

最新の遠方銀河観測から紐解く初代銀河形成

豊内大輔 (大阪大学)

共同研究者：

矢島秀伸 (筑波大学)、Andrea Ferrara (SNS Pisa)、
長峯健太郎 (大阪大学)、平下博之 (ASIAA)

初代星初代銀河研究会 @ 信州大学 2024年11月11日

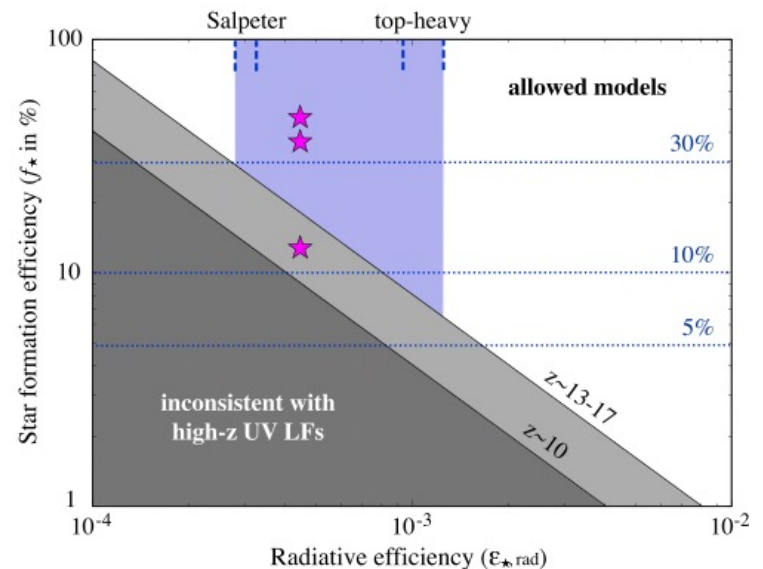
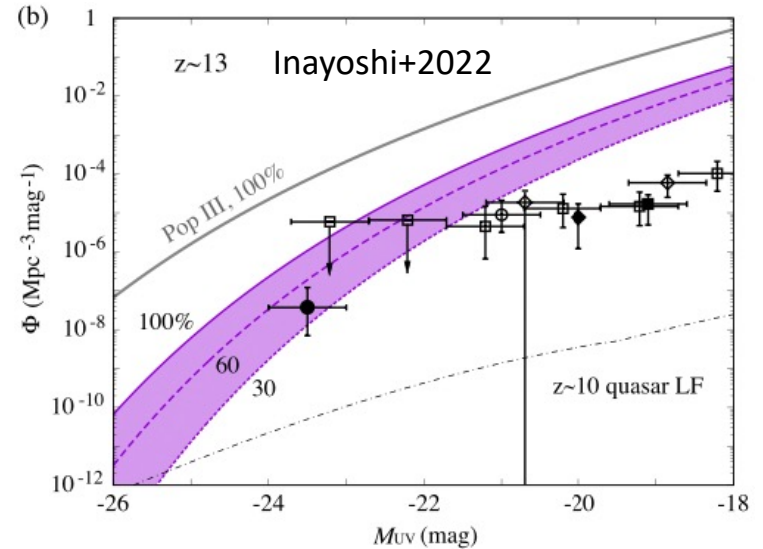
UV luminosity function of $z > 10$ galaxies

Inayoshi et al. (2022)

- High star formation efficiency ?
 - ✓ $f_* \equiv \text{SFR}/(f_b \dot{M}_h) \gtrsim 10\%$
- Top-heavy IMF ?
 - ✓ $Z < 10^{-2} Z_\odot$ (Chon+2024)

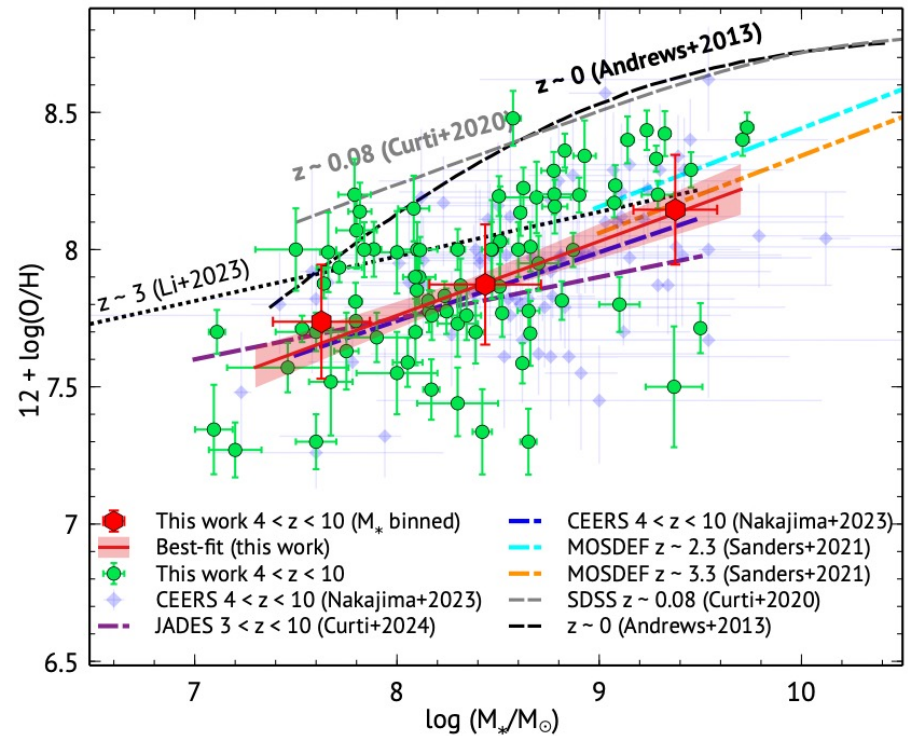
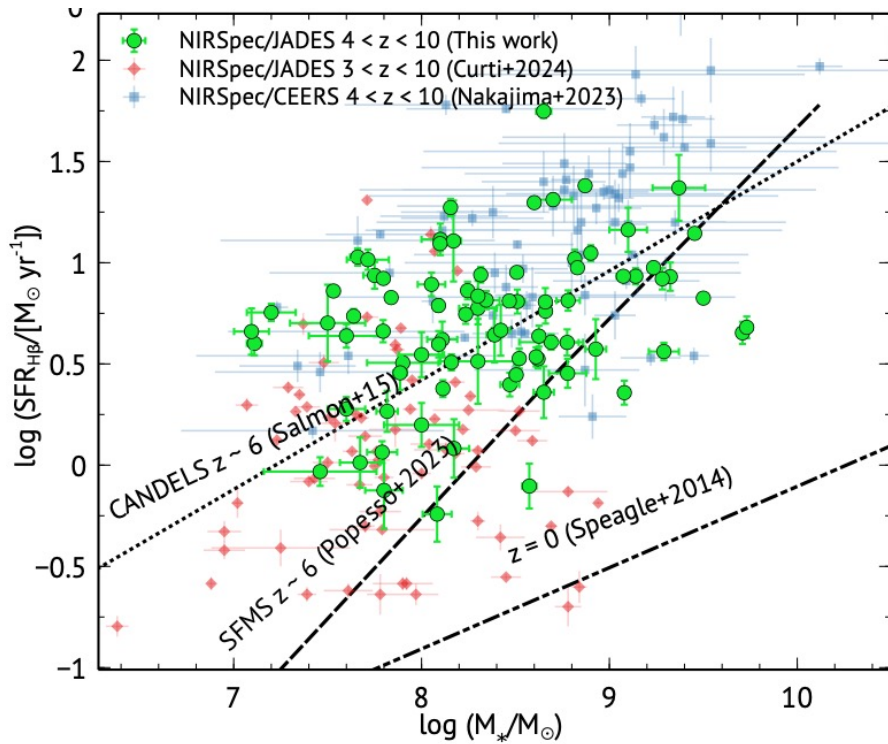
本研究の課題

- 初代銀河に特化したモデル計算
 - ✓ 星形成効率を上げるには？
 - ✓ 化学進化に伴うIMF変化を考慮
- UV光度関数についてより一般的な議論を行う

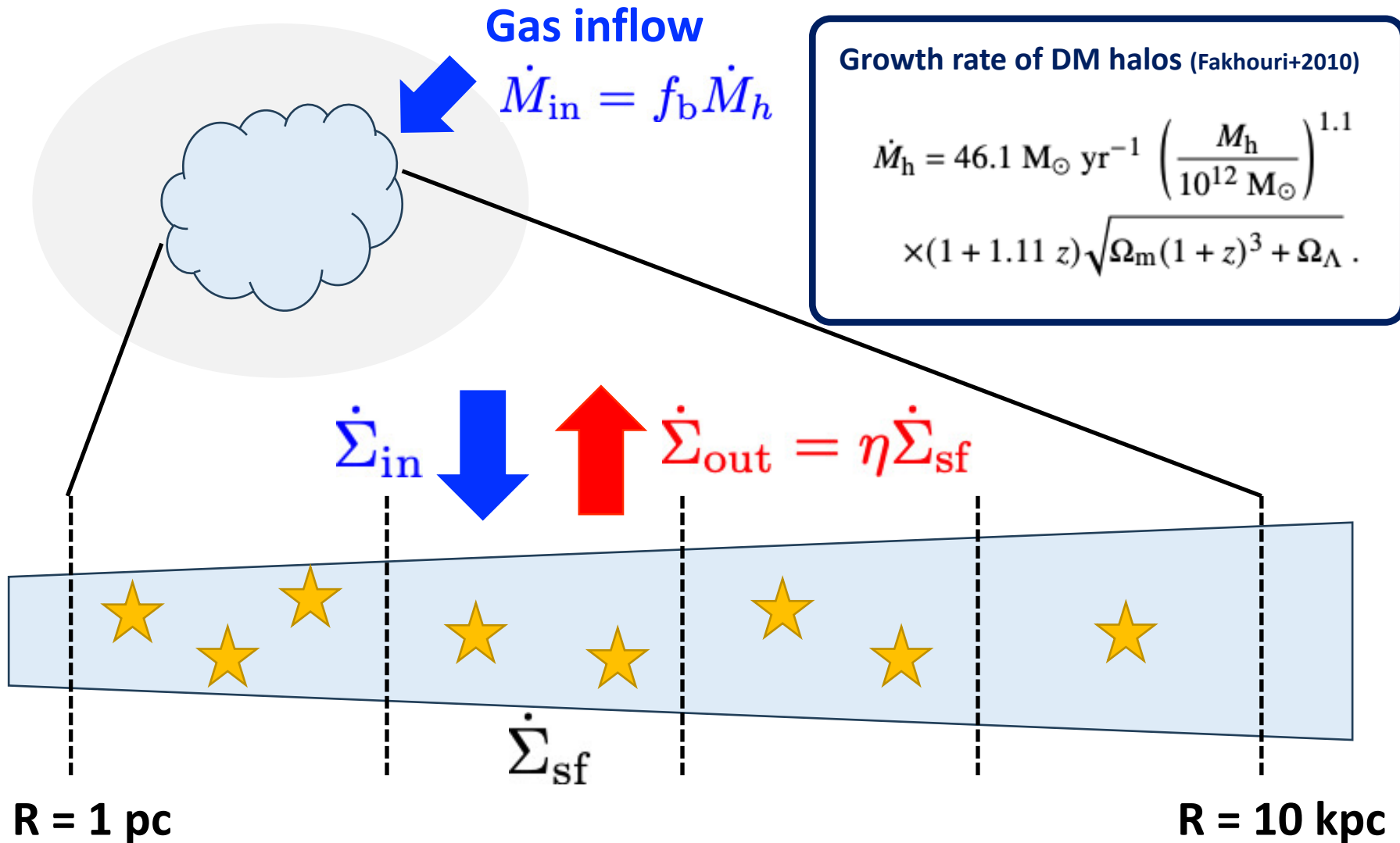


Mass-SFR-Z relation

- $z > 3$ galaxies observed with JWST NIRSpec (Nakajima+23; Curti+24, Sarkar+24)



Galaxy evolution model



Key assumptions

- **Radial profile of gas inflow rates**

$$\dot{\Sigma}_{\text{in}} \propto \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right), \quad h_R = \lambda_s r_{\text{vir}} \propto M_h^{1/3} (1+z)^{-1}$$

- high- z ほどコンパクトなガス流入。

- **Kennicutt-Schmidt law**

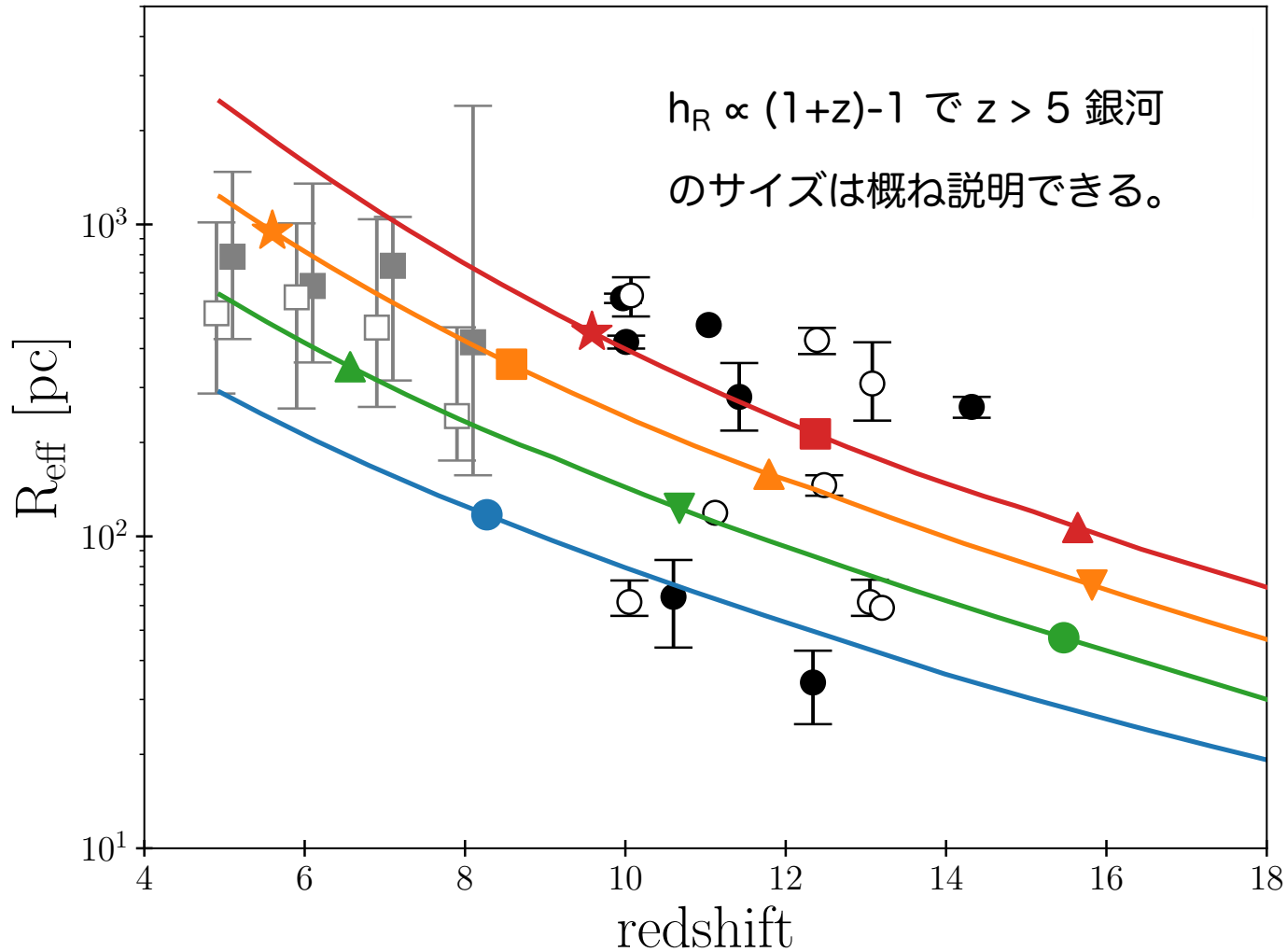
$$\dot{\Sigma}_{\text{sf}} = 2.5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_g}{\text{M}_{\odot} \text{pc}^{-2}} \right)^{1.4} \text{M}_{\odot} \text{Myr}^{-1} \text{pc}^{-2}$$

- 実際には観測・理論両面でより高い星形成率が示唆されている。
(e.g., Fukushima+2021; Vallini+2024)
- 今回は星形成効率という点で最も保守的な議論

- **Metallicity-dependent IMF (Chon+2024)**

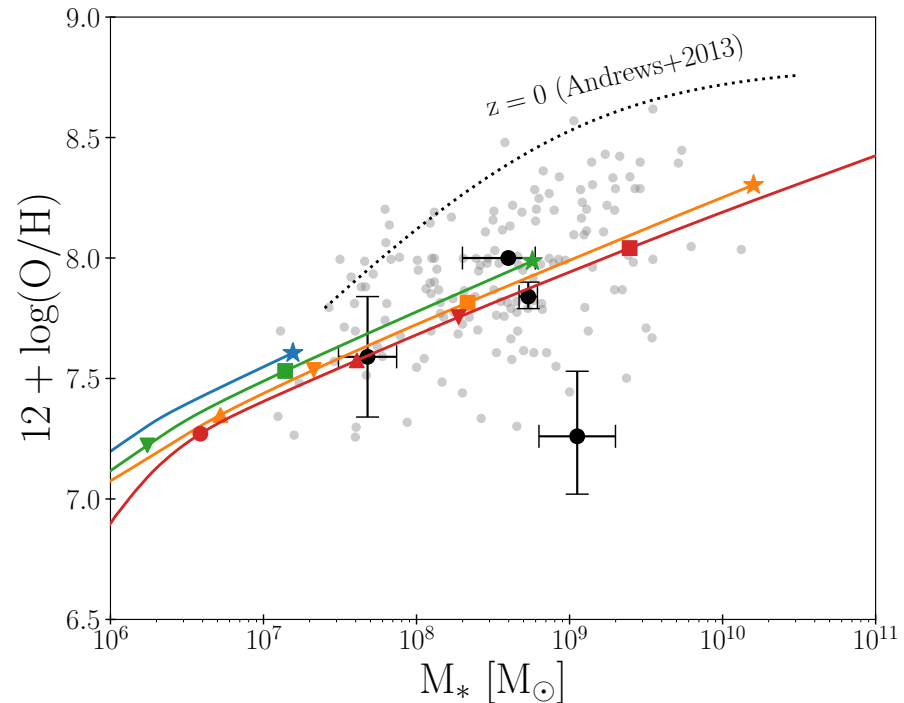
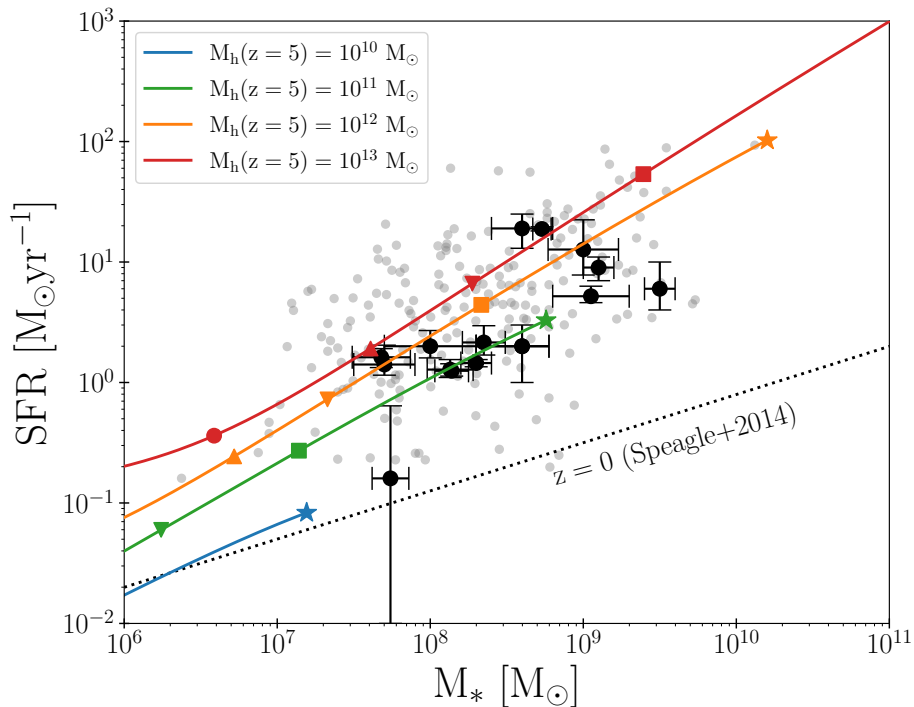
Result: UV half-light radius

M_{halo} at $z = 5 = 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13} M_{\odot}$



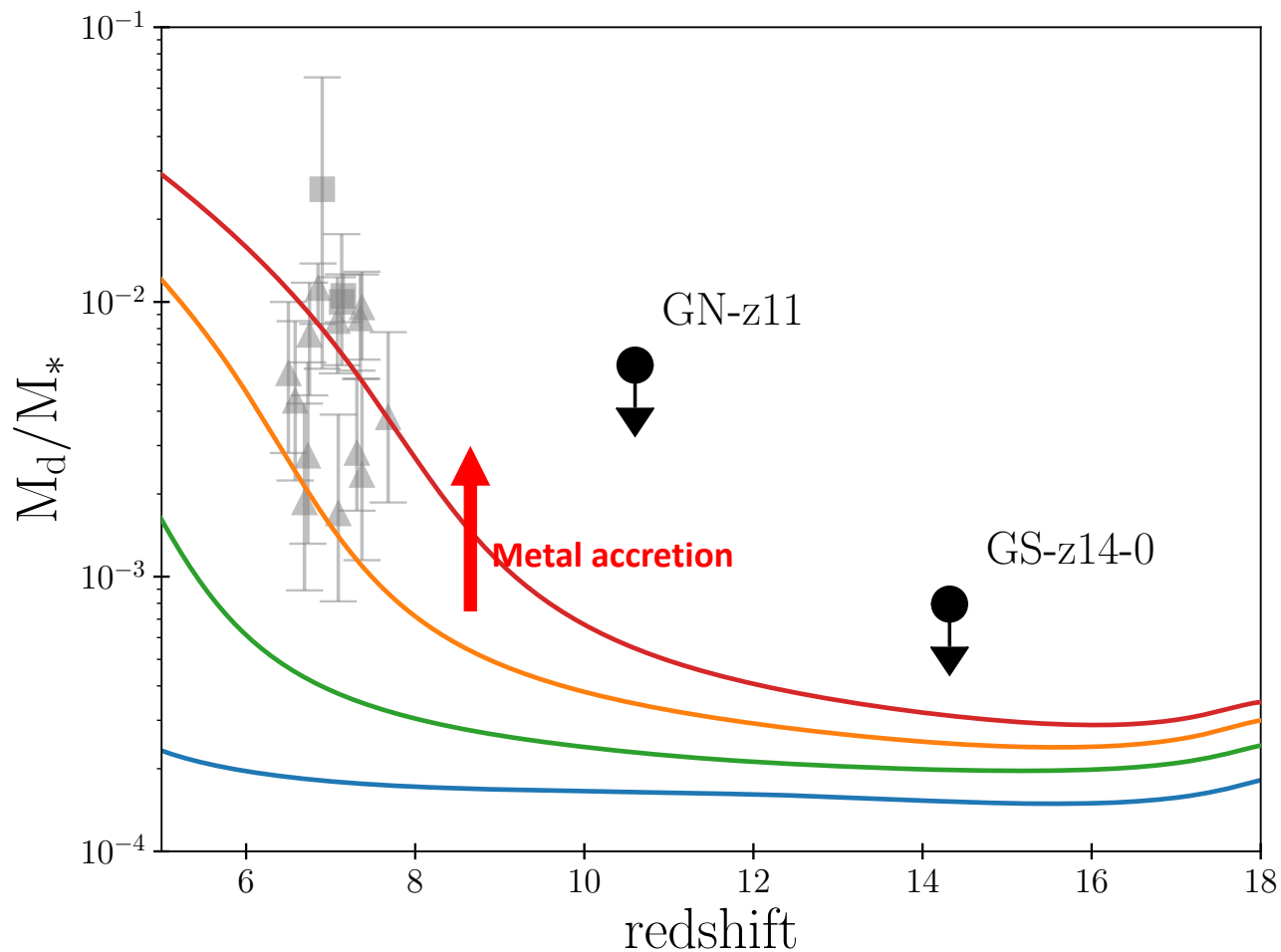
Result: Mass-SFR-Z relation

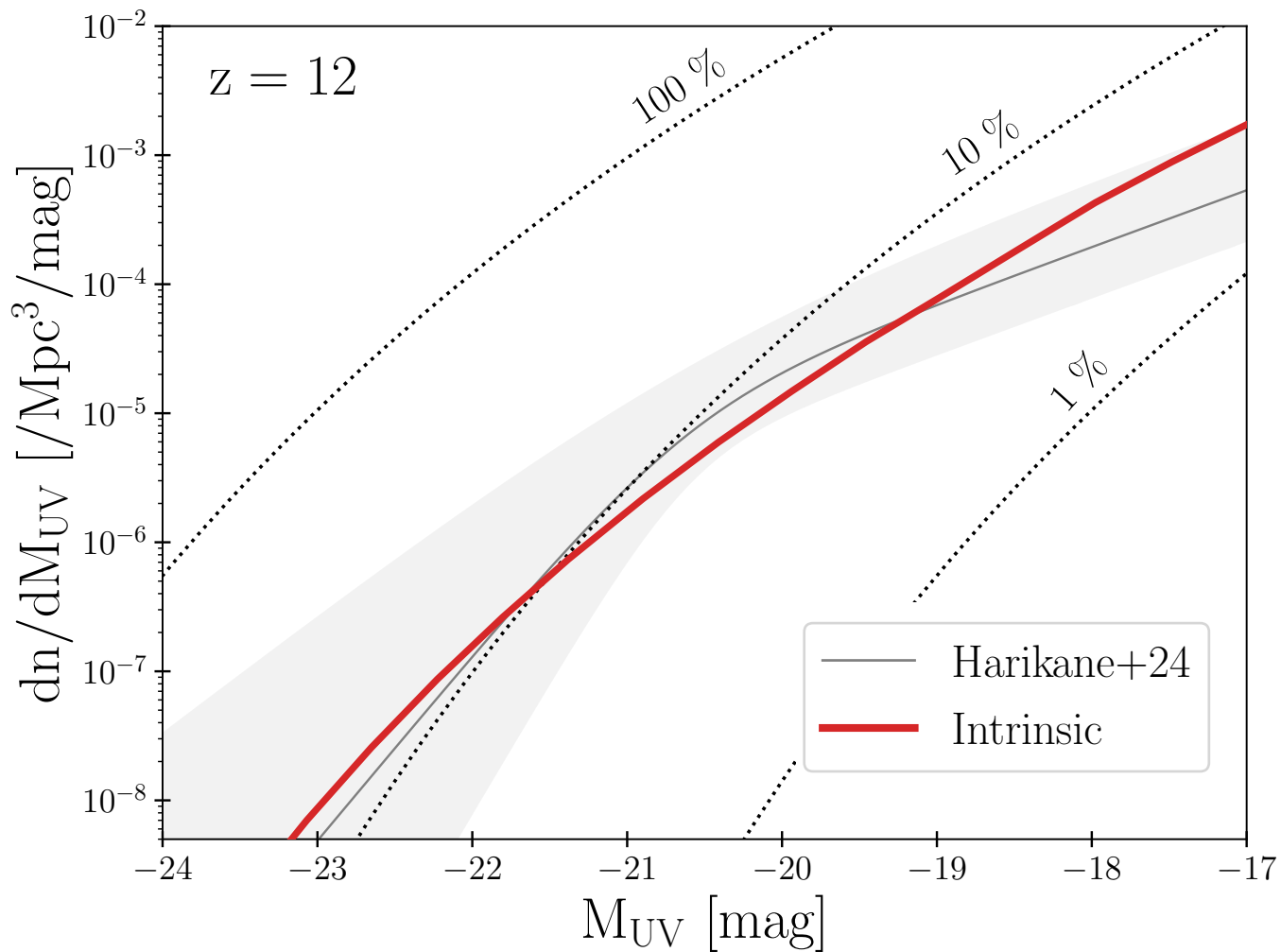
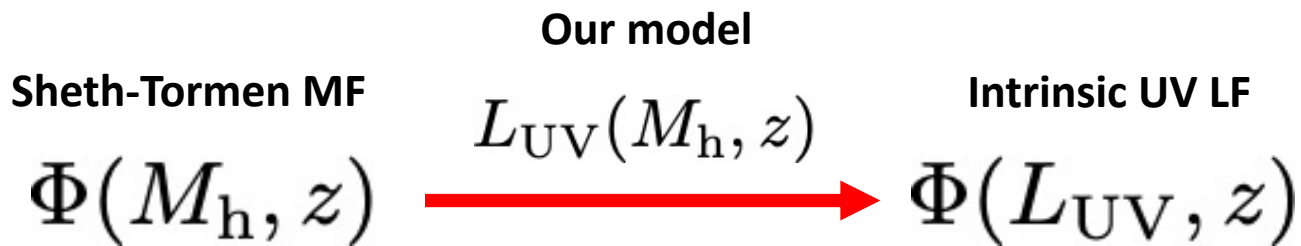
- 銀河がコンパクトなので星形成率が自然と上がる。
- 低い金属量を説明するには、**活発なアウトフロー (OFR $\sim 10 \times$ SFR)** が必要。



Result: Dust mass evolution

- $z < 10$ でダストへの重元素降着によってダスト質量が急上昇。
- $z > 10$ でのダスト連続波の未検出、 $z < 10$ でのdust-rich銀河の出現と整合的。





Is 10 % SFE possible?

Bright-end galaxies at $z \sim 12$

$$M_h \sim 10^{12} M_\odot$$

$$M_{\text{gas}} \sim \frac{f_b M_h}{\eta} \sim 10^{10} M_\odot$$

$$r_d \sim 500 \text{ pc}$$



$$\Sigma_{\text{gas}} \sim 10^4 M_\odot \text{pc}^{-2}$$

KS law

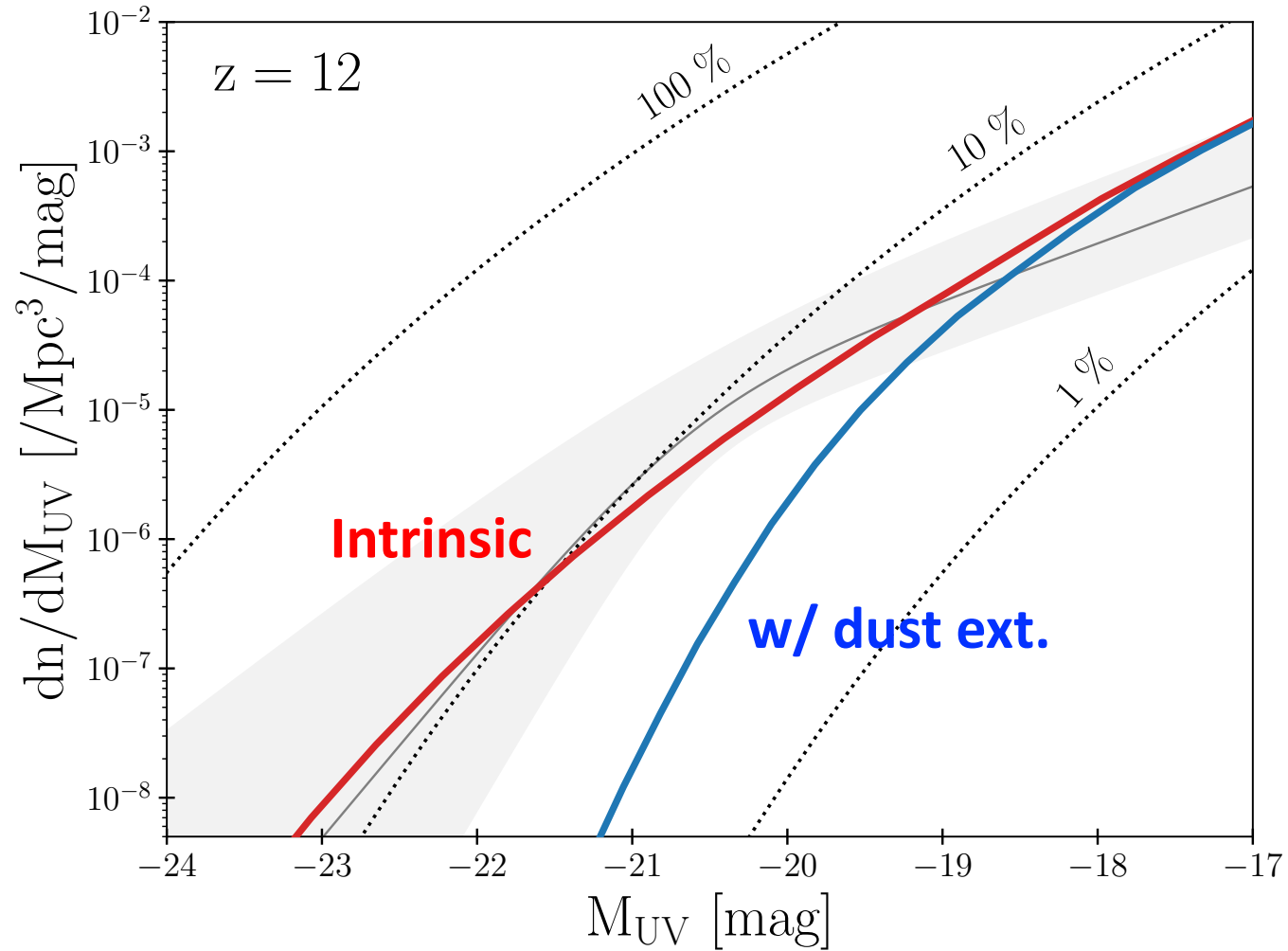


$$\dot{\Sigma}_{\text{sf}} \sim 10^{-4} M_\odot \text{pc}^{-2} \text{yr}^{-1}$$

Star formation efficiency (Inayoshi+2022)

$$f_* = \frac{\text{SFR}}{f_b \dot{M}_h} \sim 9 \times 10^{-2} \left(\frac{M_h}{10^{12} M_\odot} \right)^{0.4} \left(\frac{r_d}{500 \text{ pc}} \right)^{-0.8}$$

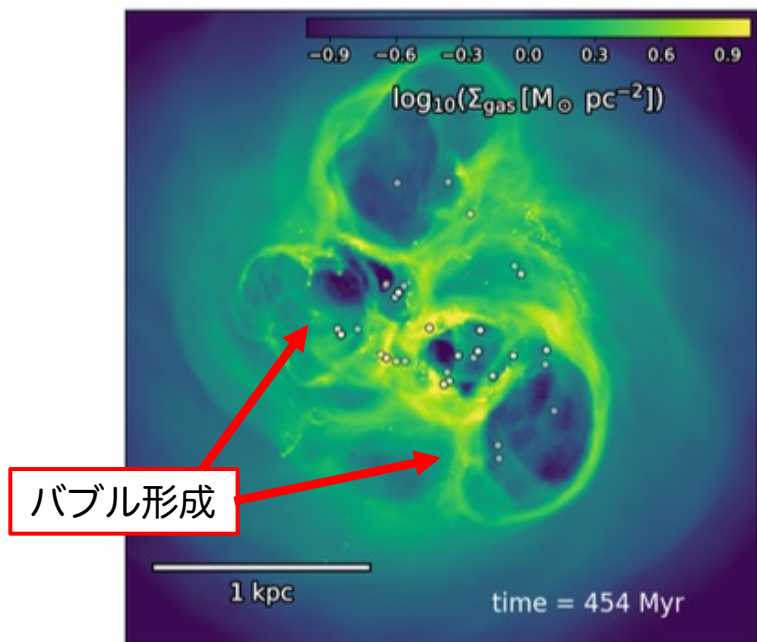
Dust-attenuated UV LF



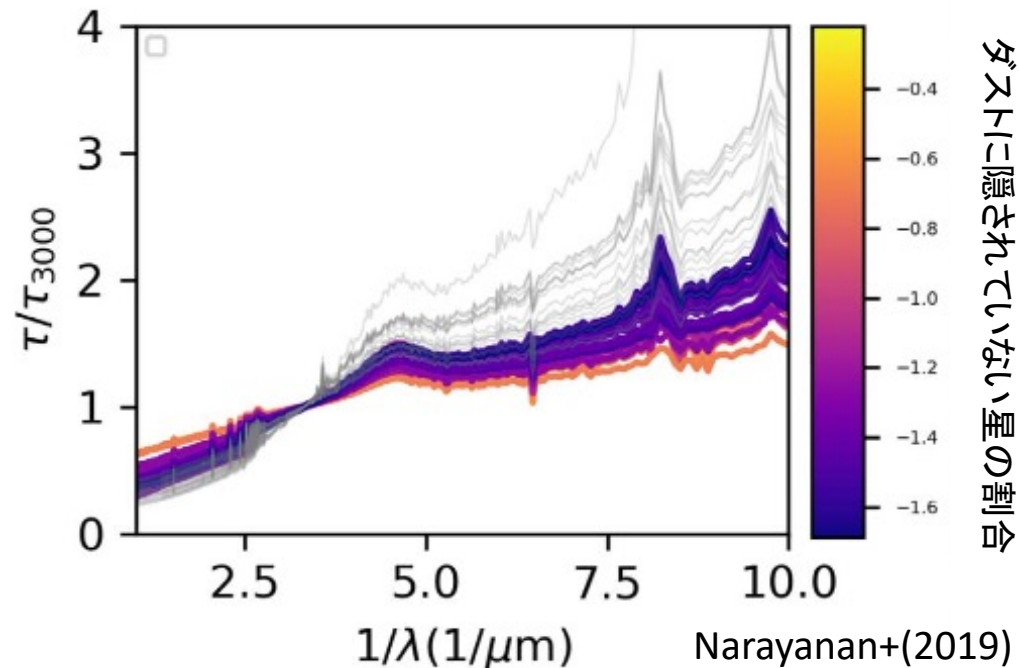
How do galaxies avoid dust attenuation?

Ferrara+22、Ziparo+23などを参考に2つのシナリオについて考察

1. **Dust ejection** : アウトフローでダストを捨てる (すでにモデルに入っている)
 - ✓ これ以上アウトフローを強くすると、星形成率、金属量ともに低くなりすぎる。
2. **Dust spatial segregation** : 星団周辺からダストを吹き飛ばす (銀河内には残っている)
 - ✓ ダストと星の空間分布の違いは銀河シミュレーションでも見えてくる。



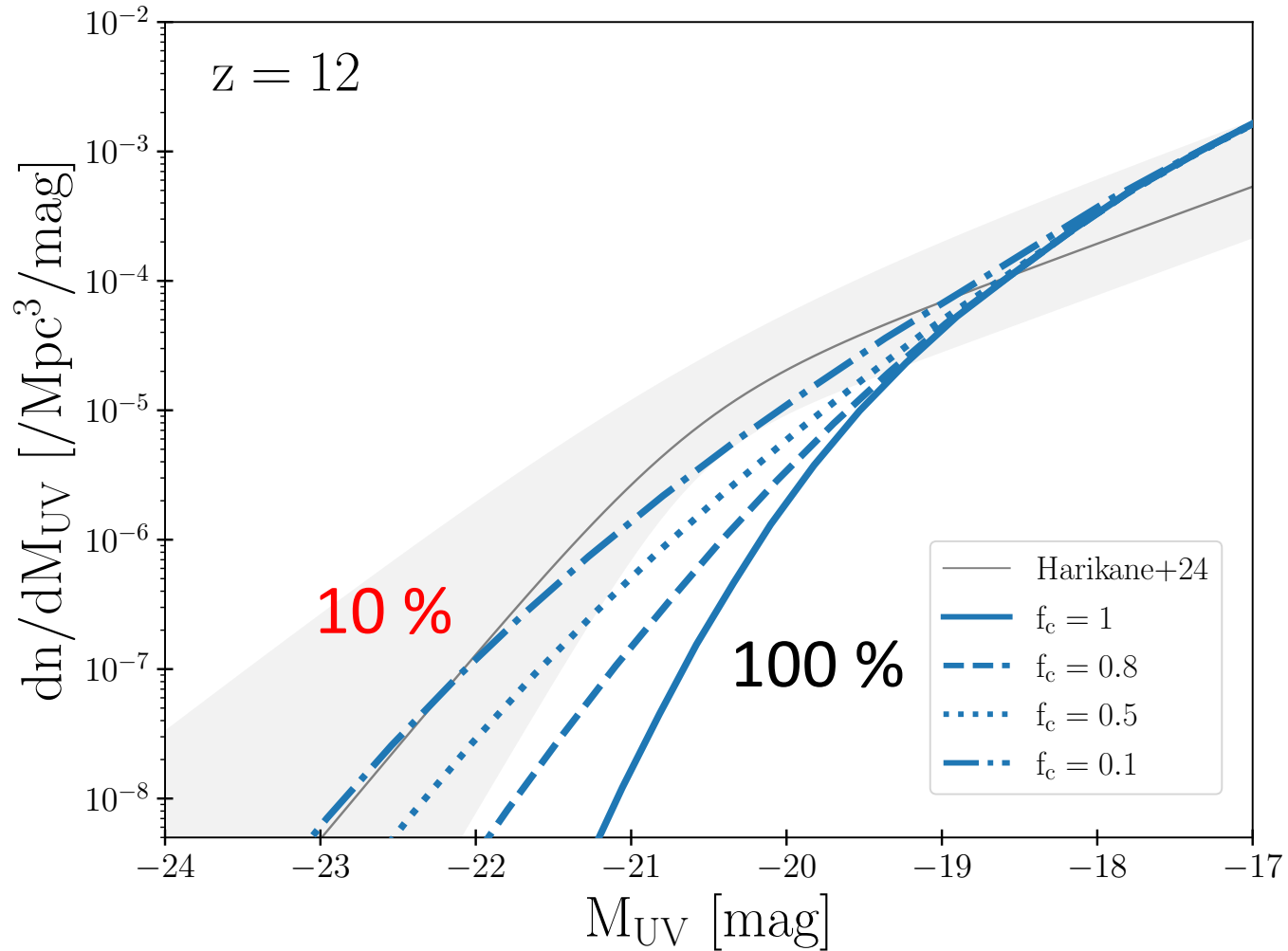
Hu (2019)



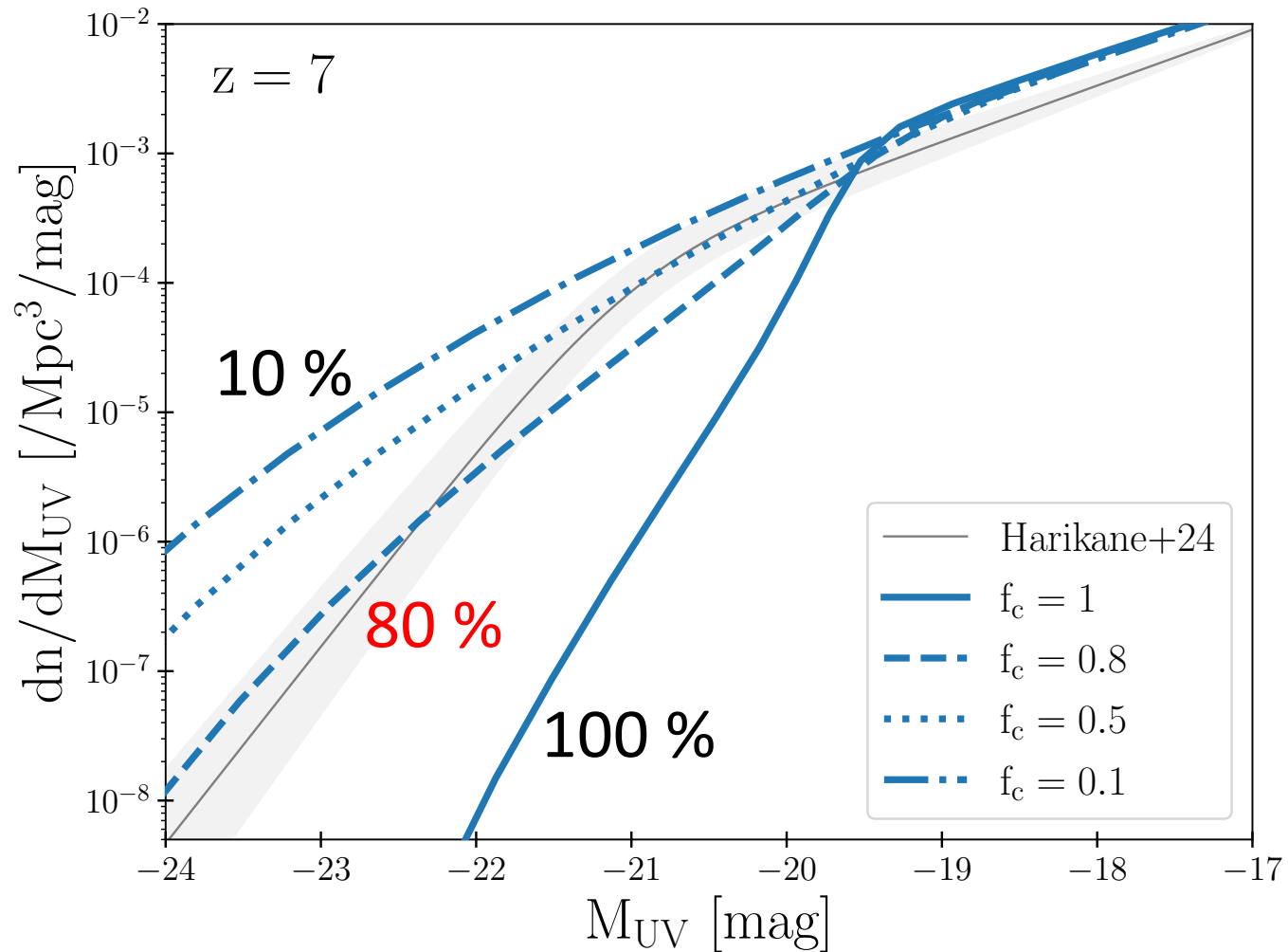
ダストに隠されていない星の割合

Narayanan+(2019)

Dust covering fraction



UV LF at $z \sim 7$



まとめ

- ✓ 初代銀河に特化した化学進化モデルを構築し、JWSTによる最新の遠方銀河観測を多角的に検証した。
- ✓ ガス流入の空間的広がりをビリアル半径に比例させると、 $z > 5$ 銀河のサイズを自然と説明できる。
- ✓ $z > 5$ 銀河の金属量を説明するには活発なアウトフロー（OFR $\sim 10 \times$ SFR）が必要。
- ✓ $z \sim 10$ 以降にダストへの重元素降着が活発になり、銀河は急激にdust-richになる。これは観測と整合的。
- ✓ Intrinsic UV LFは観測とよく合うが、ダスト減光を含めると合わない。ダストと星の空間分布の違いなどを考慮する必要がある。