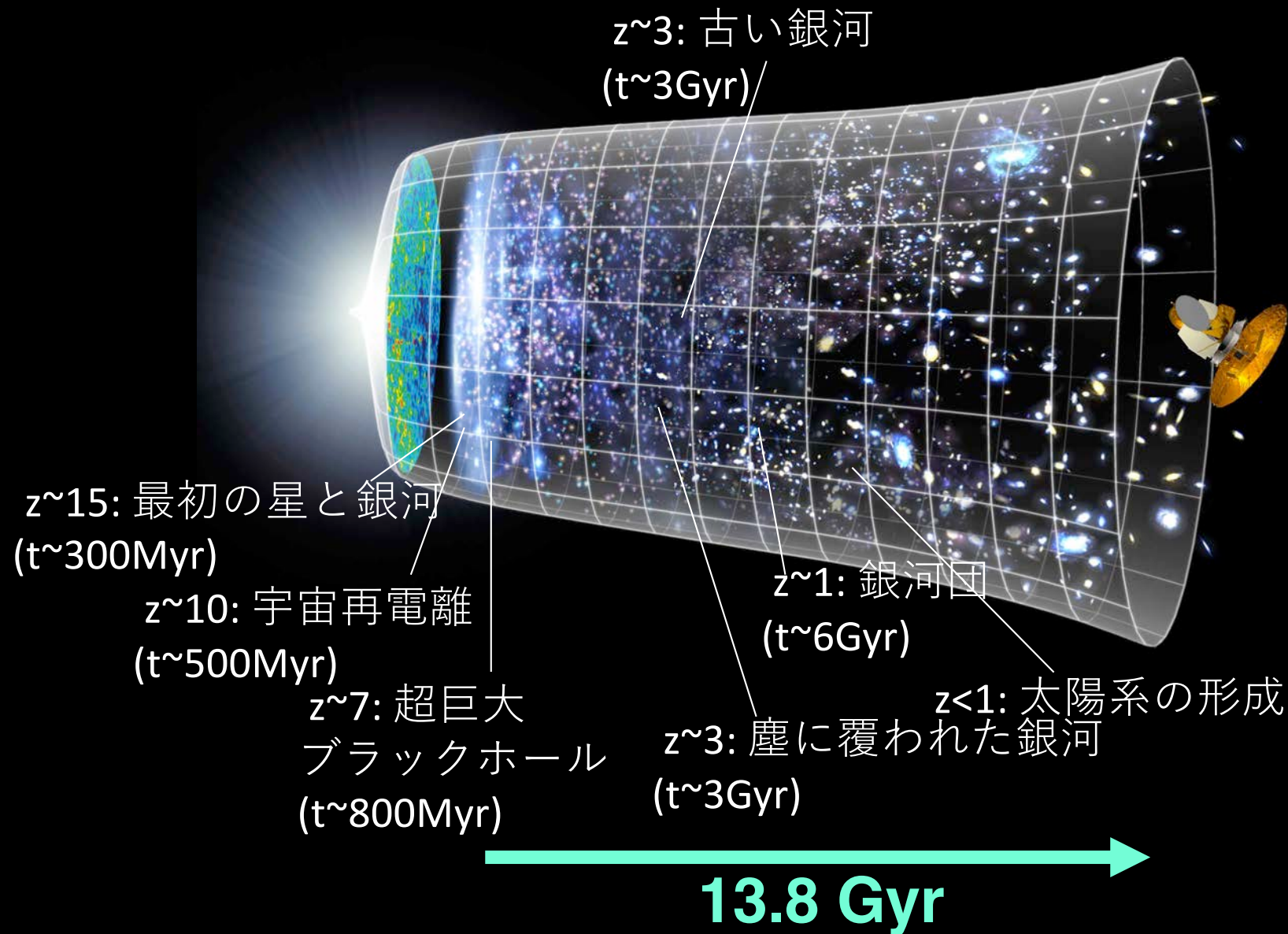


原始銀河団環境における 大質量銀河と 超巨大ブラックホール 形成の研究

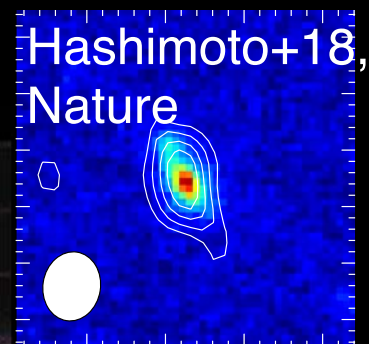
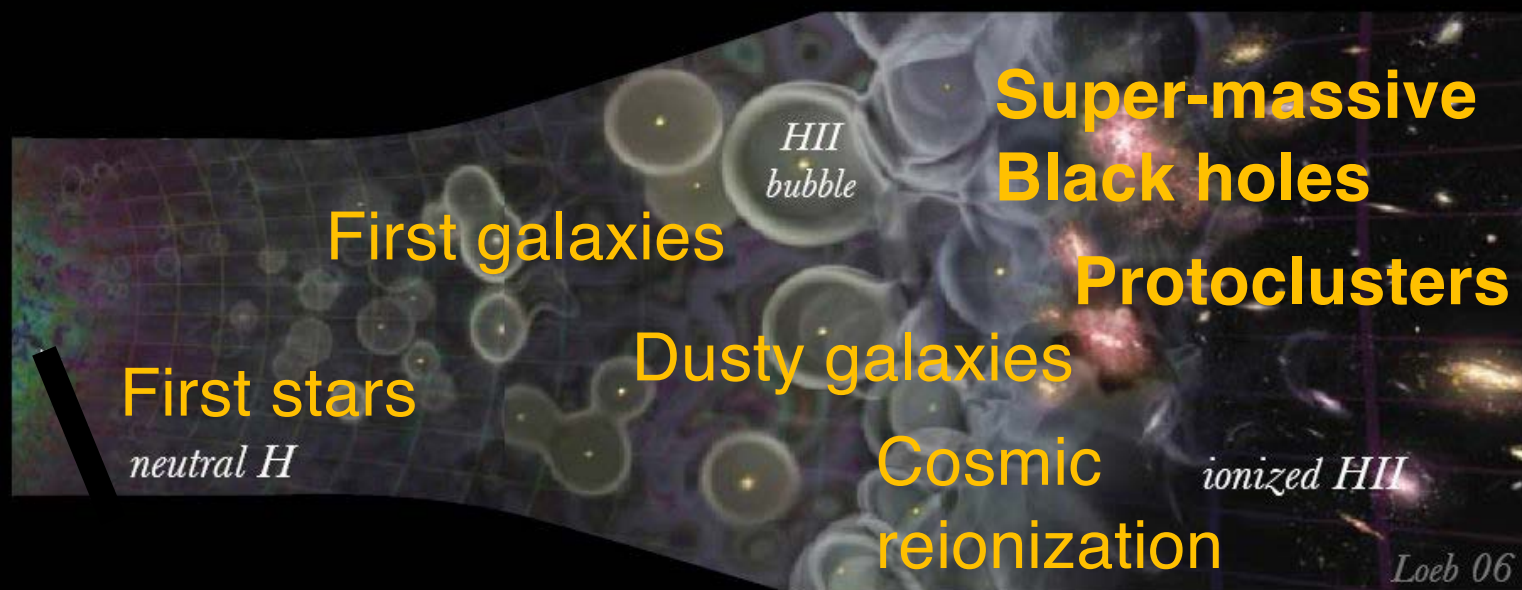
矢島秀伸

筑波大学 計算科学研究センター

宇宙の歴史 (138億年)



初期宇宙での銀河形成



How high- z galaxies form and evolve?

What star formation history?

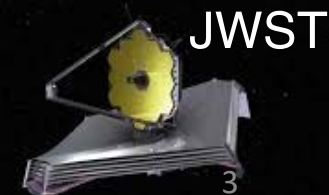
How radiation properties change with the galaxy evolution?

How massive BHs form?

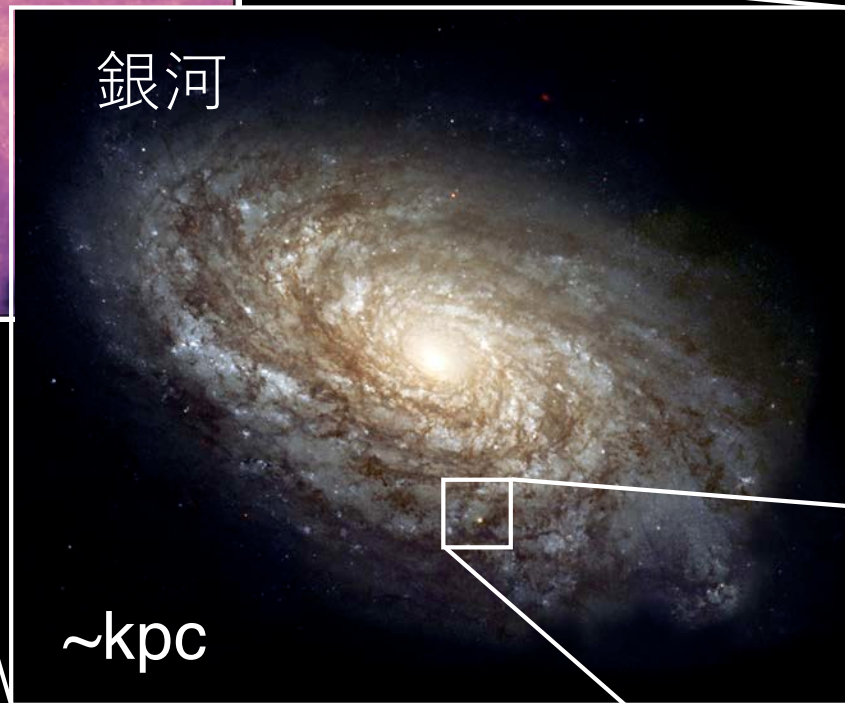
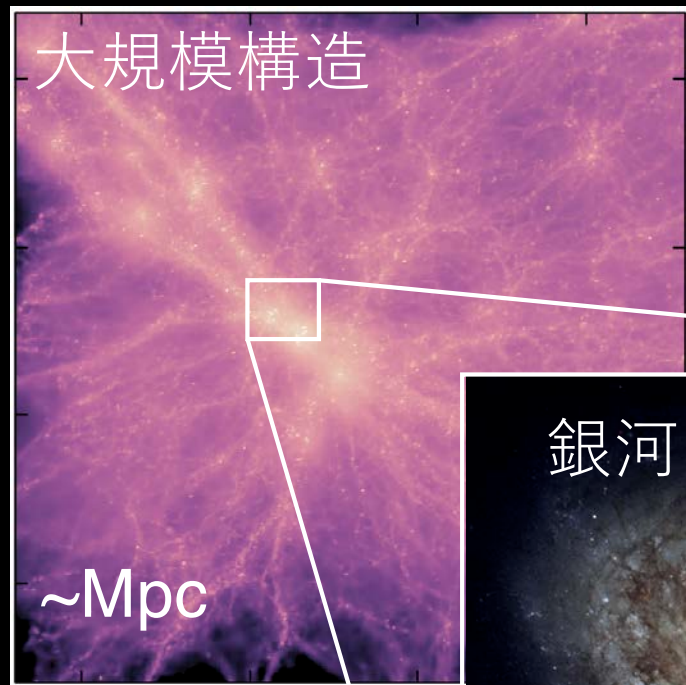
How reionization proceeds?



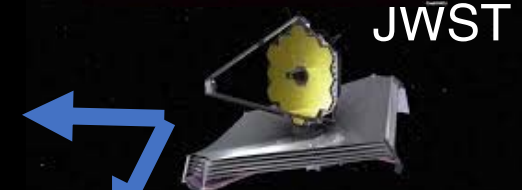
← ~2020s-2030s



宇宙階層構造



Gas accretion, feedback, merger?



輻射流体力学
ダークマター重力
多体力学
化学反応

激しい形成期の銀河想像図
(Tumlinson2017レビュー論文)

Recycling gas

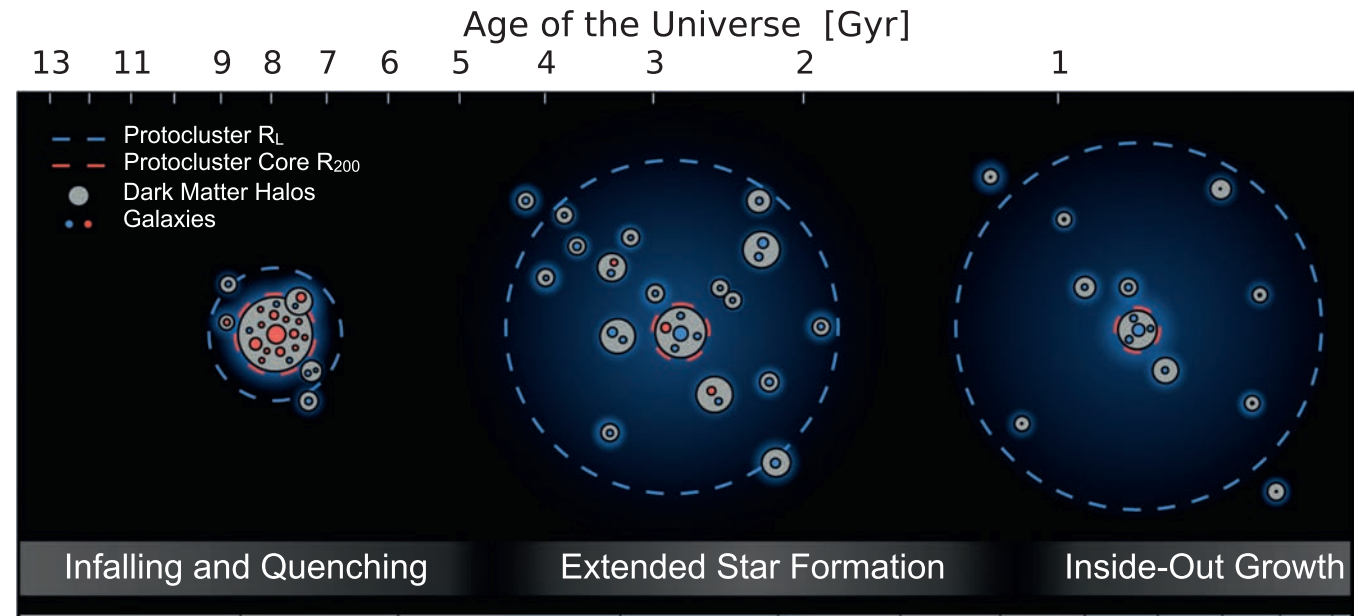
Accreting gas

15 kpc

重力 v. s. フィードバック&角運動量

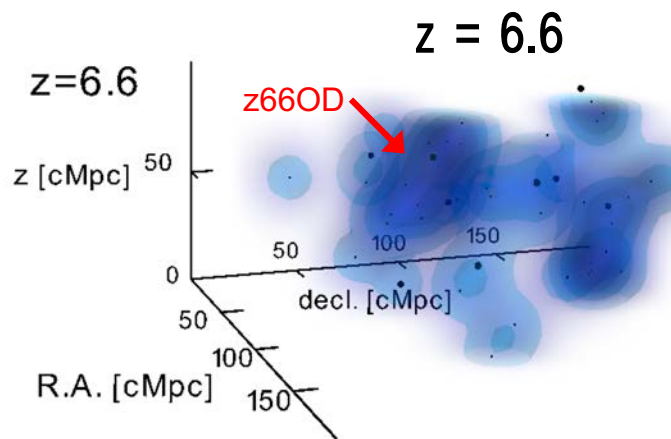
300 kpc

原始銀河団とは？



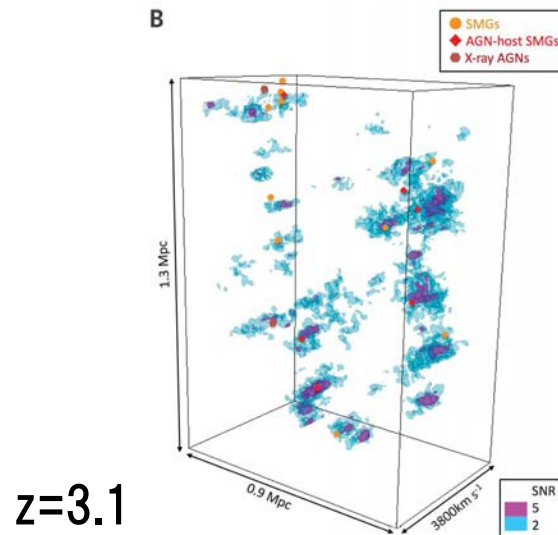
最終的に銀河団になりそうな初期宇宙の銀河密集領域

実際に発見されてきた原始銀河団たち



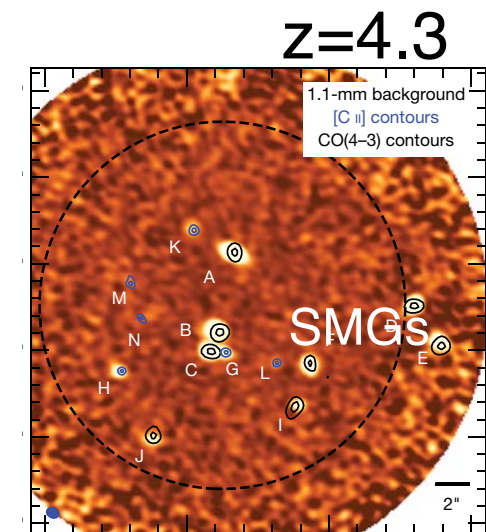
Harikane et al. (2019)

130億年前の
原始銀河団



Umehata et al. (2019, Science)

原始銀河団の
巨大フィラメント

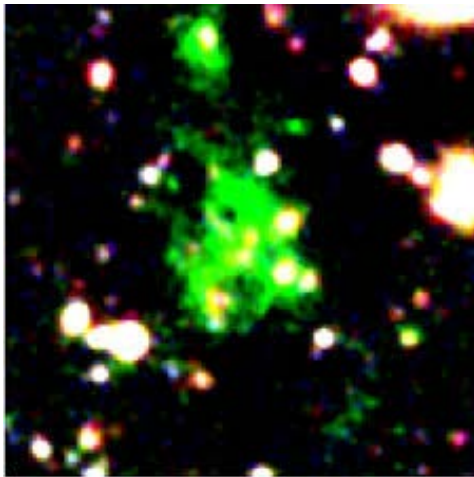


Miller et al. (2018, Nature)

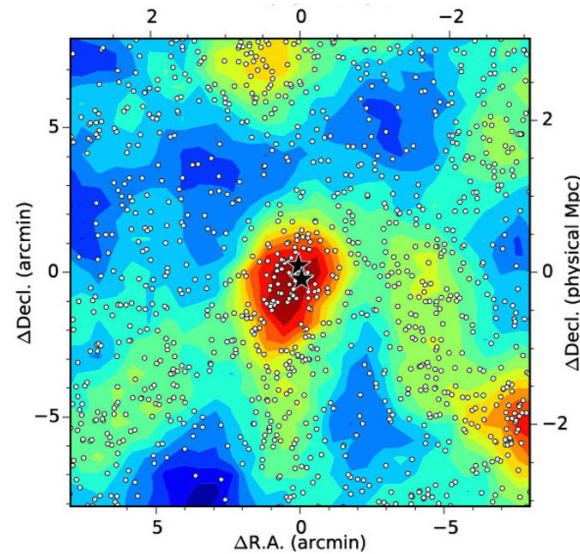
爆発的星形成
で構成される
原始銀河団

原始銀河団で発見される珍しい銀河

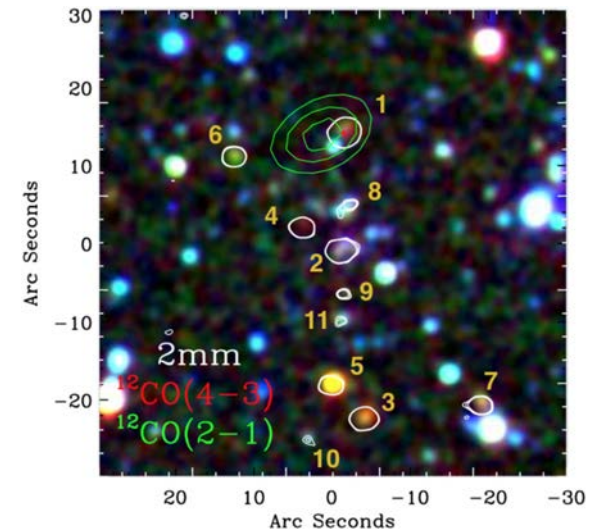
大きく広がった銀河
(ライマンアルファ
ブロッブ)



多重超巨大ブラックホール



塵に覆われた爆発的
星形成銀河群



このような銀河がどのようにして形成されたのか分かっていない

研究課題

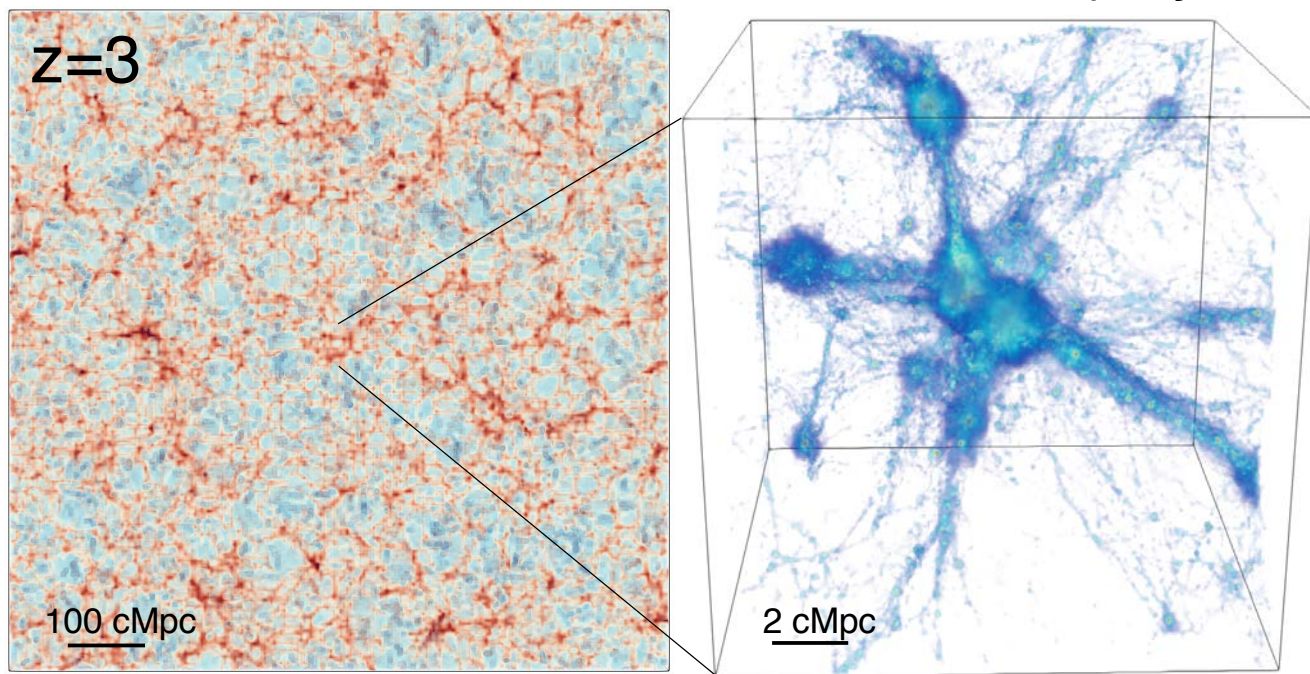
原始銀河団環境（宇宙高密度領域）では銀河や巨大ブラックホールはどのように形成するのか？

原始銀河団の理論や観測研究によって銀河研究のどのような側面が明らかになるのか？

理論的に調べるには
大規模な流体計算、輻射輸送計算などが必要

FOREVER22 simulation project

(**FOR**mation and **EV**olution of galaxies in **E**xtremely overdense **R**egions motivated by SSA22) (Yajima et al. 2020 submitted)

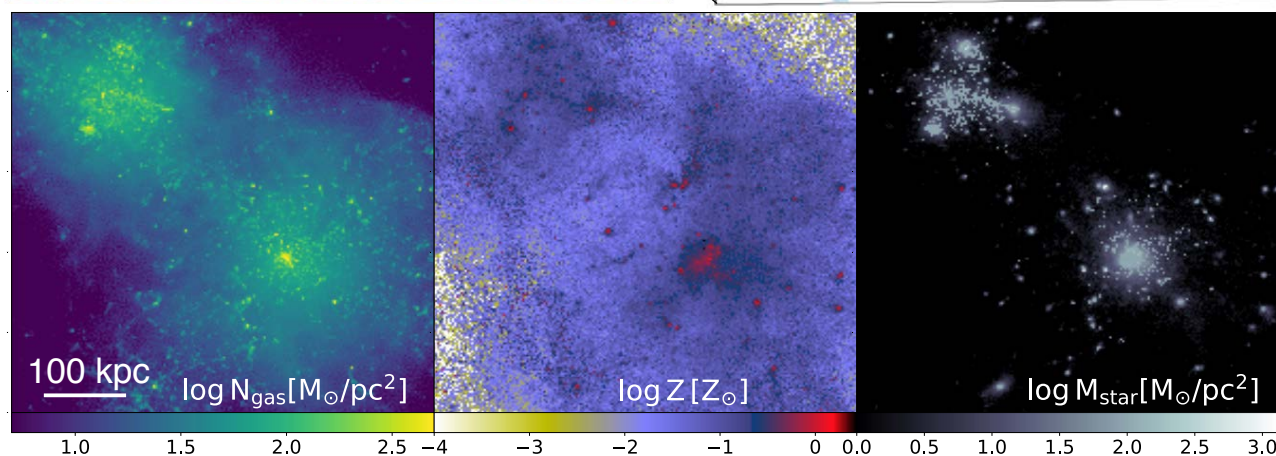


理論

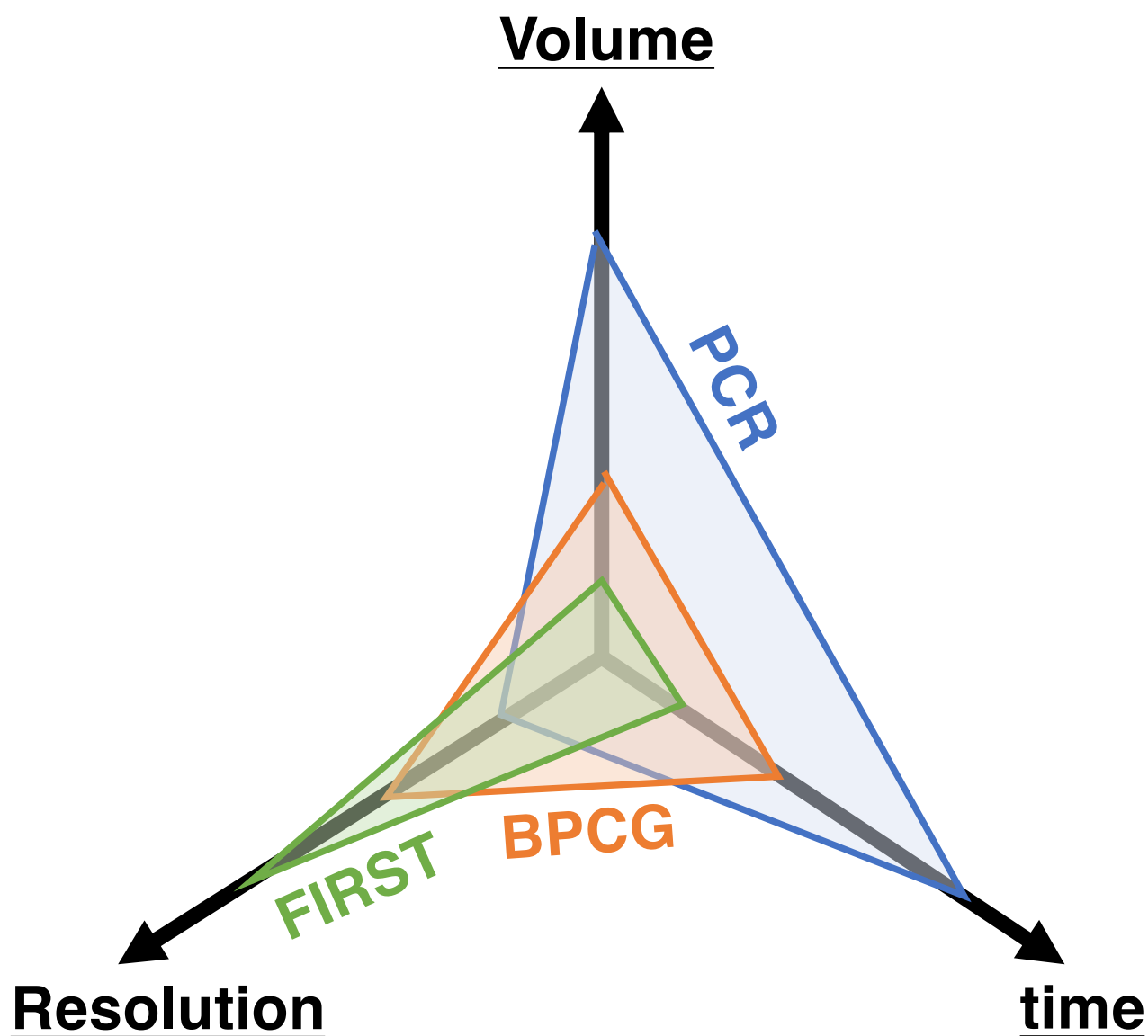
H. Yajima
M. Abe
H. Fukushima
K. Nagamine
S. Arata
A. Inoue
S. Khochfar
C. Dalla Vecchia
Y. Li

観測

T. Kodama
M. Ouchi
N. Kashikawa
T. Hashimoto
Y. Matsuda
H. Umehata
M. Kubo
K. Mawatari



Forever 22 simulation run



PCR run (x10)

$L = 20 \text{ cMpc/h}$

$m_{\text{gas}} = 3 \times 10^6 M_{\text{sun}}$

$M_{\text{halo}} \sim 10^{14} M_{\text{sun}}$

$Z_{\text{end}} = 2$

BPCG run (x10)

$L \sim 6 \text{ cMpc/h}$

$m_{\text{gas}} = 4 \times 10^5 M_{\text{sun}}$

$M_{\text{halo}} \sim 10^{13} M_{\text{sun}}$

$Z_{\text{end}} = 4$

FIRST run (x2)

$L \sim 2 \text{ cMpc/h}$

$m_{\text{gas}} = 5000 M_{\text{sun}}$

$M_{\text{halo}} \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$

$Z_{\text{end}} = 9$

宇宙論的流体計算

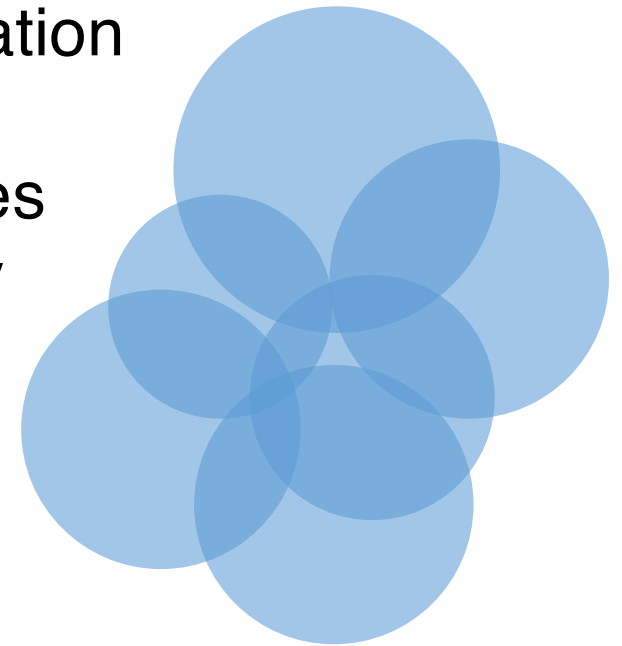
Cosmological SPH simulation with Gadget-3 (Springel 2005)
+ **FiBY models** (Johnson+2013) + **Eagle models** (Schaye+2015)
+ **Our original models** (Yajima+ 2020)

Basic equations

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v &= 0 \\ \frac{dv}{dt} &= -\frac{\nabla P}{\rho} - \nabla \phi \\ \frac{du}{dt} &= -\frac{P}{\rho} \nabla \cdot v - \frac{\Lambda(\rho, T)}{\rho} \\ P &= (\gamma - 1) \rho u\end{aligned}$$



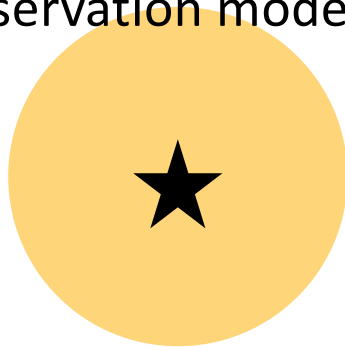
Dark matter
Star formation
Feedback
Black holes
Chemistry



星からのフィードバック

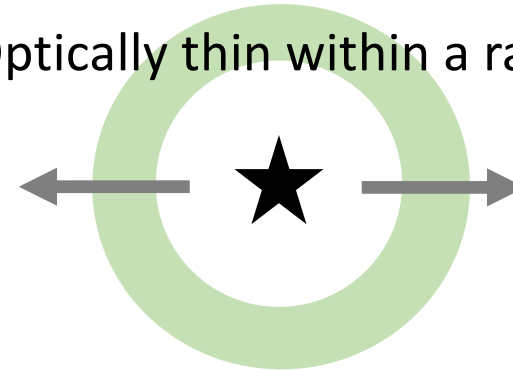
輻射加熱

Photon conservation model (not RT)

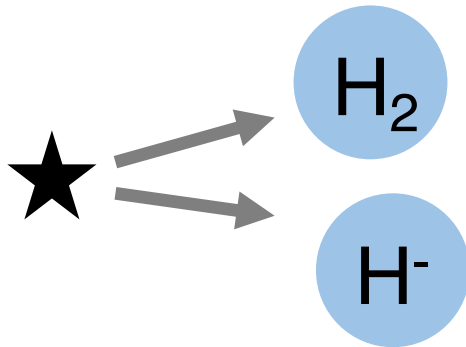


ダストへの輻射圧

Optically thin within a radius of $\tau < 1$



水素分子破壊



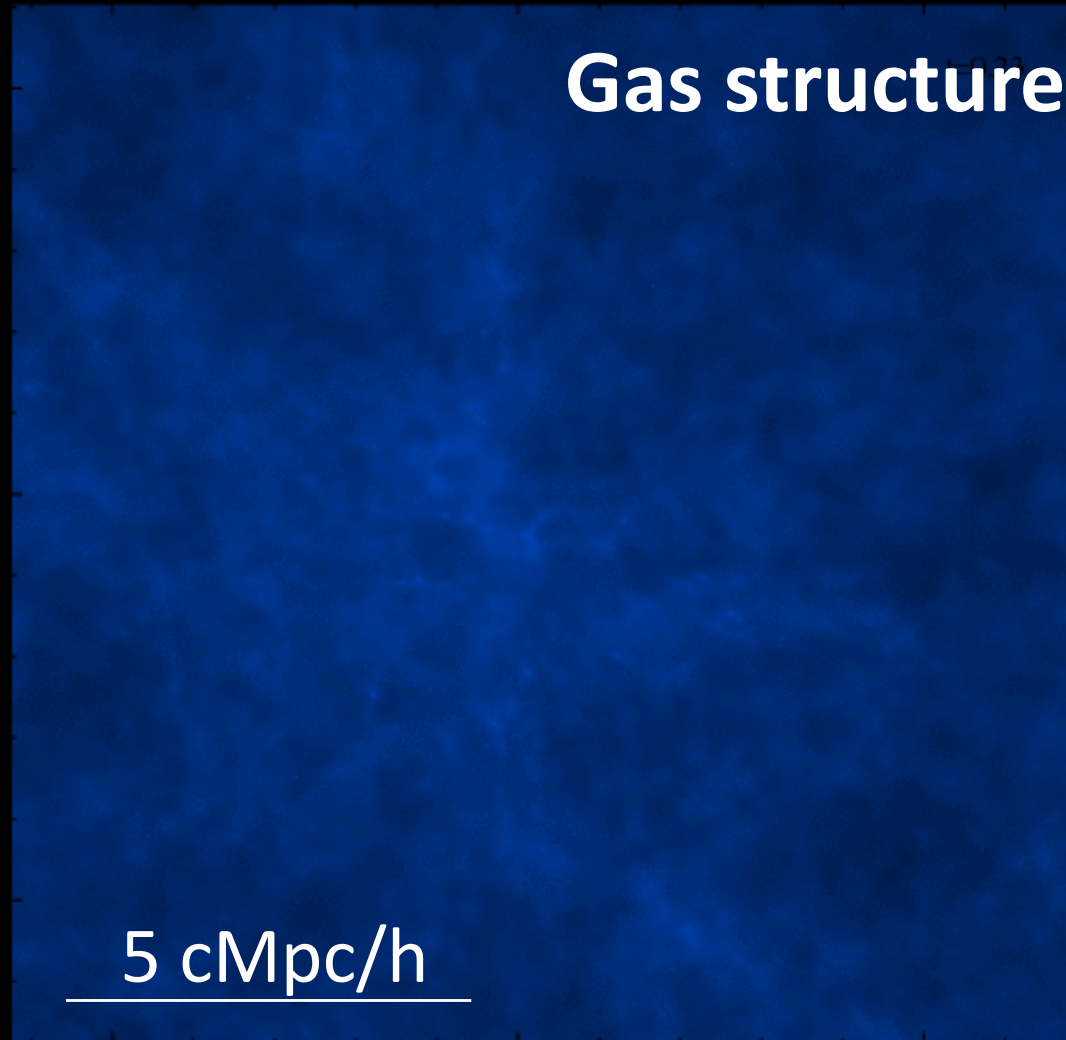
(Johnson et al. 2013)

超新星爆発



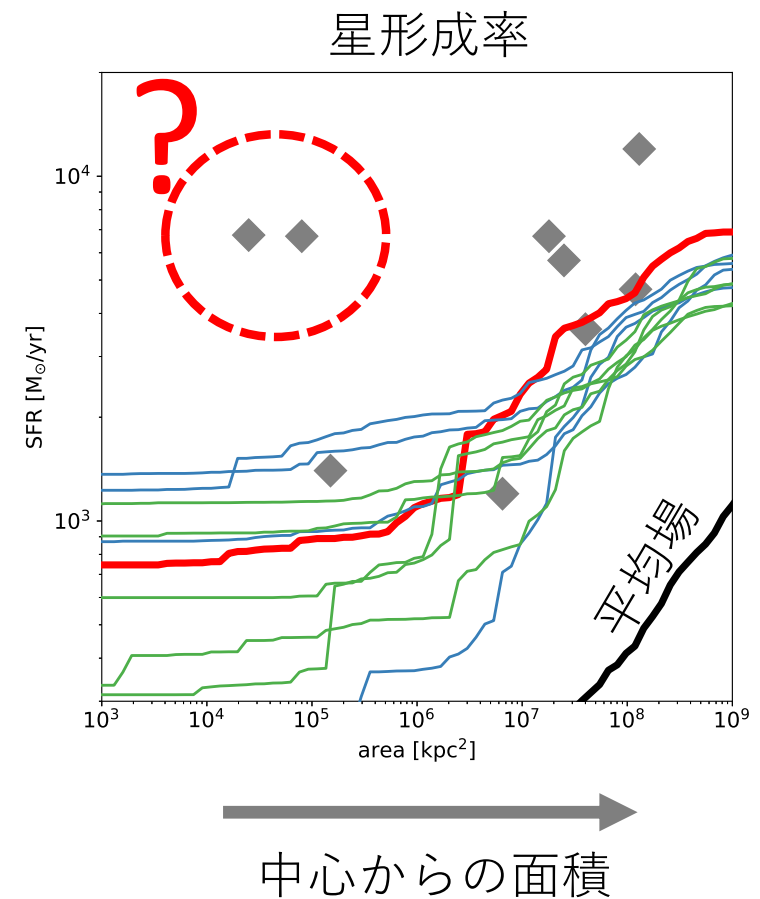
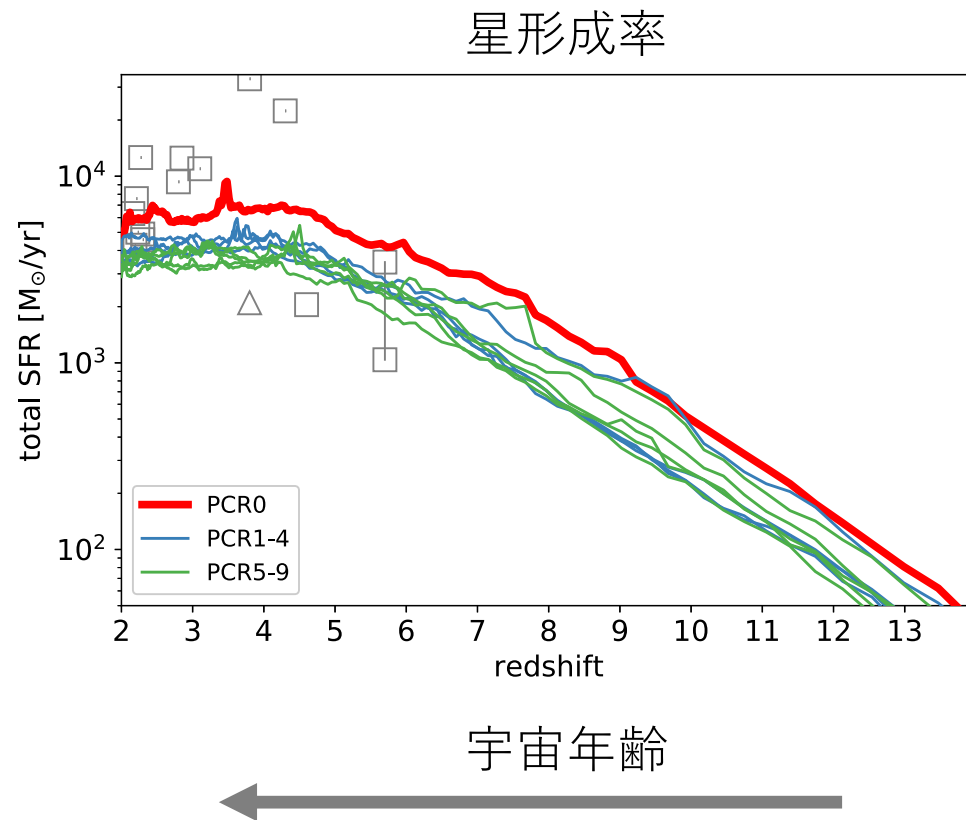
Stochastic thermal feedback
(Dalla Vecchia & Schaye 2012)

Protocluster formation

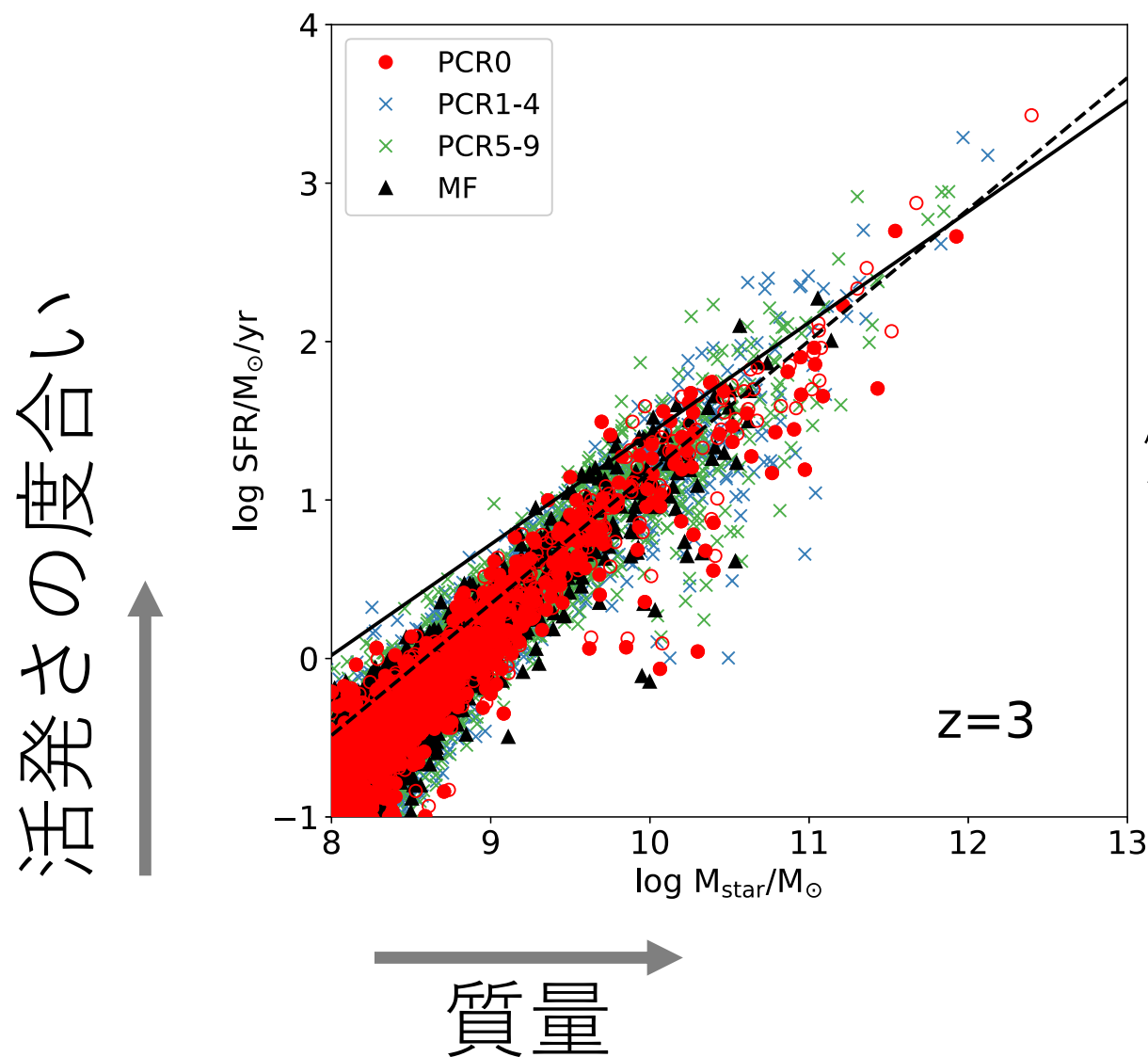


星形成史

実線：シミュレーション
シンボル：観測



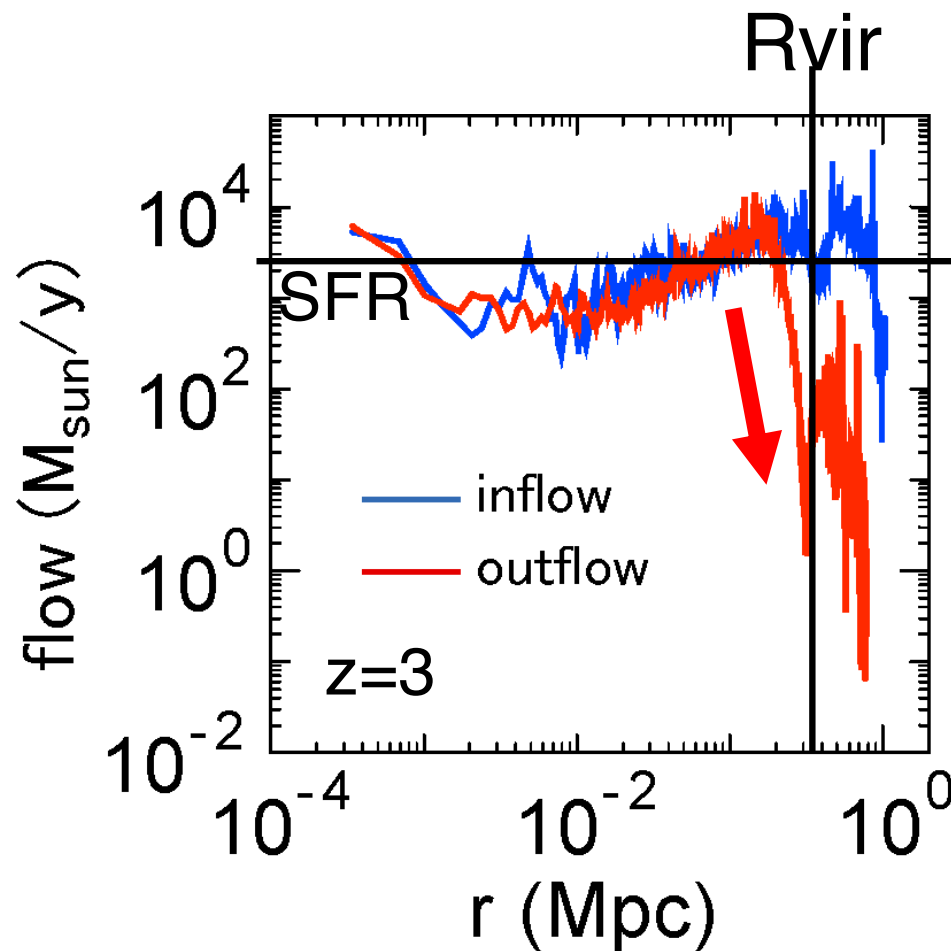
星形成率



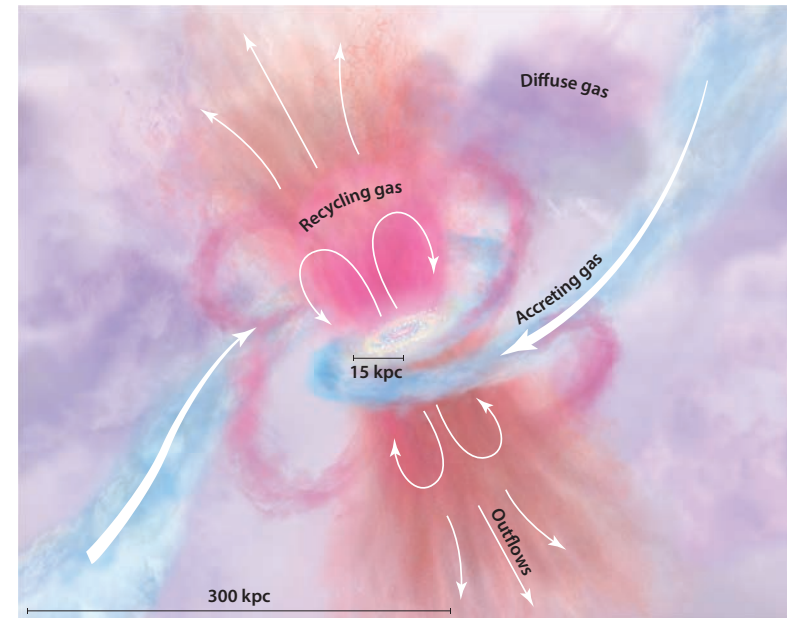
原始銀河団は重い銀河が多いが、質量に対する星形成率は平均的な領域と変わらない？

Inflow/Outflow to protoclusters

(Harada, Yajima, et al. in prep.)



Tumlinson+17

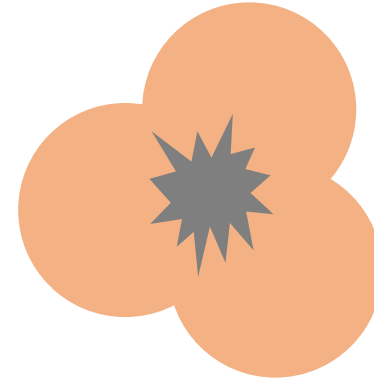


Most of outflow gas return into the galaxy as fountain flow

Toy model

Supernova feedback

$$F_{\text{SN}} \sim \frac{\dot{E}_{\text{SN}} \cdot t_{\text{cool}}}{R_{\text{cool}}}$$



Momentum per 1 SN (Thornton+98)

$$P_{1\text{SN}} = 3 \times 10^5 M_{\odot} \text{ km s}^{-1} \left(\frac{n_{\text{H}}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-2/17} \left(\frac{Z}{Z_{\odot}} \right)^{-0.14}$$



$$F_{\text{SN}} = P_{1\text{SN}} \times 10^{-2} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{SFR}{M_{\odot} \text{ yr}^{-1}} \right)$$

Toy model

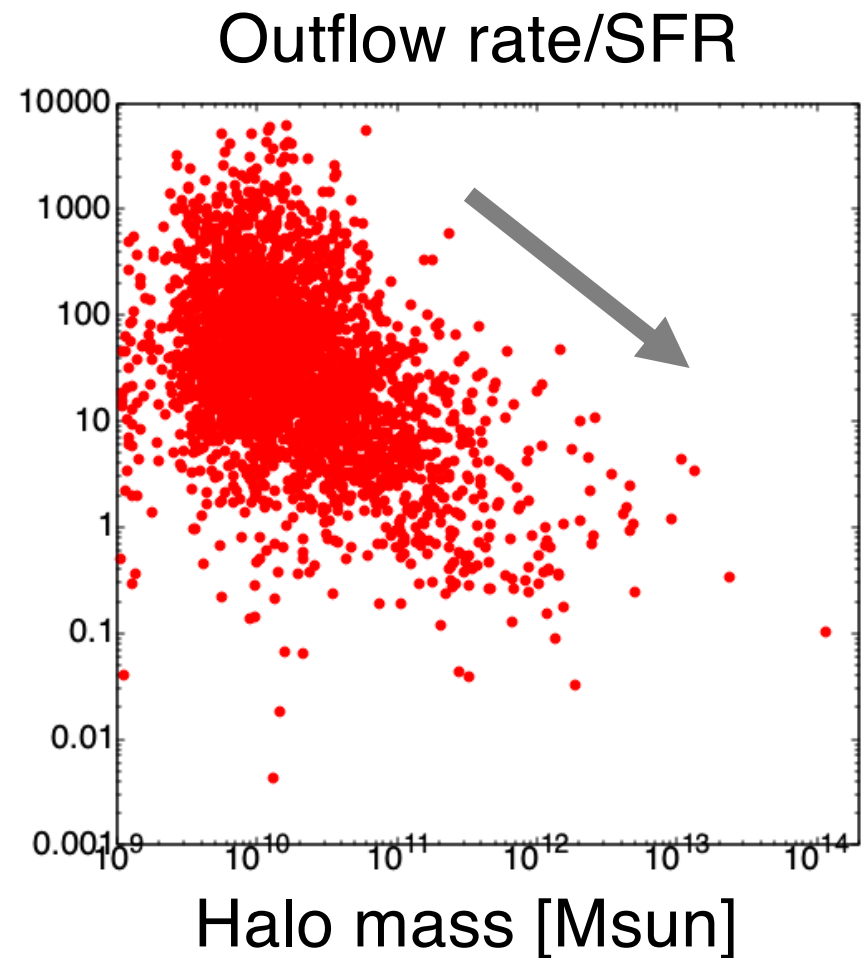
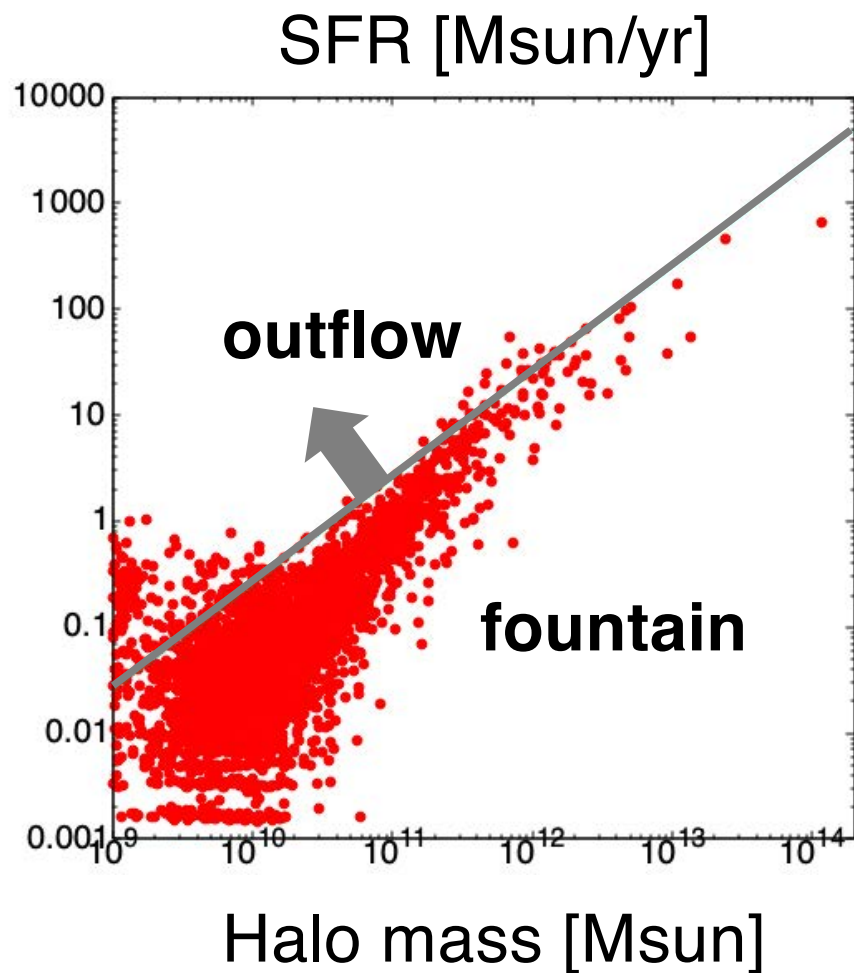
Gravitation force

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM_{\text{halo}}^2 f_{\text{gas}}}{R_{\text{vir}}^2}$$

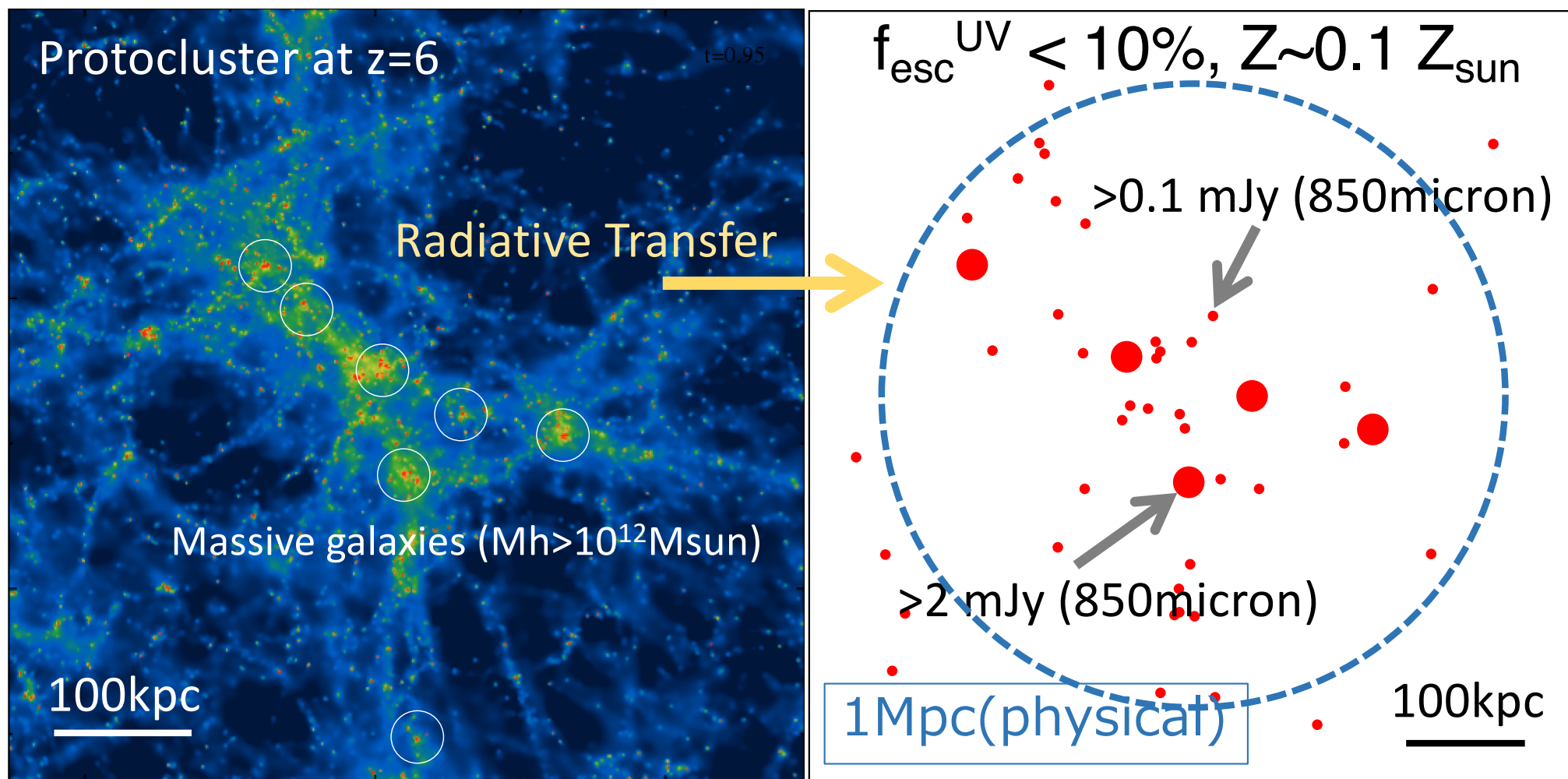
Condition for galactic outflow ($F_{\text{SN}} > F_{\text{grav}}$)

$$SFR > 25 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1} \left(\frac{M_{\text{halo}}}{10^{12} \text{ M}_{\odot}} \right)^{4/3} \left(\frac{1+z}{4} \right)^2 \left(\frac{f_{\text{gas}}}{0.1} \right) \\ \times \left(\frac{n_{\text{H}}}{1 \text{ cm}^{-3}} \right)^{2/17} \left(\frac{Z}{Z_{\odot}} \right)^{0.14}$$

Outflow rate

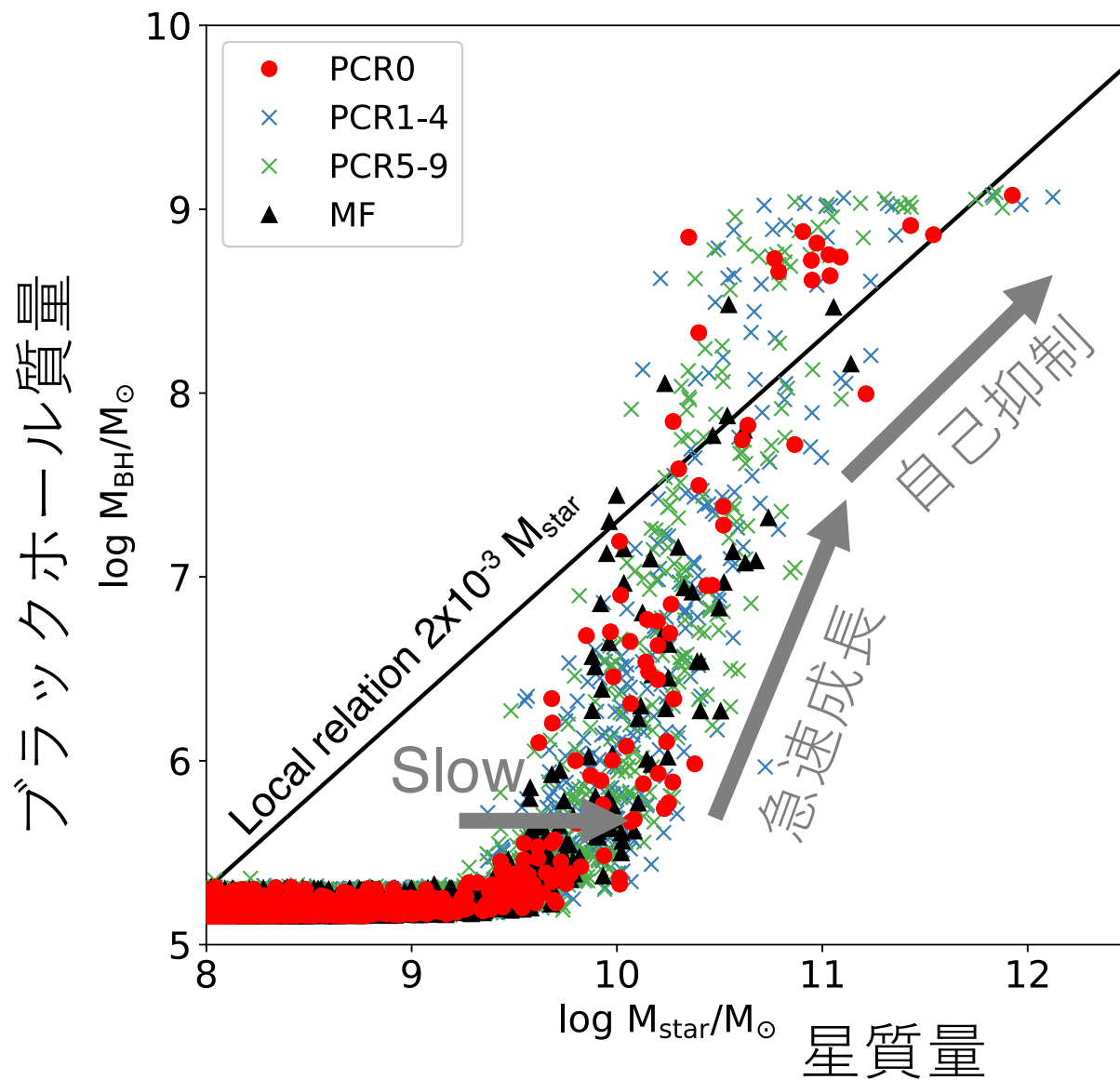


塵に覆われた爆発的星形成銀河群の形成

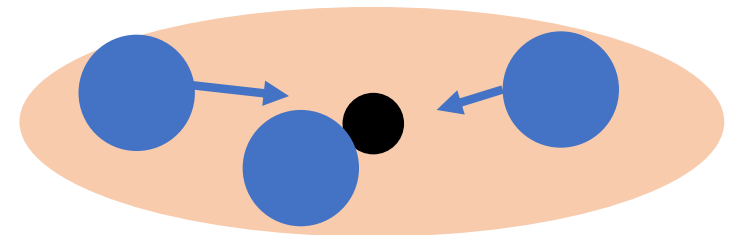
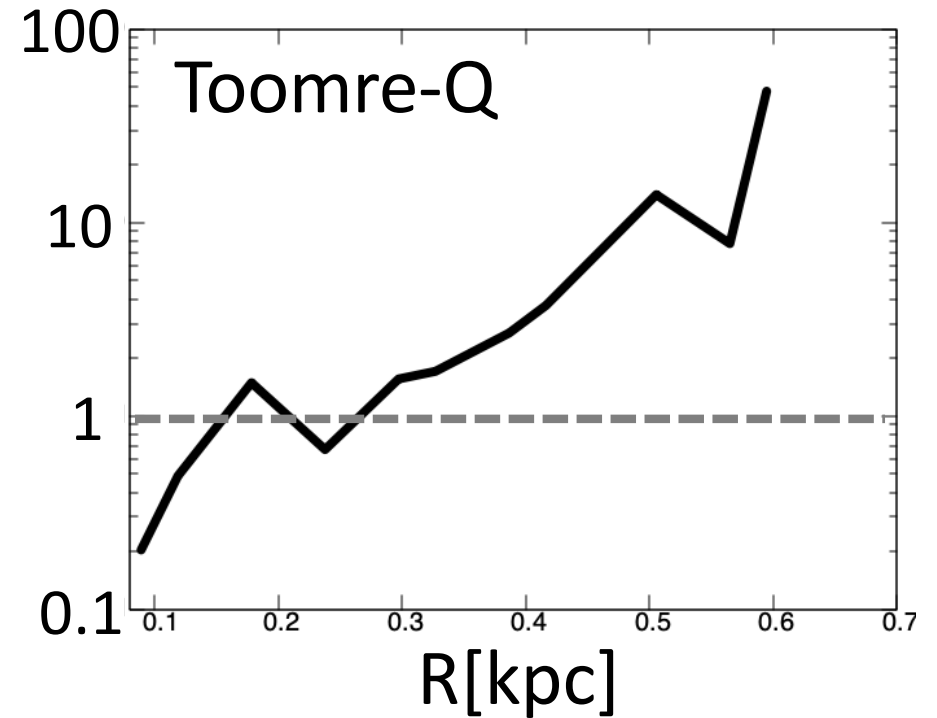
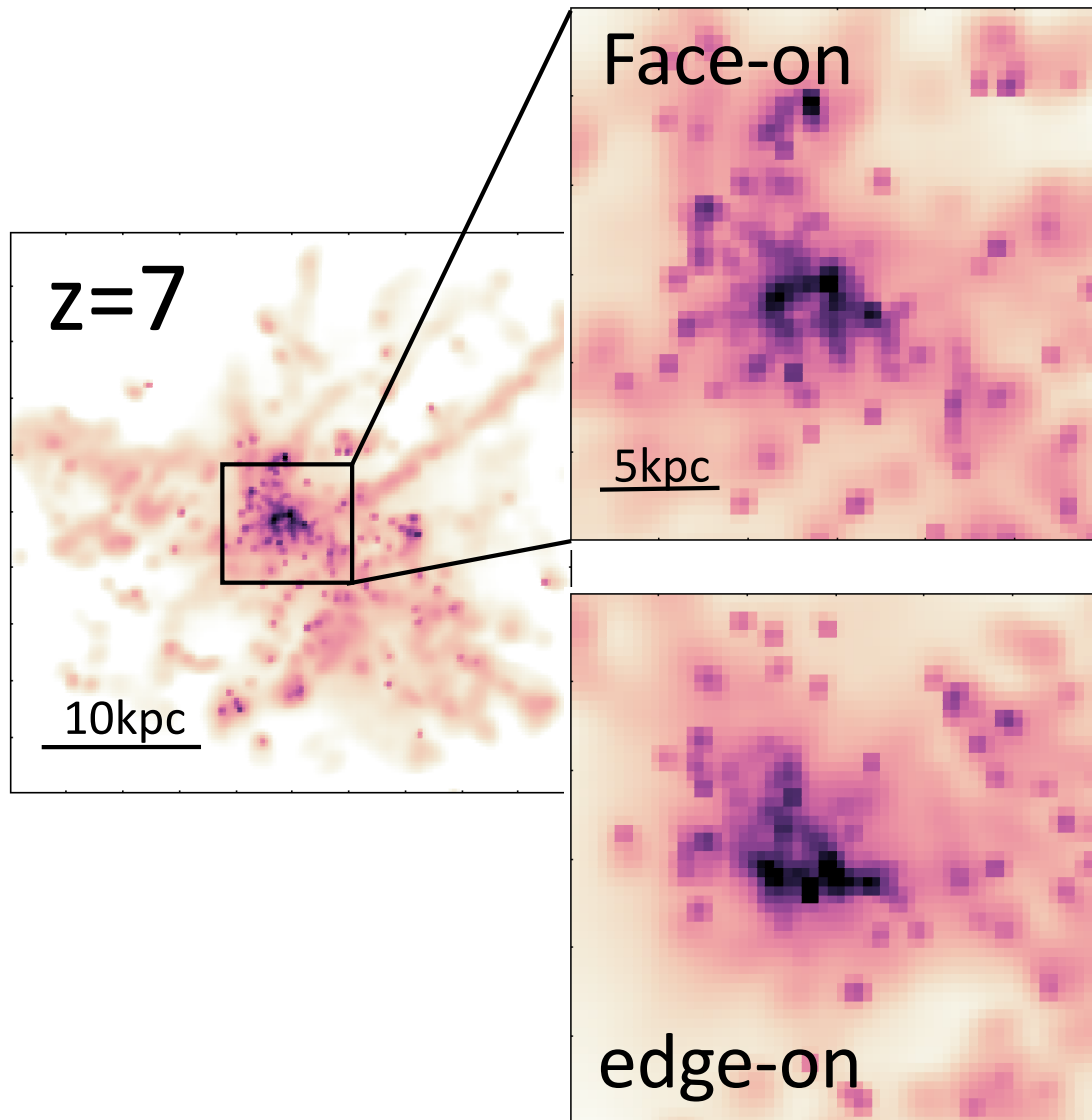


Clustering of SMGs along the filamentary structure!

Black hole mass v.s. stellar mass



Massive disk formation?



宇宙物理の計算技術を医療へ！

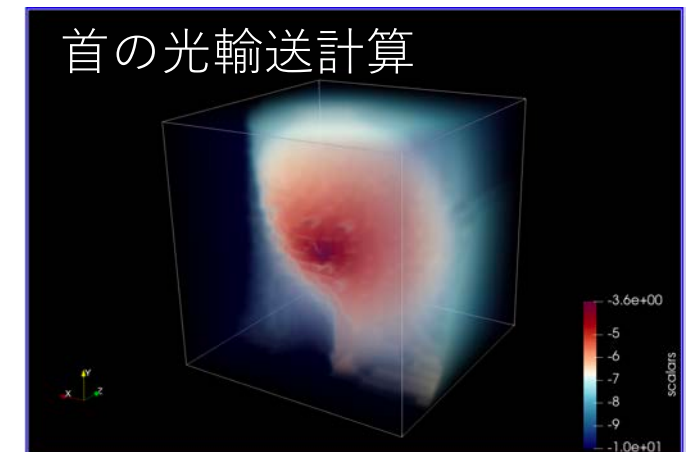
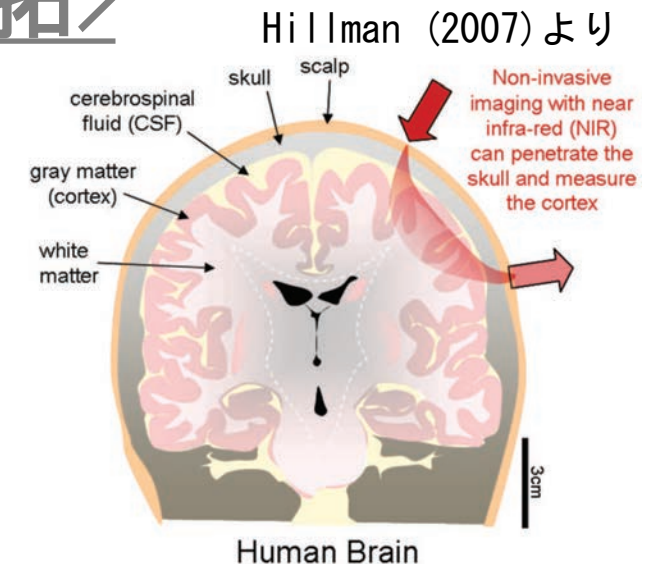
＜赤外線CT技術の開拓＞

生体ひかりイメージング

近赤外線の光を照射し、散乱光から
生体内の情報を取得する診断技術

利点

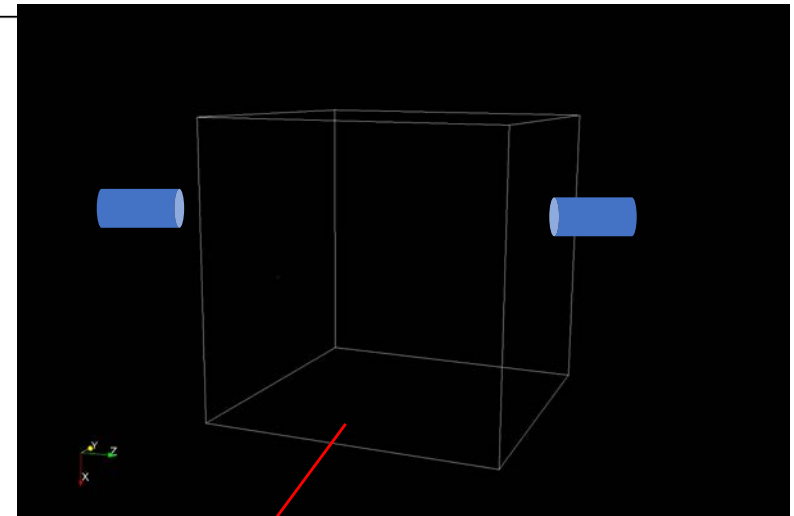
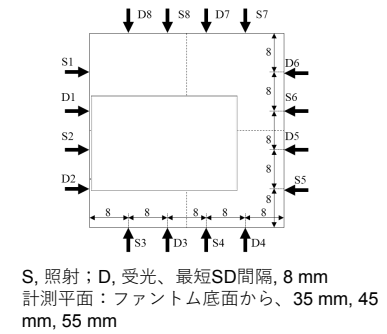
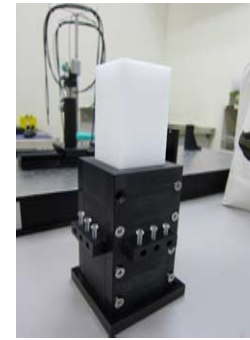
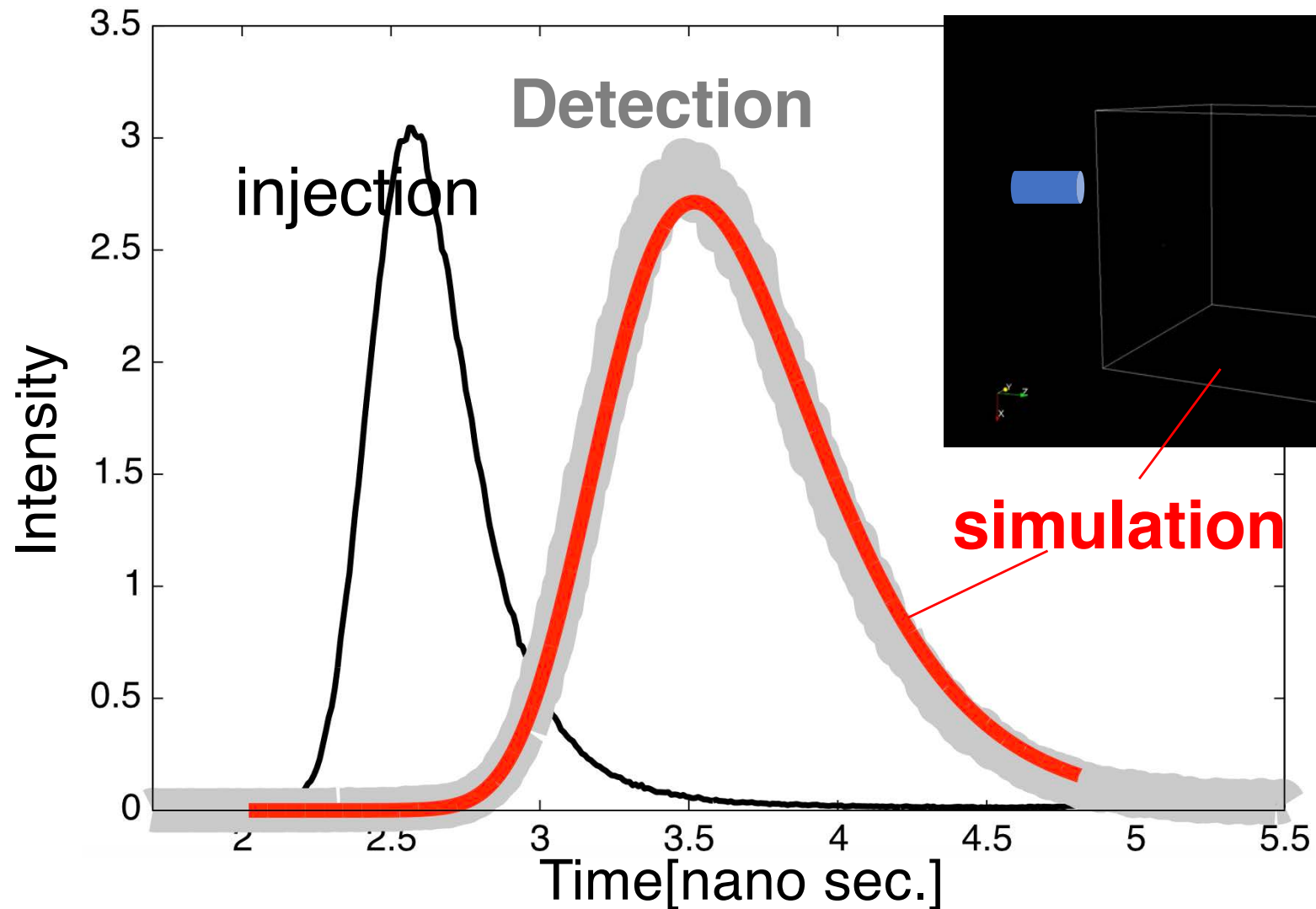
ゼロ被爆、非侵襲、ベッドサイド
低コスト、高時間分解能
新生児・乳児に適用可能



ただし、理論計算、ひかり計測ともに難しく、
ほとんど実用にいたっていない（夢の技術）

Simulation results

(**Yajima**, Abe, Umemura in prep.)



まとめ

- 高精度な原始銀河団シミュレーションを行った
- 原始銀河団では大きな星形成率を持つ大質量銀河が多数形成される
- 原始銀河団銀河は大量のガスと塵に覆われて星の光のほとんどが隠される赤外線で明るい銀河になる
- フィラメント構造からのガス流入により原始銀河団環境では超巨大ブラックホールが形成される