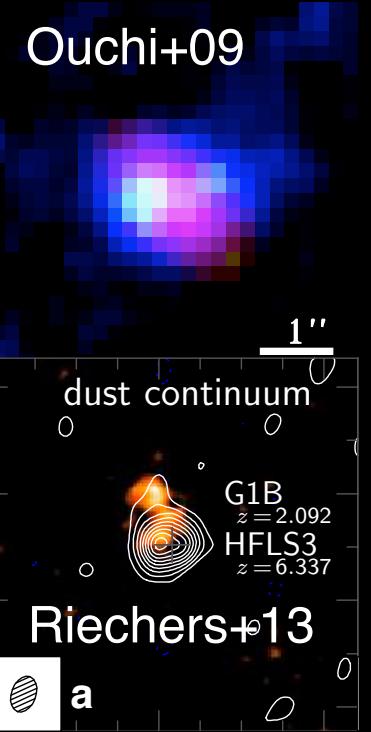
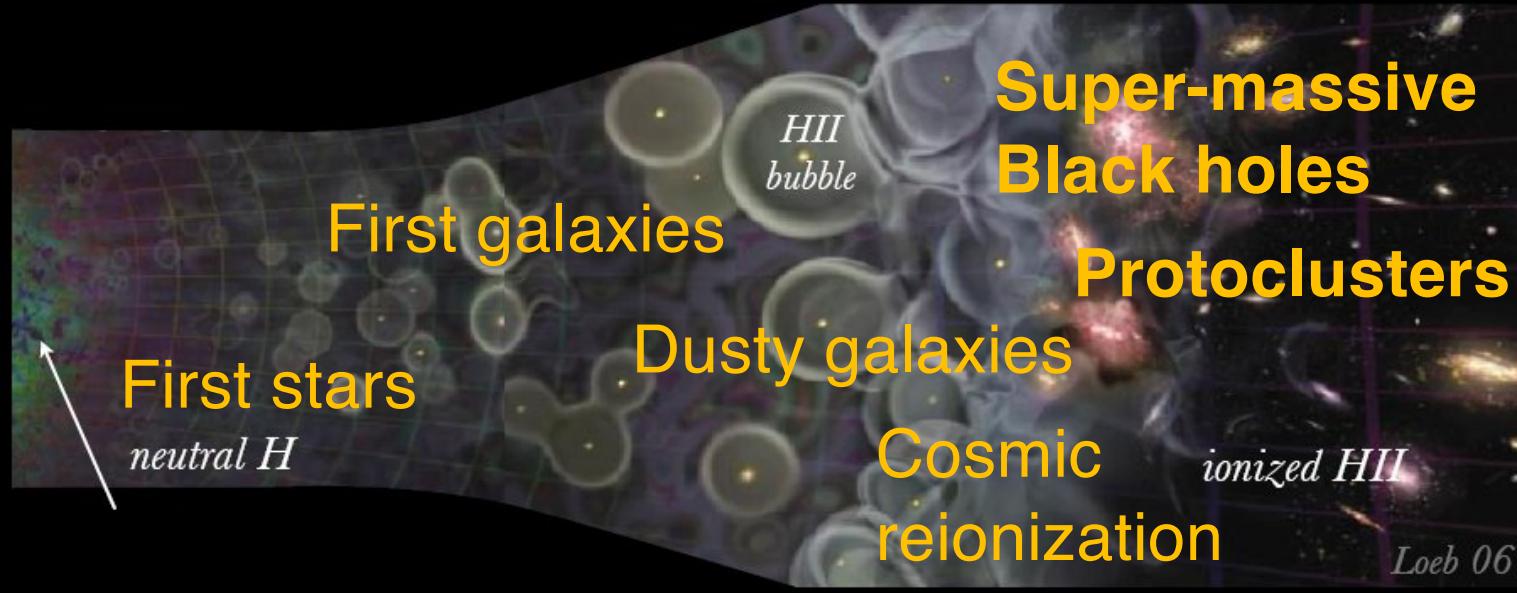


宇宙再電離期の 原始銀河団形成

矢島秀伸（筑波大）

安部牧人、荒田翔平、井上昭雄、長峯健太郎、
松田有一、大内正己、梅畠豪毅、久保真理子、
児玉忠之、Sadegh Khochfar, Claudio Dalla Vecchia, Yuexing Li

First billion years



How first galaxies form and evolve?

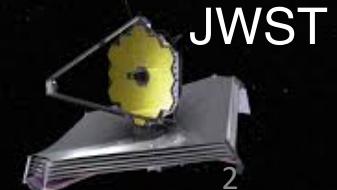
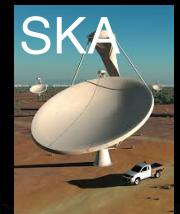
What star formation history?

How radiation properties change with the
galaxy evolution?

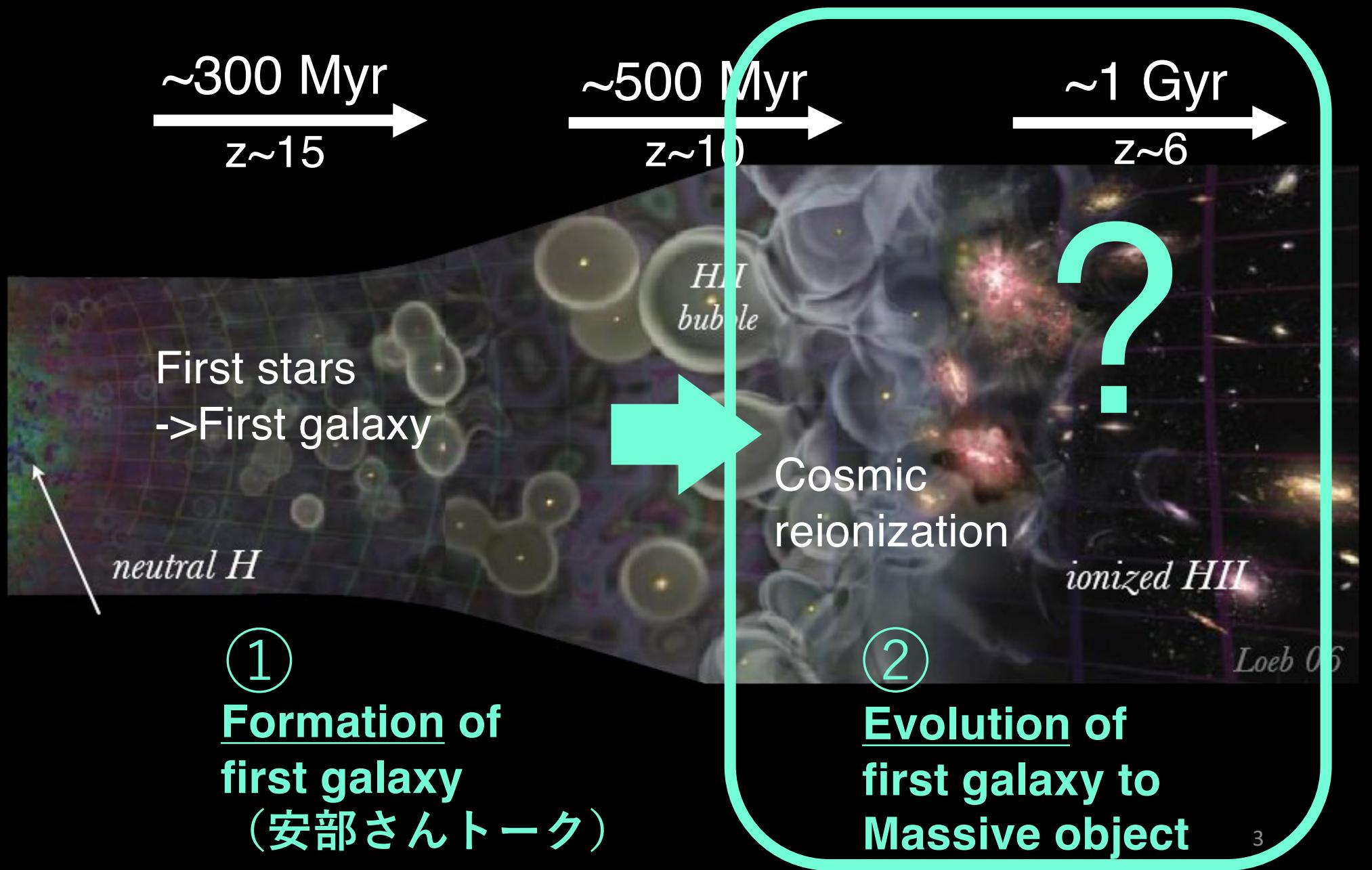
How massive BH form?



~2020s-2030s



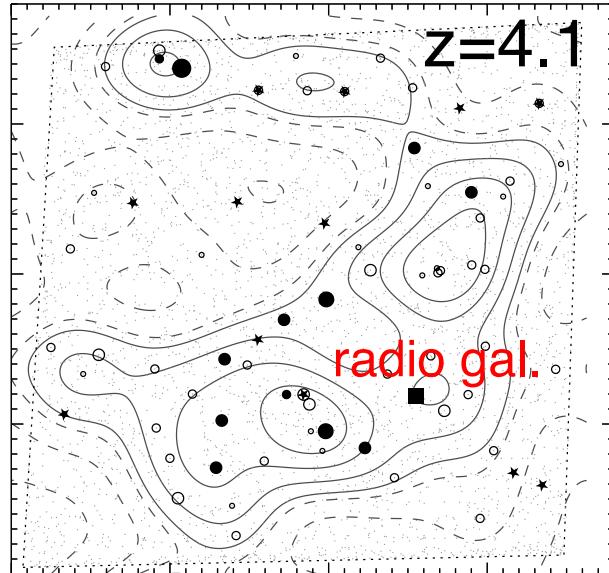
First billion years



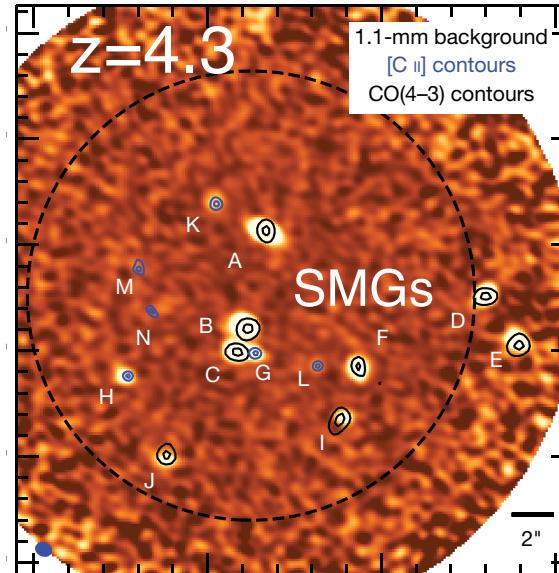
原始銀河団の発見

近年の大規模銀河サーベイによって高赤方偏移の原始銀河団候補が続々と発見されている
原始銀河団そのものの特性も多様性がある事が分かってきた

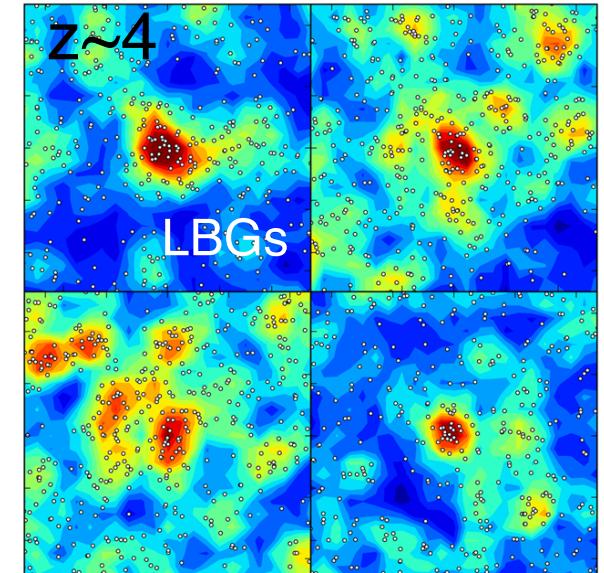
Overzier+08



Miller+18, Nature



Toshikawa+18



これらはどんな銀河団になるのか？本当に銀河団になるか？

Q.

高密度領域で銀河はどのように進化するか？

(環境効果)

原始銀河団のメンバー銀河の観測特性は？

(観測多様性)

超巨大ブラックホールは形成されるか？

(共進化)

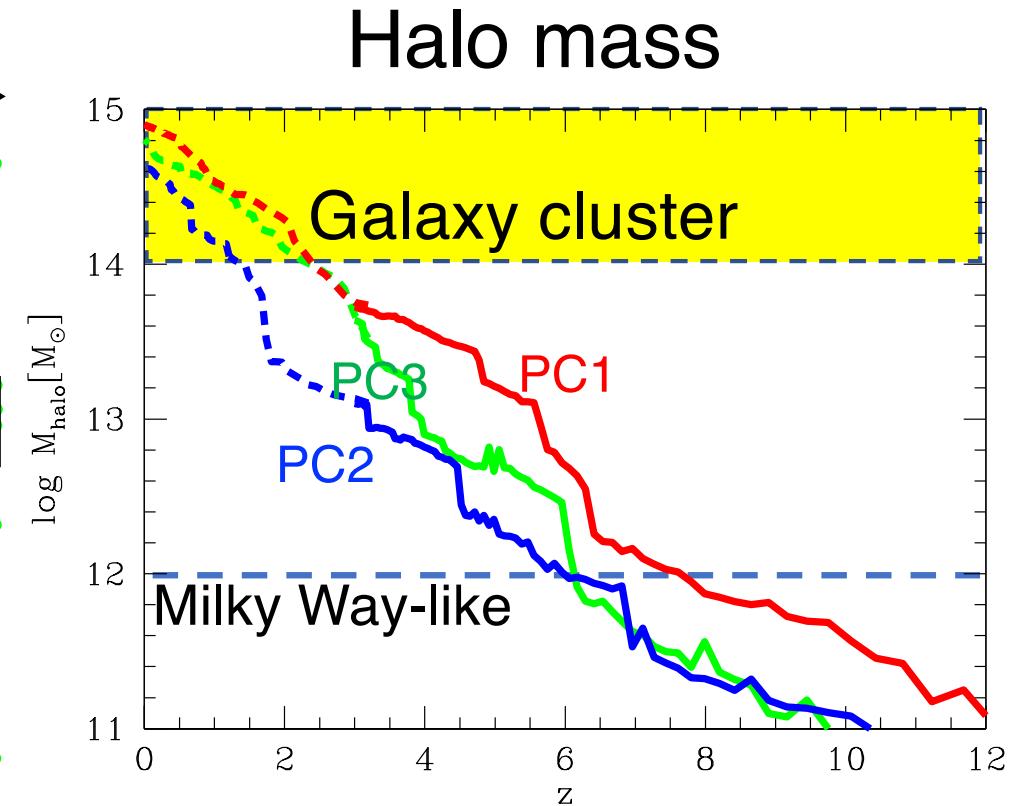
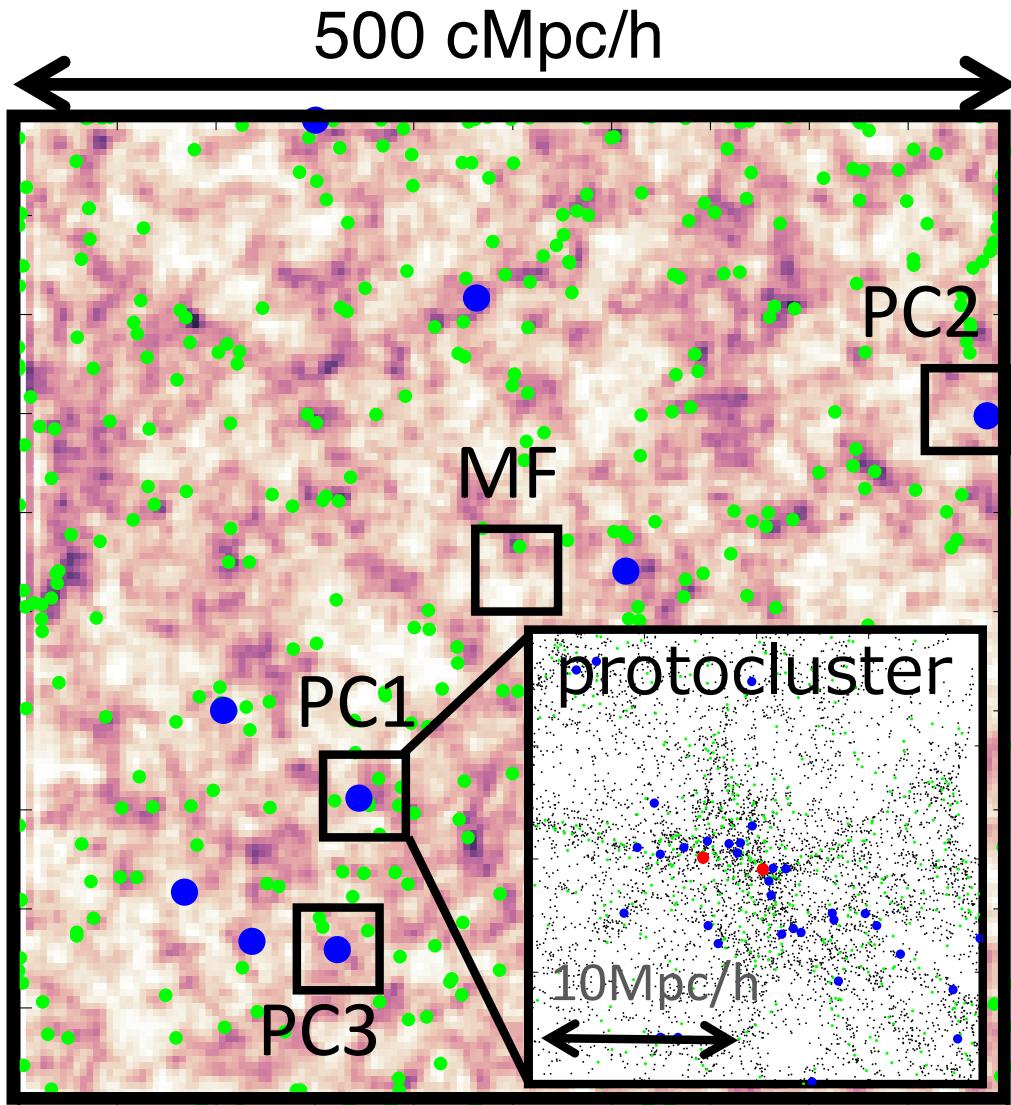
SKAで原始銀河団研究は出来るか？

(SKA問題)



Protoclusters in large-scale structure

(Yajima, Abe et al. in prep.)



$$m_{\text{SPH}} = 3 \times 10^6 \text{ M}_\odot$$

$$L_{\text{zoom}} = 20 \text{ Mpc}/h$$

$$L_{\text{box}} = 500 \text{ Mpc}/h$$

Model & Method

FiBY/OWLSプロジェクトで改良されたGadget-3コード

Basic equations

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = 0$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \nabla \phi$$

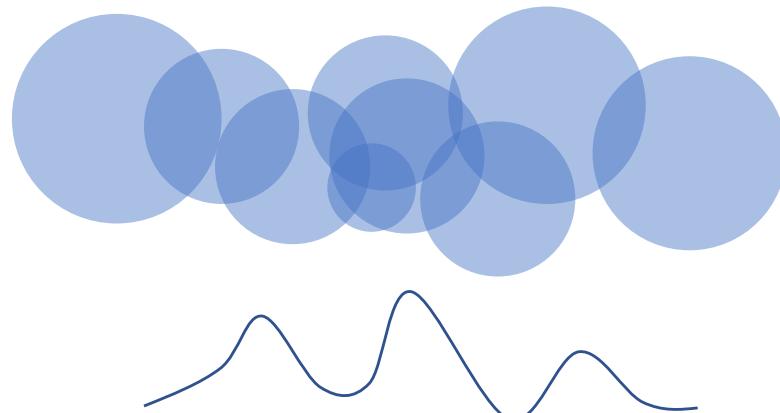
$$\frac{du}{dt} = -\frac{P}{\rho} \nabla \cdot v - \frac{\Lambda(\rho, T)}{\rho}$$

$$P = (\gamma - 1) \rho u$$

星形成: Kennicutt-Schmidt則モデル
(Schaye & Dalla Vecchia 2008)

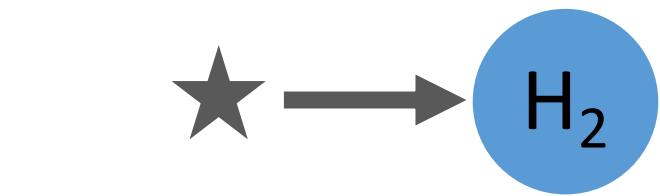
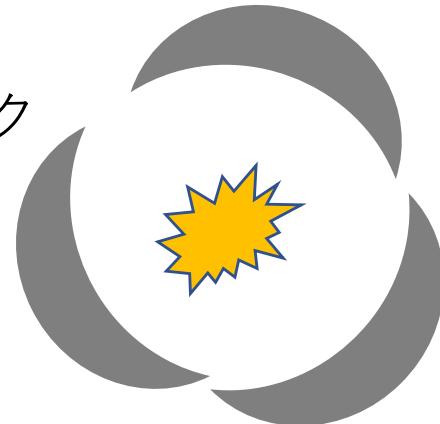
$$\dot{m}_* = m_g A (1 M_\odot \text{ pc}^{-2})^{-n} \left(\frac{\gamma}{G} f_g P \right)^{(n-1)/2}$$

金属冷却 with CLOUDY (10-10⁹ K)
(Schaye et al. 2010)

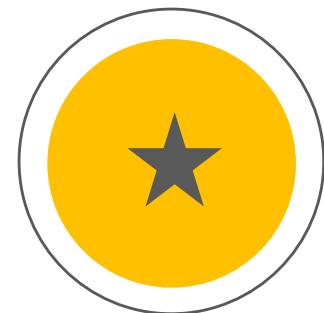


フィードバックモデル

超新星: 確率論的熱的フィードバック
(Dalla Vecchia & Schaye 2012)



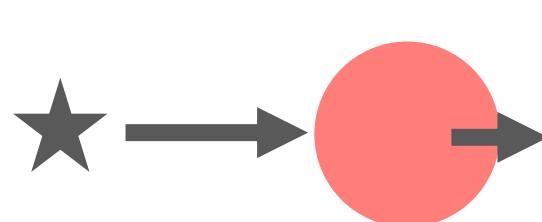
LW紫外線フィードバック
(Johnson et al. 2013)



電離フィードバック: 球対称光子保存
(Abe&Yajima in prep.)

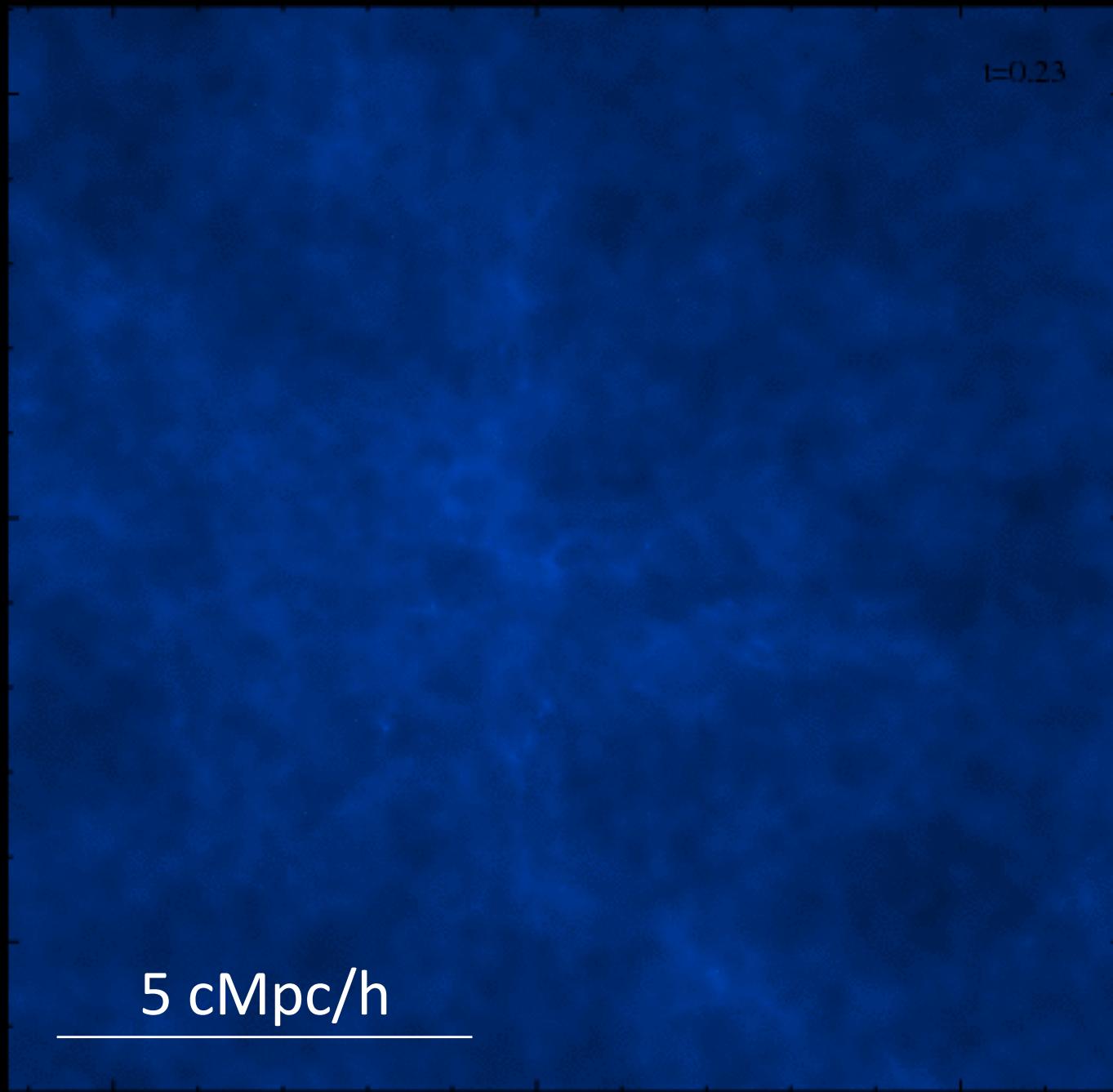


ダストの成長・破壊モデル
(Yajima et al. in prep.)

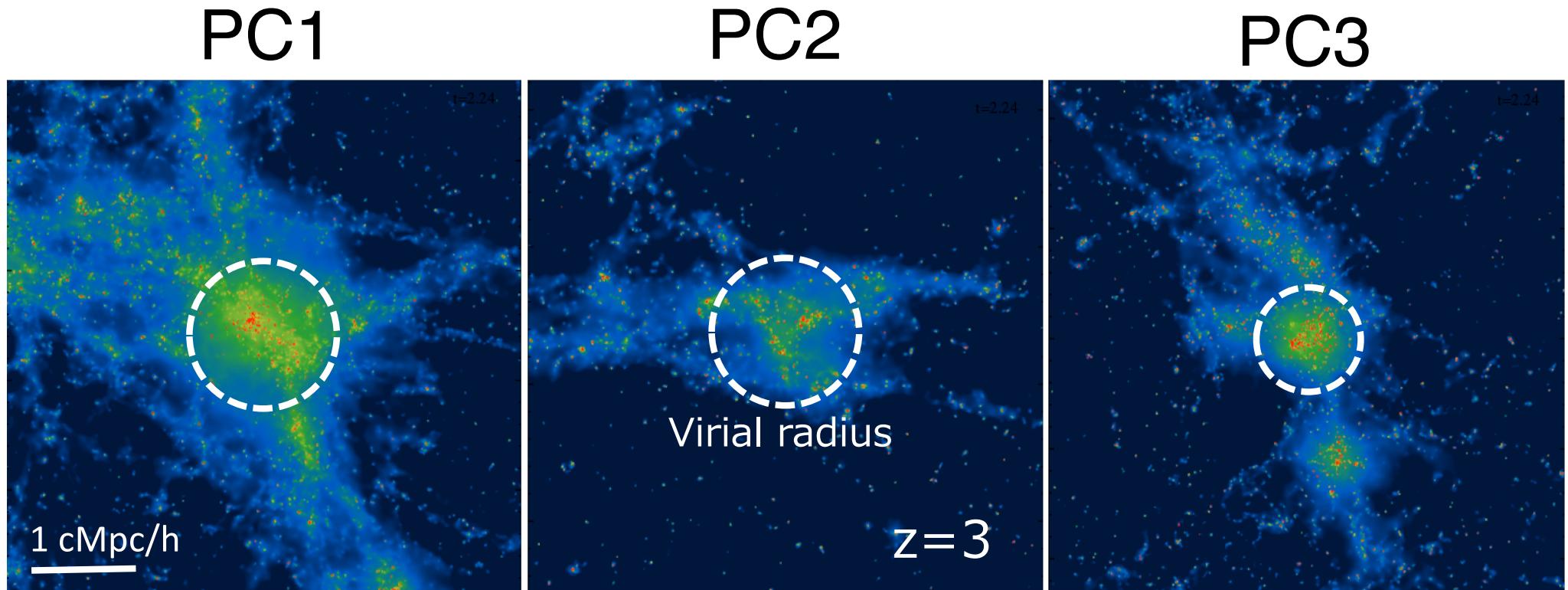


ダストへの輻射圧
(Abe&Yajima in prep.)

Gas structure

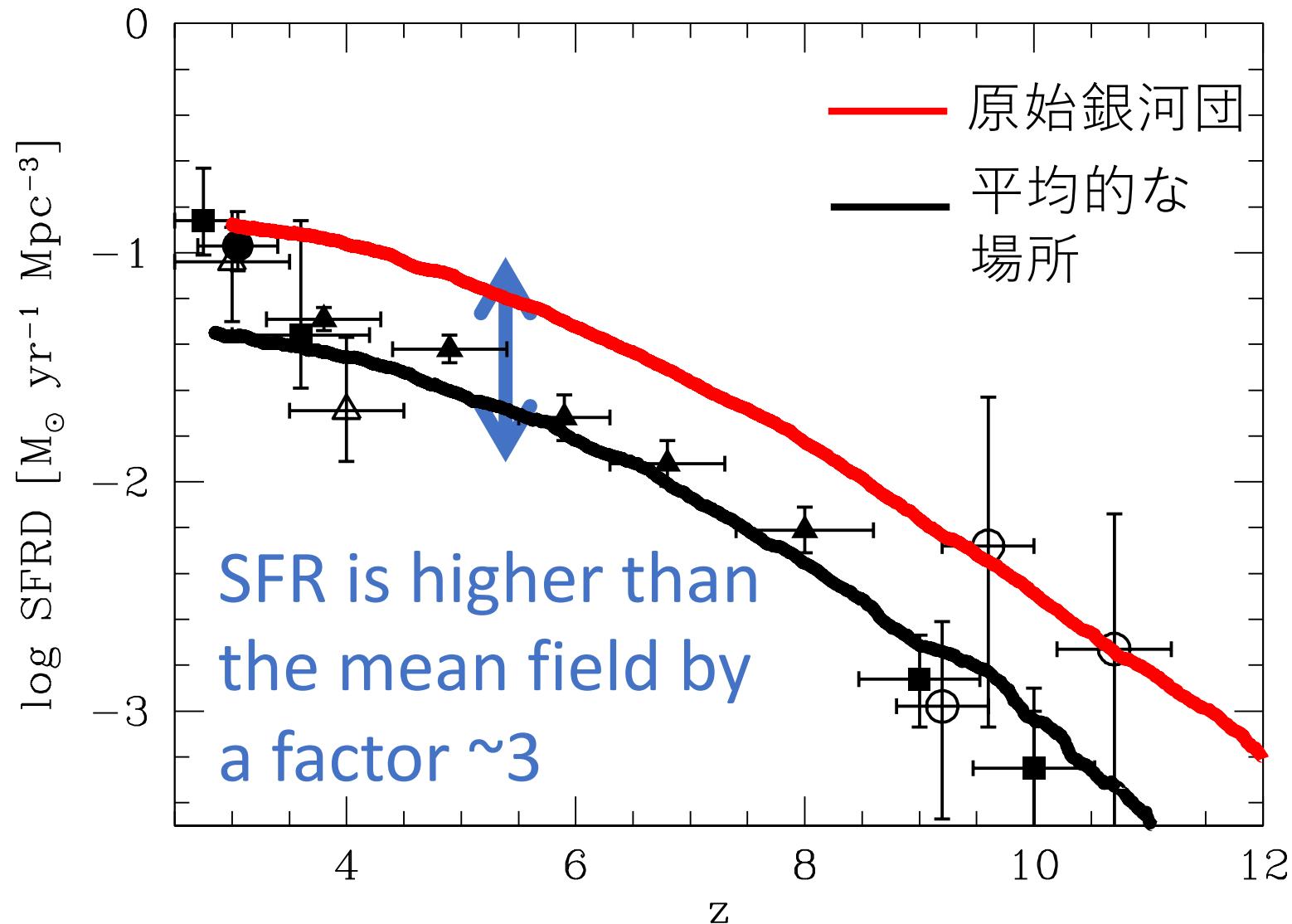


Protocluster regions

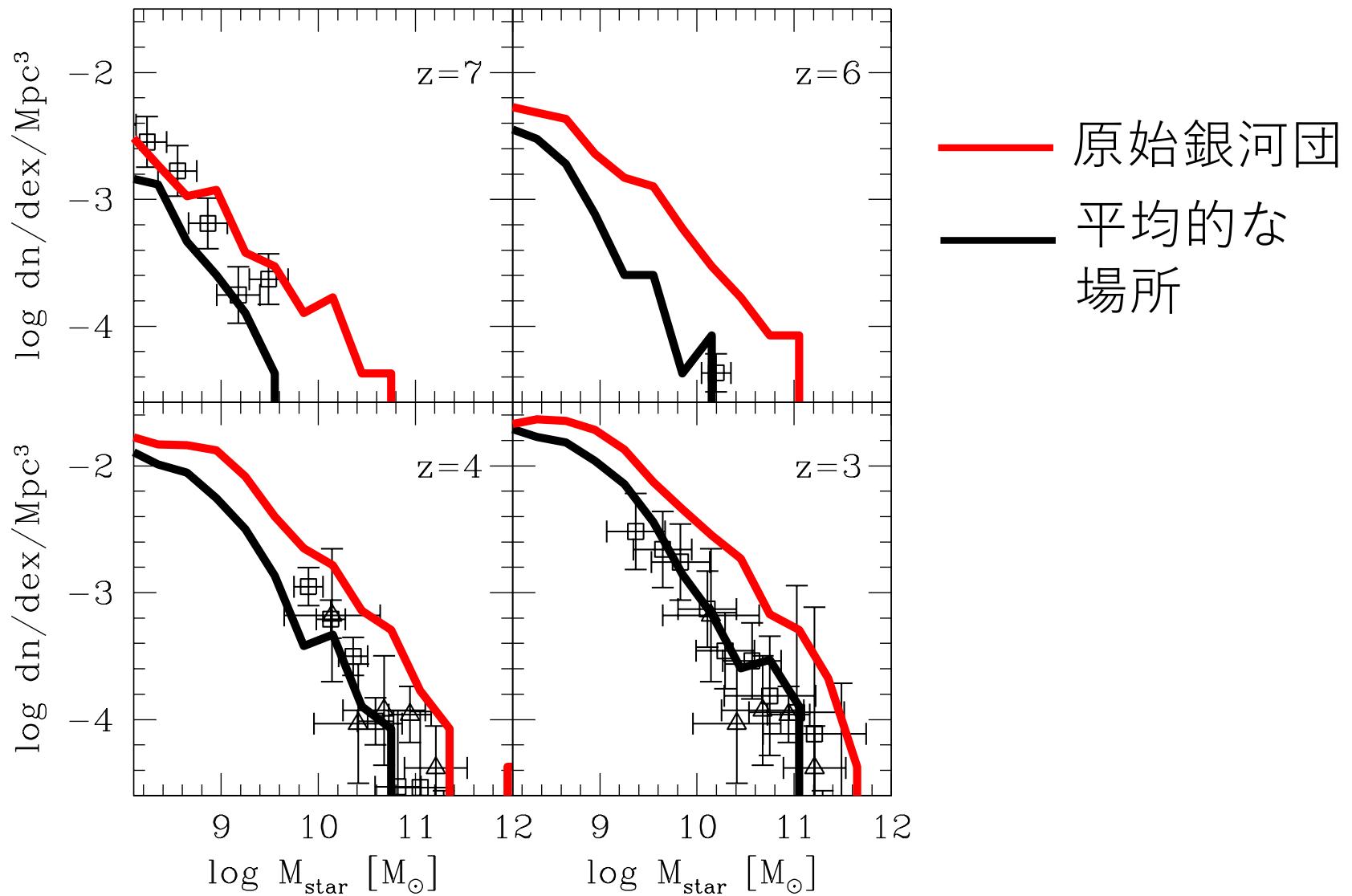


Various shapes of protoclusters

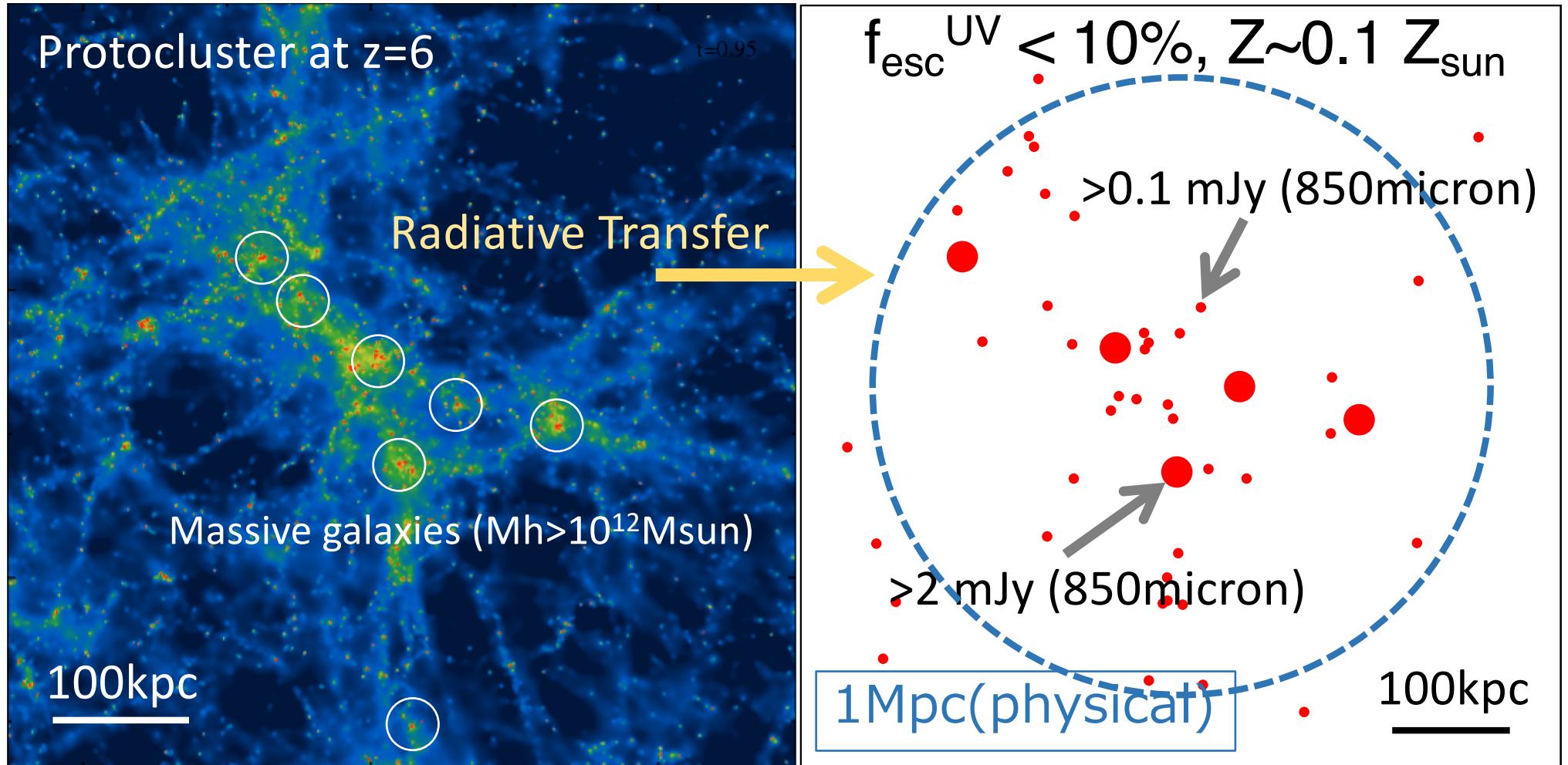
Star formation history



Stellar mass function

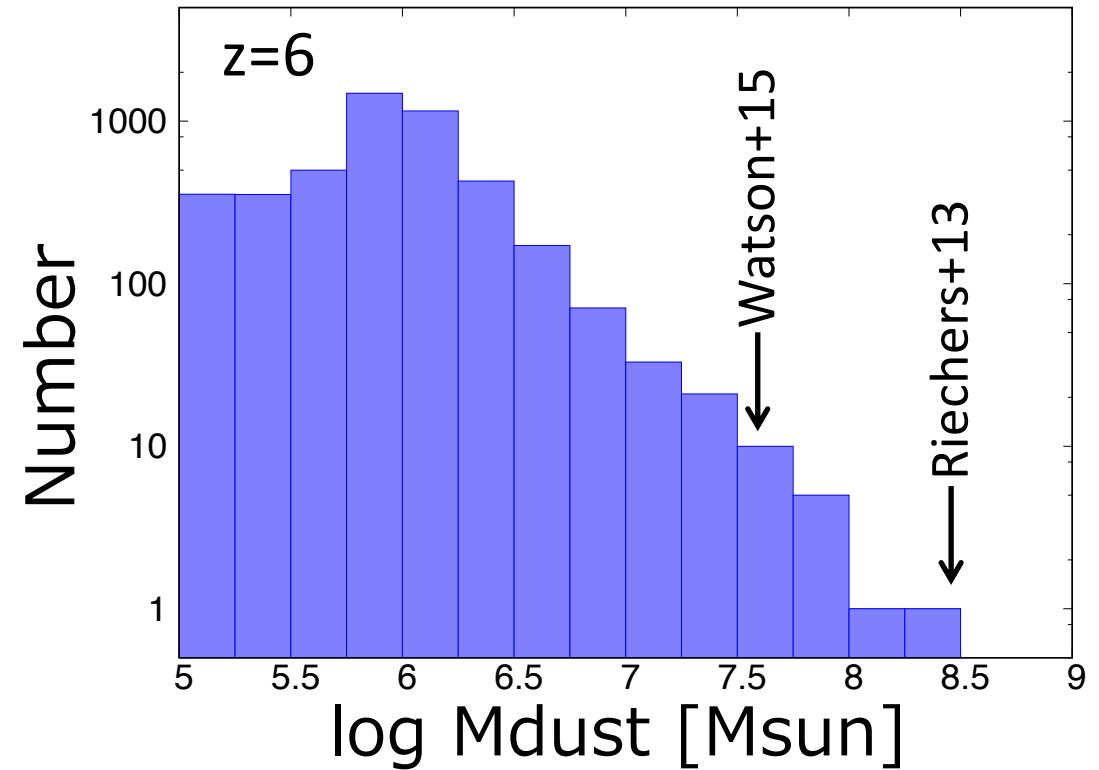
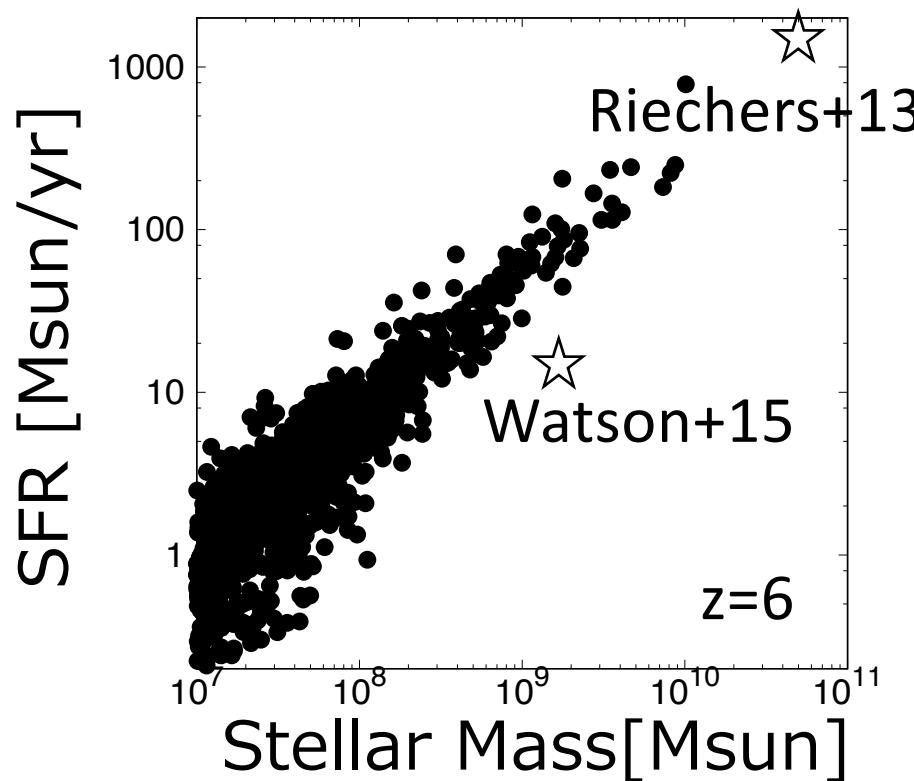


サブミリ銀河の分布



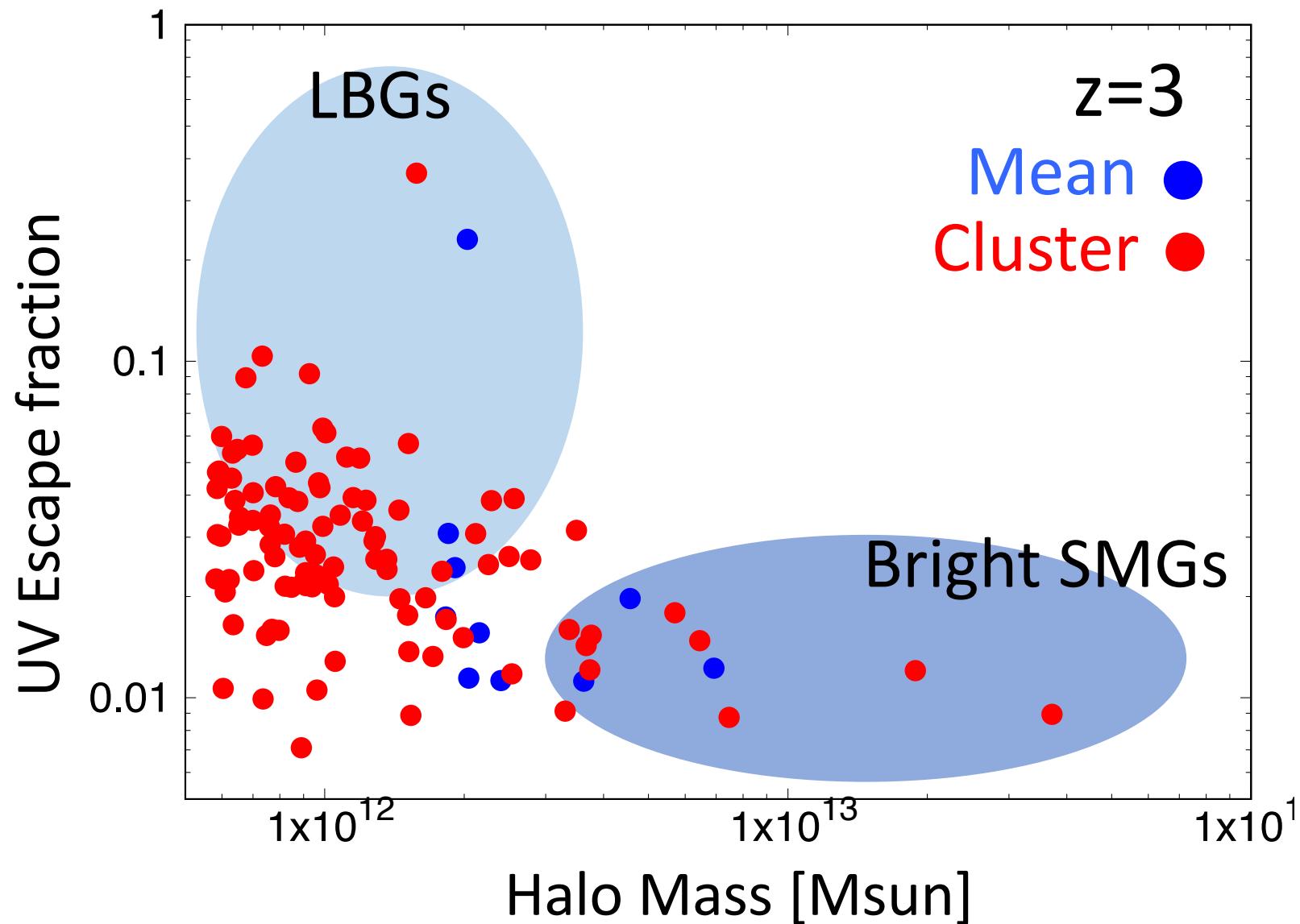
Clustering of SMGs along the filamentary structure!

星形成率、ダスト質量

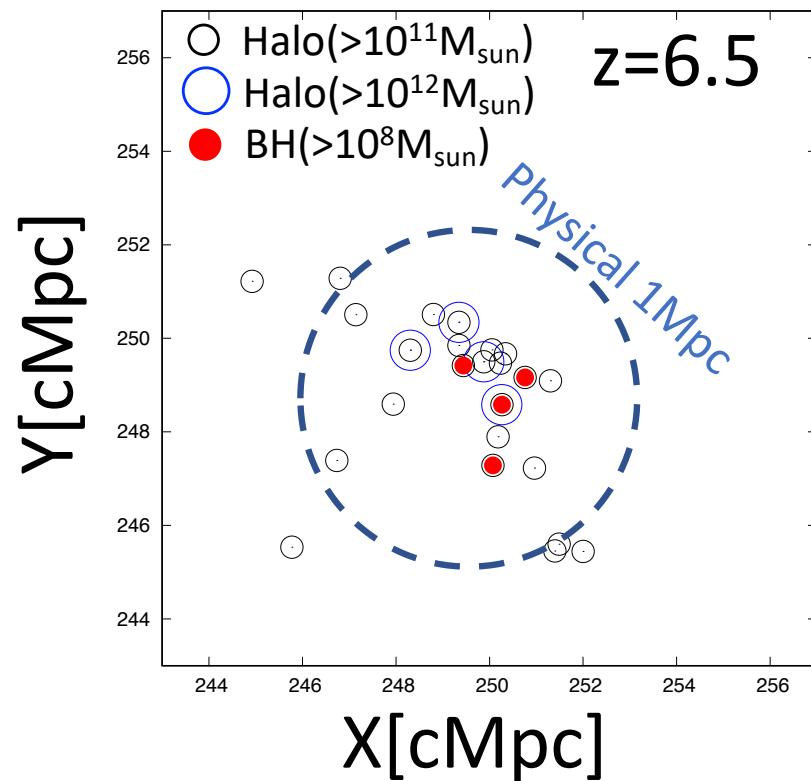


**Protocluster regions form dusty starburst galaxies
which reproduce observed SMGs**

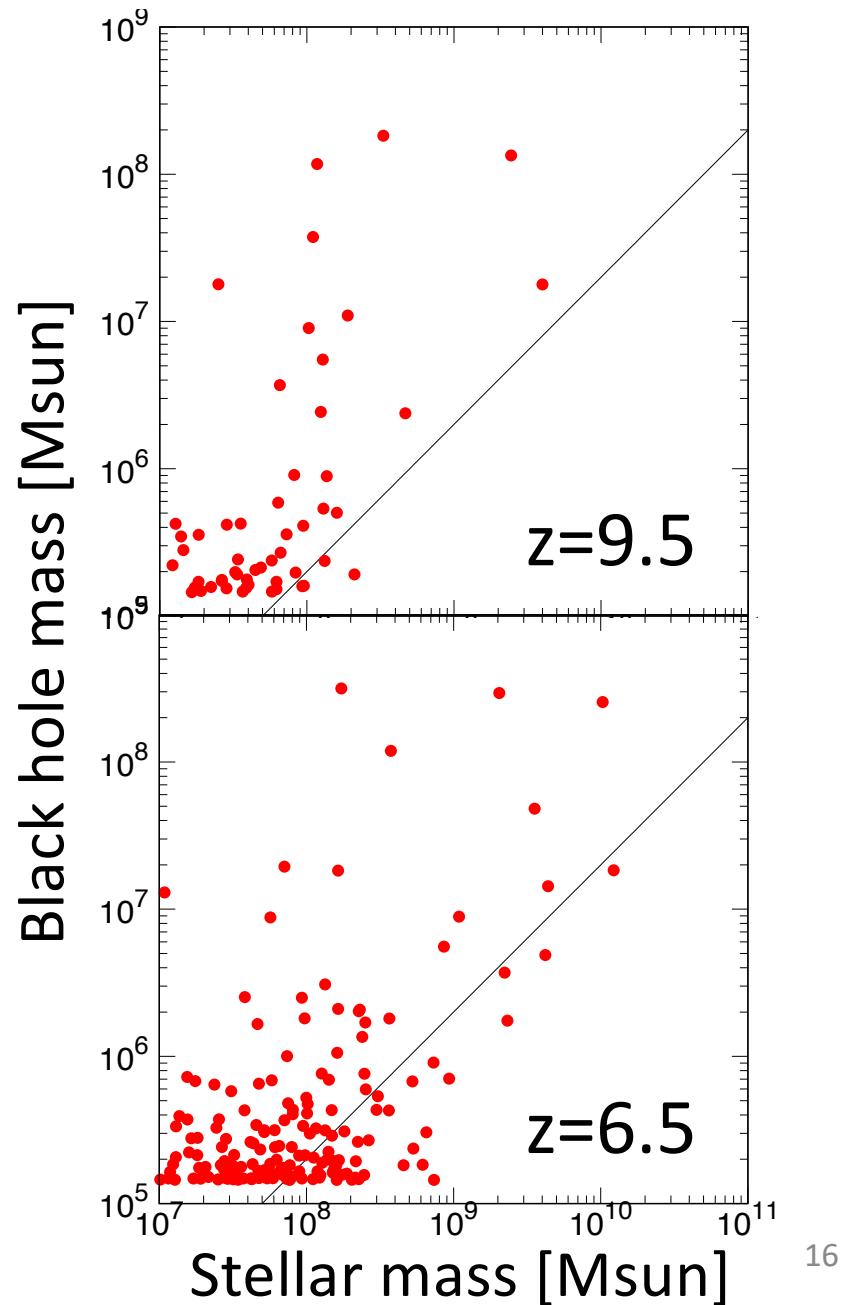
UV光子脱出率



大質量ブラックホールの形成



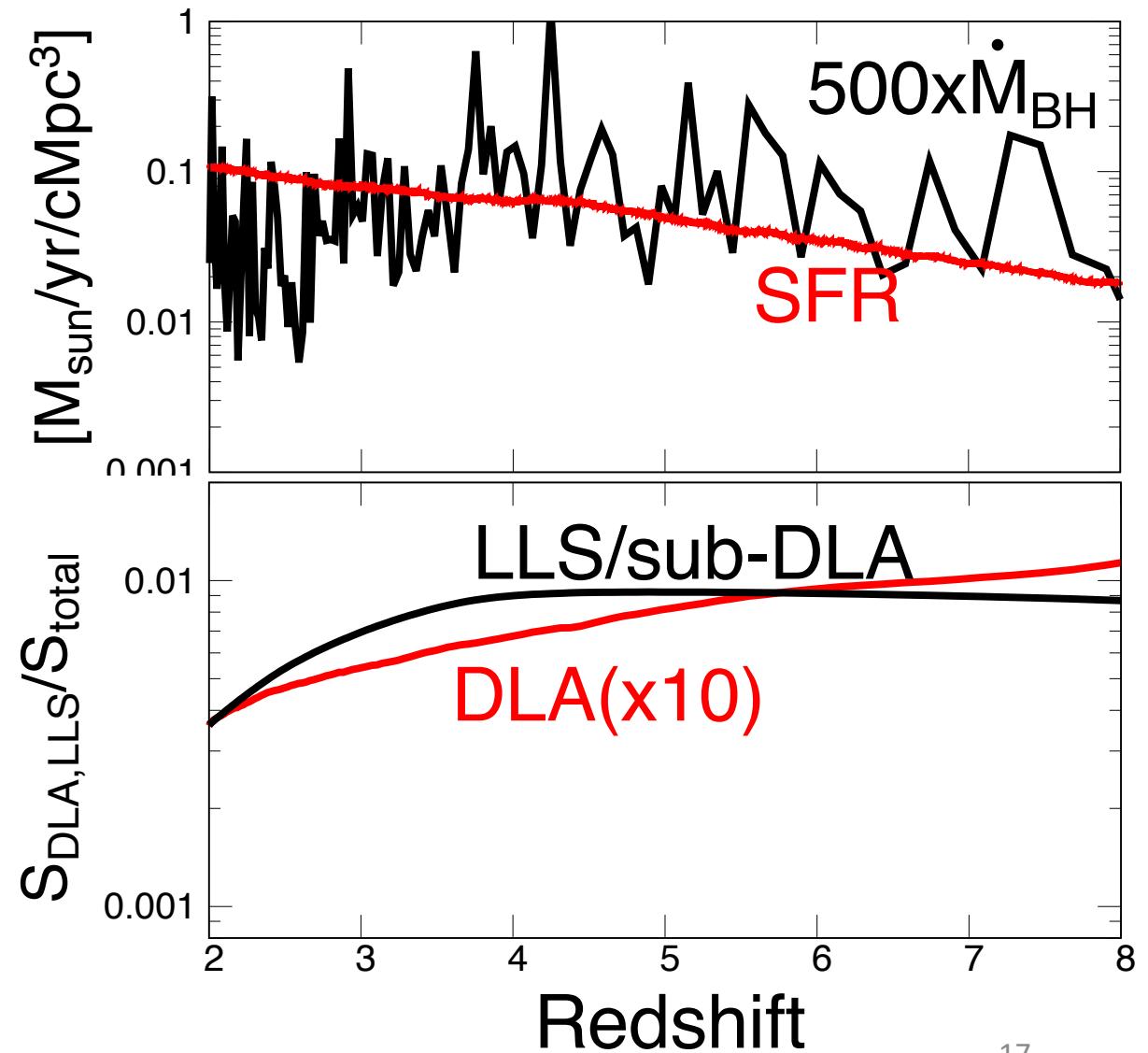
BHs grow rapidly at $z > 8$
Massive BHs form in
protoclusters



Redshift evolution of PCR

SFR
BH growth rate

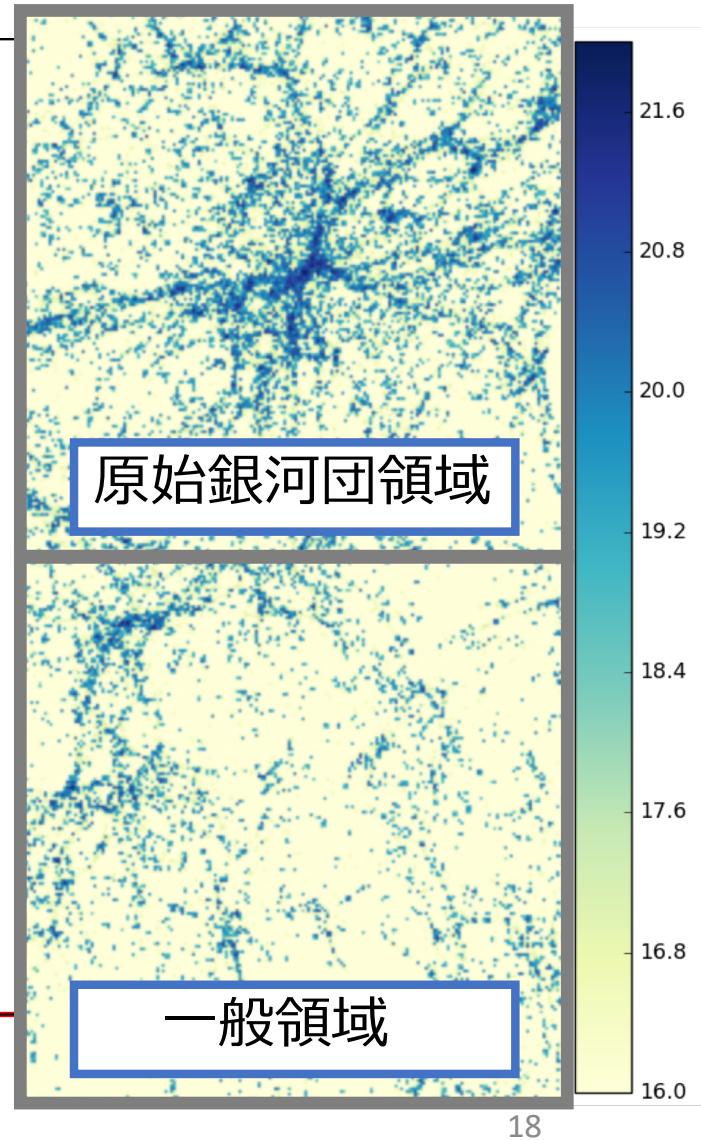
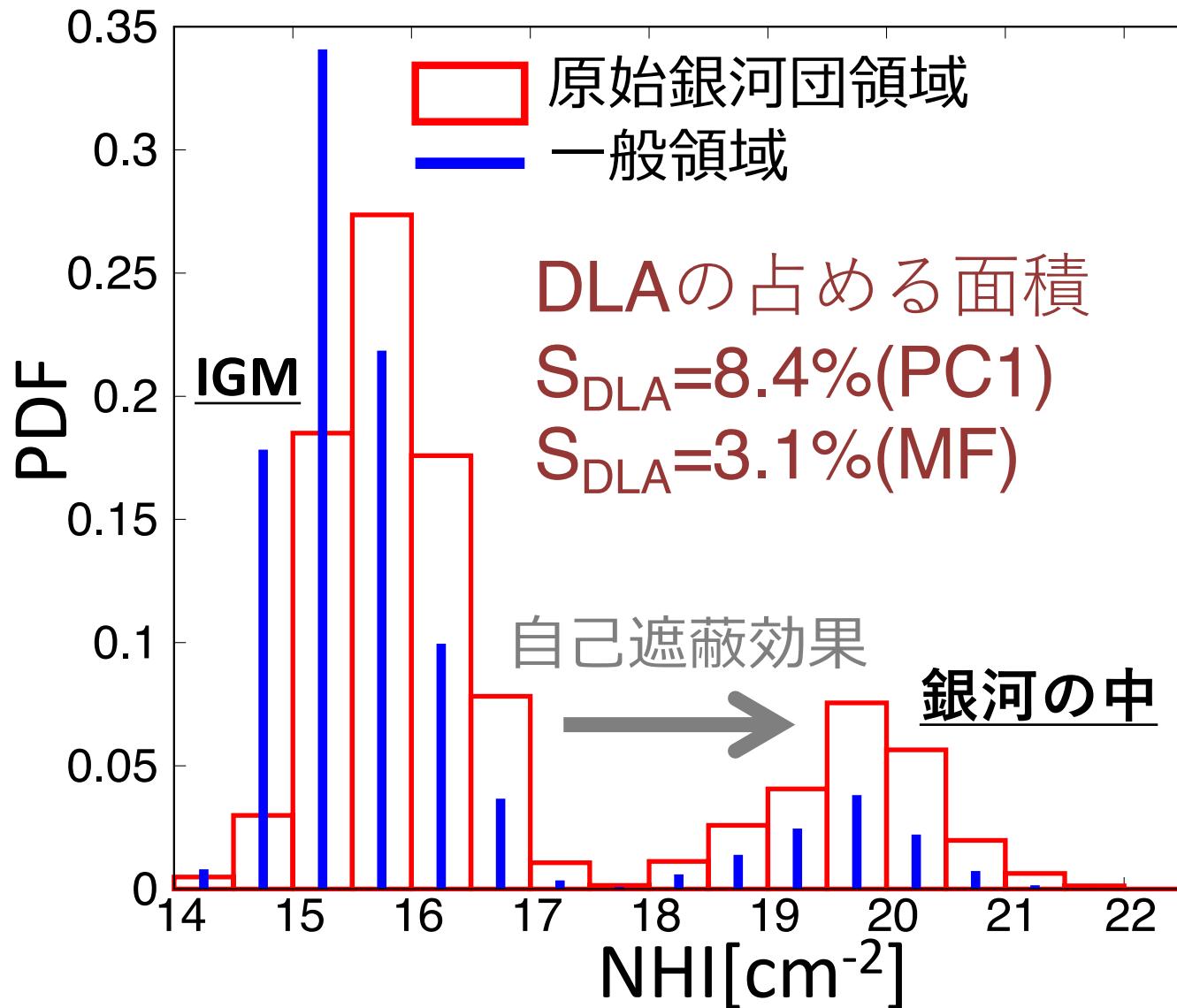
Fractions of
DLA/LLS areas
to the entire region



HI吸収線系

$n_{\text{HI}} > 0.01/\text{cm}^3$ ではUVBは遮蔽される(Yajima+12)

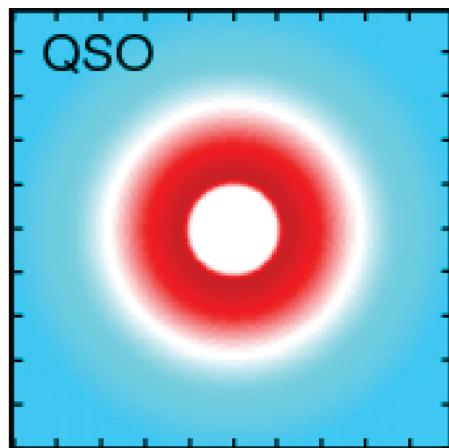
$\log N_{\text{HI}}/\text{cm}^2$



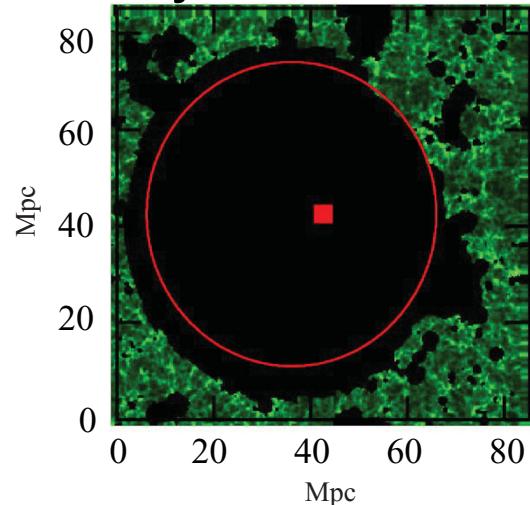
原始銀河団周辺の電離バブル はSKAで見えるか？

クエーサー周辺のバブルはぎりぎり見えると言われている

Yajima+2014



Majumudar+2012



クエーサーは形成過程や
Duty cycleなど不明確な
要素が多い

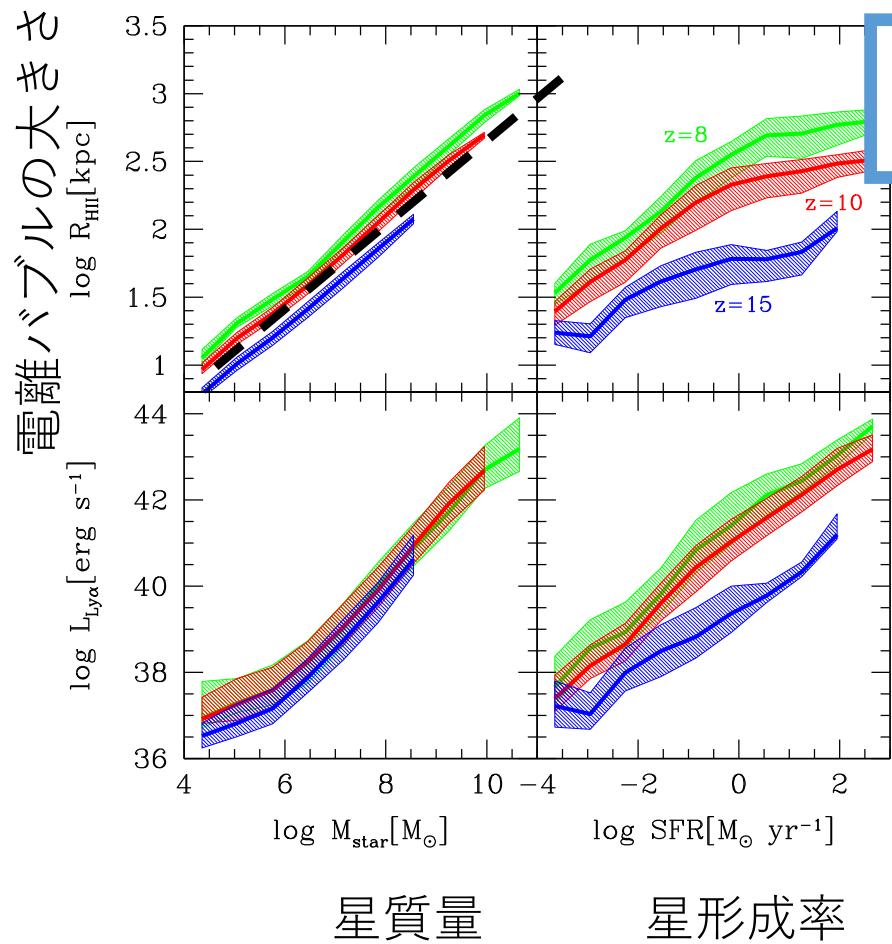
$$\dot{N}_{\text{BH}} \sim \frac{\mu \bar{m} c^2}{\bar{\epsilon}}$$
$$\sim 1 \times 10^{53} \text{ s}^{-1} \left(\frac{\text{SFR}}{\text{M}_\odot \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{f_{\text{BH/star}}}{2 \times 10^{-3}} \right) \left(\frac{f_{\text{ion/bol}}}{0.6} \right)$$

$$\dot{N}_{\text{star}} \sim 1 \times 10^{53} \text{ s}^{-1} \left(\frac{\text{SFR}}{\text{M}_\odot \text{ yr}^{-1}} \right)$$

星形成銀河のクラスタ
リングである原始銀河
も巨大電離バブルを作
りそう

電離バブルの大きさと星質量

Yajima, Sugimura, Hasegawa (2018)



$$R_{\text{HII}} \sim 1 \text{Mpc} (M_{\text{star}} / 10^{10} M_{\odot})^{1/3}$$

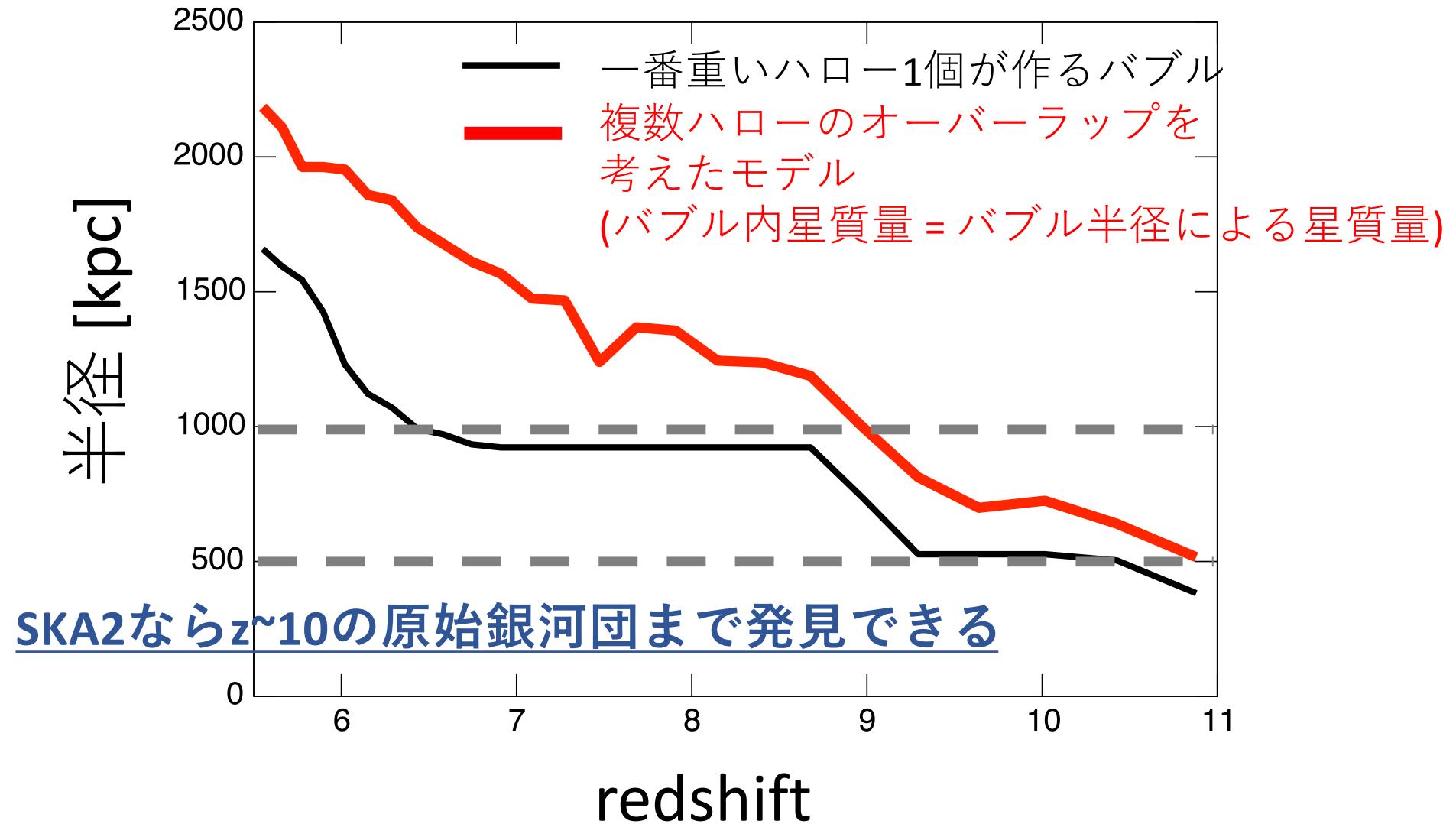
星形成率 \propto 電離光子放射率

星質量 \sim 星形成率 \times 時間

\propto 放射した全電離光子数

バブルの大きさは、再結合時間が十分短ければ星形成率、長い場合は星質量に比例する

バブルサイズの進化



Summary

- 宇宙論的流体計算で初期宇宙の原始銀河団形成過程を計算
- 物質量が多い分、星形成が3倍程度早く進む
- 原始銀河団の大質量銀河は宇宙再電離期においてもダストに覆われたサブミリ銀河となる
- ALMAによる0.1 mJy程度のサブミリ波観測により、フィラメントを含めた大規模構造をトレース出来そう
- SKAによって赤方偏移10程度の原始銀河団を電離バブルの観測により検出可能