The background of the slide is a deep space image showing a vast field of galaxies. The galaxies are of various shapes and colors, including bright yellow and white ones, and some reddish-orange ones. The image is filled with stars and galaxy clusters, creating a rich, multi-colored cosmic scene. The text is overlaid on this background in white, with a semi-transparent dark grey box behind the main title for better readability.

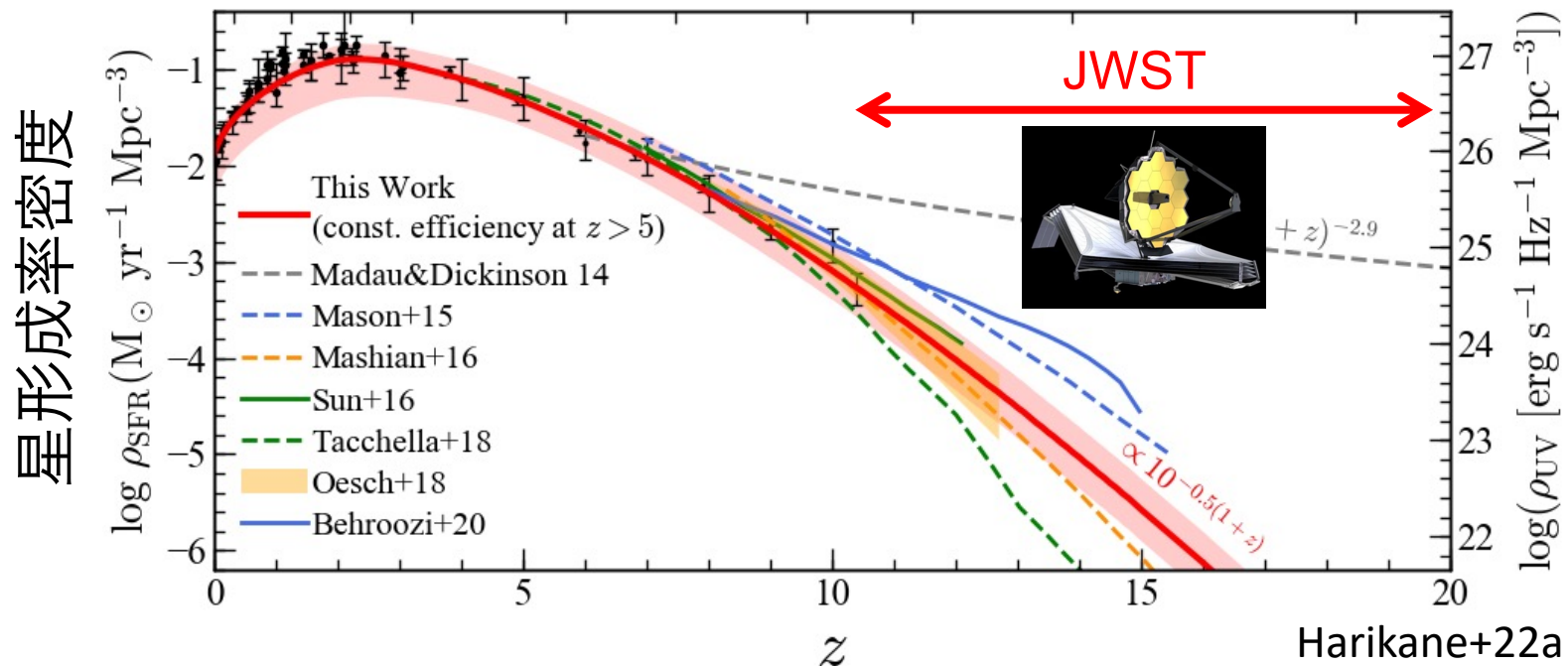
JWSTで探る遠方銀河形成: 初年度観測レビュー

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)

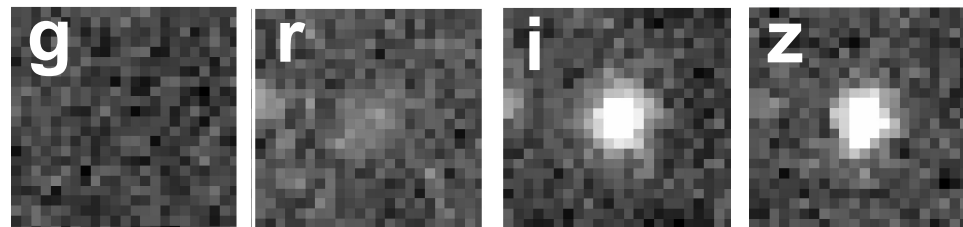
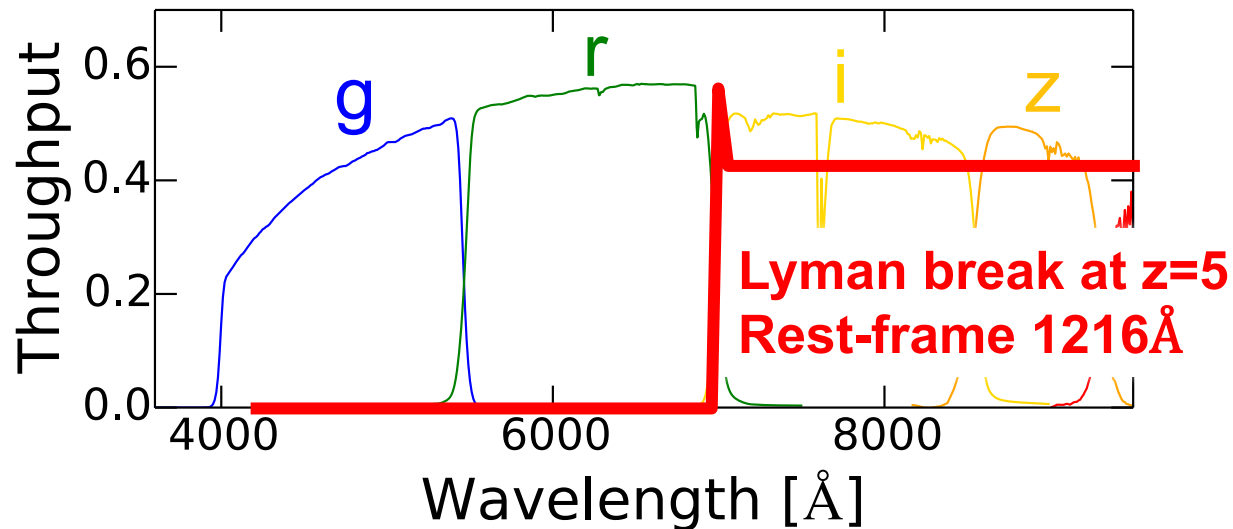
JWST登場前の状況

- 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 ($\text{SFR}/(dM_h/dt)$) 一定
 - $z=0-10$ の進化を再現, $z > 10$ では急激な現象 ($\propto 10^{-0.5(1+z)}$)



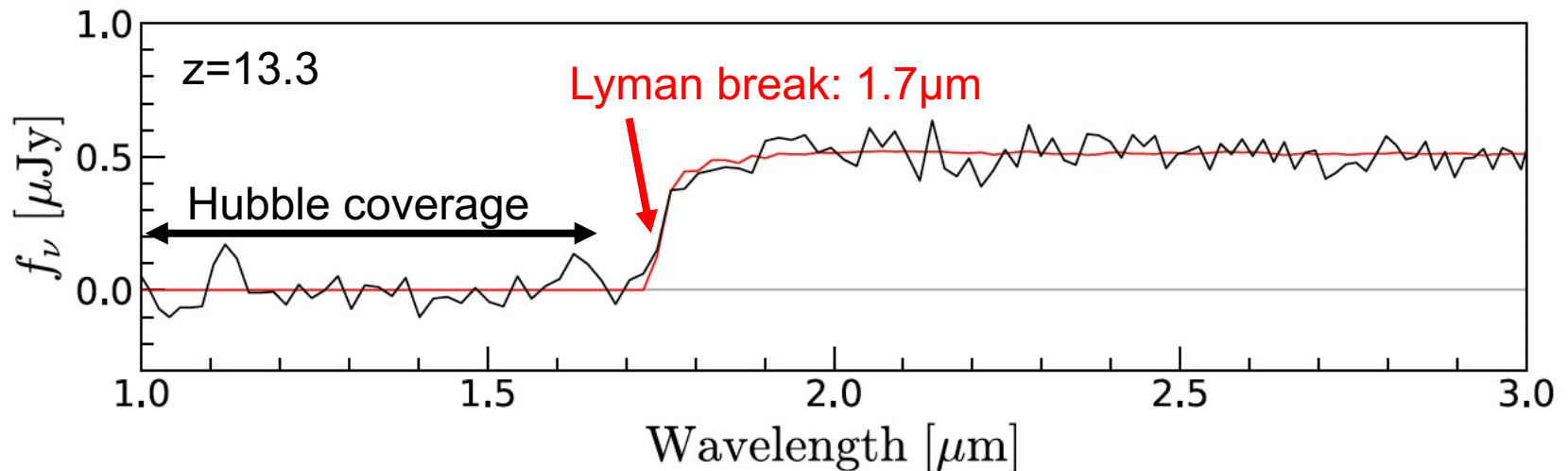
遠方銀河の選択方法

- 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 (Ly α 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 (Ly α ブレイク, 1216Å) を使う
 - Lyman break galaxy (LBG), dropout galaxy

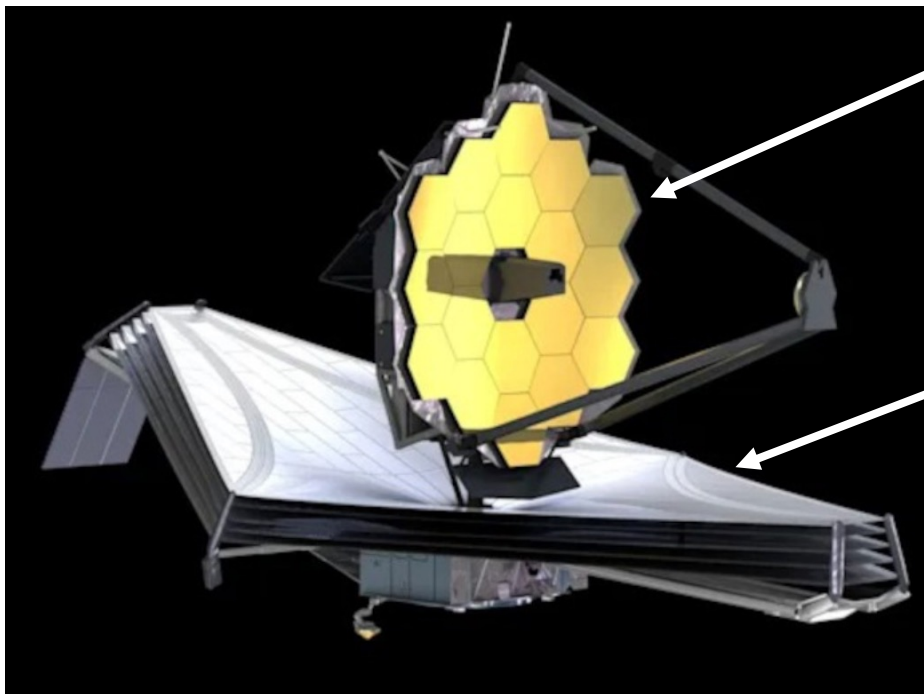


0.5-1 μ m 1.3 μ m 1.6 μ m 2.1 μ m 3.6 μ m
grizy *J* *H* *K_s* [3.6]

$z > 10$ の銀河を選択するには、1.6 μ m以上で深い観測が必要
→ JWST

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)

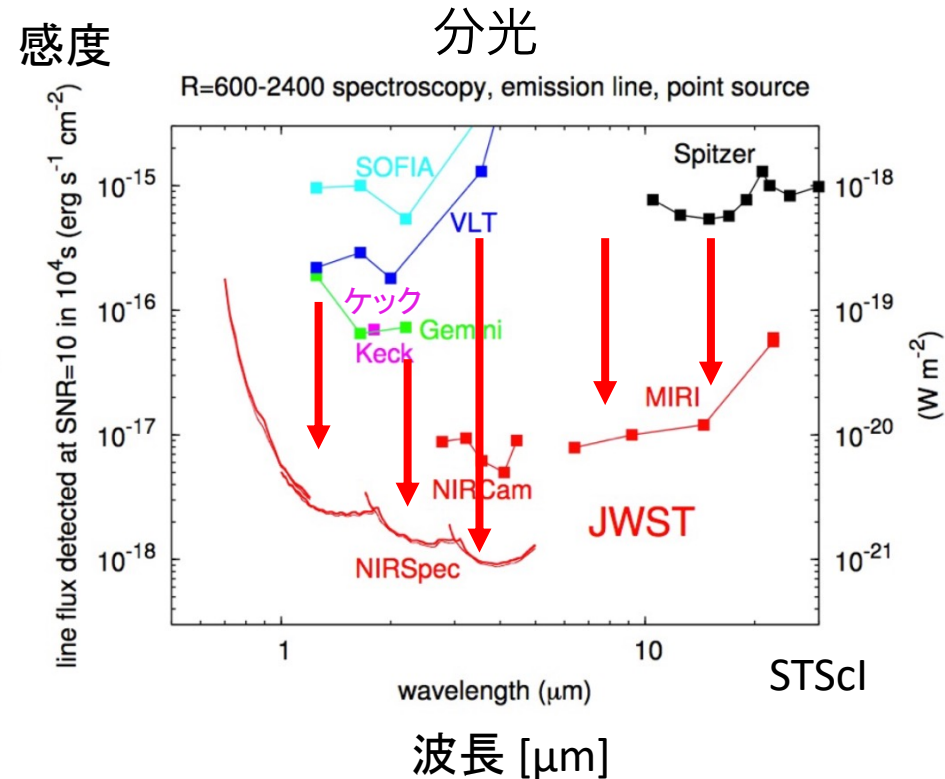
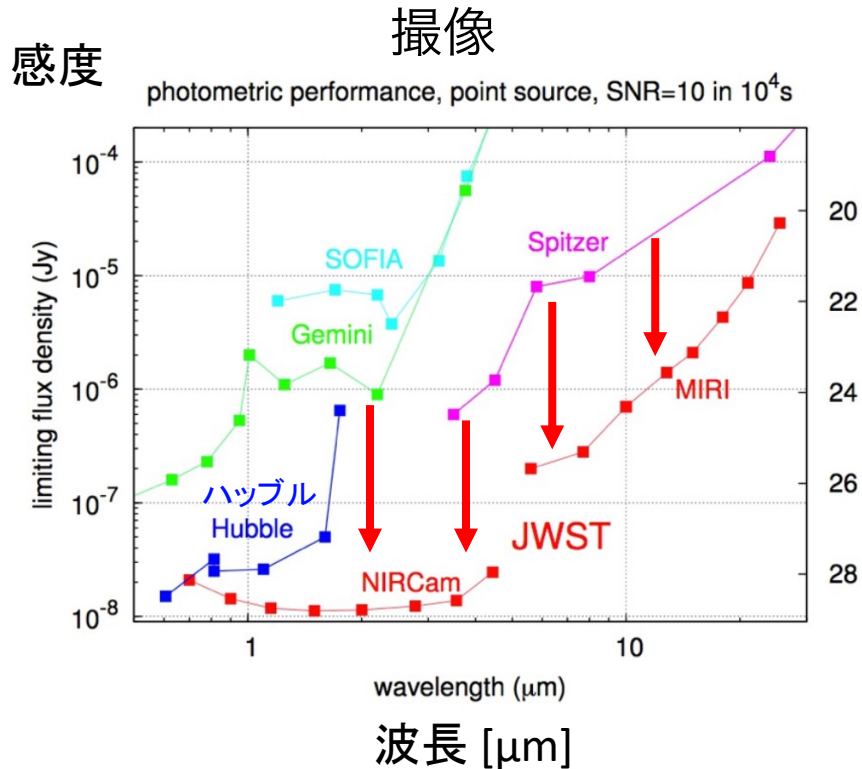
18枚の小さな鏡の組み合わせ
金メッキコーティング

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

JWSTの感度

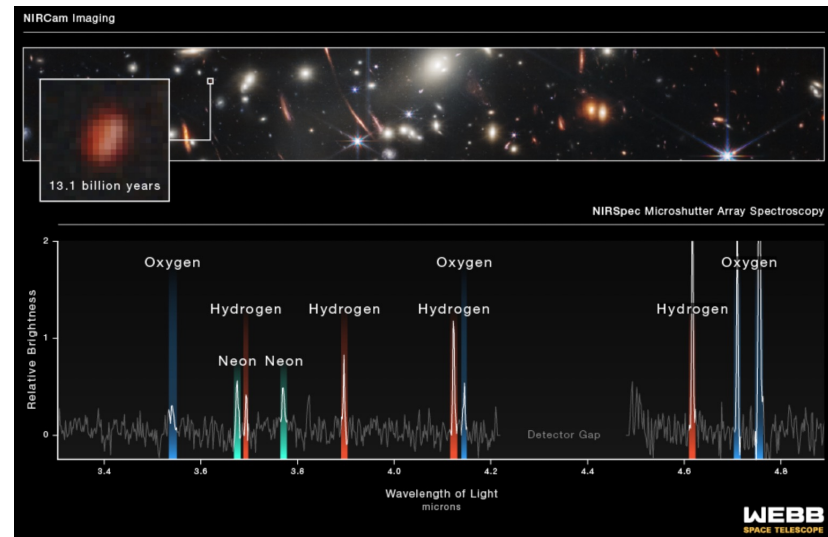
- 撮像・分光ともに感度が10-1000倍向上



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

最初のデータ公開 (2022/7/12)

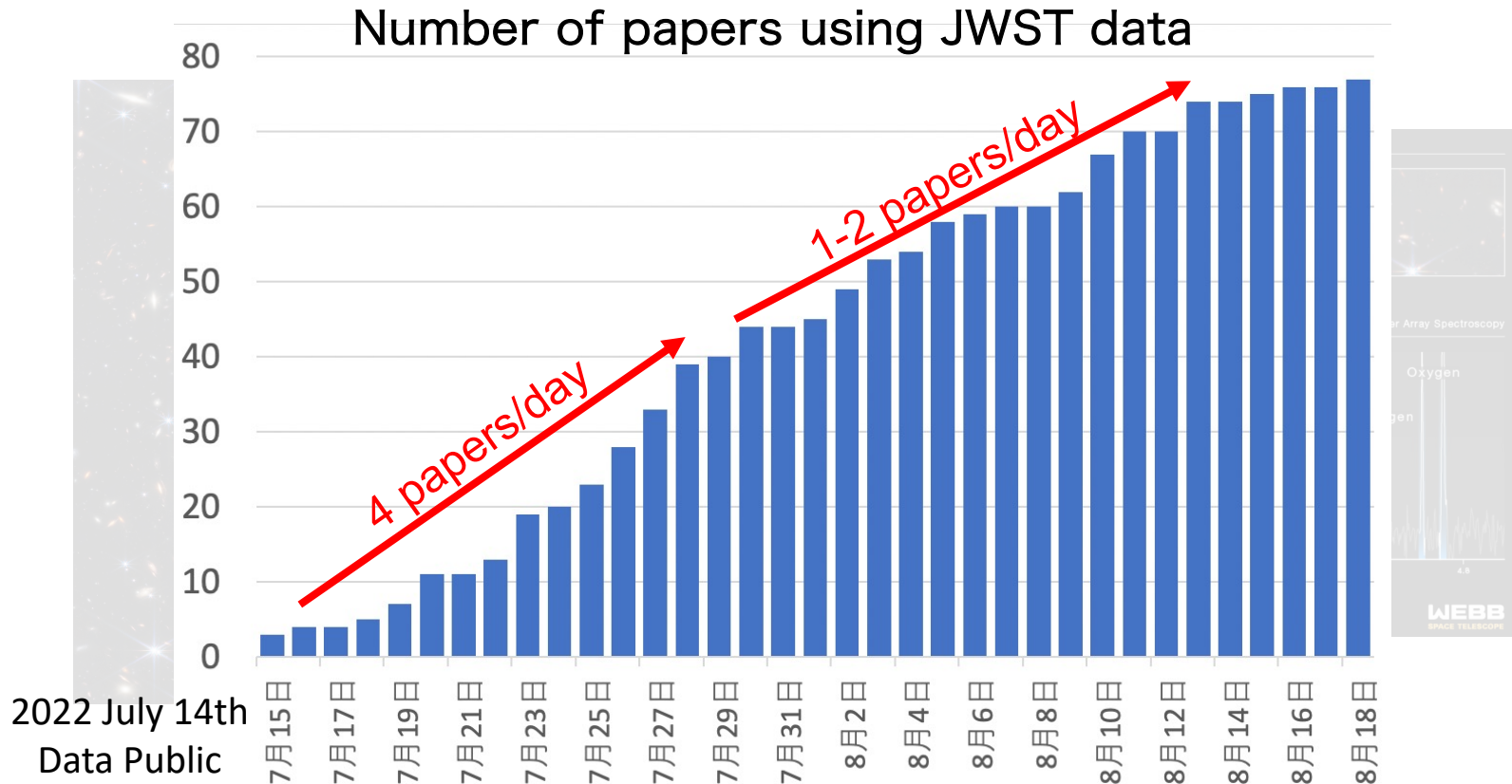
- NIRCam画像 (90 arcmin²) and NIRSpec分光データ
 - 最初の1ヶ月で80本の論文がarXivに登場 (paper rush)
 - 現在 (約一年): 2000本以上のJWST関連論文



NASA, ESA, CSA, and STScI

最初のデータ公開 (2022/7/12)

- NIRCam画像 (90 arcmin²) 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

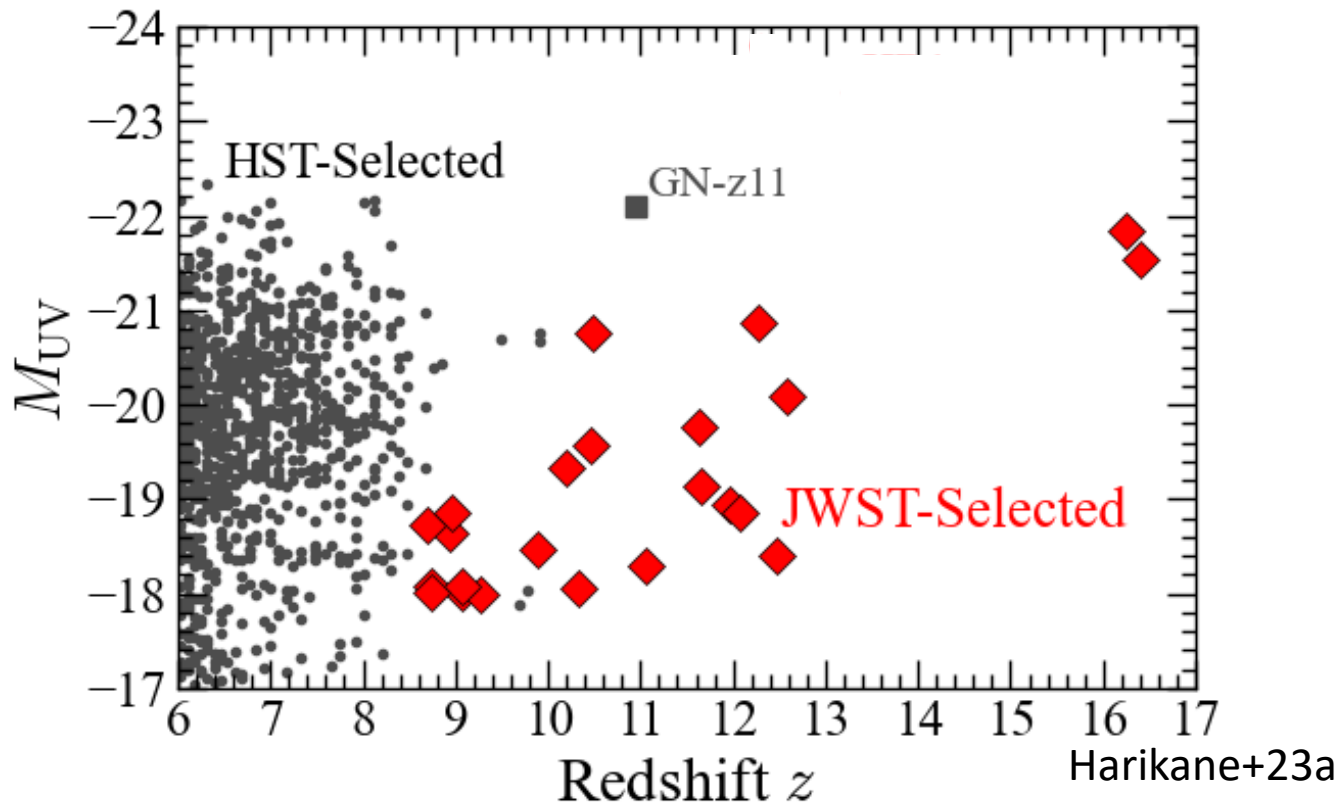


JWST一年目の成果

- $z > 10$ 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~9-16銀河候補

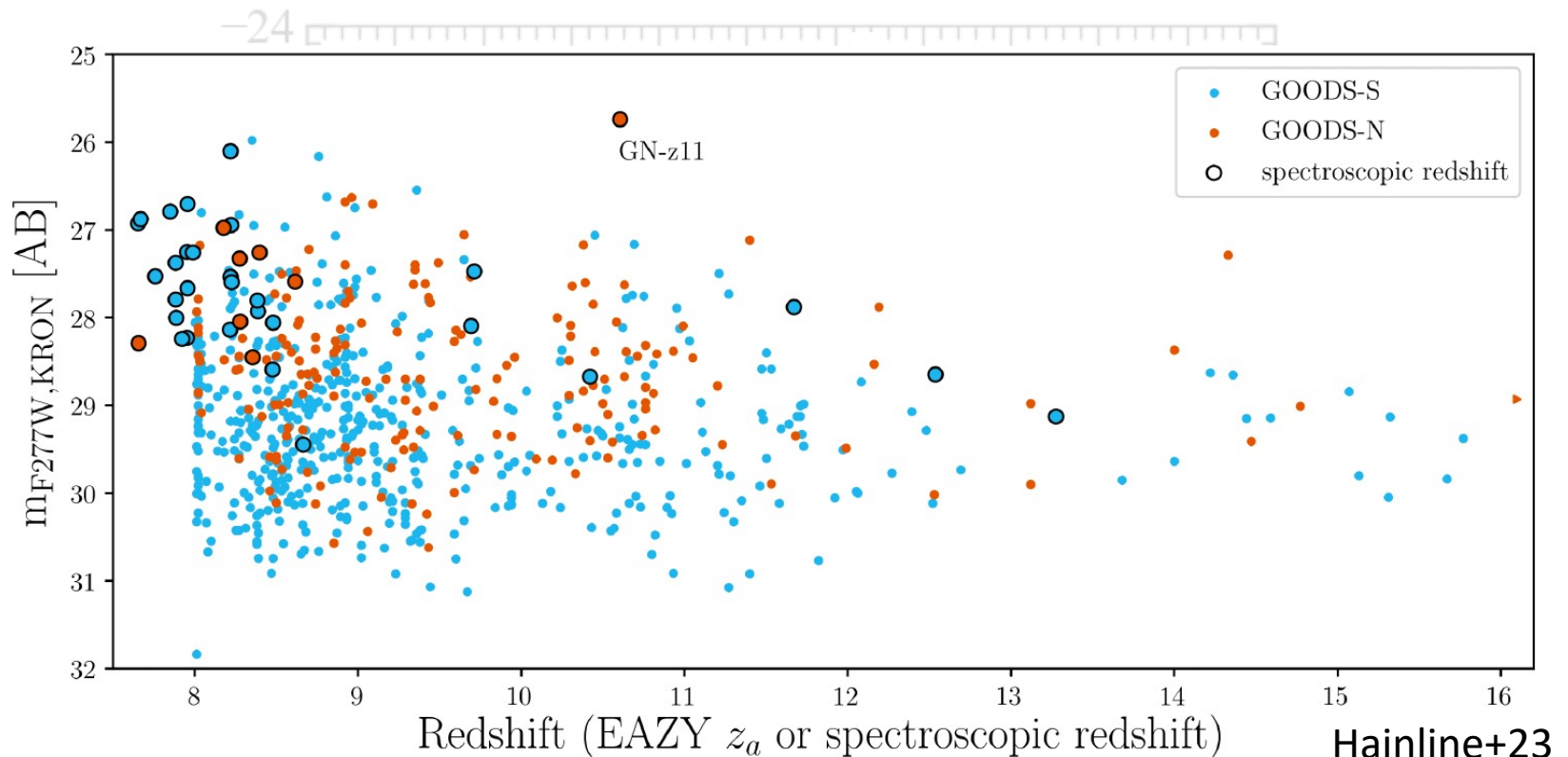
- 初期データから20天体以上のz~9-16銀河
 - 現在: z>8で700天体以上 (JADES GTOチーム)



See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez_{10/33} Gonzalez+23, Franco+23, Atek+22,23, Adams+22,23, Austin+23, Casey+23, Morishita+23ab, ...

JWST z~9-16銀河候補

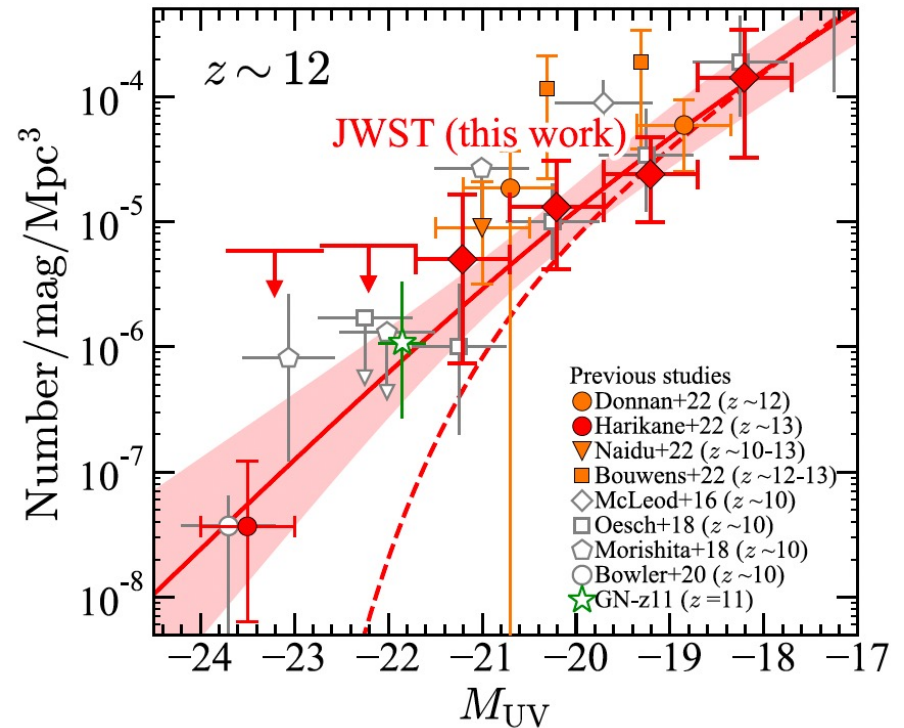
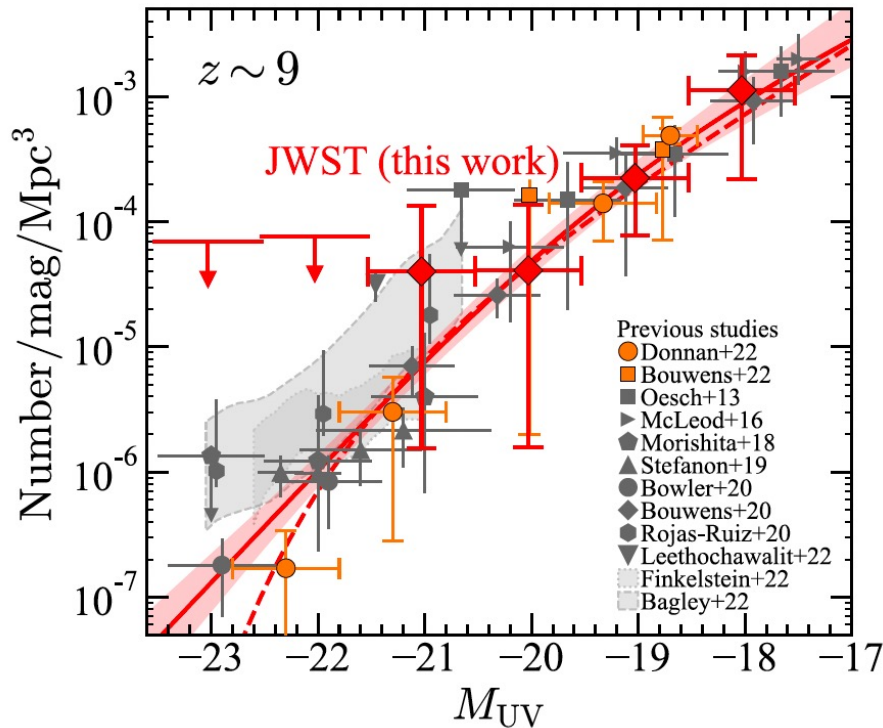
- 初期データから20天体以上のz~9-16銀河
 - 現在: z>8で700天体以上 (JADES GTOチーム)



See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez_{11/33}, 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

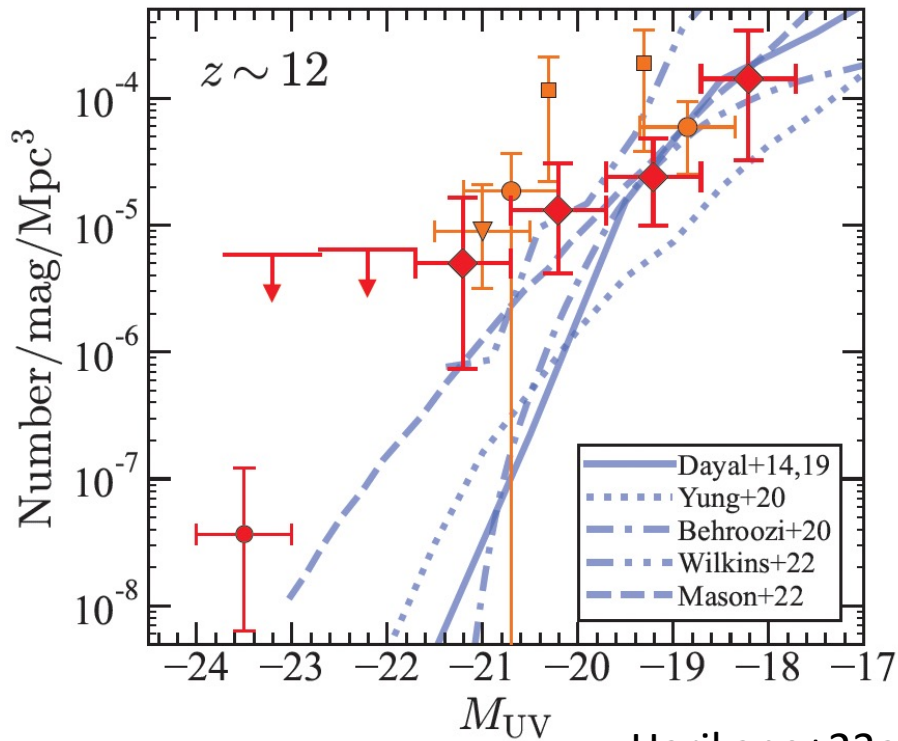


Harikane+23a

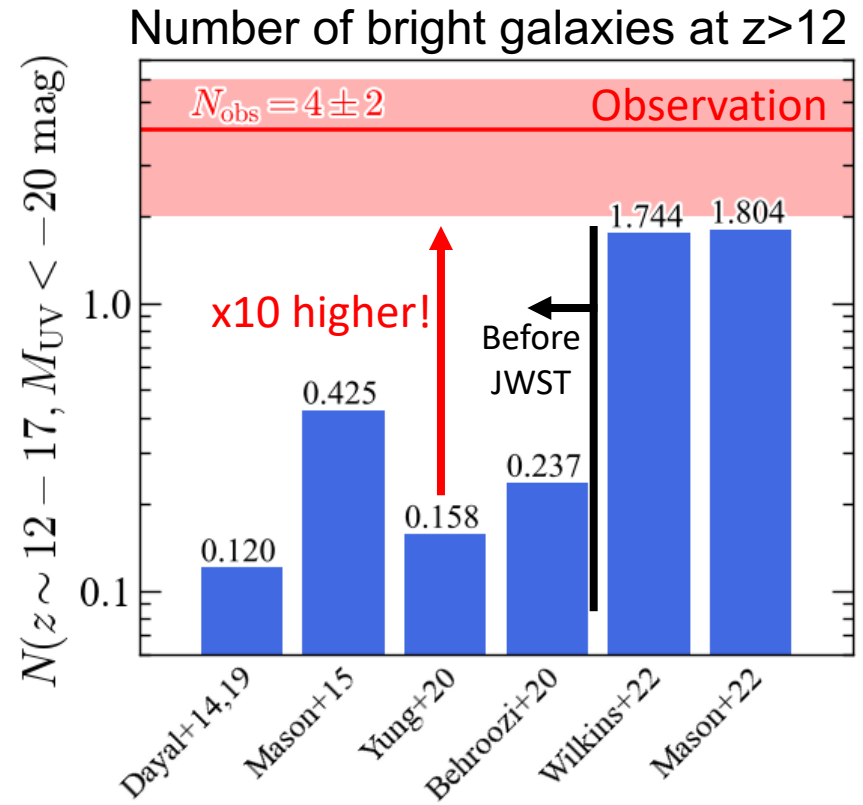
See also, Naidu+22, Castellano+22, Finkelstein+22,23ab, Donnan+23ab, Bouwens+23ab, Perez_{12/33}, Gonzalez+23, Franco+23, Atek+22,23, Adams+22,23, Austin+23, Casey+23, Morishita+23ab, ...

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



Harikane+23a



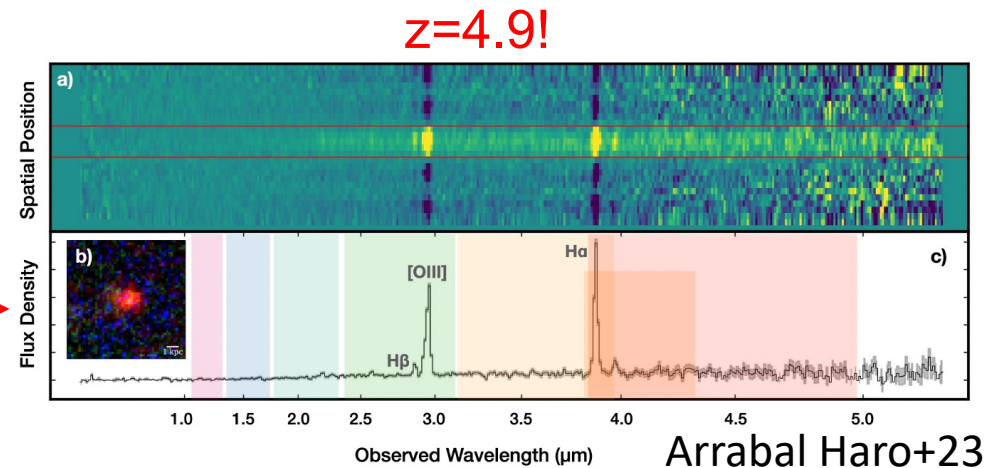
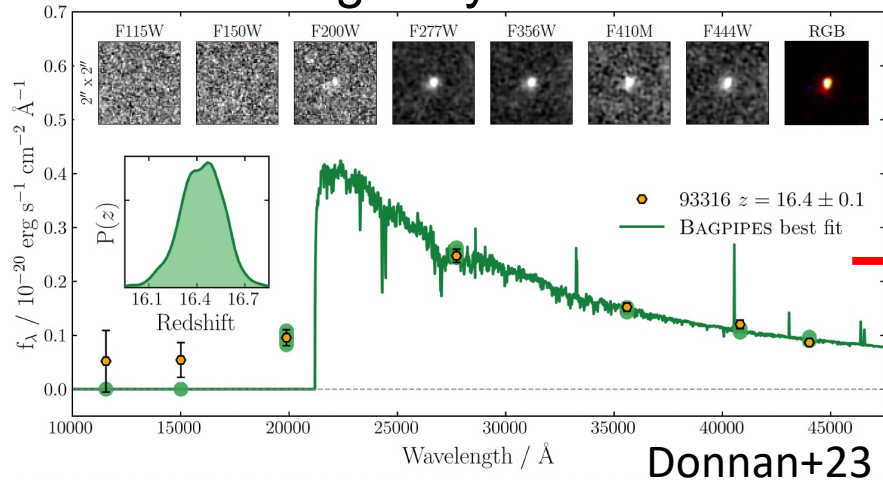
Model predictions

Harikane+23a

Low-z Interloper

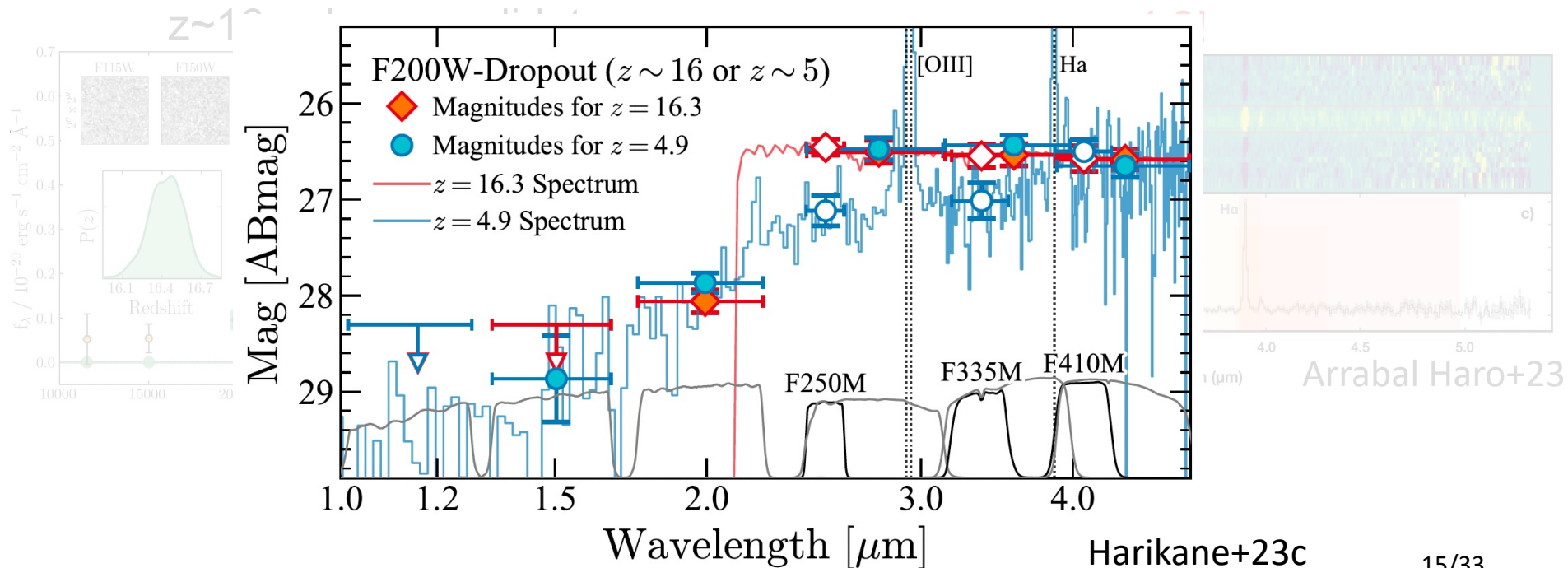
- 明るい $z \sim 16$ 銀河候補 $\rightarrow z=4.9$ の強輝線銀河だった
 - 複数のmedium-band観測がコンタミ除去に有用
 - Yan+23の $z > 10$ 候補 $\rightarrow z < 5$ のdusty銀河かも (Meyer+23)

$z \sim 16$ galaxy candidate



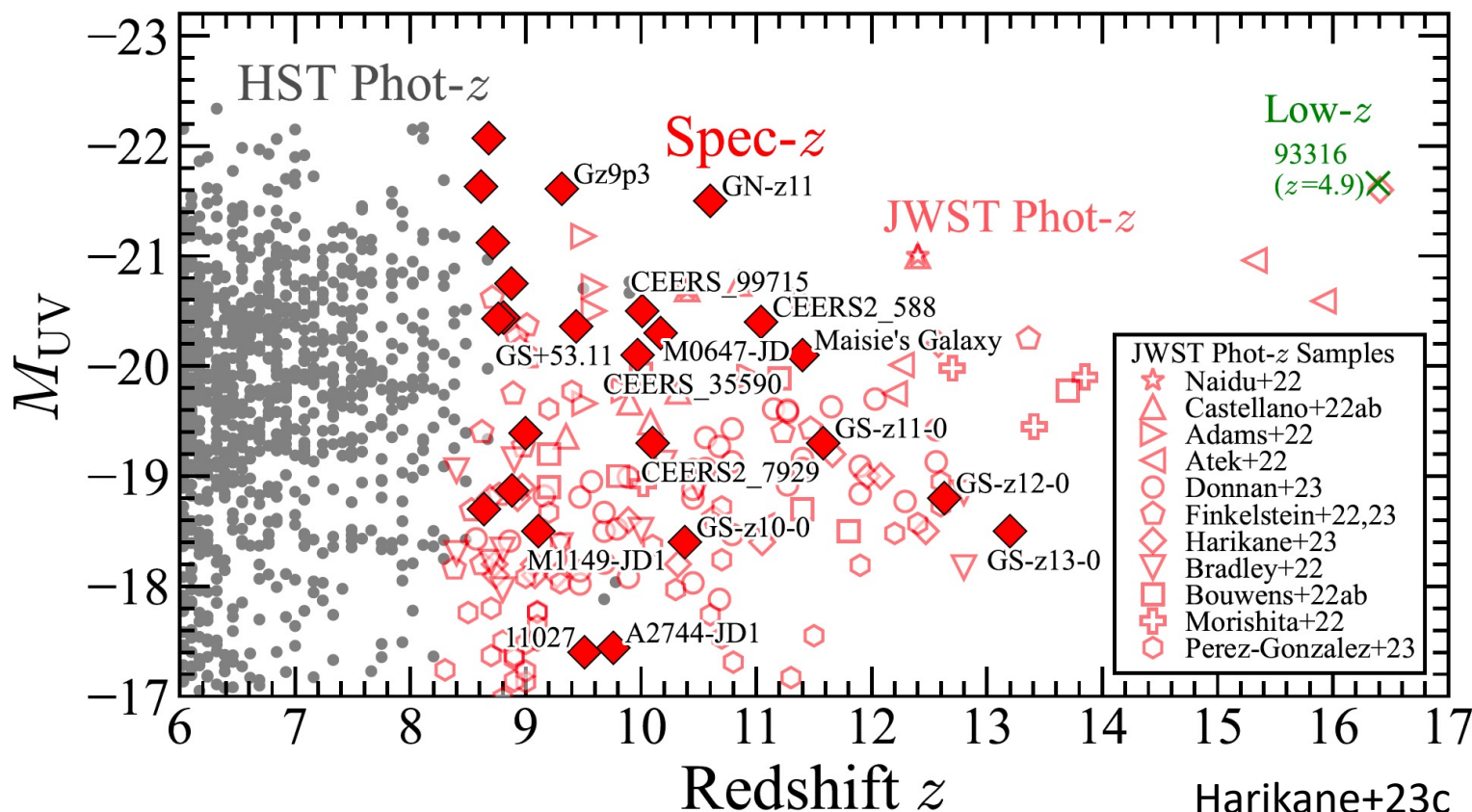
Low-z Interloper

- 明るい $z \sim 16$ 銀河候補 $\rightarrow z=4.9$ 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 $\rightarrow z < 5$ のdusty銀河かも (Meyer+23)



JWST分光観測

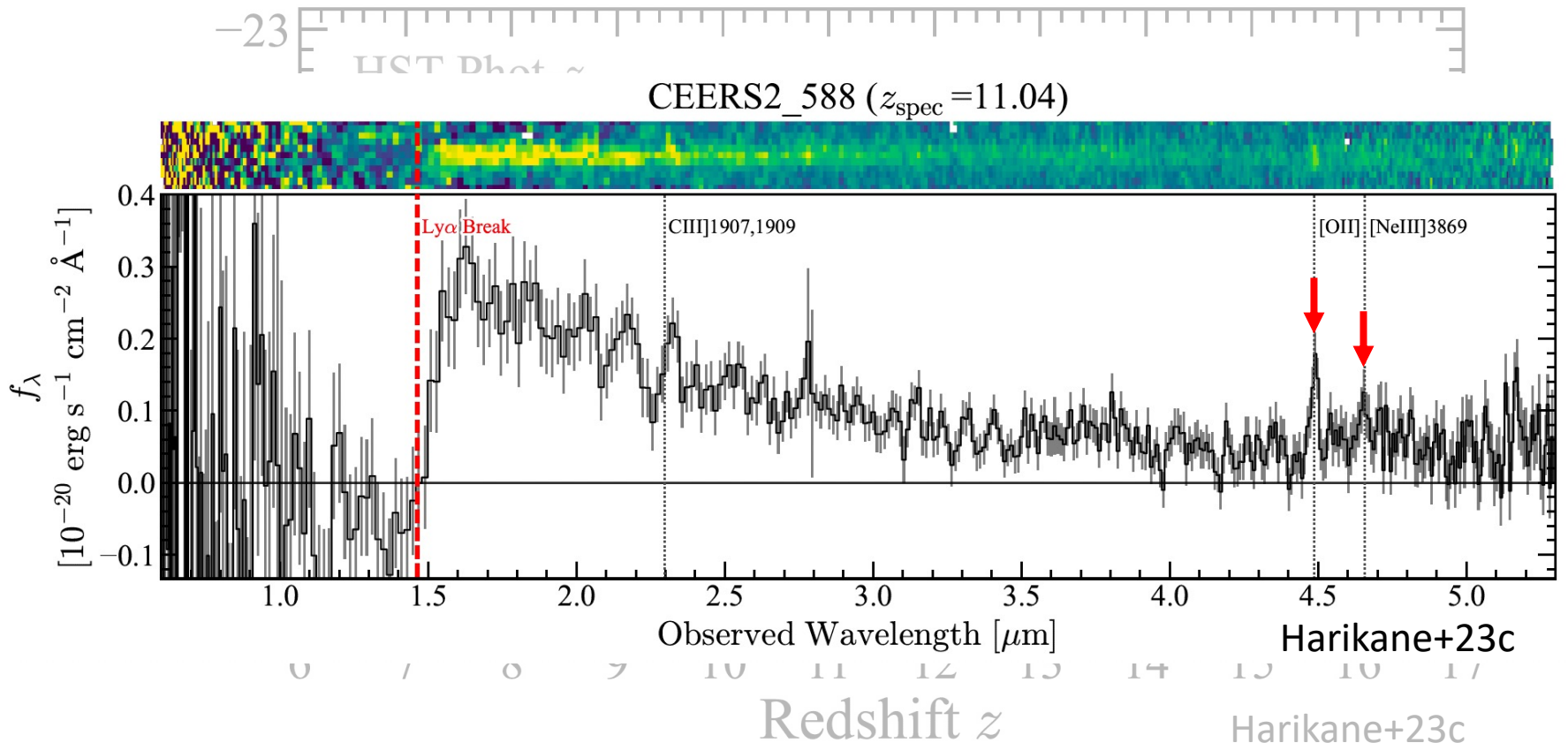
- 25個の $z=8.61-13.20$ 銀河が分光同定済み



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

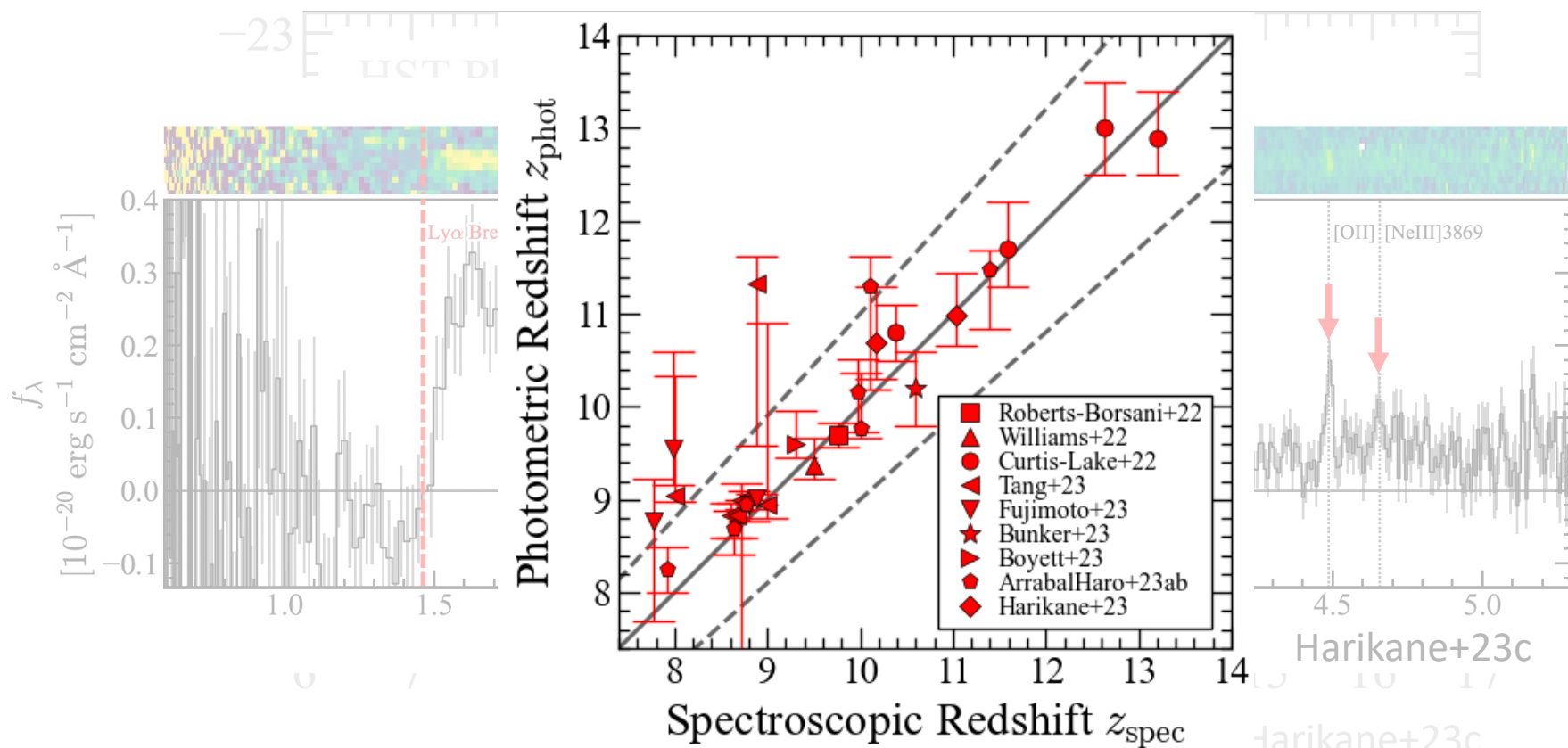
JWST分光観測

- 25個の $z=8.61-13.20$ 銀河が分光同定済み



JWST分光観測

- 25個の $z=8.61-13.20$ 銀河が分光同定済み



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 α ?	Hashimoto+18
3	EGSY8p7	8.68	Ly α	Zitrin+15

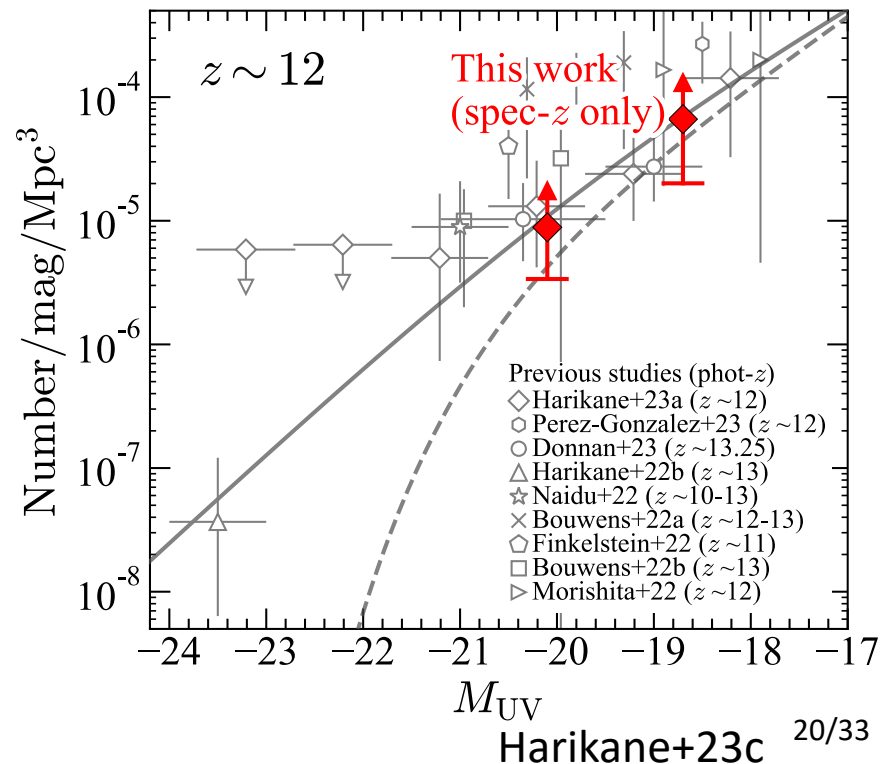
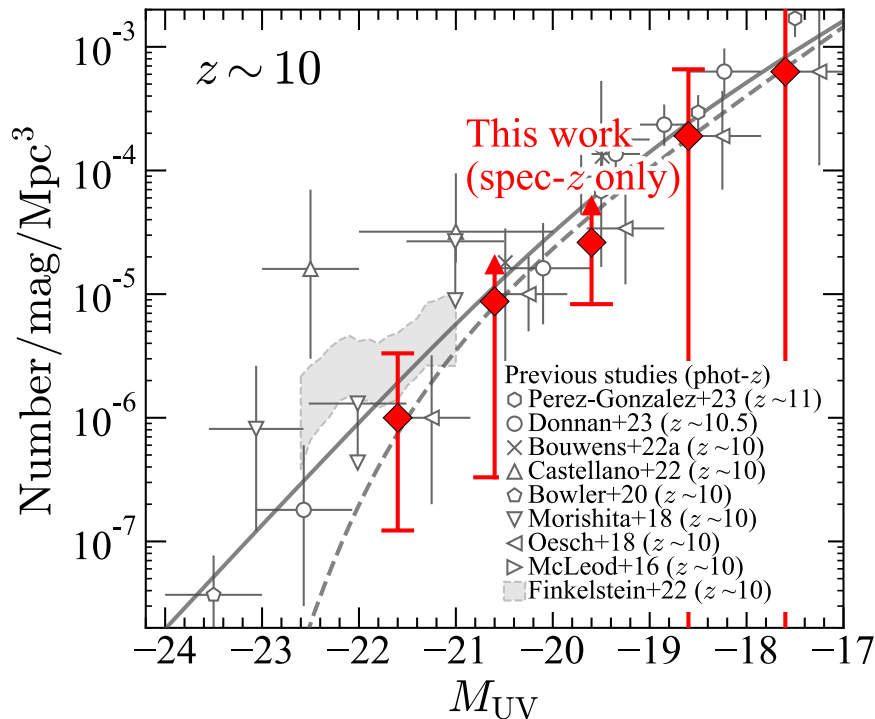
登場後



	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], [NeIII]	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], [NeIII]	Arrabal Haro+23a
7	CEERS2_588	11.04	Lyman break, [OII], [NeIII]	Harikane+23c
8	GN-z11	10.60	Lyman break, CIII], H γ , etc.	Bunker+23
9	JADES-GS-z10-0	10.38	Lyman break	Curtis-Lake+23
10	37126	10.26	Lyman break	Fujimoto+23

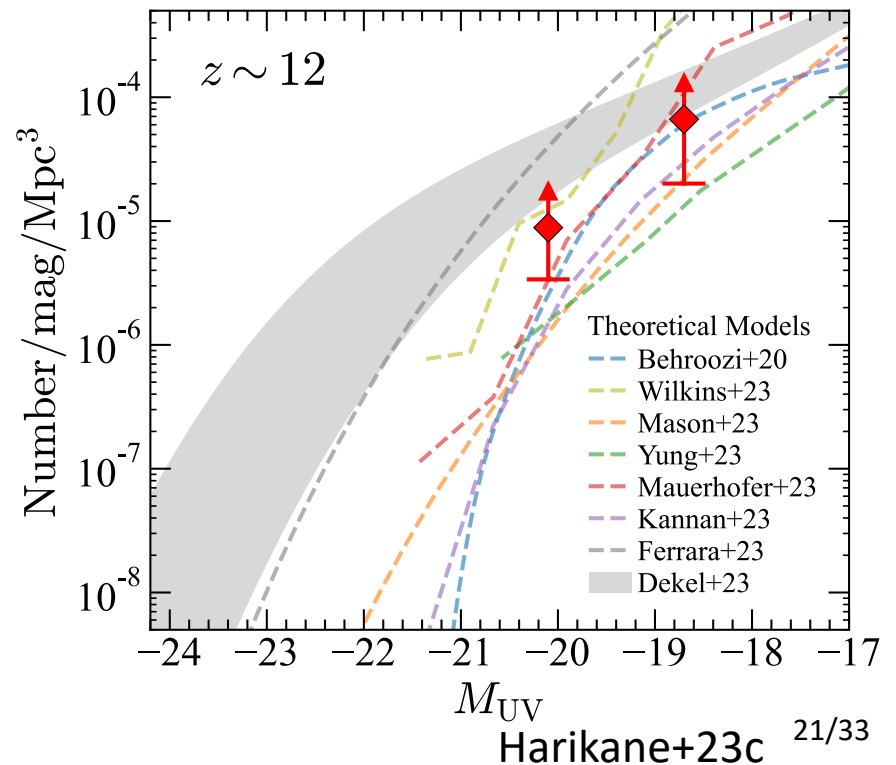
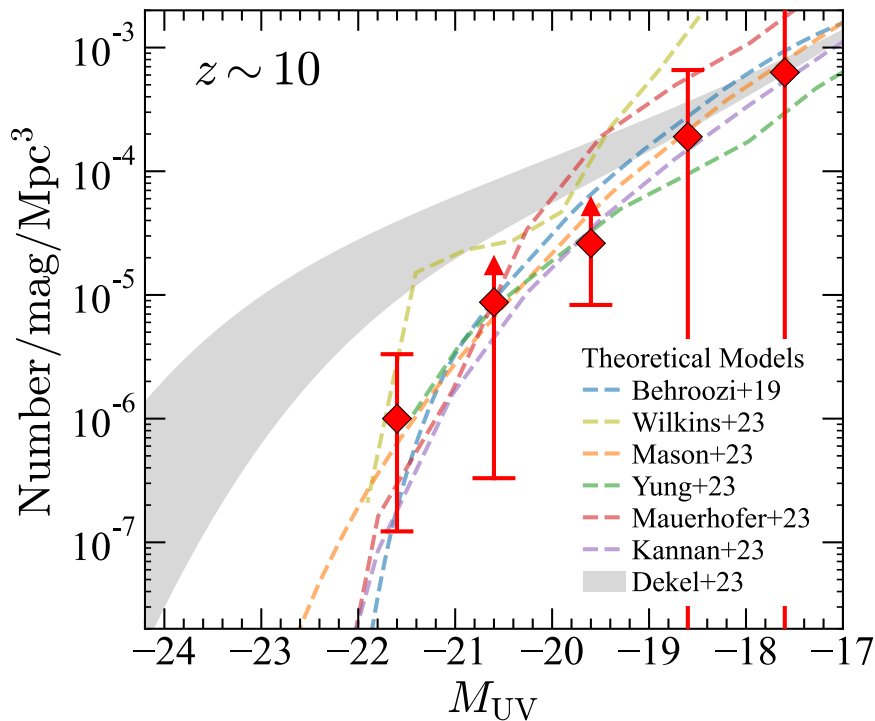
分光データをもとにした光度関数

- 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



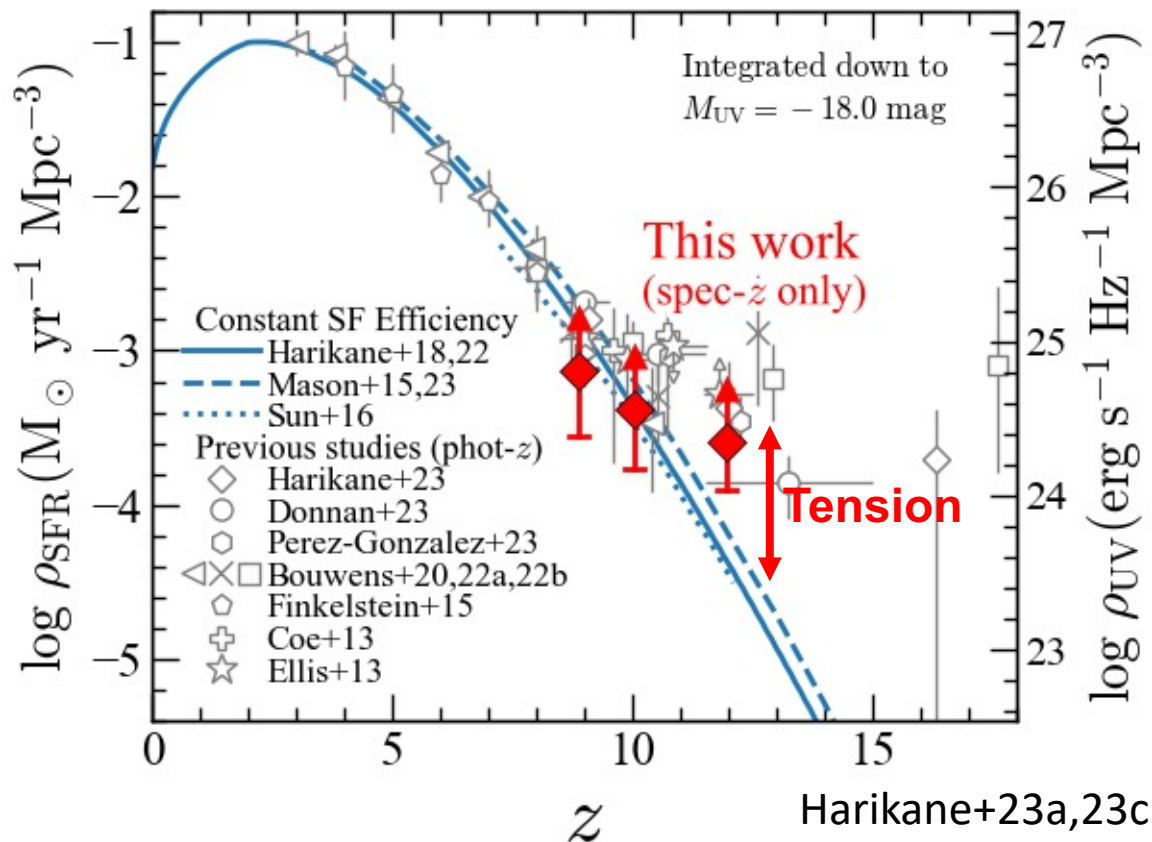
分光データをもとにした光度関数

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

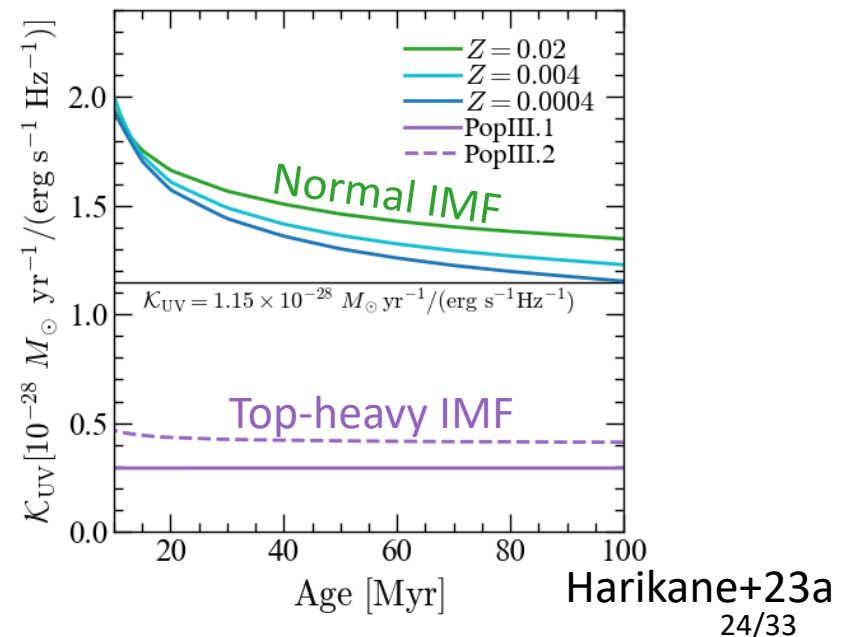
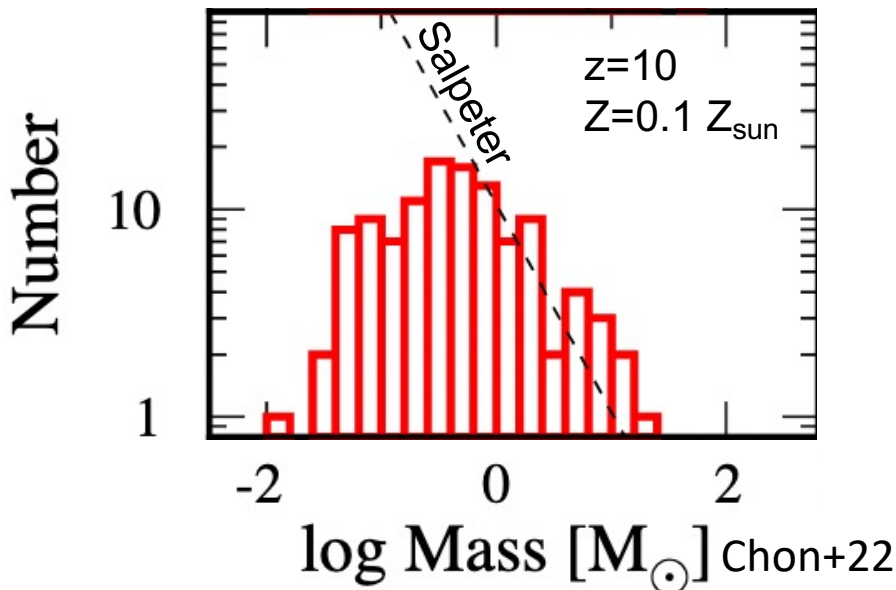


$z > 10$ で銀河が多い物理的解釈

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

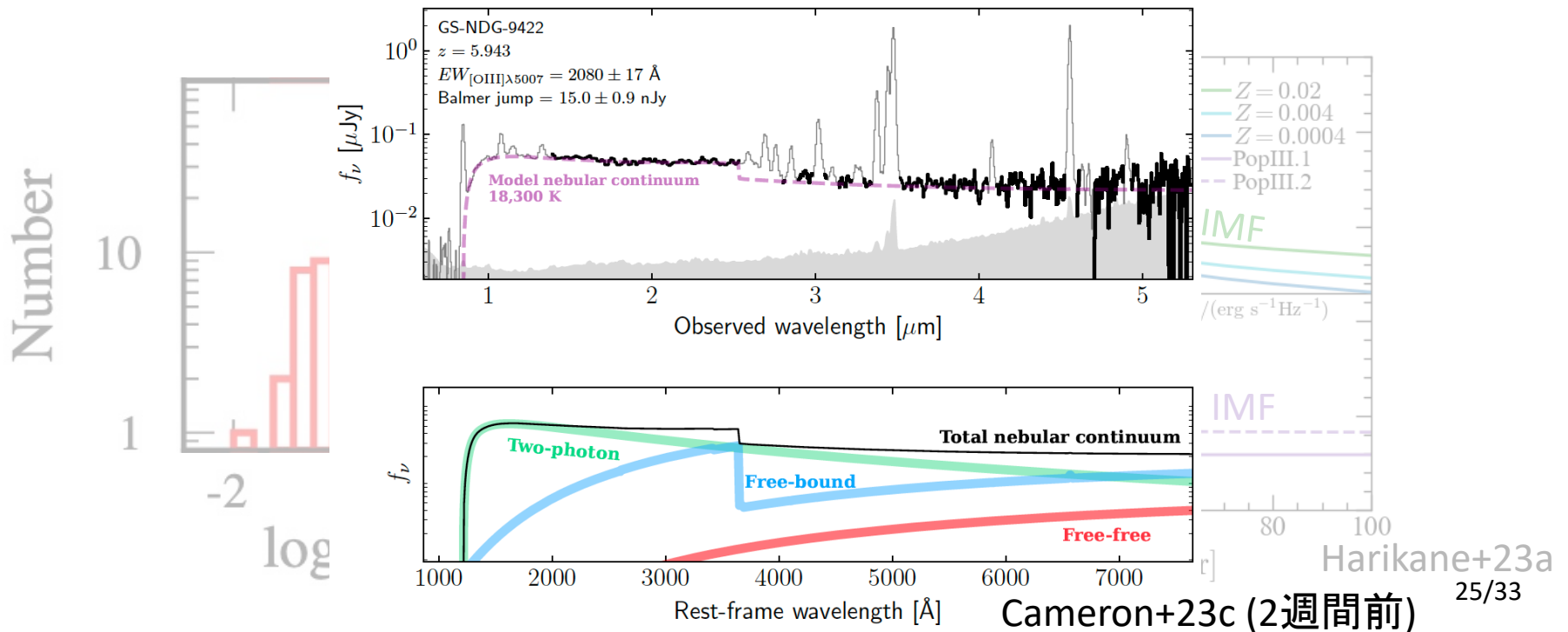
Top-Heavy IMF

- 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 $z=5.9, 7.9$



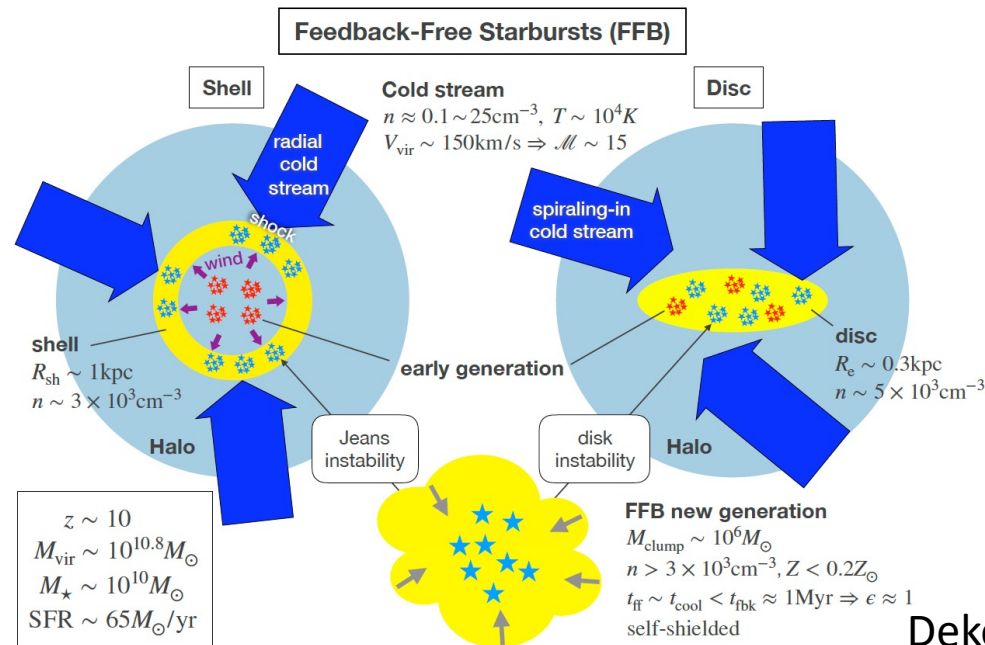
Top-Heavy IMF

- 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



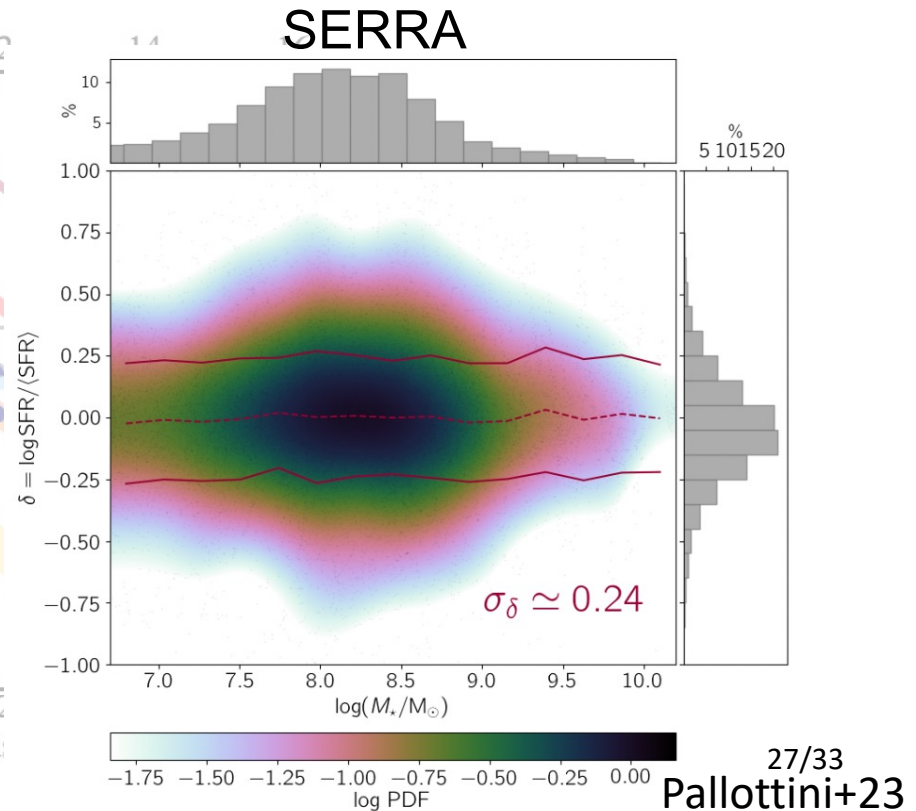
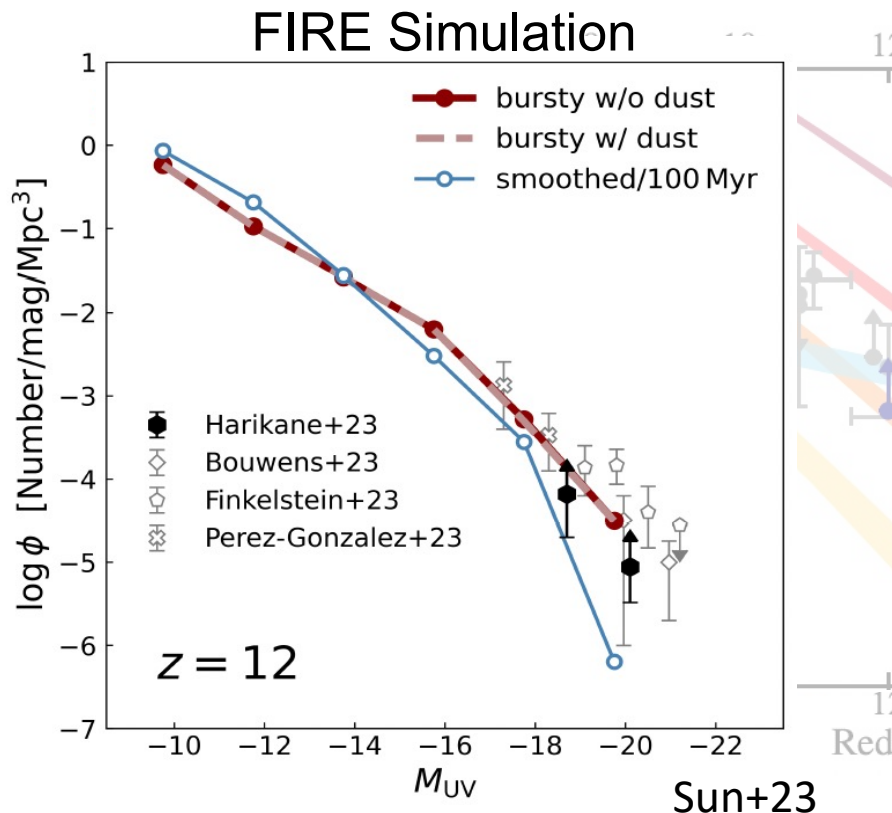
New Star Formation Models

- 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



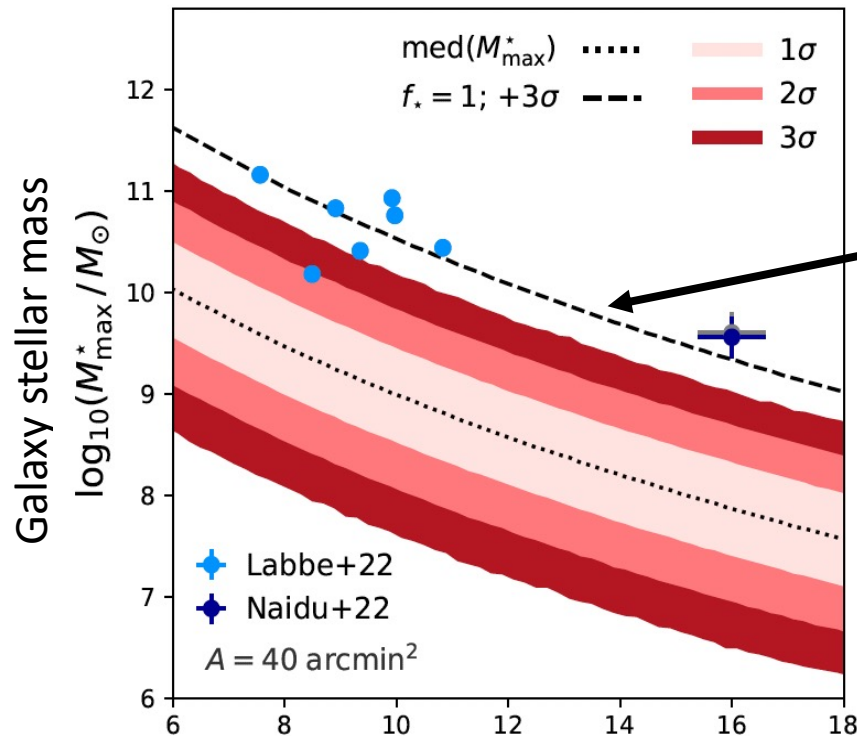
Bursty Star Formation

- 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
 - $M_* \sim 10^{11} M_{\text{sun}}$, ΛCDM とtension

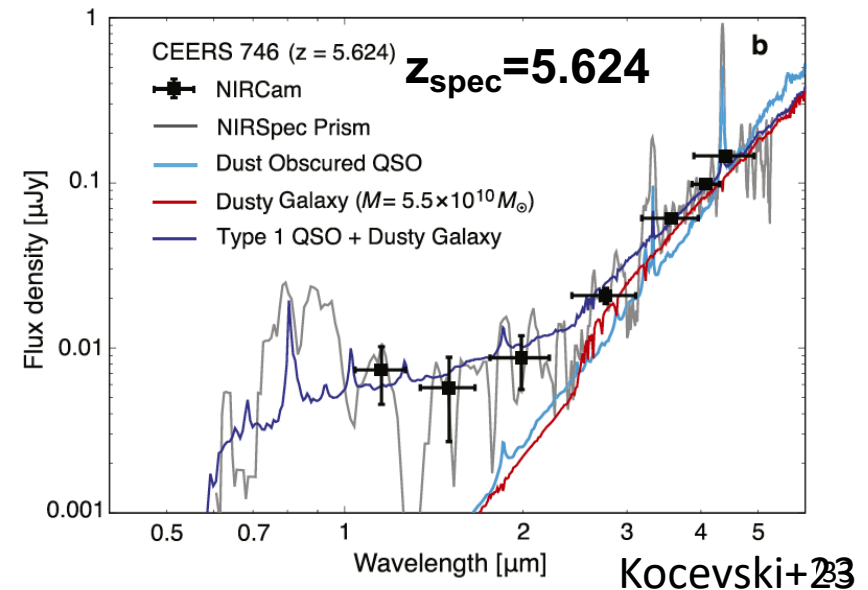
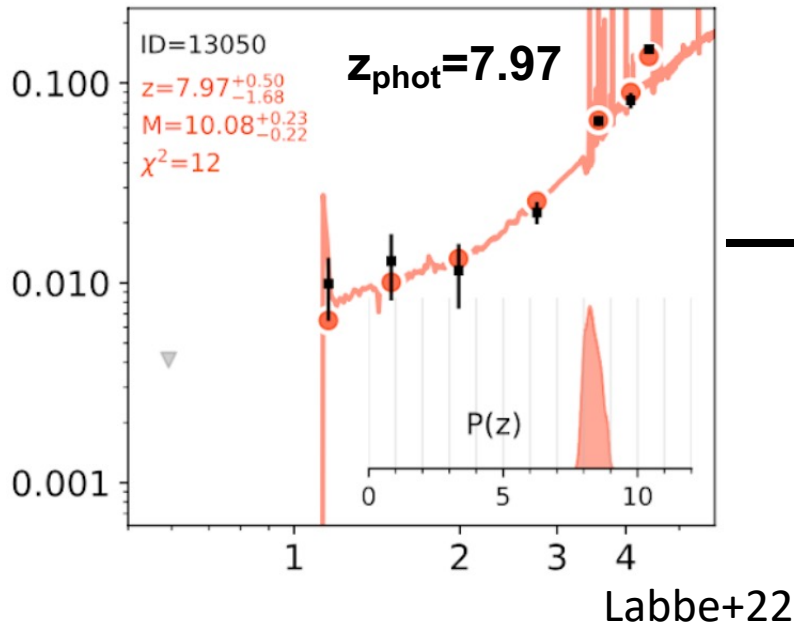


ΛCDM 宇宙論で許される最大の
星質量の3 σ 上限値
(ハロー質量 \times cosmic baryon fraction)

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

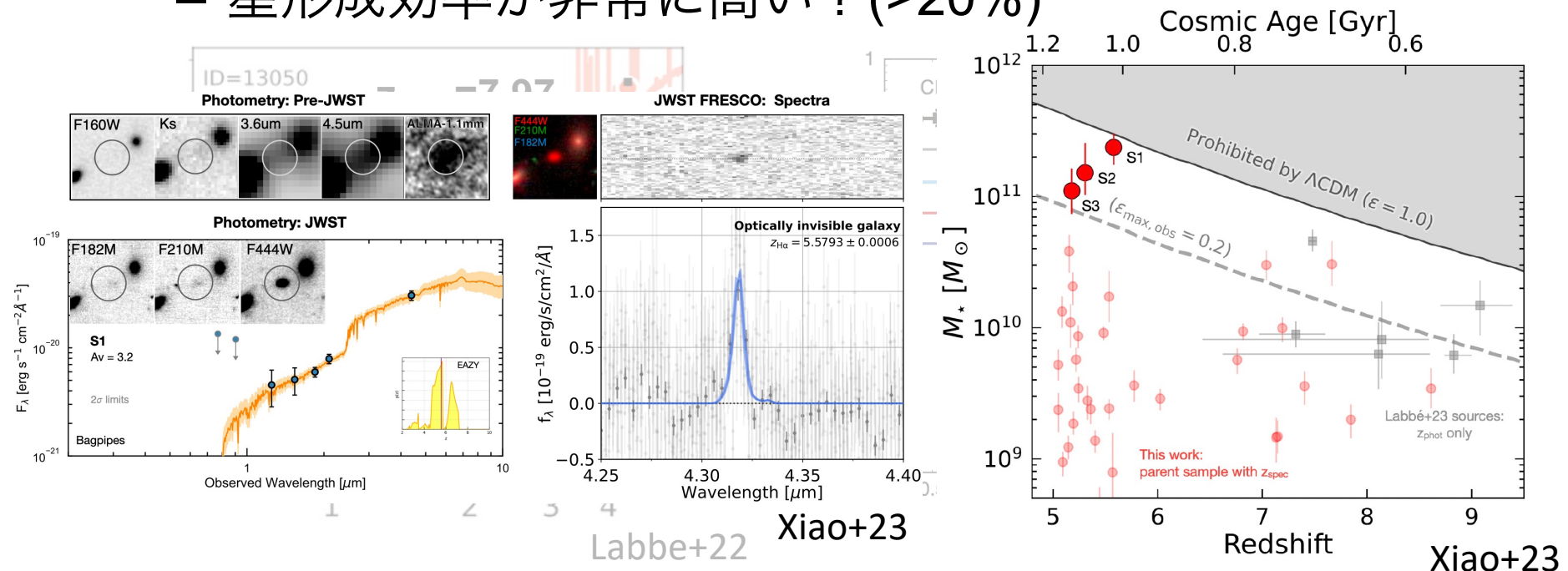
分光結果

- 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%)



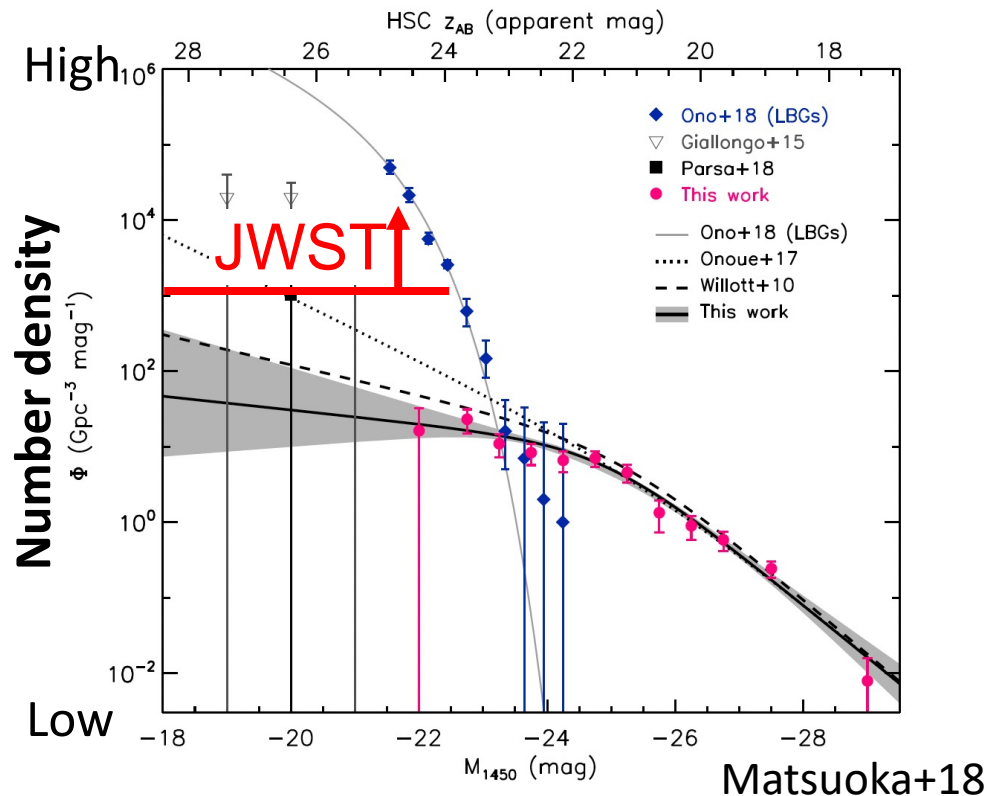
分光結果

- 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? ($>20\%$)



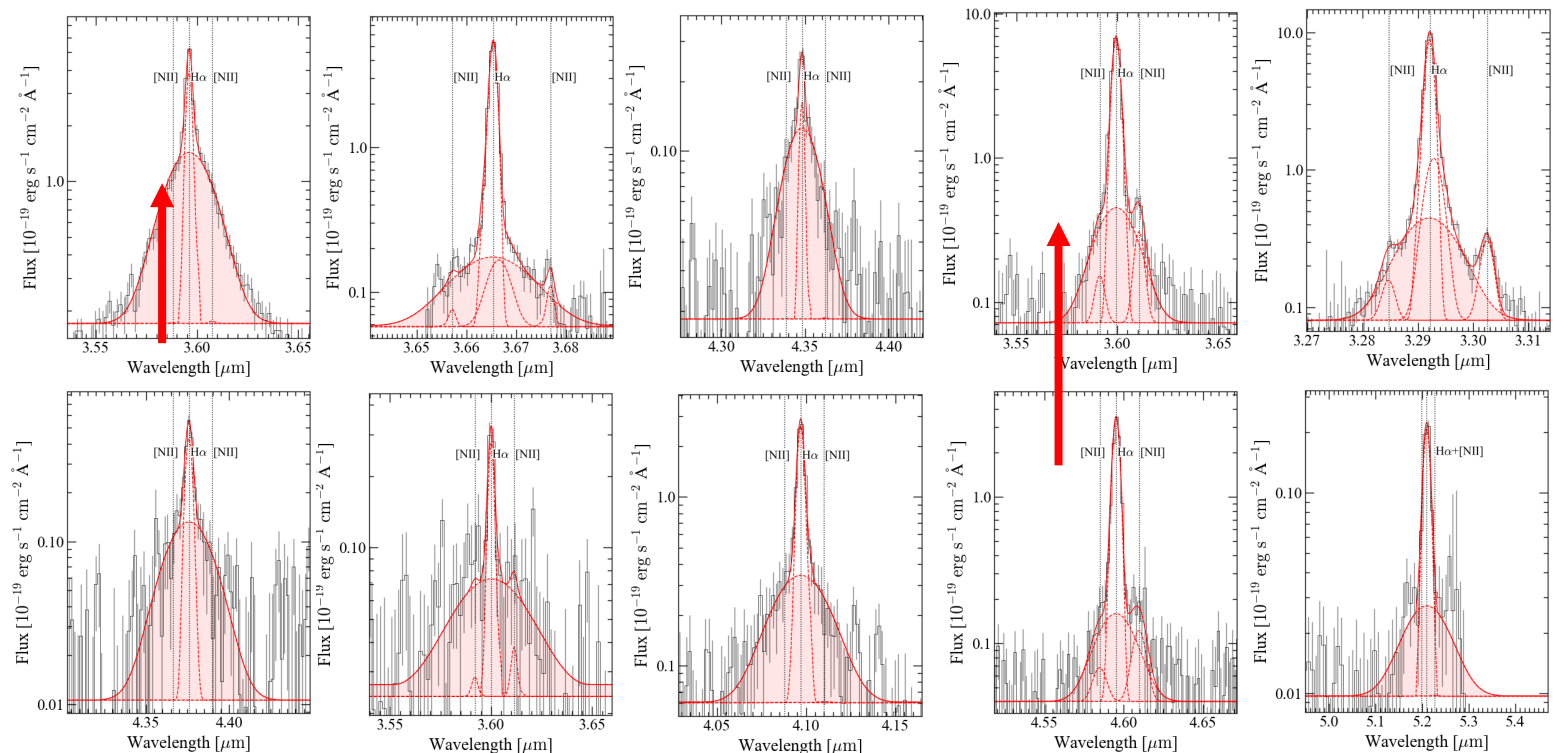
もしかしてAGNは多い？

- 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
 - Faind-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Ha輝線 (FWHM \sim 1000-6000 km/s), 狭い[OIII] (<1000 km/s)
 - 185個の銀河で10個のAGN \rightarrow $\sim 5\%$ ($\sim 1-2\%$ at $z\sim 0$)

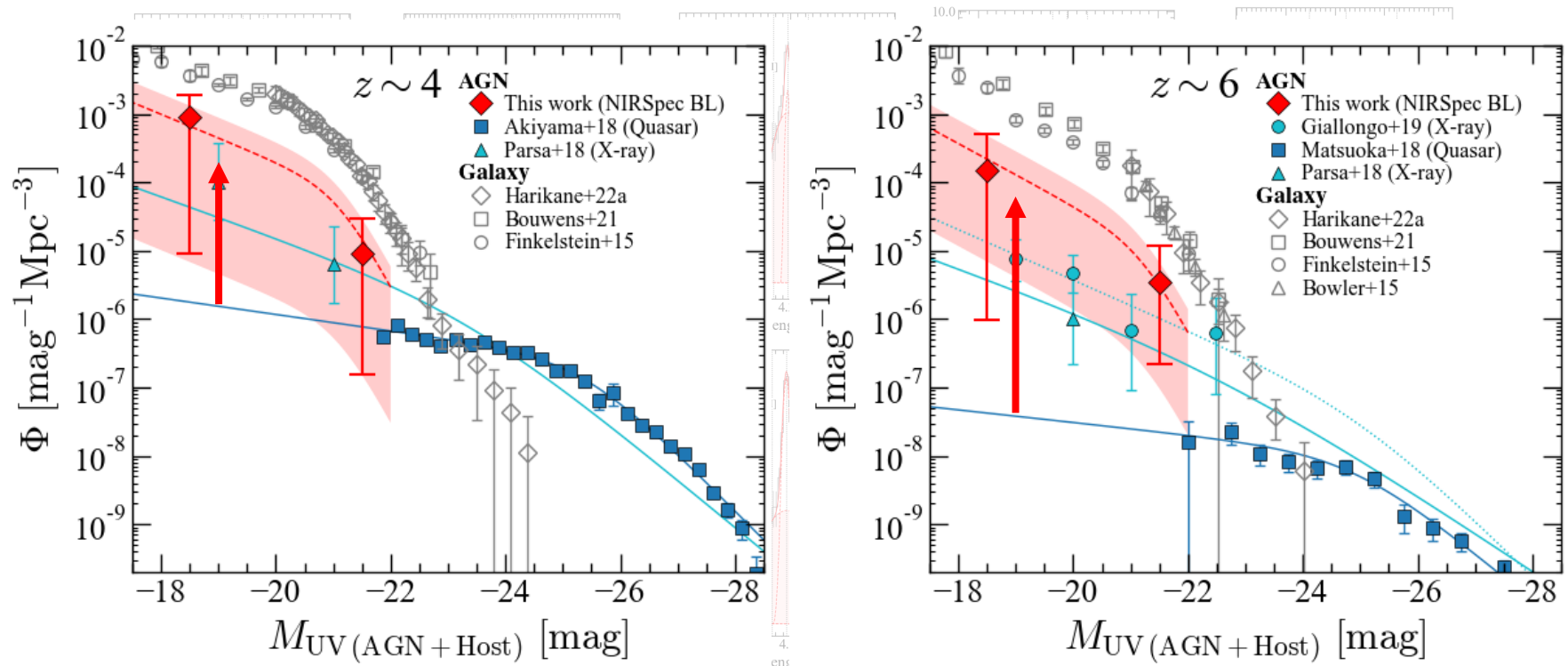


Harikane+23b

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Ha輝線 (FWHM \sim 1000-6000 km/s), 狭い[OIII] (<1000 km/s)
 - 185個の銀河で10個のAGN \rightarrow \sim 5% (\sim 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Ha輝線 (FWHM \sim 1000-6000 km/s), 狭い[OIII] (<1000 km/s)
 - 185個の銀河で10個のAGN \rightarrow \sim 5% (\sim 1-2% at $z\sim 0$)

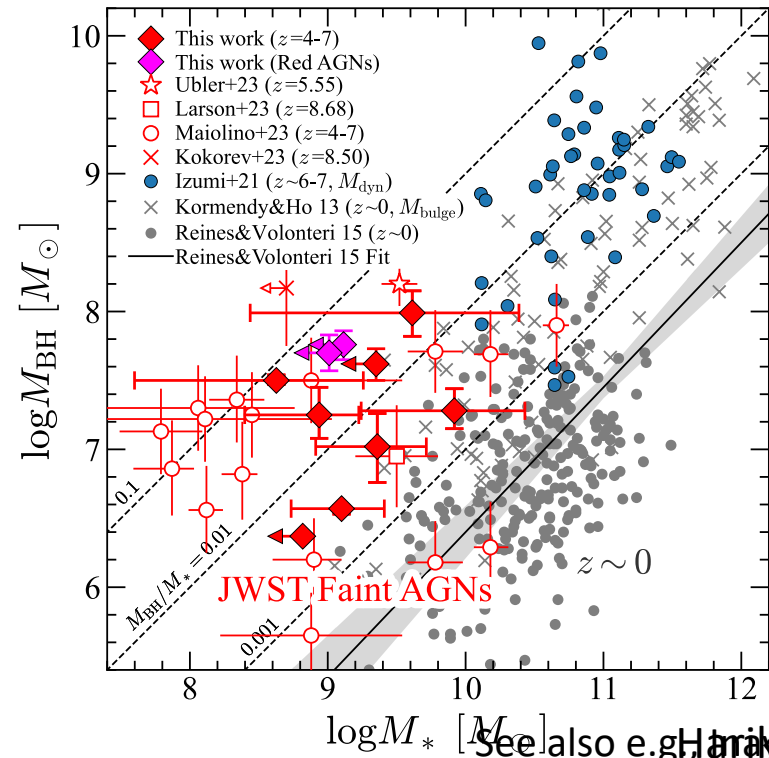
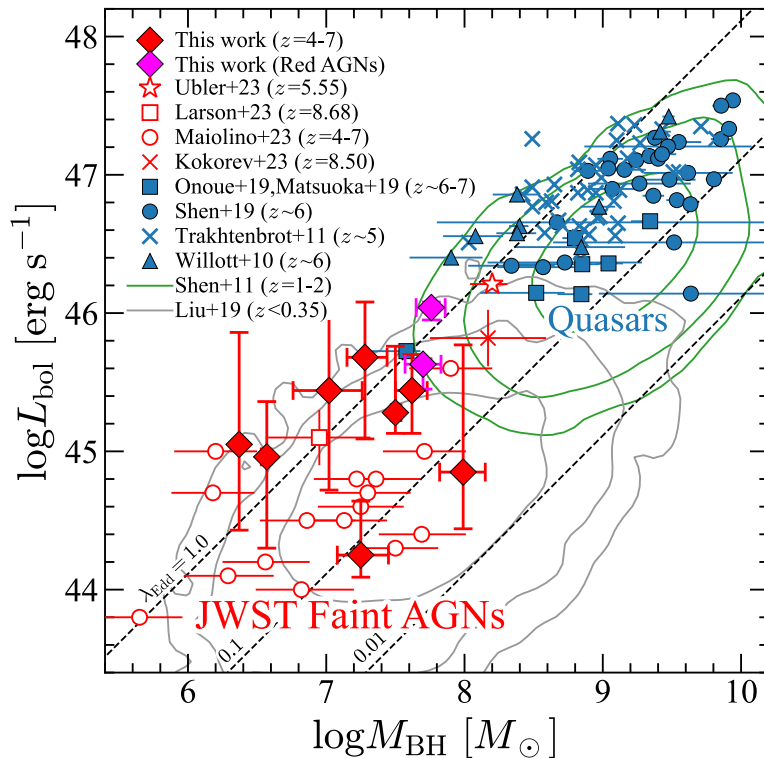


Harikane+23b

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

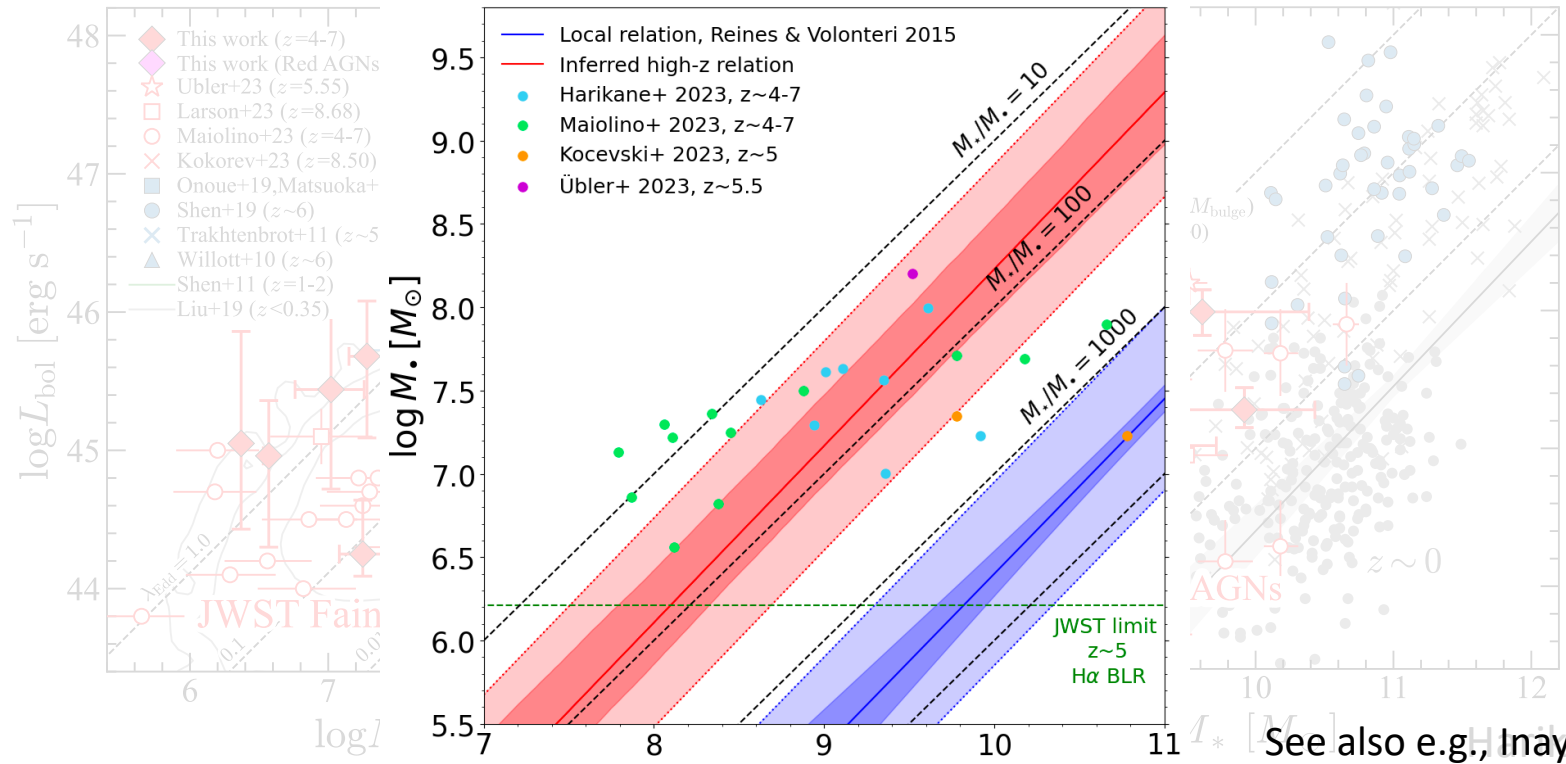
- $M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^8 M_{\text{sun}}$, クェーサーより2桁ほど小さい
 - 赤くてコンパクトな2天体はブラックホール質量大きめ
 - $z \sim 0$ の $M_* - M_{\text{BH}}$ 関係よりも M_{BH} が大きそう。 Selection bias?



see also Kocevski+23, Ubler+23, Larson+23, Maiolino+23ab, Matthee+23, Labbe+23, Harikane+23b, Kormendy+23, Reines+23, Green+23

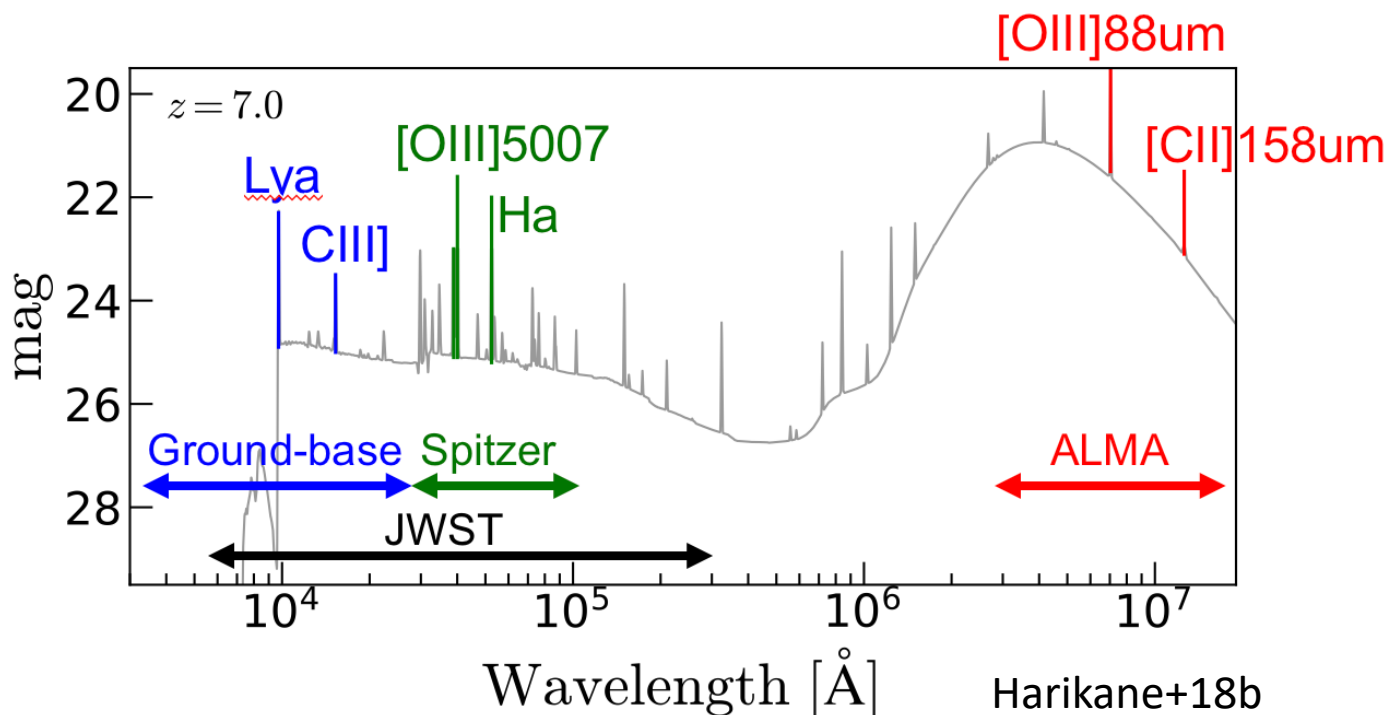
JWSTによる大量のAGNの検出

- $M_{\text{BH}} \sim 10^6 - 10^8 M_{\text{sun}}$, クェーサーより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_{BH} が大きそう。 Selection bias?



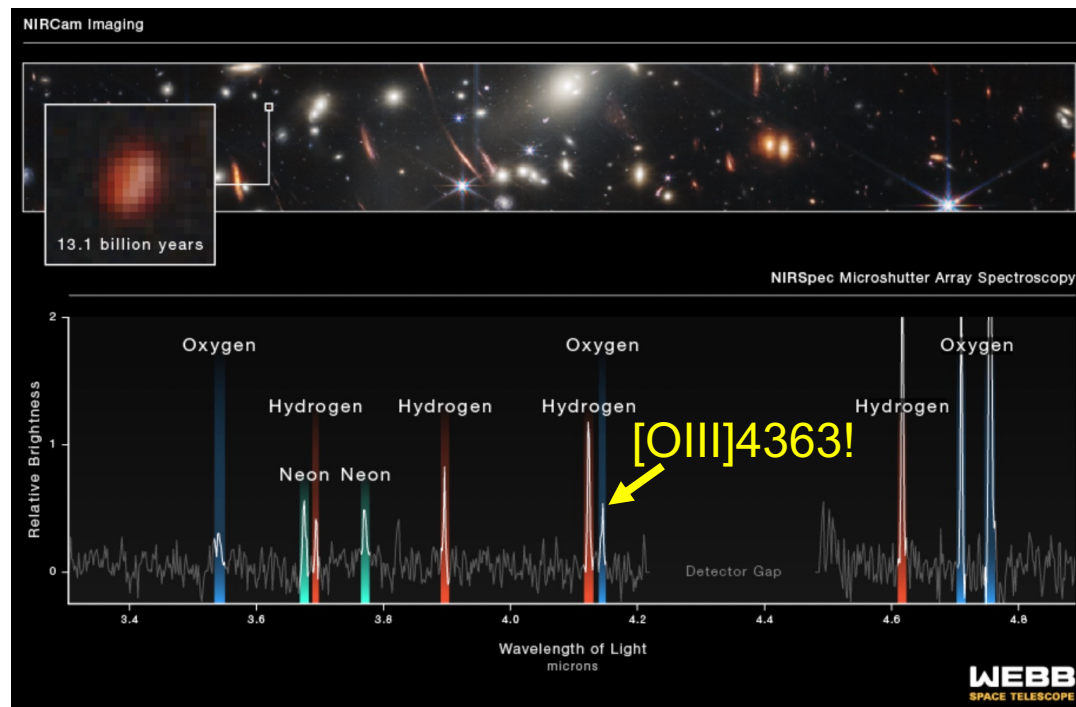
JWST分光でISMの物理状態を調べる

- 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、...



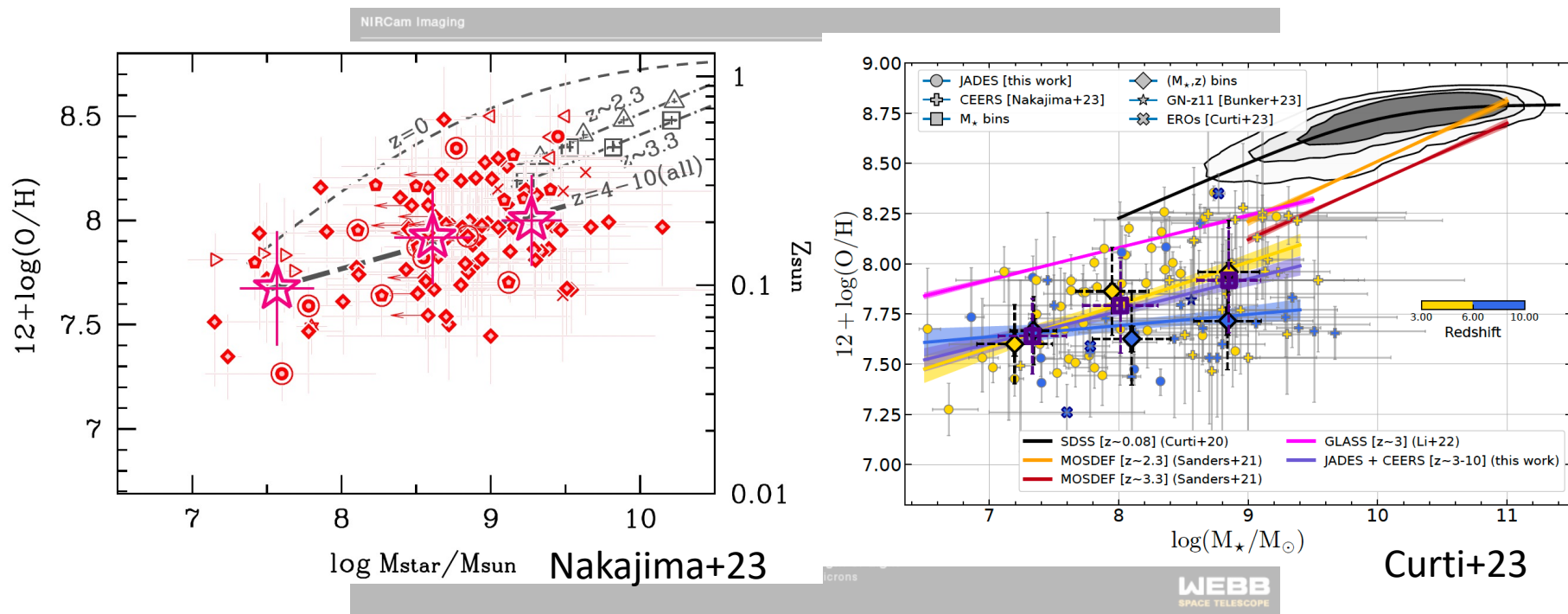
JWST/NIRSpec Mass-Metallicity Relation

- 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)



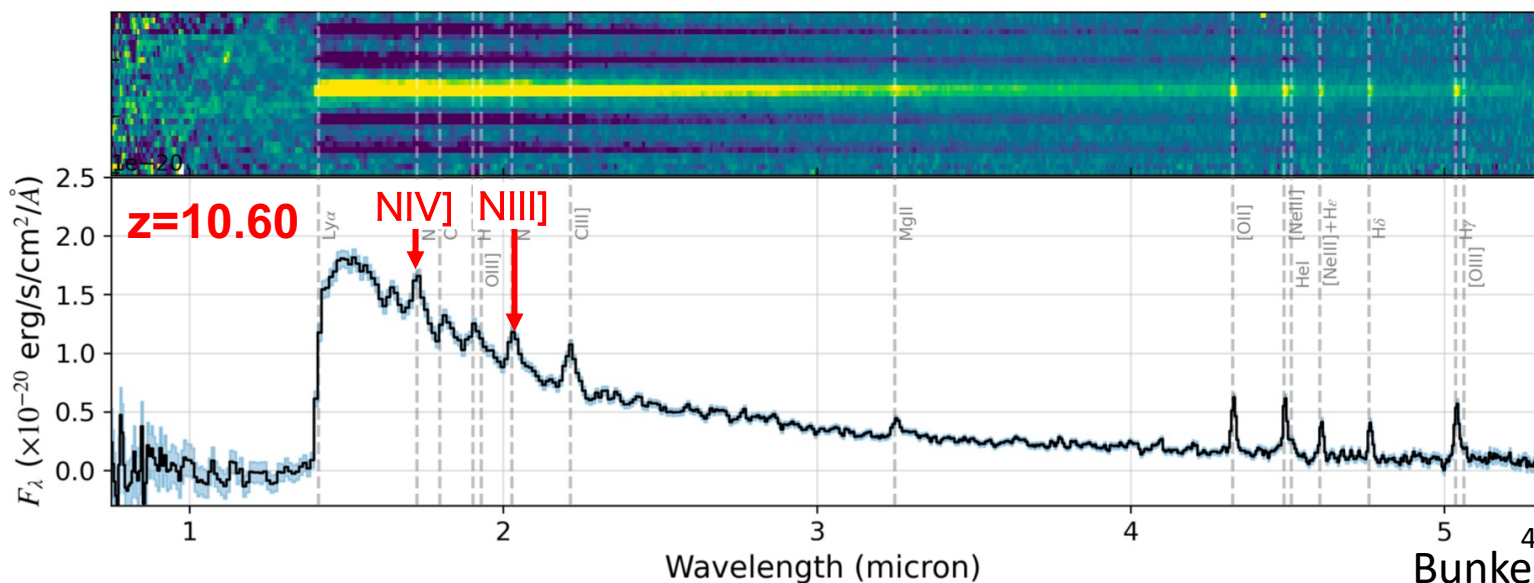
JWST/NIRSpec Mass-Metallicity Relation

- 初期データ: [OIII]4363輝線が $z=7-9$ 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)



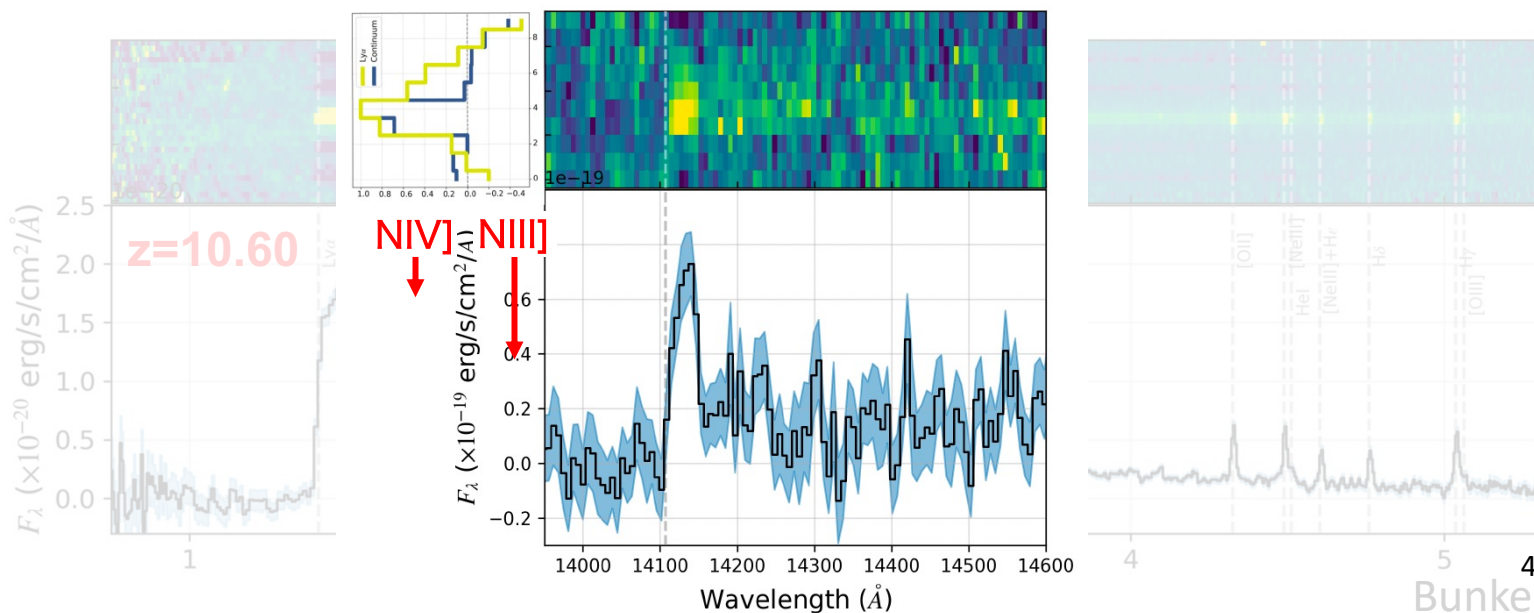
GN-z11 ($M_{UV}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 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 α 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 \rightarrow Super-solar N/O ratio?



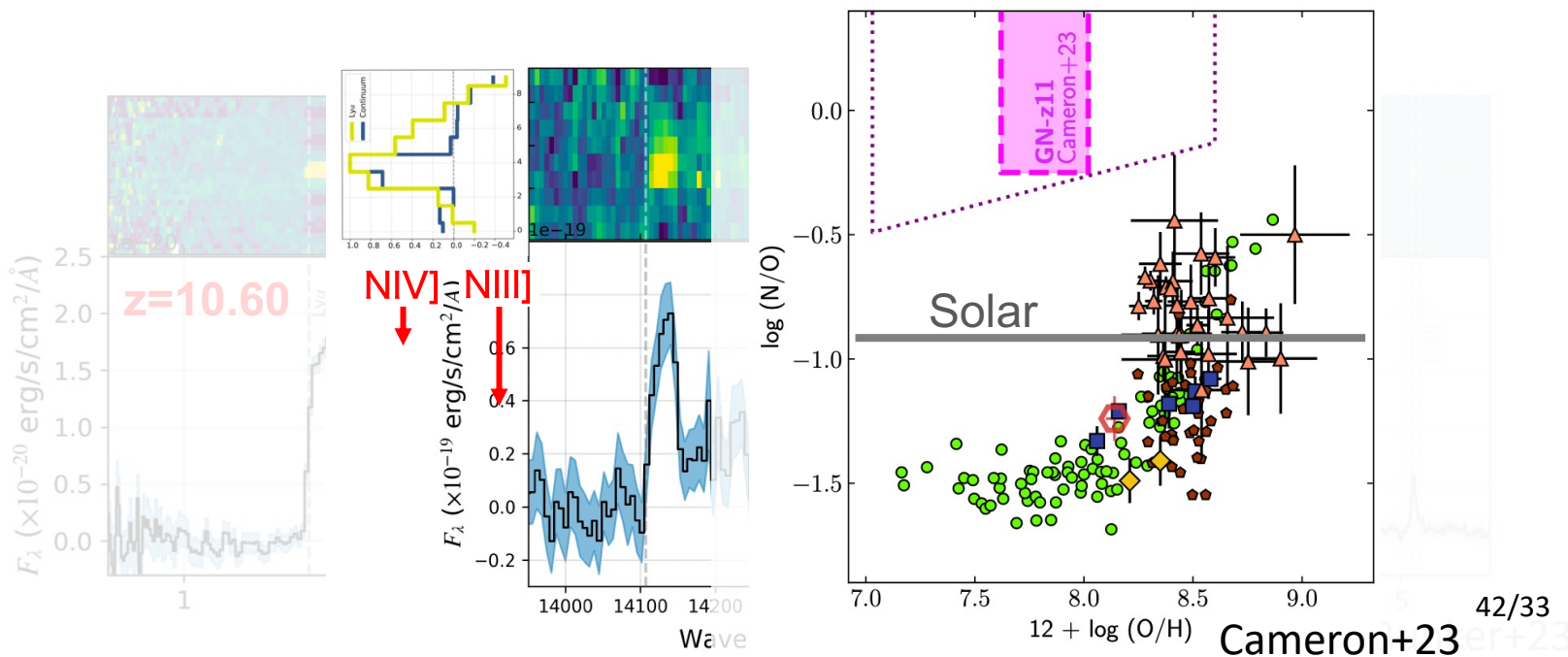
GN-z11 ($M_{UV}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 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 α 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 \rightarrow Super-solar N/O ratio?



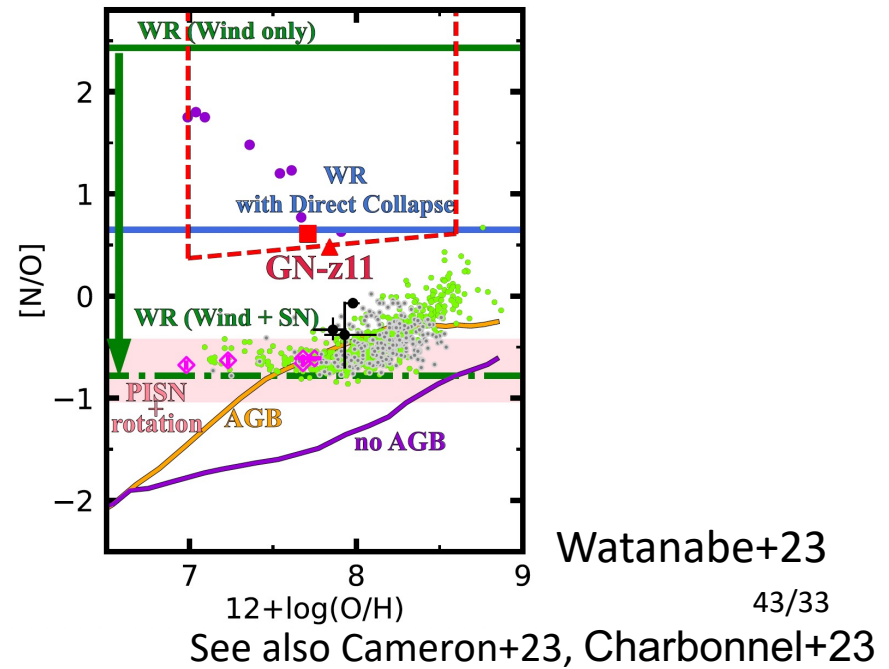
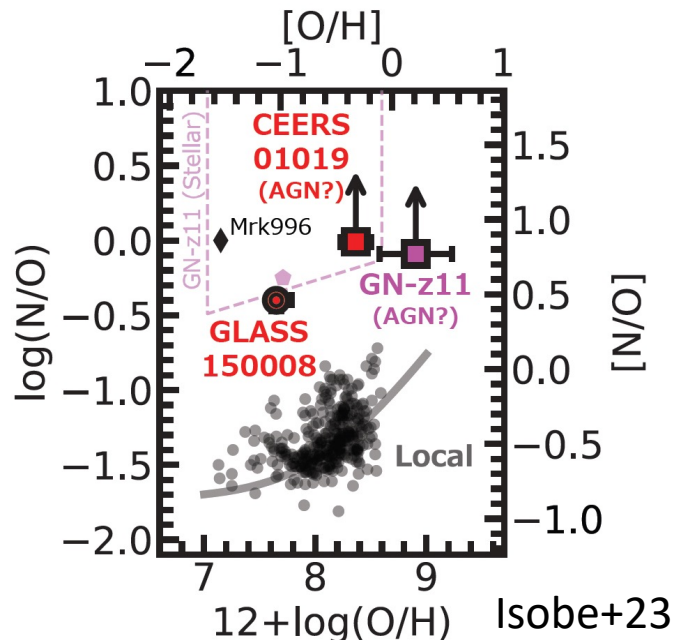
GN-z11 ($M_{UV}=-21.5$ mag) のNIRSpec分光

- 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)
 - Lya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

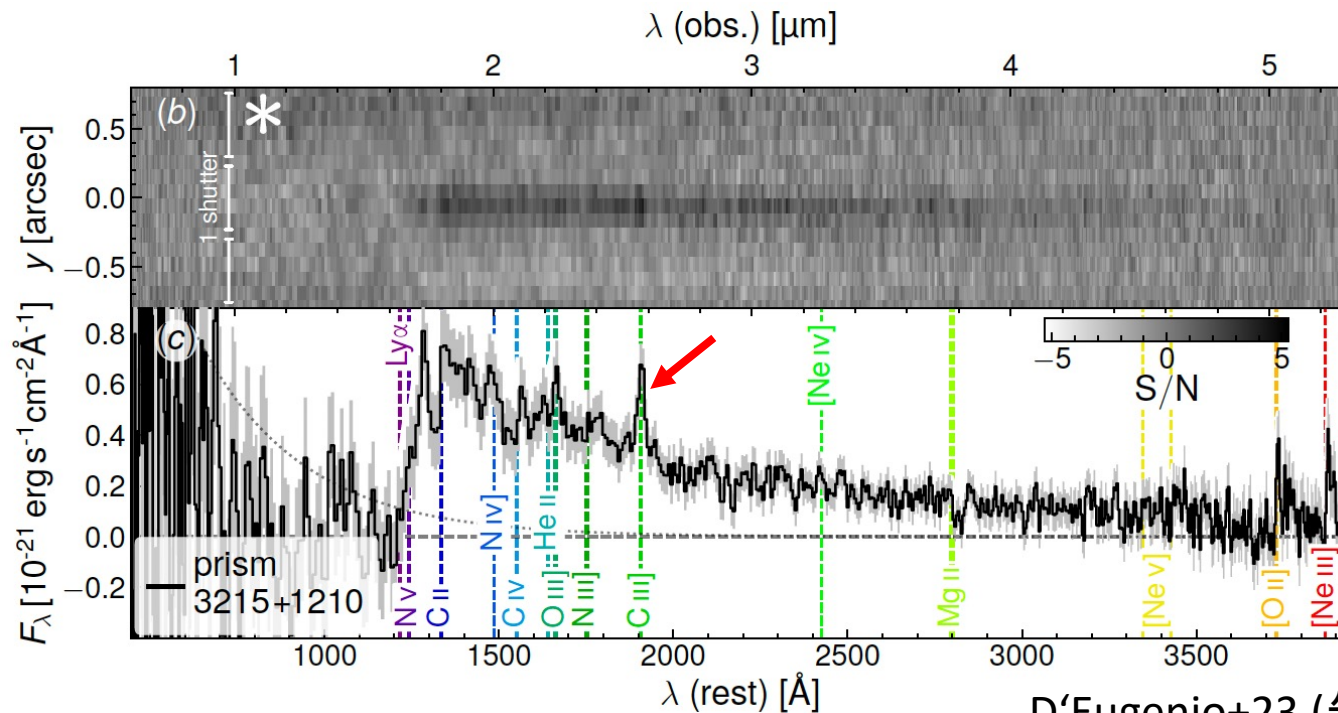
- GN-z11以外の $z > 6$ 銀河でも観測されている
- 説明が非常に難しい
 - 酸素: core-collapse SN (~ 10 Myr), 窒素: AGB星 (~ 100 Myr)
 - Wolf-Rayet星や超大質量星 ($> 1000 M_{\text{sun}}$) の星風で窒素を増やし、core-collapse SNではなくdirect collapseで潰す



Carbon-Enhanced Galaxy

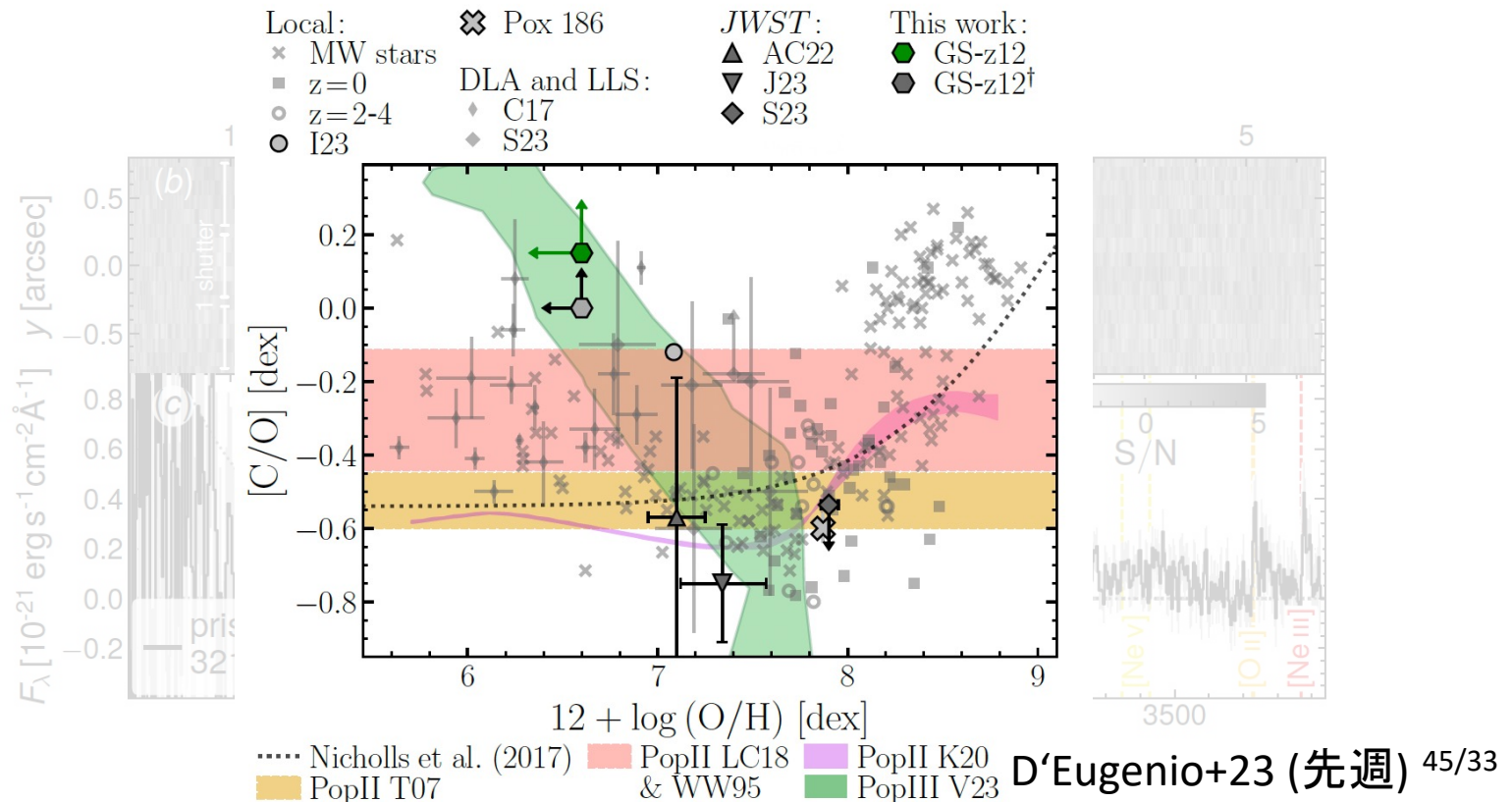
- 強いCIII]輝線 in $z=12.48$ 銀河 (3rd highest- z)
 - C/O比が太陽組成比以上
 - Pop-III ($Z_{\text{star}}=0$) によるenrichmentだと説明できる？

NIRSpec/PRISM 65時間 (Cycle1+2)



Carbon-Enhanced Galaxy

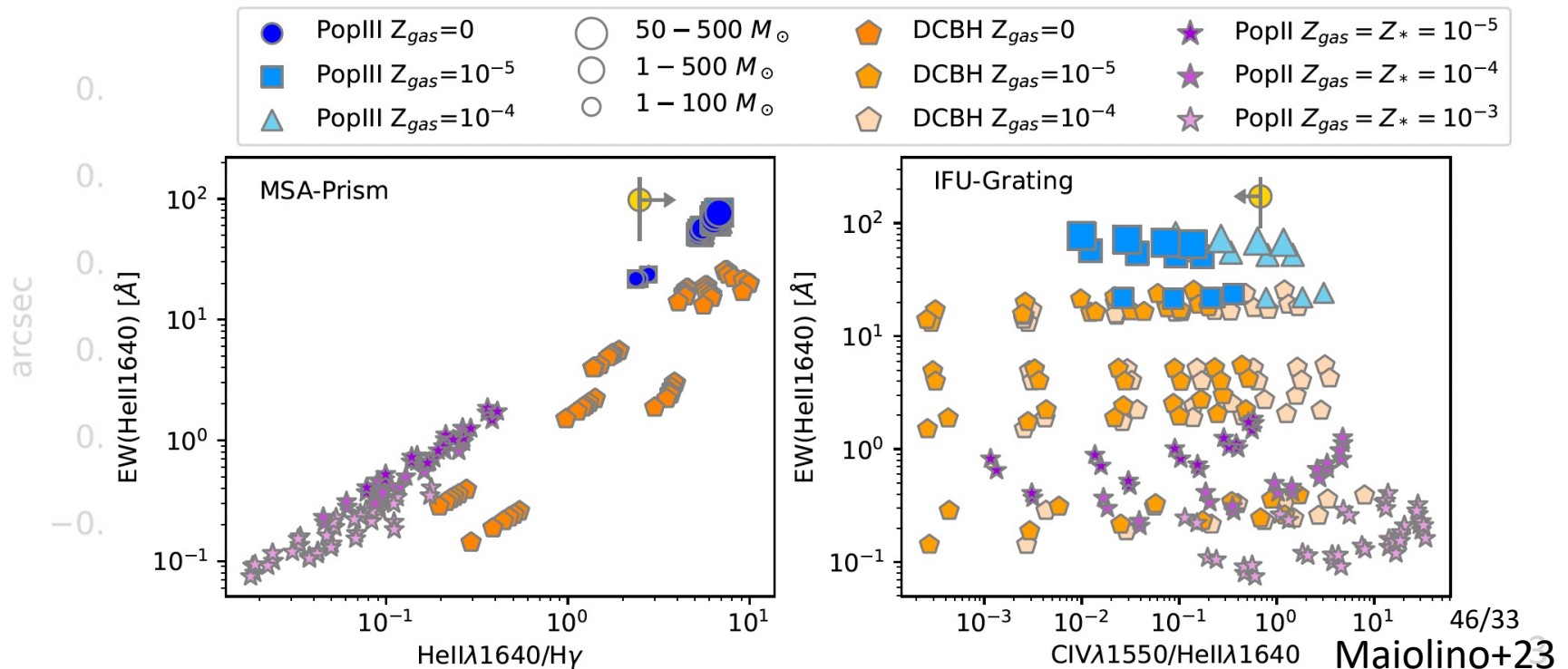
- 強いCIII]輝線 in $z=12.48$ 銀河 (3rd highest- z)
 - C/O比が太陽組成比以上
 - Pop-III ($Z_{\text{star}}=0$) によるenrichmentだと説明できる？



HeII Clump in GN-z11?

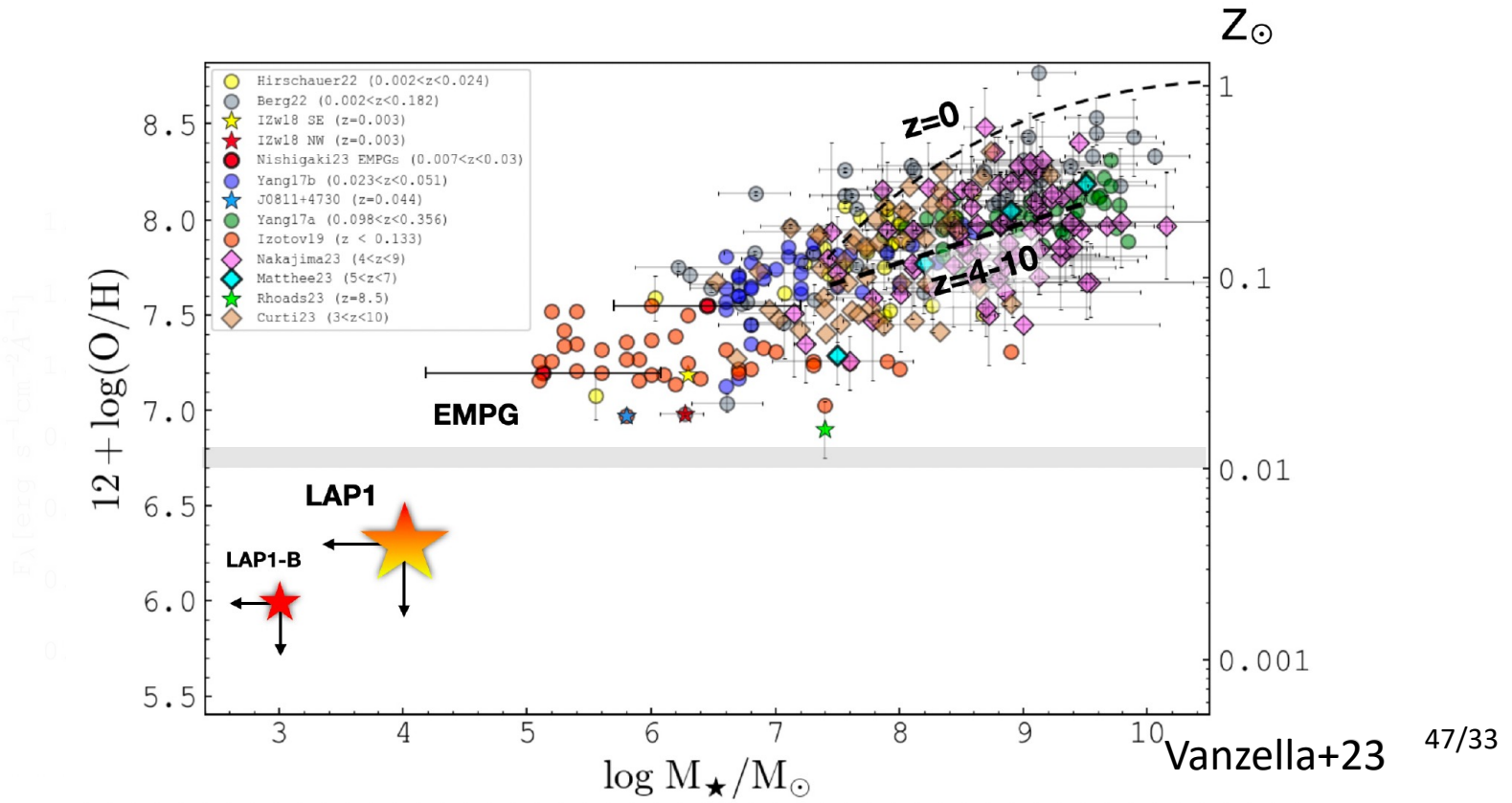
- GN-z11のNIRSpec IFU分光

- HeII1640のみで明るいclumpをGN-z11の北東で検出(6.1 σ)
- 輝線比 (HeII/H γ , HeII/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



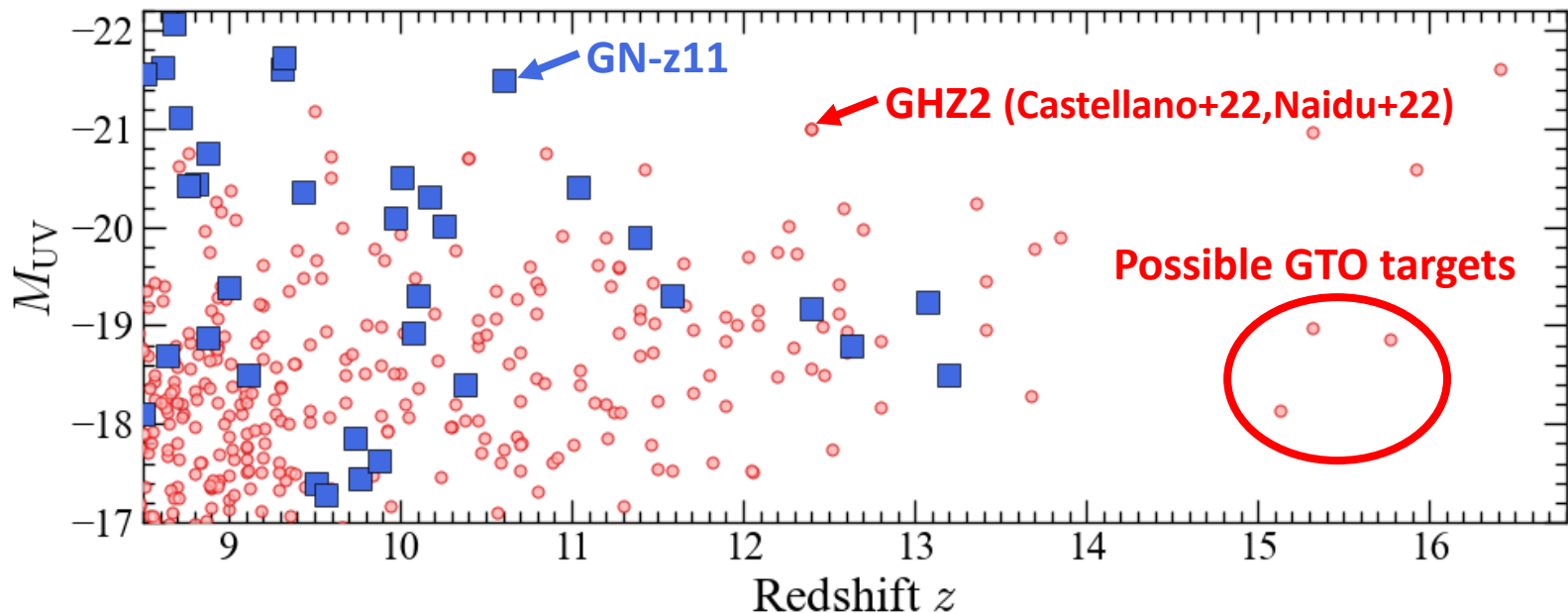
Extremely Metal Poor Population

- $z=6.6$ のLy α emitter ($EW_{Ly\alpha} > 370 \text{ \AA}$) をNIRSpec分光
 - [OIII]5007がH β 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
→ Λ 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 $z = 6.6$