

超遠方銀河の形成過程： 最新の理論と観測レビュー

矢島 秀伸

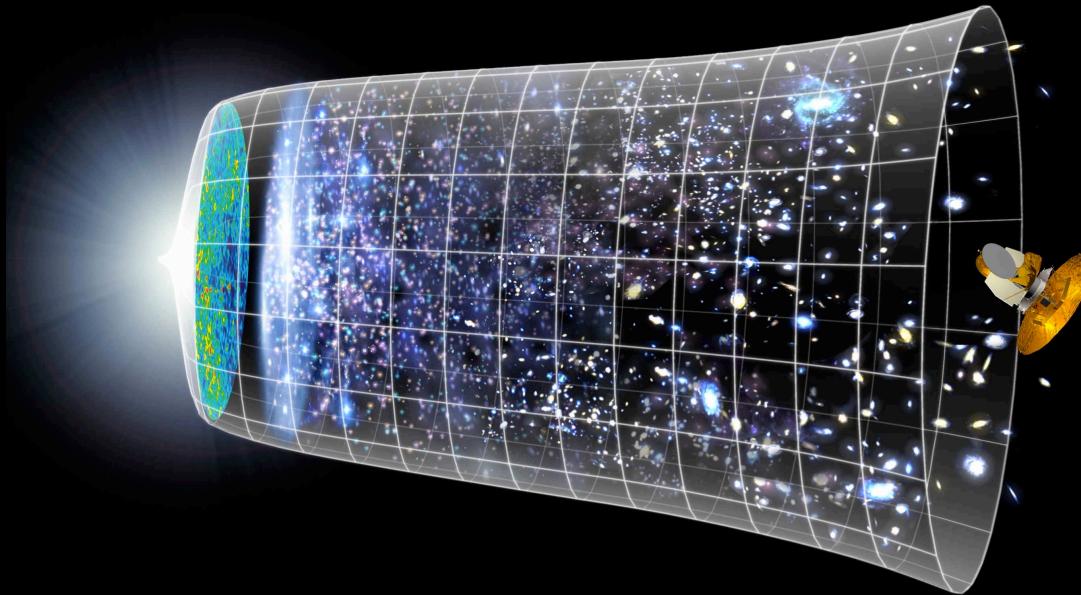
(筑波大学 計算科学研究センター)

トーク 35分、質疑 10分

アウトライン

- イントロ：超遠方銀河の観測状況
- イントロ：超遠方銀河の形成過程
- 1) 超遠方銀河形成におけるフィードバック
- 2) 超遠方銀河の重元素とPopIII星形成
- 3) 超遠方銀河と宇宙再電離
- 議論とまとめ

Super-distant galaxies

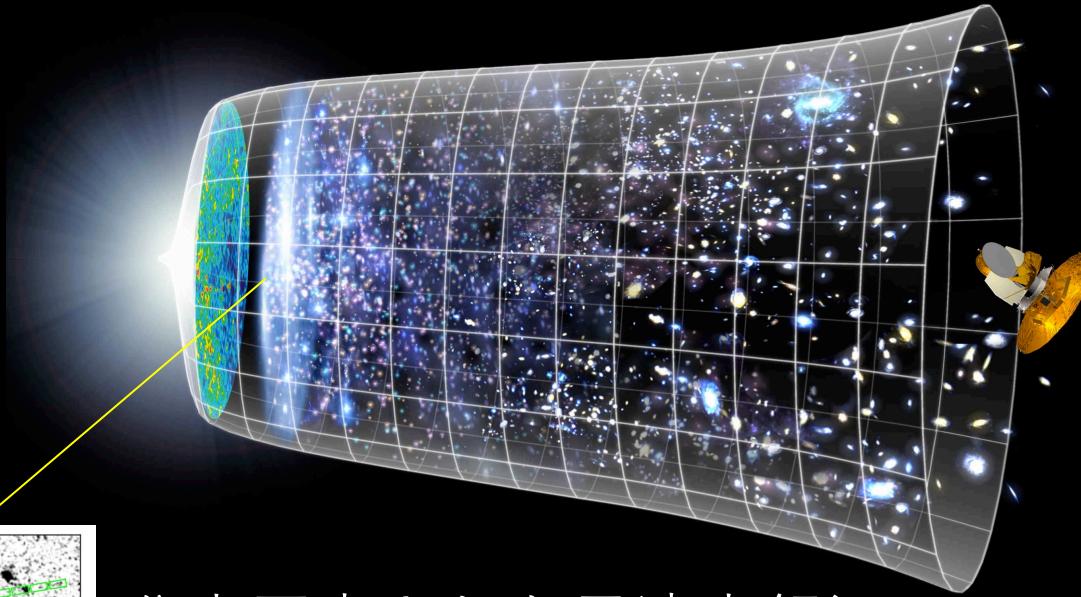


NASA/WMAP team

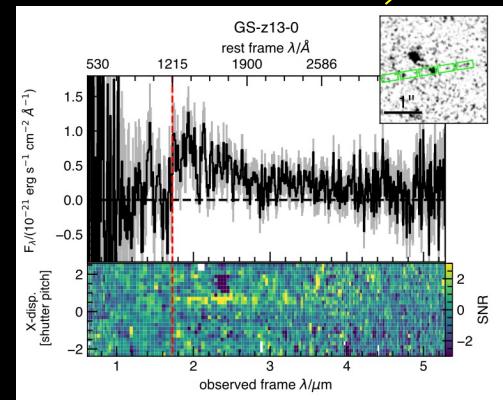
13.8 Gyr

Super-distant galaxies

NASA/WMAP team



$z=13.2$



分光同定された最遠方銀河

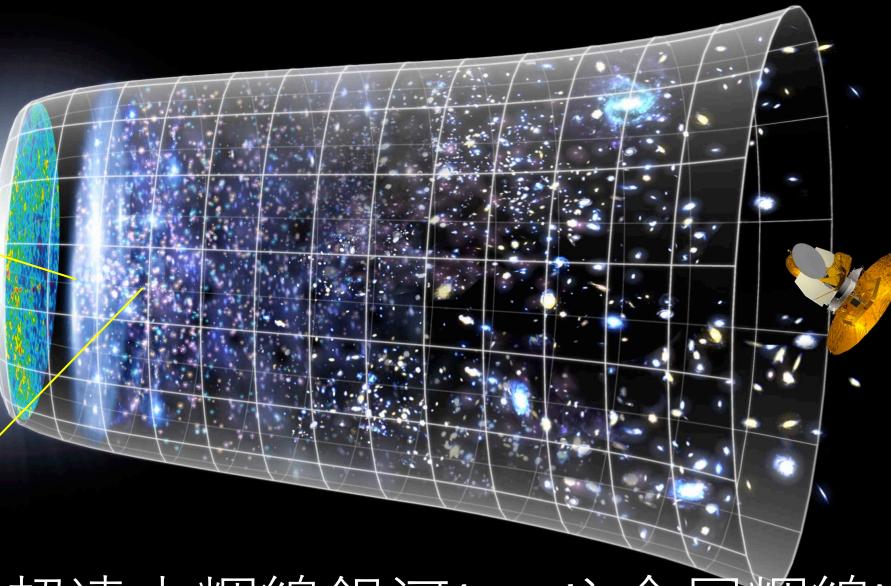
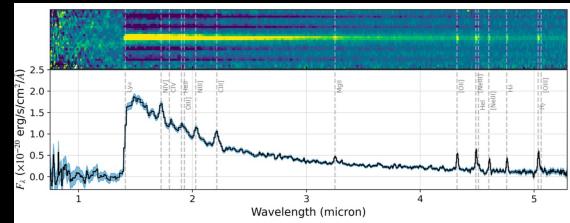
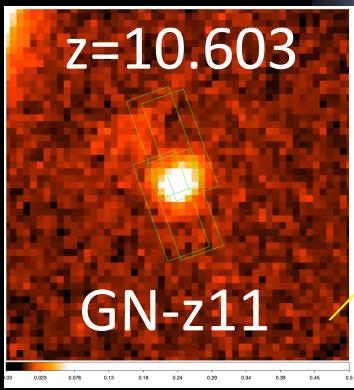
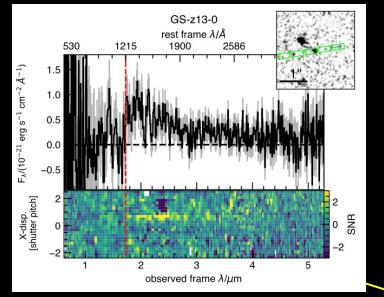
低質量：星質量 = $8.9 \times 10^7 \text{ M}_\odot$

低金属: $\log Z/Z_\odot = -1.69$

Curtis-Lake+23

13.8 Gyr

Super-distant galaxies



超遠方輝線銀河(Lyaや金属輝線)

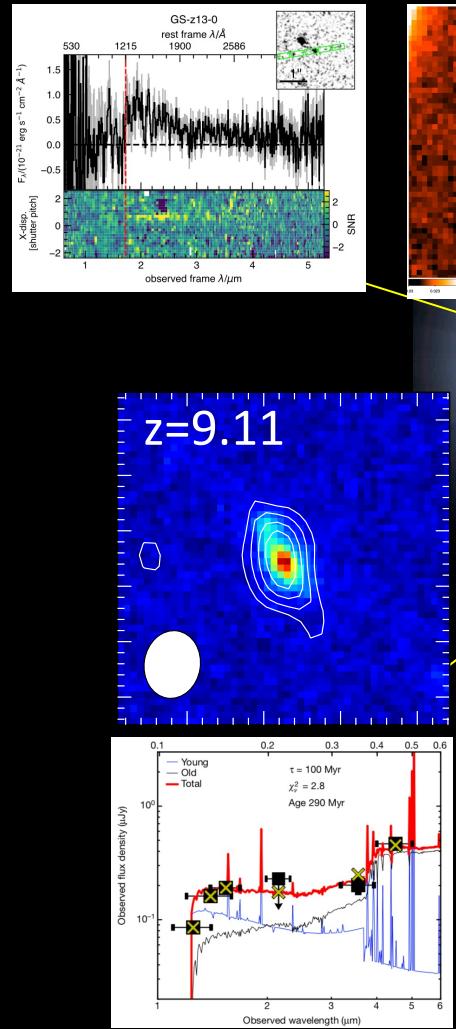
星形成率： $\sim 30 \text{Msun/yr}$, 広がったLy α ハロー
AGNやPopIII星団を含んでいる？

(Jiang+20, Bunker+23, Maiolino+23)

13.8 Gyr

Super-distant galaxies

NASA/WMAP team



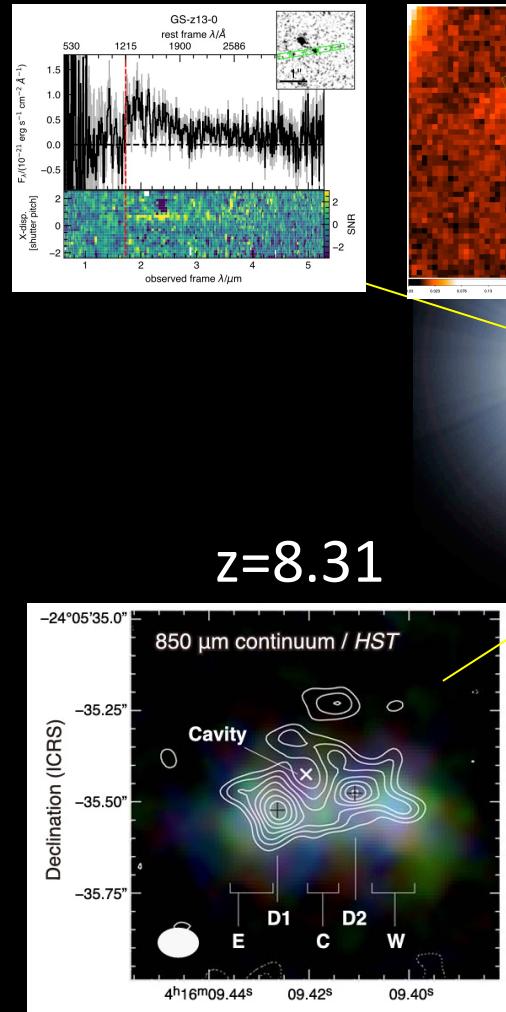
星形成のクエンチを経験？

$z=15$ あたりで一度スターバースト?
Rotation-dominatedな円盤構造を持つ
(Hashimoto+18; Tokuoka+22)

13.8 Gyr



Super-distant galaxies



$z=8.31$

Dusty clumpy 銀河

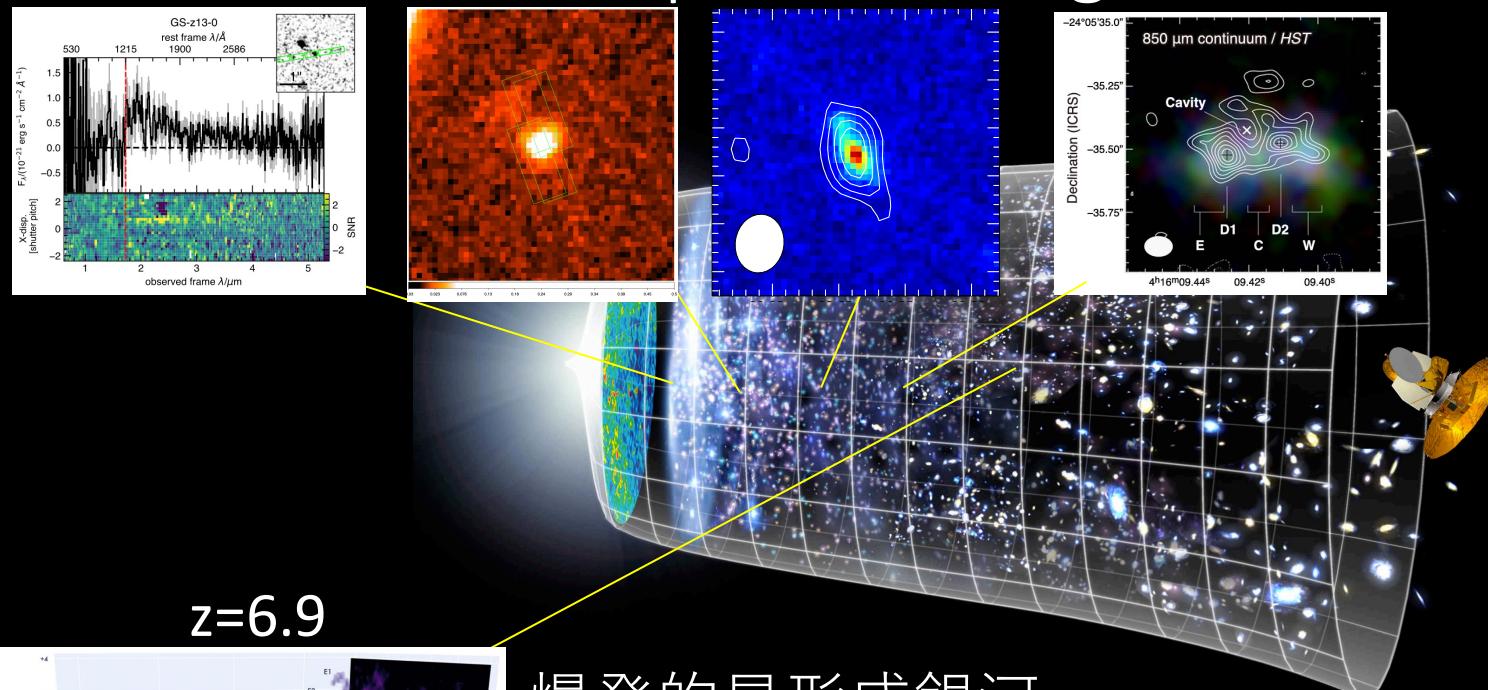
300pc以下のスケールで複数のダストクランプが存在
Supper-bubbleっぽいのもある

13.8 Gyr

NASA/WMAP team

Super-distant galaxies

NASA/WMAP team



$z=6.9$

爆発的星形成銀河

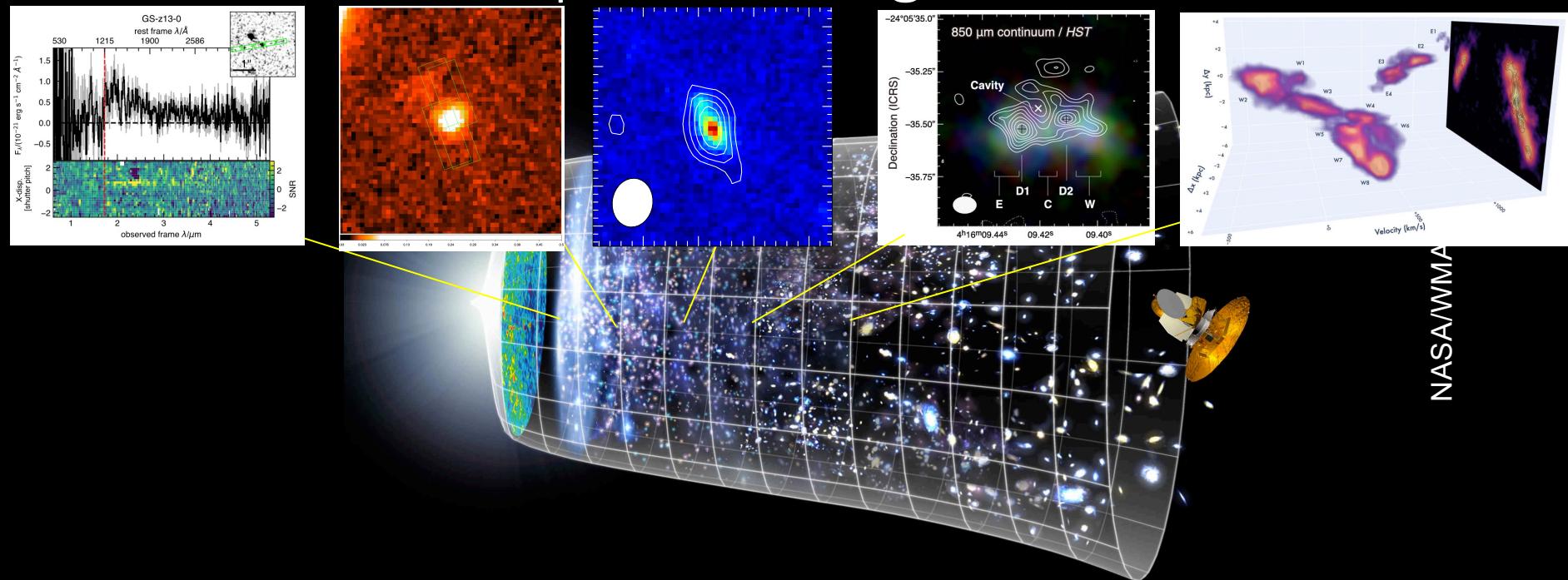
異常な星形成率 : $740 + 3640 \text{ Msun / yr}$

複数の大質量クランプ ($M_{\text{star}} \sim 3-5 \times 10^9 \text{ Msun}$) から構成

(Marrone+18; Spilker+22; Alvarez-Marquez+23)

13.8 Gyr

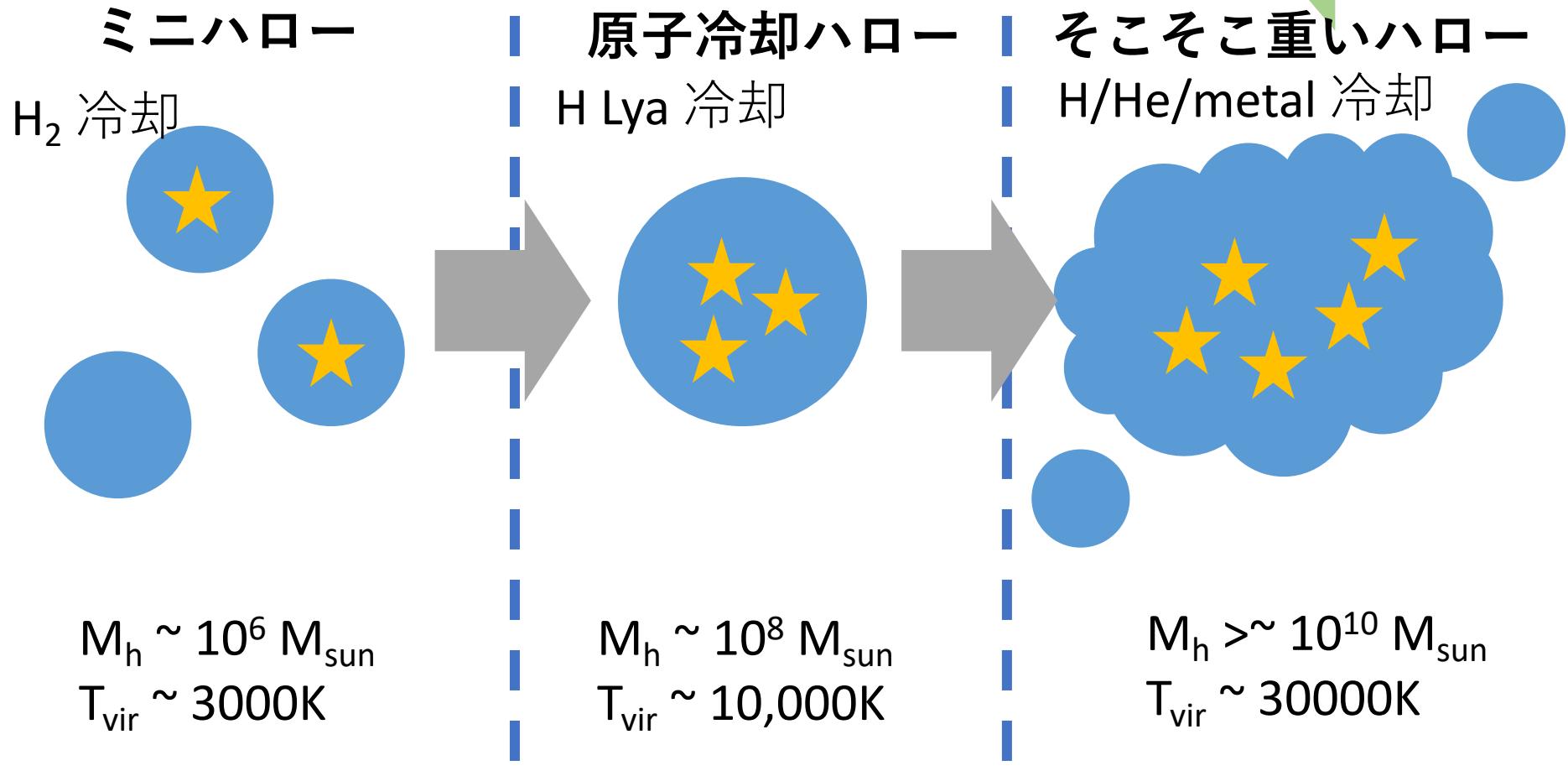
Super-distant galaxies



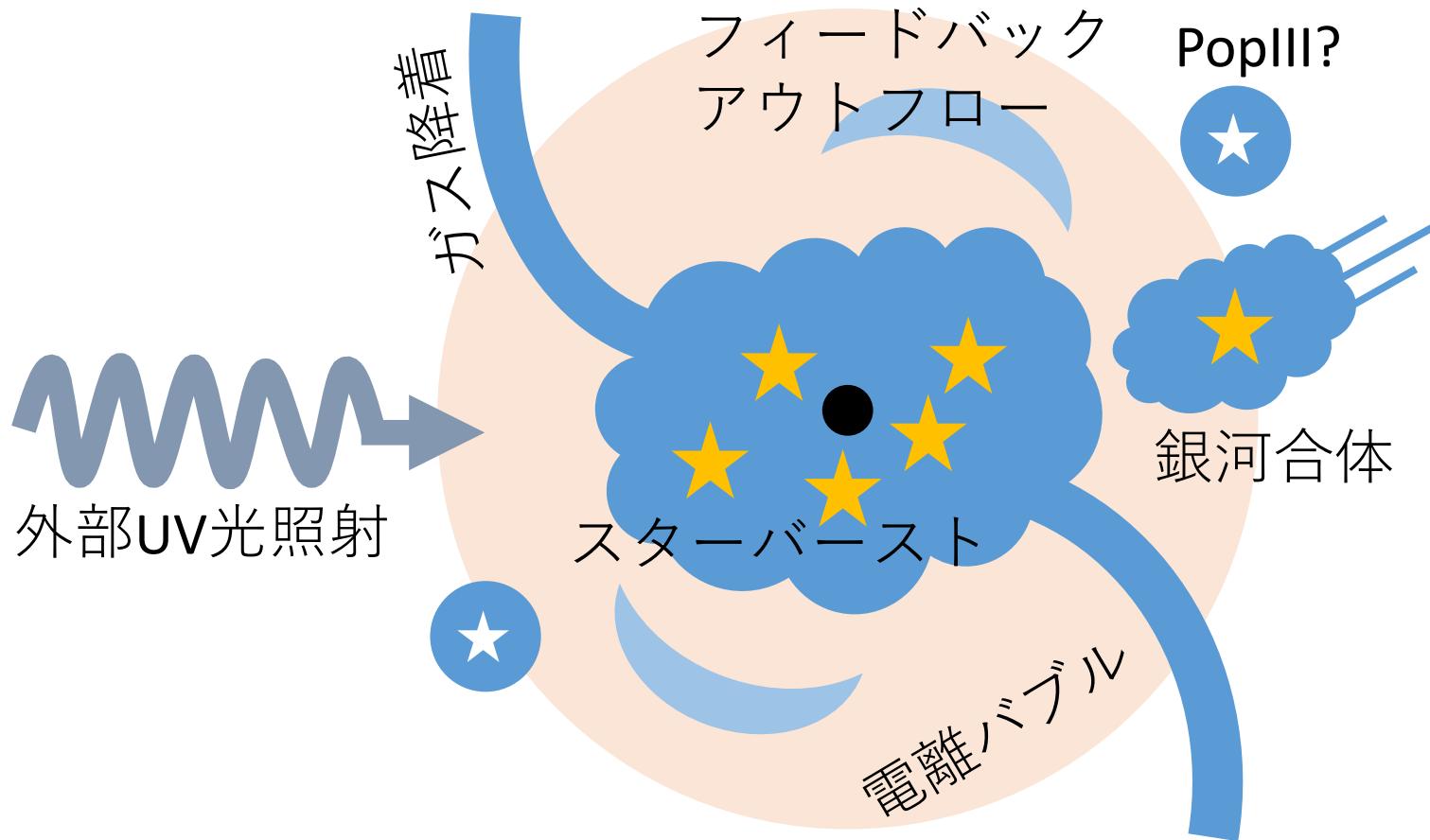
NASA/WMA

これらの多様な超遠方銀河はどのように
形成され進化したのか？

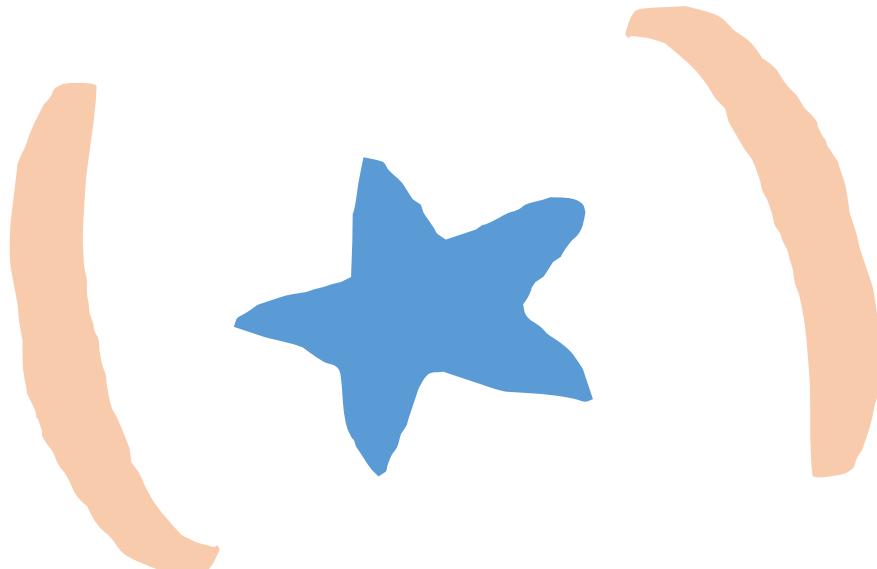
超遠方銀河形成過程



超遠方銀河形成過程



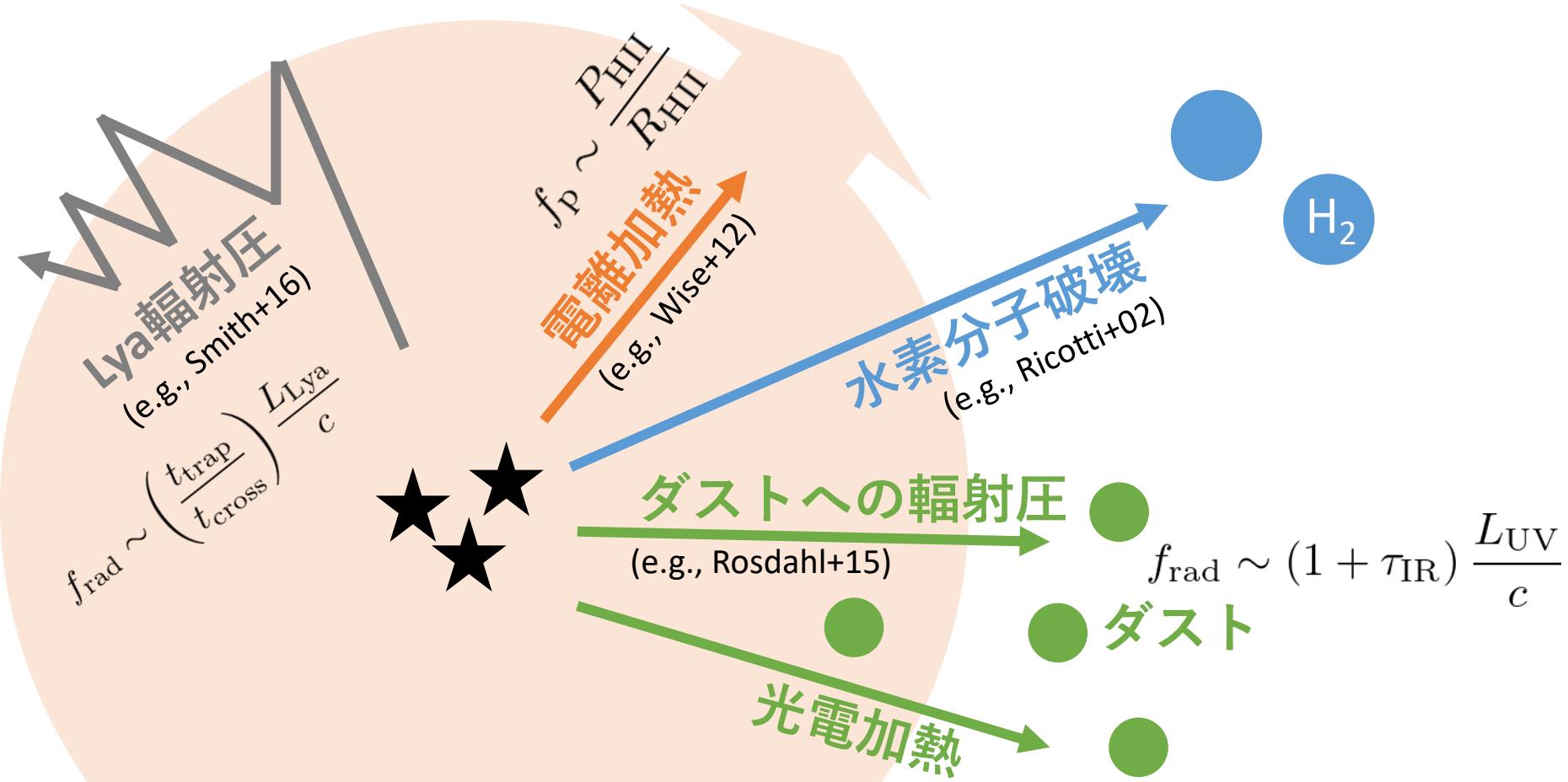
1. 超遠方銀河形成における フィードバック



銀河形成とフィードバック

- ① 輻射フィードバック
- ② 超新星フィードバック
- ③ AGN フィードバック

輻射フィードバック



超新星爆発フィードバック

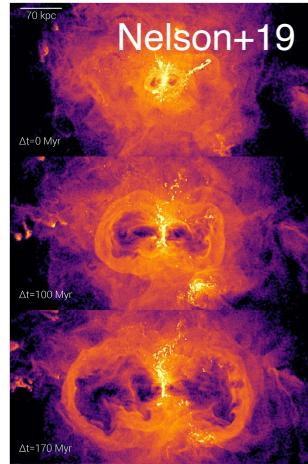
どうやって爆発エネルギー($\sim 10^{51}$ erg)を星間ガスの運動エネルギーを変換するか

①ガスを引っこ抜く

Springel+03

Kick速度、
Mass loading
などパラメータ

kick



④1次元点源爆発の結果を使う

Kimm+14, 15
Hopkins+14

kick

②冷却を手で止める

Stinson+06

シミュレーションの歴史

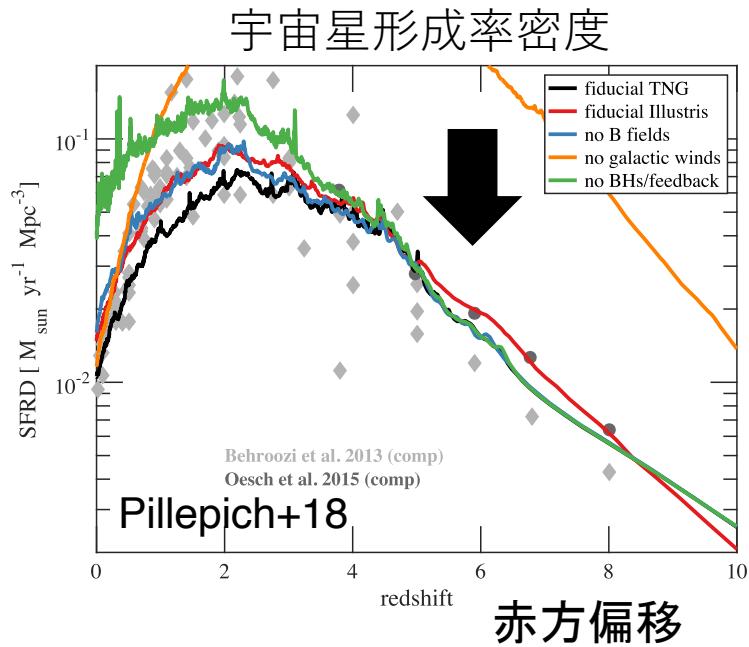
Thermal

③小さい領域に高温バブルを入れる

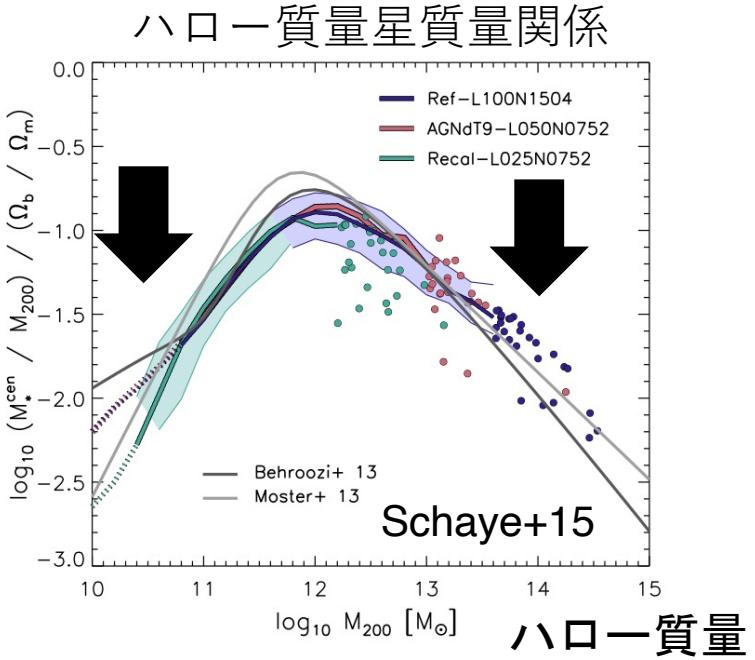
Dalla Vecchia+12

これまでの銀河シミュレーションのパラメータチューニング (JWST以前)

星形成率密度



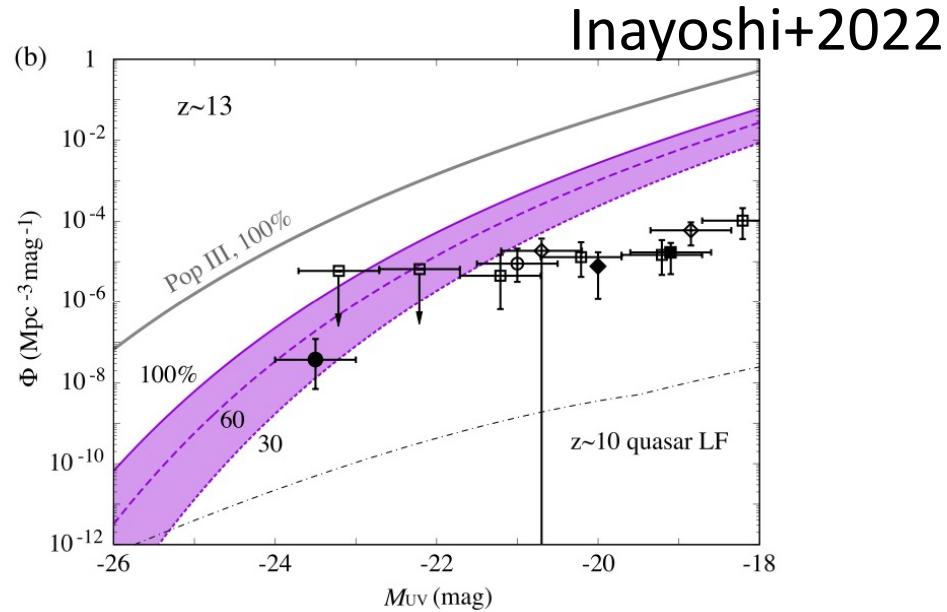
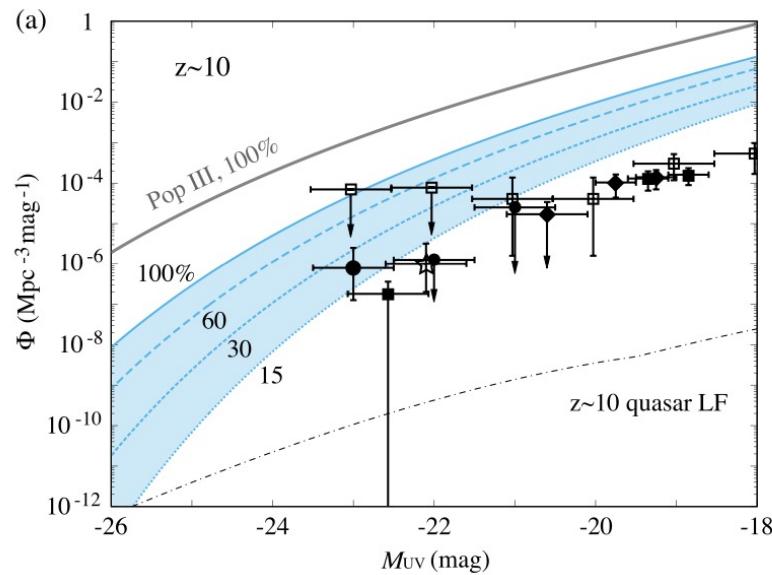
星質量/ハロー質量



昔: over cooling おきがち、星作りすぎ

今: がっつりフィードバックを効かせる

JWST以後 超遠方銀河の高い星形成効率?



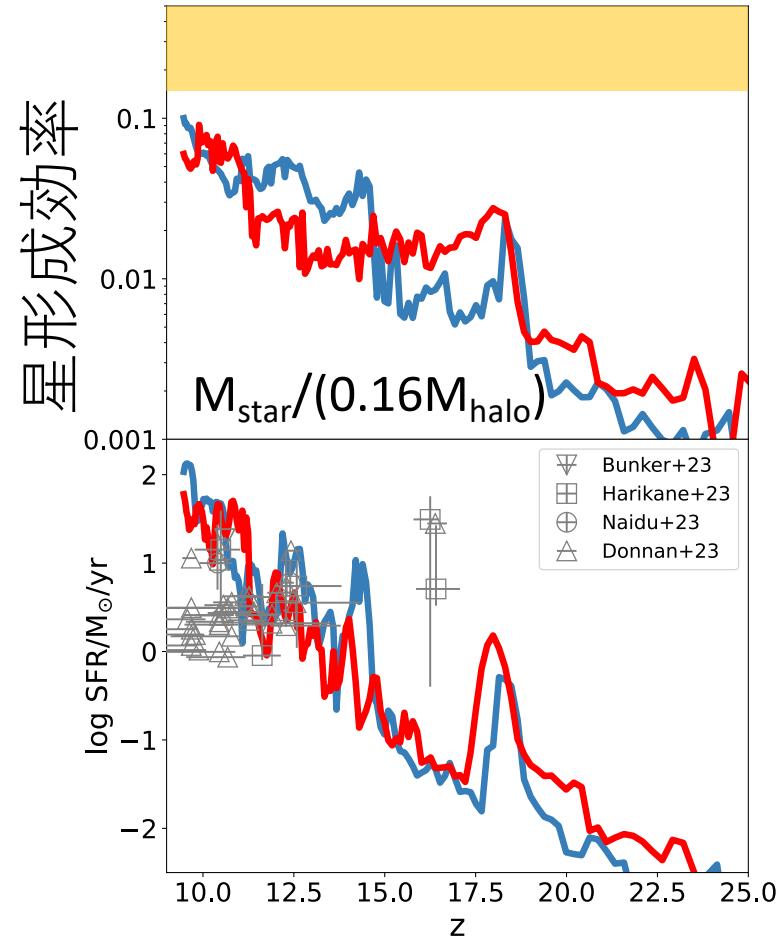
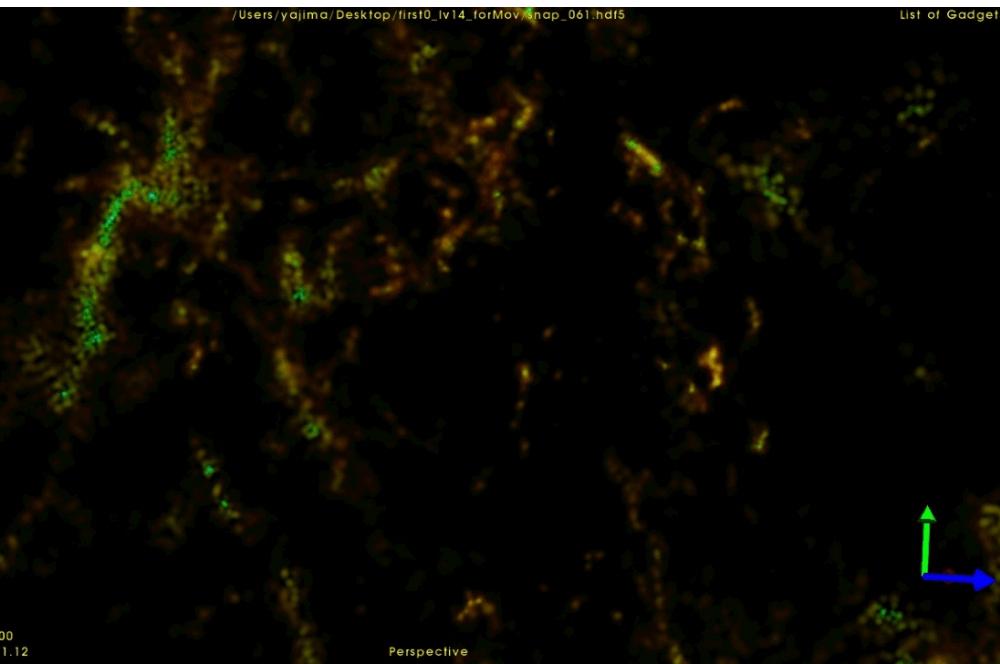
Harikane+2023の分光サンプルだけでもそこまでは変わらなさそう

JWSTで検出された明るい銀河は高い星形成効率(>15%)?

初代銀河シミュレーション

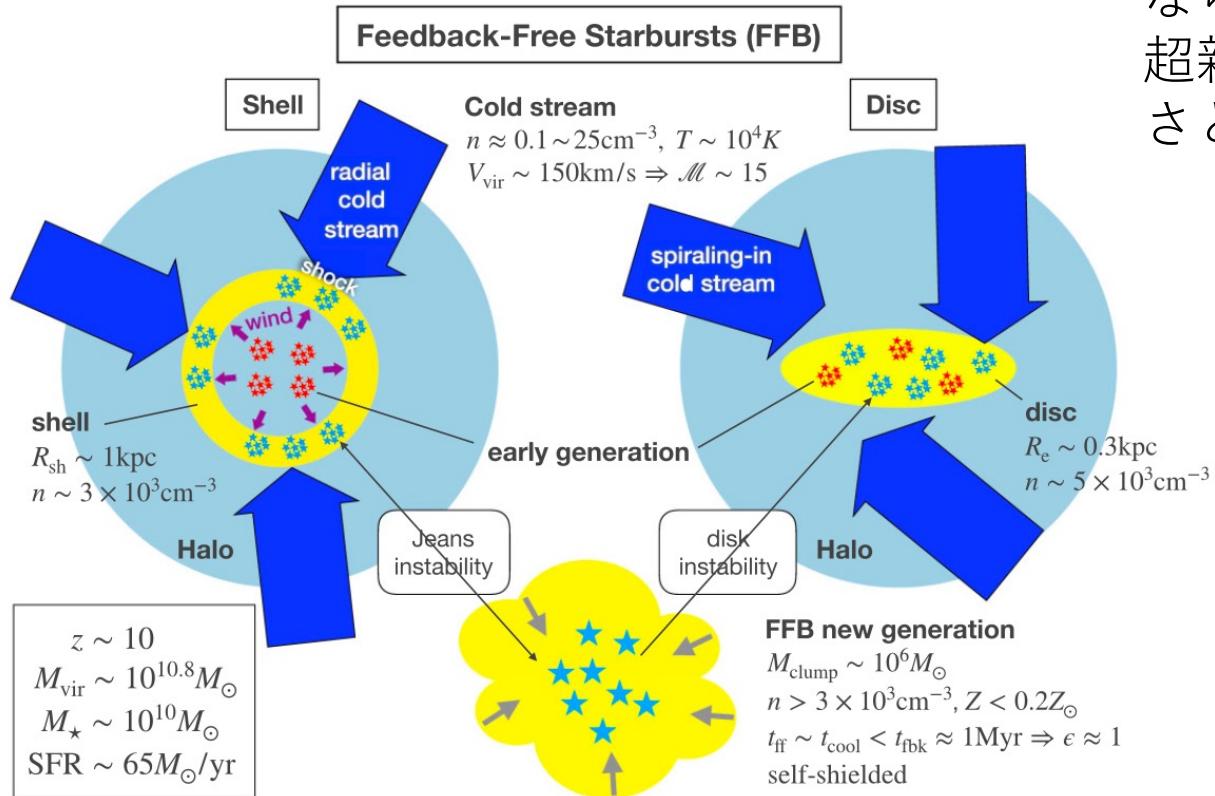
Yajima+(2023)

原始銀河団領域に着目した
初代銀河シミュレーション



Feedback-Free Starbursts (FFB)?

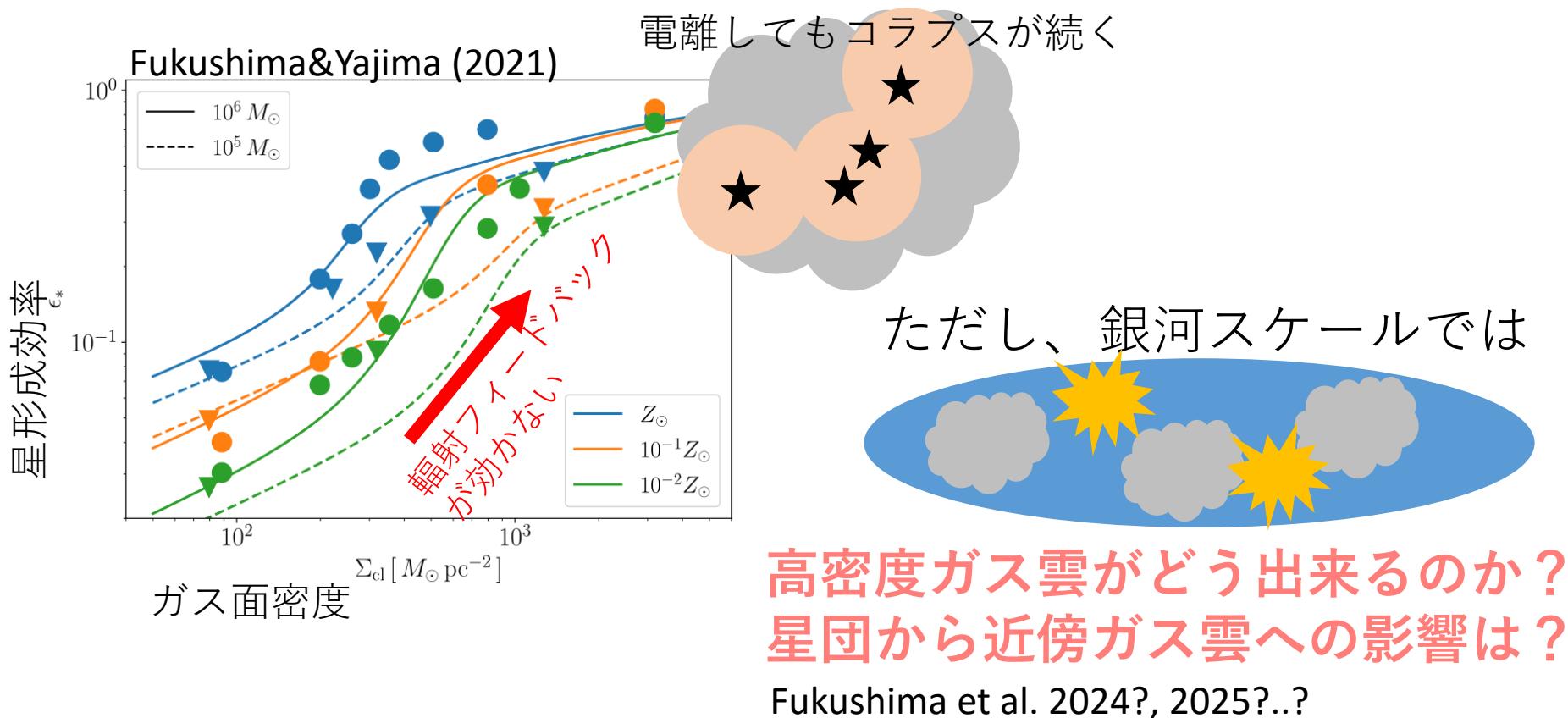
Dekel et al. (2023)



高密度ガス($n_H > 3000/\text{cm}^3$)
なら自由落下時間も短く
超新星が起きる前にさっ
と星に変換出来る

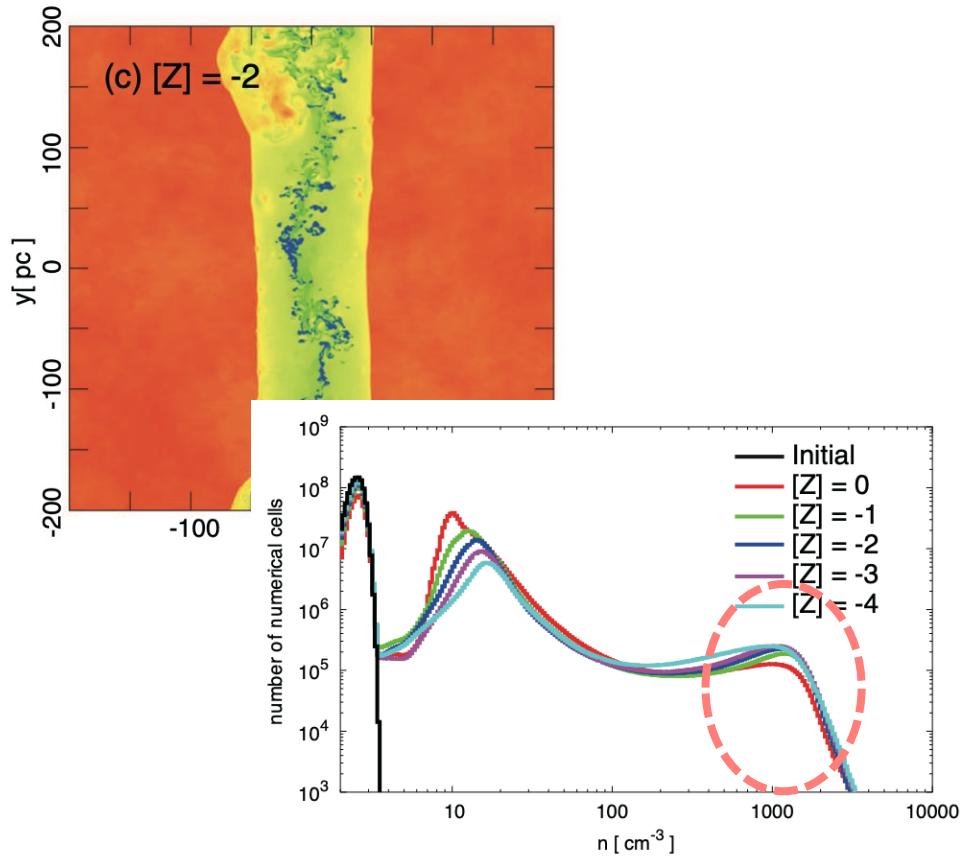
高密度分子雲での星団形成

Fukushima&Yajima (2021, 2022, 2023)

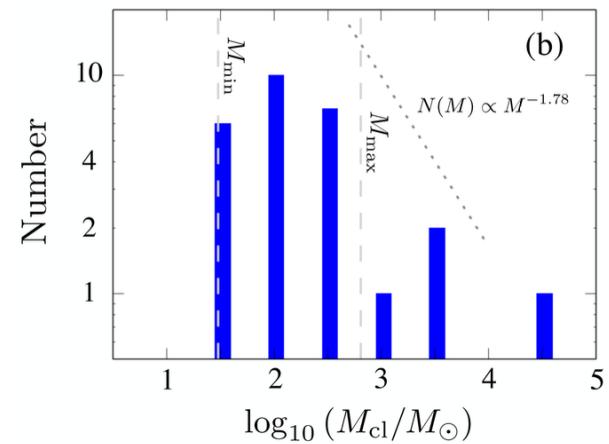
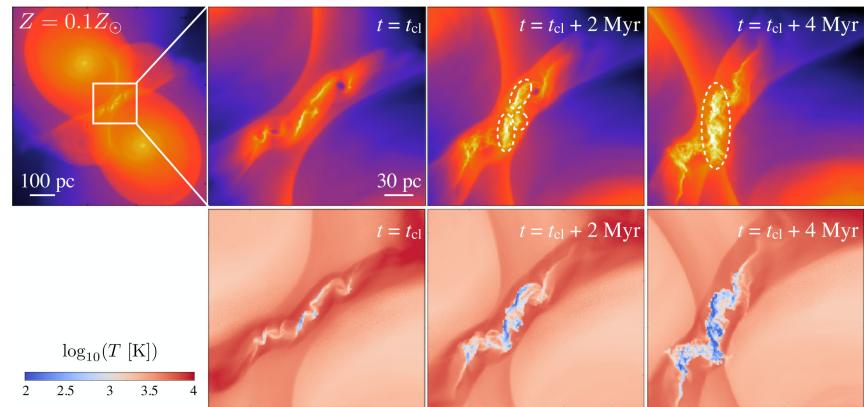


高密度ガス雲形成（熱的不安定）

Inoue&Omukai (2015)



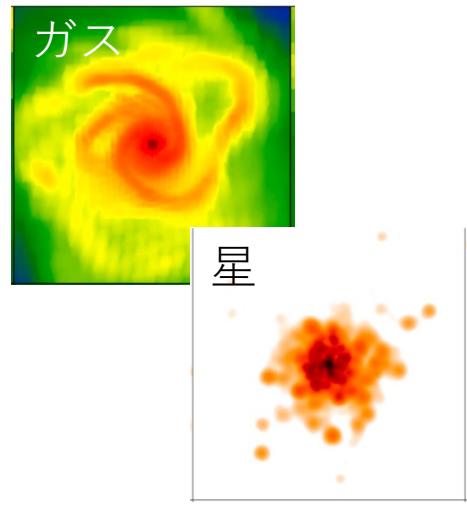
Arata,Yajima,Nagamine (2018)



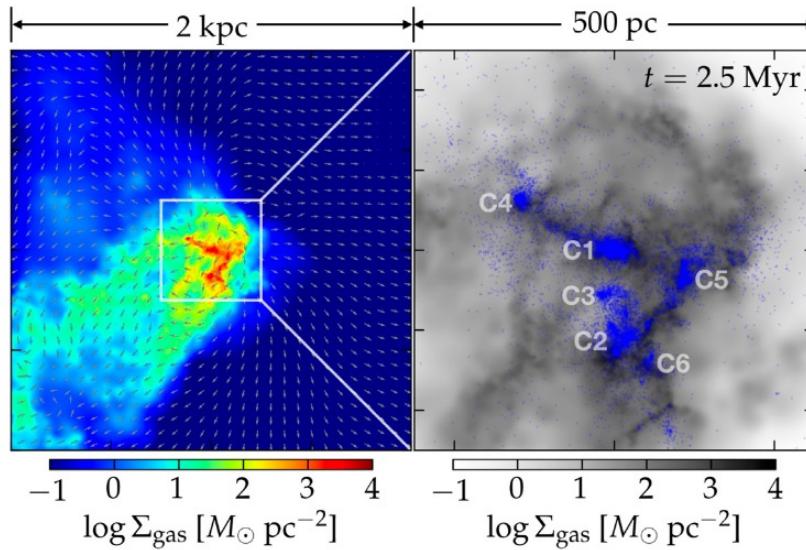
高密度ガス雲形成（重力不安定？）

高分解能宇宙論的流体計算で高密度ガス雲・高密度星団が形成

Ricotti+(2016)



Ma+(2020)



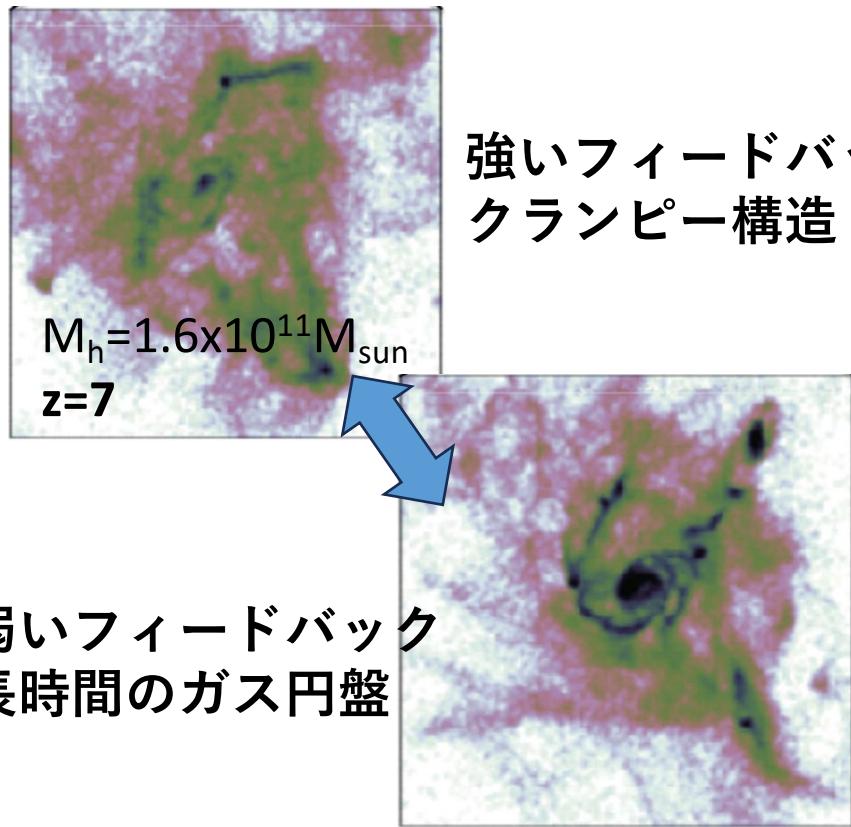
球状星団likeな
ものが複数形成

28%はbound
Star clustersとし
て形成らしい

ただし、星形成効率は2%ぐらい..

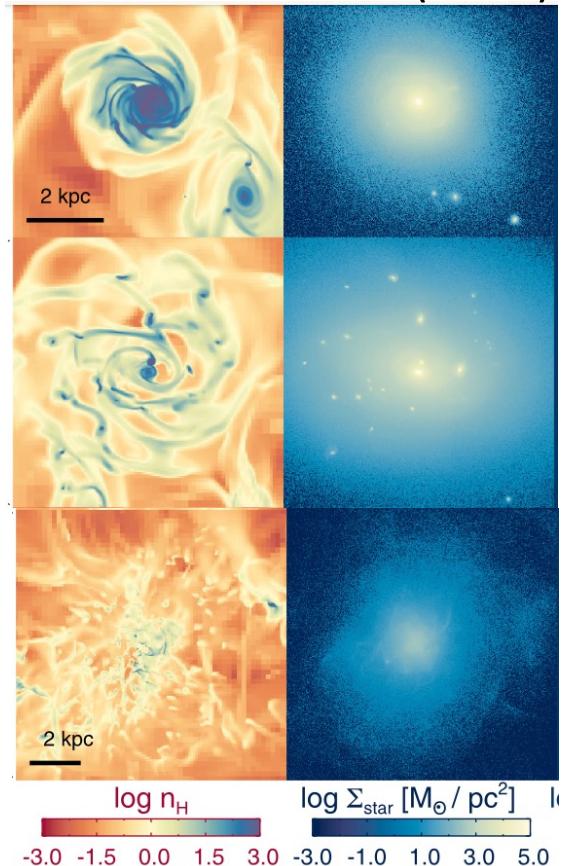
フィードバック効率で銀河形態も変化

Yajima+(2017)



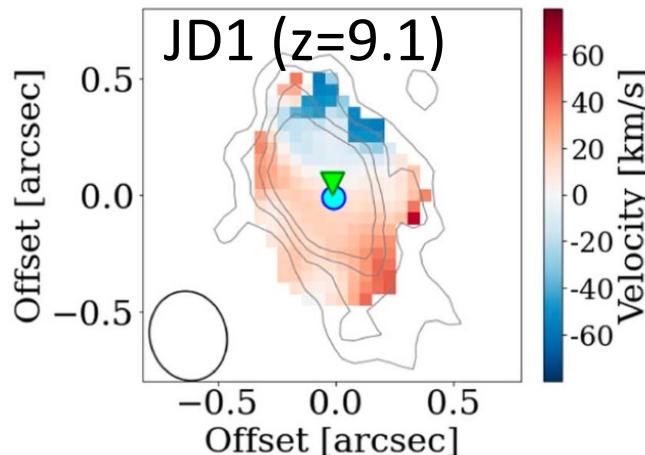
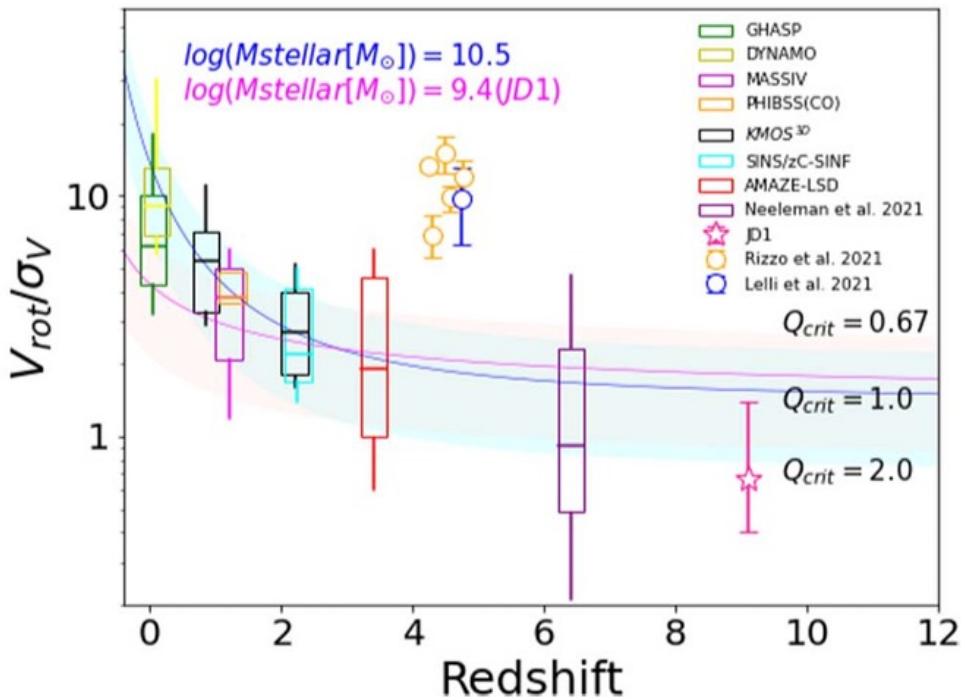
熱的
なし
Kinetic (強しい)

Kimm+(2015)



遠方銀河の銀河形態

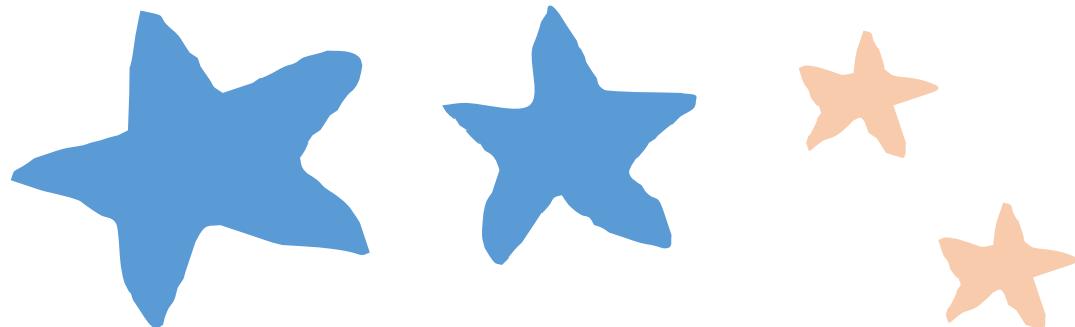
GN-z11はdisky?



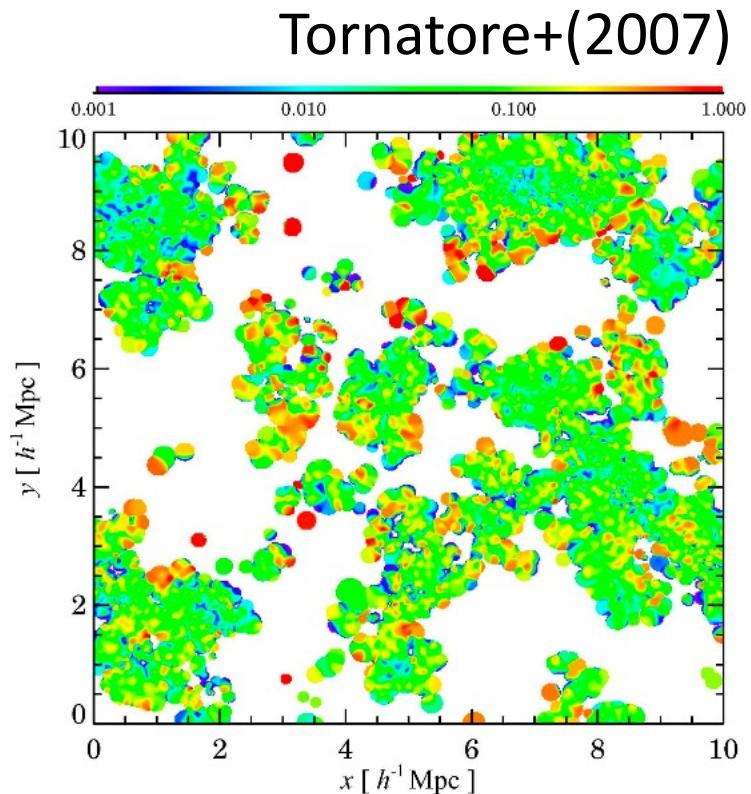
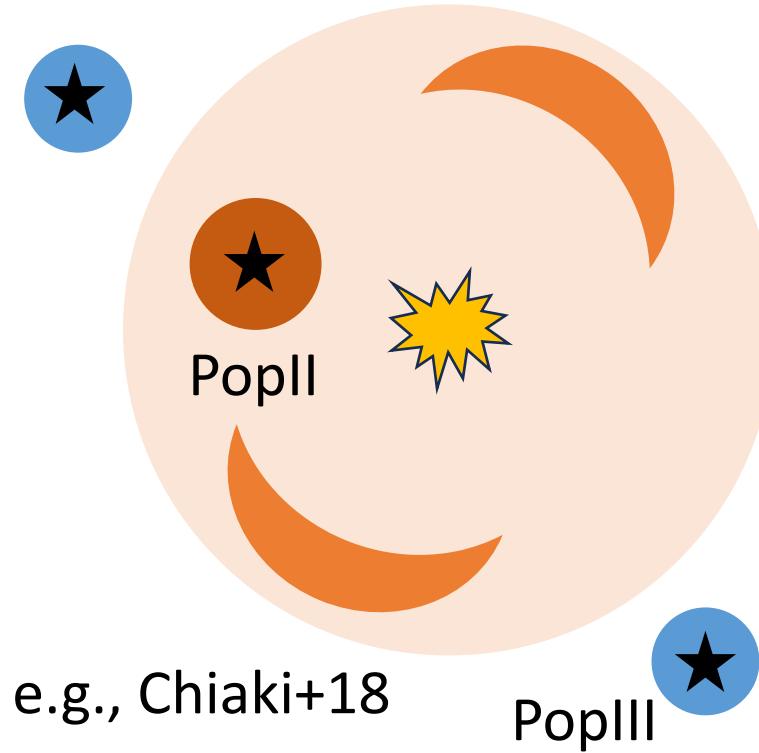
Tokuoka+22

星形成効率 × 銀河形態の議論が今後重要？

2. 超遠方銀河の重元素と PopIII星の形成

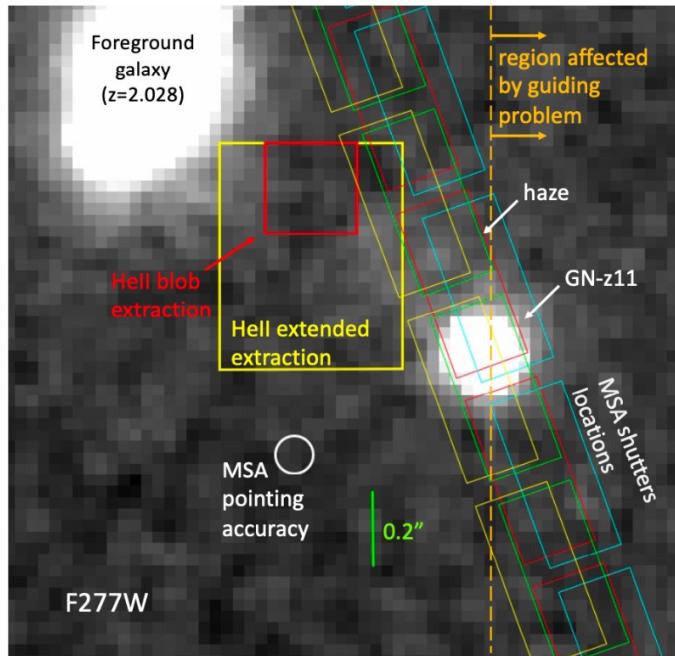


Pop IIIからPop IIへのtransition



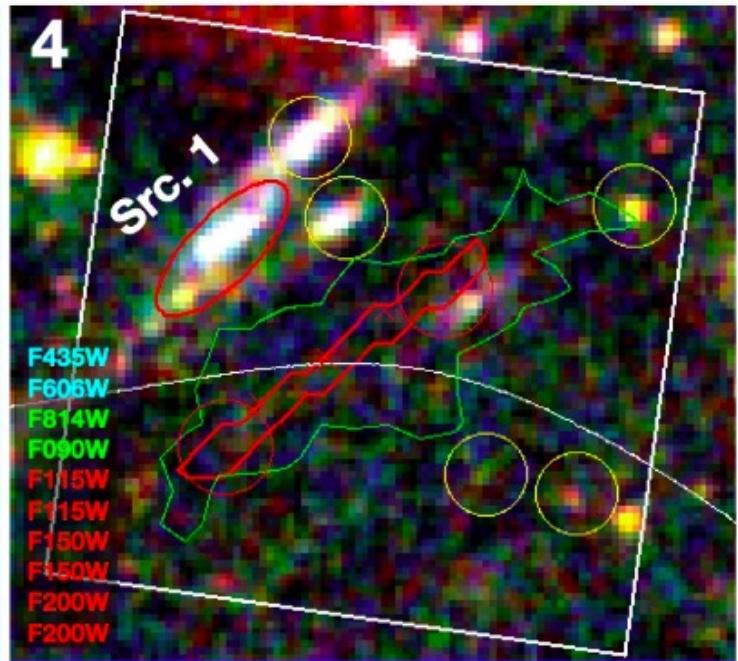
PopIII星団 in 超遠方銀河？

Maiolino+(2023)



GN-z11にHell clumpが検出、PopIII?

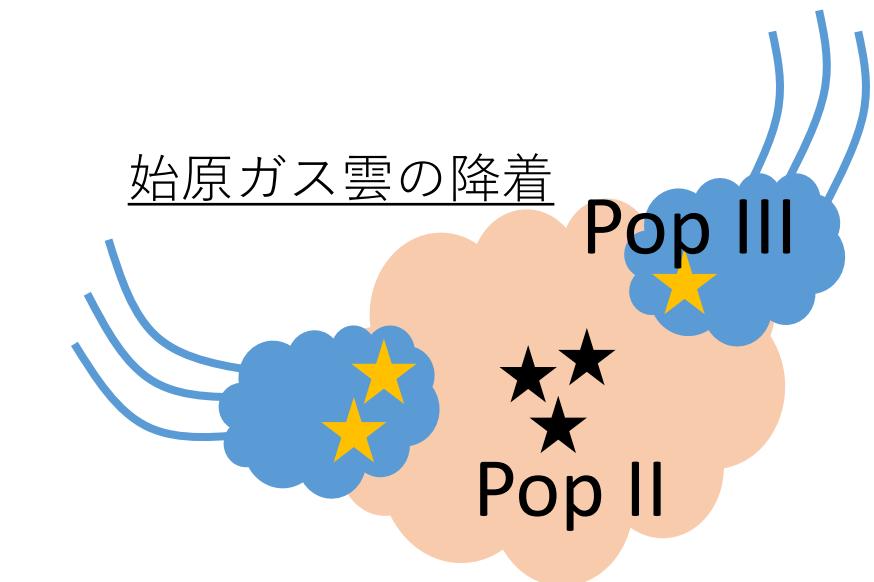
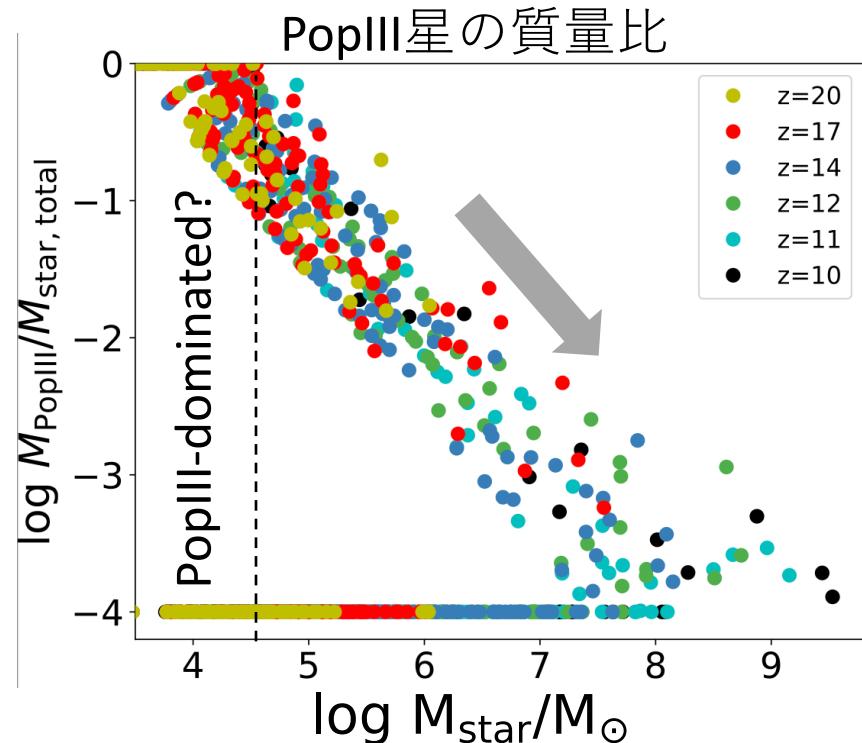
Vanzella+(2023)
JWST + HST



レンズされた星団から強いLy α 輝線、
PopIII?

初代銀河内に種族III星はいるのか？

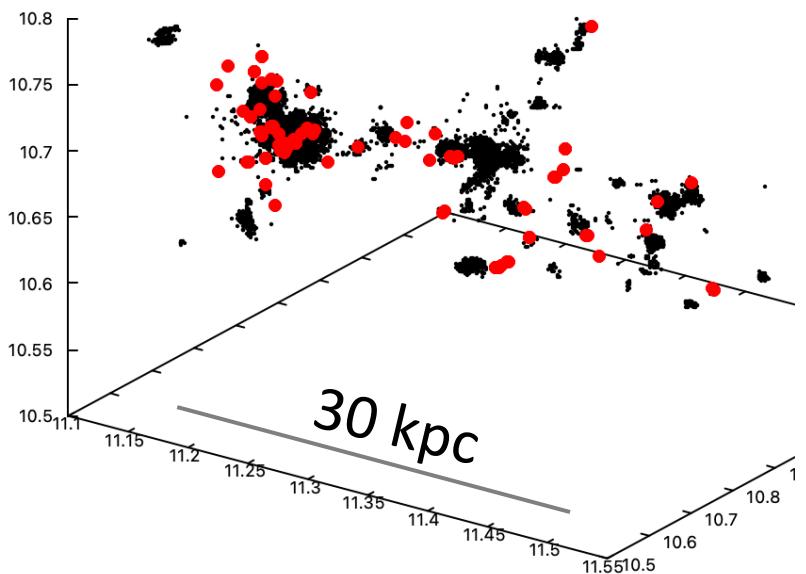
(Yajima+2023)



種族III星割合は銀河質量とともに
スムーズに減少
 $M_{\star} \sim 10^6 M_{\odot}$ のシステムでは1%程度

種族III星の分布

- Pop II
- Pop III



$z=10$

$f_{\text{popIII}} = 0.017\%$

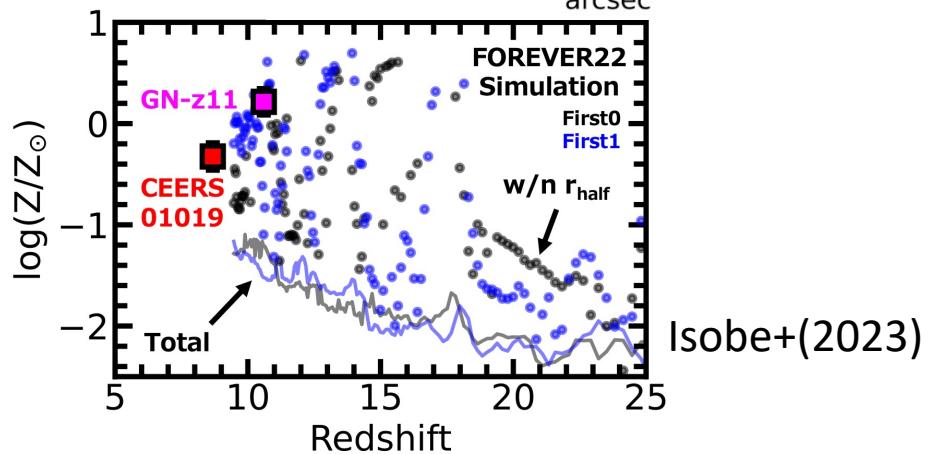
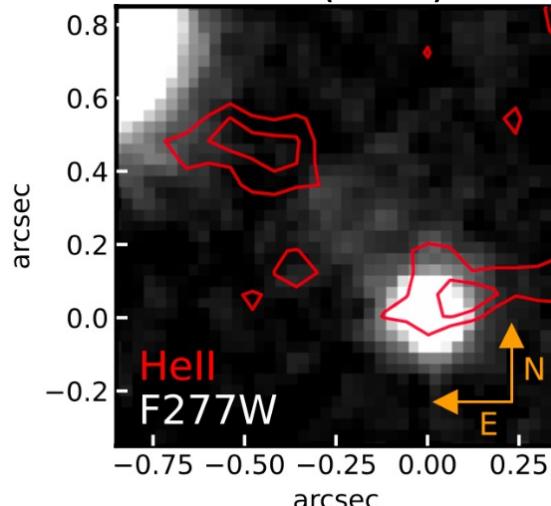
$\text{SFR} = 41.5 \text{ } M_{\text{sun}}/\text{yr}$

$M_{\text{star}} = 2.8 \times 10^9 \text{ } M_{\text{sun}}$

$M_{\text{POPIII}} = 4.8 \times 10^5 \text{ } M_{\text{sun}}$

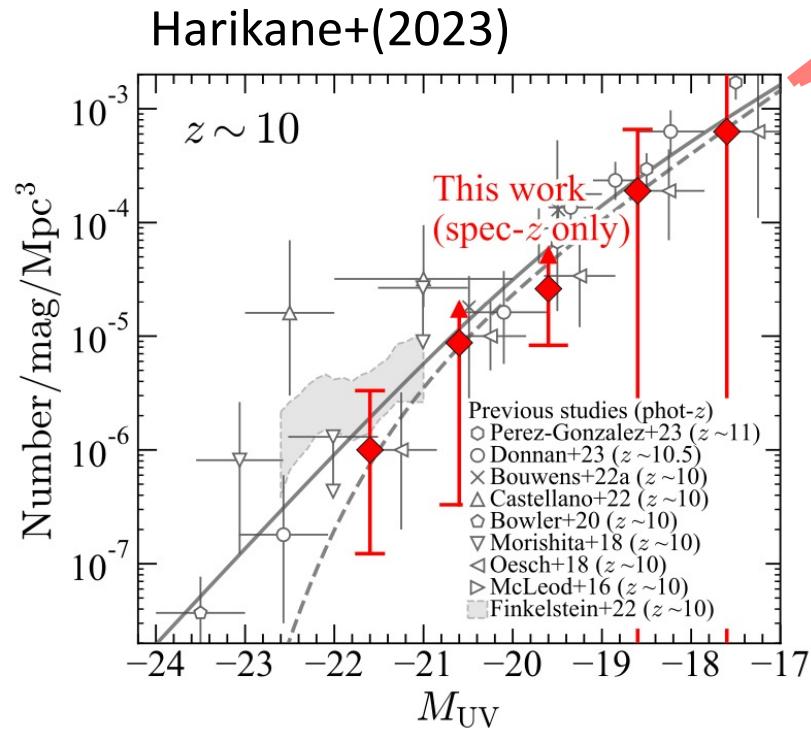
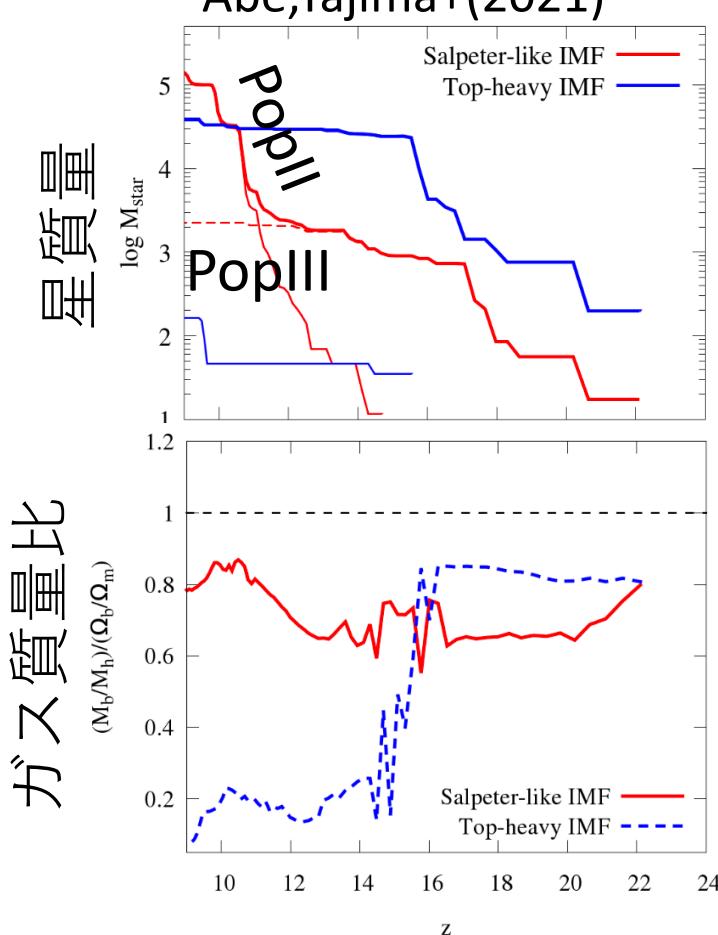
$Z = 6.6 \times 10^{-2} Z_{\text{sun}}$

Maiolino+(2023)



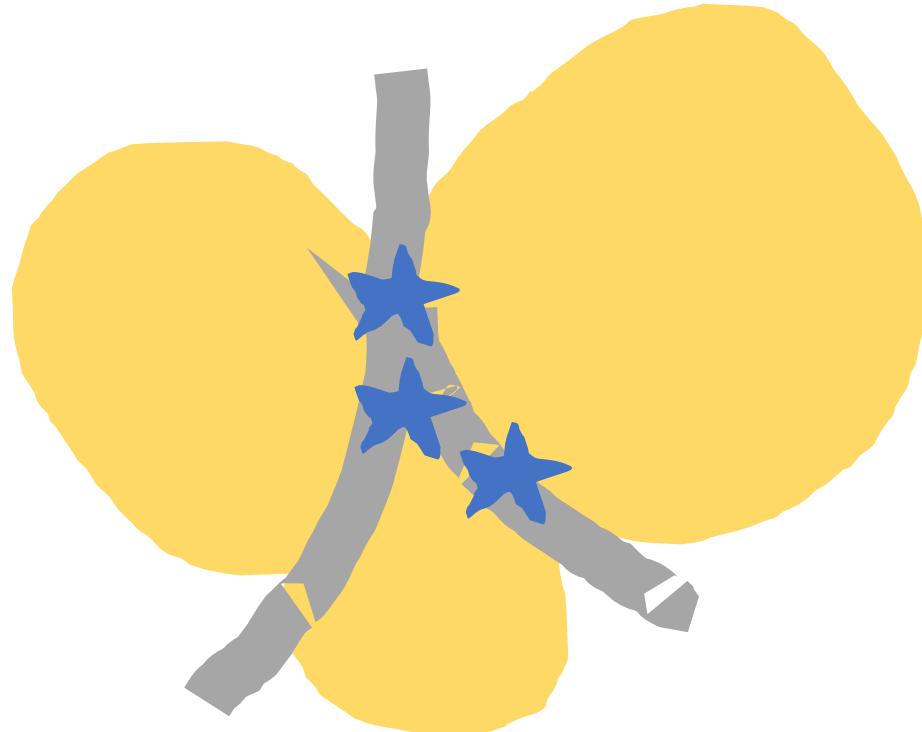
Isobe+(2023)

PopIII IMFと超遠方銀河形成



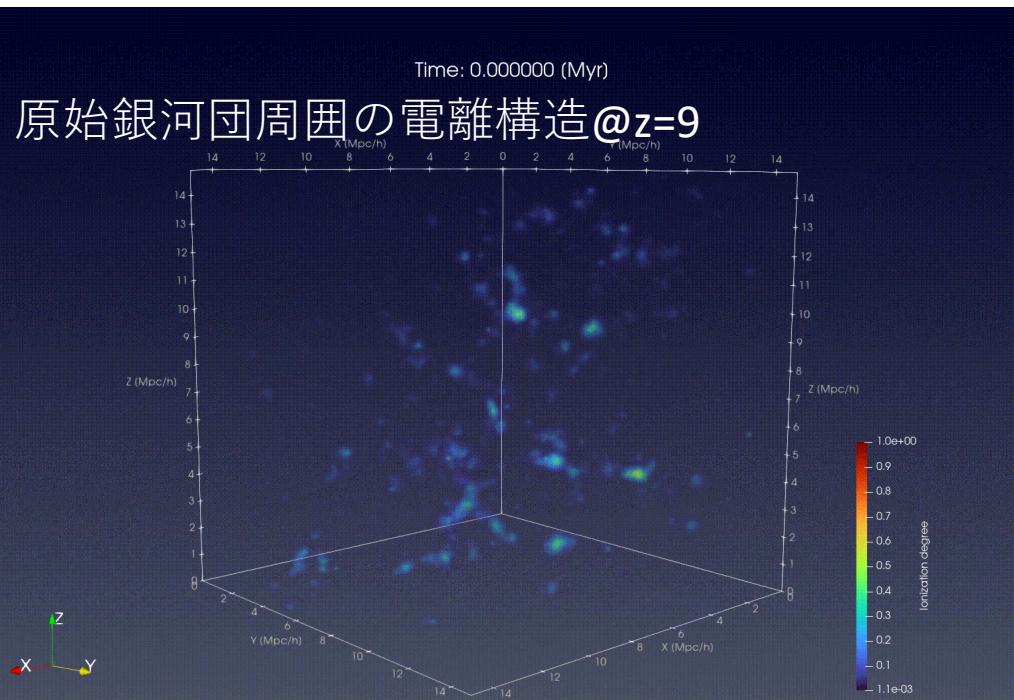
PopIII IMFの違いによって初代銀河の
ガス質量・SFRが大きく変化
光度関数のfaint-endに痕跡が？

3. 超遠方銀河と宇宙再電離



宇宙再電離と銀河形成

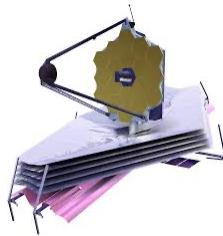
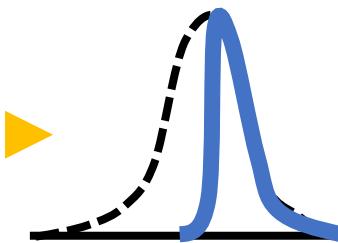
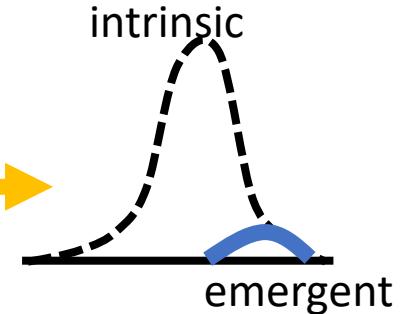
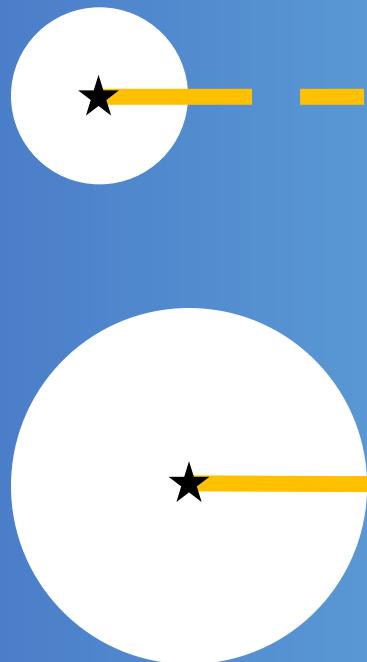
Soga,Yajima+ in prep.



- 1) QSO GP test: 再電離は $z \sim 6$ で完了 (Fan+06)
- 2) CMB観測: 再電離は $z \sim 8$ ごろ起きた (Planck)

一方、
電離源は何か？
電離史はどうだった？
どういう電離バブル？
はずっと分かっていない

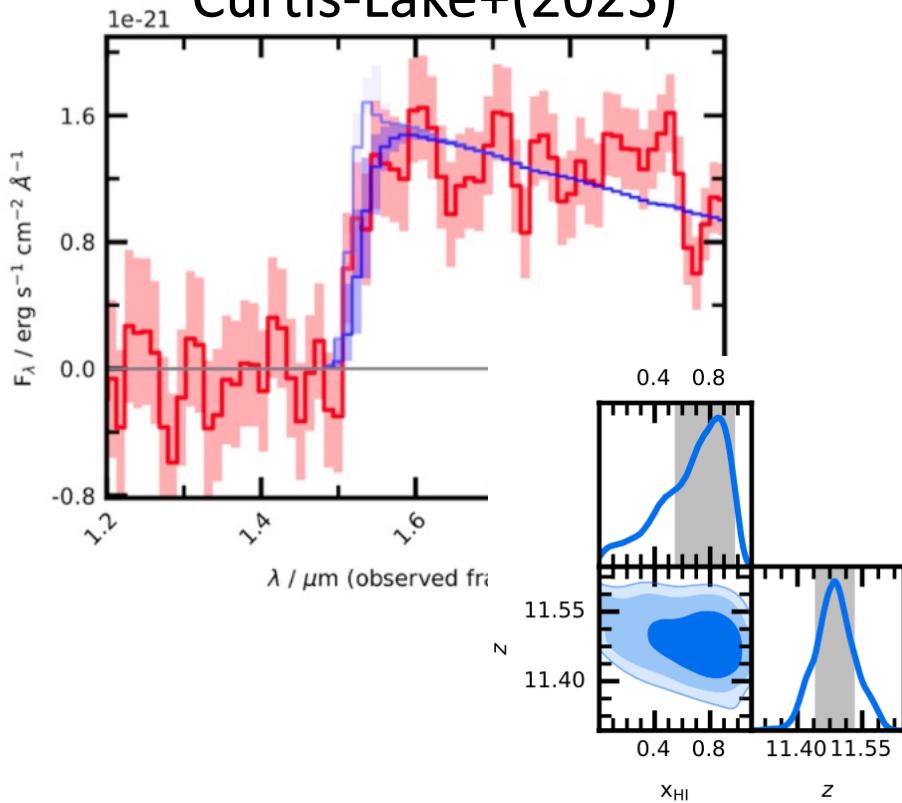
最近のJWST分光観測で進展? Ionized bubble and Ly α transmission



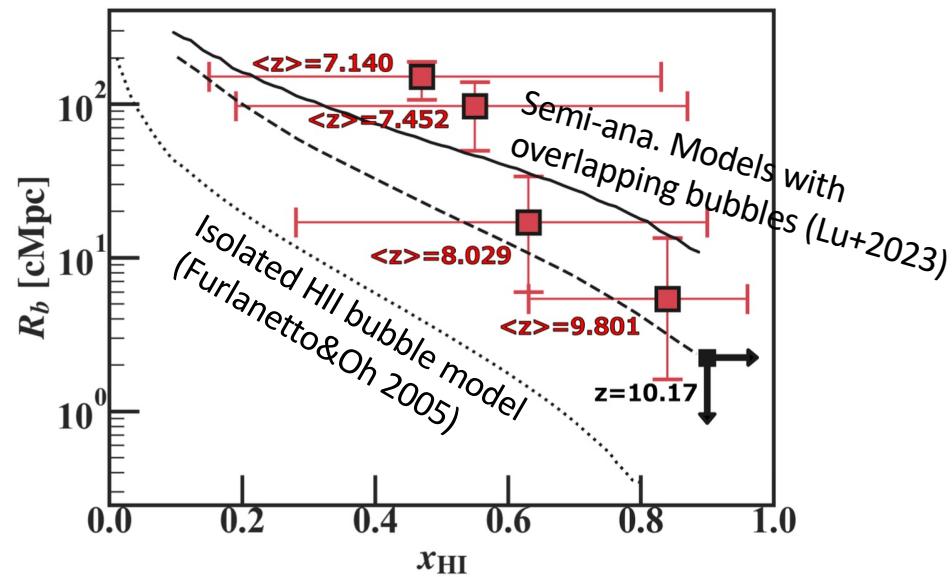
Ly α line profile

Damping wingによる再電離研究

Curtis-Lake+(2023)



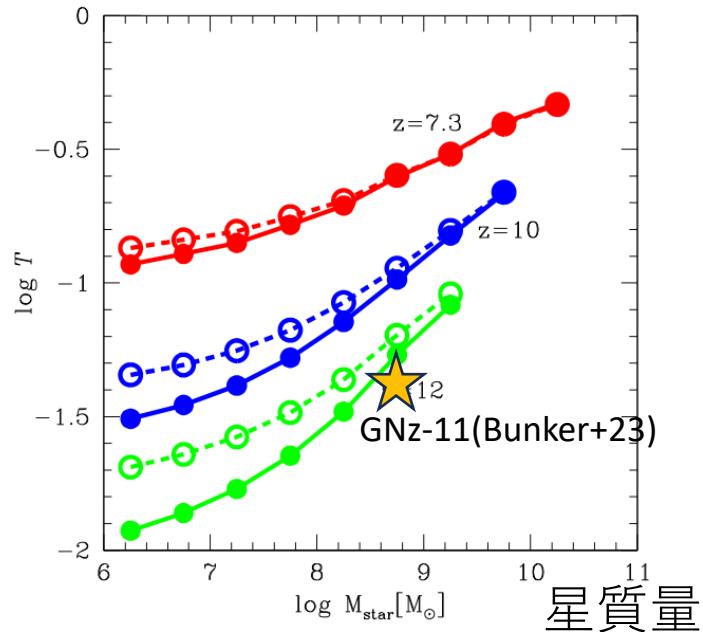
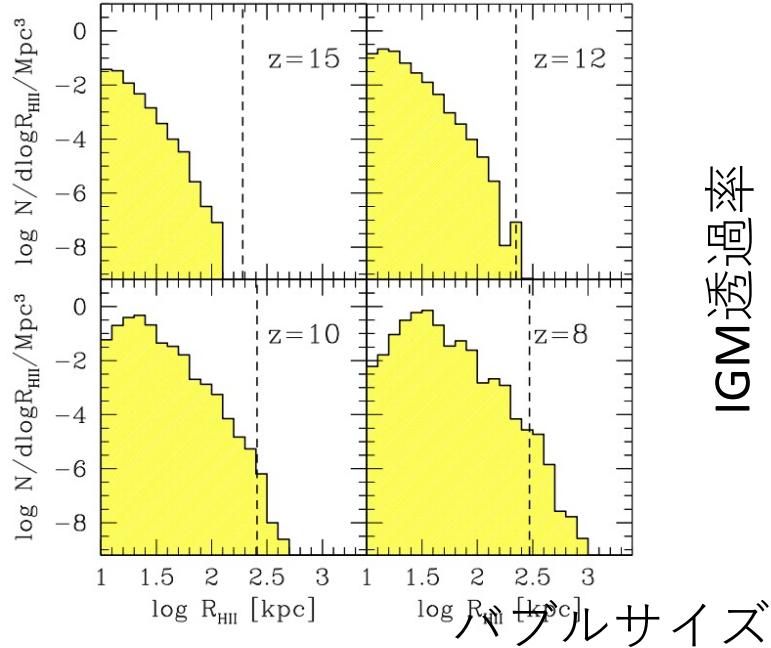
Umeda+(2023)



This indicates that observed galaxies distributes within giant HII bubbles with the overlap effect

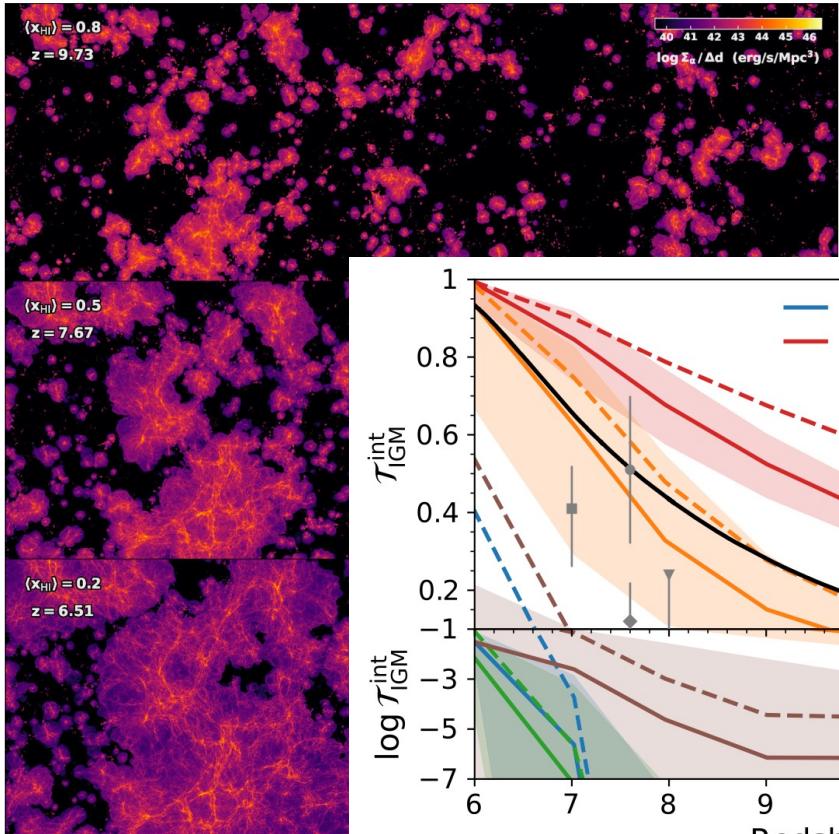
電離バブルと Ly α transmission

Yajima+(2018)

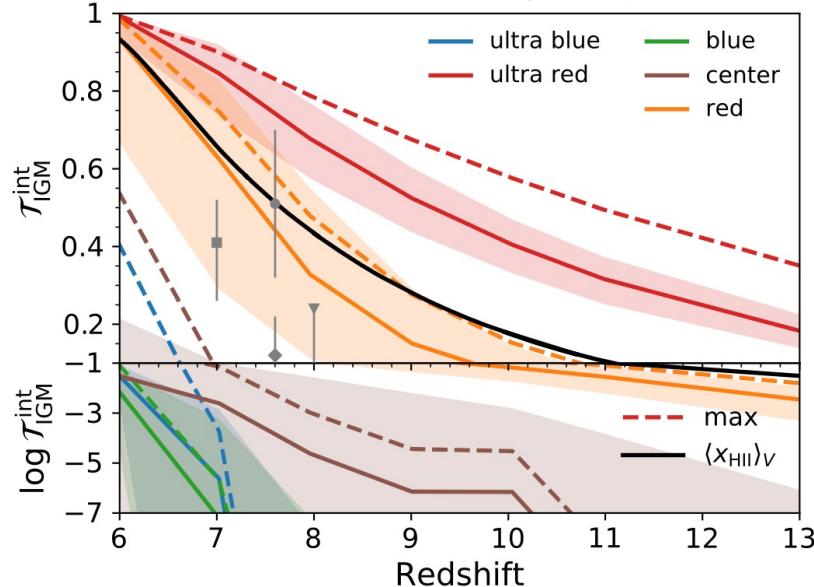


Halo merger tree + sub-grid SF model + 電離バブル成長式
+ Ly α transfer from 1Dガス球 + Ly α IGM 透過率 計算
で電離バブルと IGM 透過率をモデル化

THESAN simulation (Kannan+2022)

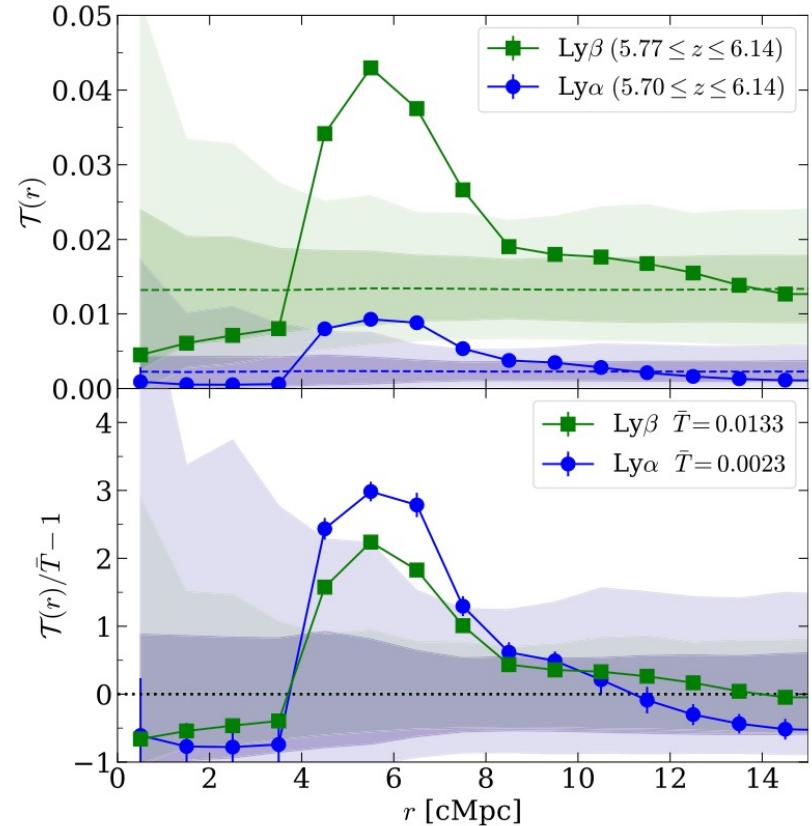
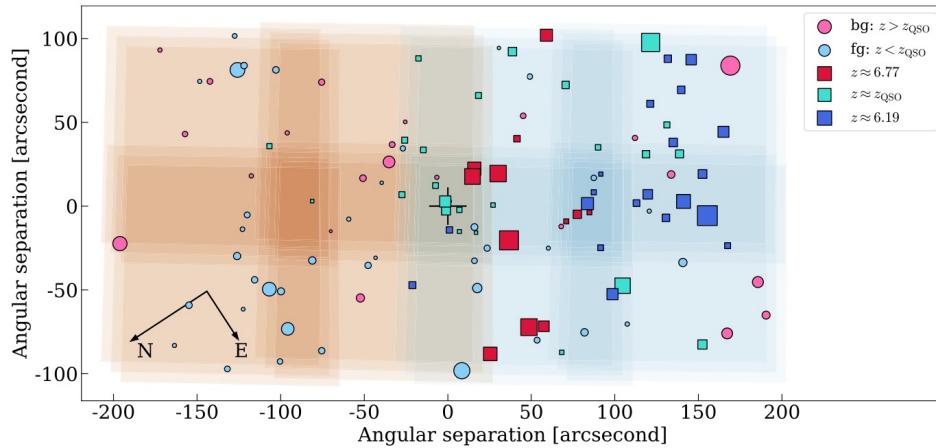


AREPO-RTによる宇宙論的RHD計算
大規模電離構造($\sim 100\text{cMpc}$)から銀河内
構造までをコンシスティントに計算らしい
Smith+22



銀河クラスタリングとIGM透過率

Kashino+(2023)



銀河から~5cMpcぐらいのところでIGM透過率が上がっている
それより近傍では透過率は平均より低い

まとめ

JWST (&ALMA) + シミュレーションにより、
超遠方銀河の情報が急激に増えつつ、
分かりそうで分からない点が沢山でてきた

PopIIIの情報はいつまで残る？観測可能か？
初代銀河ではどんな分子雲・星団が形成されている？
どんなフィードバックがどれくらい効くのか？
初代銀河に付随している電離バブルはどのようなものか？
赤方偏移10で銀河多様性を起こすメカニズムは何か？