を利用

# Feedbacks Treatment for FIRE

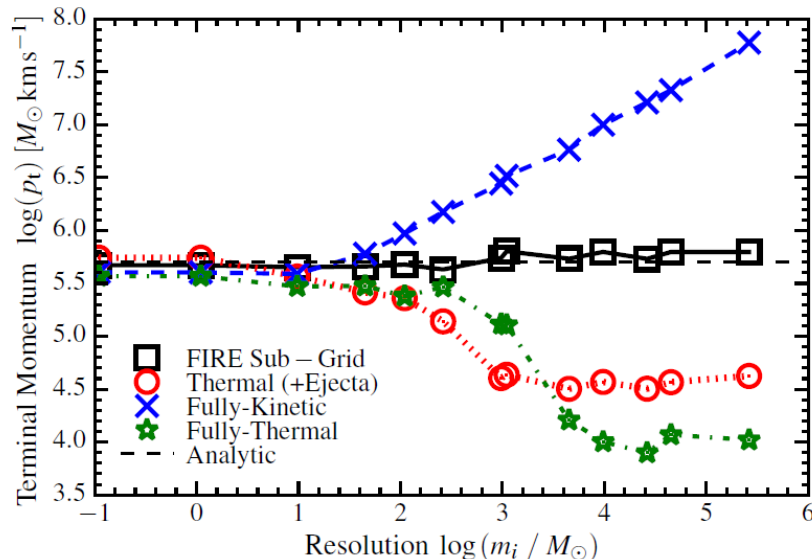
✓ Kinetic feedback (Hopkins+'17)

- 点源爆発の simulation 結果 (Cioffi+'88) を利用
- 雪かき膨張期に注目してモデリング
- Resolution dependence が小さい (ない?)
- Local な物理量 (密度、メタリシティ) だけで計算できる

$$\frac{p_t}{M_\odot \text{ km s}^{-1}} \simeq 4.8 \times 10^5 \left( \frac{E_{SN}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{13/14} \left( \frac{n_b}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/7} f(Z_b)^{3/2}$$

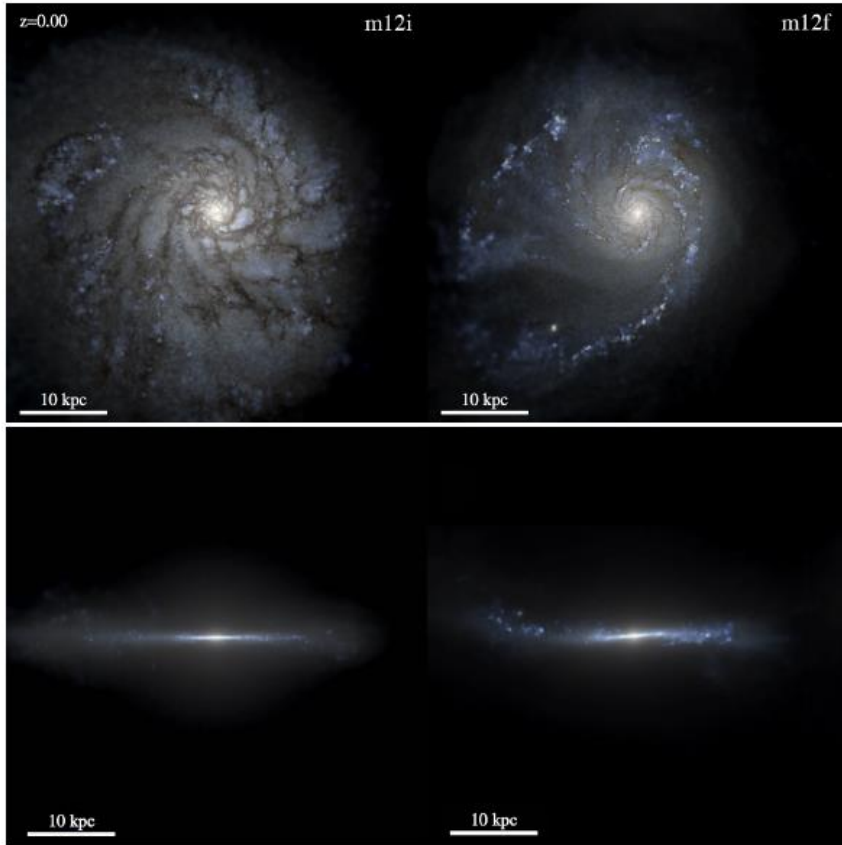
$$f(Z_b) \approx 2 \quad (Z/Z_\odot < 0.01)$$

$$f(Z_b) \approx (Z/Z_\odot)^{-0.14} \quad (Z/Z_\odot < 0.01)$$

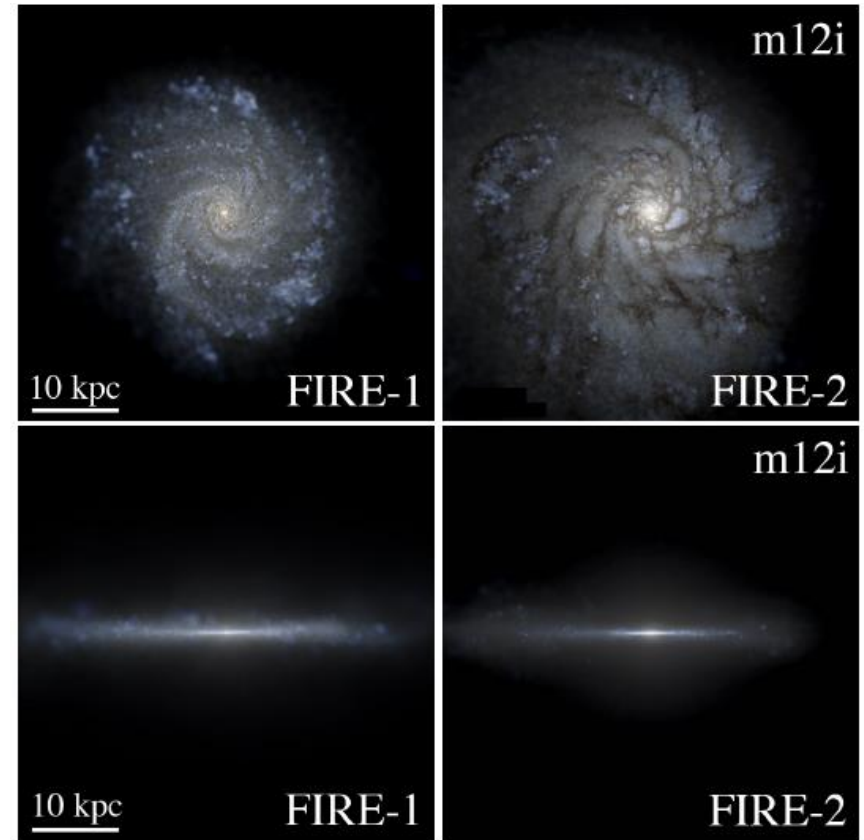


# FIRE, FIRE-2 project

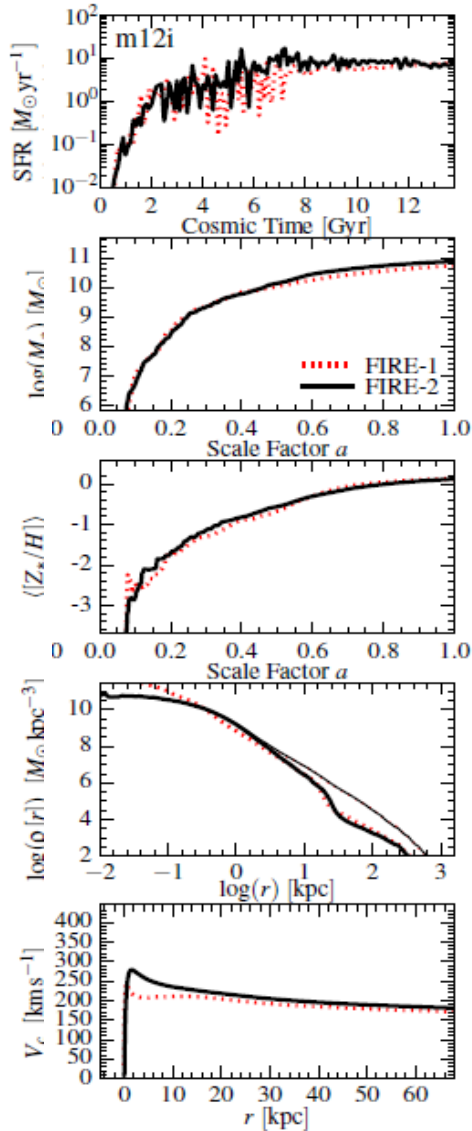
FIRE-2 milky way type galaxy



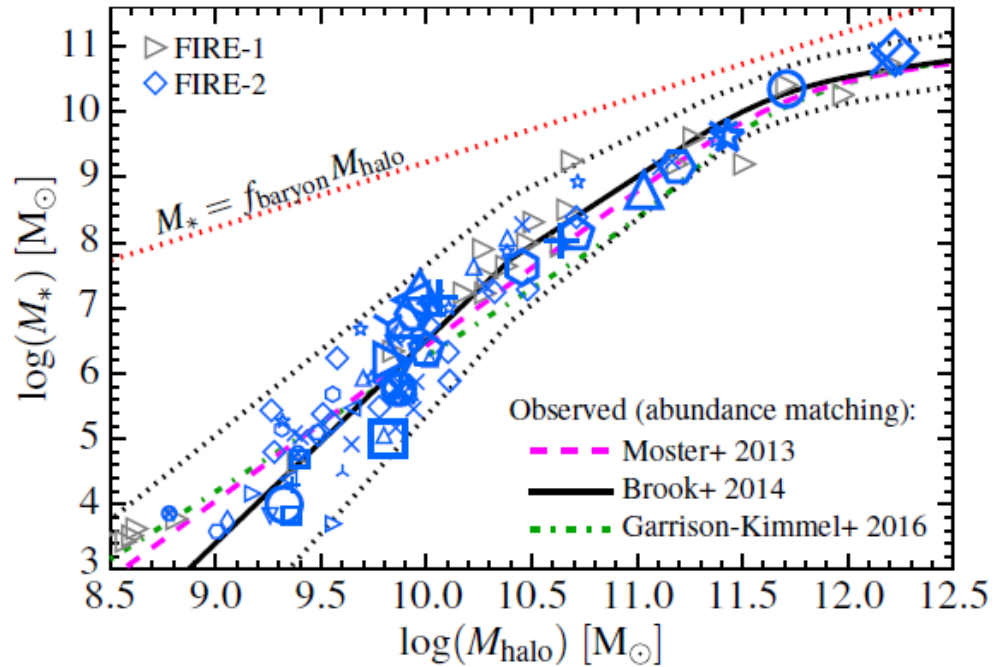
Comparison FIRE with FIE-2



# FIRE, FIRE-2 project

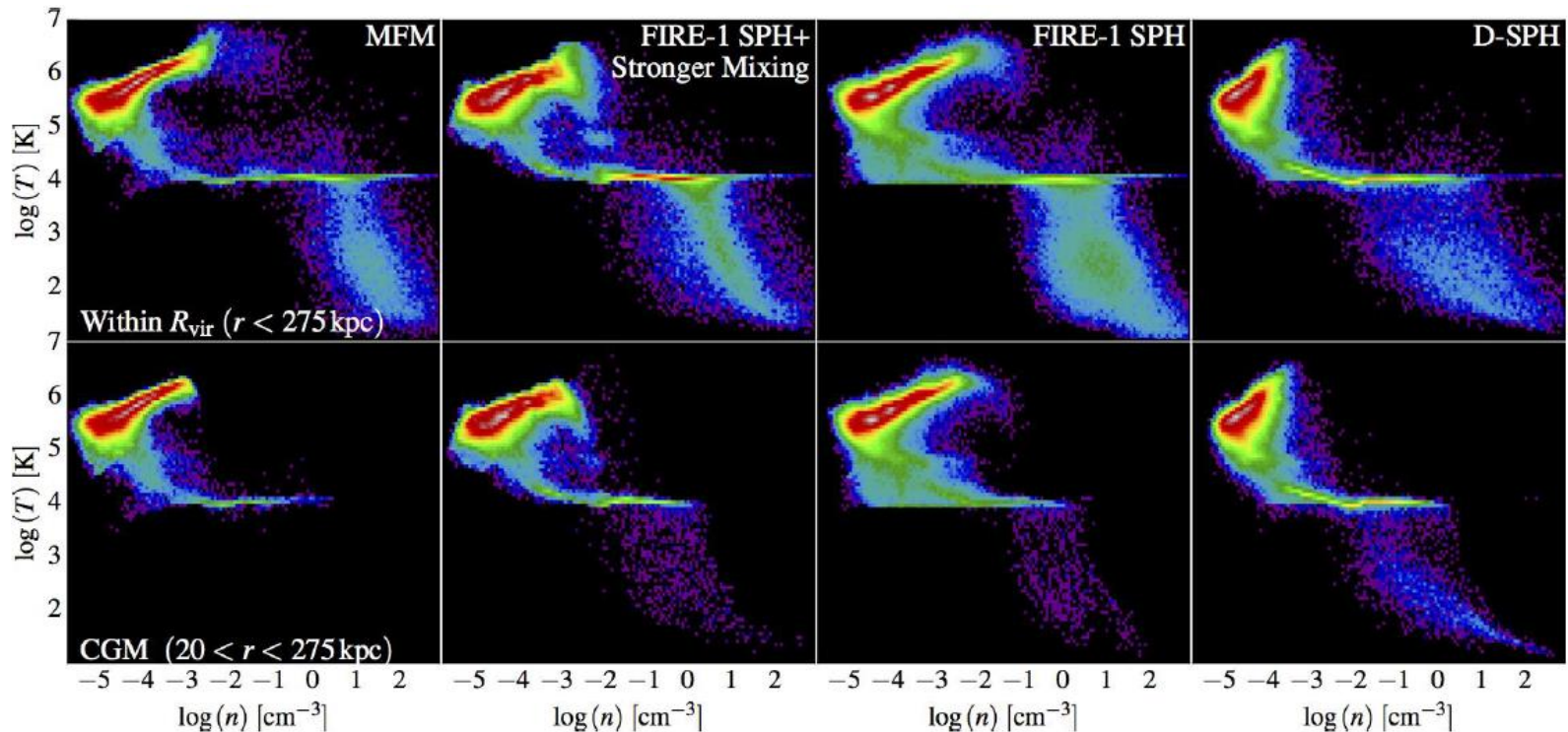
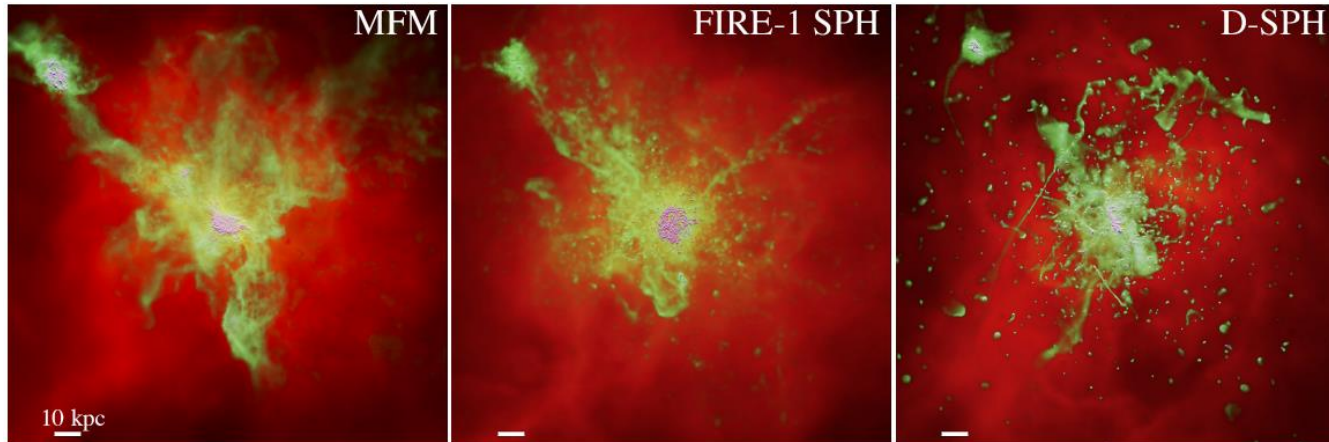


## Stellar to halo mass ratio



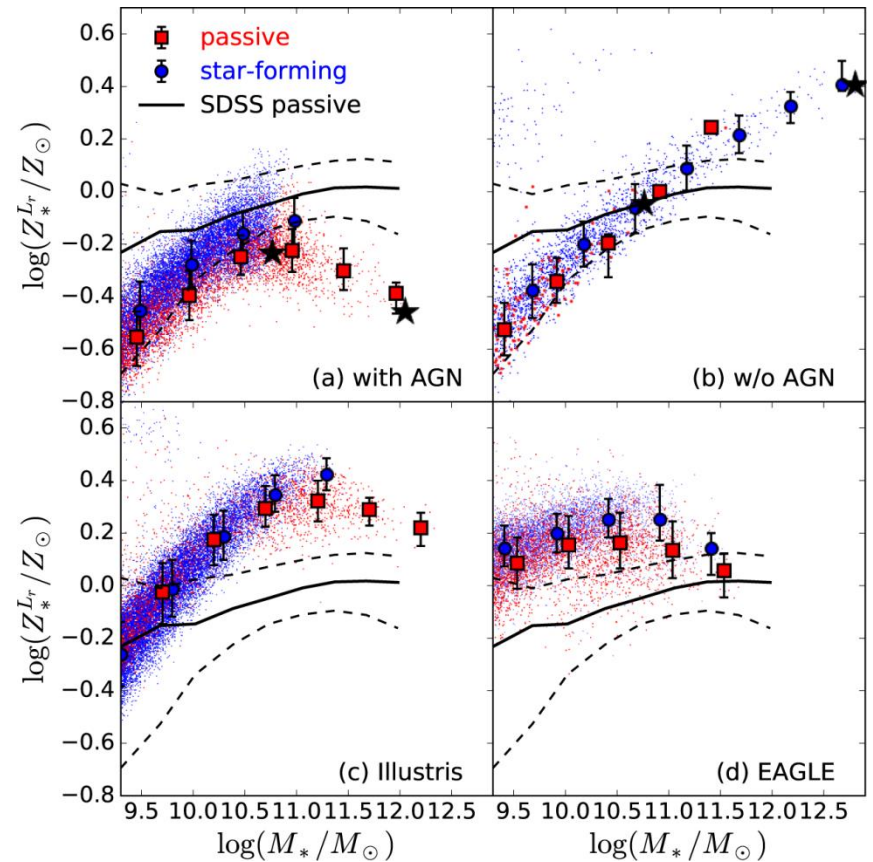
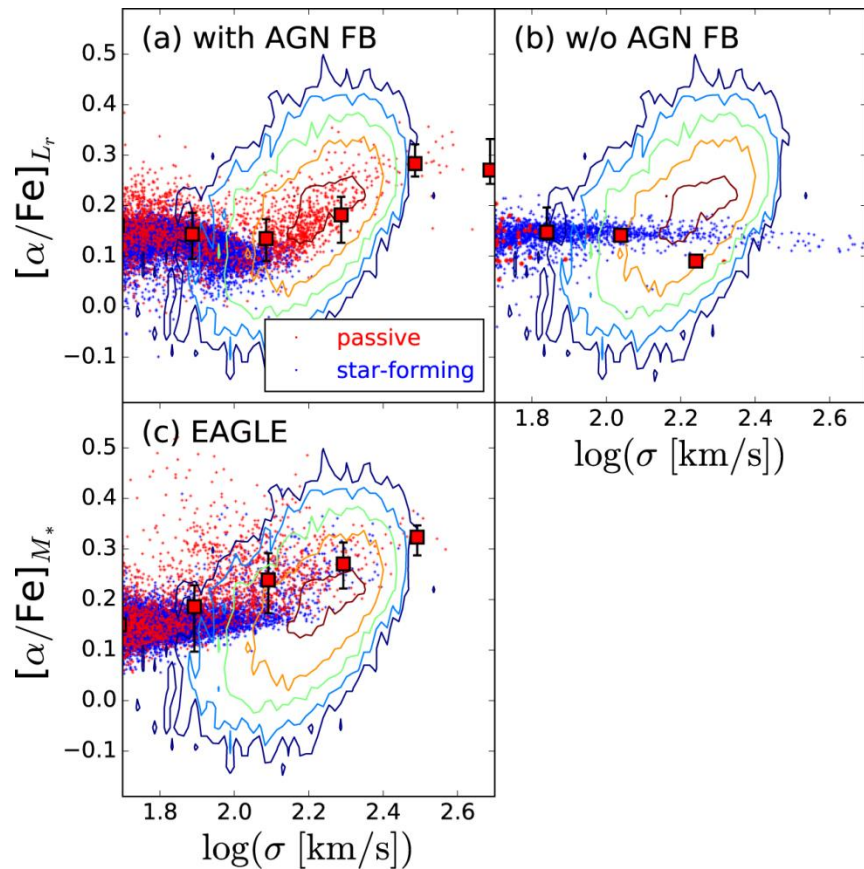


# FIRE, FIRE-2 project





# 既存モデルの問題点 (例)



# まとめ

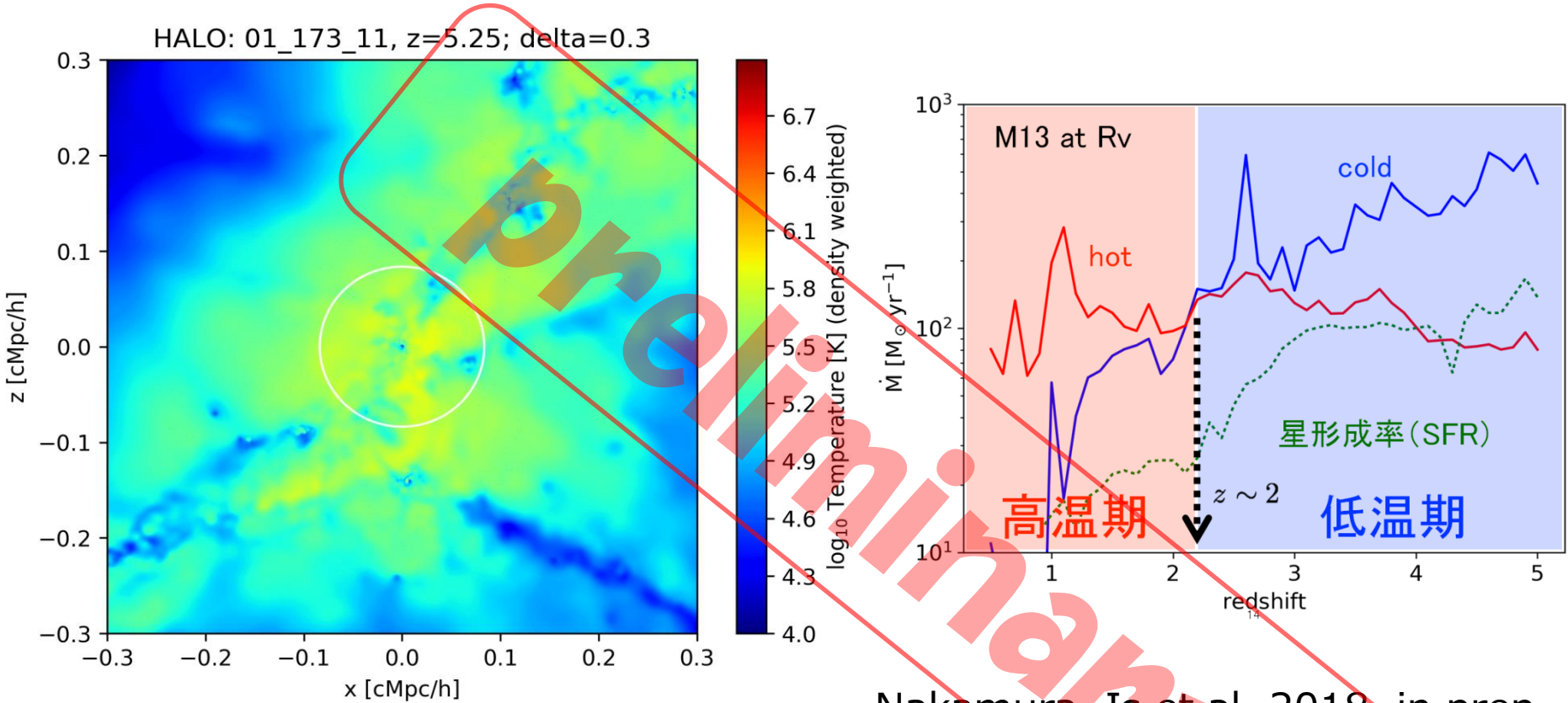
- ✓ Stellar mass function や cosmic star formation history と  
いった基本的な物理量はどのプロジェクトでも再現している。
  - ⇒ 統計量だけの議論では、セミアナに負ける
- ✓ 統計量だけでなく、銀河の形態・内部構造の議論も可能になってきた。
  - ⇒ これは simulation の強み
- ✓ SN Feedback 一つとっても、コード内で取り扱いはそれぞれで違う。
  - ⇒ 結局どれがいいのかいまだにわからない？
- ✓ と上では言いつつ、流体ソルバーの違いも見えてきている
  - ⇒ 今後はより良いソルバーを使うほうがいいのかも
- ✓ 日本で同じようなことをやろうと思うと少し厳しい？
- ✓ 金属汚染の進化はまだ完全にわかっていない
- ✓ 近い将来 star cluster with a IMF 近似が使えなくなってくる
- ✓ IMF という最も大きい不定性は依然として残ったまま

# 今後

- ✓ Dust 進化を取り入れたモデルの構築
- ✓ ISM/IGM/CGM といったガスの物理状態の詳細な研究
- ✓ Star by star simulation
- ✓ 銀河動物園へ向けた研究（輻射特性等）

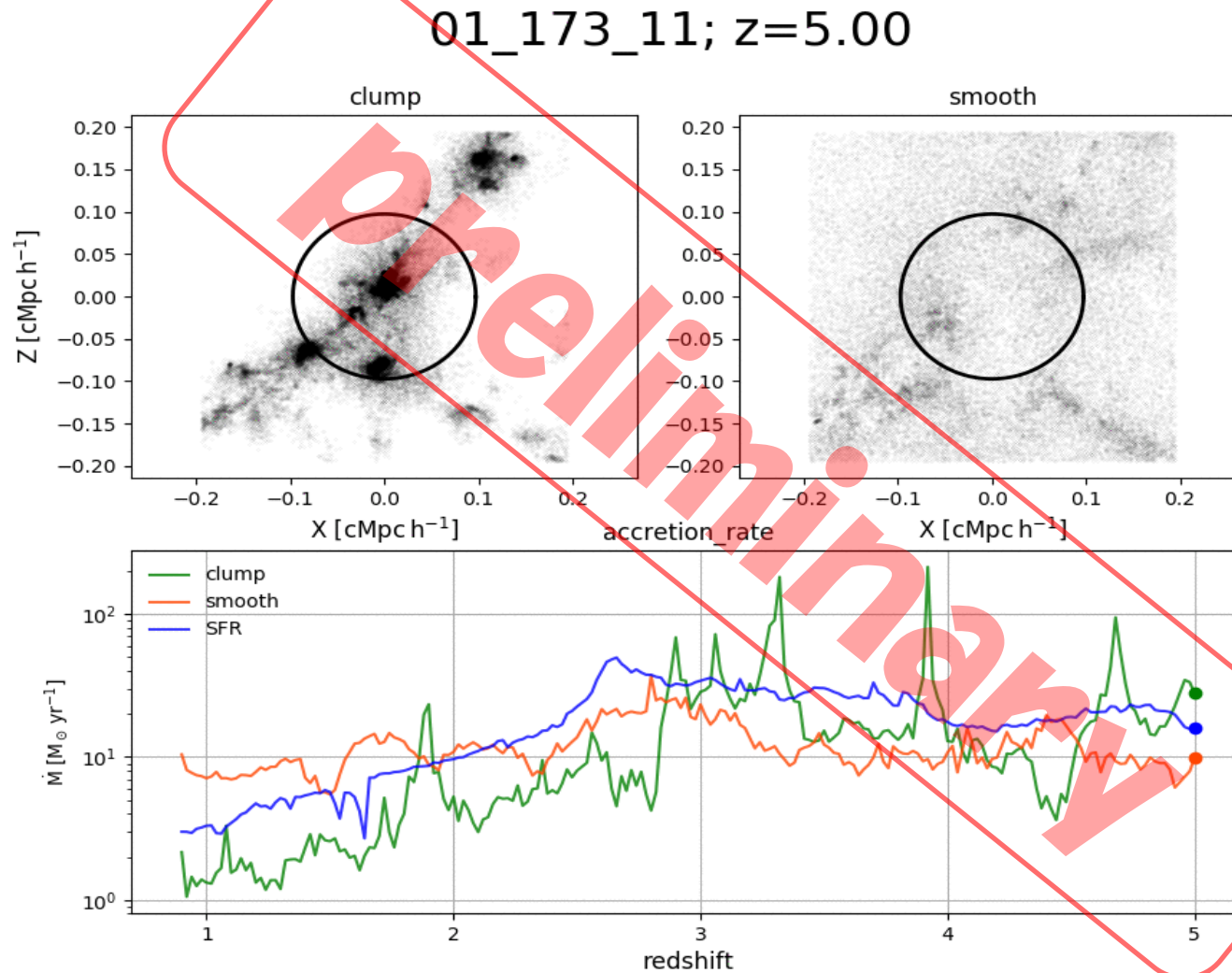
などなど

# Gas $\mathcal{D}$ inflow (cold/hot flow)/outflow



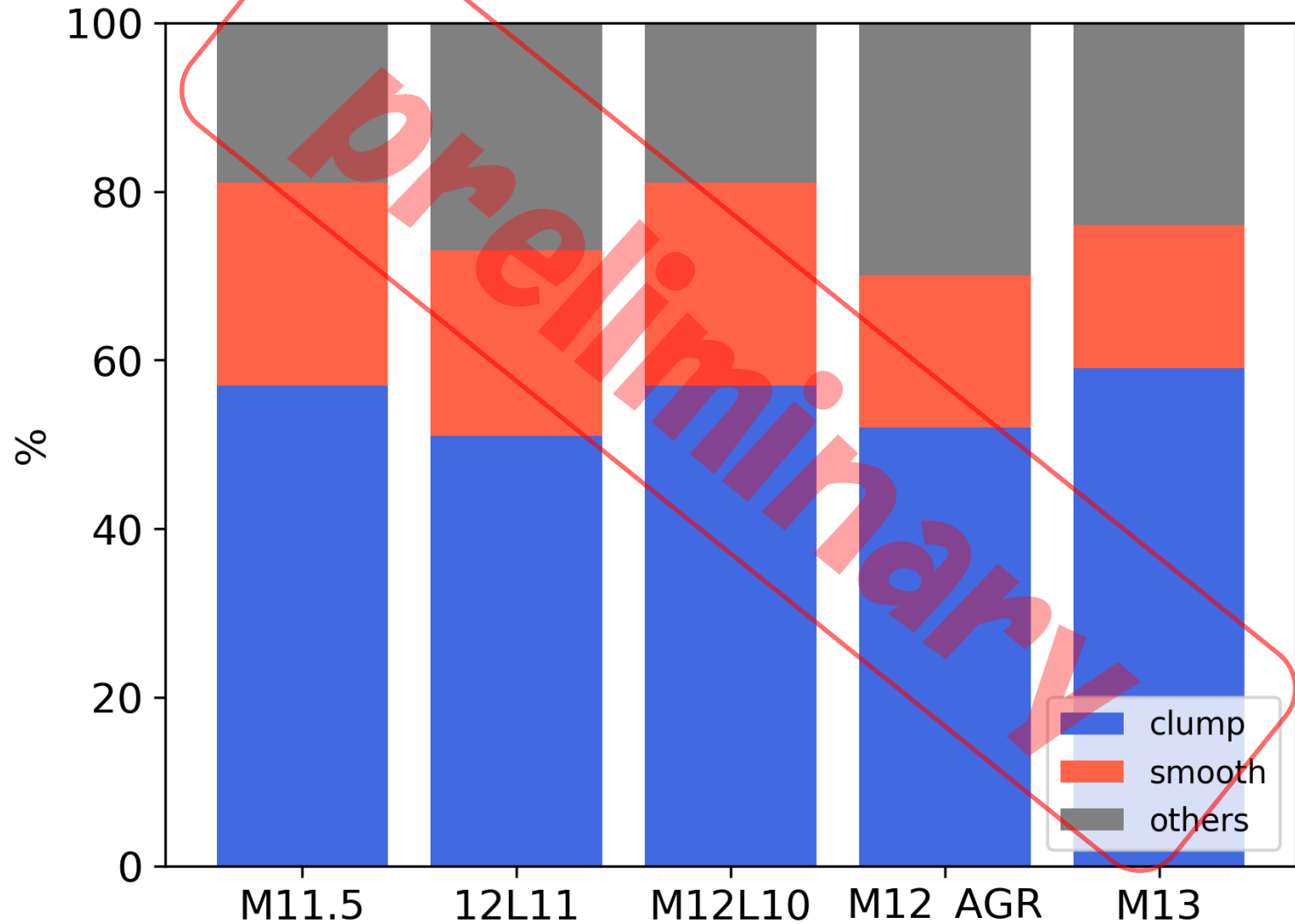
Nakamura, Is et al, 2018, in prep

# Gas $\mathcal{D}$ inflow (cold/hot flow)/outflow



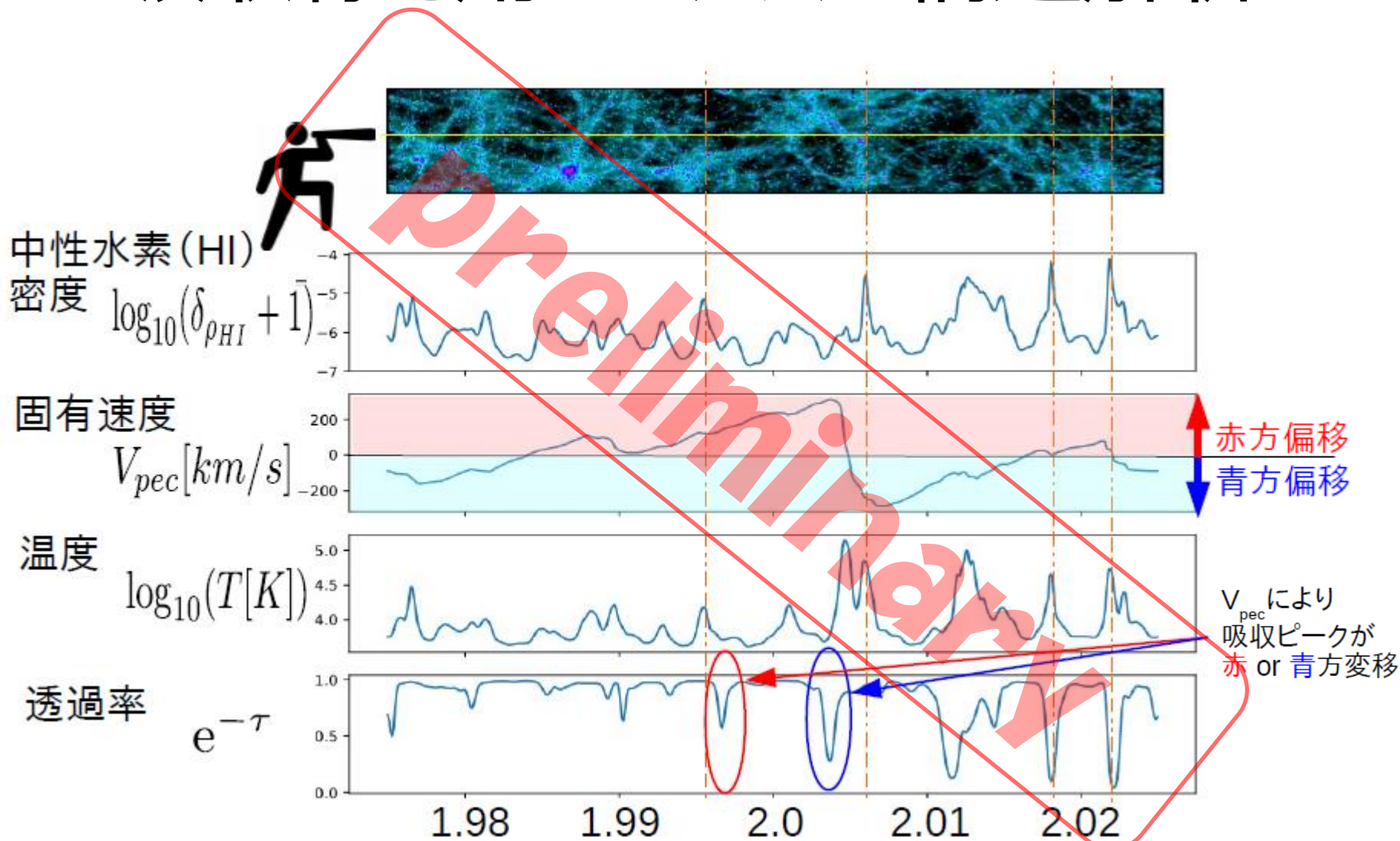
# Gas の inflow (cold/hot flow)/outflow

$z=1$ におけるビリアル半径内の星質量の内訳

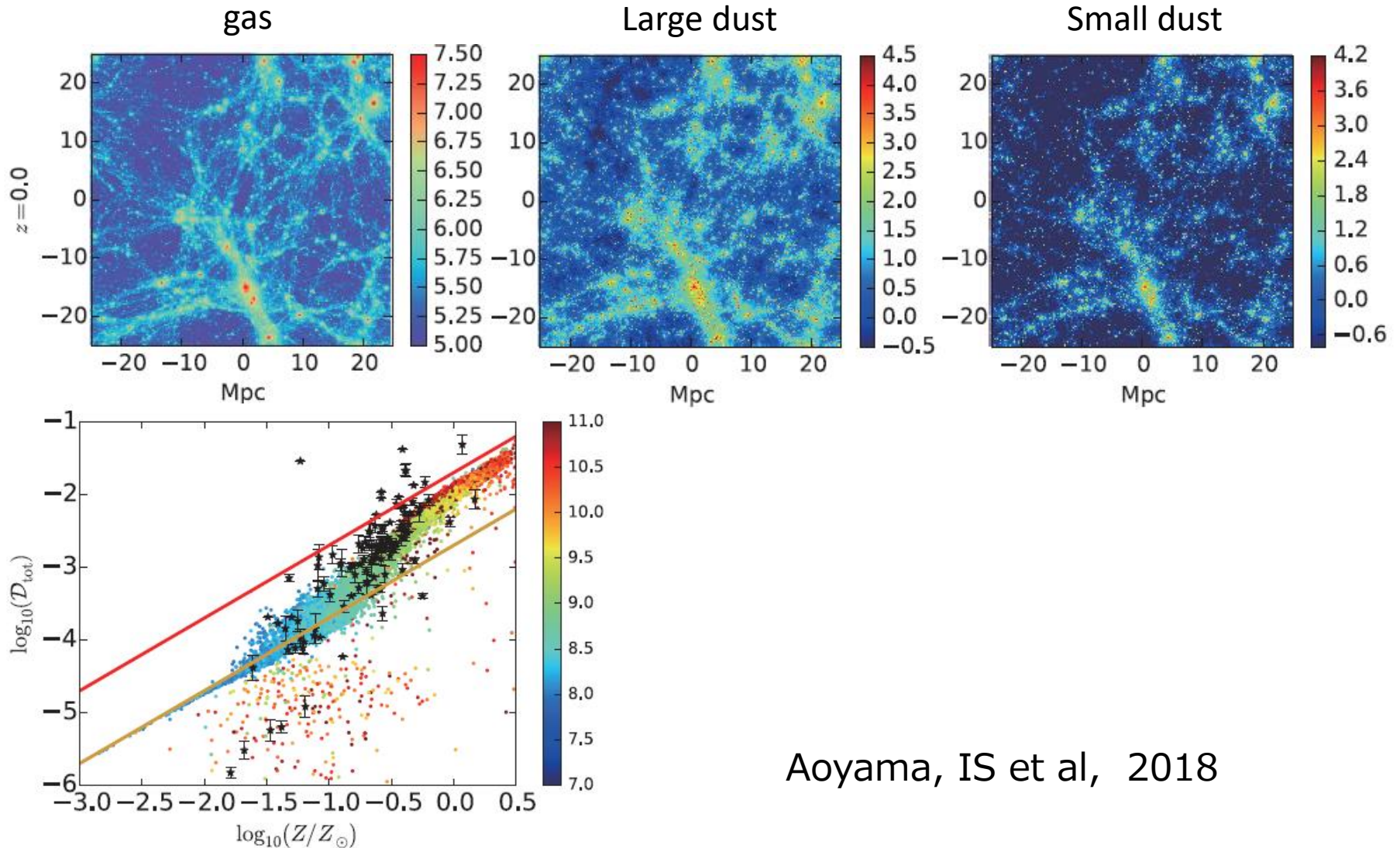




# 吸収線を用いたガスの構造解析



# Cosmological simulation with dust formation



Aoyama, IS et al, 2018