輻射輸送計算で探る
遠方Ly α 輝線銀河の性質

筑波大学計算科学研究センター
曽我健太
共同研究者：矢島秀伸（筑波）、清田朋和（総研大）、大内正巳（東京）

arXiv:2504.03156
@令和7年度 第1回 宇宙史研究センター(TCHoU)構成員会議・成果報告&交流会

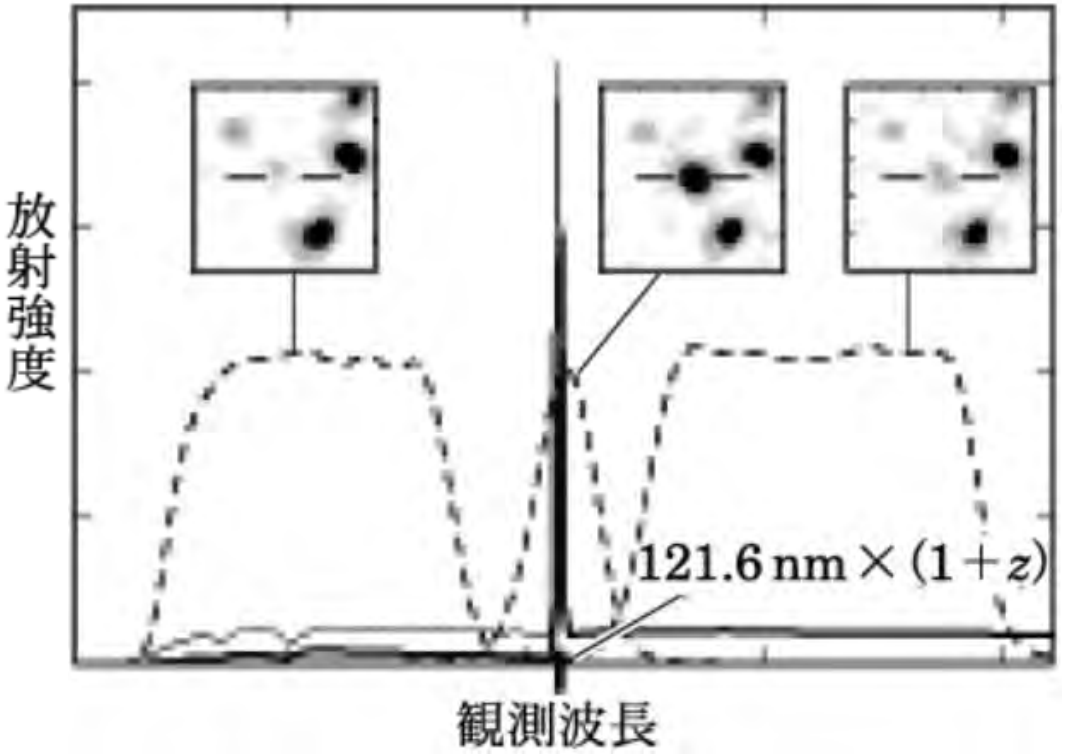
目次

- 第一部：遠方Lyα輝線銀河の観測
  - イントロダクション
    - Lyman Alpha Emitters (LAE)とは
    - 宇宙初期の銀河形成と再電離期の謎
    - HimikoとCR7：宇宙初期の非常に明るいLAE
    - 本研究の目的
  - 観測結果
    - JWST NIRSpec イメージ
    - 複数輝線の場合(Lya, Ha, [CII])
    - Lyα表面輝度分布
    - Himiko, CR7の星質量・星形成率
- 第二部：Lyα輻射輸送計算と観測との比較
    - Lyα輻射輸送計算
    - Himiko, CR7 候補天体の探査
    - シミュレーションで得られたLyα表面輝度
    - Lyα光度の時間変化
- Summary & Conclusion

第一部
遠方Ly α 輝線銀河の観測

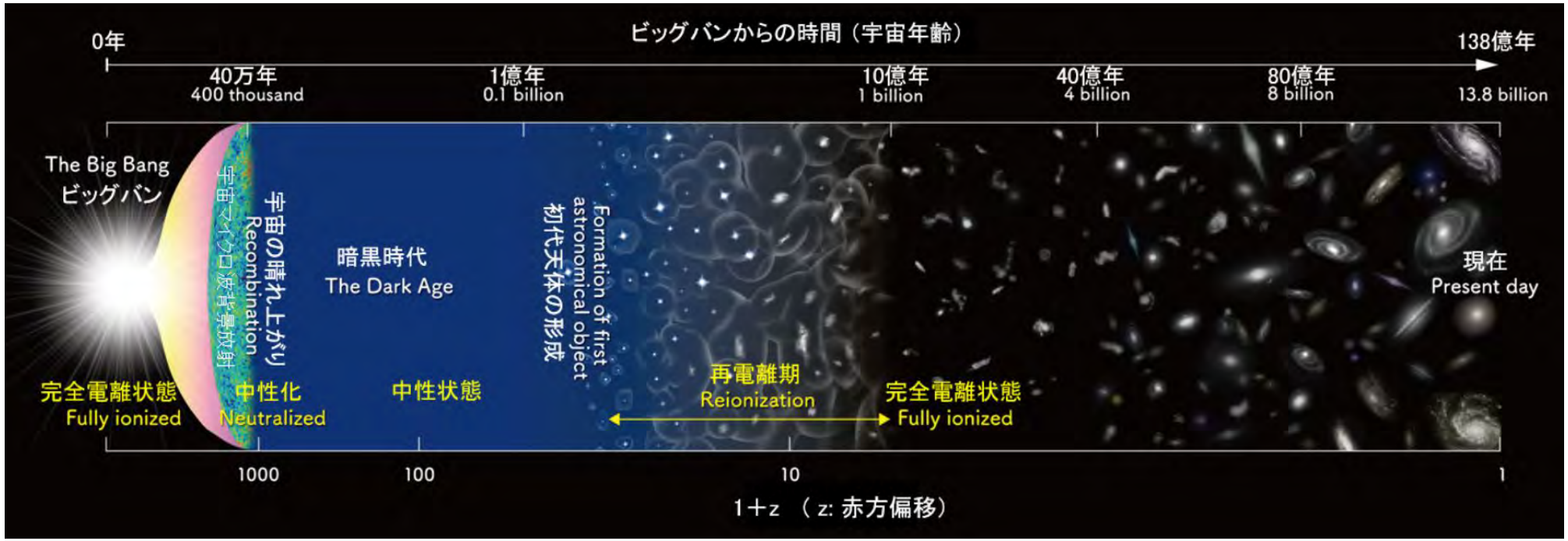
Lyman Alpha Emitters (LAE)とは

- 強いLyα輝線を放出する銀河
  - 一般的に、若くて低質量な星形成銀河
  - 後に大質量銀河へと成長する候補天体（ビルディング・ブロック）
  - 銀河形成・進化の手がかりとなる天体



シリーズ現代の天文学 第4巻、谷口・岡村・祖父江編『銀河I』

宇宙初期の銀河形成と再電離期の謎



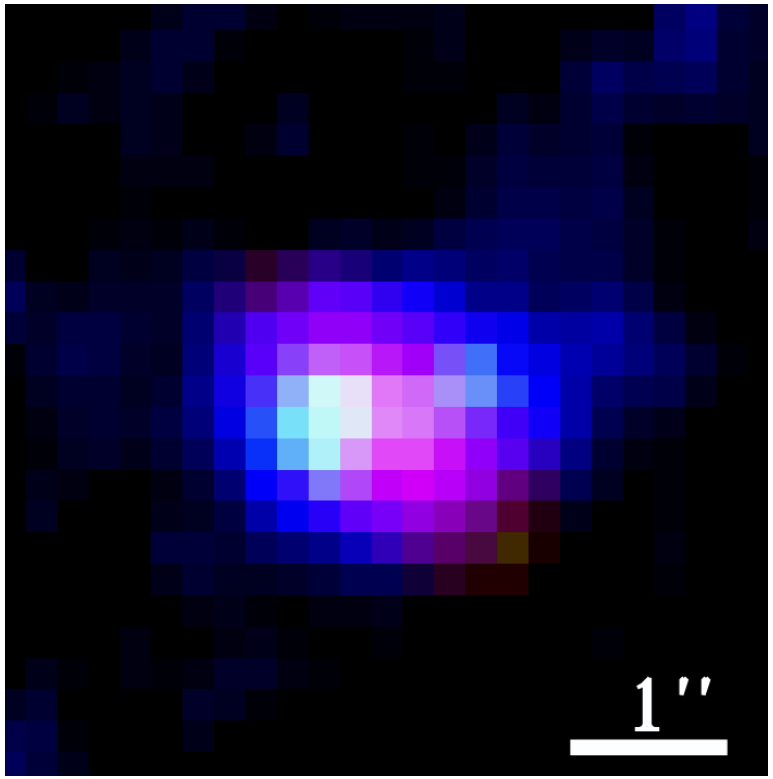
https://almatelescope.jp/assets/uploads/sites/alma.mtk.nao.ac.jp/j/news/files/editor/20160617_fig1e.jpg

- 宇宙が誕生して数億年後、最初の星と銀河が形成され始めた
- この時代（$z \gtrsim 6$）は「宇宙の夜明け」＝再電離期と呼ばれる
- 銀河が放つ電離光子が、宇宙空間を再び電離させたと考えられている
- しかし、主要な光源はなにか、再電離の進行速度などは未解決問題である。

HimikoとCR7：宇宙初期の非常に明るいLAE

- 赤方偏移z ≈ 6.6（宇宙年齢約１億年）で発見された明るいLAE
  - $L_{\mathrm{Ly}\alpha} = 3.9 \times 10^{43}\ \mathrm{erg\ s^{-1}}$
- 16–17 kpcに渡る空間的に拡がり
- HST観測により複数の星形成領域（合体中銀河）を示唆
- ALMA観測では[C II]輝線あり／塵は検出されず低金属環境か？

Himikoの疑似カラーイメージ



Ouchi et al. (2009)

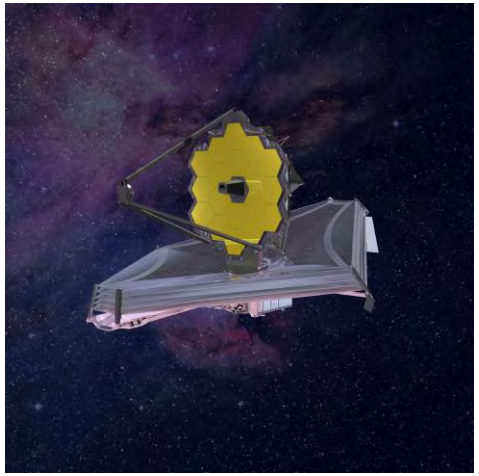
本研究の目的

- 従来は、拡がったLyα放射やUV輝度の起源を説明できなかった
- 最新高性能望遠鏡James Webb Space Telescope（JWST）によって、空間分解された分光データが取得可能に
  - 銀河内部の金属量・電離状態を詳細に解析
- 観測された天体をシミュレーションで説明できるかを、輻射輸送計算の実行によって検証する。

観測の概要

- 対象天体：Himiko, CR7
- 観測機器
  - JWST/NIRCam （撮像）
    - フィルター：F090W, F115W, F150W, F200W, F277W, F356W, F410M, F444W
  - JWST/NIRSpec （分光）
    - フィルター： PRISM/CLEAR(0.60–5.30 μm), G395H/F290LP(2.87–5.27 μm)
  - Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) Band 6
    - [C ii]158 μm 輝線
  - Hyper Suprime-Cam (HSC) Subaru
    - フィルター：Narrow Band (NB) 921

JWST



https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/goddard/studying-the-solar-system-with-nasas-webb-telescope/

ALMA

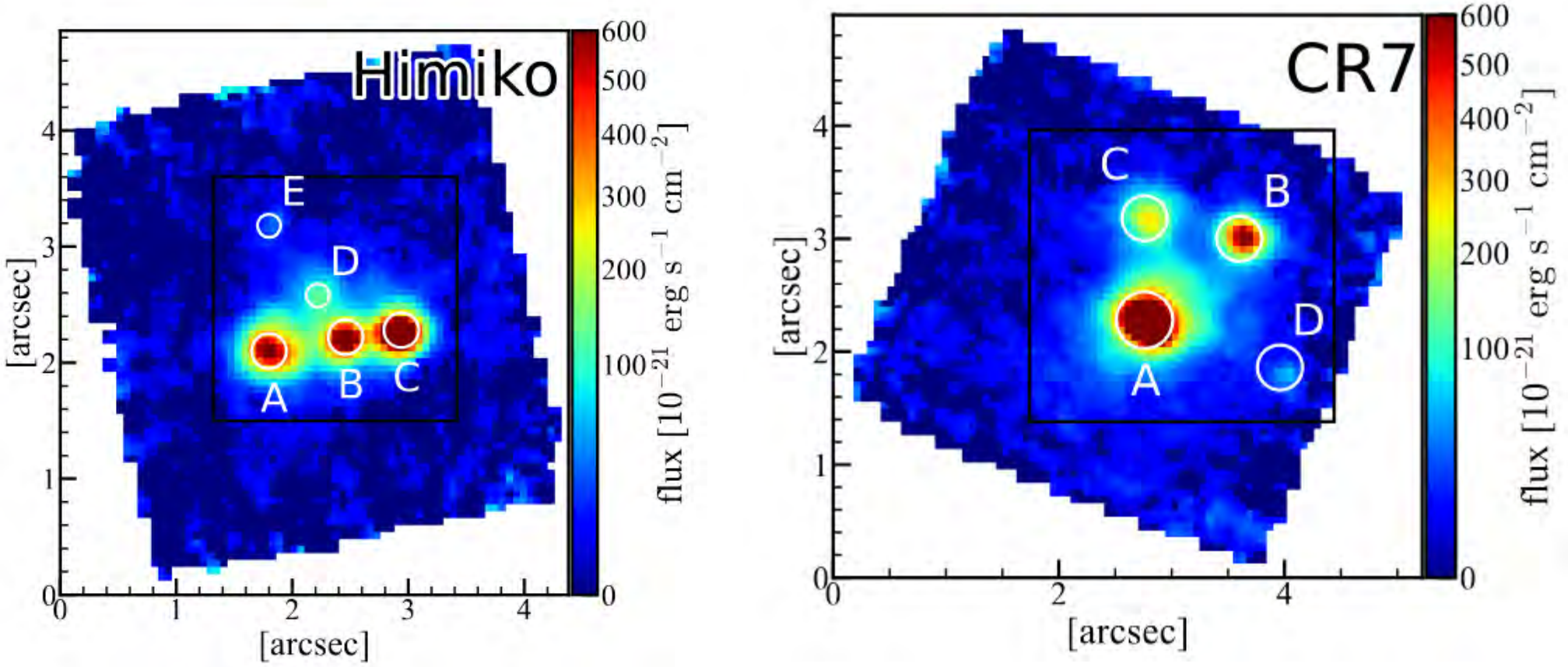
Image credit: ESO/C. Malin (christophmalin.com))

Subaru

https://subarutelescope.org/jp/gallery/facility/2025/05/07/3552.html

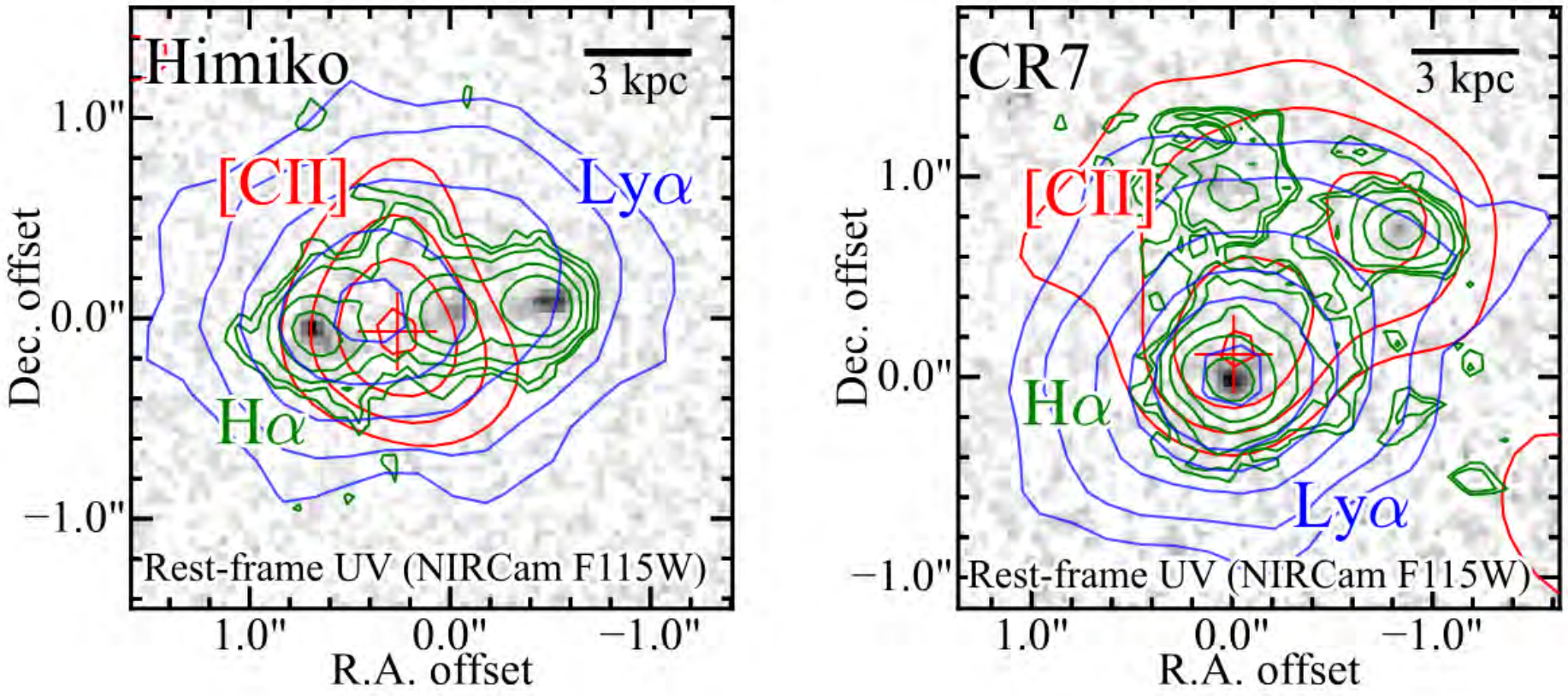
観測結果: JWST NIRSpec イメージ

[O III] λ 5007 輝線のまわり ±750 km/s の範囲のJWST NIRSpec 画像



- 4~5個のクランプが約20kpcスケールで存在。
- [OIII] doubletによって新たなクランプが見つかった（Himiko-E & D）

観測結果：複数輝線の場合(Ly α , H α , [CII])



- 各クランプ位置をピークにするようにH α が分布
- [CII]とLy α ピーク位置がほぼ同じ。
- Ly α が他の輝線に比べて、拡がった構造

Himiko, CR7の星質量・星形成率

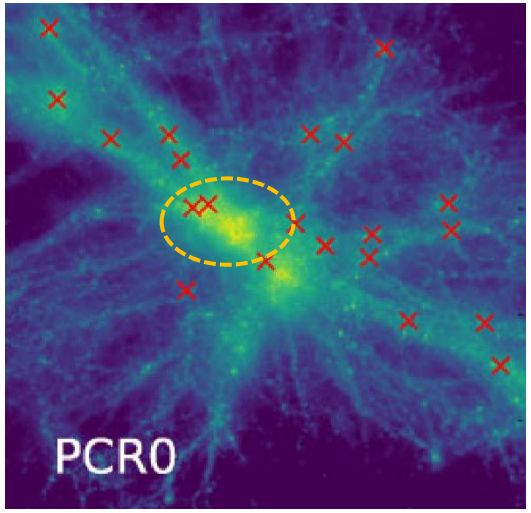
- SED fitting
  - ある一定の仮定の下、様々な星（質量、年齢、金属量）の重ね合わせで、最もSEDとよくフィットする場合を調べることで、銀河の物理量（例、星質量）を調べる手法。
- 仮定
  - 星の種族合成モデル＋輝線放射モデル。
  - 初期質量関数：Chabrier (2003)
  - 銀河間物質による減光：Madau (1995)
- 結果(Himiko)
  - 星質量：$8.4 < ¥\log(M_{\rm star}) < 8.9\ [M_\odot]$
  - 星形成率：$7.9 < SFR < 14.1\ [M_\odot\ {\rm yr}^{-1}]$
  - ->比較的、活発に星形成をしている天体

	SED fitting		
Object	$\log(M_*)$	SFR	A_V
	$(M_\odot)$	$(M_\odot\ {\rm yr}^{-1})$	(mag)
(1)	(2)	(3)	(4)
Himiko-A	$8.4^{+0.2}_{-0.1}$	$7.9^{+0.6}_{-0.6}$	$0.03^{+0.03}_{-0.02}$
Himiko-B	$8.9^{+0.1}_{-0.2}$	$11.7^{+1.2}_{-1.0}$	$0.48^{+0.06}_{-0.06}$
Himiko-C	$8.4^{+0.1}_{-0.1}$	$14.1^{+0.9}_{-0.7}$	$0.21^{+0.04}_{-0.04}$
CR7-A	$8.8^{+0.1}_{-0.2}$	$23.4^{+2.4}_{-3.0}$	$0.13^{+0.04}_{-0.05}$
	$9.3^{+0.1}_{-0.1}$	$25.7^{+1.2}_{-1.1}$	$0.20^{+0.01}_{-0.01}$
CR7-B	$8.9^{+0.2}_{-0.2}$	$2.9^{+1.4}_{-0.9}$	$0.13^{+0.15}_{-0.09}$
	$8.5^{+0.2}_{-0.2}$	$5.9^{+0.5}_{-0.4}$	$0.14^{+0.05}_{-0.03}$
CR7-C	$8.3^{+0.3}_{-0.3}$	$2.8^{+0.6}_{-0.6}$	$0.05^{+0.07}_{-0.04}$
	$8.3^{+0.3}_{-0.1}$	$3.8^{+0.7}_{-0.7}$	$0.08^{+0.04}_{-0.03}$

第二部
Ly α 輻射輸送計算と観測との比較

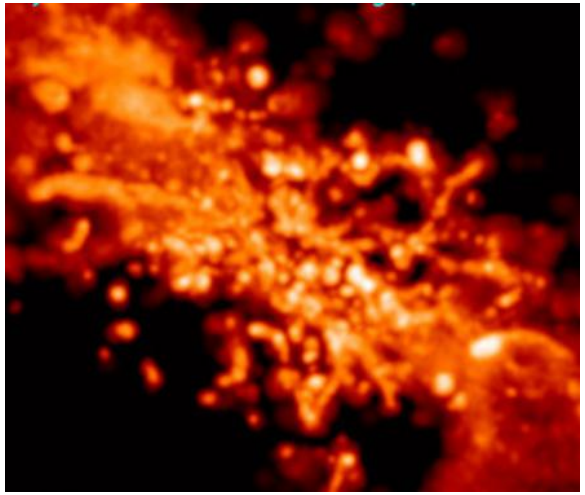
第二部：Ly α 輻射輸送計算

- データ：FOREVER22 (Yajima et al. 2022)
  - 宇宙論的銀河形成シミュレーション
  - 多数の銀河サンプル有り
  - このデータからHimiko 候補天体を探す
- 輻射輸送計算： ART2 code(Li et al. 2020)
  - Adaptive Mesh Refinement(AMR)という、密度に応じて細かくメッシュ分割して密度場を表現。
  - Ly α の多重散乱をモンテカルロ法で計算。



FOREVER22 (Yajima et al. 2022)

Himiko候補天体を抜き出して輻射輸送計算



ART2 Li et al. (2020)

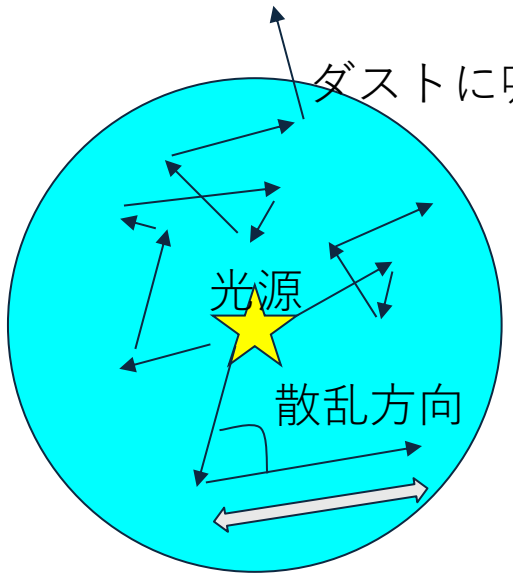
Lyα光子の輻射輸送計算方法

ART2 code (Li et al. (2020)): AMR+モンテカルロ輻射輸送

粒子の散乱過程を確率的に扱うことで表面輝度分布を計算する。

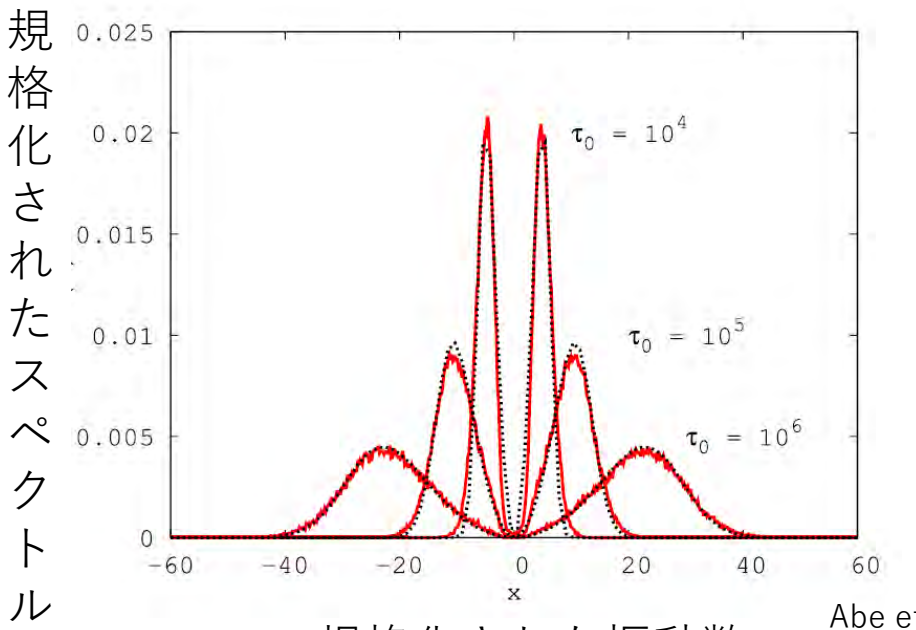
Lyα光子の散乱過程

光子が系外に脱出するまで
or
ダストに吸収されるまで計算



光子が進む距離

脱出光子スペクトルと光学的厚み



規格化された振動数

Abe et al. (2018)

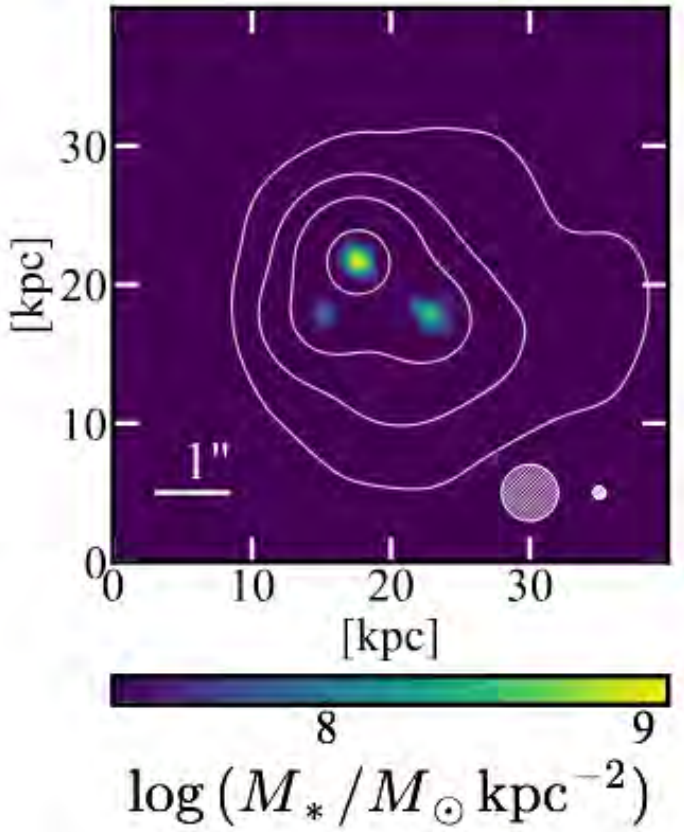
散乱時に速度による振動数シフトを伴う

Himiko, CR7 候補天体の探査

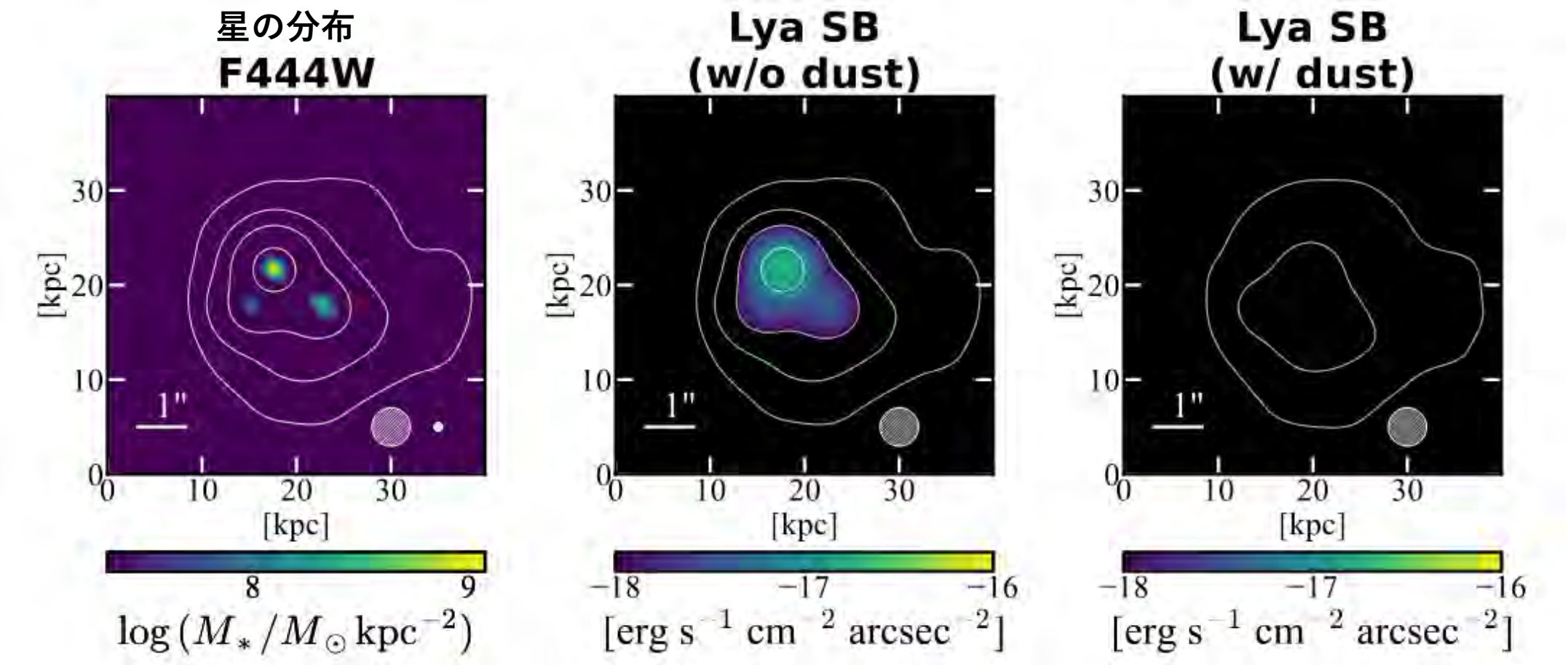
- 観測量と整合的な候補天体を以下の条件で探査
  - 赤方偏移： $6 \leq z \leq 7$
  - 星質量： $8 \leq \log(M_*)\,[M_\odot] \leq 9$
  - 星形成率： $1 \leq \mathrm{SFR}\,[M_\odot\ \mathrm{yr}^{-1}] \leq 30$
  - 空間的拡がり： $L \sim 20$ [kpc] （目視）
  - 複数のクランプを持つ（目視）

	Simulation(z=6.6)
$\mathrm{SFR}\,[M_\odot\ \mathrm{yr}^{-1}]$	13.5
$\log(M_{\mathrm{star}})\,[M_\odot]$	9.2
$\log(M_{\mathrm{dust}}/M_{\mathrm{gas}})$	-2.58

選ばれた天体の星の分布



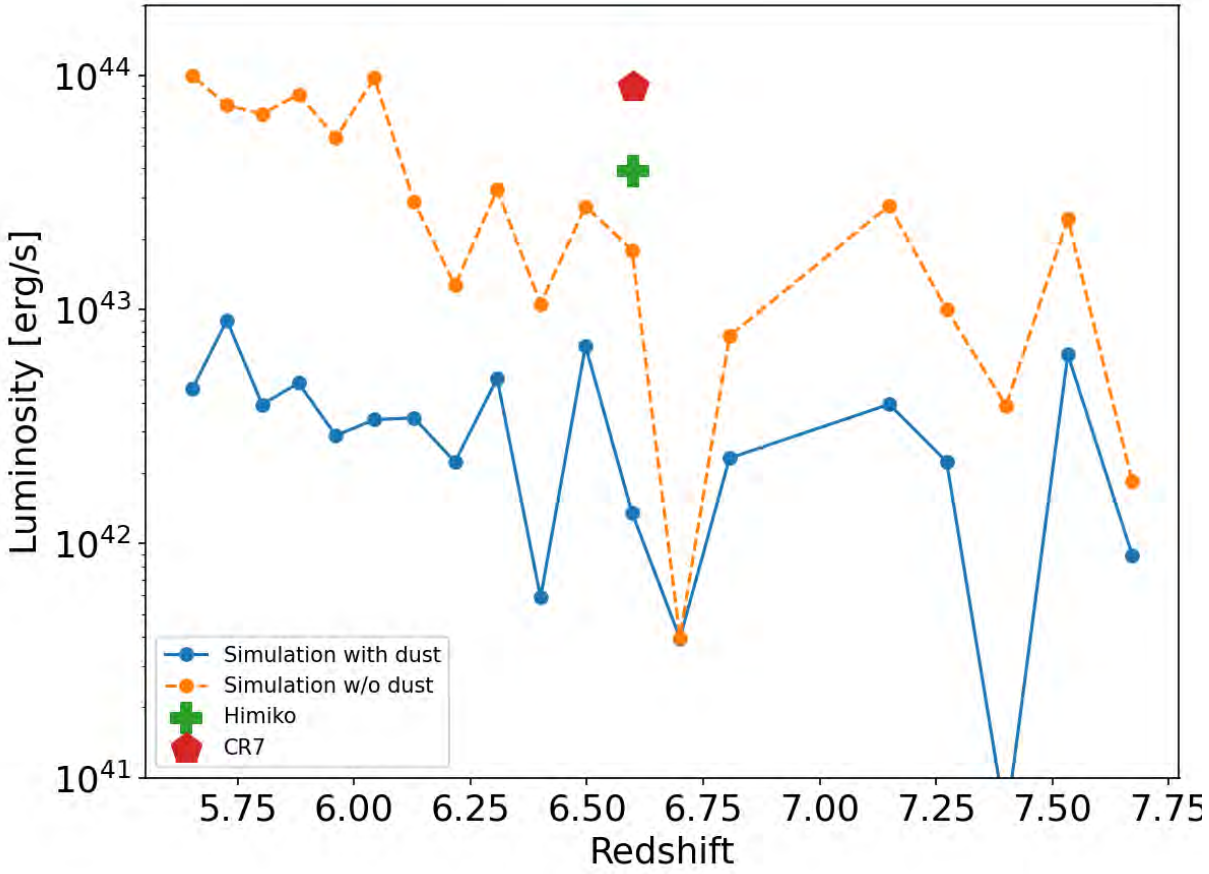
シミュレーションで得られたLy α 表面輝度



- ダスト減光を考慮しない場合、Subaru HSTで検出可能。
- ダスト減光を含めると観測限界を下回る。

Ly α 光度の時間変化

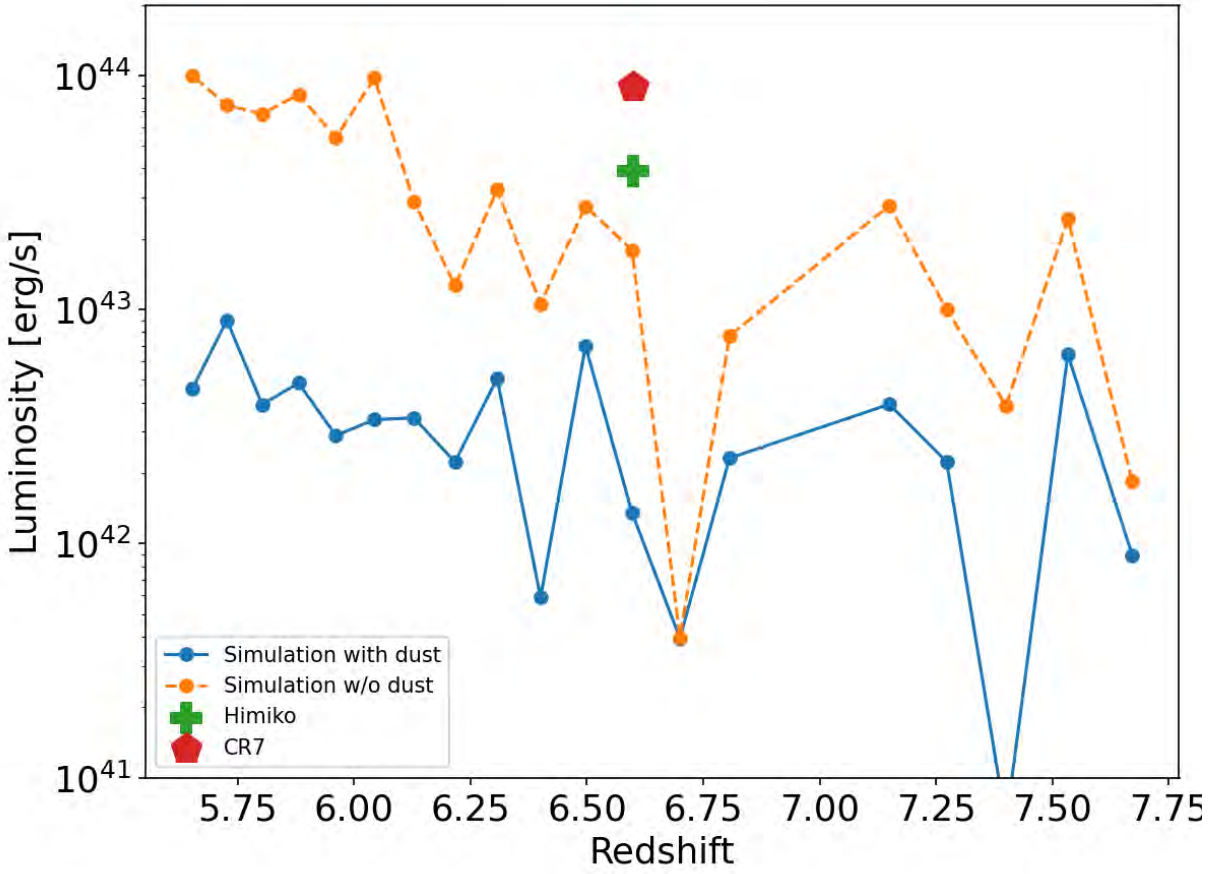
- 時間とともに光度は増加
- ダストなしでは、Himikoの46.2%、CR7の20.2%の明るさ
- Himiko, CR7はSFR, 星質量を同程度にしたシミュレーション天体よりかなり明るい

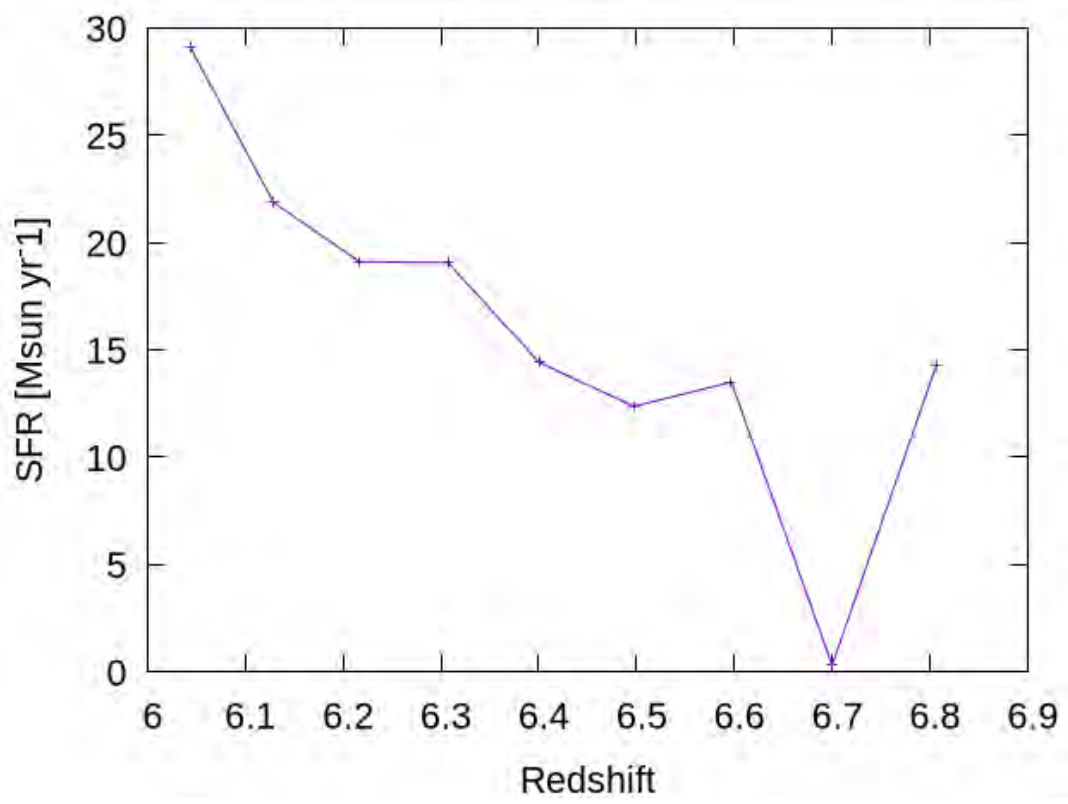


	Simulation (z=6.6)	Himiko	CR7
SFR	13.5	11.2	9.7
$\log(M_{\mathrm{star}})$	9.2	8.6	8.67
$\log(M_{\mathrm{dust}}/M_{\mathrm{gas}})$	-2.58	<-2.5	<-3.2
L_{Lya}	1.79e43 (w/o dust)	3.9e43	8.9e43
	3.94e41 (with dust)		

Ly α 光度の時間変化

- 時間とともに光度は増加
- ダストなしでは、Himikoの46.2%、CR7の20.2%の明るさ
- Himiko, CR7はSFR, 星質量を同程度にしたシミュレーション天体よりかなり明るい





議論：ダスト量の食い違いはどこから？

- Himiko, CR7ではダストの破壊機構が強く効いてる？
  - 超新星爆発の衝撃波によるsputtering
- シミュレーションでダストの物理を正しく解けているか？
  - 宇宙論的な文脈で、銀河内のダストの形成・破壊を解くのはかなり厳しい-> サブグリッドモデル
- Himiko 候補天体を探す段階で、ダスト量に関する制限を設けるべきか？
  - 今回のシミュレーションデータは若干、星質量がHimikoに比べて大きい。
  - ある時点では、あまり星質量は大きくないが、瞬間的にSFRが高く、ダスト量が少ない銀河で調査
  - 今回はForever22の10個ある高密度領域のうち１つしか探査していないので、（運が良ければ）都合のよい銀河が見つかる可能性。

Summary & Conclusion

- 赤方偏移z=6.6で明るいLy α 輝線天体、Himiko, CR7を観測・理論の双方からその性質を調べた。
- JWST dataによりHimiko, CR7は明るい3つのクランプを空間スケール20kpc内に持つ。
- 星質量$M_{\mathrm{star}} = 10^{8-9} M_{\odot}$, 星形成率$\mathrm{SFR} \sim 10 M_{\odot} \mathrm{yr}^{-1}$程度の値持ち、比較的活発に星形成をする一方で、ダスト量は少ない($\log\left(M_{\mathrm{dust}}/M_{\mathrm{gas}}\right) < -2.5 \mathrm{or} -3.5$。）
- ダスト吸収を考慮しない場合の**Ly α 輻射輸送結果は、Himikoと同程度の光度$L_{\mathrm{Ly\alpha}} \sim 10^{43} \mathrm{erg\,s^{-1}}$をもち、かつ同程度の拡がり($\sim 20\mathrm{kpc}$)を再現した**。
- 一方で、ダスト吸収を含めた場合、Himiko, CR7に比べて1~2桁暗い結果となり、ダスト量に関しては引き続き調査が必要。