

# 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( $\sim 1\text{Myr}$ )
  - $z \sim 20\text{--}30$ 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)

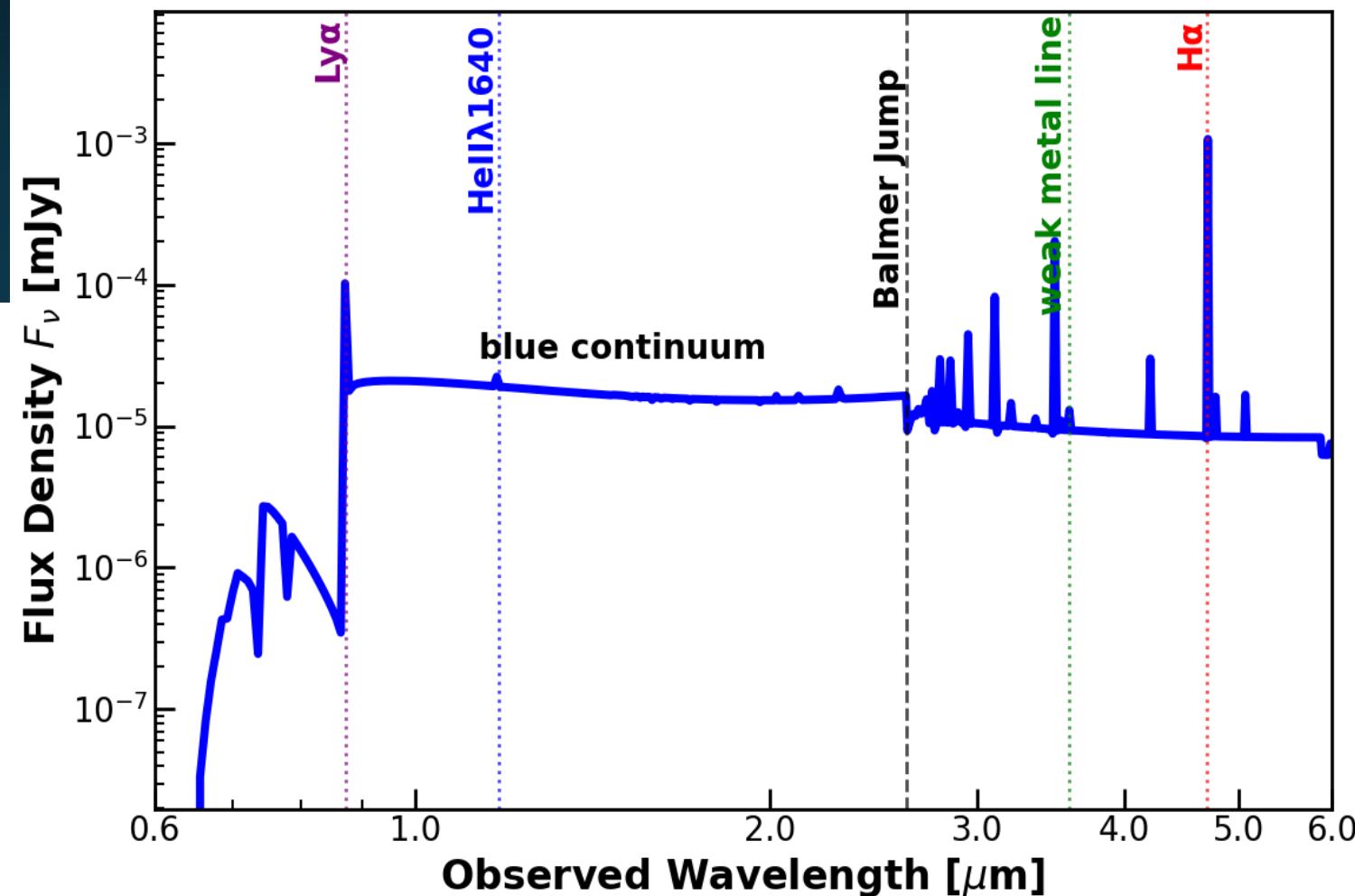
→これらの発見：天文学における**最も重要な目標**の一つ

- 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

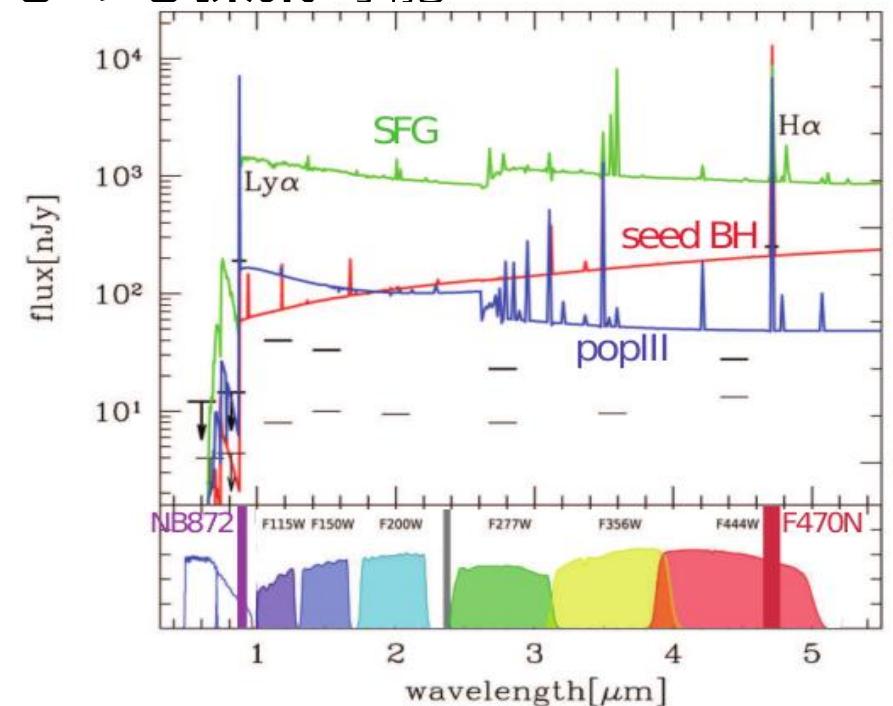
(Schaerer 03)



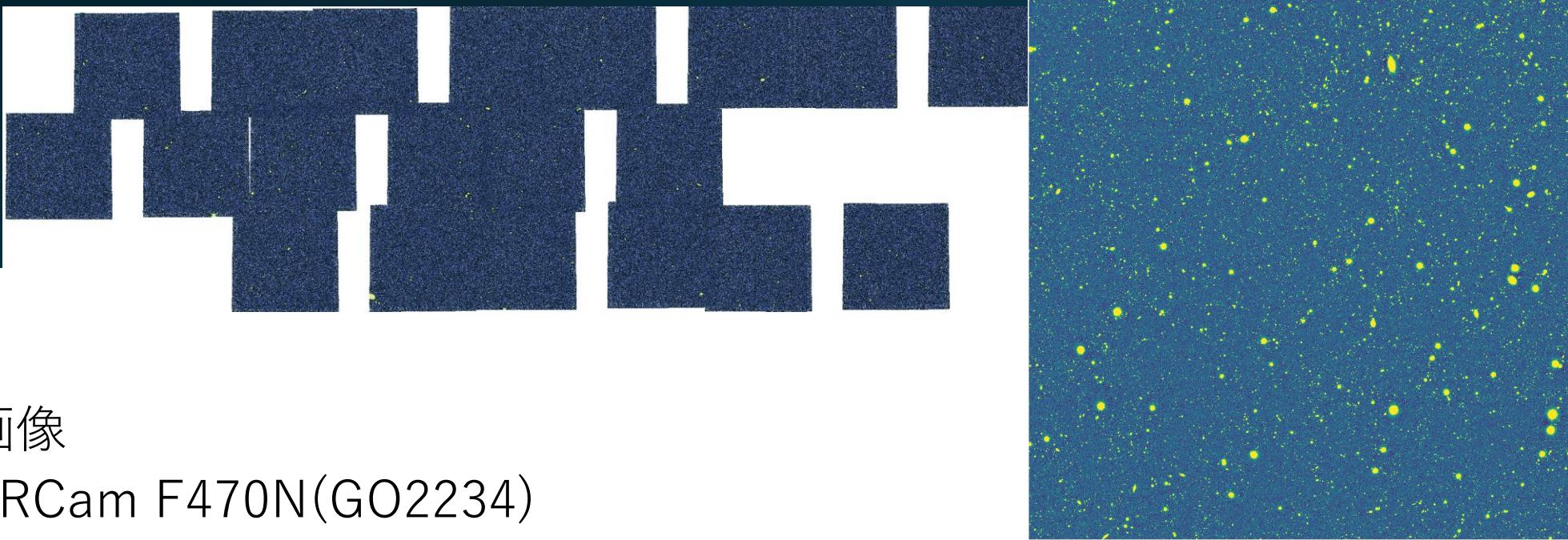
- JWSTの登場により、PopIII候補となる天体はいくつか見つかっている(e.g. Vanzella+23, Morishita+25, Cai+25)が、依然として候補数は少なく、より多くの、信頼できる候補天体を探す必要がある
- 連續光検出天体からの候補探査が主流(e.g. Fujimoto+25)

# Method

- 2つの狭帯域フィルター
  - **NB872**: Subaru HSC :  $z \sim 6.2$  の  $\text{Ly}\alpha$
  - **F470N**: JWST NIRCam :  $z \sim 6.2$  の  $\text{H}\alpha$
- 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、 $\text{H}\alpha$  emitter(**HAE**),  
 $\text{Ly}\alpha$  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



## OCEERS画像

- JWST/NIRCam F470N(GO2234)
  - JWST & HST broadband : $0.6 \mu m$ - $4.4 \mu m$ (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

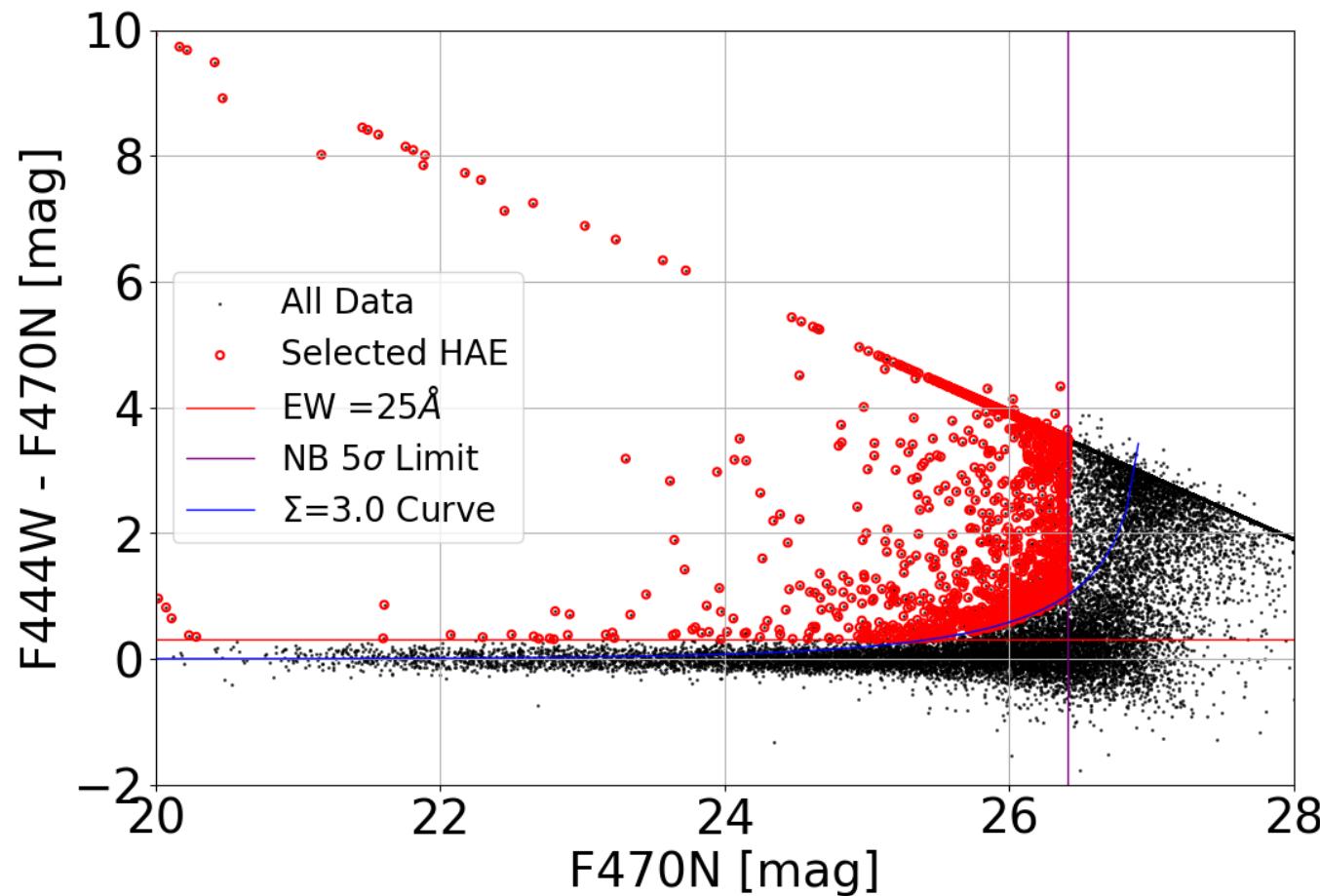
- $\text{EW}(\text{H}\alpha) > 25 \text{ \AA}$  (color > 0.31)
- $\Sigma$  cut(:SN ratio of NB excess)<sub>(Pirie+25)</sub>

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

(BB : F444Wmag、NB : F470Nmag、

ZP : zero point of F470N image、 $\sigma$  : noise)

- $\text{F470N} < 26.41$  (5  $\sigma$ )



# 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

- $\text{EW}(\text{Ly } \alpha) > 25 \text{ \AA}$  (color  $> 0.71$ )
- $\Sigma$  cut(:SN ratio of NB excess)<sub>(Pirie+25)</sub>

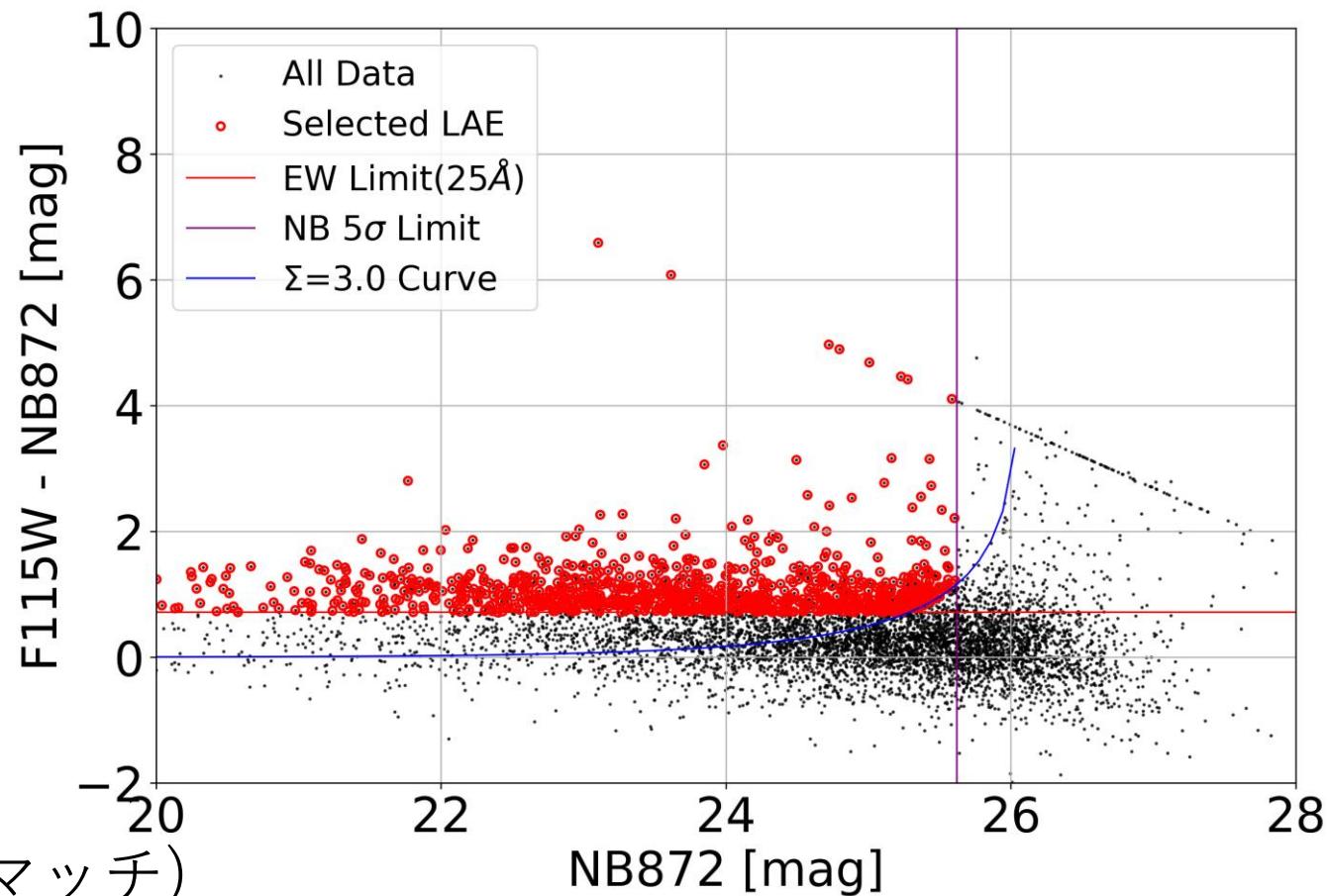
$$\Sigma = \frac{1 - 10^{-0.4(BB - NB)}}{10^{-0.4(ZP - NB)} \sqrt{\sigma_{NB}^2 + \sigma_{BB}^2}} > 3$$

(BB : F115Wmag、NB : NB872mag)

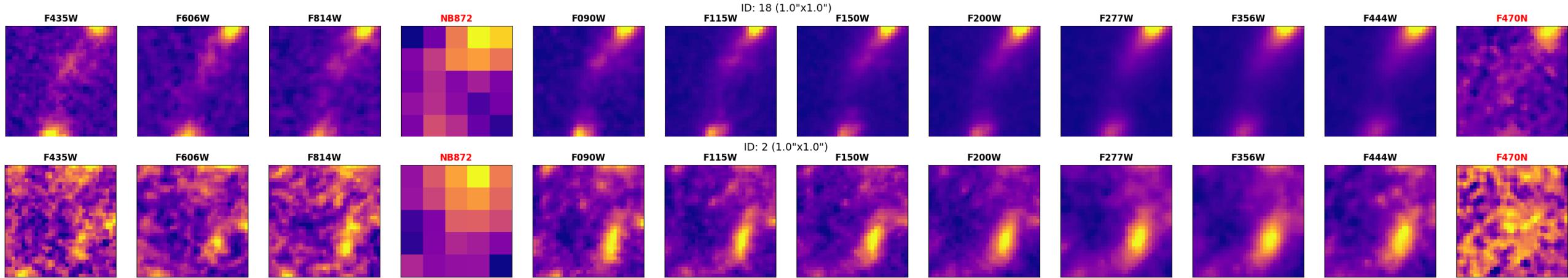
ZP : zero point of NB872 image、 $\sigma$  : noise)

- $\text{NB872} < 25.62$  (5  $\sigma$ )

→ 56 HAE & LAE(=DLE) (0.5"マッチ)



# PopIII-cand. selection (Visual inspection)

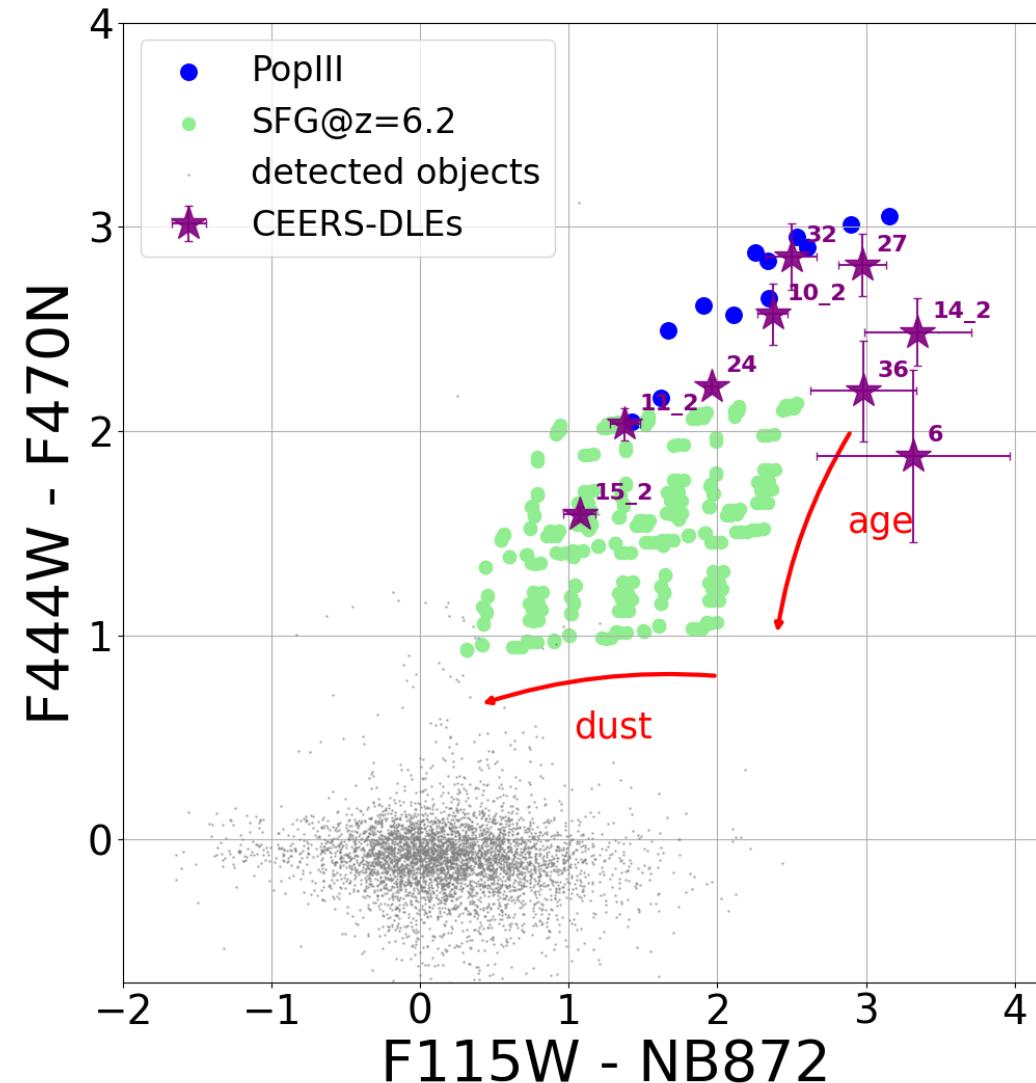


- DLEとした56天体のうち、low-zコンタミやゴミを除く
- 原因の多く：
  - 検出のoffset
  - NB872とF115Wのaperture sizeの違い(広がった天体)
  - F470NのSNが悪い部分
  - F470Nで近傍で広がった天体の一部を誤検出

→9/56 天体を最終的にDLEとした

# PopIII-cand. selection (2色図)

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



# PopIII cand. Selection(SED fitting CIGALE<sub>(Boquien+19)</sub>)

## ○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),  $\beta$ ,  $Z$ , 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)

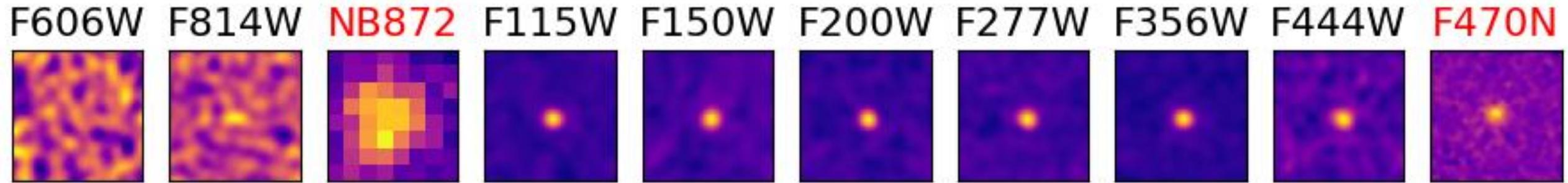
- $Z=0.0, 10^{-7}, 10^{-5}, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02 \rightarrow$  低金属量をカバー
- ベイズ推定した物理量:age, E(B-V),  $\beta$ ,  $Z$
- **selection条件 :**
- $E(B-V) < 0.1 \text{ & } \beta < -2.2 \text{ & } \text{bayes.Z} < 10^{-3} \text{ & } \text{best.Z} < 10^{-5}$

# PopIII-cand. selection

	<b>6</b>	<b>24</b>	<b>27</b>	<b>32</b>	<b>36</b>	<b>10_2</b>	<b>12_2</b>	<b>14_2</b>	<b>15_2</b>
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

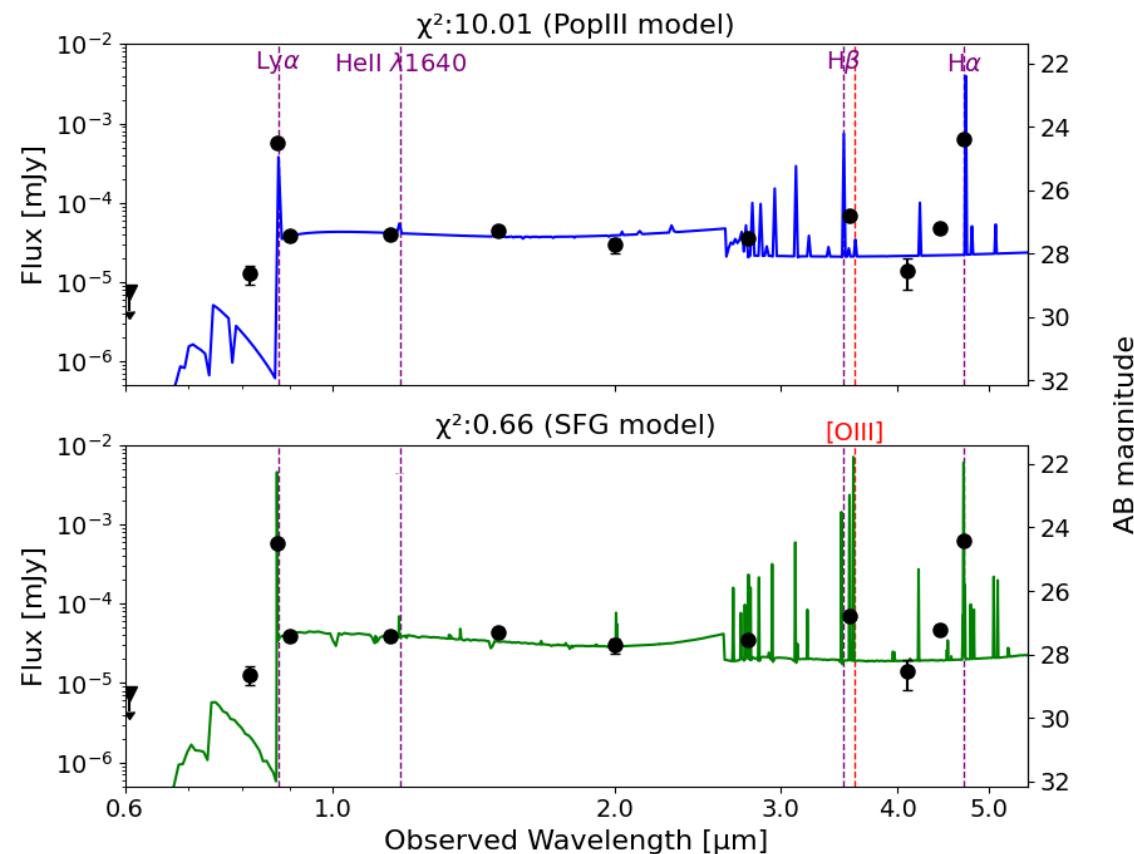


## • BC03 モデル

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

## • PopIII モデル

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



# 他の候補天体との比較

	<b>CEERS DLE-1</b>	<b>LAP1-B</b>	<b>LAP-2</b>	<b>AMORE6</b>	<b>CR3</b>	<b>GLIMPSE 16043</b>	<b>RXJ2128</b>	<b>J1236 +6215</b>	<b>GN-z11*</b>
rest EW (Ly $\alpha$ )( $\text{\AA}$ )	371	>250	-	-	822	-	<10	19.2	18
rest EW (H $\alpha$ )( $\text{\AA}$ )	1992	>1800	650		2814	2810		166.5	-
$\beta$	-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)	$1.3 \times 10^2$	<10	<10	<10	2.0	<5.0	$2.2 \times 10^2$	$5.0 \times 10^2$	-
stellar mass( $M_{\odot}$ )	$2.19 \times 10^8$	$<2.7 \times 10^3$	$<3 \times 10^4$	$5.6 \times 10^5$	$6.1 \times 10^5$	$\sim 10^5$	$5.6 \times 10^7$	$7.8 \times 10^8$	$5.37 \times 10^8$
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  $\alpha$  と H  $\alpha$  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<sub>(Zackrisson+11)</sub>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