

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

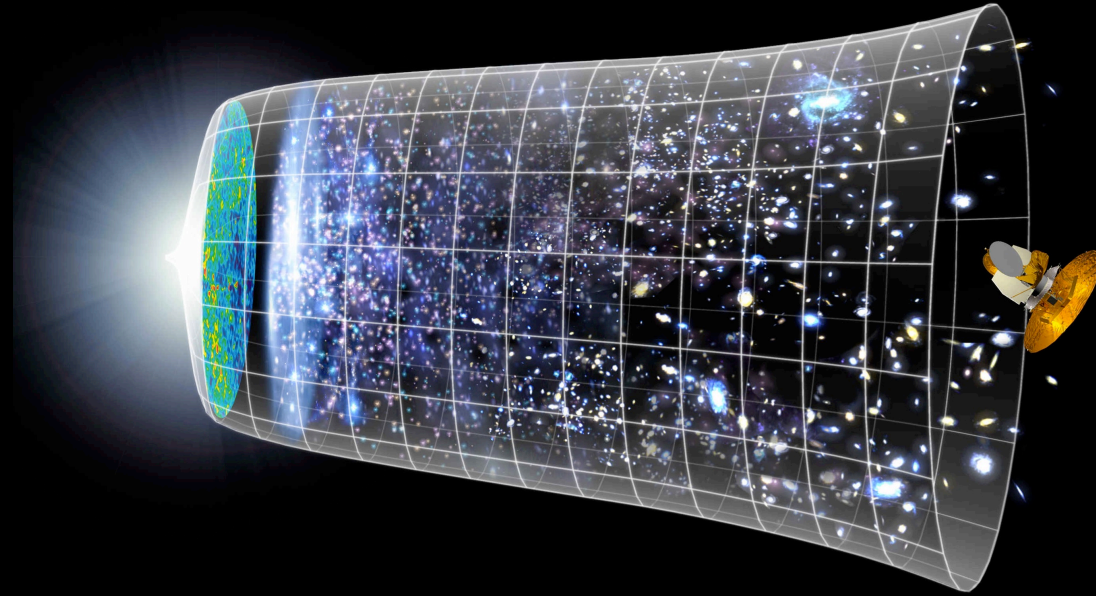
(筑波大学 計算科学研究センター)

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

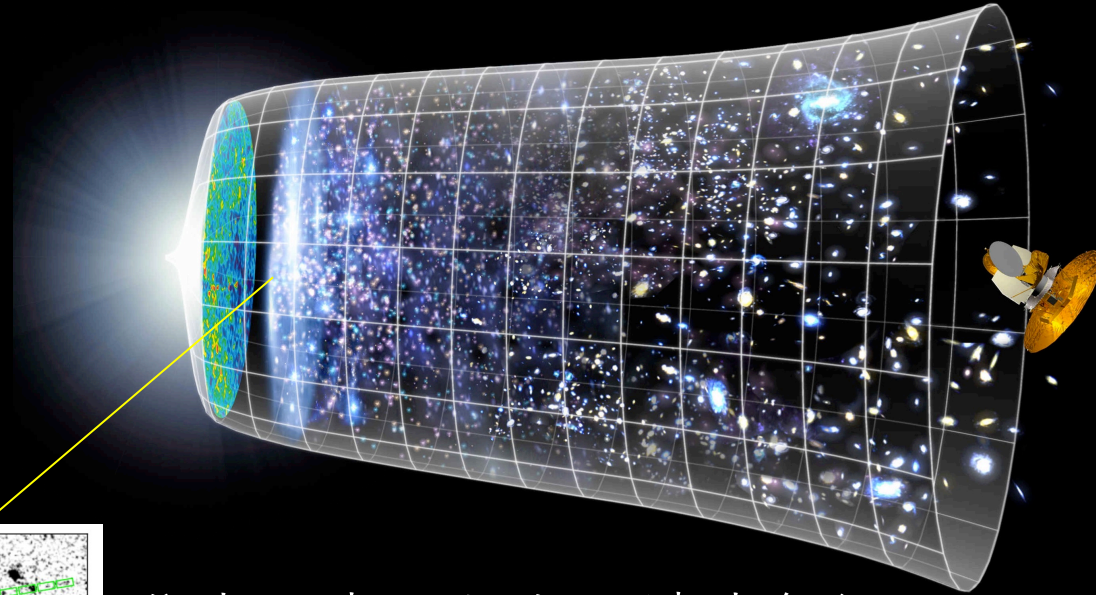


NASA/WMAP team

13.8 Gyr

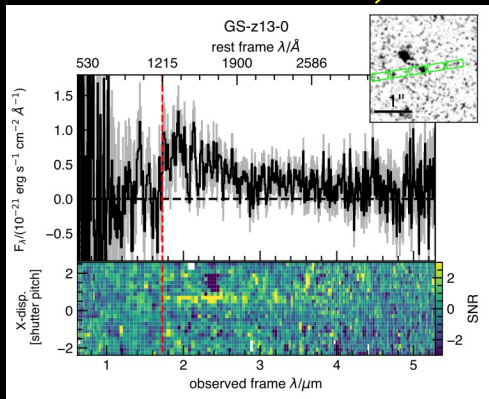


Super-distant galaxies



NASA/WMAP team

$z=13.2$



分光同定された最遠方銀河

低質量：星質量= $8.9 \times 10^7 M_{\text{sun}}$

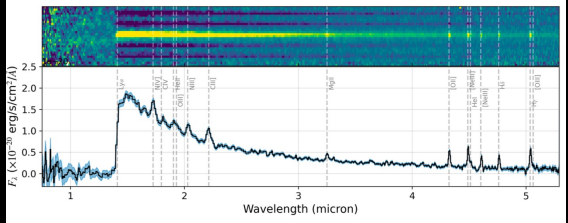
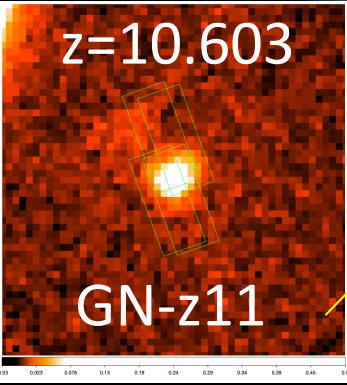
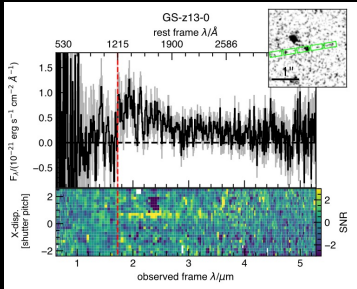
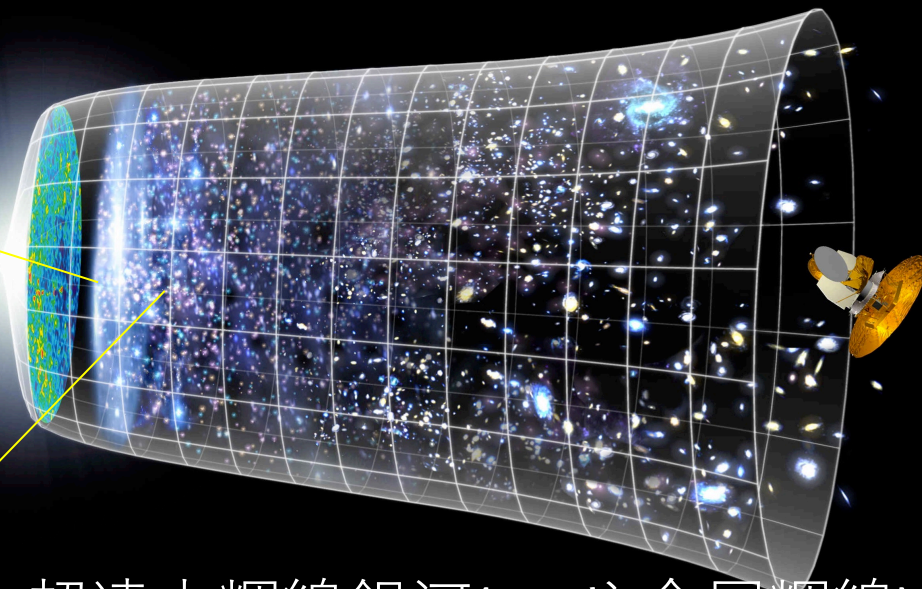
低金属： $\log Z/Z_{\text{sun}} = -1.69$

Curtis-Lake+23

13.8 Gyr

Super-distant galaxies

NASA/WMAP team



超遠方輝線銀河(Lyaや金属輝線)

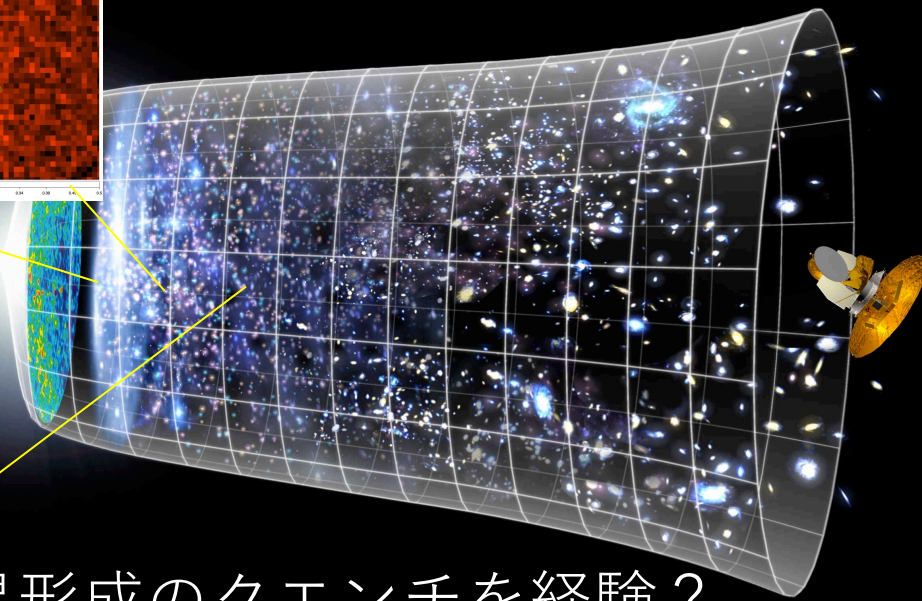
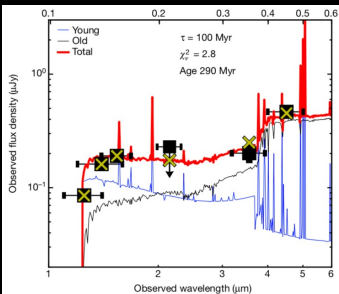
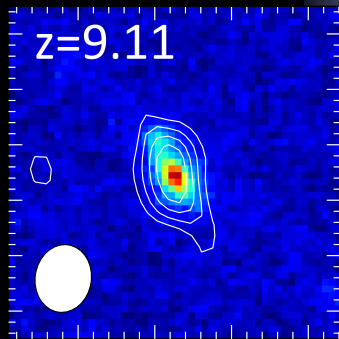
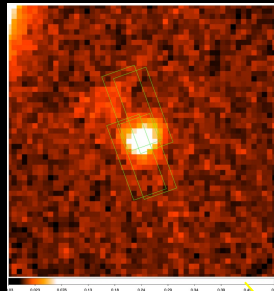
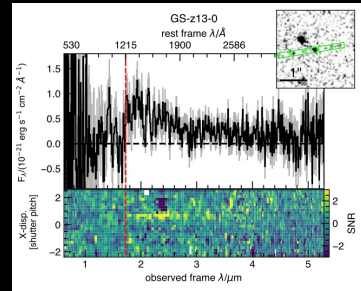
星形成率： $\sim 30 M_{\text{sun}}/\text{yr}$, 広がったLy α ハロー
AGNやPopIII星団を含んでいる？

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

13.8 Gyr



Super-distant galaxies



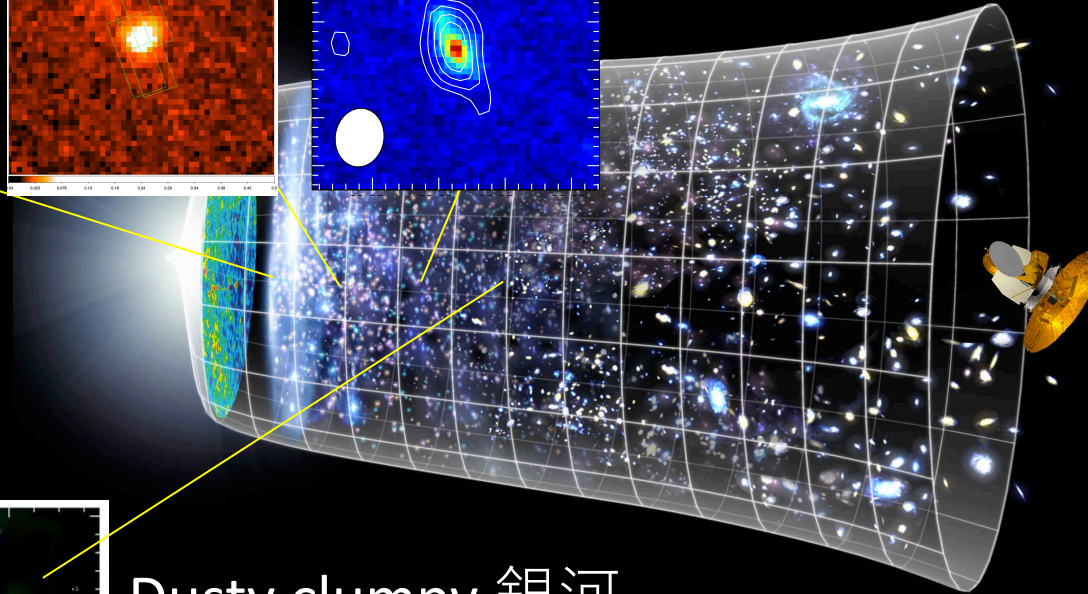
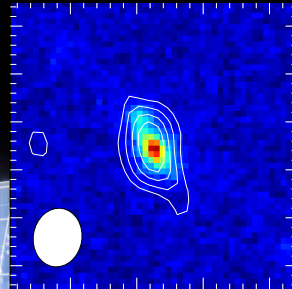
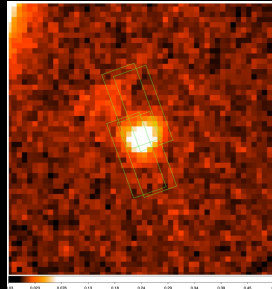
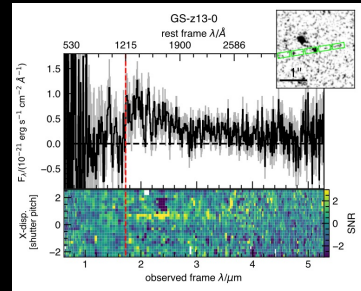
星形成のクエンチを経験？

$z=15$ 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

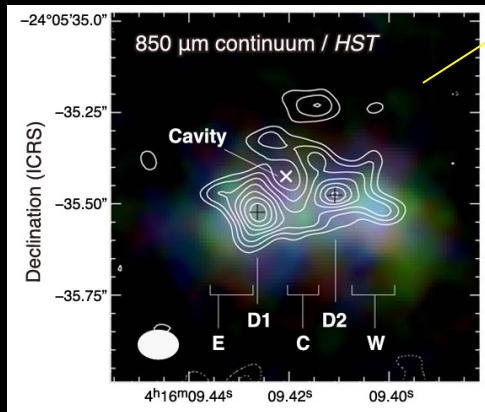


Super-distant galaxies



NASA/WMAP team

$z=8.31$



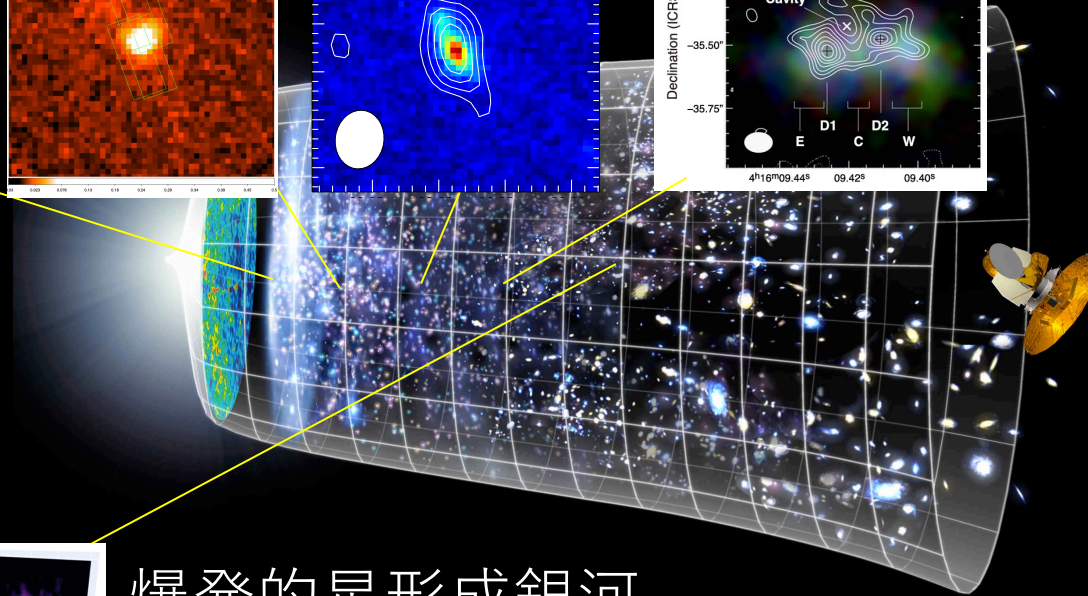
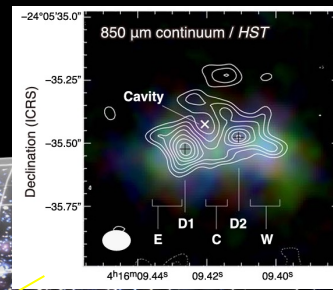
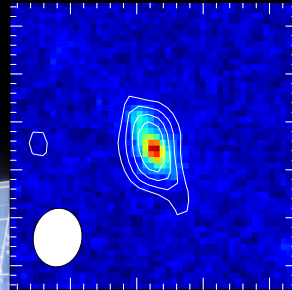
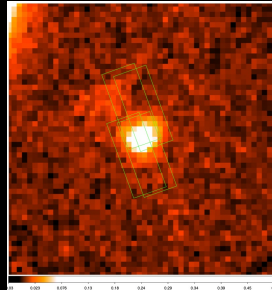
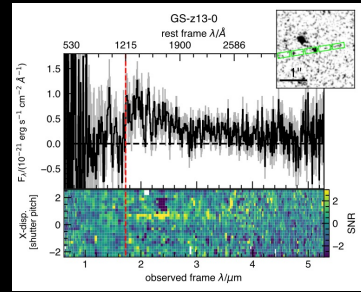
Dusty clumpy 銀河

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

(Tamura+23)

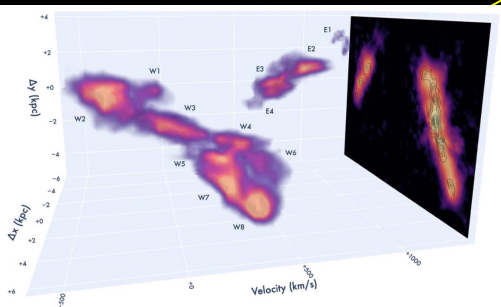
13.8 Gyr

Super-distant galaxies



NASA/WMAP team

$z=6.9$



爆発的星形成銀河

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

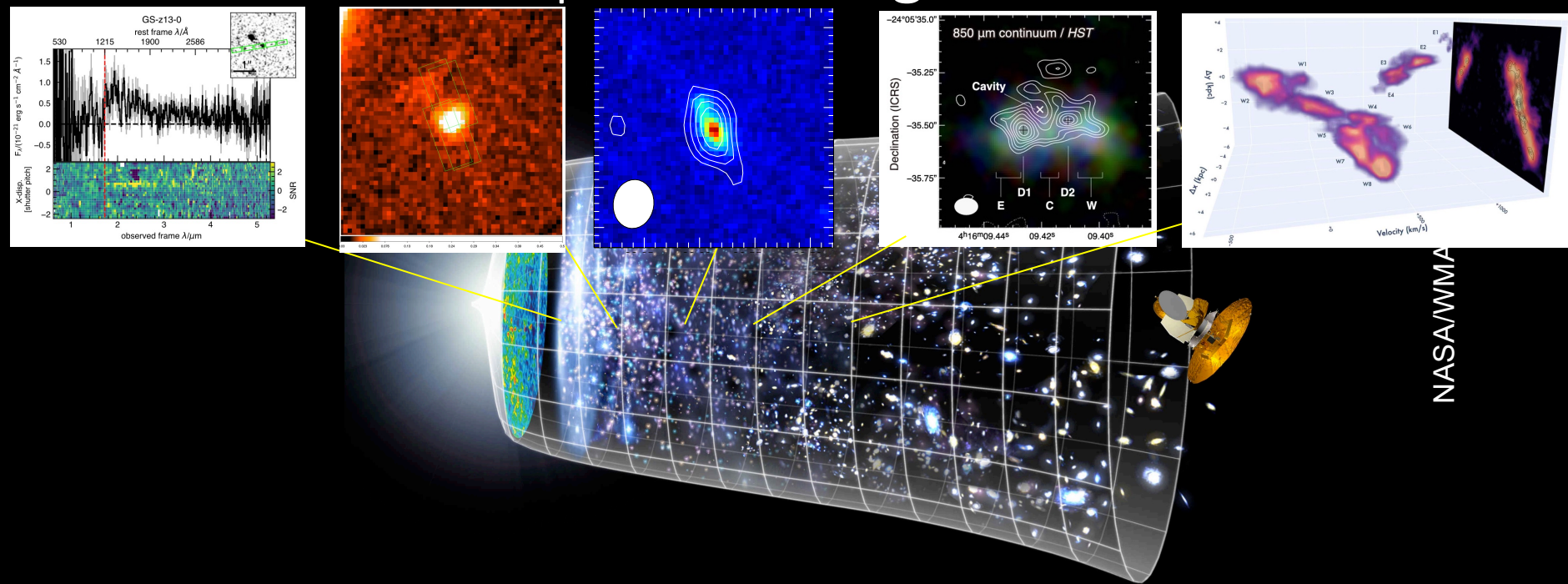
複数の大質量クランプ ($M_{\text{star}} \sim 3-5 \times 10^9 \text{ Msun}$) から構成

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

13.8 Gyr



Super-distant galaxies

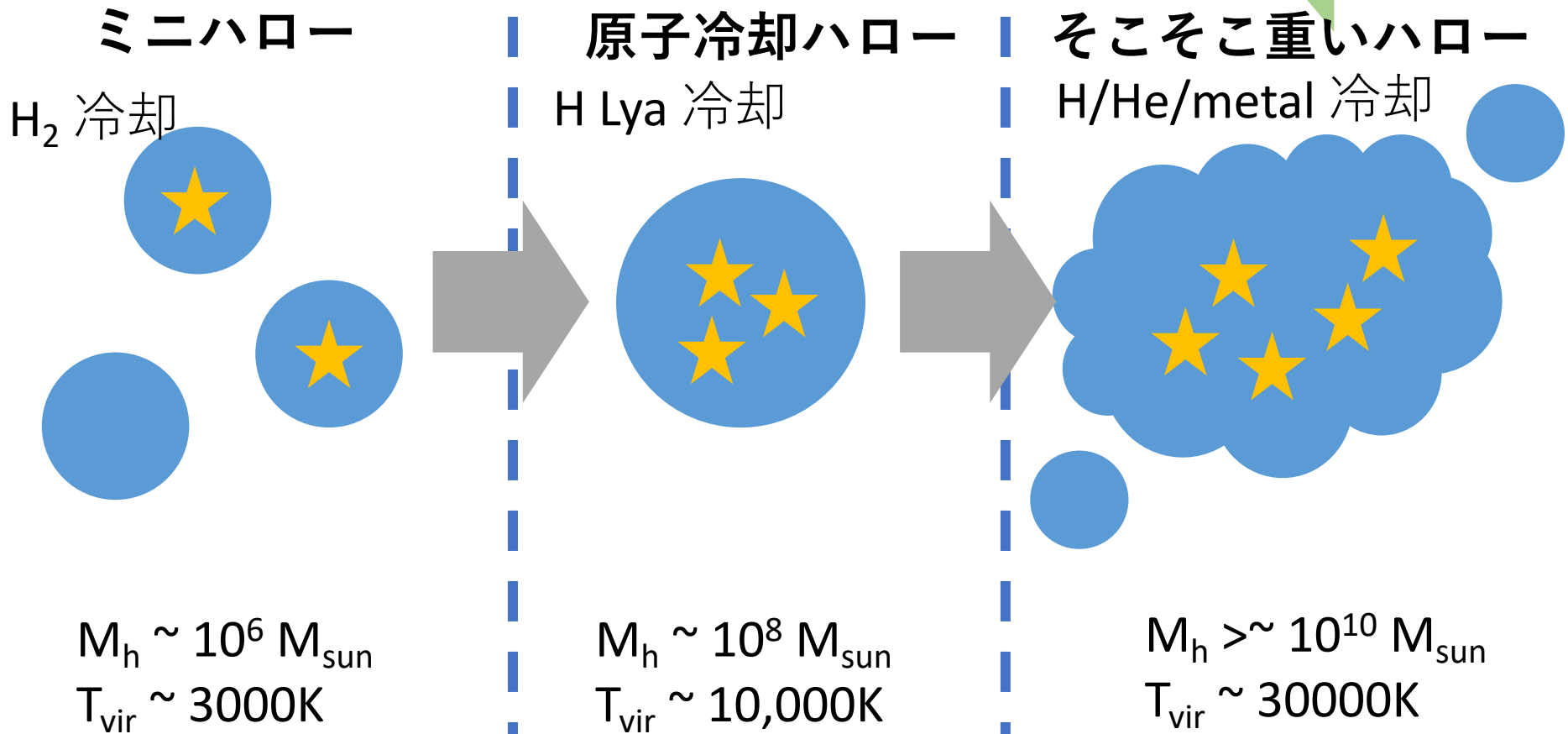


NASA/WMA

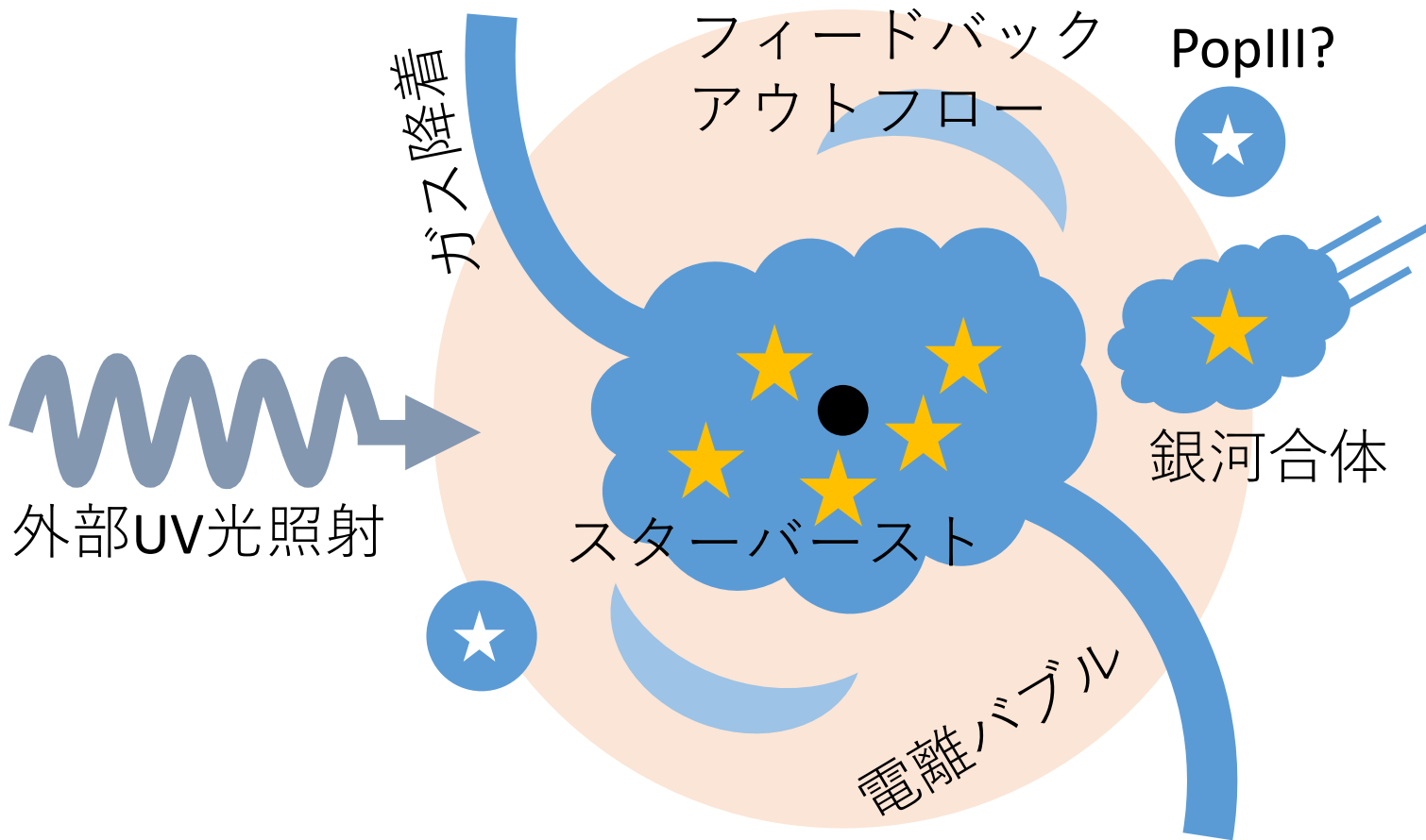
これらの多様な超遠方銀河はどのように形成され進化したのか？

超遠方銀河形成過程

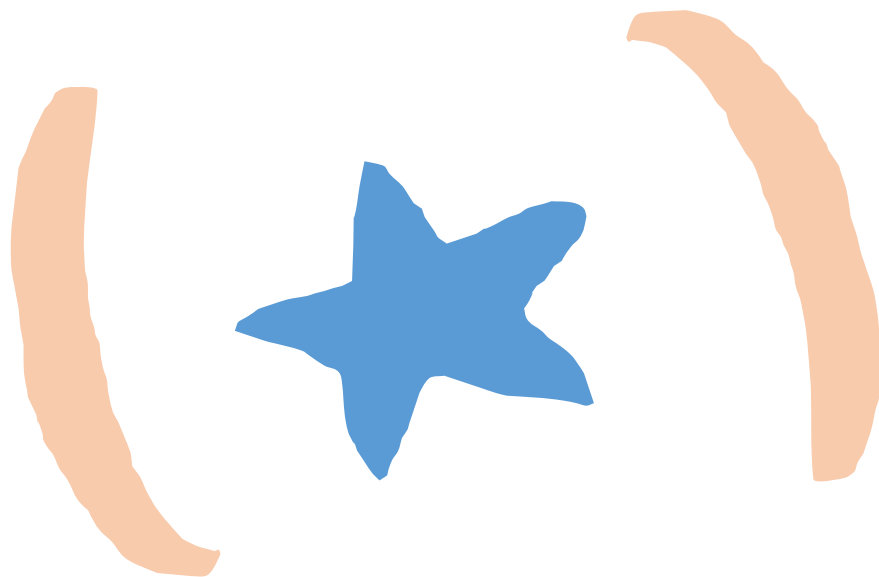
JWST観測



超遠方銀河形成過程



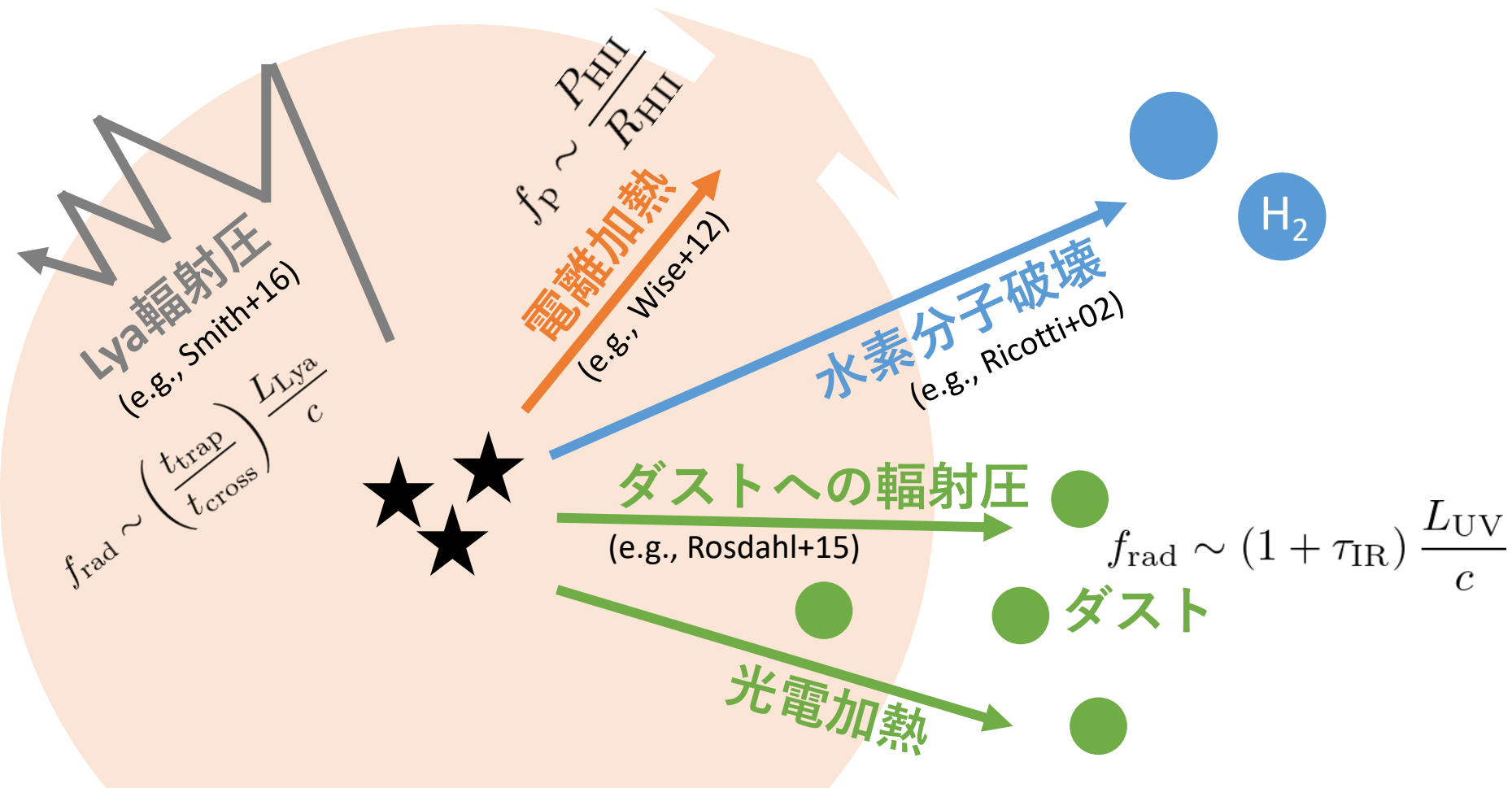
1. 超遠方銀河形成における フィードバック



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

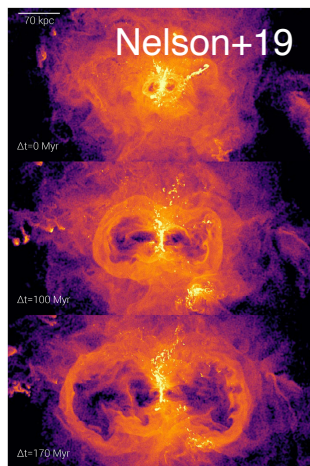
Kick速度、
Mass loading
などパラメータ

kick

②冷却を手で止める

Stinson+06

Thermal



④1次元点源爆発の結果を使う

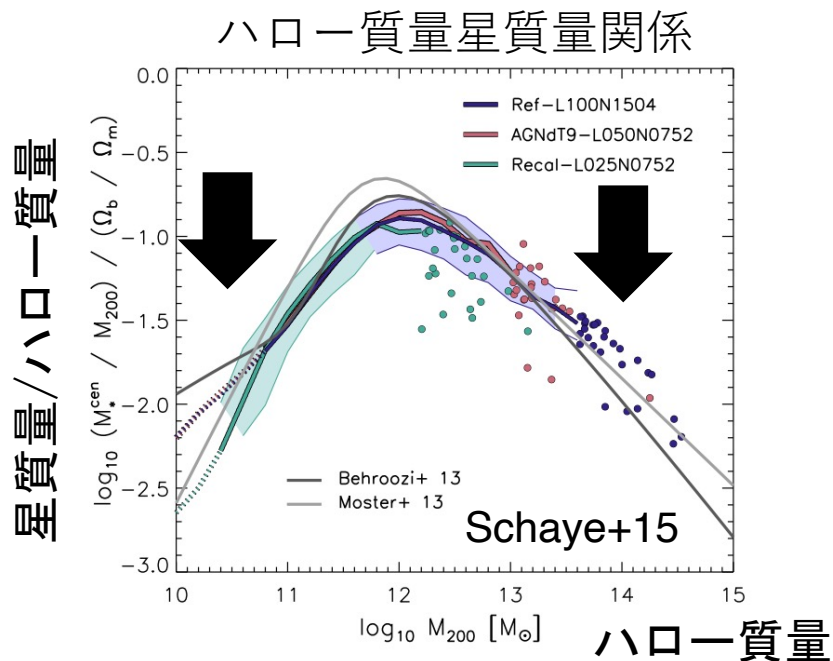
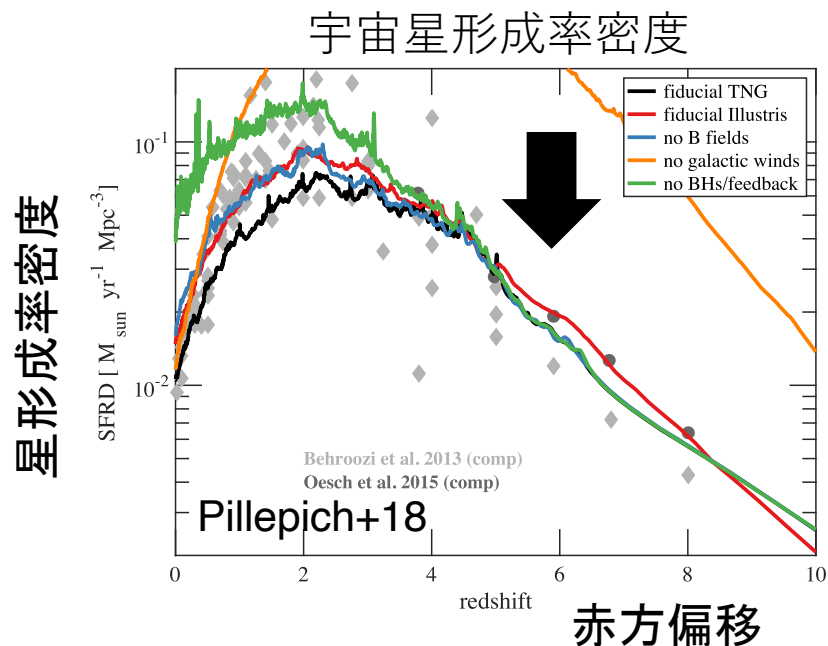
Kimm+14, 15
Hopkins+14

kick

シミュレーションの歴史

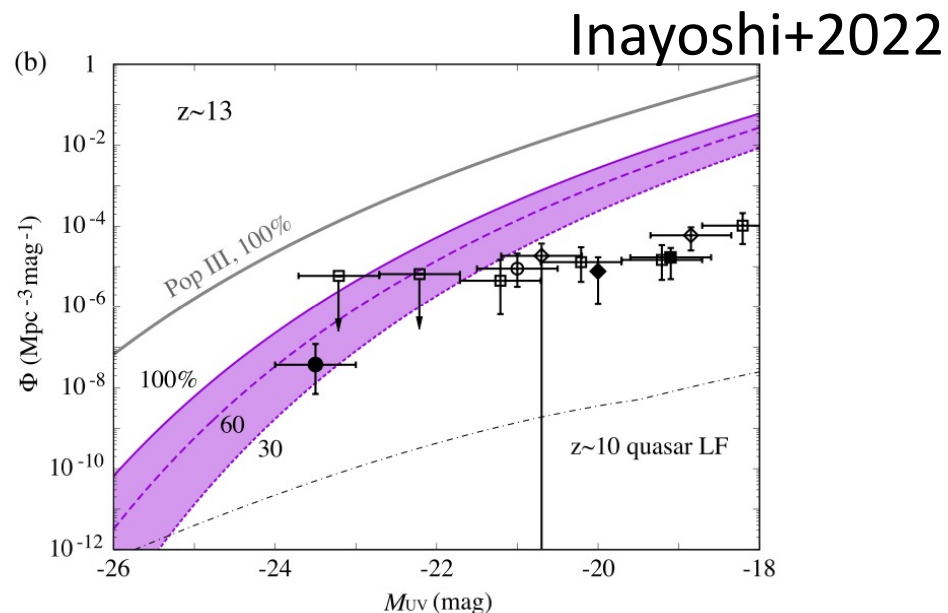
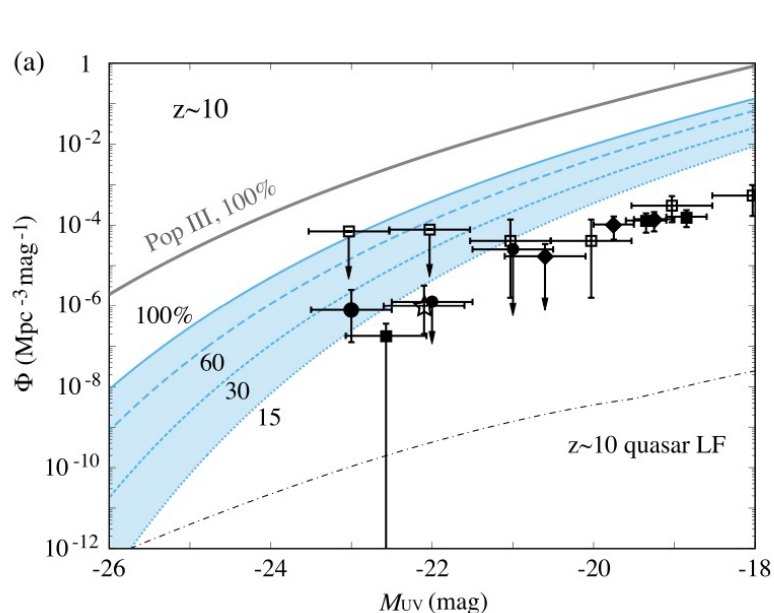
③小さい領域に
高温バブルを入れる
Dalla Vecchia+12

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)



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?



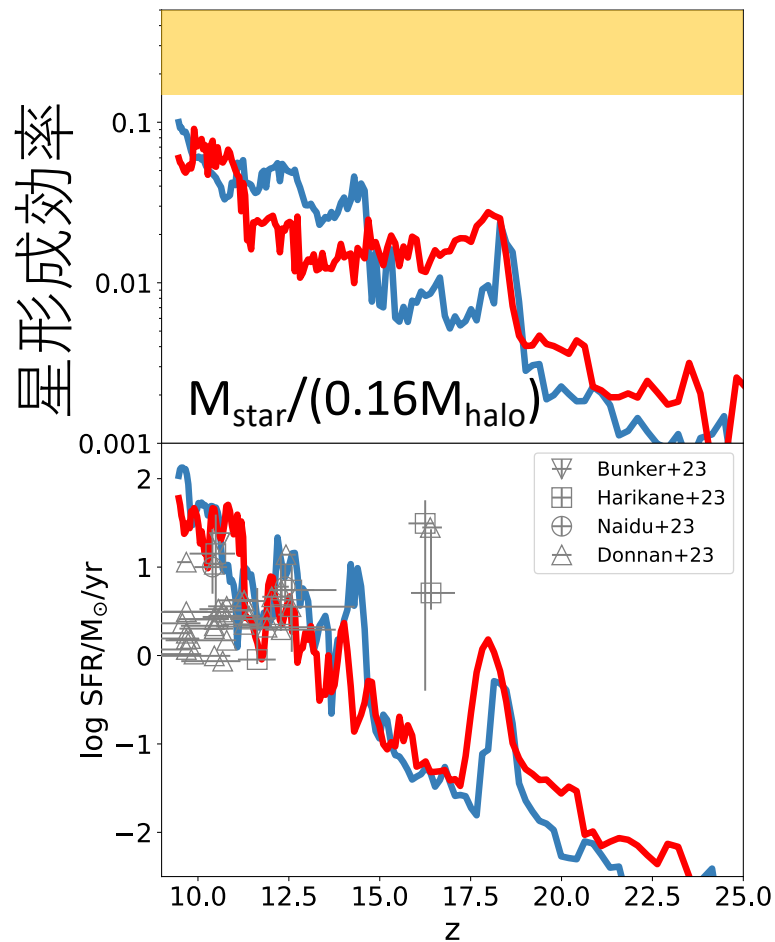
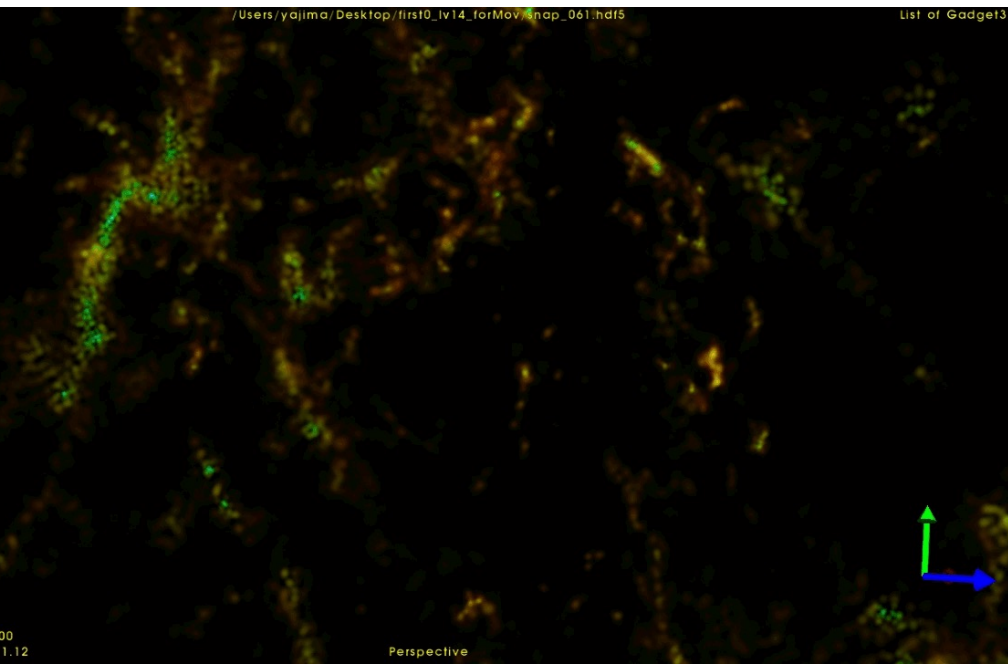
Harikane+2023の分光サンプルだけでもそこまでは変わらなさそう

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)

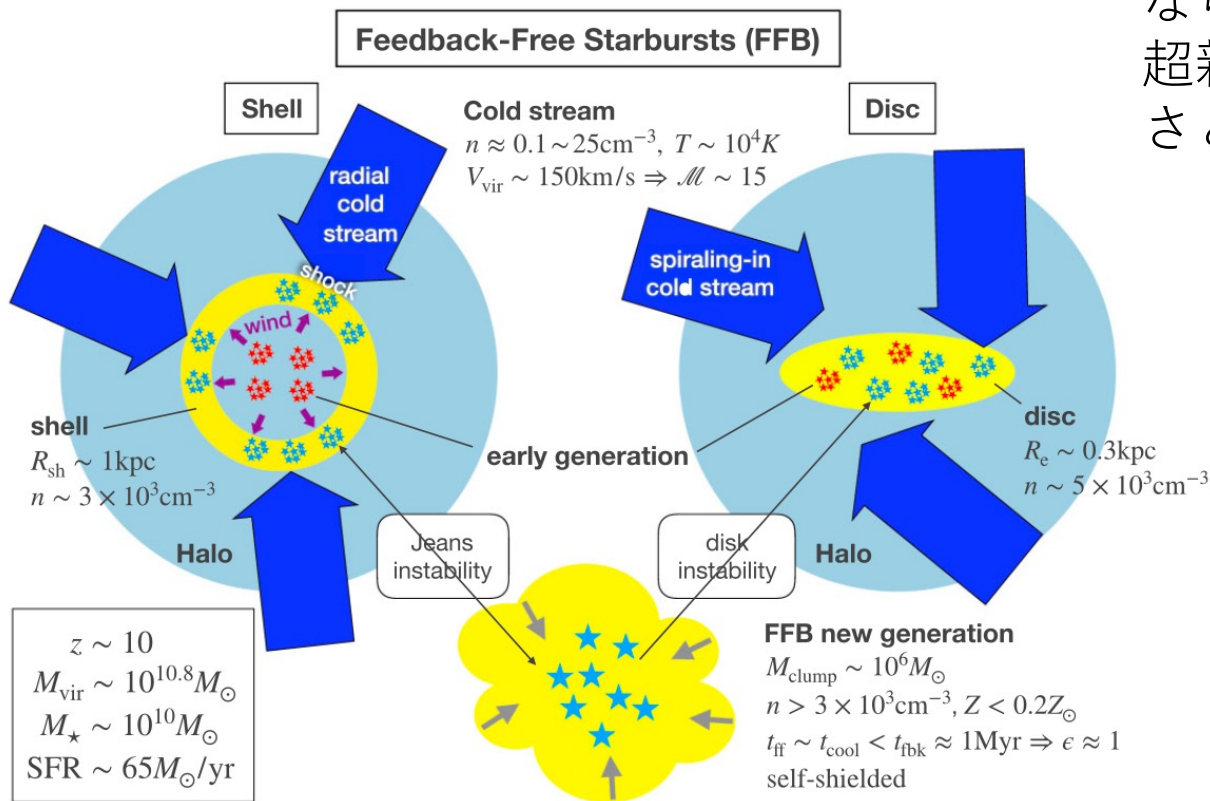
原始銀河団領域に着目した
初代銀河シミュレーション



Feedback-Free Starbursts (FFB)?

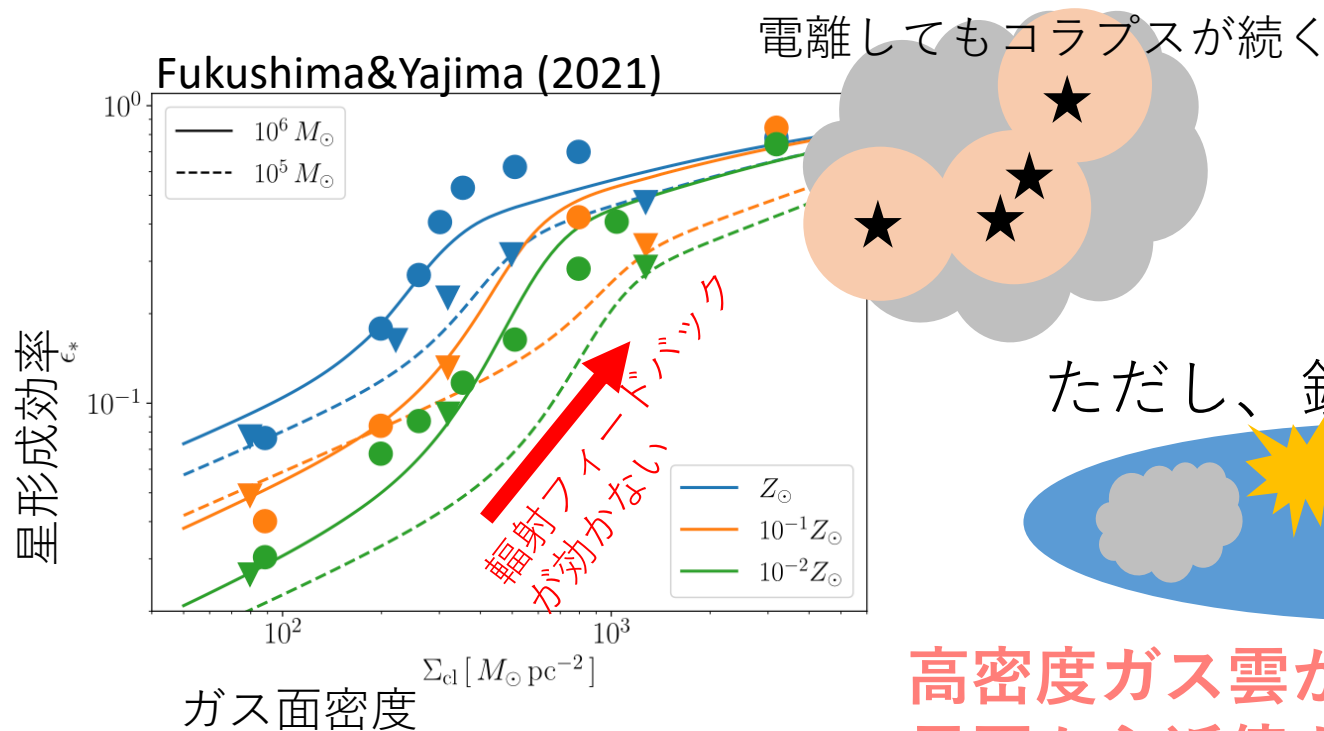
Dekel et al. (2023)

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
さと星に変換出来る



高密度分子雲での星団形成

Fukushima&Yajima (2021, 2022, 2023)

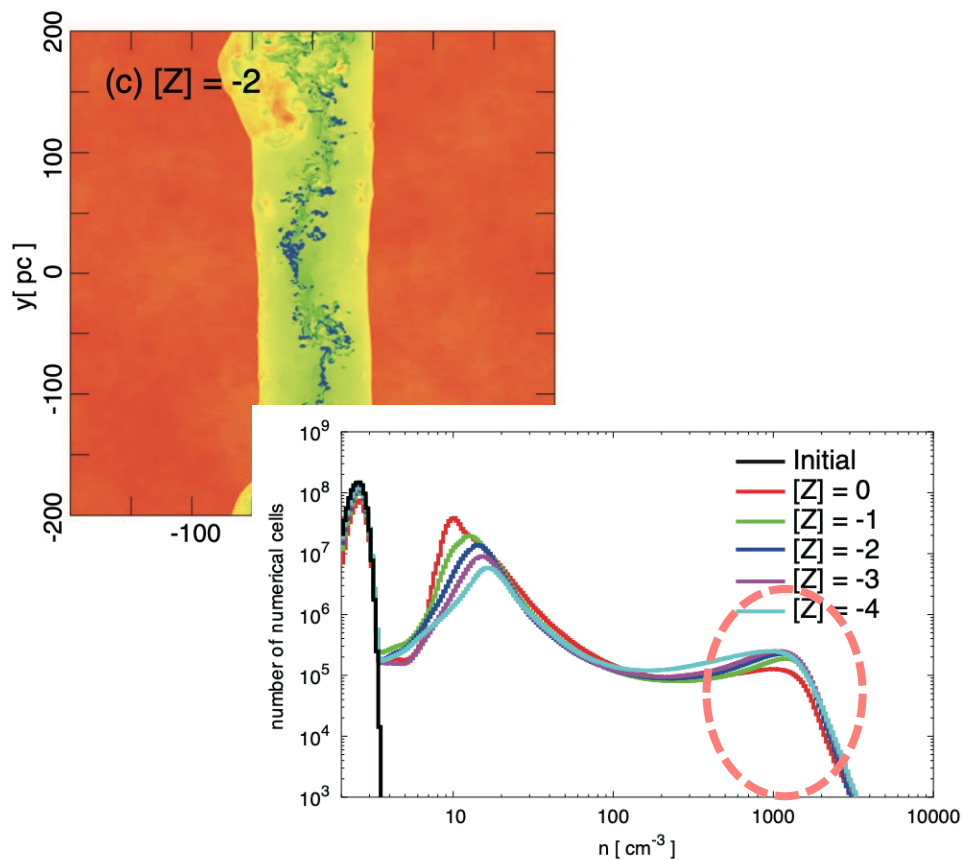


高密度ガス雲がどう出来るのか？
星団から近傍ガス雲への影響は？

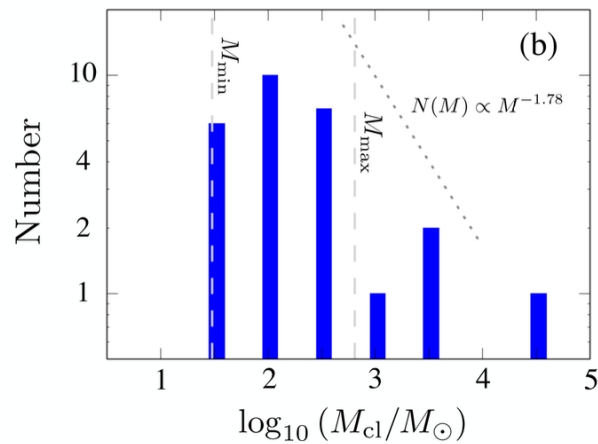
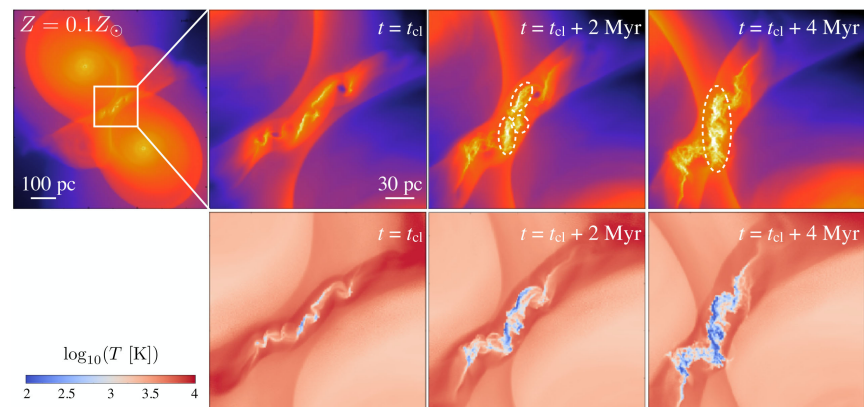
Fukushima et al. 2024?, 2025?..?

高密度ガス雲形成 (熱的不安定)

Inoue&Omukai (2015)



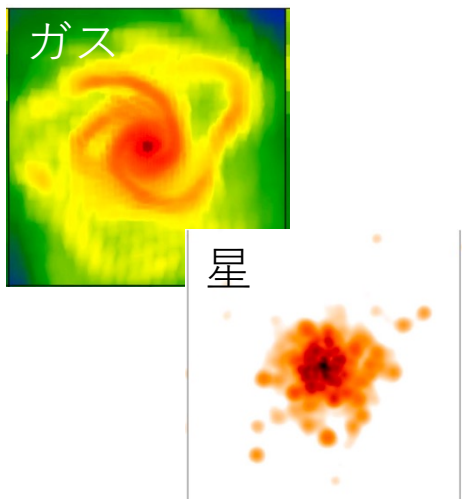
Arata,Yajima,Nagamine (2018)



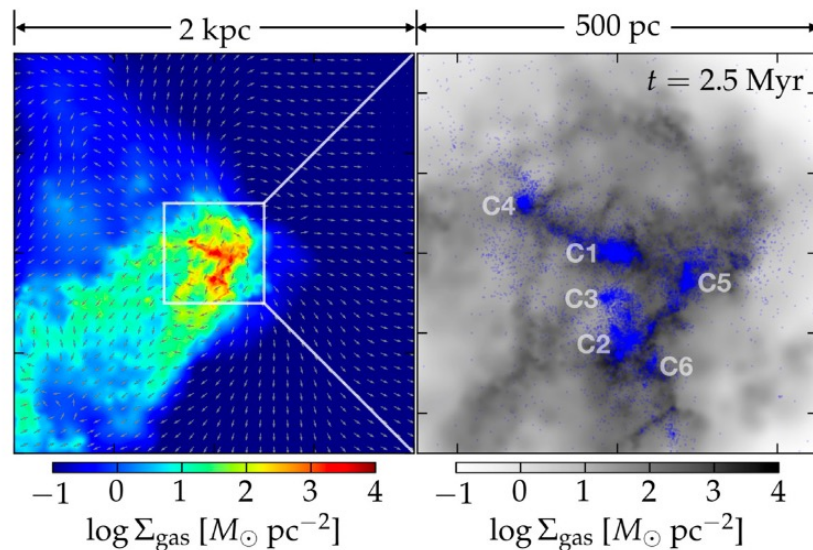
高密度ガス雲形成（重力不安定?）

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)



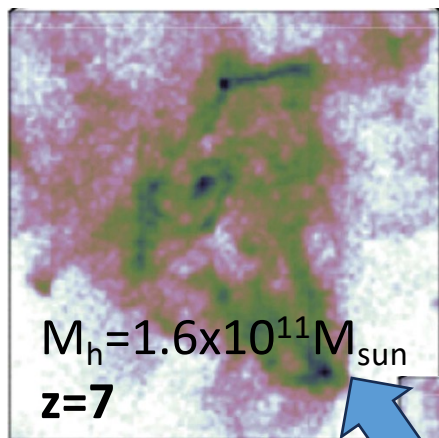
球状星団likeな
ものが複数形成

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..

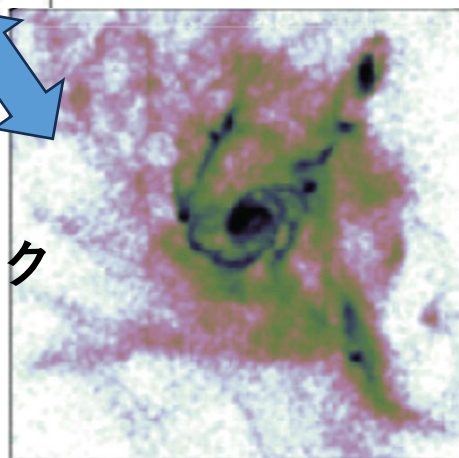
フィードバック効率で銀河形態も変化

Yajima+(2017)

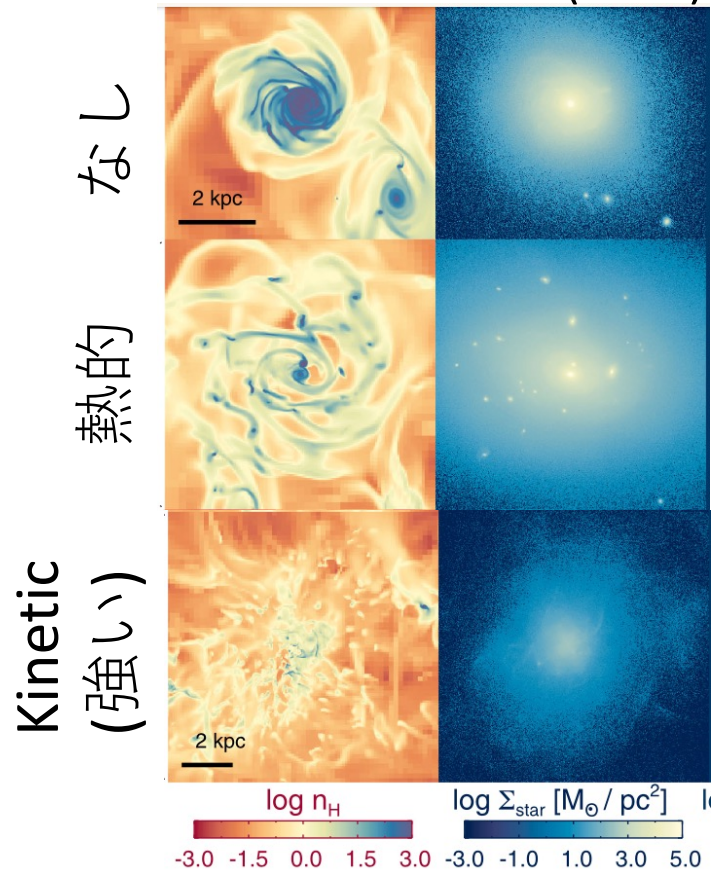


強いフィードバック
クランピー構造

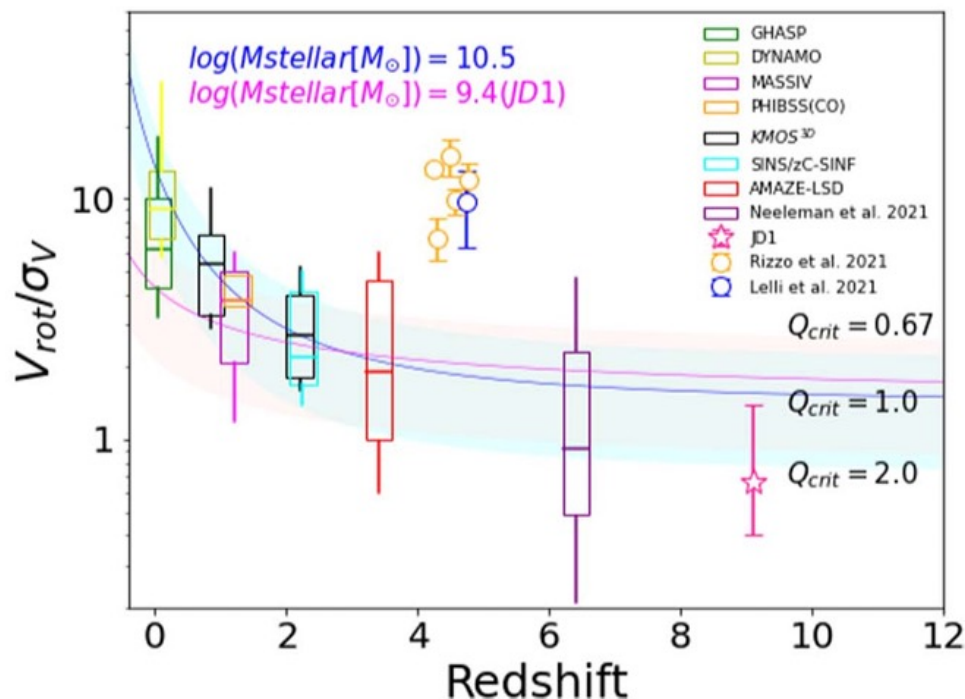
弱いフィードバック
長時間のガス円盤



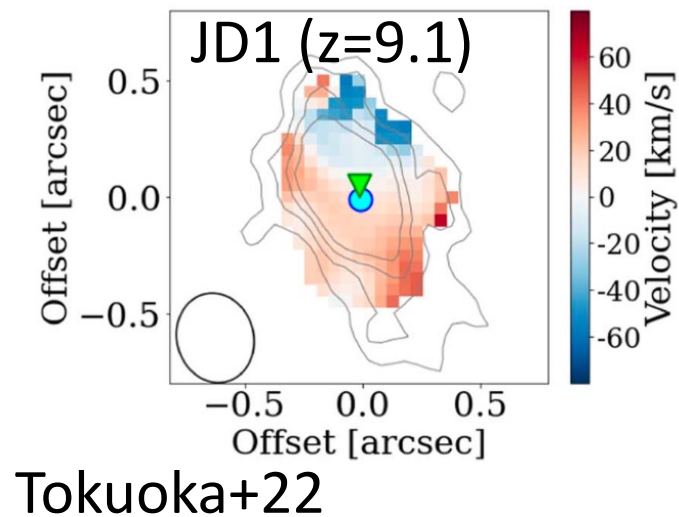
Kimm+(2015)



遠方銀河の銀河形態

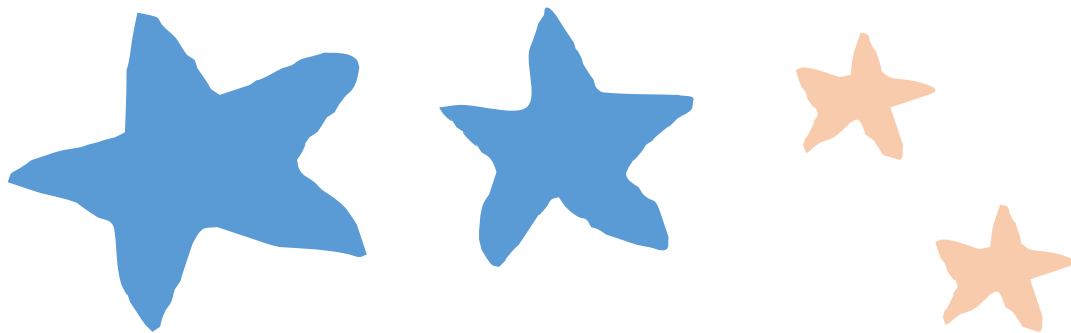


GN-z11はdisky?

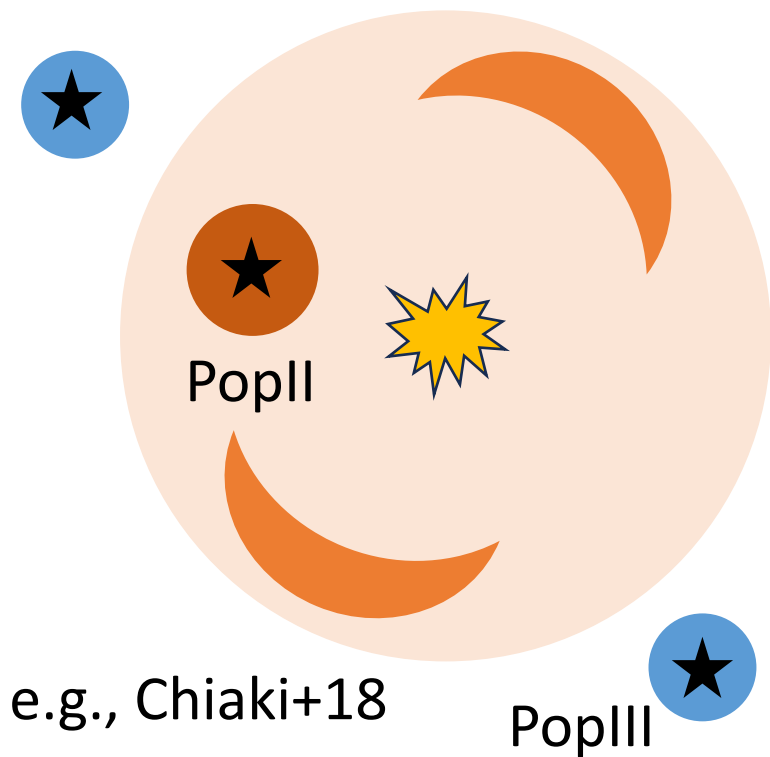


星形成効率 x 銀河形態の議論が今後重要？

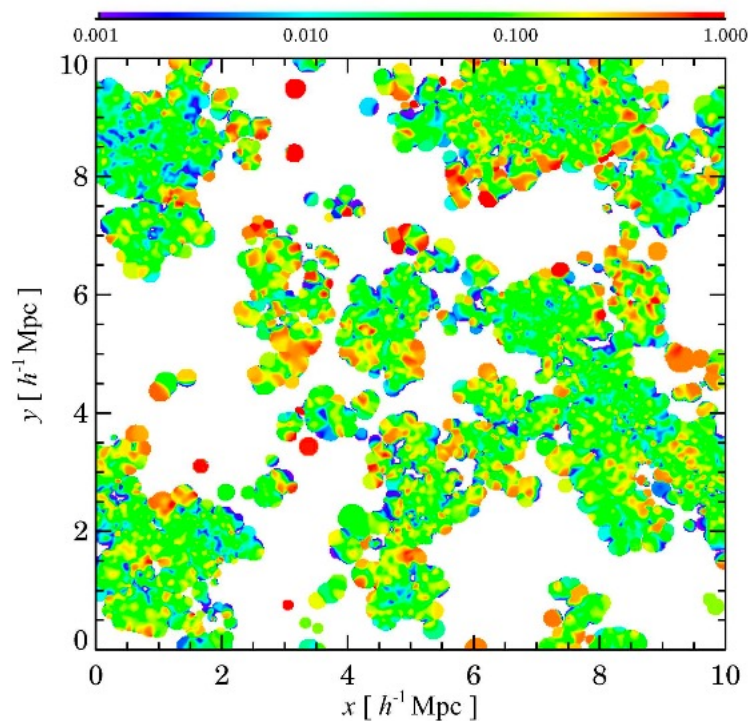
2. 超遠方銀河の重元素と PopIII星の形成



Pop IIIからPop IIへのtransition

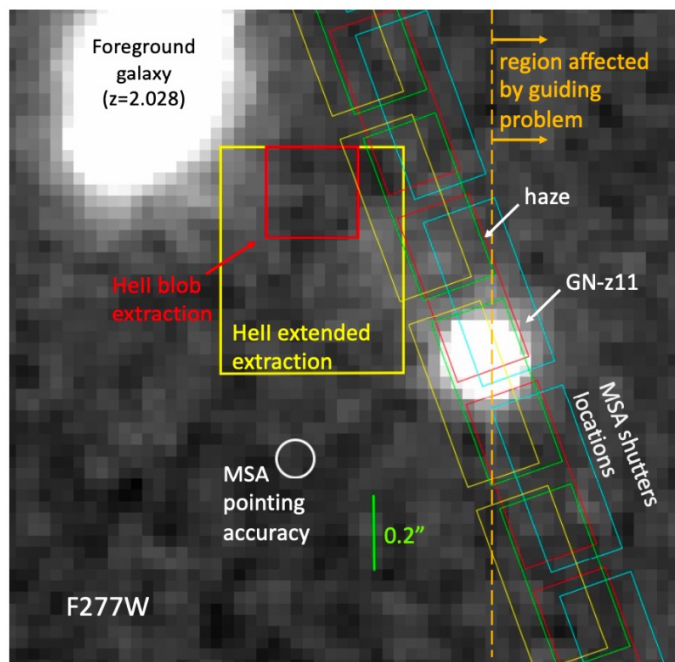


Tornatore+(2007)



PopIII星団 in 超遠方銀河？

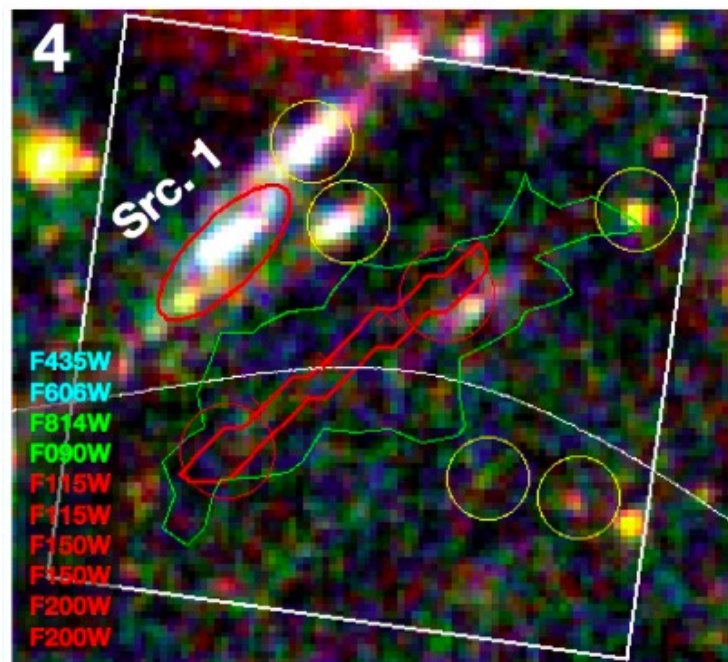
Maiolino+(2023)



GN-z11にHell clumpが検出、PopIII?

Vanzella+(2023)

JWST + HST

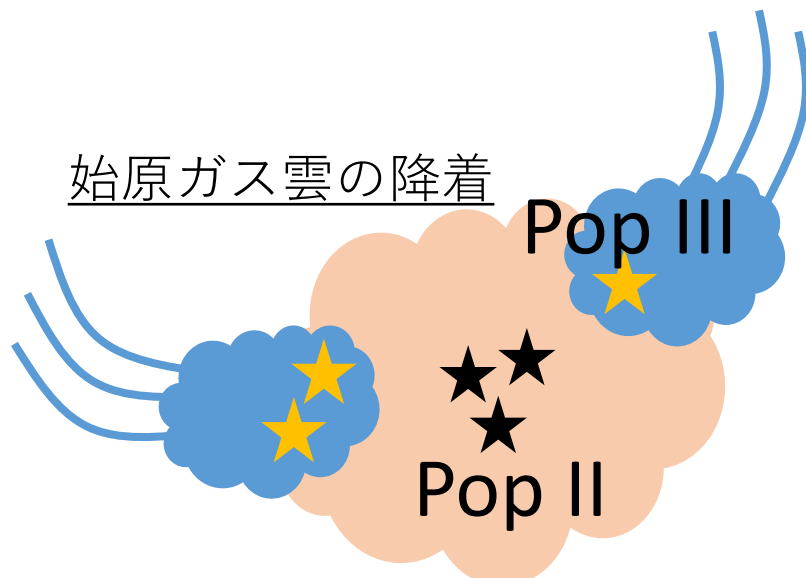
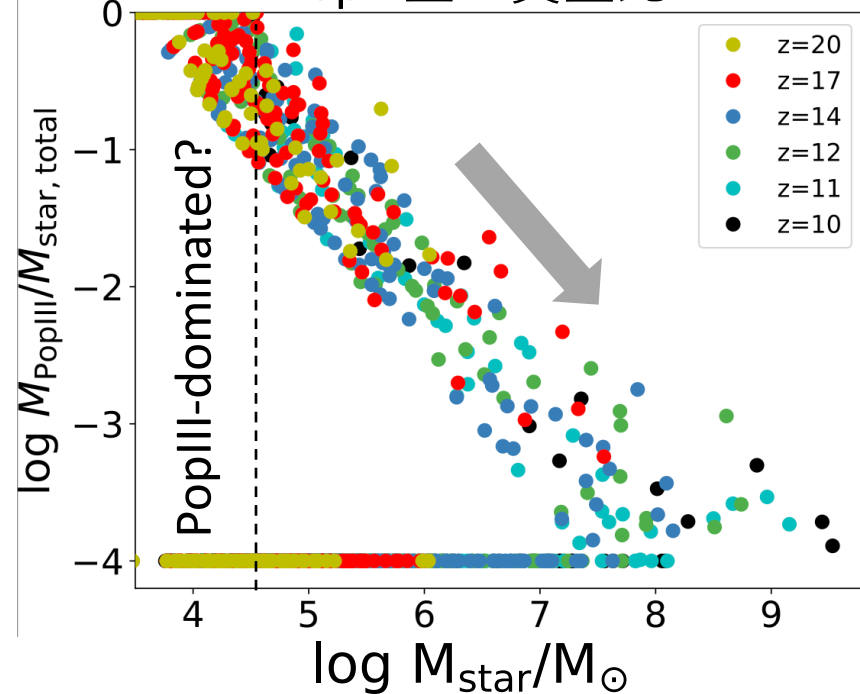


レンズされた星団から強いLy α 輝線、PopIII?

初代銀河内に種族III星はいるのか？

(Yajima+2023)

PopIII星の質量比



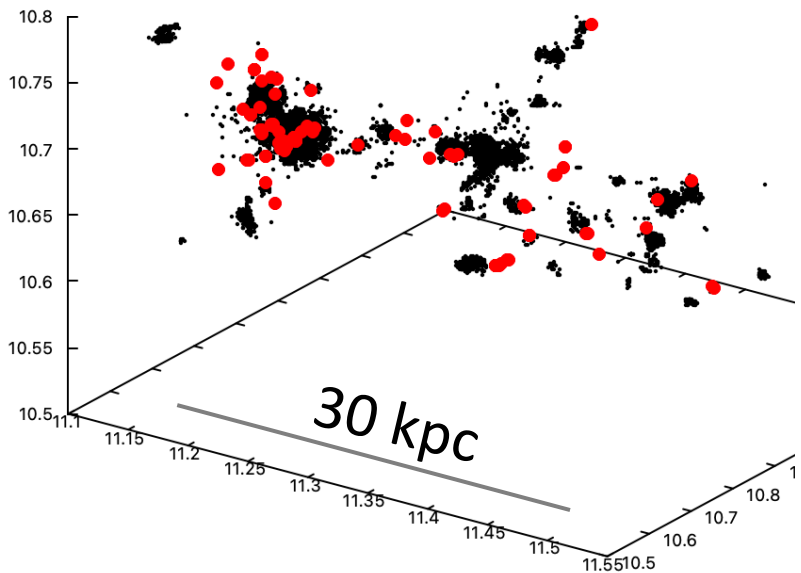
種族III星割合は銀河質量とともに
スムーズに減少

$M_{\text{star}} \sim 10^6 M_{\text{sun}}$ のシステムでは1%程度

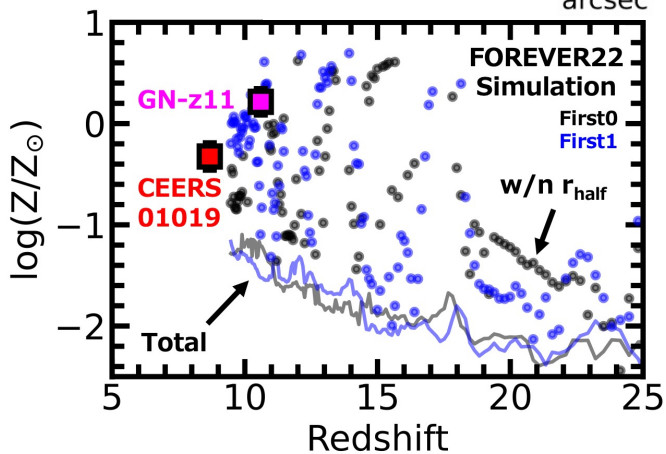
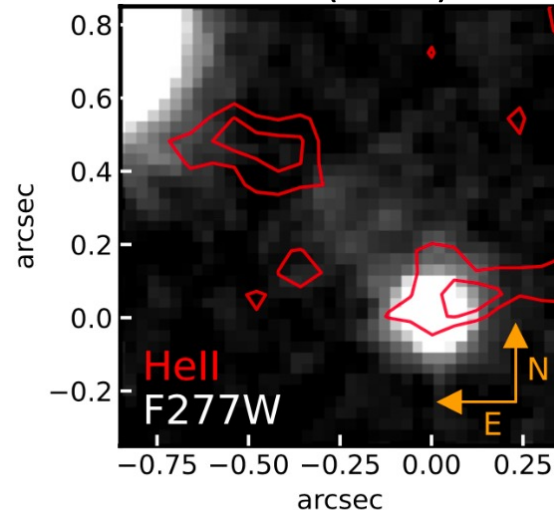
種族III星の分布

- Pop II
- Pop III

$z=10$
 $f_{\text{popIII}}=0.017\%$
 $\text{SFR}=41.5 M_{\text{sun}}/\text{yr}$
 $M_{\text{star}}=2.8 \times 10^9 M_{\text{sun}}$
 $M_{\text{POPIII}}=4.8 \times 10^5 M_{\text{sun}}$
 $Z=6.6 \times 10^{-2} Z_{\text{sun}}$



Maiolino+(2023)

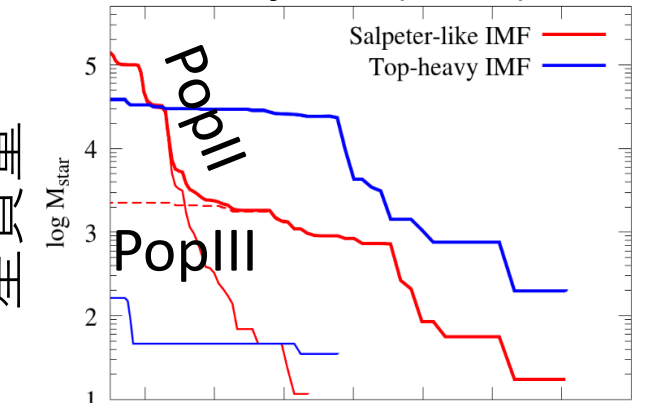


Isoabe+(2023)

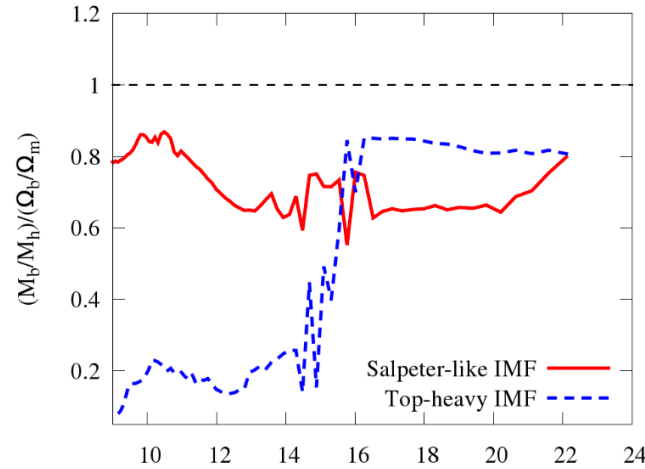
PopIII IMFと超遠方銀河形成

星質量

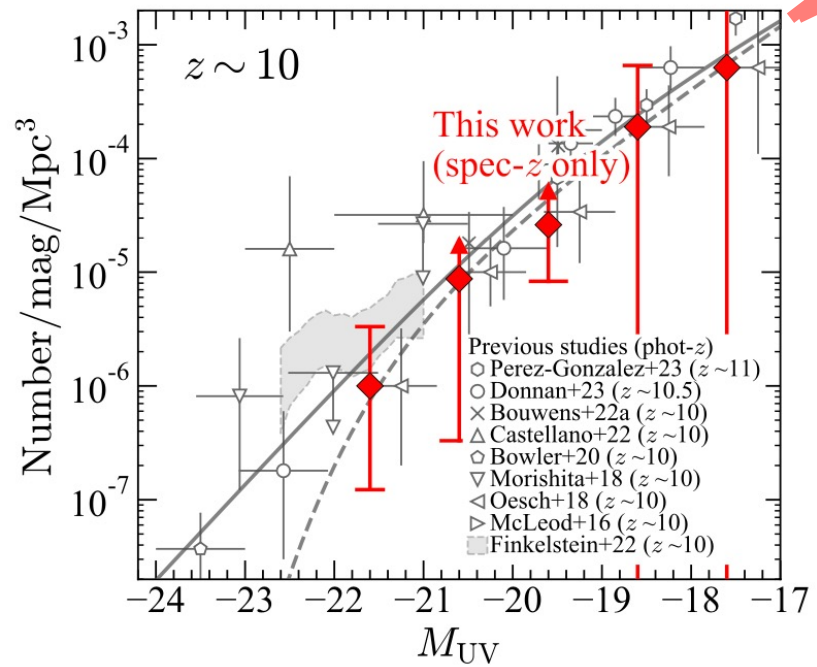
Abe, Yajima+(2021)



ガス質量比

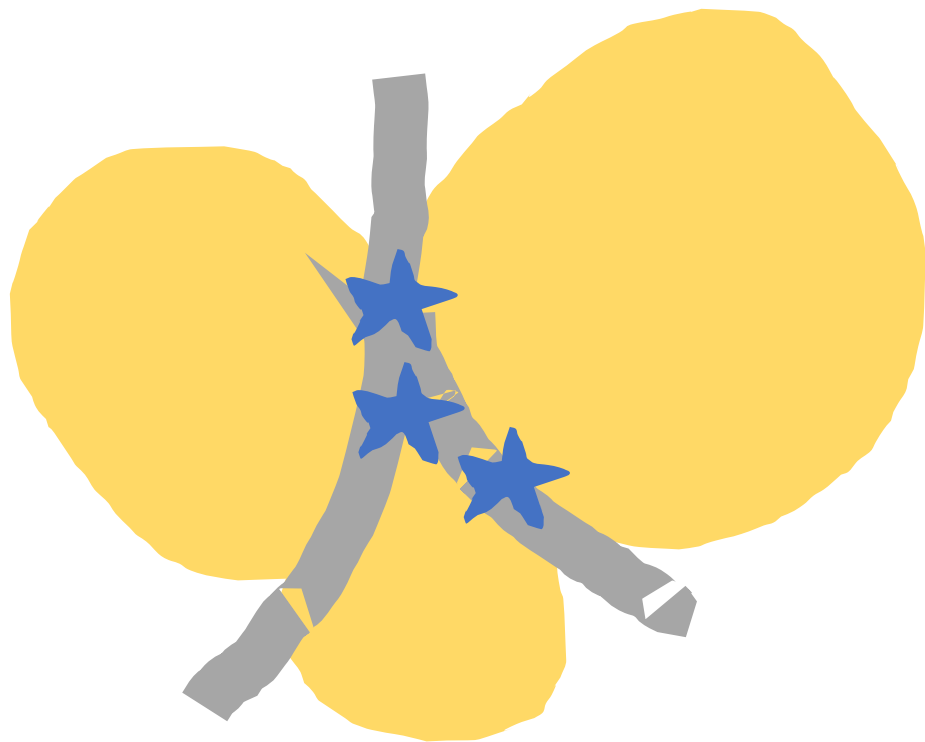


Harikane+(2023)



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？

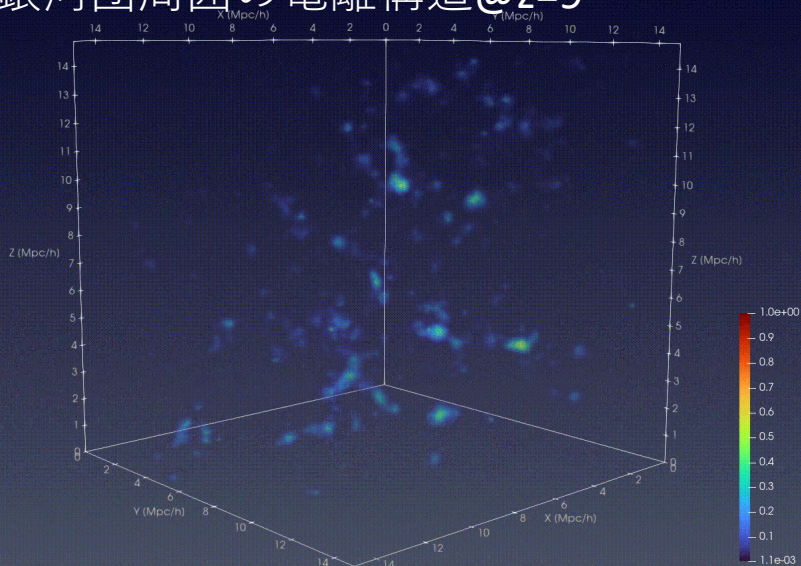
3. 超遠方銀河と宇宙再電離



宇宙再電離と銀河形成

Soga, Yajima+ in prep.

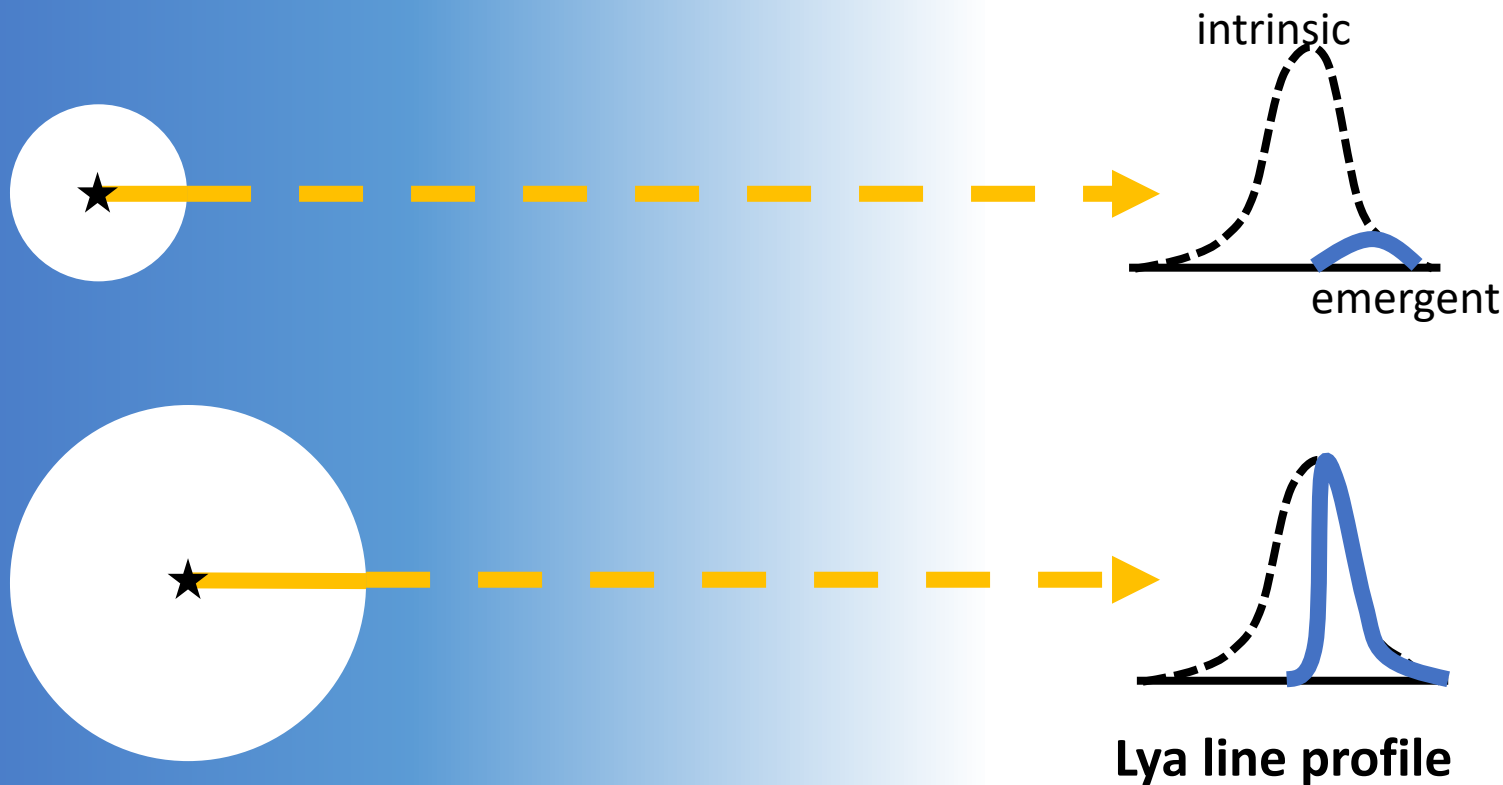
Time: 0.000000 (Myr)
原始銀河団周囲の電離構造 @z=9



- 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)

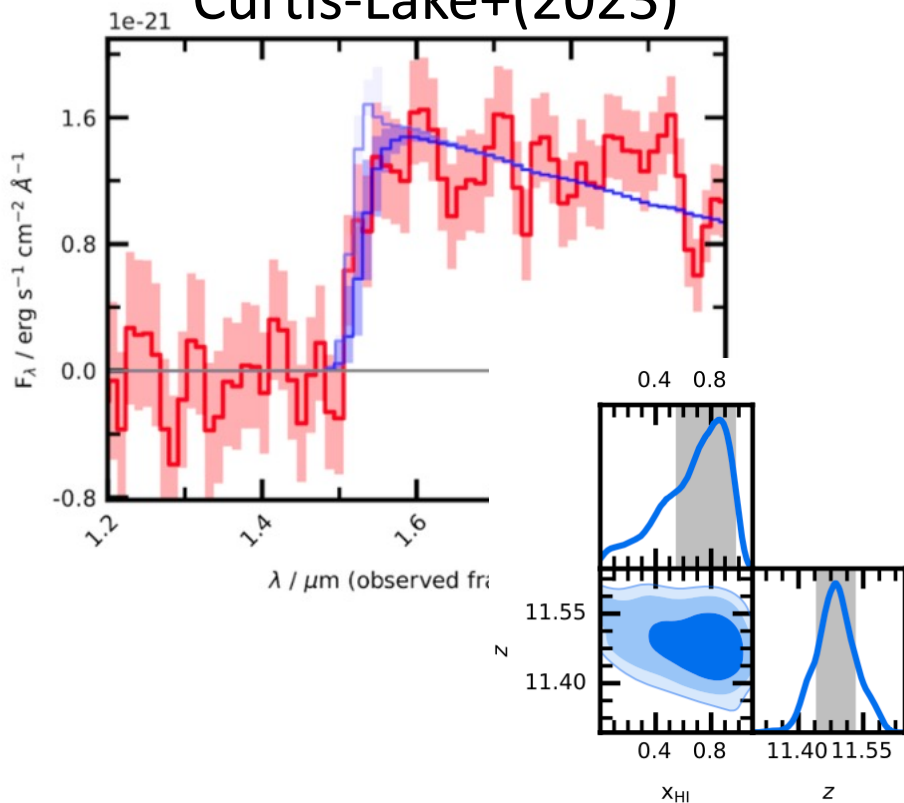
一方、
電離源は何か？
電離史はどうだった？
どういう電離バブル？
はずっと分かっていない

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

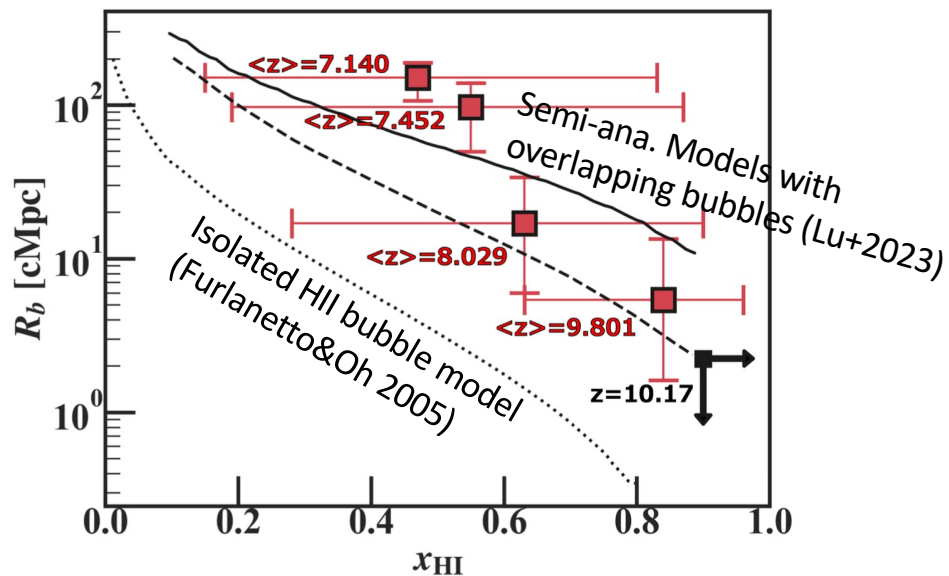


Damping wingによる再電離研究

Curtis-Lake+(2023)



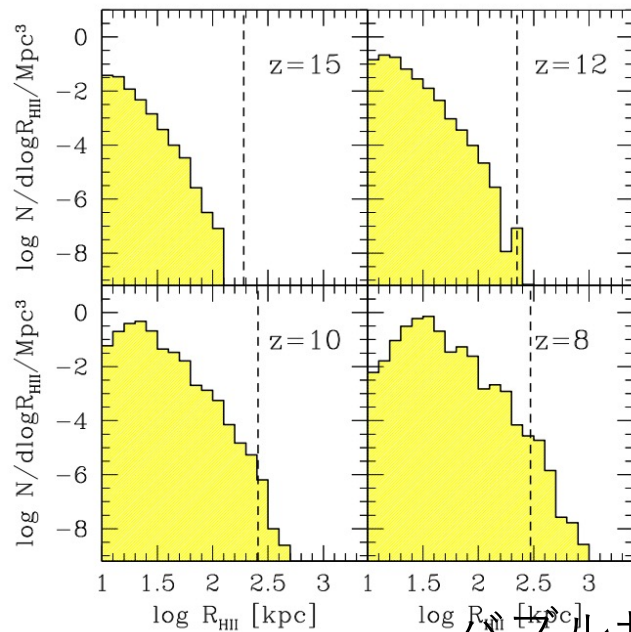
Umeda+(2023)



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

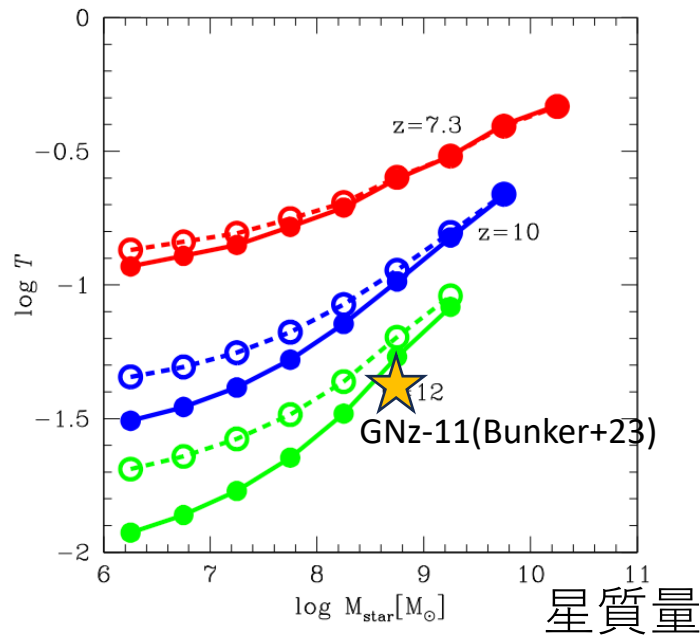
電離バブルと Ly α transmission

Yajima+(2018)



バブルサイズ

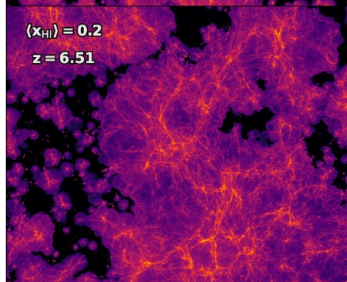
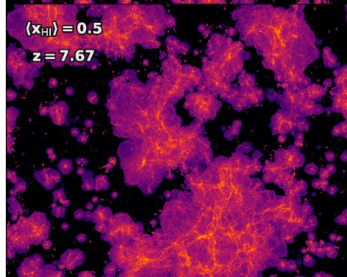
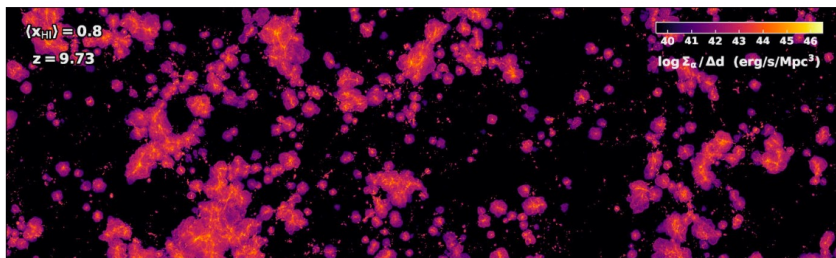
IGM透過率



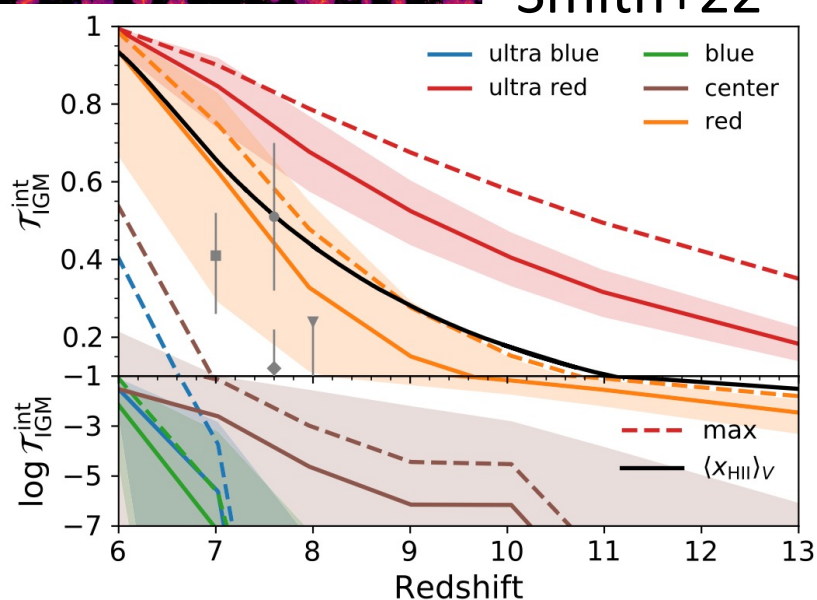
星質量

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)

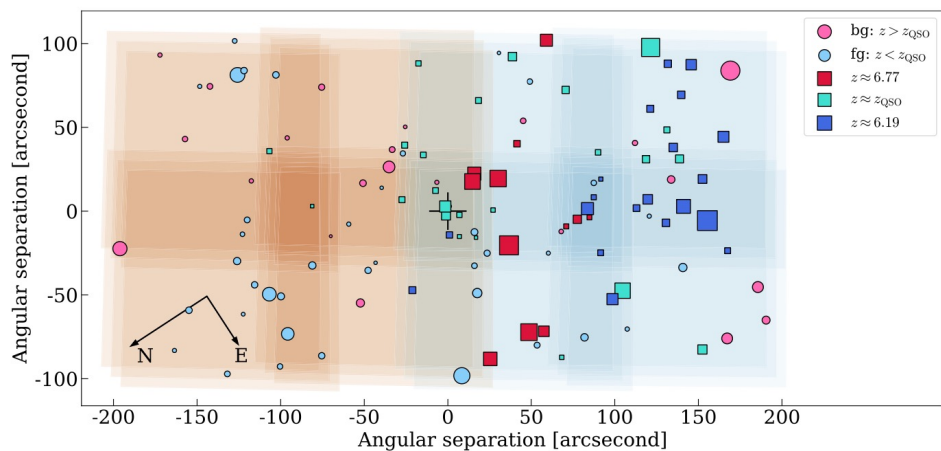


AREPO-RTによる宇宙論的RHD計算
大規模電離構造($\sim 100\text{cMpc}$)から銀河内
構造までをコンシステントに計算らしい
Smith+22

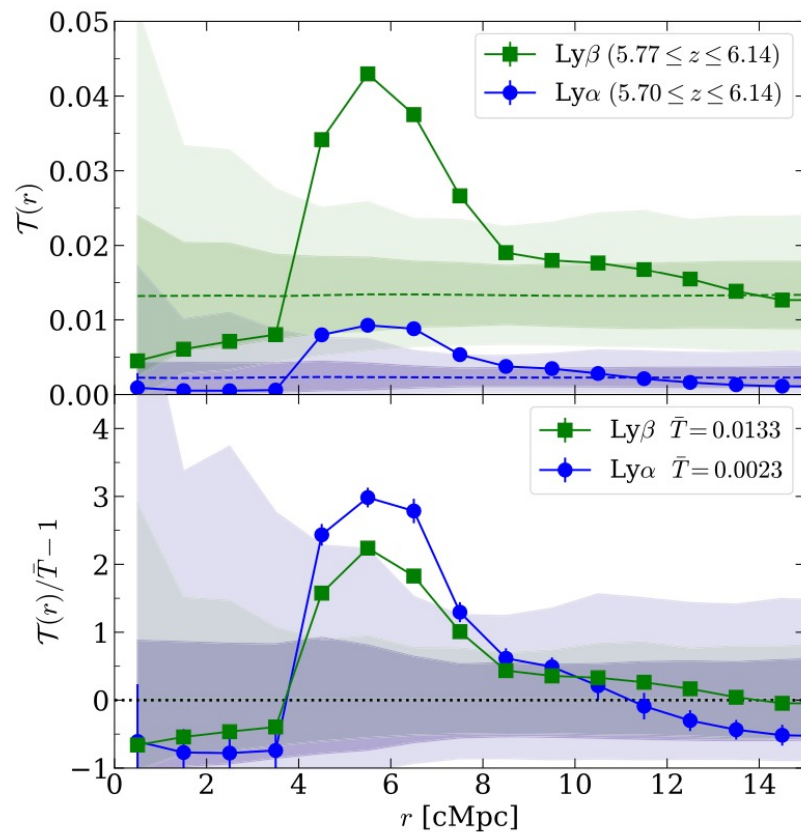


銀河クラスターリングとIGM透過率

Kashino+(2023)



銀河から $\sim 5\text{cMpc}$ 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？