

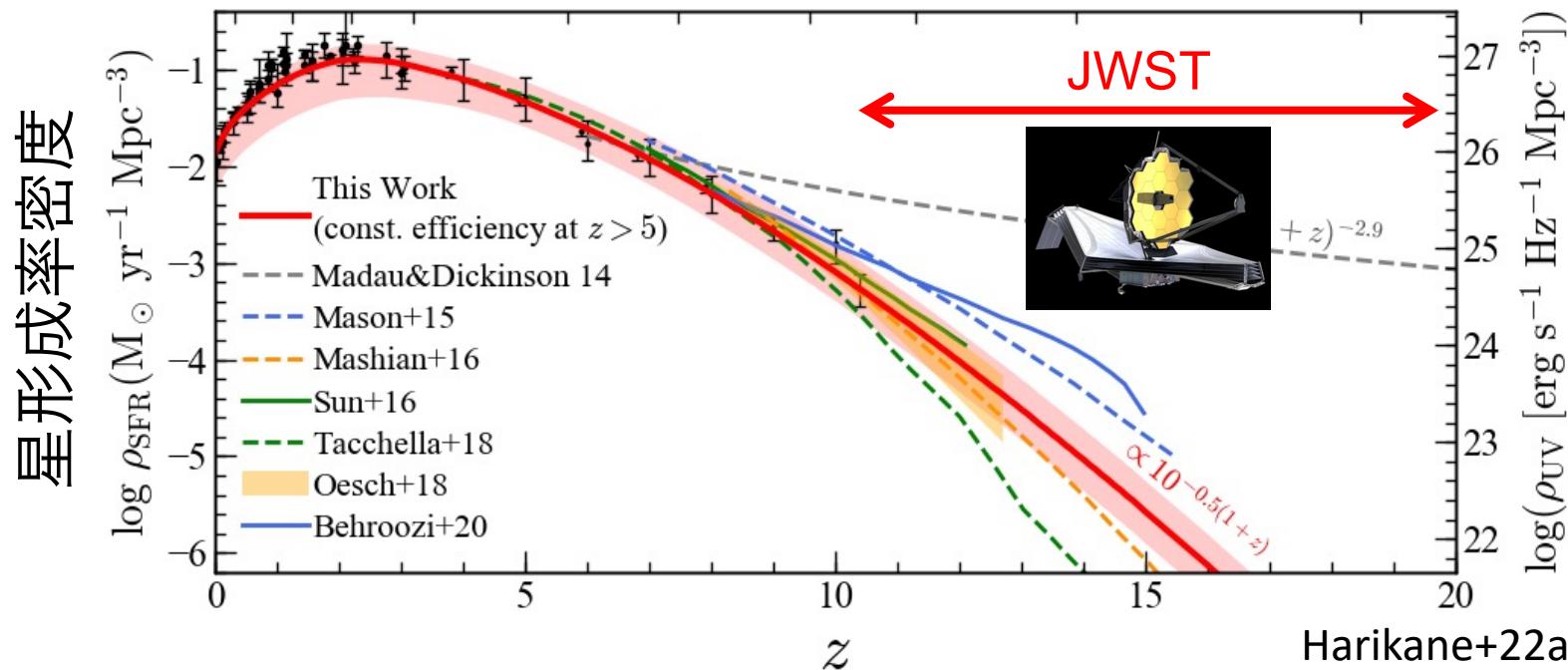
# JWSTで探る遠方銀河形成: 初年度観測レビュー

播金優一  
(東京大学宇宙線研究所)

JWST First Image of a galaxy cluster, SMACS0723,  
released in July 2022 (NASA)

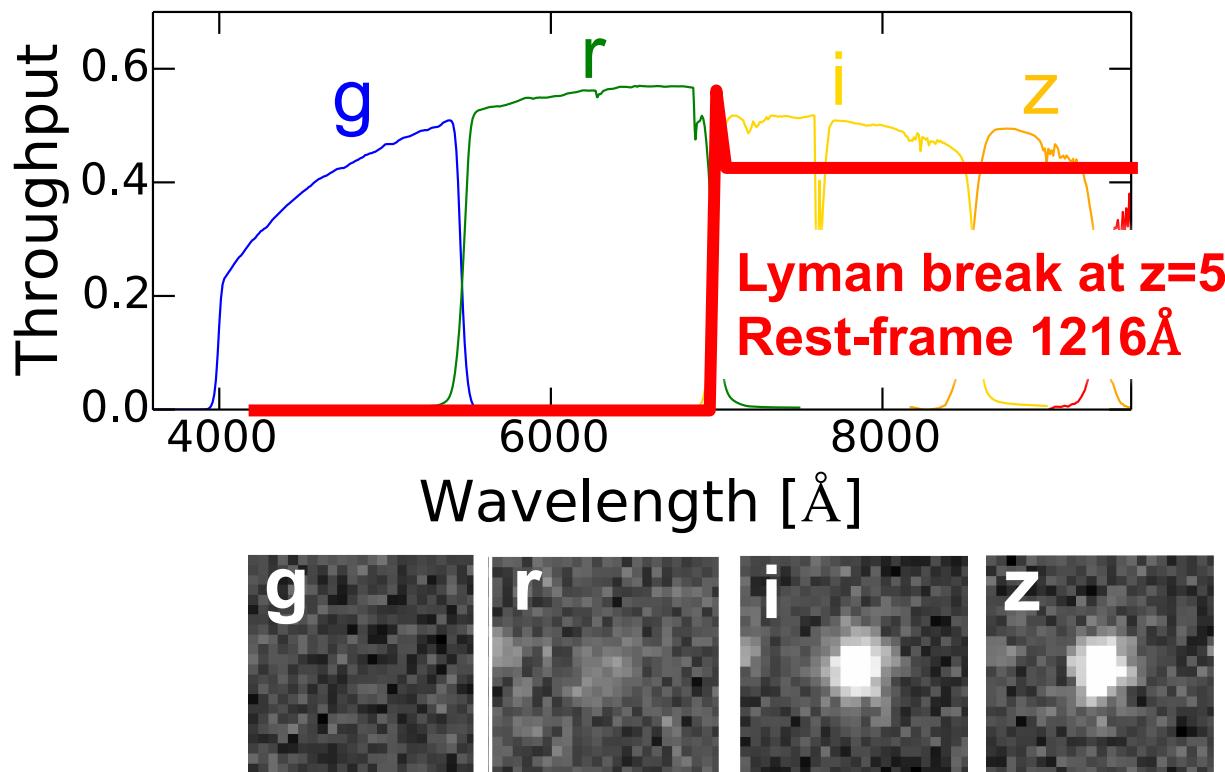
# JWST登場前の状況

- ・ ハッブル望遠鏡による観測 ( $z < 10$ )
  - 星形成率密度進化 (e.g., Bouwens+15, Finkelstein+15)
- ・ モデル: 星形成効率 ( $SFR/(dM_h/dt)$ ) 一定
  - $z=0-10$ の進化を再現,  $z>10$ では急激な現象 ( $\propto 10^{-0.5(1+z)}$ )



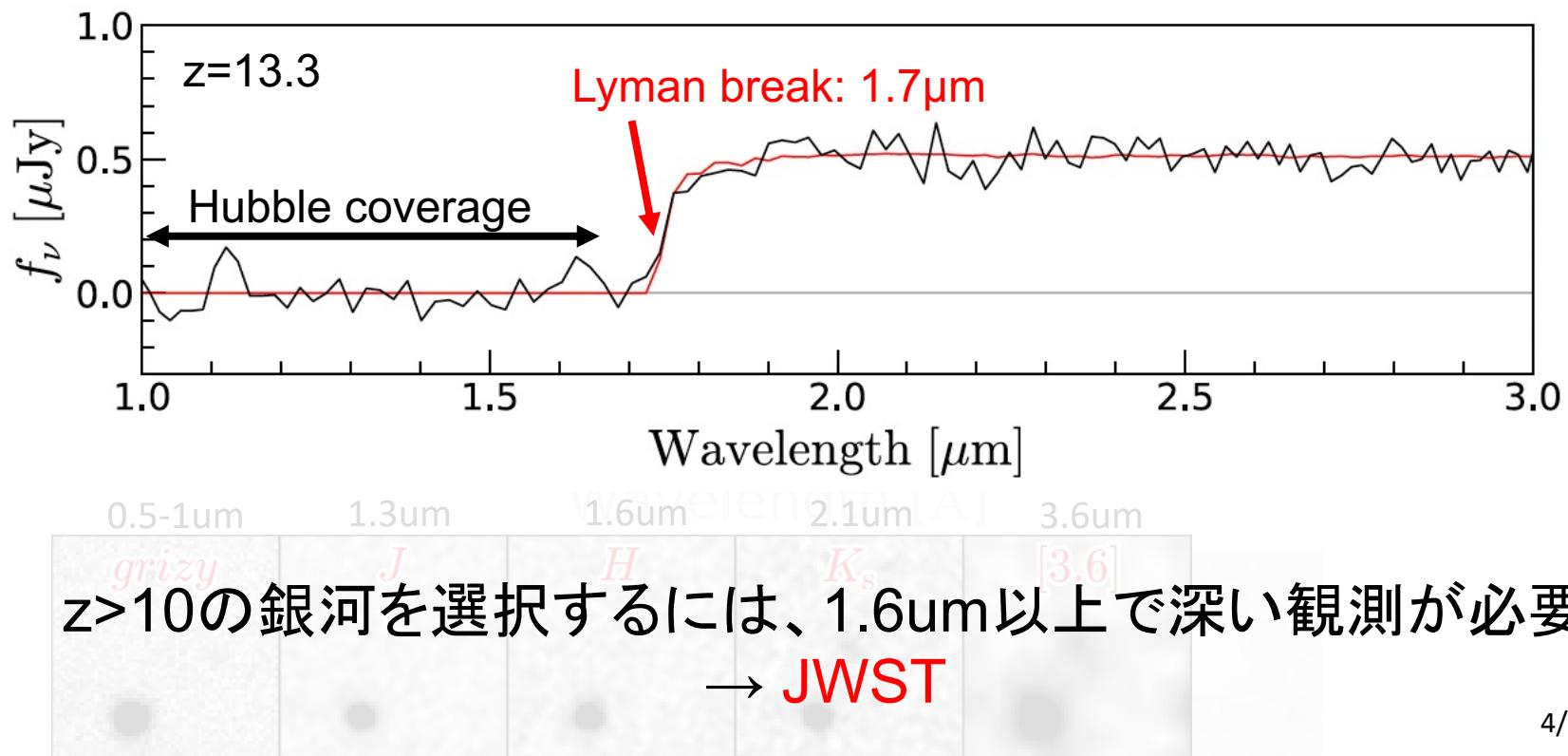
# 遠方銀河の選択方法

- ライマンブレイク法(ドロップアウト法)
  - IGM中の中性水素の吸収(Lyaブレイク, 1216Å)を使う
  - Lyman break galaxy (LBG), dropout galaxy



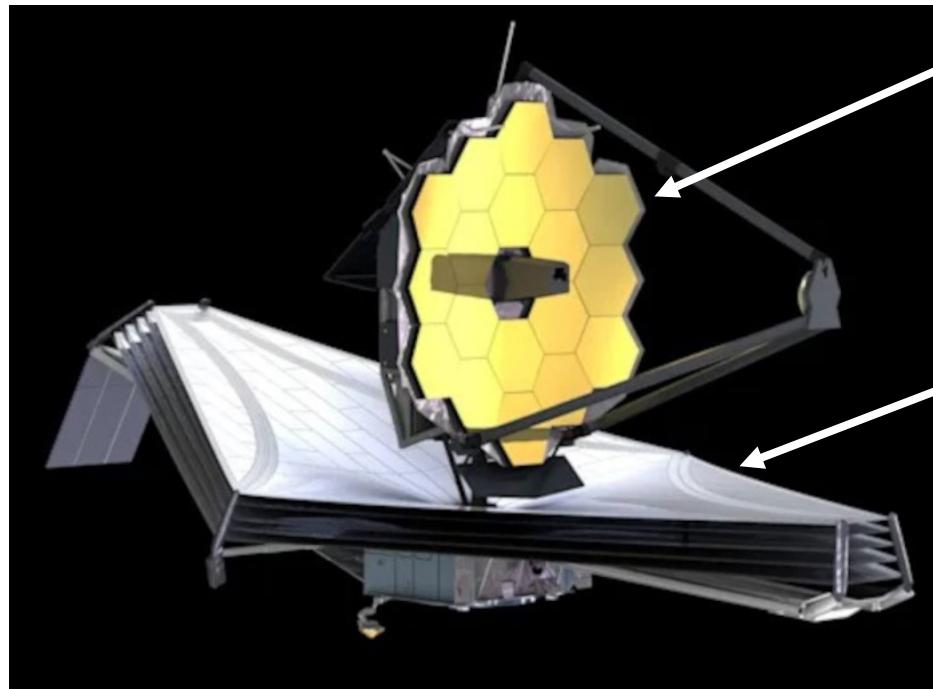
# 遠方銀河の選択方法

- ライマンブレイク法(ドロップアウト法)
  - IGM中の中性水素の吸収(Lyaブレイク, 1216Å)を使う
  - Lyman break galaxy (LBG), dropout galaxy



# James Webb Space Telescope (JWST)

- 赤外線望遠鏡。6.5mの非常に大きな鏡
  - ハッブル望遠鏡の鏡は2.4m
- 一兆円規模の巨大望遠鏡プロジェクト
- 2021/12/25打ち上げ、2022/7/12に最初の画像公開



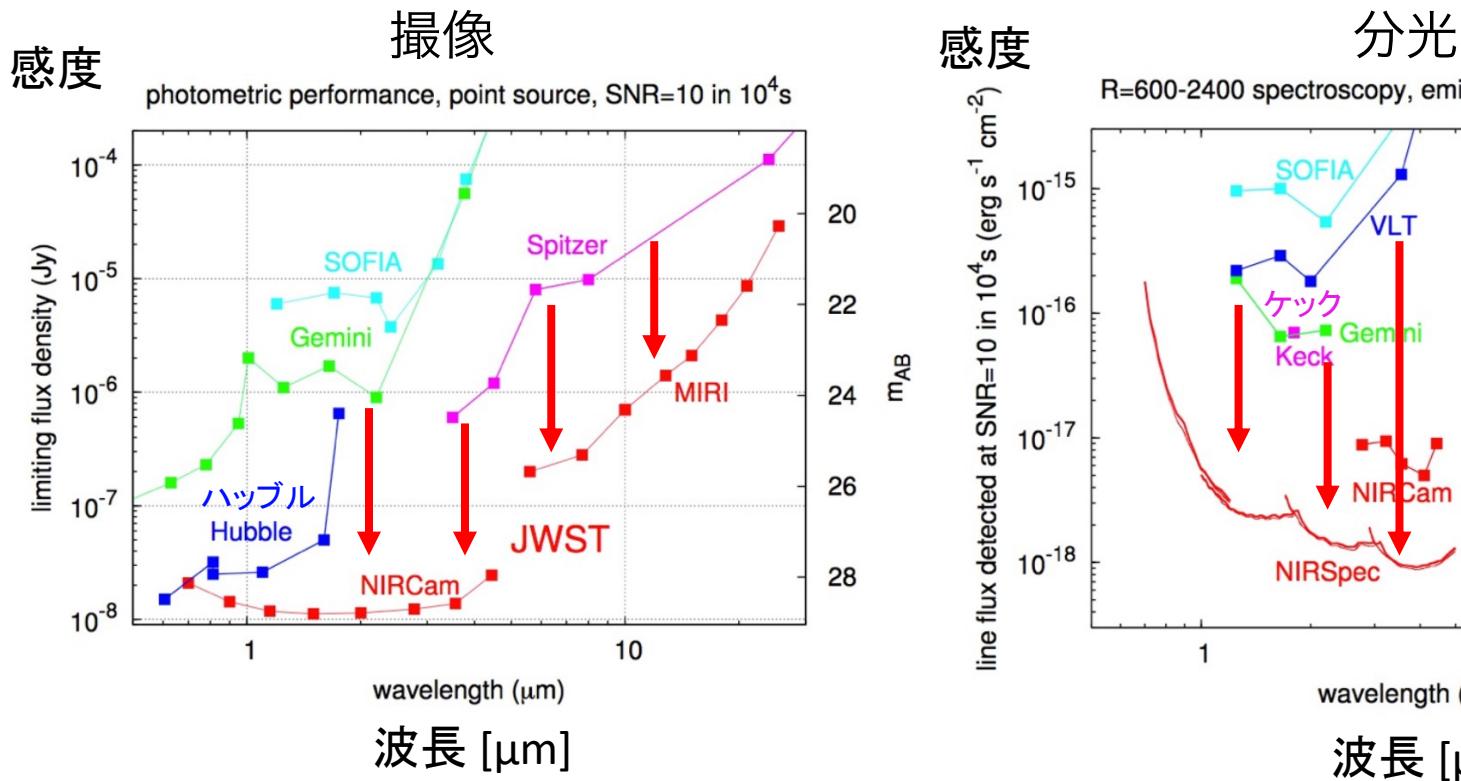
主鏡 (直径6.5m)  
18枚の小さな鏡の組み合わせ  
金メッキコーティング

サンシールド  
太陽からの光を遮って、  
望遠鏡を-233°Cに保つ

NASA

# JWSTの感度

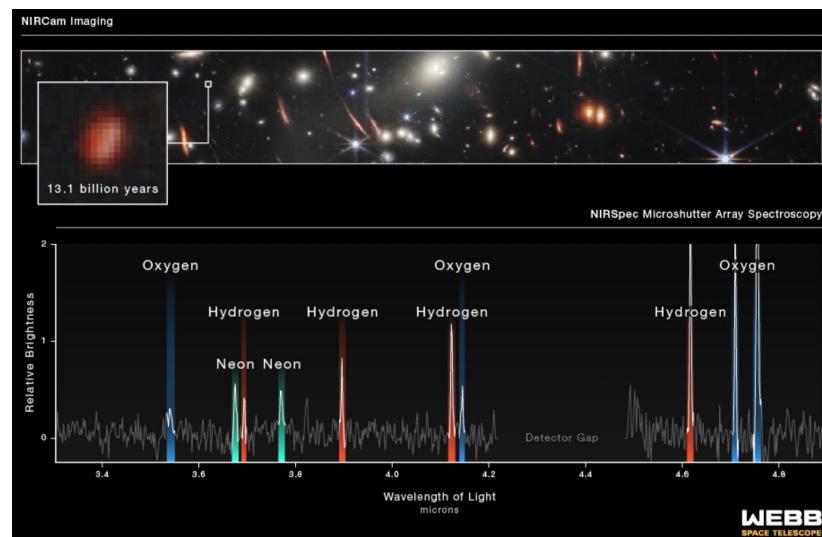
- 撮像・分光ともに感度が10-1000倍向上



<https://www.stsci.edu/jwst/about-jwst/history/historical-sensitivity-estimates>

# 最初のデータ公開 (2022/7/12)

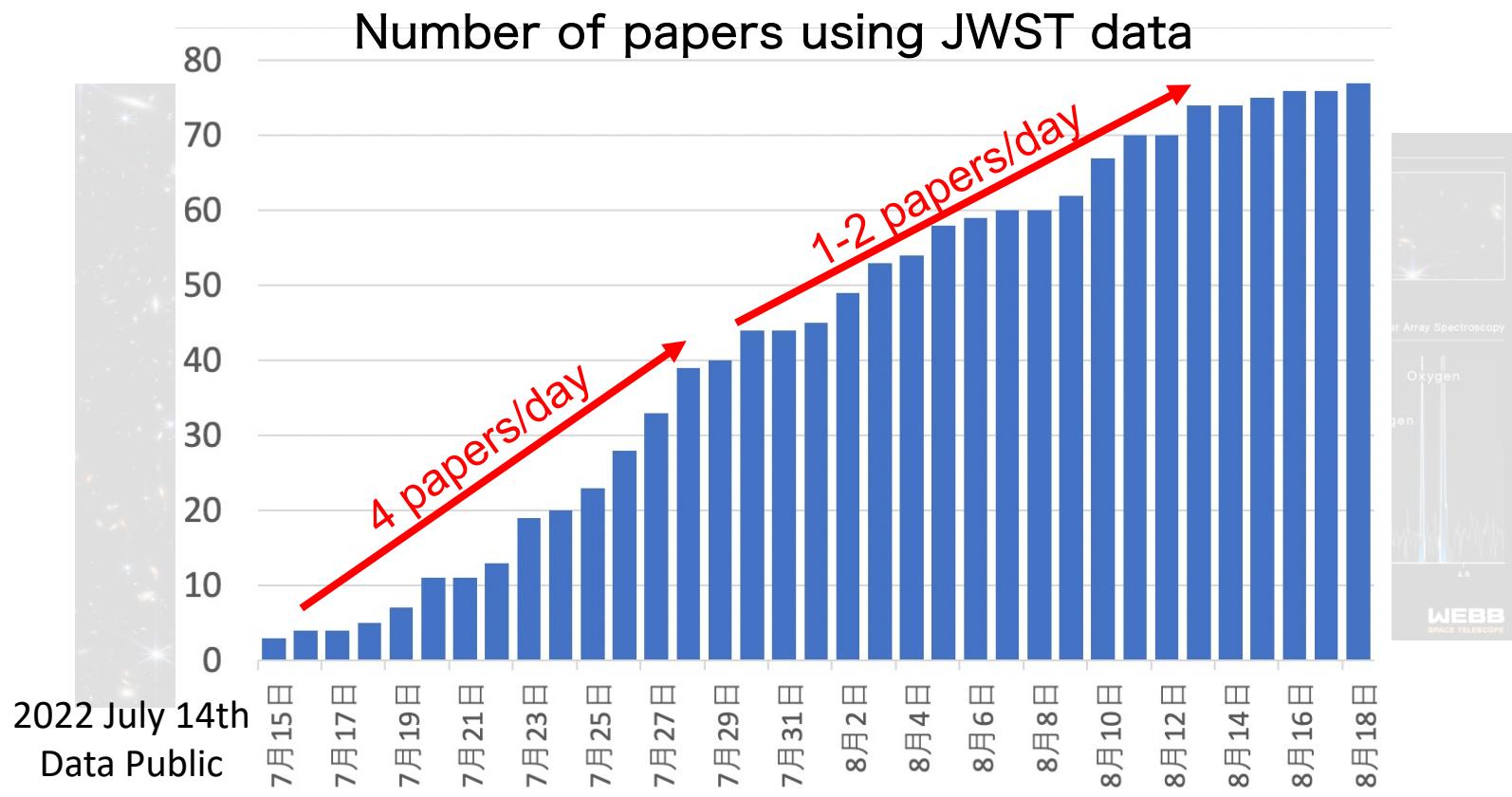
- NIRCam画像 (90 arcmin<sup>2</sup>) and NIRSpec分光データ
  - 最初の1ヶ月で80本の論文がarXivに登場 (paper rush)
  - 現在(約一年): 2000本以上のJWST関連論文



NASA, ESA, CSA, and STScI

# 最初のデータ公開 (2022/7/12)

- NIRCam画像 (90 arcmin<sup>2</sup>) and NIRSpec分光データ
  - 最初の1ヶ月で80本の論文がarXivに登場 (paper rush)
  - 現在(約一年): 2000本以上のJWST関連論文

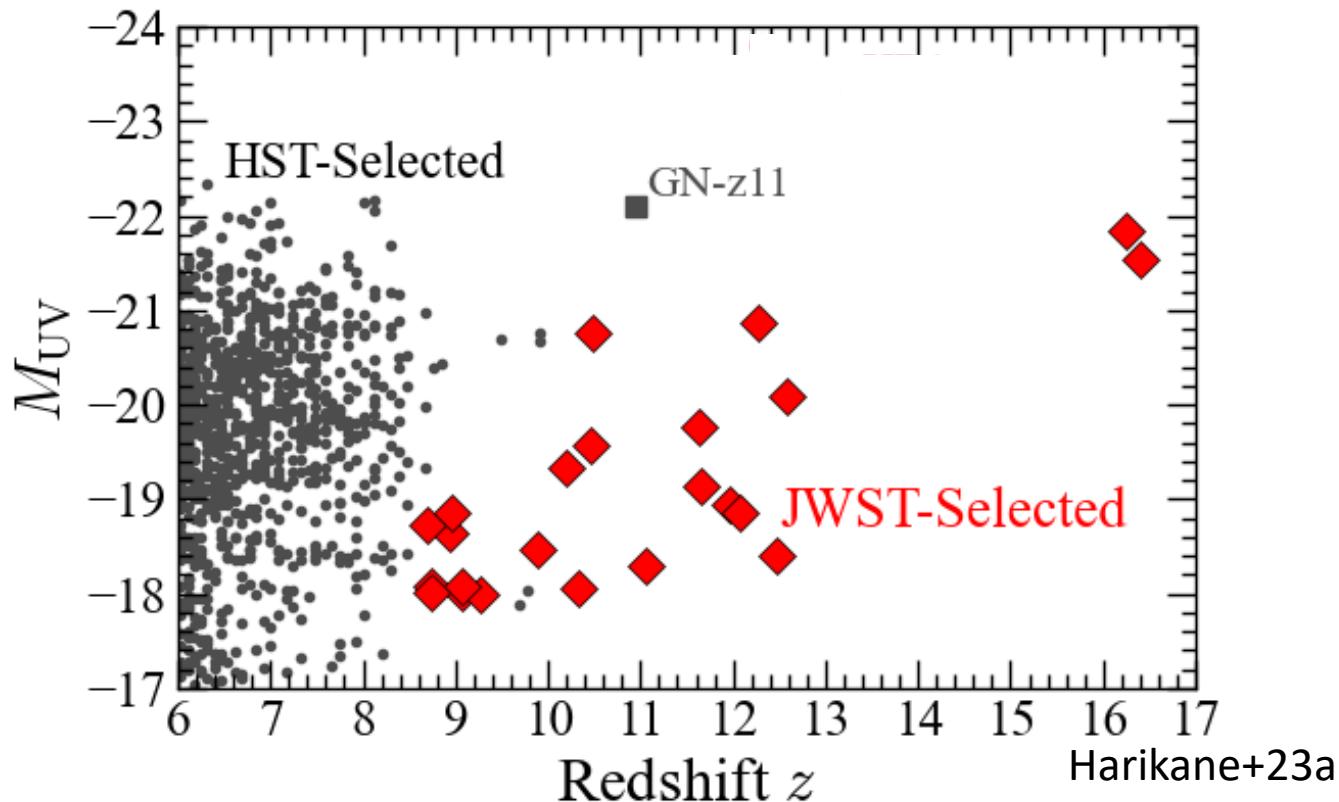


# JWST一年目の成果

- $z>10$ の銀河候補と分光結果
  - e.g., Harikane+23ac, Finkelstein+22,23, Arrabal Haro+23ab, Hainline+23
- $z=7-9$ の大質量銀河?
  - e.g., Labbe+23, Xiao+23, Boylan-Kolchin 22, Lovell+22
- $z>4$ で多くのAGN (see 稲吉さんtalk)
  - e.g., Kocevski+23, Harikane+23, Maiolino+23, Kokrev+23, Greene+23
- 金属量進化、酸素、窒素 (GN-z11)、炭素
  - e.g., Nakajima+23, Curti+23, Bunker+23, Cameron+23, Isobe+23
- Pop-III or extremely metal poor systems
  - e.g., Wang+23, Maiolino+23, Vanzella+23
    - 銀河サイズ (e.g., Ono+23ab, Morishita+23b)
    - 宇宙再電離史 (e.g., Umeda+23, Heintz+23) 中根さん, 梅田さんtalks
    - $z=5-9$  原始銀河団 (e.g., Morishita+23a, Helton+23)
    - $z>4$  passive銀河 (e.g., Carnall+23, Looser+23) 但木さんtalk
    - 単独の星 ( $z=2.2, 4.8$ , e.g., Diego+23, Meena+23)

# JWST $z \sim 9-16$ 銀河候補

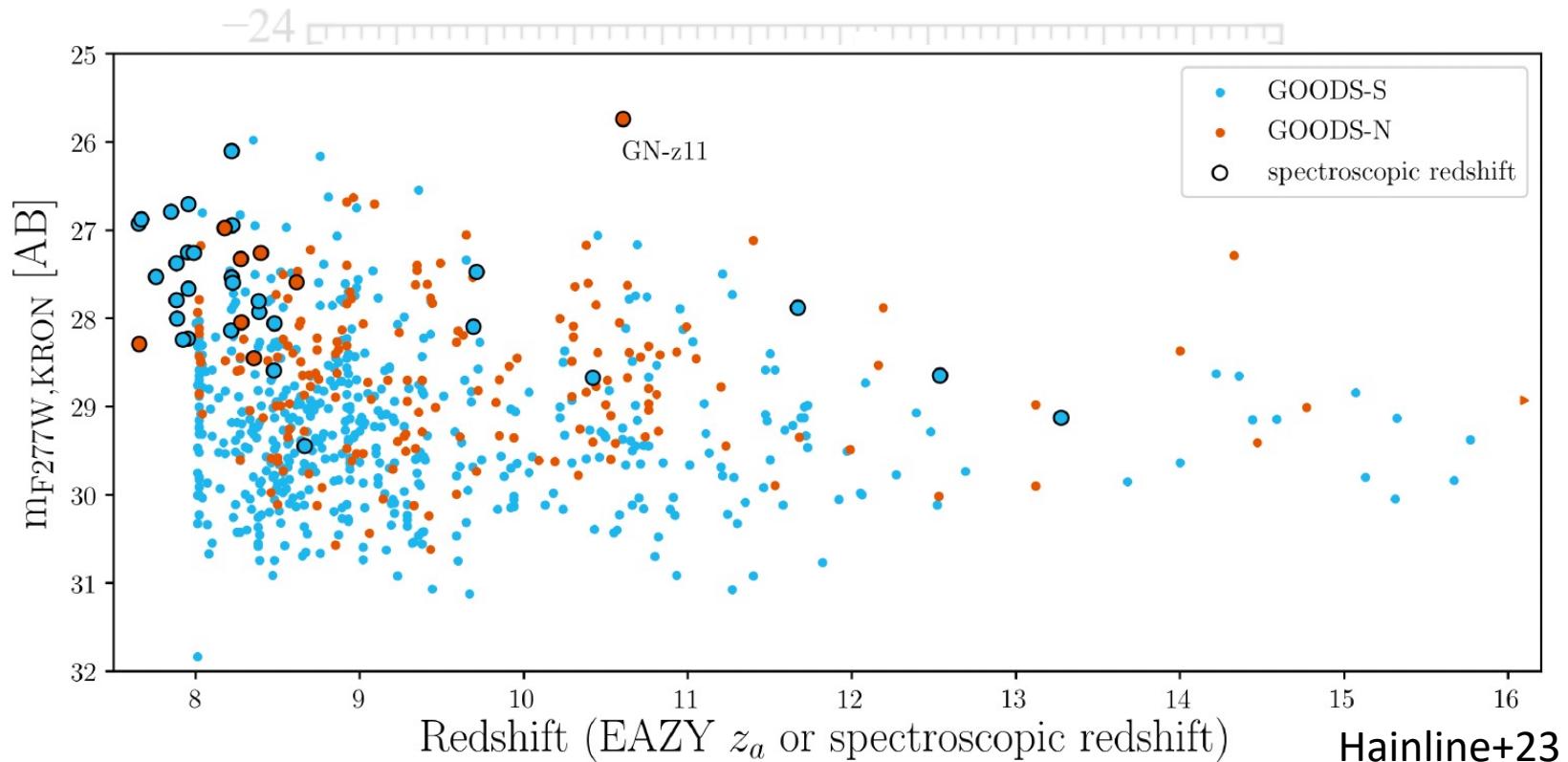
- 初期データから20天体以上の $z \sim 9-16$ 銀河
  - 現在:  $z > 8$ で700天体以上 (JADES GTOチーム)



See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez  
Gonzalez+23, Franco+23, Atek+22,23, Adams+22,23, Austin+23, Casey+23, Morishita+23ab, ...

# JWST $z \sim 9-16$ 銀河候補

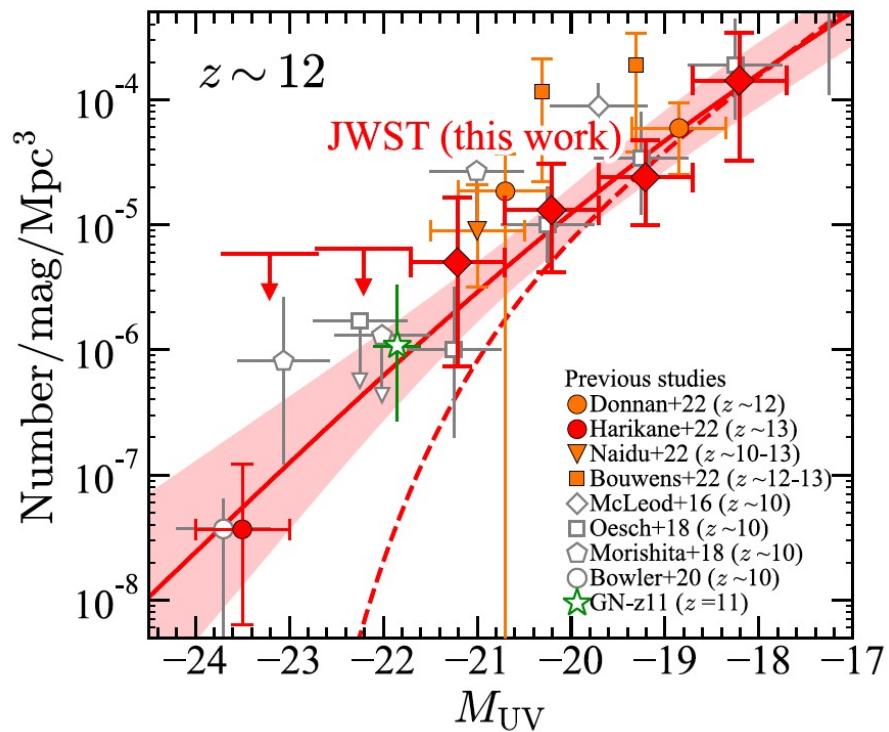
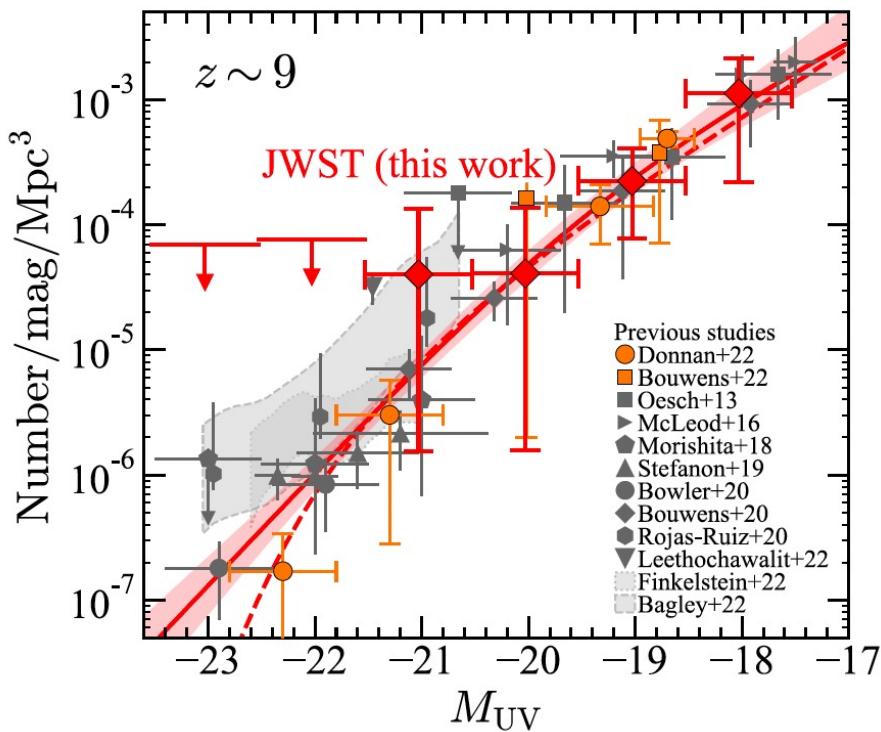
- 初期データから20天体以上の $z \sim 9-16$ 銀河
  - 現在:  $z > 8$ で700天体以上 (JADES GTOチーム)



See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez<sub>11/33</sub>, Gonzalez+23, Franco+23, Atek+22,23, Adams+22,23, Austin+23, Casey+23, Morishita+23ab, ...

# UV光度関数

- 他のHST, JWSTの結果も概ね一致

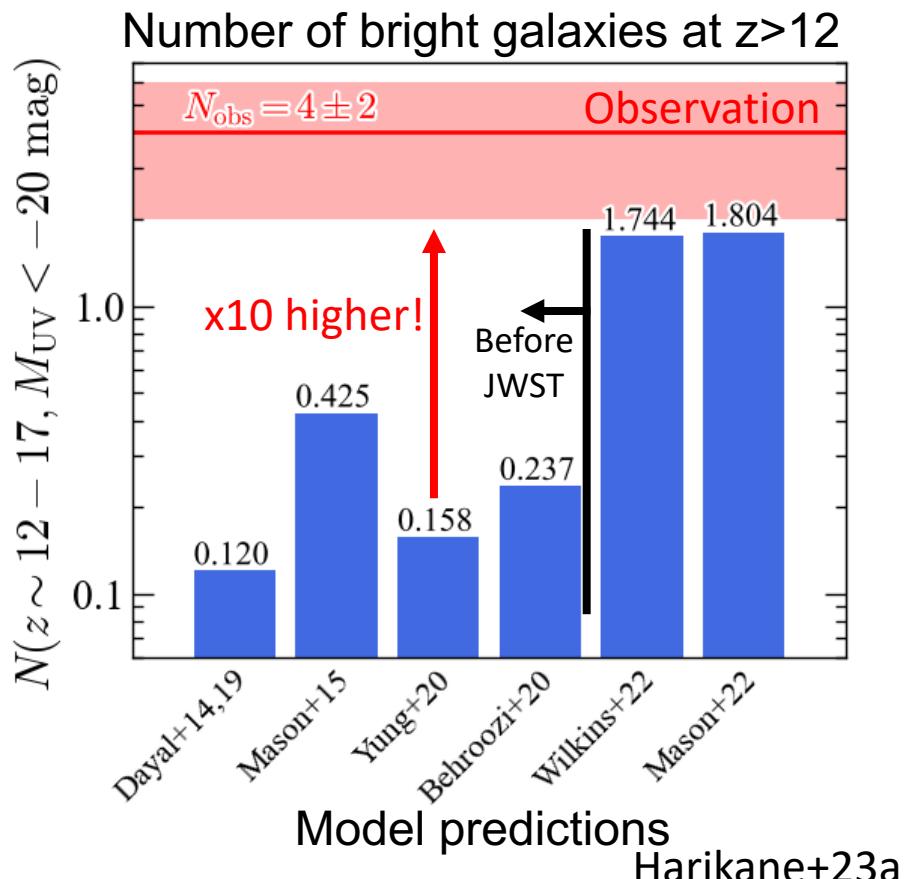
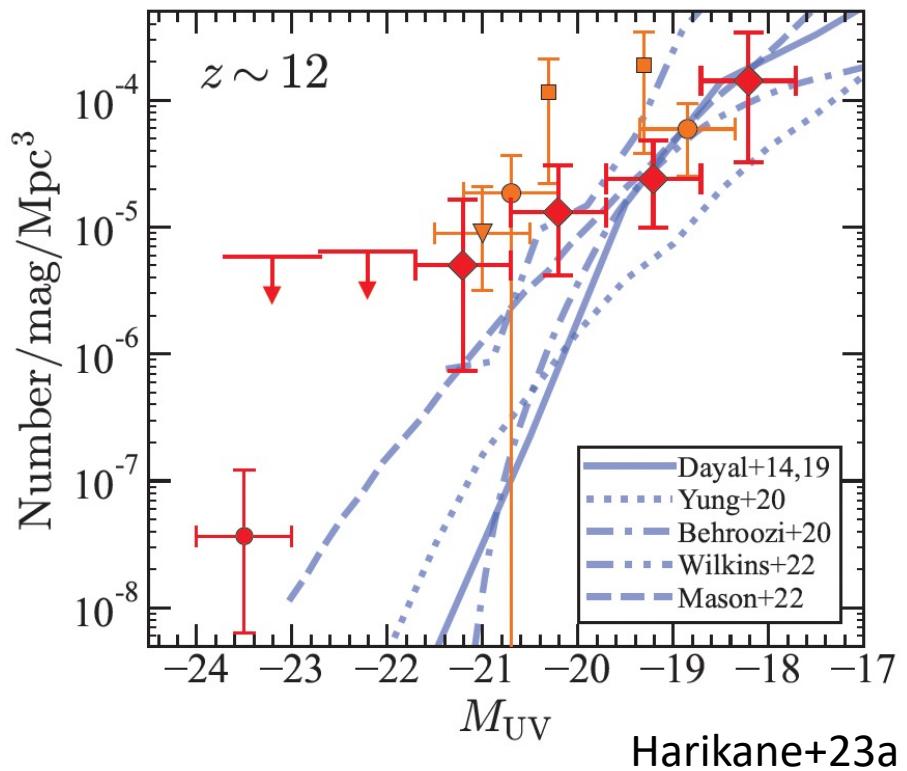


Harikane+23a

See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez<sub>12/33</sub>, Gonzalez+23, Franco+23, Atek+22,23, Adams+22,23, Austin+23, Casey+23, Morishita+23ab, ...

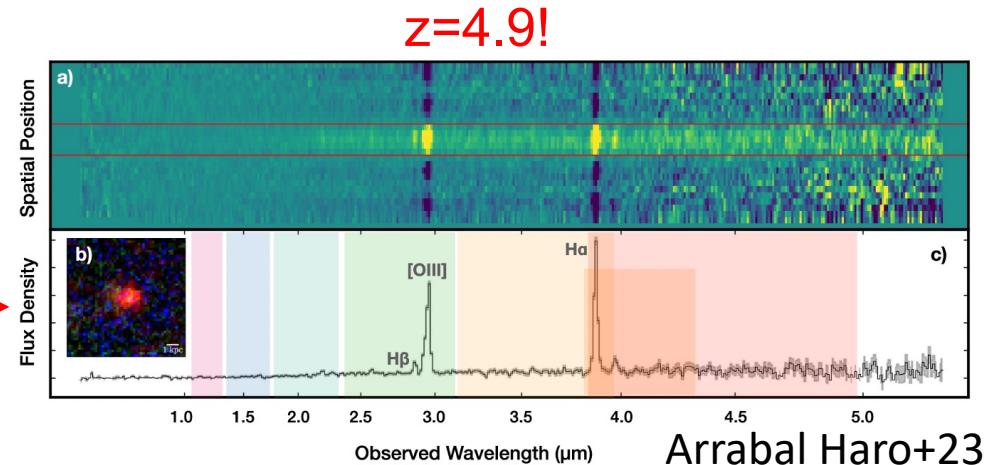
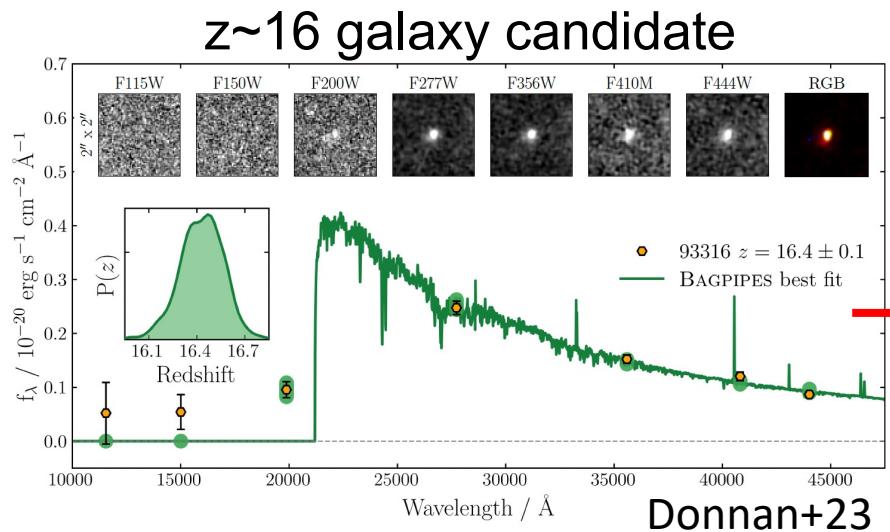
# モデルとの比較

- 明るい $z > 10$ 銀河の個数密度がモデル予想より高い



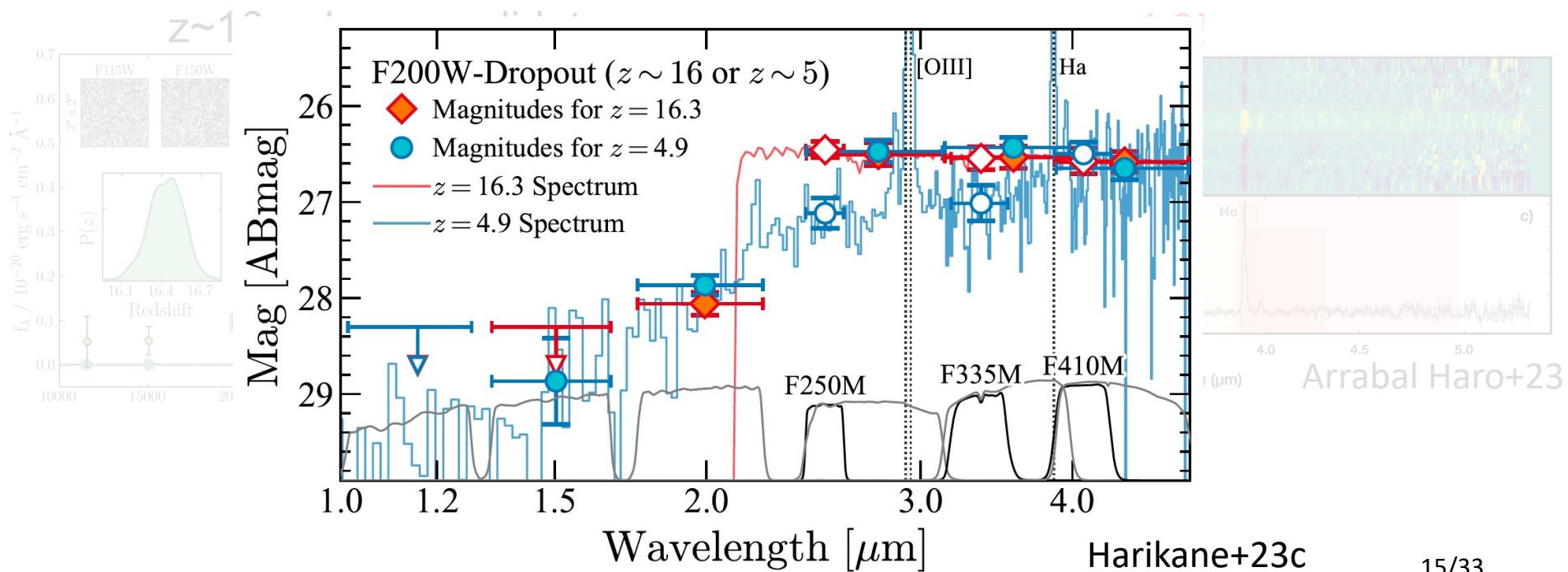
# Low-z Interloper

- 明るい $z \sim 16$ 銀河候補 →  $z=4.9$ の強輝線銀河だった
  - 複数のmedium-band観測がコンタミ除去に有用
  - Yan+23の $z > 10$ 候補 →  $z < 5$ のdusty銀河かも (Meyer+23)



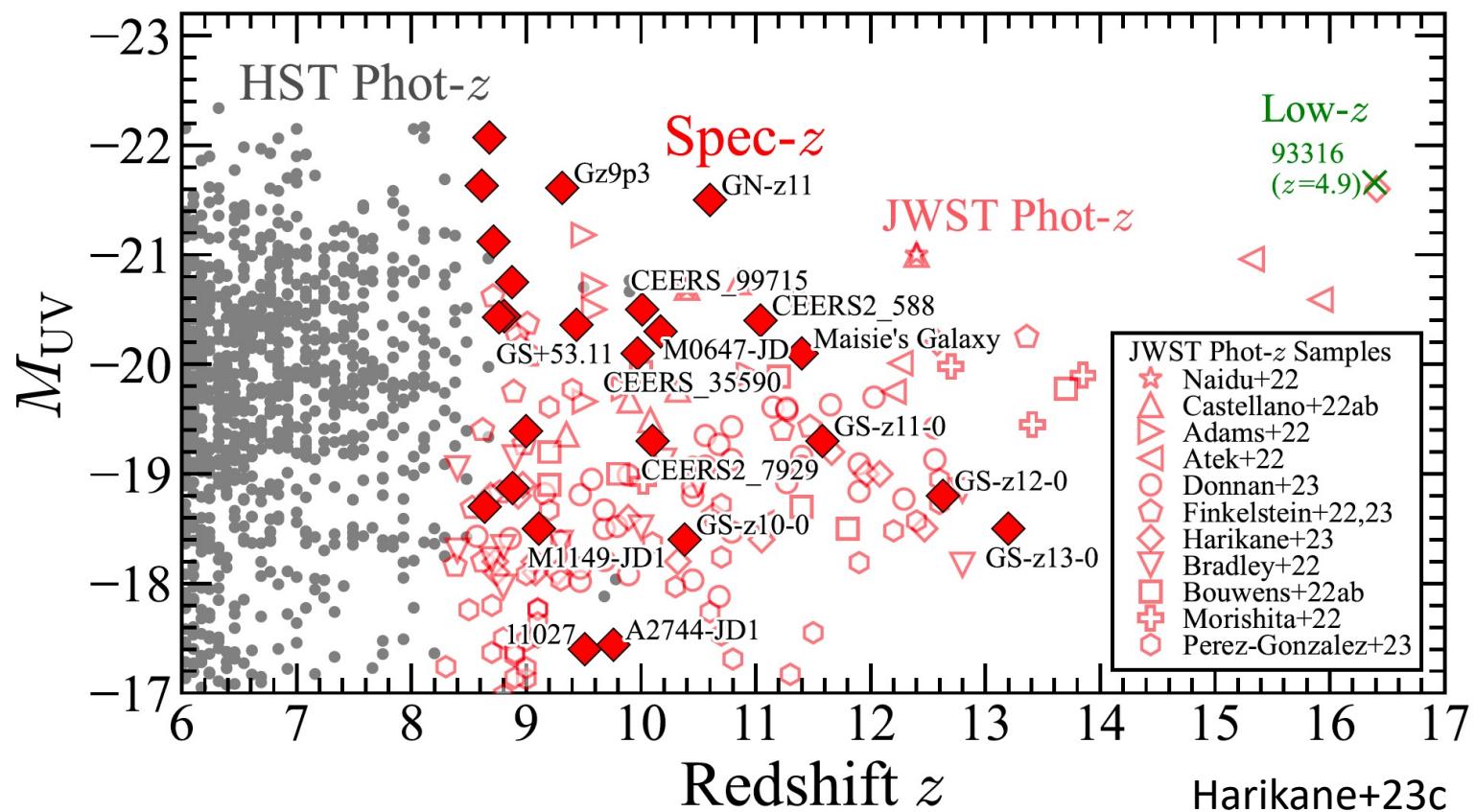
# Low-z Interloper

- 明るい $z \sim 16$ 銀河候補 →  $z = 4.9$ の強輝線銀河だった
  - 複数のmedium-band観測がコンタミ除去に有用
  - Yan+23の $z > 10$ 候補 →  $z < 5$ のdusty銀河かも (Meyer+23)



# JWST分光観測

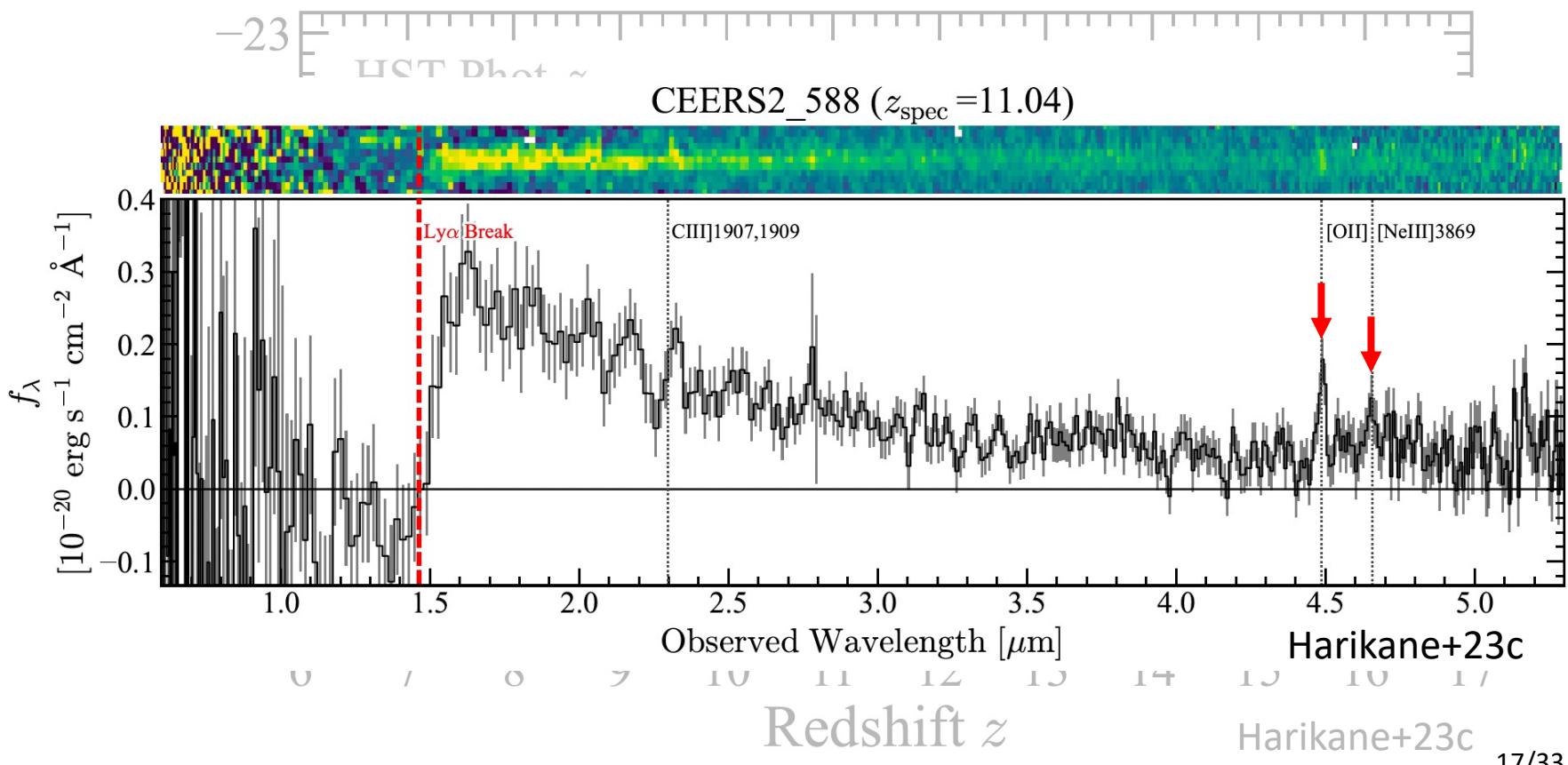
- 25個の $z=8.61-13.20$ 銀河が分光同定済み



See also, Arrabal Haro+23ab, Curtis-Lake+23, Wang+23, Fujimoto+23ab,...

# JWST分光観測

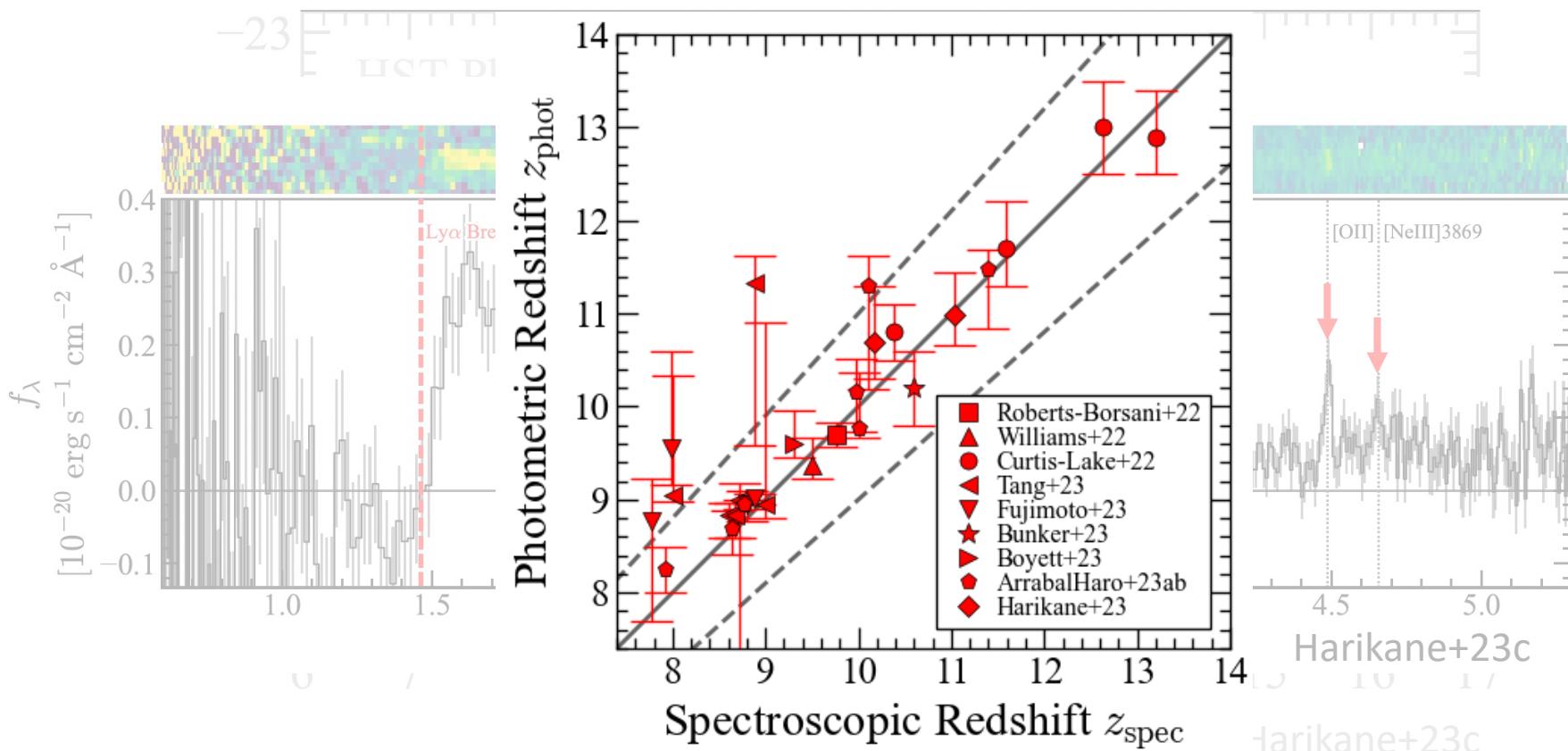
- 25個の $z=8.61\text{-}13.20$ 銀河が分光同定済み



See also, Arrabal Haro+23ab, Curtis-Lake+23, Wang+23, Fujimoto+23ab, ...

# JWST分光観測

- 25個の $z=8.61-13.20$ 銀河が分光同定済み



See also, Arrabal Haro+23ab, Curtis-Lake+23, Wang+23, Fujimoto+23ab, ...

# 遠方銀河リスト

JWST登場前

	Name	Redshift	Feature	Reference
1	GN-z11	10.96	Lyman break, line?	Oesch+16, Jiang+20
2	MACS1149-JD1	9.11	[OIII], Ly $\alpha$ ?	Hashimoto+18
3	EGSY8p7	8.68	Ly $\alpha$	Zitrin+15

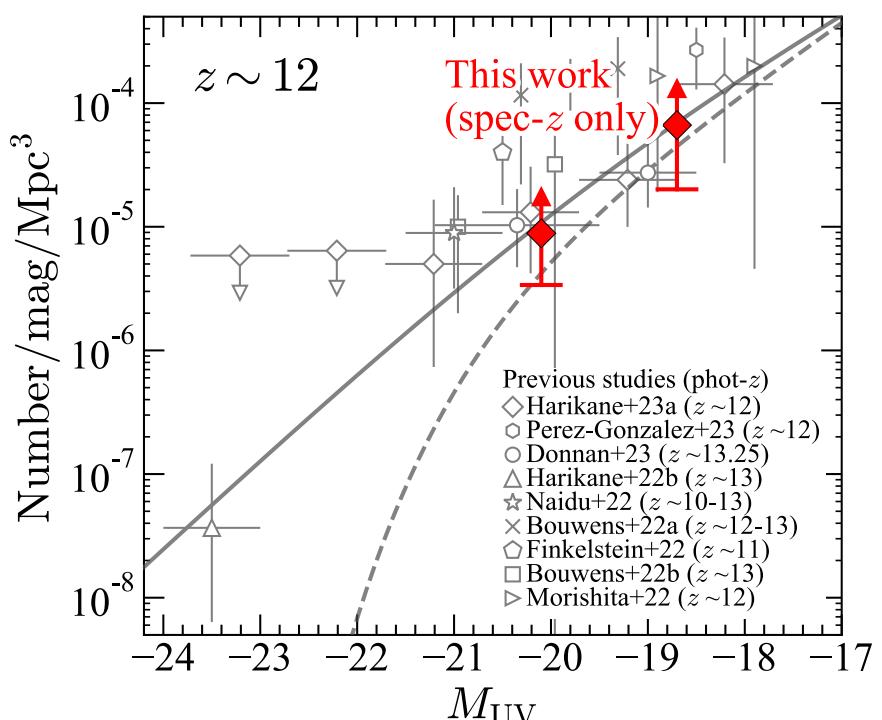
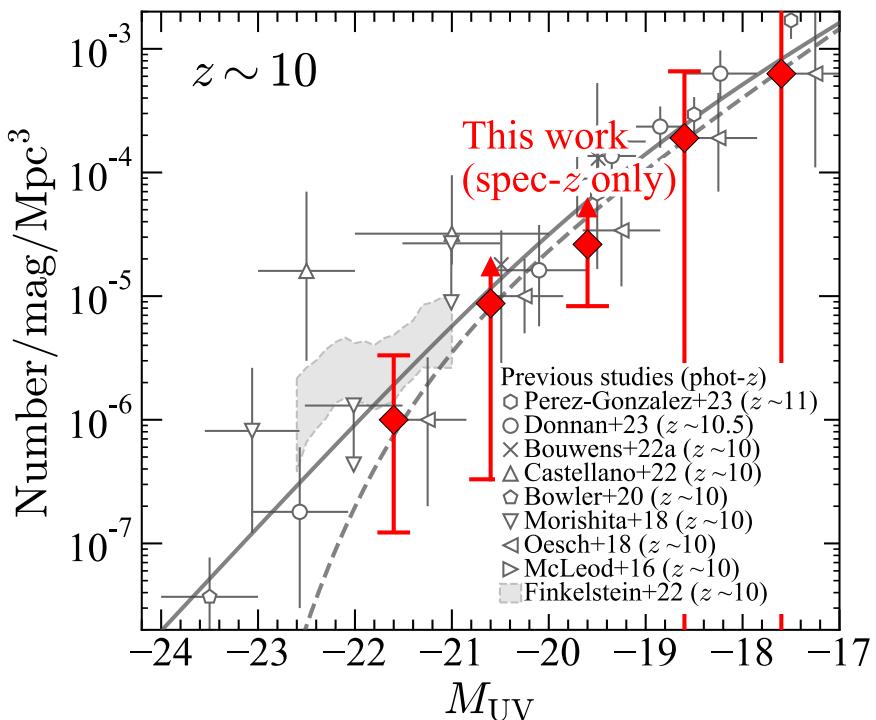
登場後



	Name	Redshift	Feature	Reference
1	JADES-GS-z13-0	13.20	Lyman break	Curtis-Lake+23
2	UNCOVER-z13	13.08	Lyman break	Wang+23
3	JADES-GS-z12-0	12.48	Lyman break, CIII], [OII], [NIII]	Curtis-Lake+23
4	UNCOVER-z12	12.39	Lyman break, [OII]?	Wang+23
5	JADES-GS-z11-0	11.58	Lyman break	Curtis-Lake+23
6	Maisie's Galaxy	11.44	Lyman break, [OII], [NIII]	Arrabal Haro+23a
7	CEERS2_588	11.04	Lyman break, [OII], [NIII]	Harikane+23c
8	GN-z11	10.60	Lyman break, CIII], H $\gamma$ , etc.	Bunker+23
9	JADES-GS-z10-0	10.38	Lyman break	Curtis-Lake+23
10	37126	10.26	Lyman break	Fujimoto+23

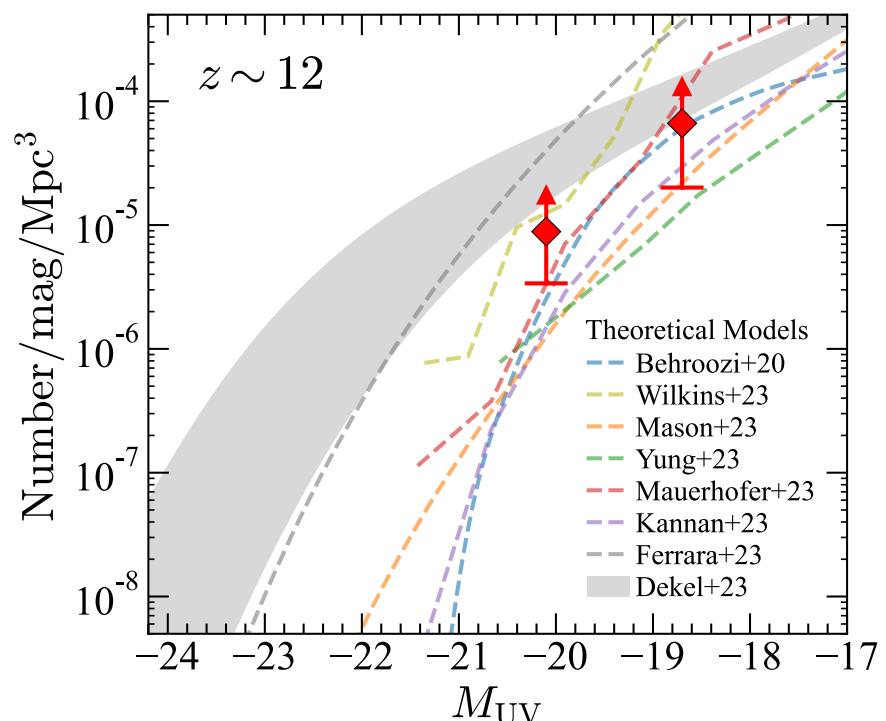
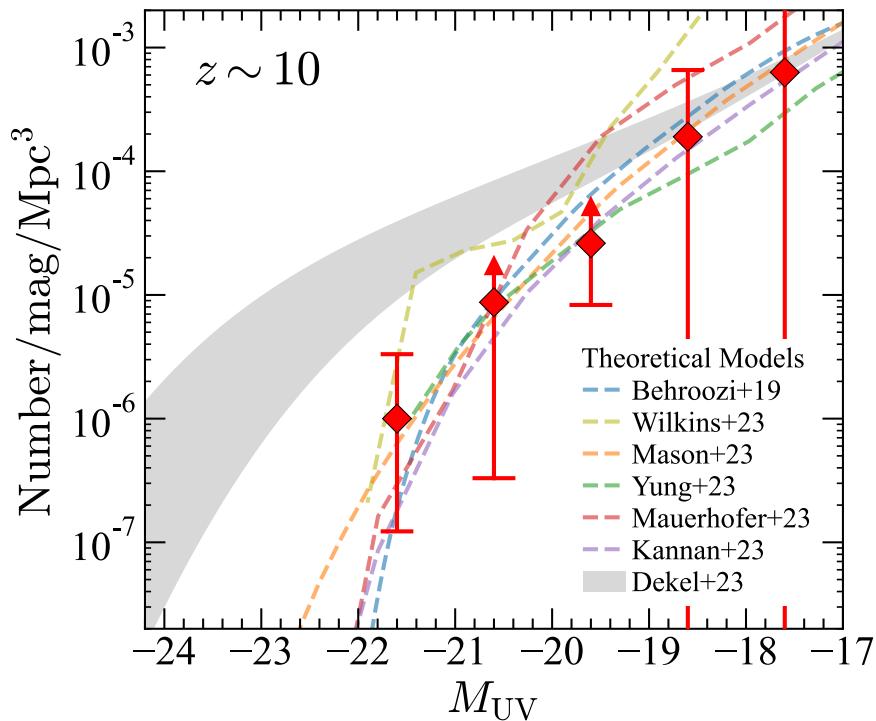
# 分光データをもとにした光度関数

- ・ コンタミネーションの心配なし
  - Photo-zの結果と無矛盾
  - 明るい $z \sim 12$ 銀河の個数密度は多くのモデルより高そう



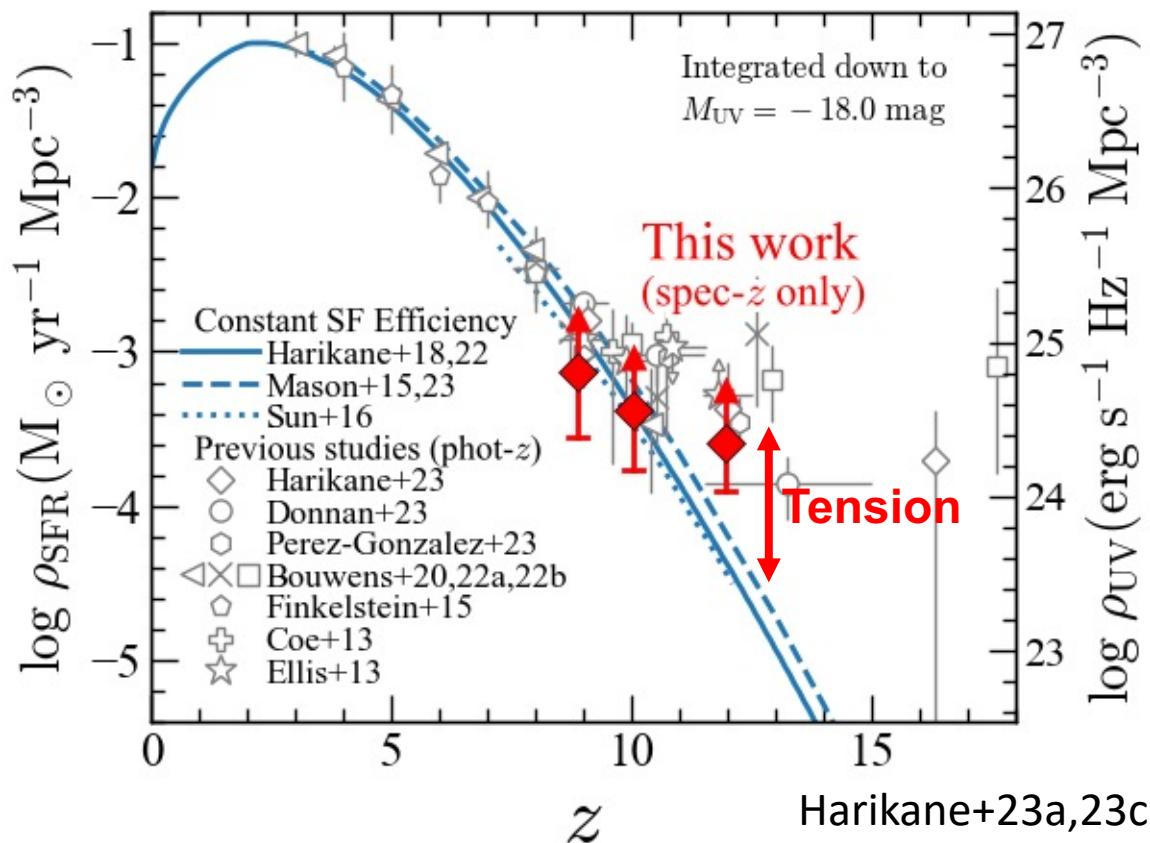
# 分光データをもとにした光度関数

- コンタミネーションの心配なし
  - Photo-zの結果と無矛盾
  - 明るい $z \sim 12$ 銀河の個数密度は多くのモデルより高そう



# $z > 10$ の星形成率密度

- UV→SFR:  $SFR(M_\odot \text{ yr}^{-1}) = \mathcal{K}_{\text{UV}} L_{\text{UV}} (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$   
 $\mathcal{K}_{\text{UV}} = 1.15 \times 10^{-28} M_\odot \text{ yr}^{-1} / (\text{erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1})$
- $z > 10$  では星形成効率一定のモデルと tension

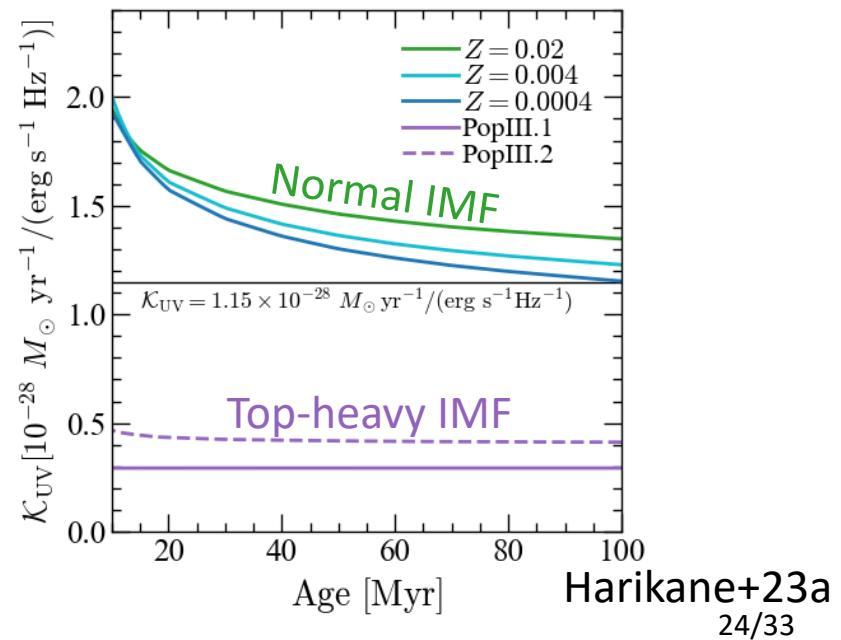
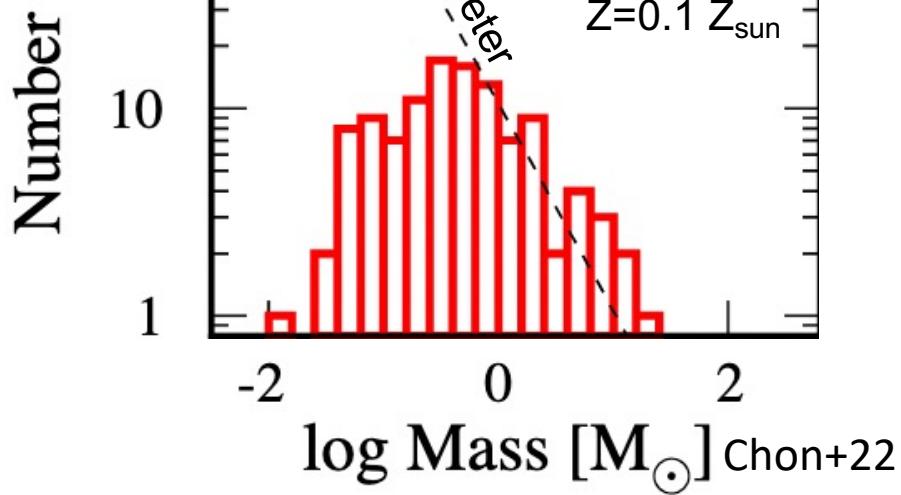


# $z > 10$ で銀河が多い物理的解釈

1. 再電離期前における高い星形成効率 (銀河スケールで  $> 5\%$  必要。例: Fukushima+21, Inayoshi+22, Harikane+23a)
2. 活発なAGN活動 (例: Onoue+23, Kocevski+23, Harikane+23b)
3. Top-heavyな初期質量関数(IMF) (w/ Pop-III?, 例: Omukai+05, Chon+22, Steinhardt+23)
4. Feedback free starburst (Dekel+23)
5. Radiation driven outflow (Ferrara+22,23)
6. Burstyな星形成史 (例: Mason+23, Shen+23, Sun+23ab, Pallottini+23)
7. Power spectrum変更 (例: Hirano+23, Parashari+23)  
→平野さんtalk

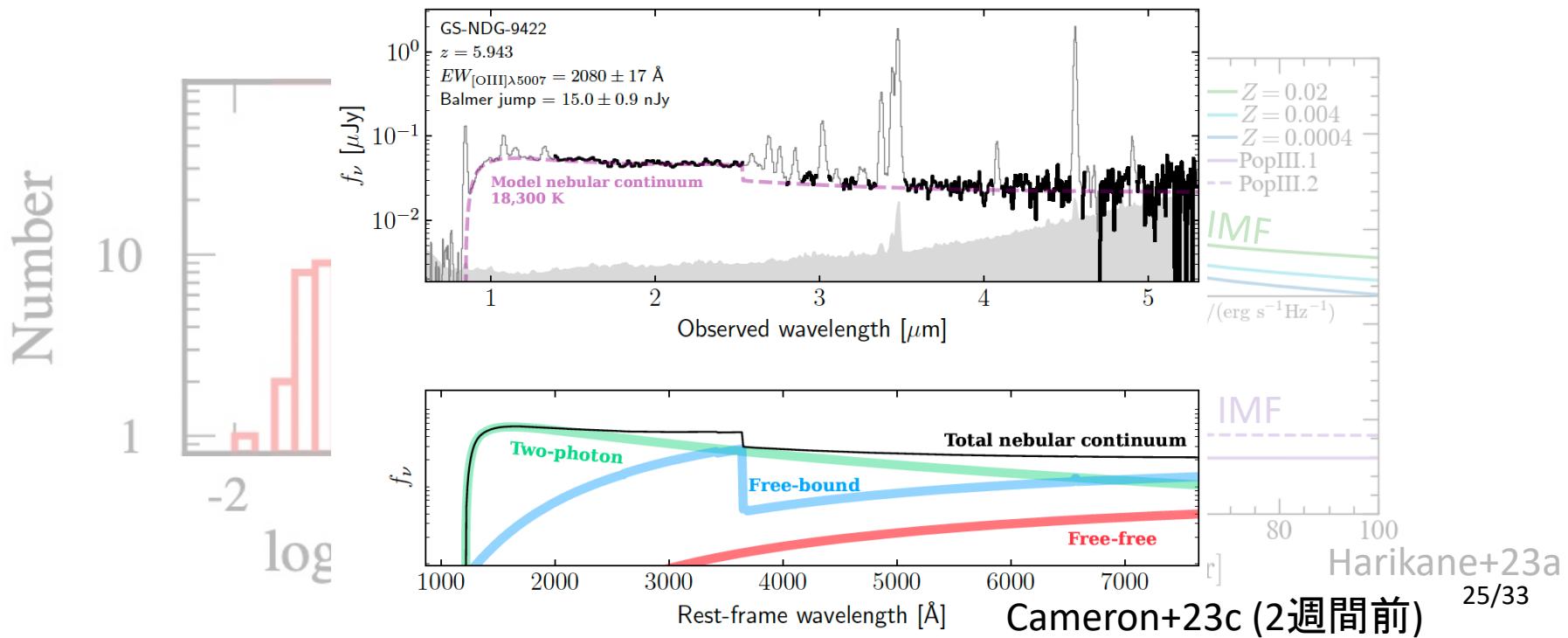
# Top-Heavy IMF

- 低金属量、高いCMB温度により、high-zではtop-heavy IMFの予想 (Omukai+05, Chon+22, Steinhardt+23)
  - Nebular continuumにより紫外光が明るくなる
  - Nebular continuum dominated galaxies at  $z=5.9, 7.9$



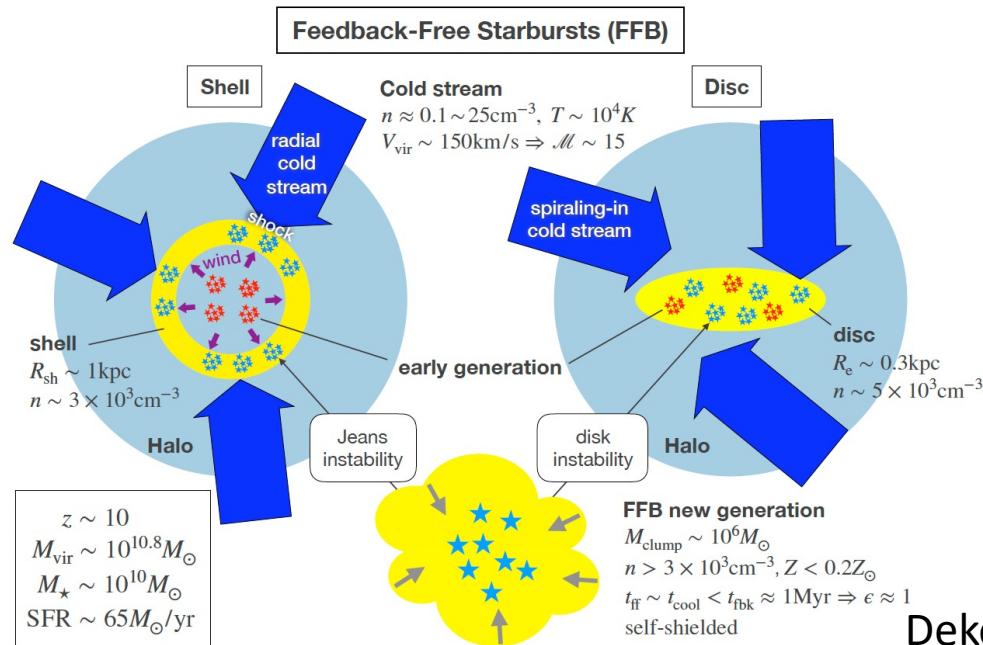
# Top-Heavy IMF

- 低金属量、高いCMB温度により、high-zではtop-heavy IMFの予想 (Omukai+05, Chon+22, Steinhardt+23)
  - Nebular continuumにより紫外光が明るくなる
  - Nebular continuum dominated galaxies at  $z=5.9, 7.9$



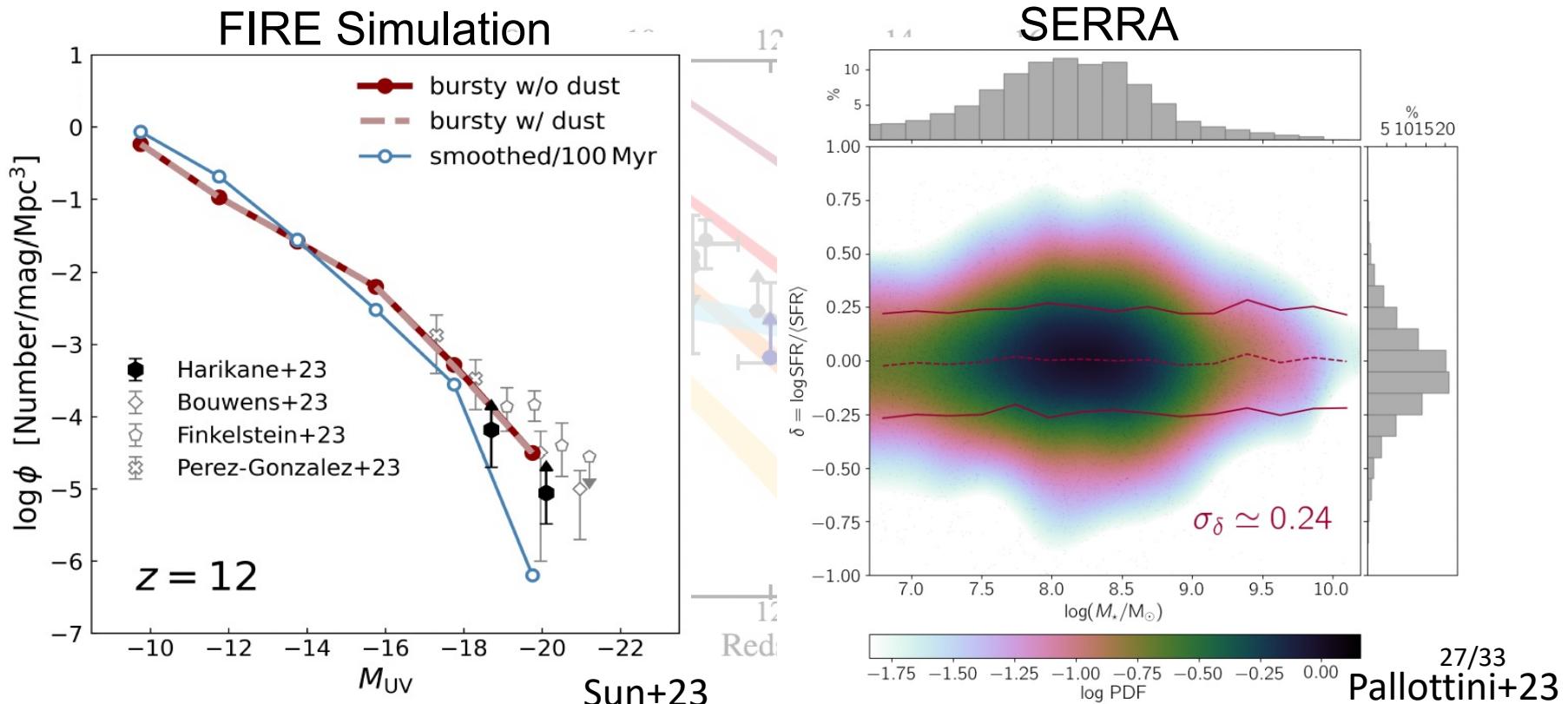
# New Star Formation Models

- Feedback free starburst (Dekel+23)
  - フィードバックが効き始める前に一気にガスを落としてstarburstさせる (高密度、低金属量条件下)
- Radiation driven outflow (Ferrara+22,23)
  - Radiation driven windでダストを吹き飛ばす



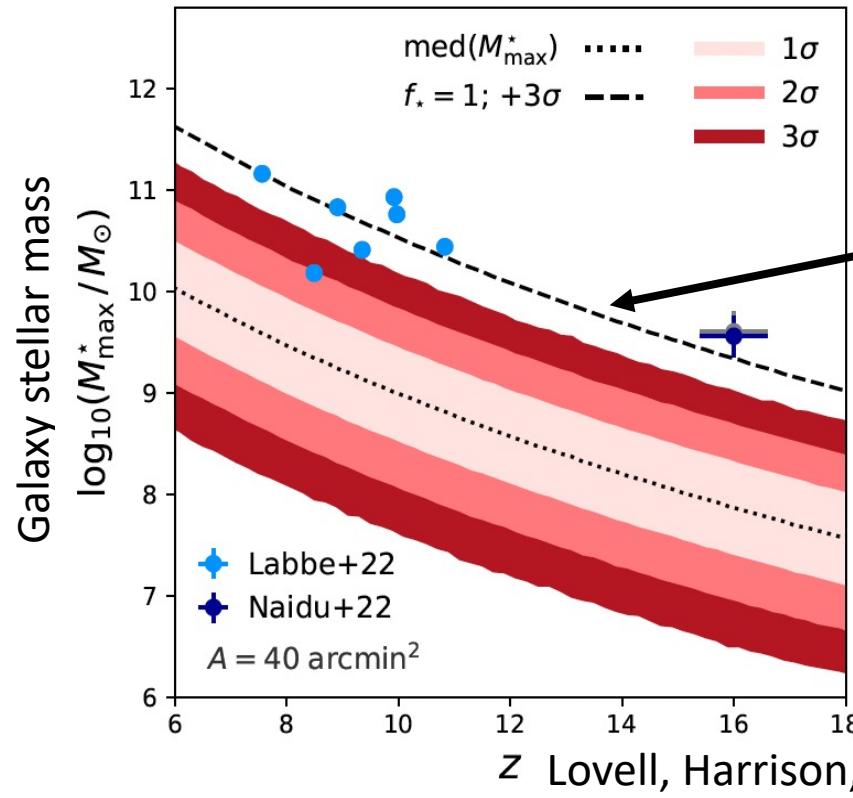
# Bursty Star Formation

- 星形成史が“bursty”だと観測が説明できるかも
  - Burst phaseにいる小質量の銀河を選択的に検出
  - FIRE → 観測を再現可能。SERRA → 再現できない。



# 非常に重たい銀河の候補

- Labbe+22:  $z \sim 7-9$ で大質量銀河の候補を発見
  - $M_* \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$ ,  $\Lambda$ CDMとtension

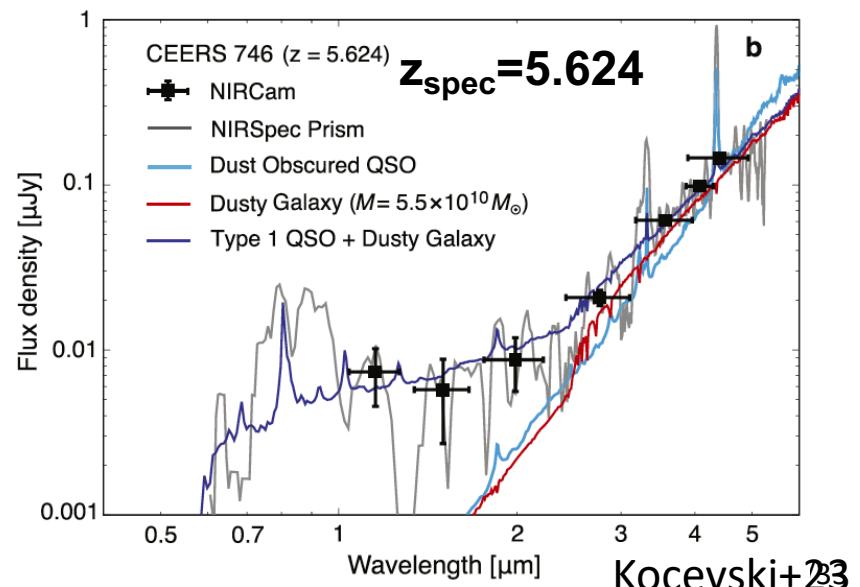
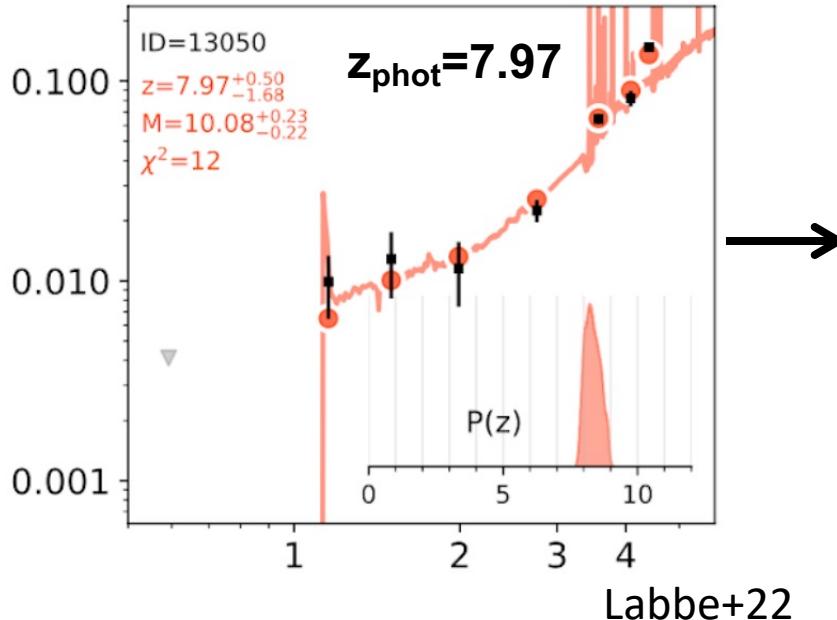


$\Lambda$ CDM宇宙論で許される最大の  
星質量の $3\sigma$ 上限値  
(ハロー一質量 X cosmic baryon fraction)

Lovell, Harrison,YH+22. See also Boylan-Kolchin 22

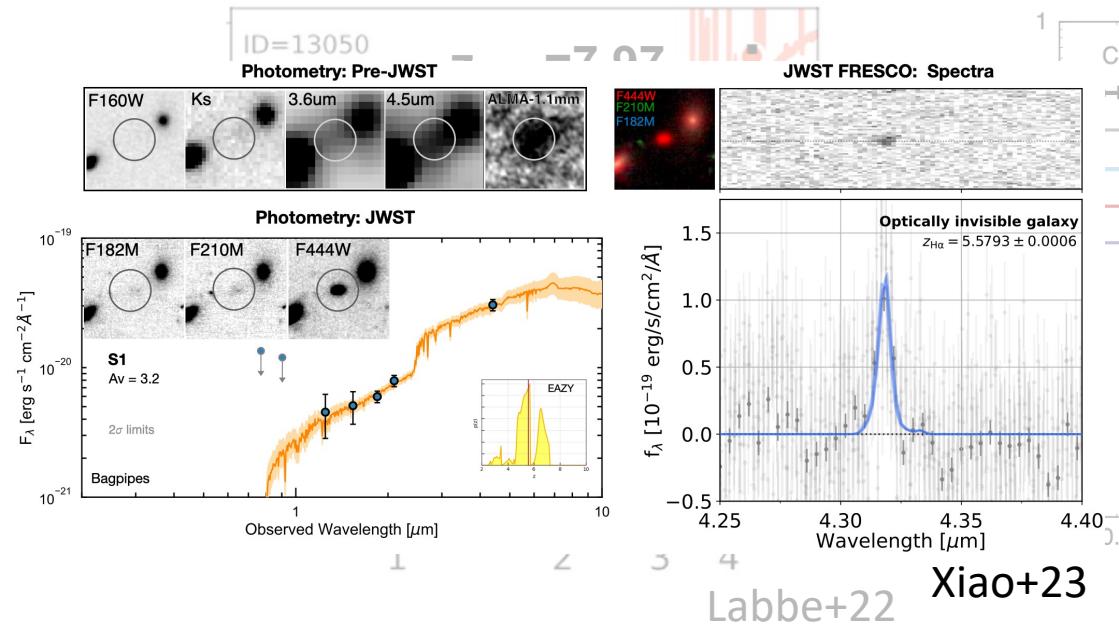
# 分光結果

- 1天体のみだが、大質量銀河ではなくAGN
  - AGN活動のために赤方偏移を過大評価
  - 他の天体はCycle 2 (GO-4106) で来年2-3月に観測
- 一方で、分光で大質量銀河も報告されている
  - 星形成効率が非常に高い？(>20%)



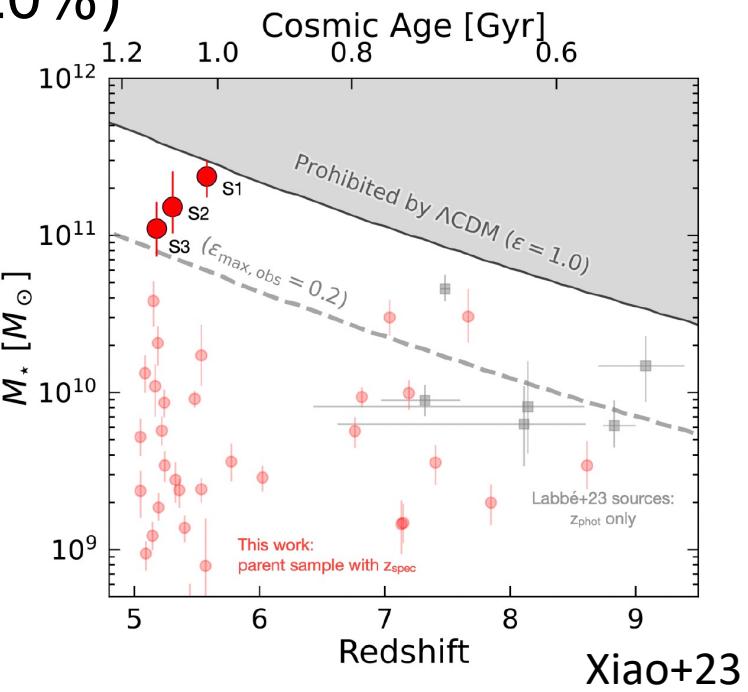
# 分光結果

- 1天体のみだが、大質量銀河ではなくAGN
  - AGN活動のために赤方偏移を過大評価
  - 他の天体はCycle 2 (GO-4106) で来年2-3月に観測
- 一方で、分光で大質量銀河も報告されている
  - 星形成効率が非常に高い？(>20%)



Labbe+22

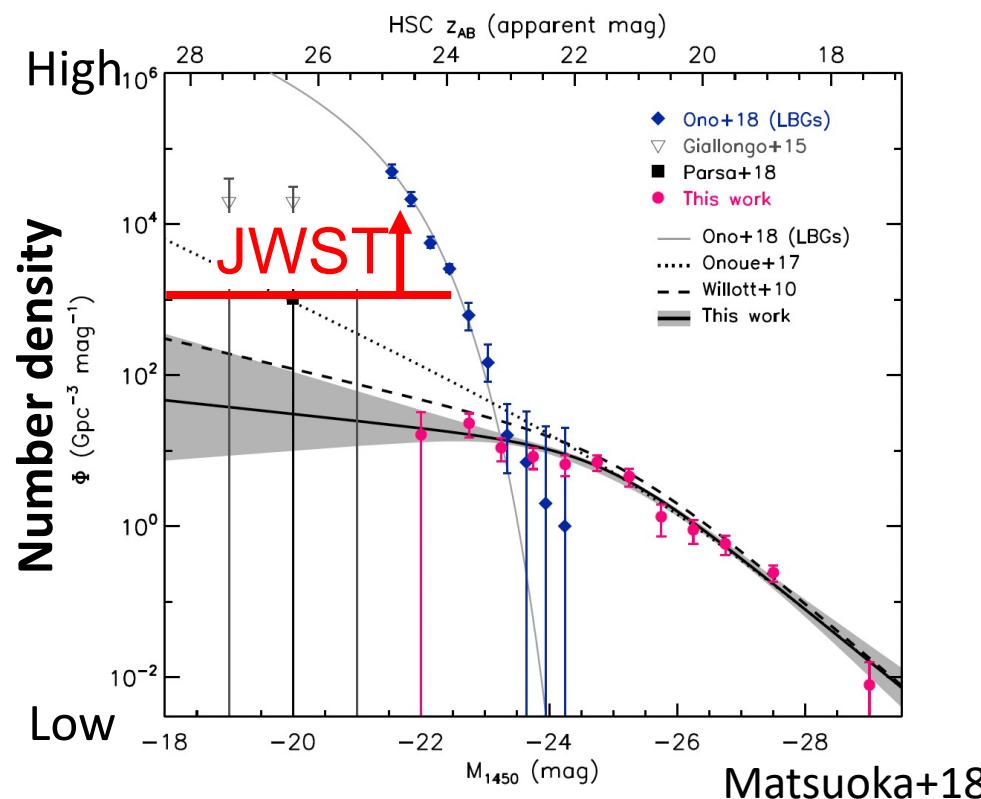
Xiao+23



Xiao+23

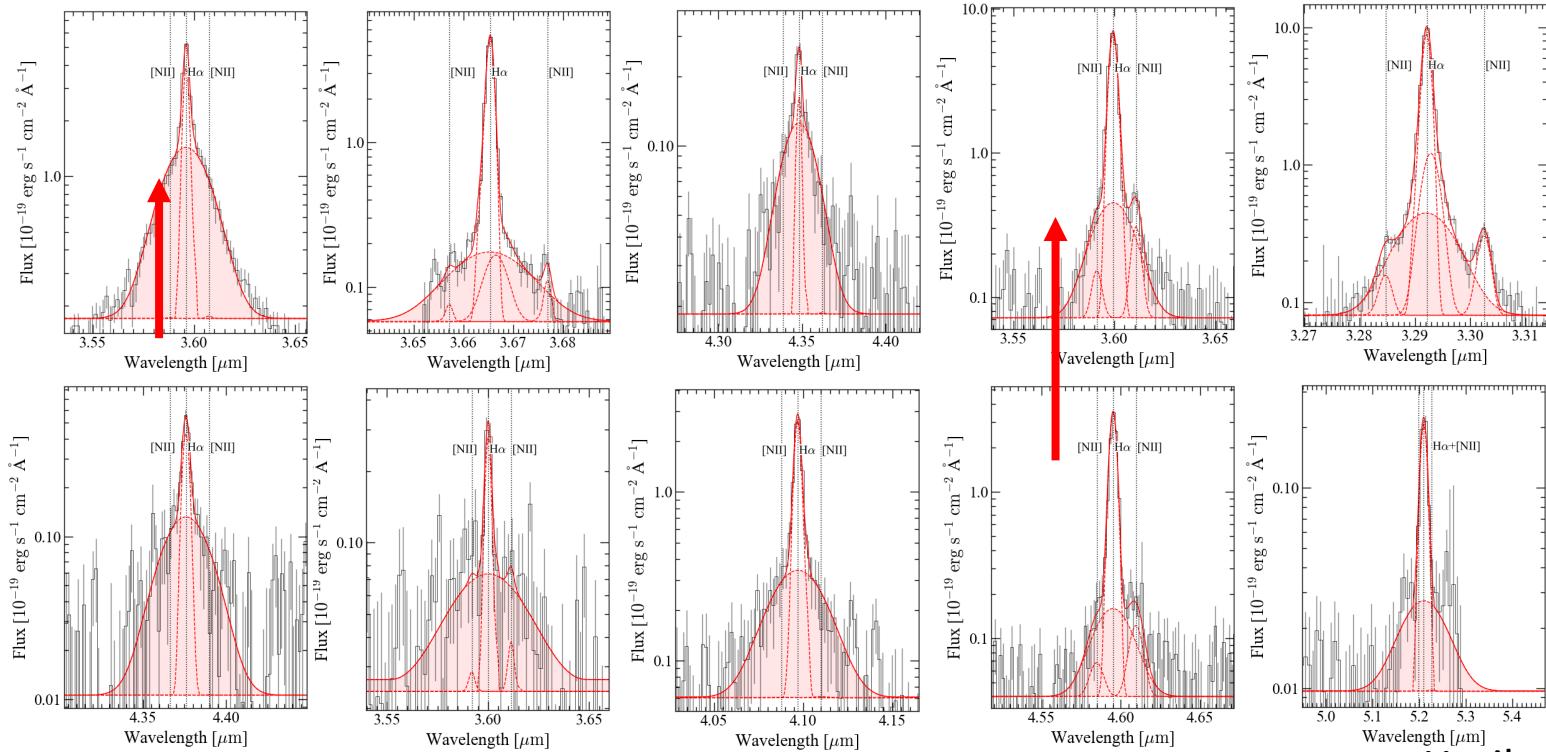
# もしかしてAGNは多い？

- JWST以前:  $z \sim 4-7$  のクエーサー w/  $M_{\text{BH}} \sim 10^9 M_{\text{sun}}$
- クエーサー光度関数
  - Faint-end slopeがフラット→ JWSTでの検出予想0.2個



# JWSTによる大量のAGNの検出

- 10 Broad-line AGNs at  $z=4-7$  (JWST/NIRSpec Spectra)
  - 広いH $\alpha$ 輝線 (FWHM~1000-6000 km/s), 狹い[OIII] (<1000 km/s)
  - 185個の銀河で10個のAGN → ~5% (~1-2% at  $z\sim 0$ )

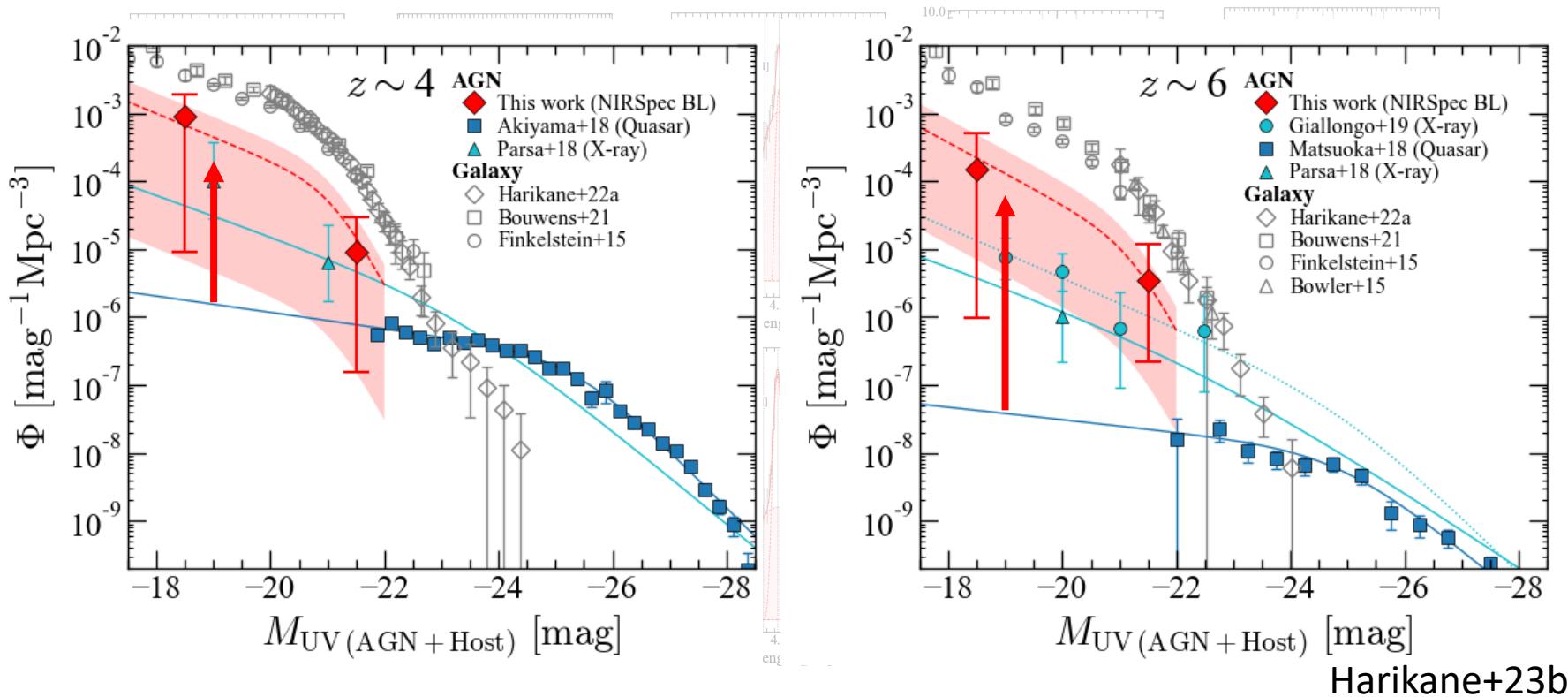


Harikane+23b

see also Kocevski+23, Ubler+23, Larson+23, Maiolino+23ab, Matthee+23, Labbe+23, Kokrev+23, Greene+23

# JWSTによる大量のAGNの検出

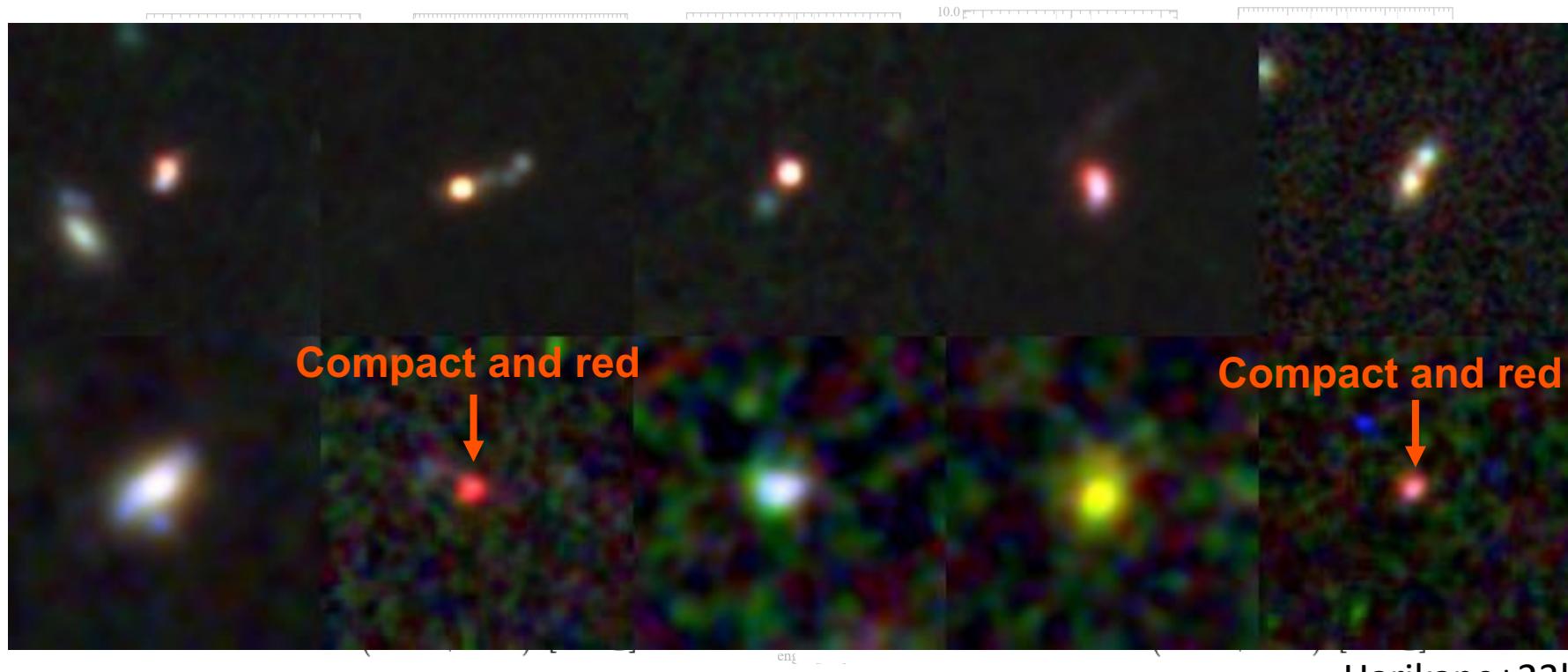
- 10 Broad-line AGNs at  $z=4-7$  (JWST/NIRSpec Spectra)
  - 広いH $\alpha$ 輝線 (FWHM~1000-6000 km/s), 狹い[OIII] (<1000 km/s)
  - 185個の銀河で10個のAGN → ~5% (~1-2% at  $z\sim 0$ )



see also Kocevski+23, Ubler+23, Larson+23, Maiolino+23ab, Matthee+23, Labbe+23, Kokrev+23, Greene+23

# JWSTによる大量のAGNの検出

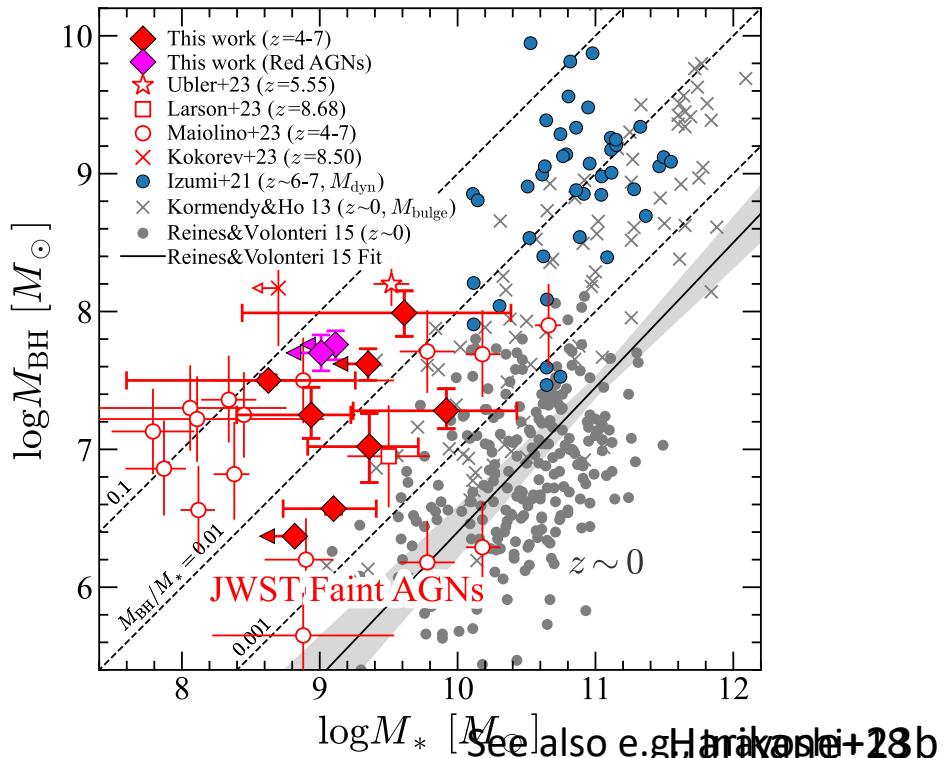
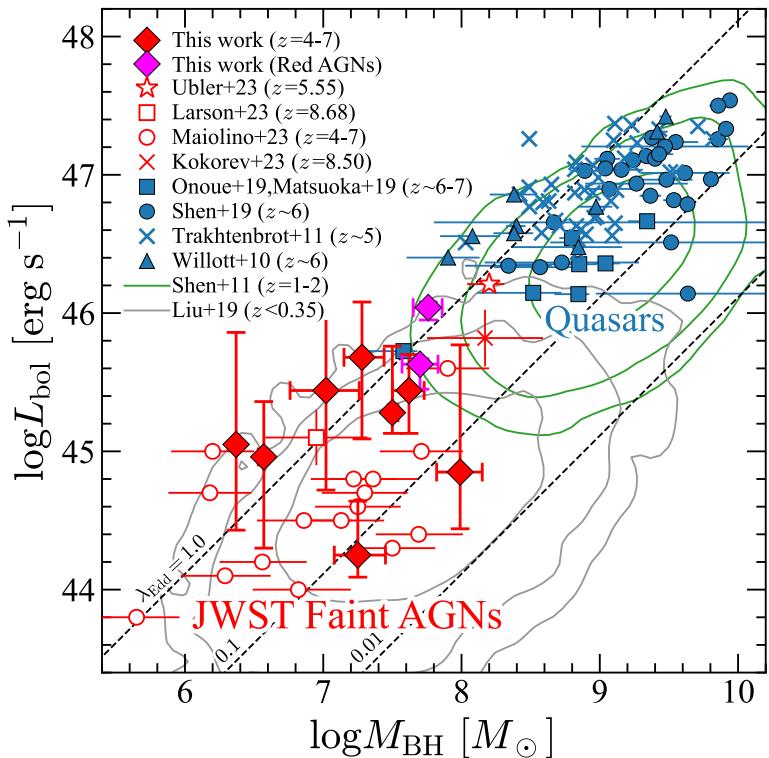
- 10 Broad-line AGNs at  $z=4-7$  (JWST/NIRSpec Spectra)
  - 広いH $\alpha$ 輝線 (FWHM~1000-6000 km/s), 狹い[OIII] (<1000 km/s)
  - 185個の銀河で10個のAGN → ~5% (~1-2% at  $z\sim 0$ )



see also Kocevski+23, Ubler+23, Larson+23, Maiolino+23ab, Matthee+23, Labbe+23, Kokrev+23, Greene+23

# JWSTによる大量のAGNの検出

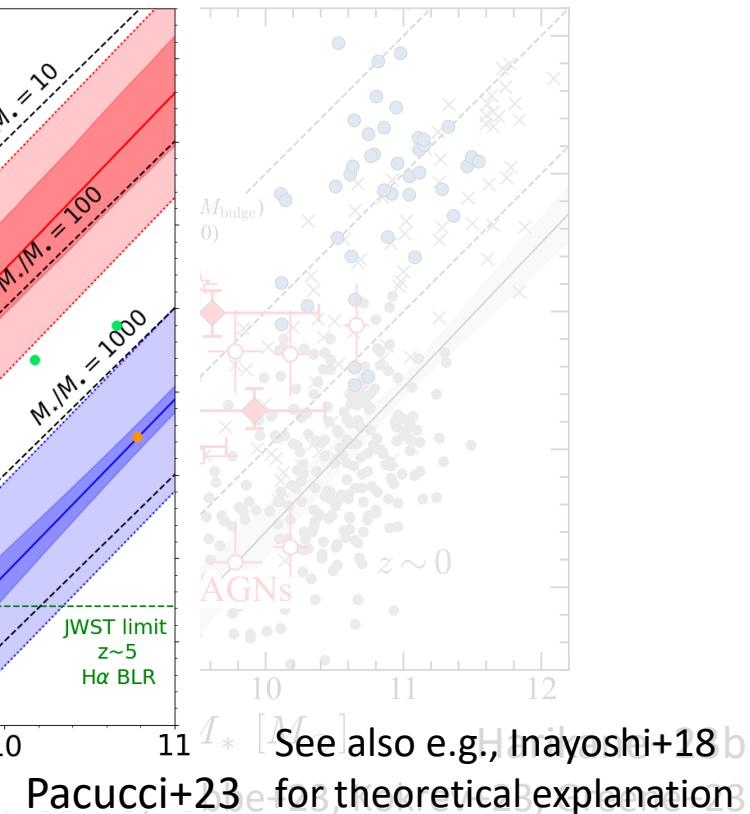
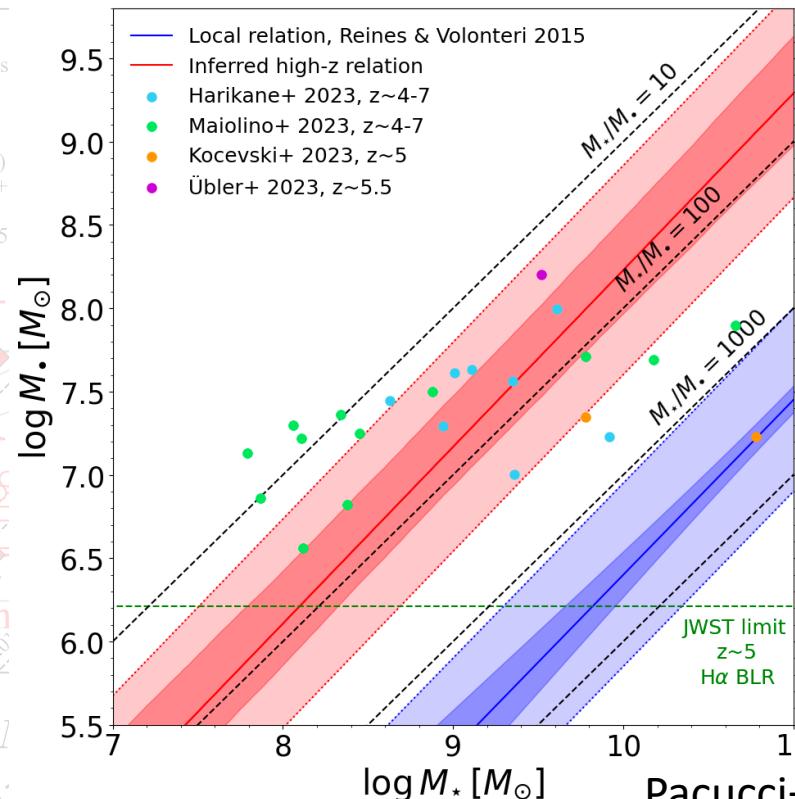
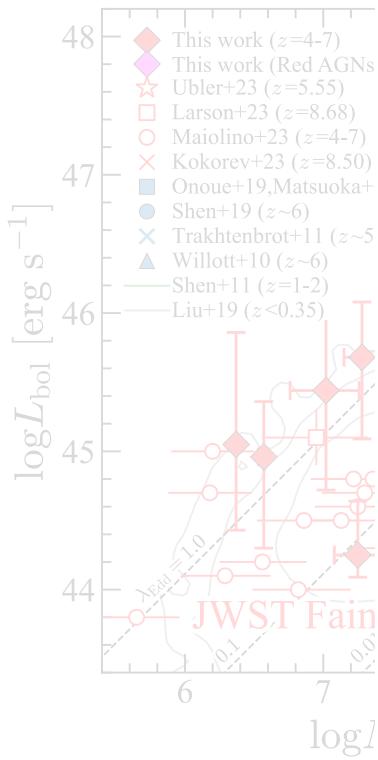
- $M_{BH} \sim 10^6 - 10^8 M_{\text{sun}}$ , クエーサーより2桁ほど小さい
    - 赤くてコンパクトな2天体はブラックホール質量大きめ
    - $z \sim 0$  の  $M_* - M_{BH}$  関係よりも  $M_{BH}$  が大きそう。Selection bias?



see also Kocevski+23, Ubler+23, Larson+23, Maiolino+23ab, Matthee+23, Labbe+23, the theoretical explanation 2B

# JWSTによる大量のAGNの検出

- $M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^8 M_{\text{sun}}$ , クエーサーより2桁ほど小さい
  - 赤くてコンパクトな2天体はブラックホール質量大きめ
  - $z \sim 0$  の  $M_{*} - M_{\text{BH}}$  関係よりも  $M_{\text{BH}}$  が大きい。Selection bias?

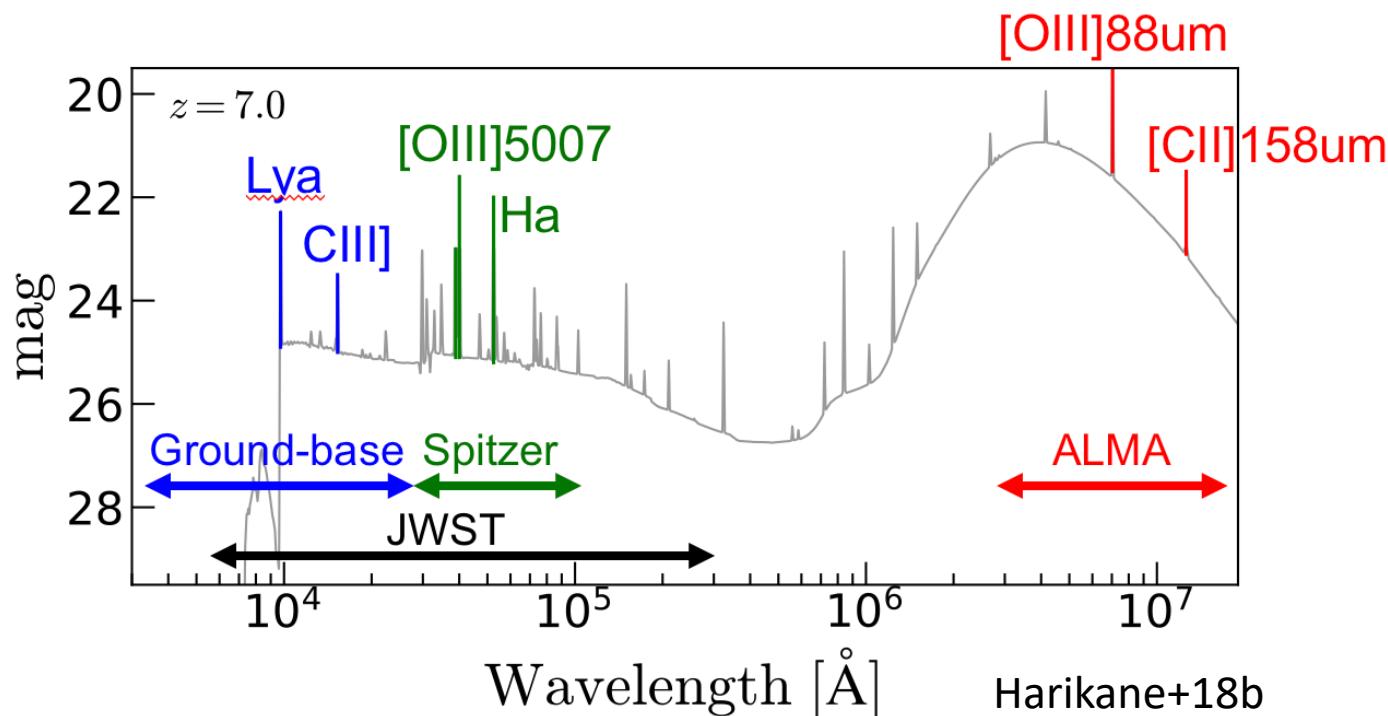


see also Kocevski+23, Ubler+:

See also e.g., Inayoshi+18b  
Pacucci+23e for theoretical explanation

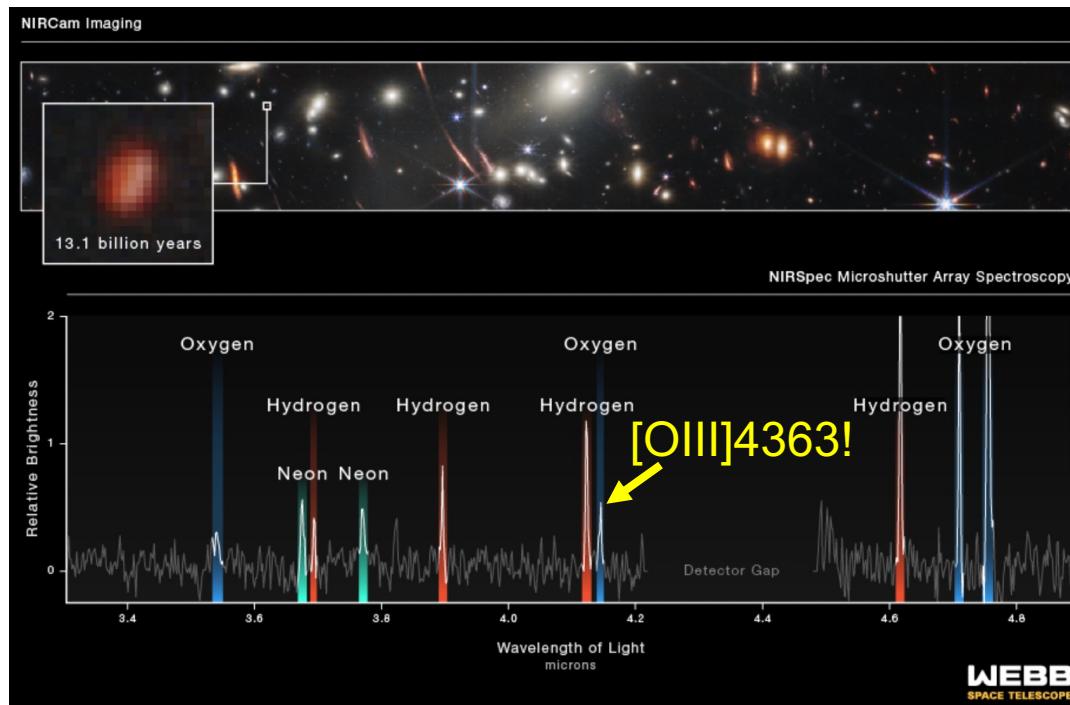
# JWST分光でISMの物理状態を調べる

- JWST以前
  - 地上望遠鏡: rest-UV輝線 (弱い)
  - ALMA: [CII]158um or [OIII]88umのみ (e.g., Harikane+20)
- JWST: 静止系可視輝線 → 金属量、電離状態、 ...



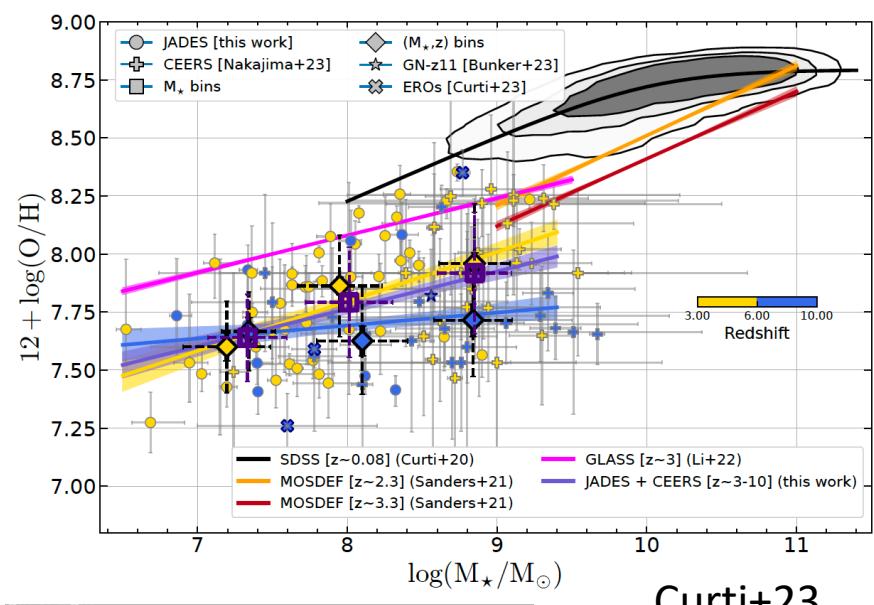
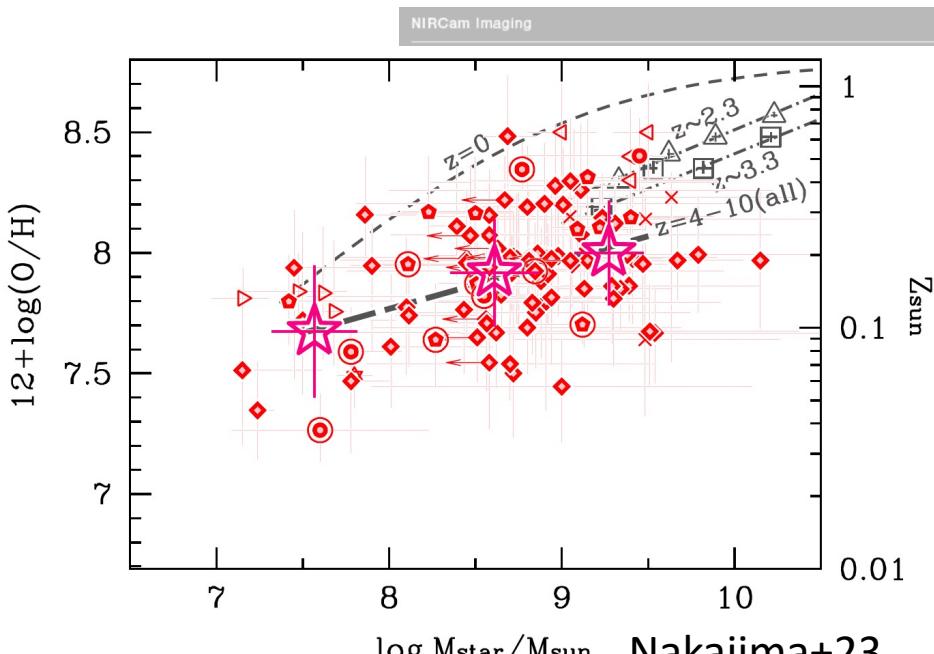
# JWST/NIRSpec Mass-Metallicity Relation

- 初期データ: [OIII]4363輝線が $z=7-9$ 銀河で検出
  - 直接温度法による正確な金属量推定
- 星質量-金属量関係 ( $z=4-10$  銀河 ~200個)



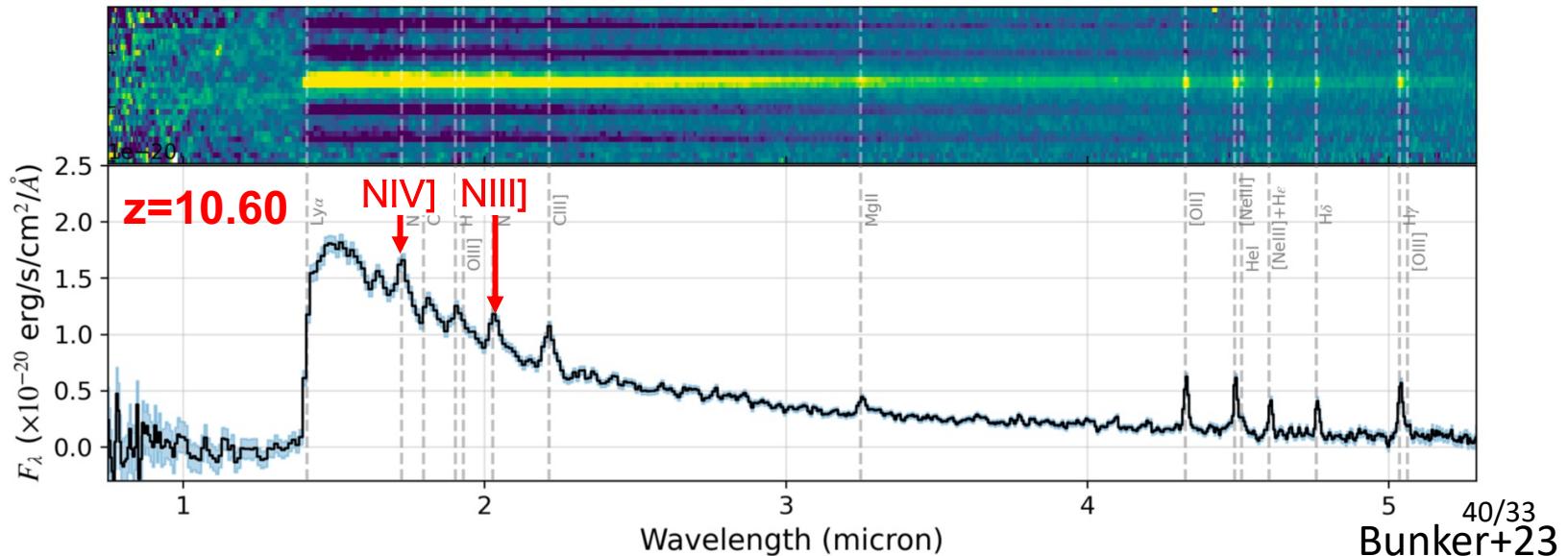
# JWST/NIRSpec Mass-Metallicity Relation

- 初期データ: [OIII]4363輝線が $z=7\text{-}9$ 銀河で検出
  - 直接温度法による正確な金属量推定
- 星質量-金属量関係 ( $z=4\text{-}10$  銀河 ~200個)



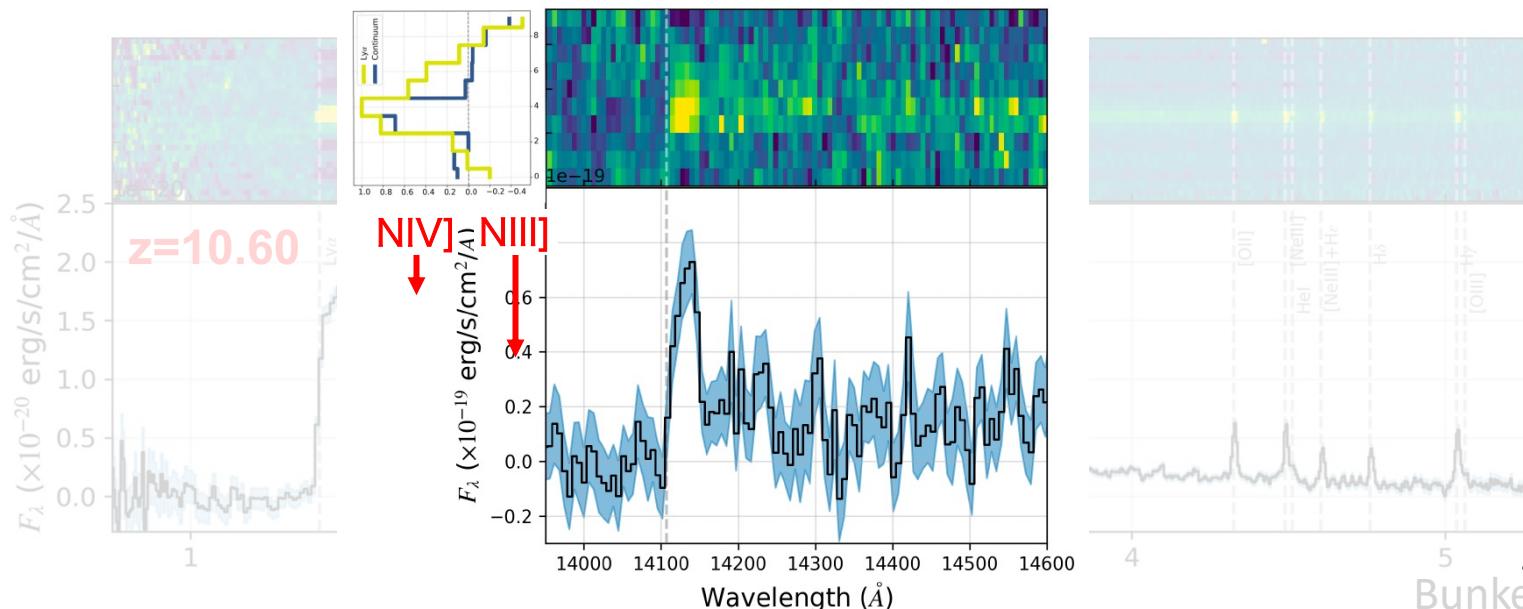
# GN-z11 ( $M_{UV}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 分光赤方偏移:  $z=10.60$ 
  - 若い (20 Myr), 低いO/H ( $0.1Z_{\text{sun}}$ ), 青いUV slope (-2.4)
  - Ly $\alpha$ ハロー:  $z=10.60$ のこの銀河の周りに電離バブル?
  - 強い窒素輝線 → Super-solar N/O ratio?



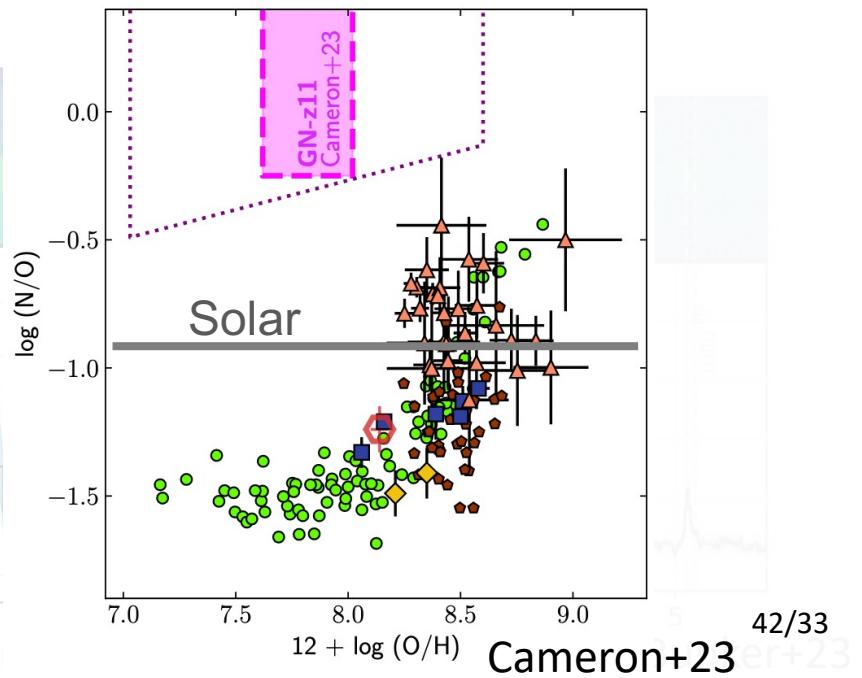
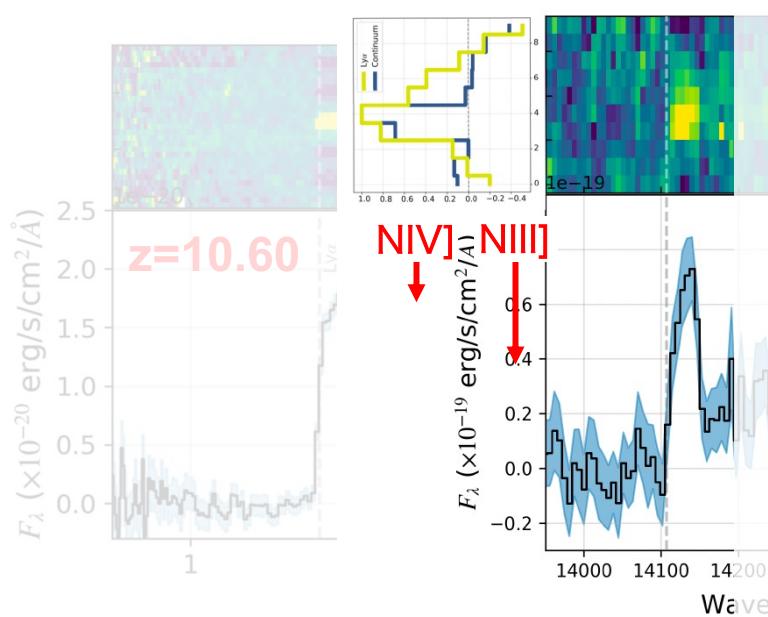
# GN-z11 ( $M_{UV}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 分光赤方偏移:  $z=10.60$ 
  - 若い (20 Myr), 低いO/H ( $0.1Z_{\text{sun}}$ ), 青いUV slope (-2.4)
  - Ly $\alpha$ ハロー:  $z=10.60$ のこの銀河の周りに電離バブル?
  - 強い窒素輝線 → Super-solar N/O ratio?



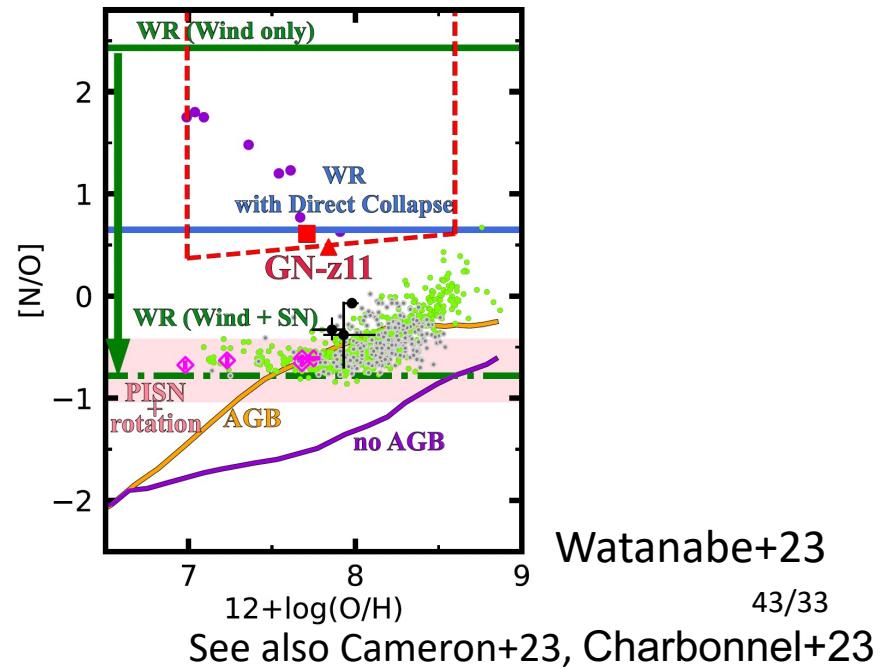
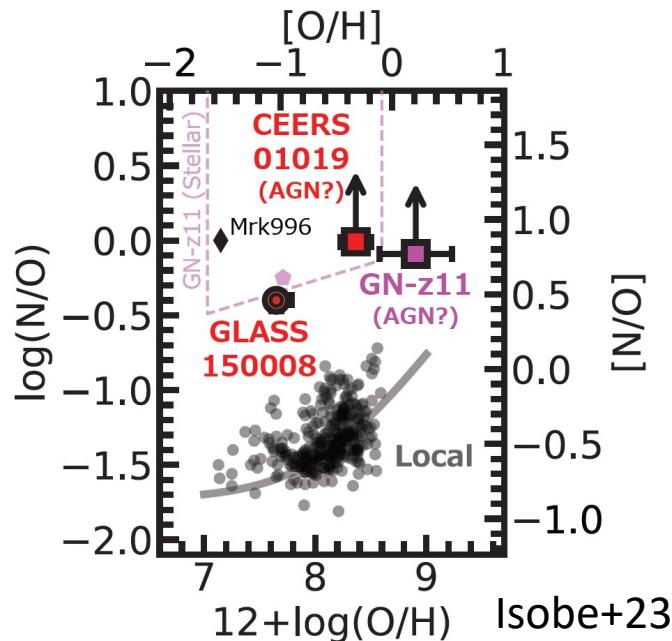
# GN-z11 ( $M_{\text{UV}}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 分光赤方偏移:  $z=10.60$ 
  - 若い (20 Myr), 低いO/H ( $0.1Z_{\text{sun}}$ ), 青いUV slope (-2.4)
  - Ly $\alpha$ ハロー:  $z=10.60$ のこの銀河の周りに電離バブル?
  - 強い窒素輝線 → Super-solar N/O ratio?



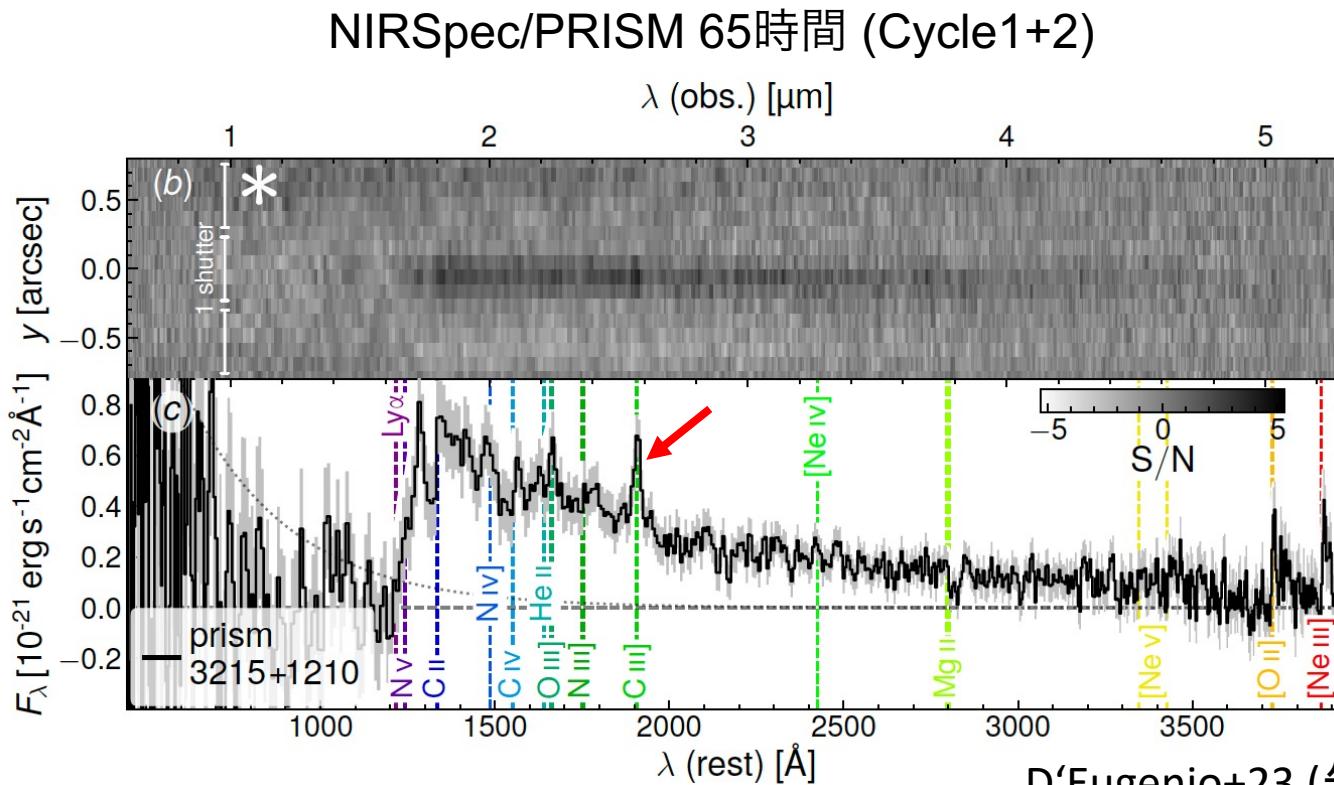
# 非常に高い窒素/酸素比

- GN-z11以外の $z>6$ 銀河でも観測されている
- 説明が非常に難しい
  - 酸素: core-collapse SN ( $\sim 10$  Myr), 窒素: AGB星 ( $\sim 100$  Myr)
  - Wolf-Rayet星や超大質量星 ( $>1000 M_{\text{sun}}$ ) の星風で窒素を増やし、core-collapse SNではなくdirect collapseで潰す



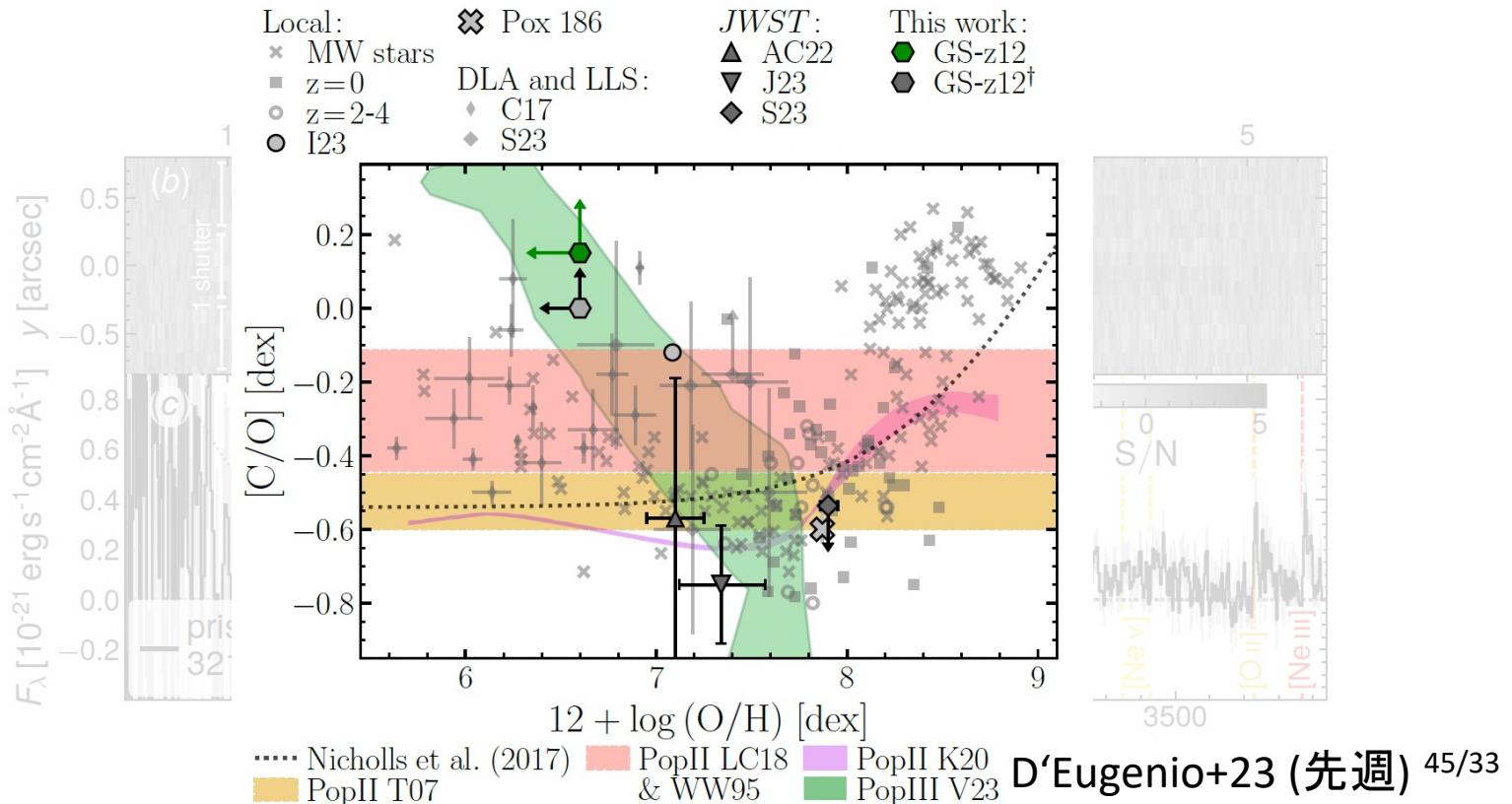
# Carbon-Enhanced Galaxy

- 強いCIII]輝線 in  $z=12.48$ 銀河 (3rd highest-z)
  - C/O比が太陽組成比以上
  - Pop-III ( $Z_{\text{star}}=0$ ) によるenrichmentだと説明できる？



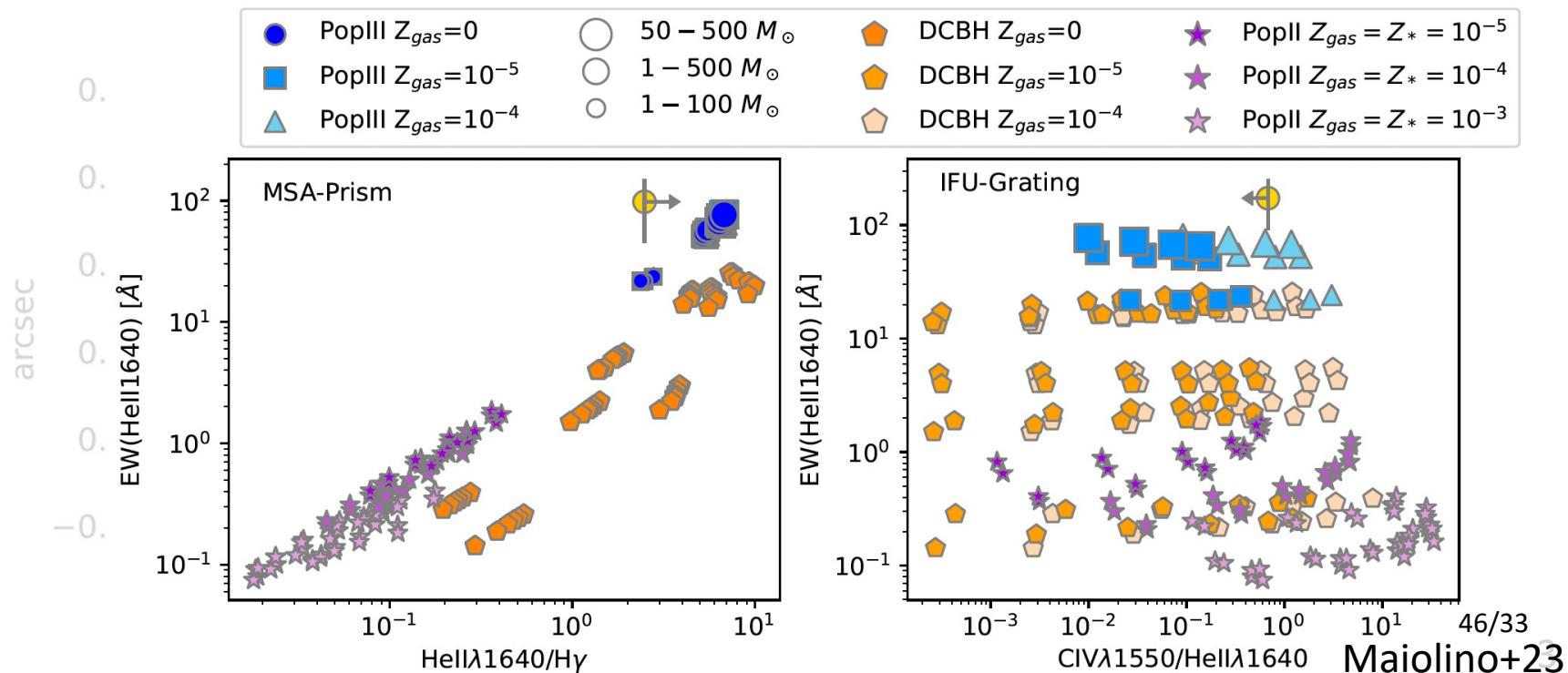
# Carbon-Enhanced Galaxy

- 強いCIII]輝線 in  $z=12.48$ 銀河 (3rd highest-z)
  - C/O比が太陽組成比以上
  - Pop-III ( $Z_{\text{star}}=0$ ) によるenrichmentだと説明できる？



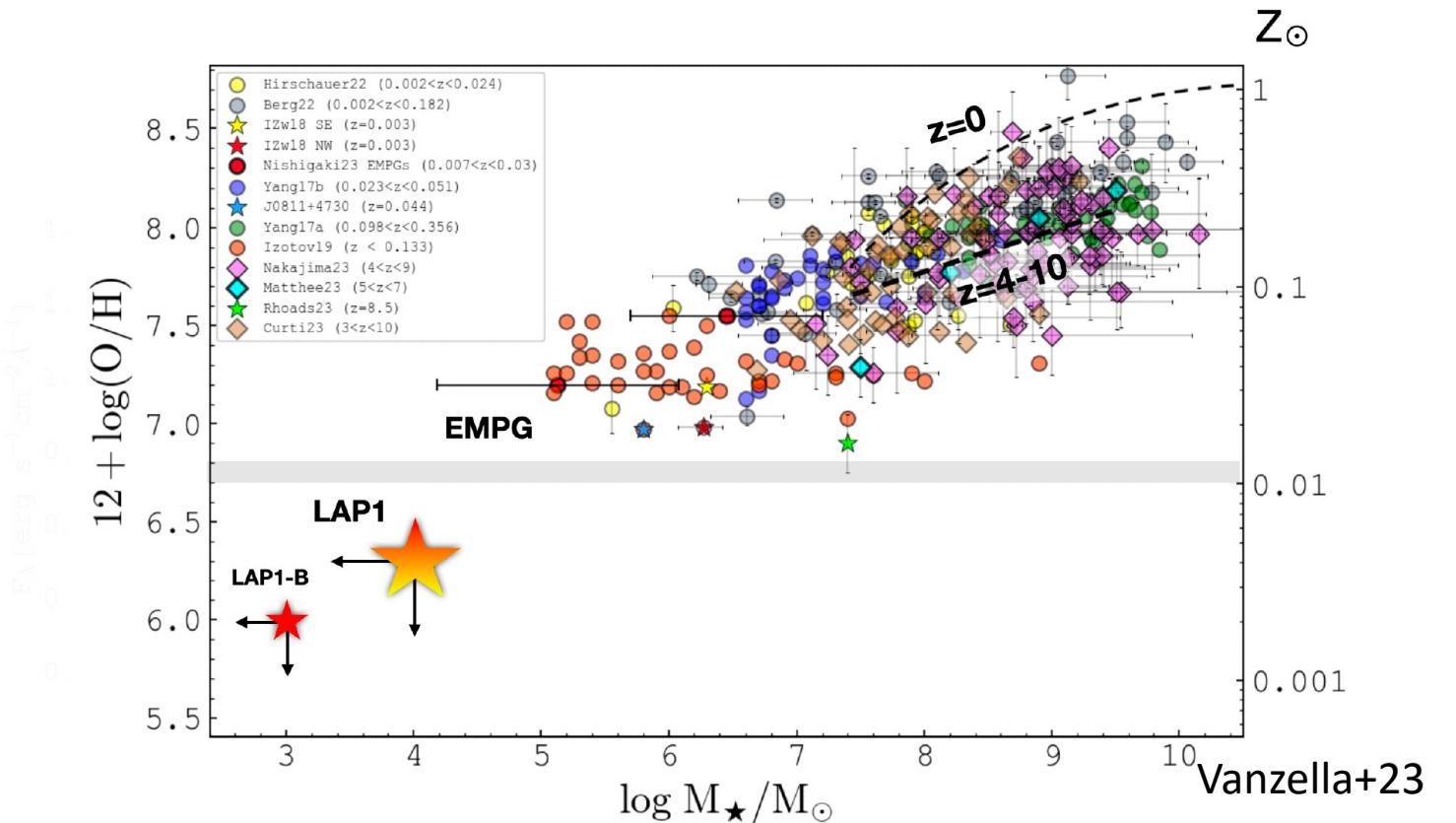
# Hell Clump in GN-z11?

- GN-z11のNIRSpec IFU分光
  - Hell1640のみで明るいclumpをGN-z11の北東で検出( $6.1\sigma$ )
  - 輝線比 (Hell/H $\gamma$ , Hell/CIV等) はPop-IIIと無矛盾
  - 他チームによる検証・深い観測が必要



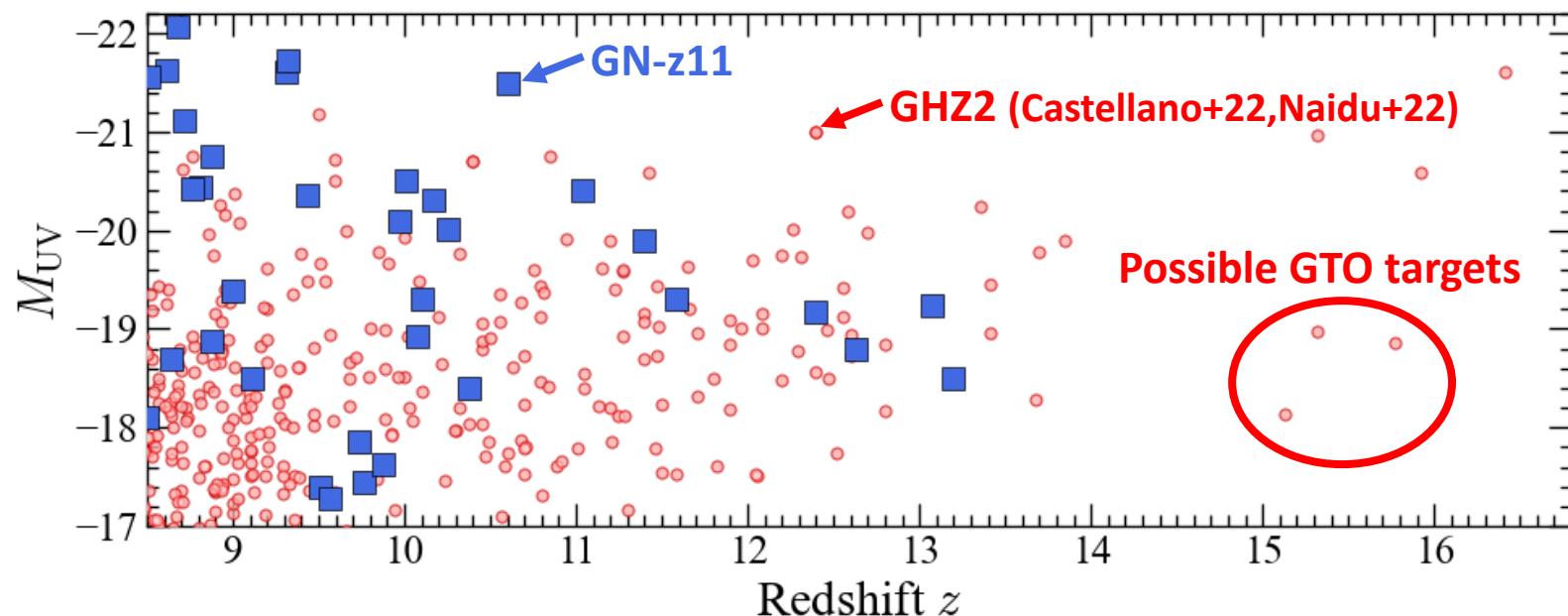
# Extremely Metal Poor Population

- $z=6.6$  の Ly $\alpha$  emitter ( $\text{EW}_{\text{Ly}\alpha} > 370 \text{ \AA}$ ) を NIRSpec 分光
  - [OIII]5007 が Hb 輝線よりも弱い!
  - 非常に低金属量,  $Z < 0.01 Z_{\text{sun}}$ 。形成初期の銀河 (星団)?



# Future Prospects

- $z \sim 12$  の明るい銀河候補 (GHZ2) の分光 (先月)
  - GN-z11のような特異な性質が見つかるか？
- $z \sim 15-16$  の暗い銀河候補
  - 12月-1月にJADES GTOで分光 → 最遠方銀河記録更新？



# Summary: JWST一年目の成果

- $z>10$ の銀河候補と分光結果
  - e.g., Harikane+23ac, Finkelstein+22,23, Arrabal Haro+23ab  
→ 理論予想以上に $z>10$ 銀河が多い。Top-heavy IMF, 星形成効率, burst?
- $z=7-9$ の大質量銀河?
  - e.g., Labbe+23, Xiao+23, Boylan-Kolchin 22, Lovell+22  
→  $\Lambda$ CDMが破綻することはなさそう。高い星形成効率必要 (>20%)?
- $z>4$ で多くのAGN (see also 稲吉さんtalk)
  - e.g., Kocevski+23, Harikane+23, Maiolino+23, Kokrev+23, Greene+23  
→ AGN fraction 5%。Little red dots。 $M_{\text{BH}}-M_*$ 関係 (overmassive?)
- 金属量進化、酸素、窒素 (GN-z11)、炭素
  - e.g., Nakajima+23, Curti+23, Bunker+23, Cameron+23, Isobe+23  
→  $z=4-10$ の $M_*$ -O/H関係。GN-z11の高いN/O比。C/Oが高い $z=12$ 銀河。
- Pop-III or extremely metal poor systems
  - e.g., Wang+23, Maiolino+23, Vanzella+23  
→ 本当にPop-IIIかどうかは今後の検証が必要。 $Z<0.01 Z_{\text{sun}}$  at  $z=6.6$