

JWST/Subaruの狭帯域フィルターを用いた $z \sim 6.2$ におけるPopIII銀河の探索

東京大学理学系研究科 M1 榎森遼

共同研究者：柏川伸成(東京大学), 稲吉恒平(北京大学), 井上昭雄(早稲田大学), 伊藤慧 (DAWN), 尾上匡房 (早稲田大学), 百瀬莉恵子(カーネギー天文台), 嶋作一大(東京大学), 長峯健太郎(大阪大学), Yongming Liang(東京大学), 嶋川里澄(早稲田大学), 武田佳大, 有田淳也(東京大学), 利川潤(東北大学), 久保真理子(関西学院大学), 内山久和(法政大学), 西村優里(筑波大学), 菊田智史, 清水駿太, 是友健太郎(東京大学)

はじめに

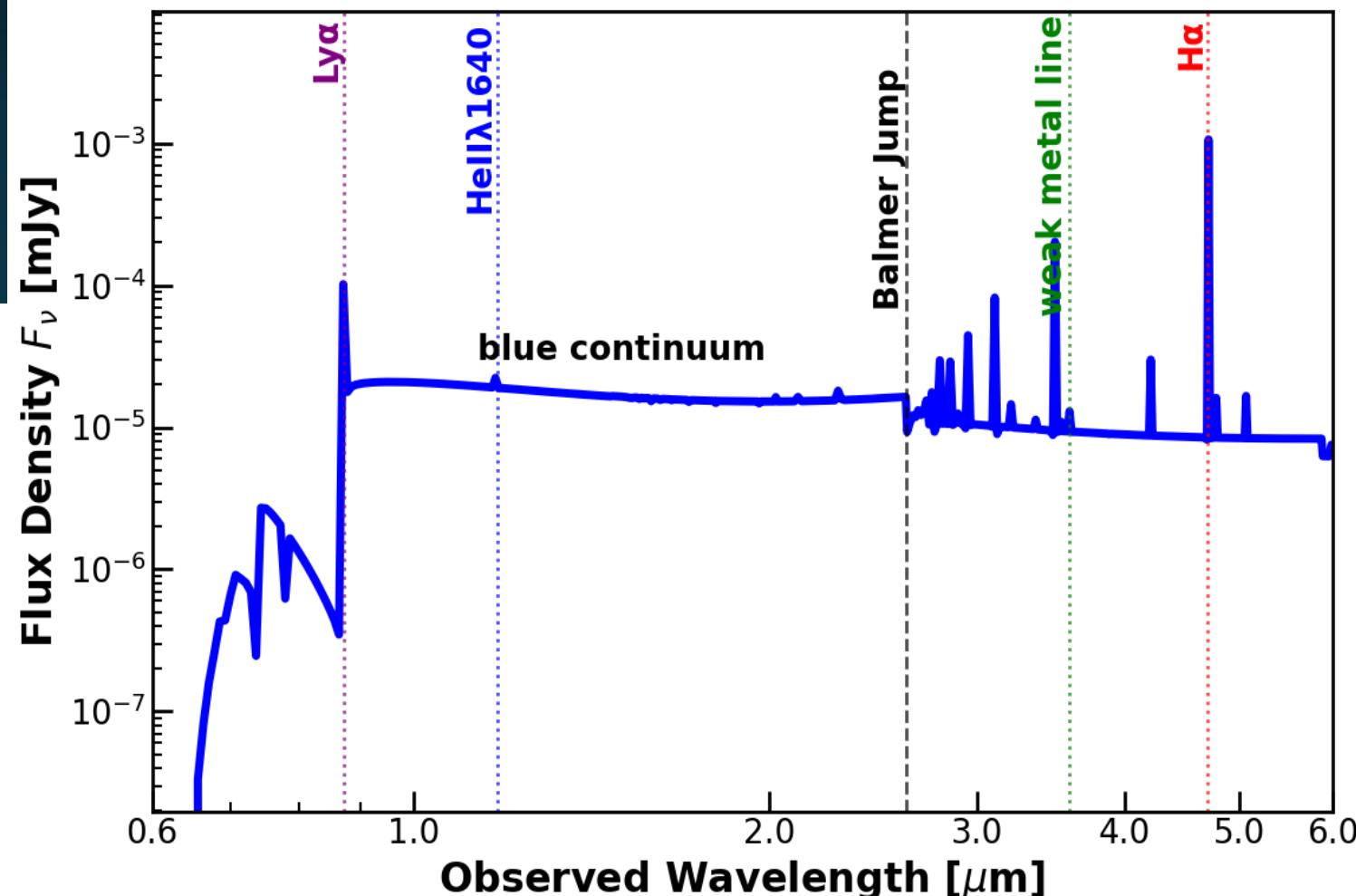
- **Pop III 星**：金属量ゼロのガスから作られた初代星
 - 高温で、非常に強い放射($>54.4\text{eV}$)
 - 寿命が短い(~1Myr)
 - $z \sim 20\text{--}30$ 頃から存在 (Bromm 2013, Klessen & Glover 2023)
 - 宇宙再電離期 ($z \sim 6\text{--}10$)まで形成(Venditti+23, Tornatore+07)

→これらの発見：天文学における**最も重要な目標**の一つ

- 初期宇宙における銀河の星形成進化
- 宇宙初期のmetal enrichment
- 宇宙再電離への寄与

Introduction

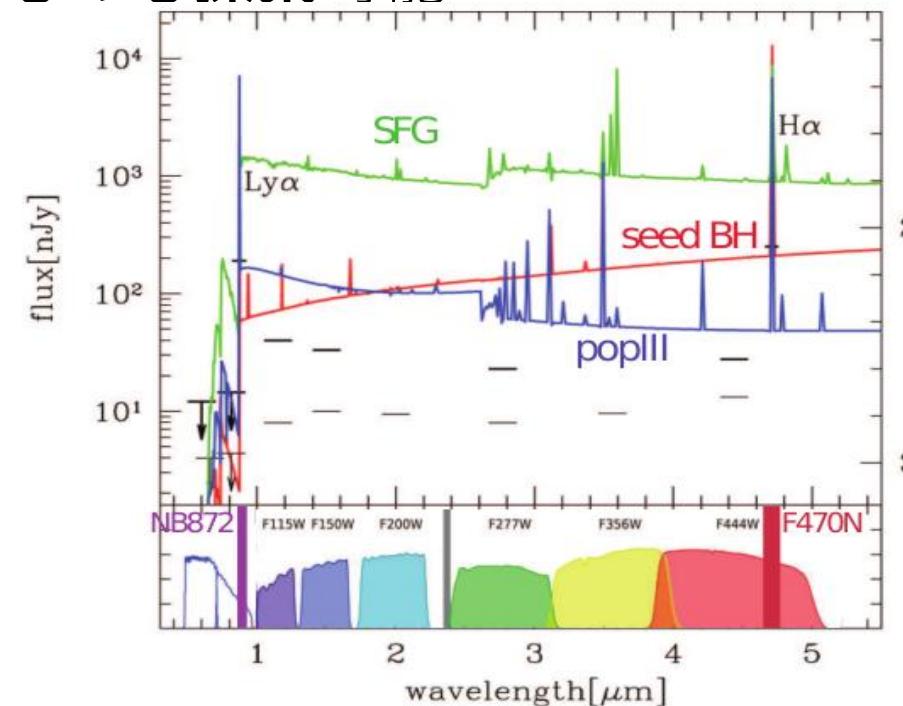
- PopIIIのスペクトルの特徴
(Schaerer 03)



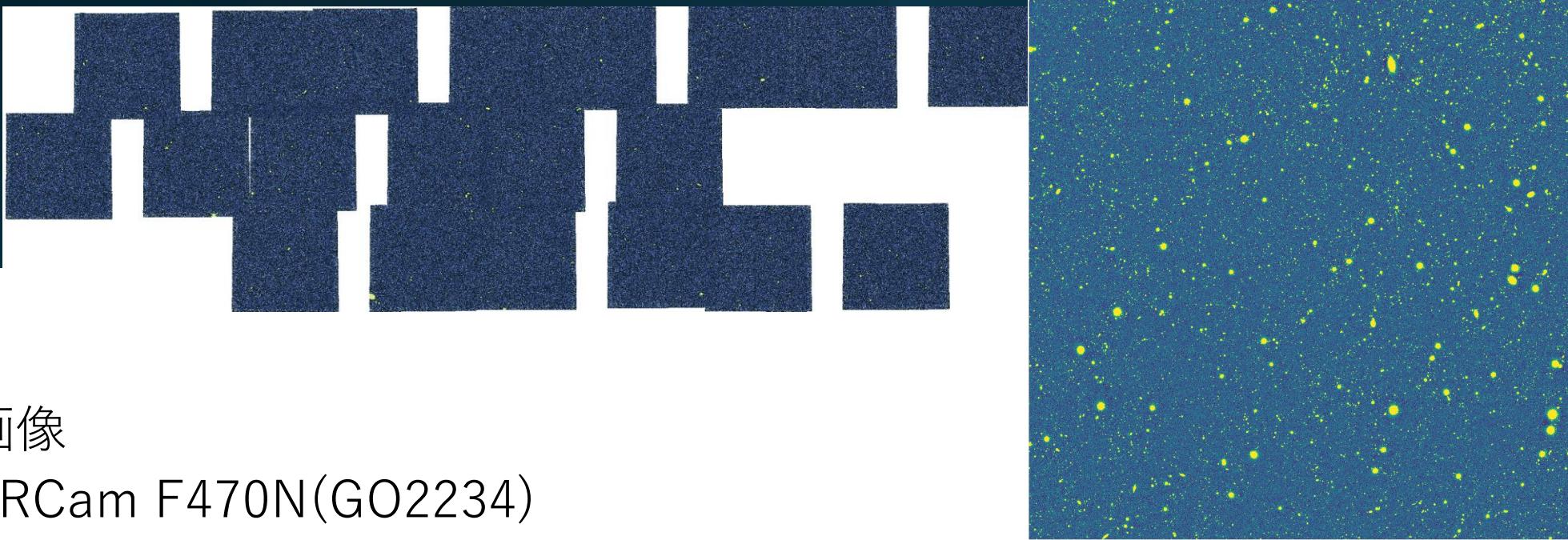
- JWSTの登場により、PopIII 候補となる天体はいくつか見つかっている(e.g. Vanzella+23, Morishita+25, Cai+25)が、依然として候補数は少なく、より多くの、信頼できる候補天体を探す必要がある
- 連続光検出天体からの候補探査が主流(e.g. Fujimoto+25)

Method

- 2つの狭帯域フィルター
 - NB872: Subaru HSC : $z \sim 6.2$ の Ly α
 - F470N: JWST NIRCam : $z \sim 6.2$ の H α
- = 輝線の特徴を反映かつ連続光が検出されないものも探索可能
(より効率的で系統的なPopIII探索)
- JWSTの広帯域フィルターとのcolor excessにより、H α emitter(HAE), Ly α emitter(LAE)をそれぞれ選定
- Dual Line Emitter(DLE)を選びだし、PopIII候補の可能性を探る



Data



○CEERS画像

- JWST/NIRCam F470N(GO2234)
- JWST & HST broadband : $0.6 \mu\text{m}$ - $4.4 \mu\text{m}$ (100 sq arcmin)
- Subaru/HSC **NB872**(S23B-022, S24B-021, S25A-065) (1.8 sq deg)

○JWST/HSC PipelineでのNB画像の**reduction**

- JWST Pipeline 1.18.1(F470N) & HSC Pipeline 8.5.3(NB872)
- Pixel scale=(0.03", 0.168"), 位置合わせ

○BB画像のF470Nへの**PSFマッチング** (Pypher)

- F470NのPSF : FWHM=0.164"

HAE-cand. selection

- **SExtractor** : F470Nで検出&測光, BBでdouble image modeで測光(0.3", 0.6")

○F444W-F470N vs F470N

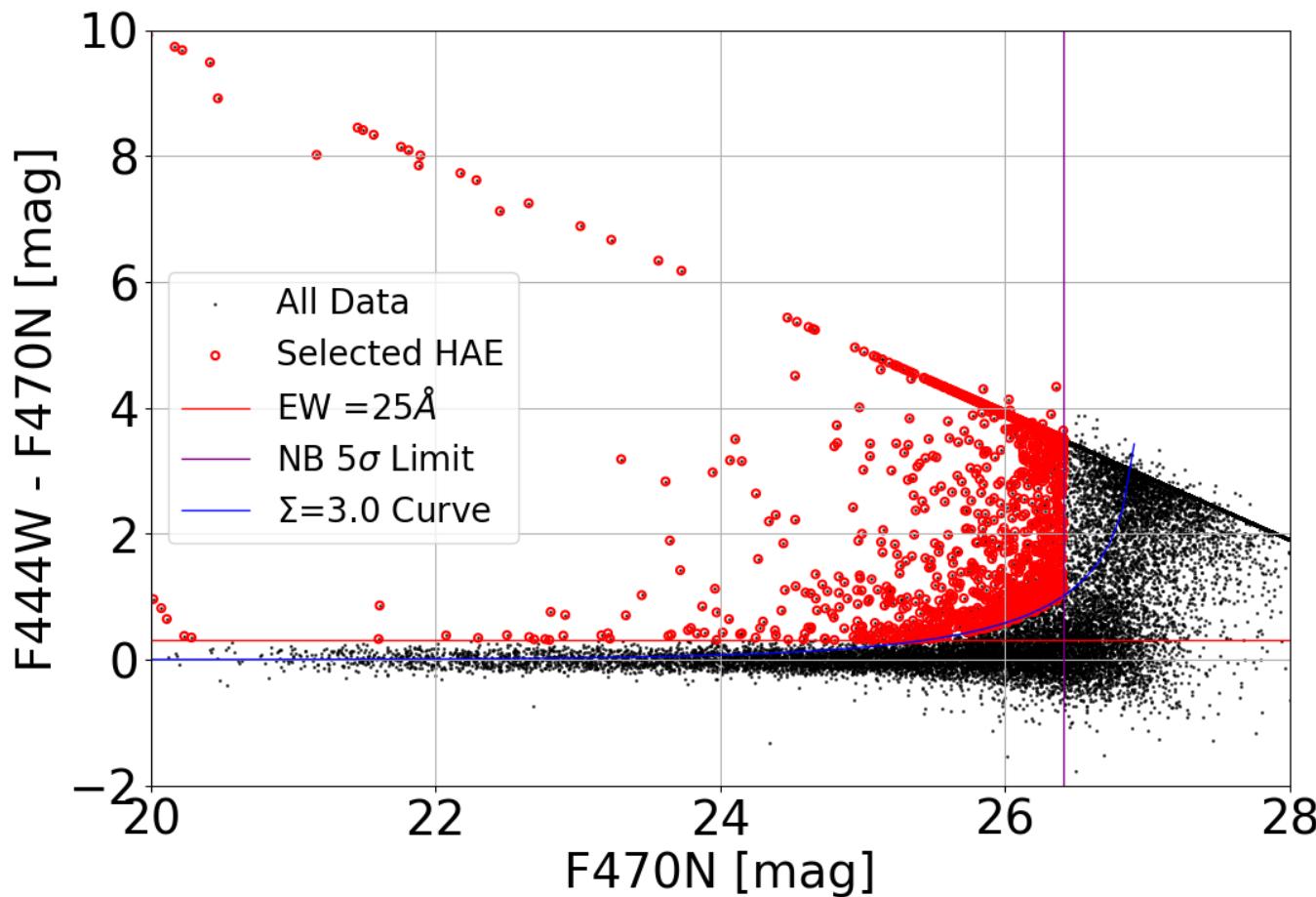
- $\text{EW}(\text{H}\alpha) > 25 \text{\AA}$ (color > 0.31)
- Σ cut(:SN ratio of NB excess)_(Pirie+25)

$$\Sigma = \frac{1 - 10^{-0.4(BB-NB)}}{10^{-0.4(ZP-NB)} \sqrt{\sigma_{NB}^2 + \sigma_{BB}^2}} > 3$$

(BB : F444Wmag、NB : F470Nmag、

ZP : zero point of F470N image、 σ : noise)

- $F470N < 26.41$ (5σ)



LAE-cand. selection

- **SExtractor** : NB872で検出&測光(1.8"), 同じ座標のF115Wをphotutilsで測光(0.6")

○ F115W-NB872 vs NB872

- EW(Ly α)>25 Å (color >0.71)
- Σ cut(:SN ratio of NB excess)_(Pirie+25)

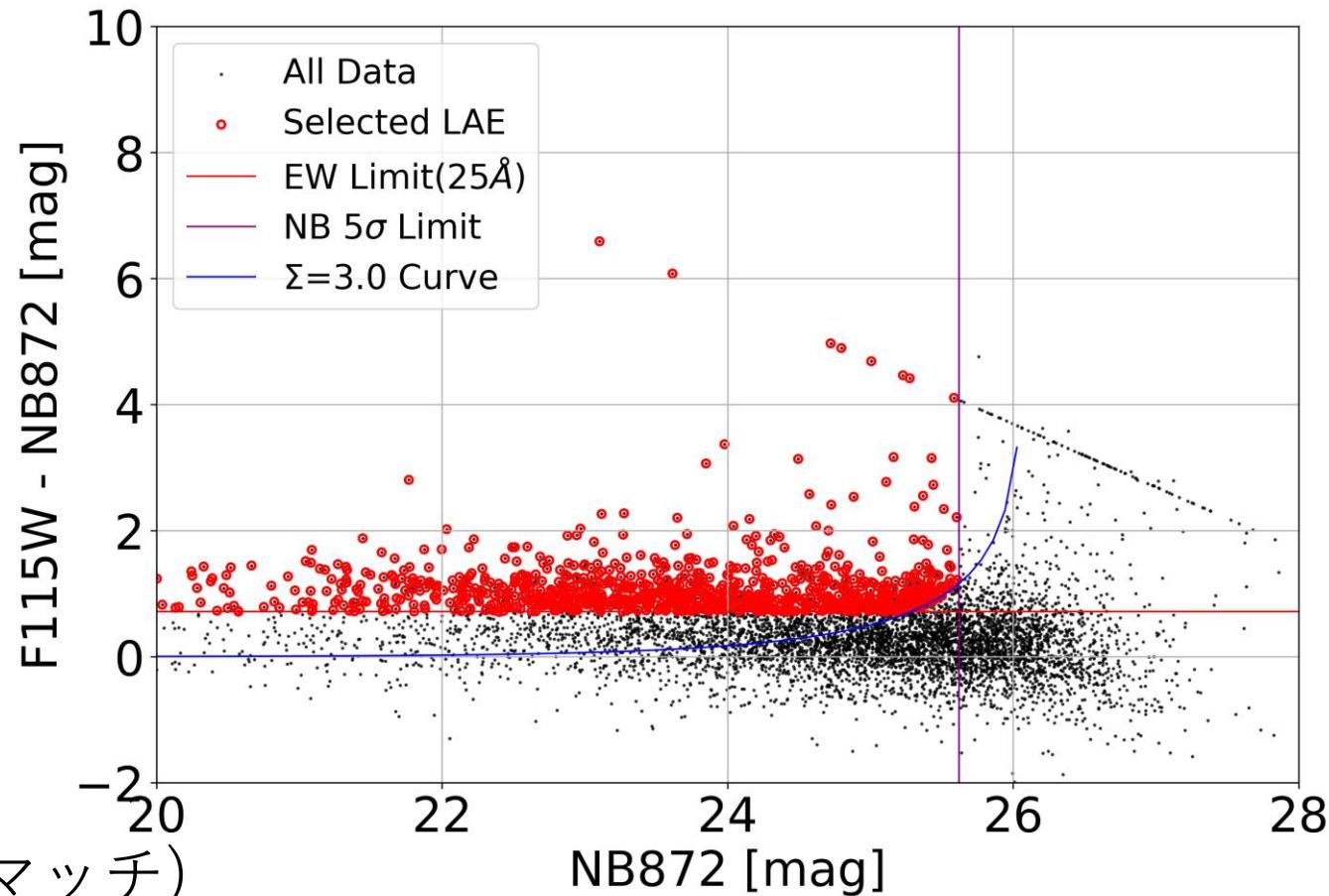
$$\Sigma = \frac{1 - 10^{-0.4(BB - NB)}}{10^{-0.4(ZP - NB)} \sqrt{\sigma_{NB}^2 + \sigma_{BB}^2}} > 3$$

(BB : F115Wmag、NB : NB872mag)

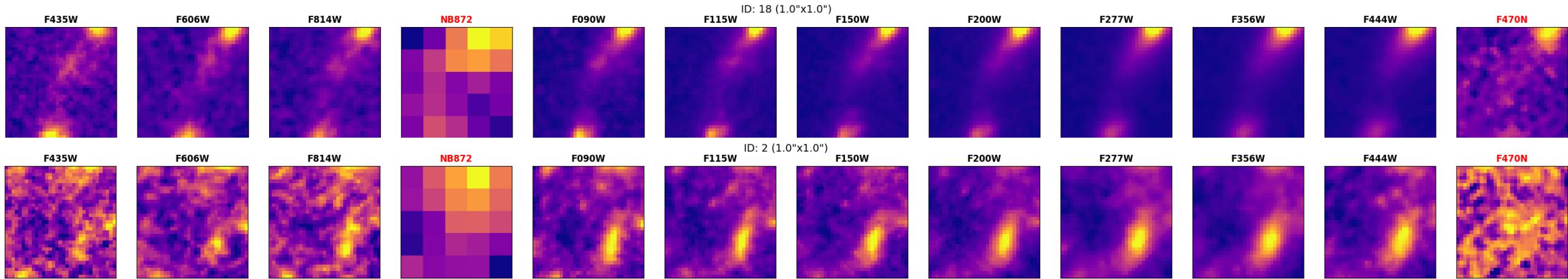
ZP : zero point of NB872 image、 σ : noise)

- NB872<25.62 (5 σ)

→56 HAE & LAE(=DLE) (0.5"マッチ)



PopIII-cand. selection (Visual inspection)

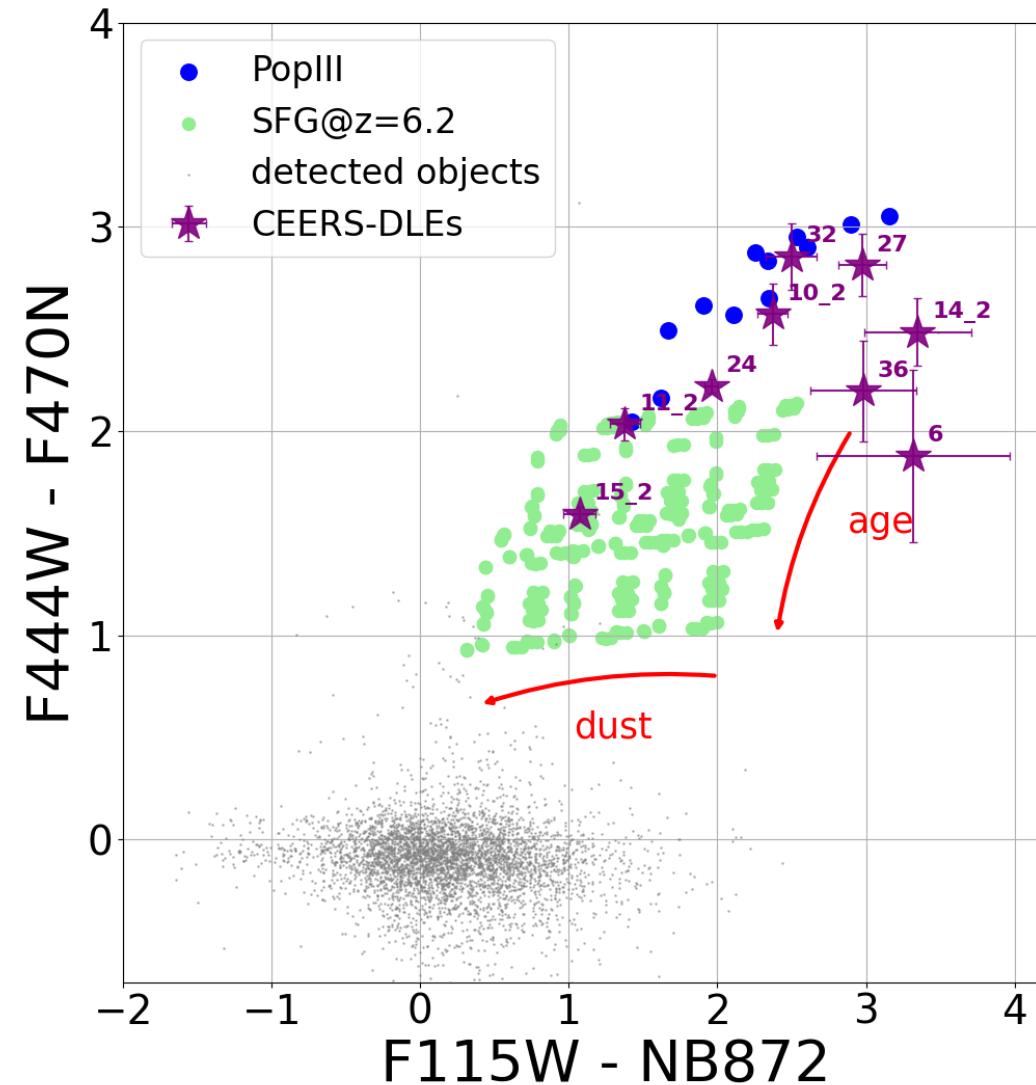


- DLEとした56天体のうち、low-zコンタミやゴミを除く
- 原因の多く：
 - 検出のoffset
 - NB872とF115Wのaperture sizeの違い(広がった天体)
 - F470NのSNが悪い部分
 - F470Nで近傍で広がった天体の一部を誤検出

→9/56 天体を最終的にDLEとした

PopIII-cand. selection (2色図)

- F444W – F470N : $\text{H}\alpha$ のexcess
- F115W – NB872 : $\text{Ly}\alpha$ のexcess
- SFGモデルの範囲内:2天体
 $F115W-\text{NB872} < 2.55$ かつ $F444W-\text{F470N} < 2.15$
- 7天体 : PopIIIモデルと整合的



PopIII cand. Selection(SED fitting CIGALE_(Boquien+19))

○BC03モデル(Bruzual & Charlot 03)

- $Z=0.0001, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02$
- ベイズ推定した物理量:age, mass, E(B-V), β , Z, SFR
- **Selection条件 :**
 $E(B-V) < 0.1 \text{ & } \beta < -2.2 \text{ & } \text{stellar age} < 10^2 \text{Myr}$

○Inoue11モデル(Inoue11)(SFH+SSP+nebular)

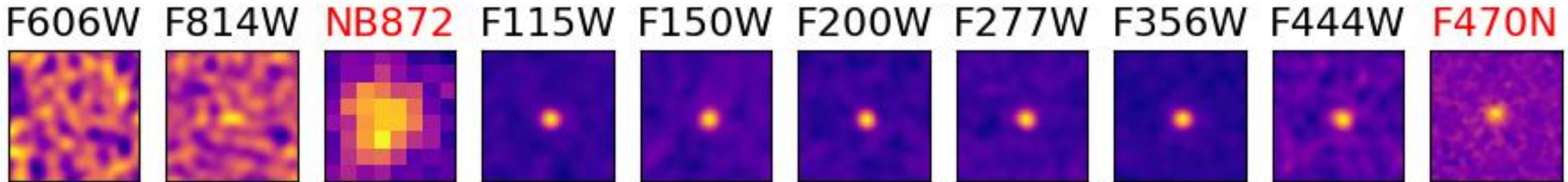
- $Z=0.0, 10^{-7}, 10^{-5}, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02 \rightarrow$ 低金属量をカバー
- ベイズ推定した物理量:age, E(B-V), β , Z
- **selection条件 :**
- $E(B-V) < 0.1 \text{ & } \beta < -2.2 \text{ & } \text{bayes.Z} < 10^{-3} \text{ & } \text{best.Z} < 10^{-5}$

PopIII-cand. selection

	6	24	27	32	36	10_2	12_2	14_2	15_2
2-color diagram	○	○	○	○	○	○	×	○	×
SED(BC03)	○	△	△	○	△	○	△	○	△
SED(Inoue11)	△	△	○	△	△	△	△	△	△

- visual inspection, 2色図、2種類のSED fitting全てで○△×の3段階評価
- SED fittingでは、全ての条件を満たすと○、全ての条件を満たさないと×
- 全て○の天体は存在しなかったが、2つ○の天体は5天体
- そのうち、**PopIIIモデルとベストフィット**だった天体は**1天体**
 (=CEERS-DLE-1) → **PopIII候補**として選定

CEERS-DLE-1

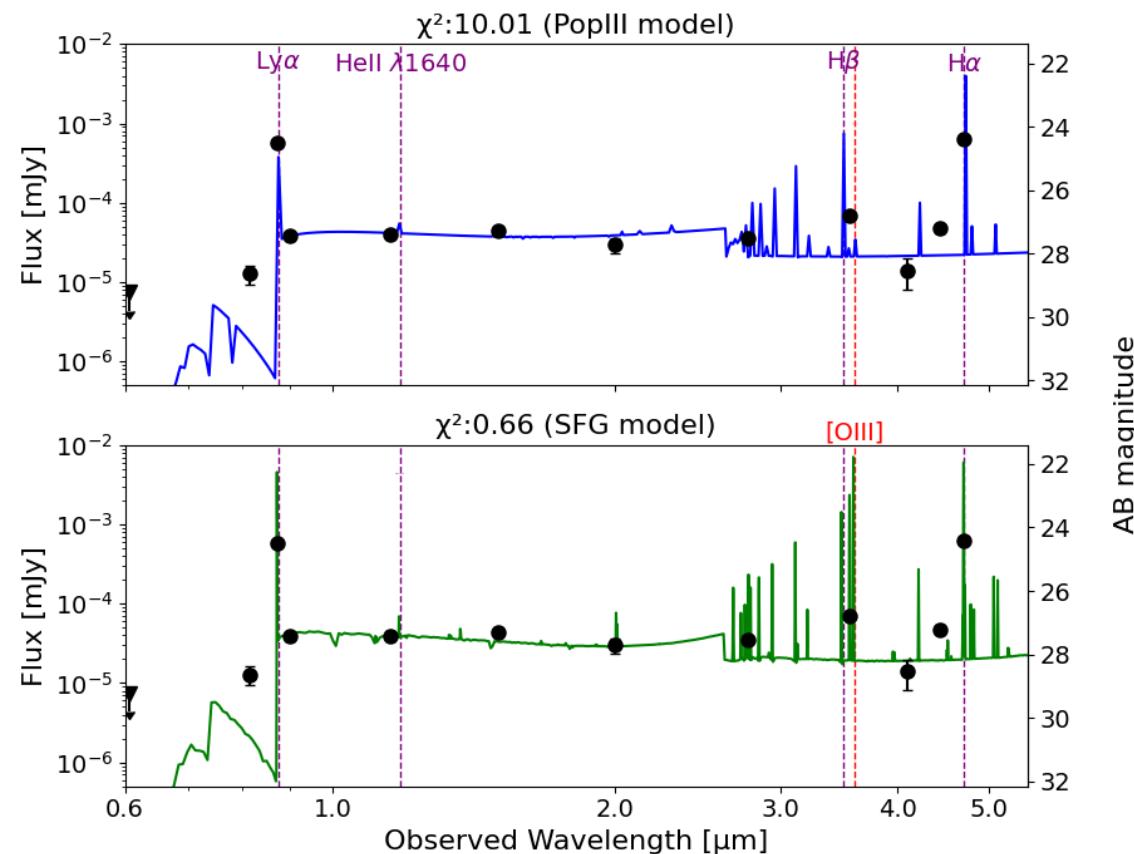


- BC03 モデル

- stellar age = $(1.32 \pm 1.95) \times 10^2$ Myr,
- stellar mass = $(2.19 \pm 1.96) \times 10^8 M_\star$,
- $E(B-V) = 0.046 \pm 0.010$, $\beta = -2.58 \pm 0.09$,
- $Z = 0.0043 \pm 0.0073$,
- $SFR_{UV} = (29.50 \pm 19.11) M_\star/\text{yr}$

- PopIII モデル

- age = 10.90 ± 18.94 , $E(B-V) = 0.0029 \pm 0.0074$,
 - $\beta = -2.30 \pm 0.14$, $Z = (1.4 \pm 7.5) \times 10^{-4}$
 - $EW_0(\text{Ly } \alpha) = 371^{+60}_{-53} \text{ \AA}$, $EW_0(\text{H } \alpha) = 1992^{+325}_{-262} \text{ \AA}$
- PopIII に整合的



他の候補天体との比較

	CEERS DLE-1	LAP1-B	LAP-2	AMORE6	CR3	GLIMPSE 16043	RXJ2128	J1236 +6215	GN-z11*
rest EW (Ly α)(Å)	371	>250	-	-	822	-	<10	19.2	18
rest EW (H α)(Å)	1992	>1800	650		2814	2810		166.5	-
β	-2.58	-	-	-2.77	-2.34	-2.34	-2.53	-2.18	-2.3
E(B-V)	0.046	~0	~0	~0	0.015	~0	0.039	0.04	<0.1
stellar age(Myr)	1.3×10^2	<10	<10	<10	2.0	<5.0	2.2×10^2	5.0×10^2	-
stellar mass(M_{\odot})	2.19×10^8	$<2.7 \times 10^3$	$<3 \times 10^4$	5.6×10^5	6.1×10^5	$\sim 10^5$	5.6×10^7	7.8×10^8	5.37×10^8
Z(Z_{\odot})	0.007	0.0042	<0.006	<0.0012	<0.008	<0.005	0.08	0.15	0.2

- PopIII候補5天体(Vanzella+23, Nakajima+25, Morishita+25, Cai+25, Fujimoto+25)
- Hell検出天体3天体(Wang+24, Mondal+25, Maiolino+24)

Summary & Outlook

- JWST NIRCamとSubaru HSCの**2つの狭帯域フィルター**で同時に Ly α と H α のexcessを見ることで、**PopIIIの効率的かつ系統的探索を行った**
- **DLE**として**9**天体選定し、その中から1天体をPopIII候補天体として選定
- **PopIIIのモデルグリッド不足**：Yggdrasilモデル(Zackrisson+11)でのSED fitting
- **他領域**：JELS(in PRIMER-COSMOS)での同様のselection
- **Discussion**：DLE、特にCEERS-DLE-1の周囲の天体の議論
- **フォローアップ**：JWST NIRSpecの分光観測