

# 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

- **PopIII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(>54.4eV)
  - ・ 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)

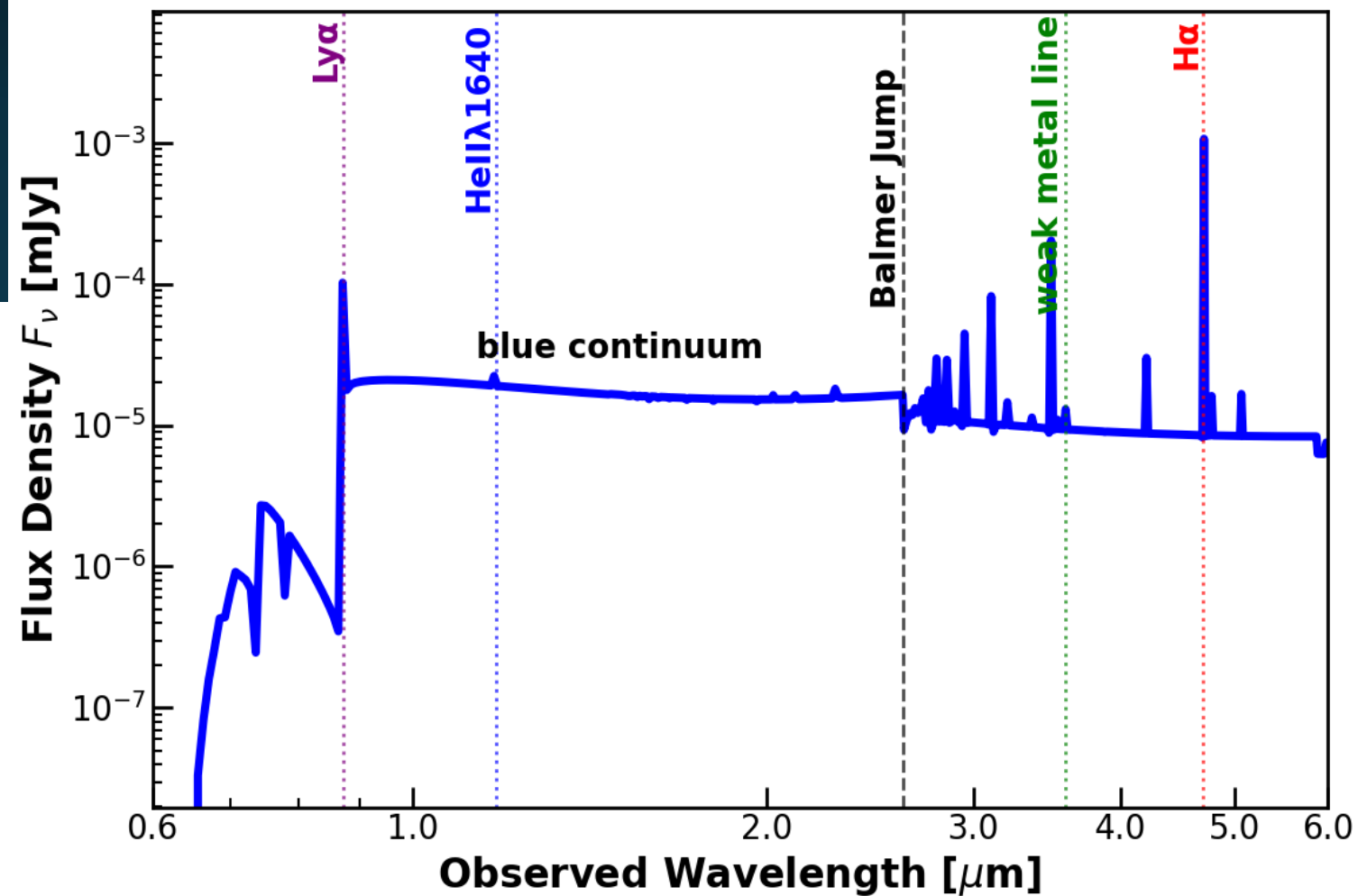
→これらの発見：天文学における**最も重要な目標**の一つ

- ・ 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たいる (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

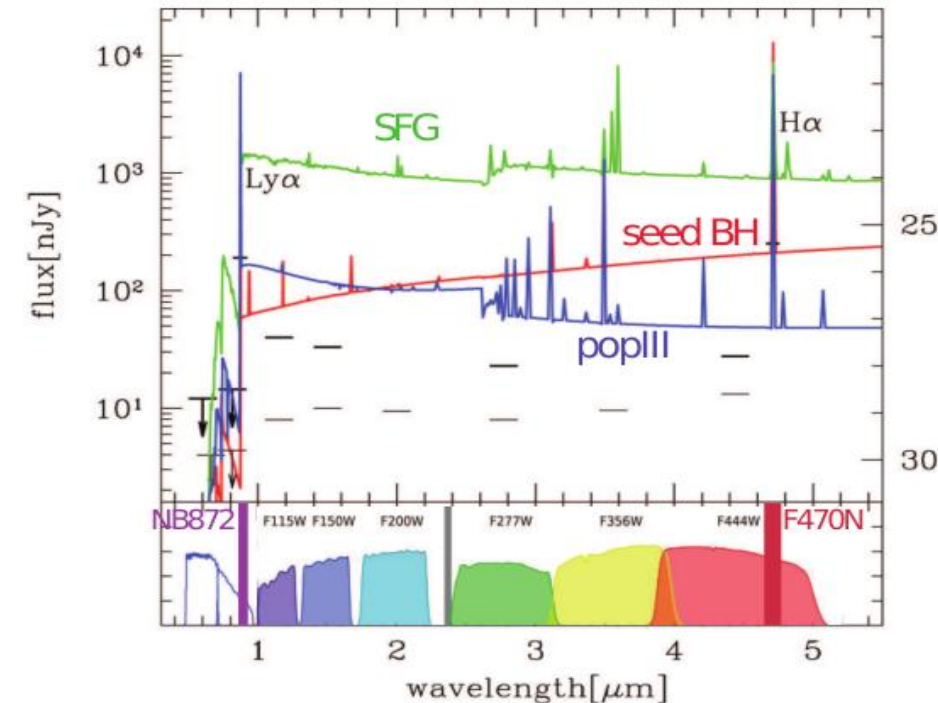
- 2つの狭帯域フィルター

- **NB872**: Subaru HSC :  $z \sim 6.2$  の  $\text{Ly}\alpha$
- **F470N**: JWST NIRCам :  $z \sim 6.2$  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)

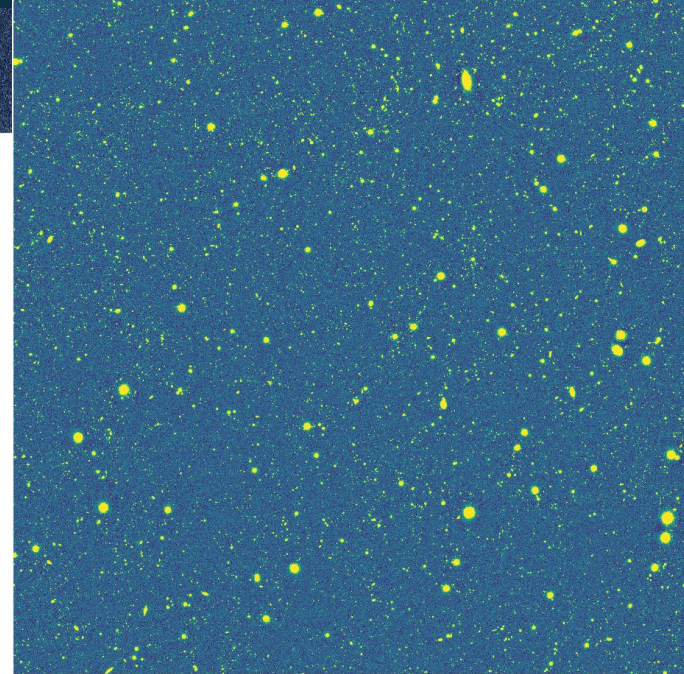
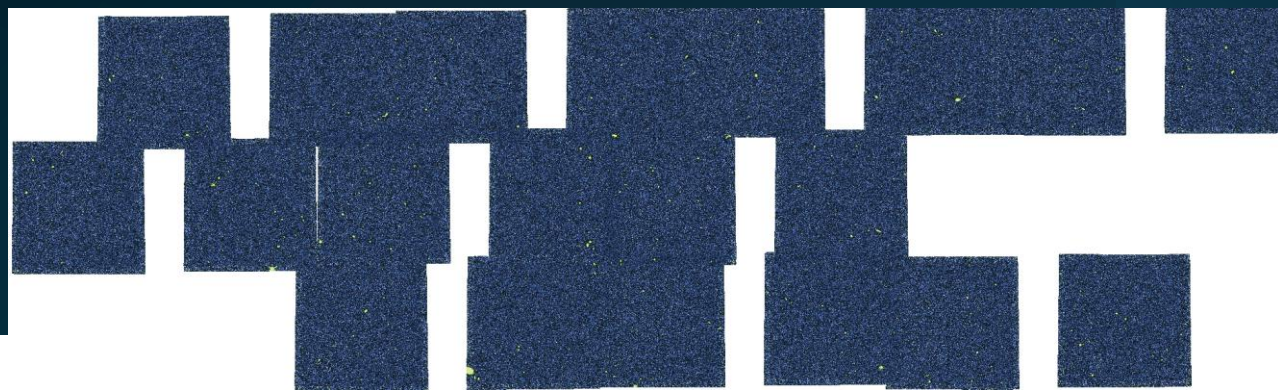
• JWSTの広帯域フィルターとの**color excess**により、 $\text{H}\alpha$  emitter(**HAE**),  $\text{Ly}\alpha$  emitter(**LAE**)をそれぞれ選定

→ **Dual Line Emitter(DLE)**を選びだし、  
**PopIII**候補の可能性を探る





# Data



## ○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")

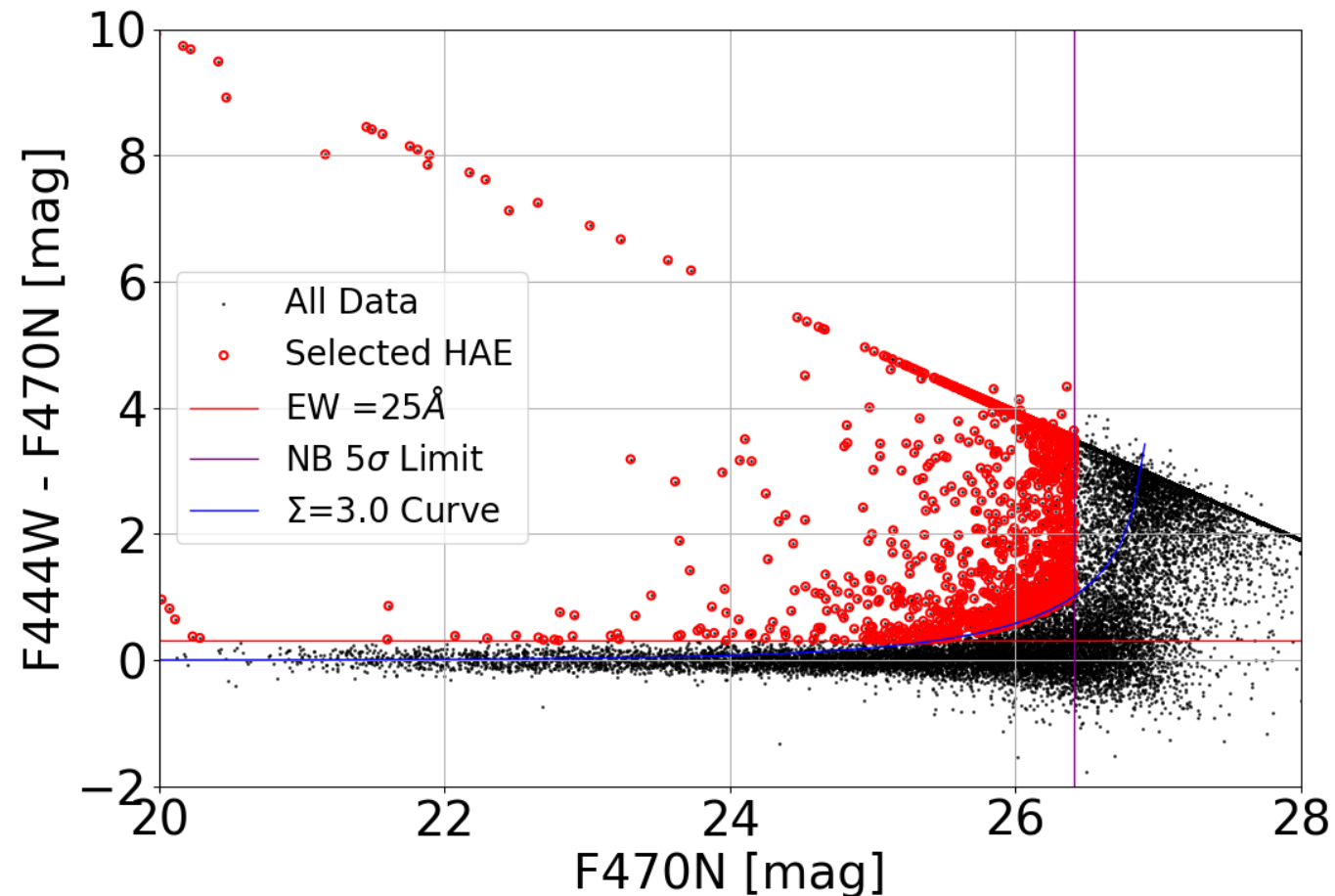
## ○F444W-F470N vs F470N

- $EW(H\alpha) > 25 \text{ \AA}$  (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)

- $F470N < 26.41$  ( $5\sigma$ )



# 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

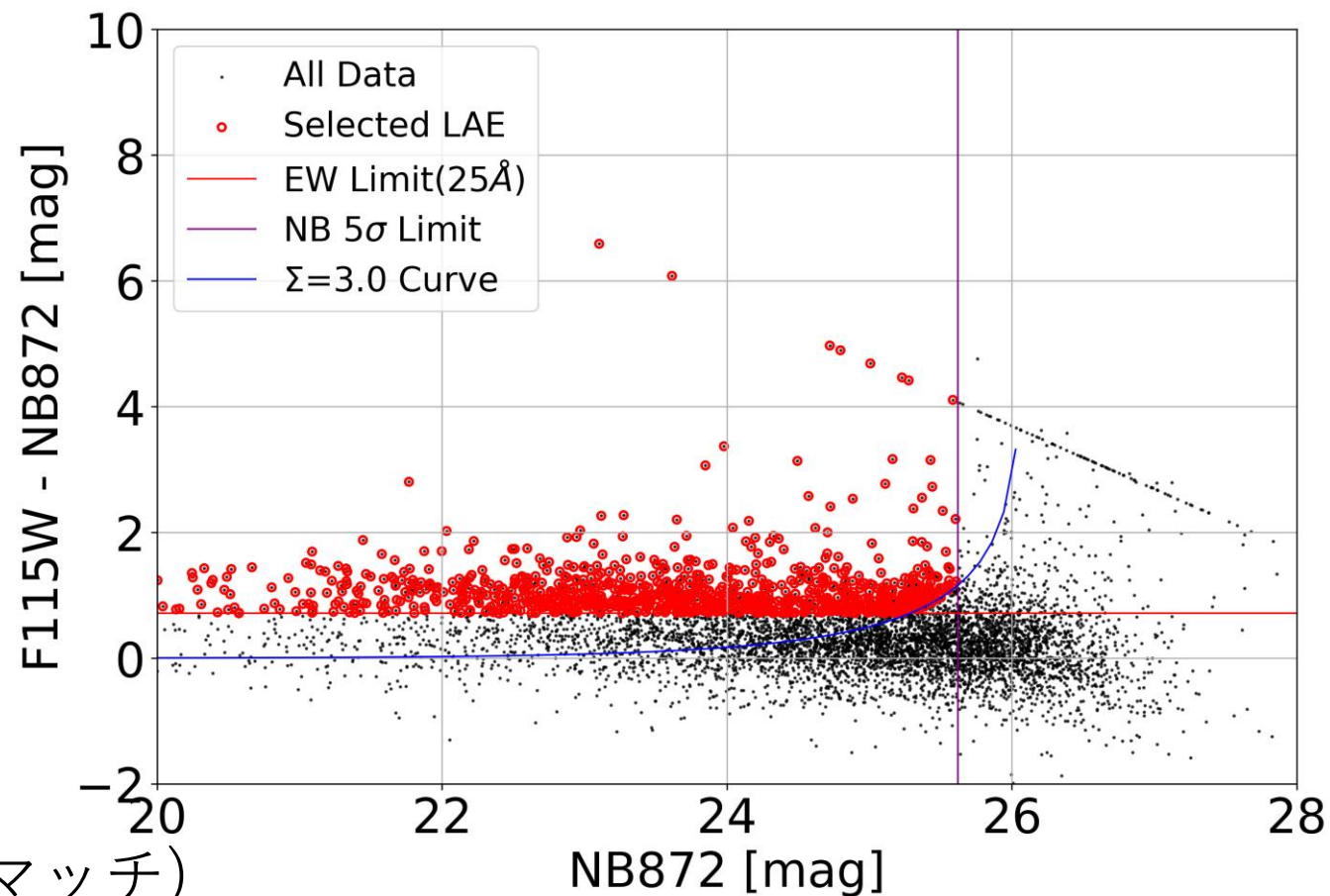
- $EW(\text{Ly } \alpha) > 25 \text{ \AA}$  (color  $> 0.71$ )
- $\Sigma \text{ cut}(\text{:SN ratio of NB excess})_{(\text{Pirie+25})}$

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

(BB : F115Wmag、NB : NB872mag、  
ZP : zero point of NB872 image、 $\sigma$  : noise)

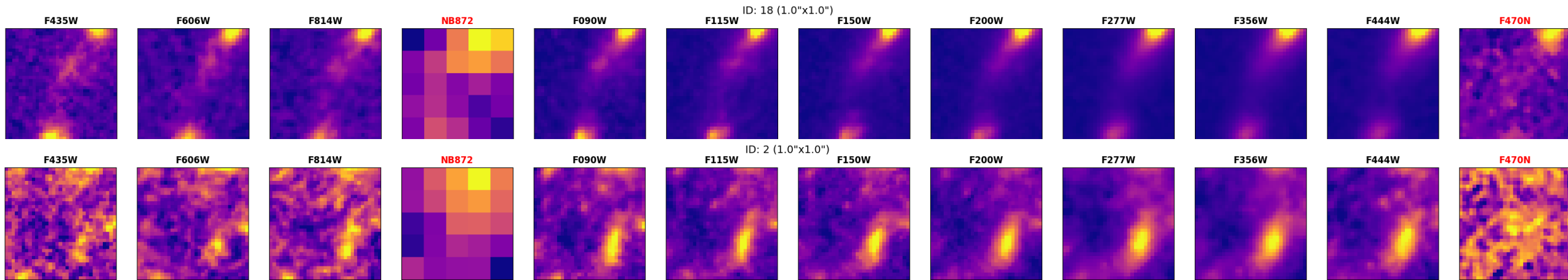
- $\text{NB872} < 25.62 \text{ (} 5 \sigma \text{)}$

→ **56 HAE & LAE(=DLE)** (0.5"マッチ)





# PopII-cand. selection (Visual inspection)



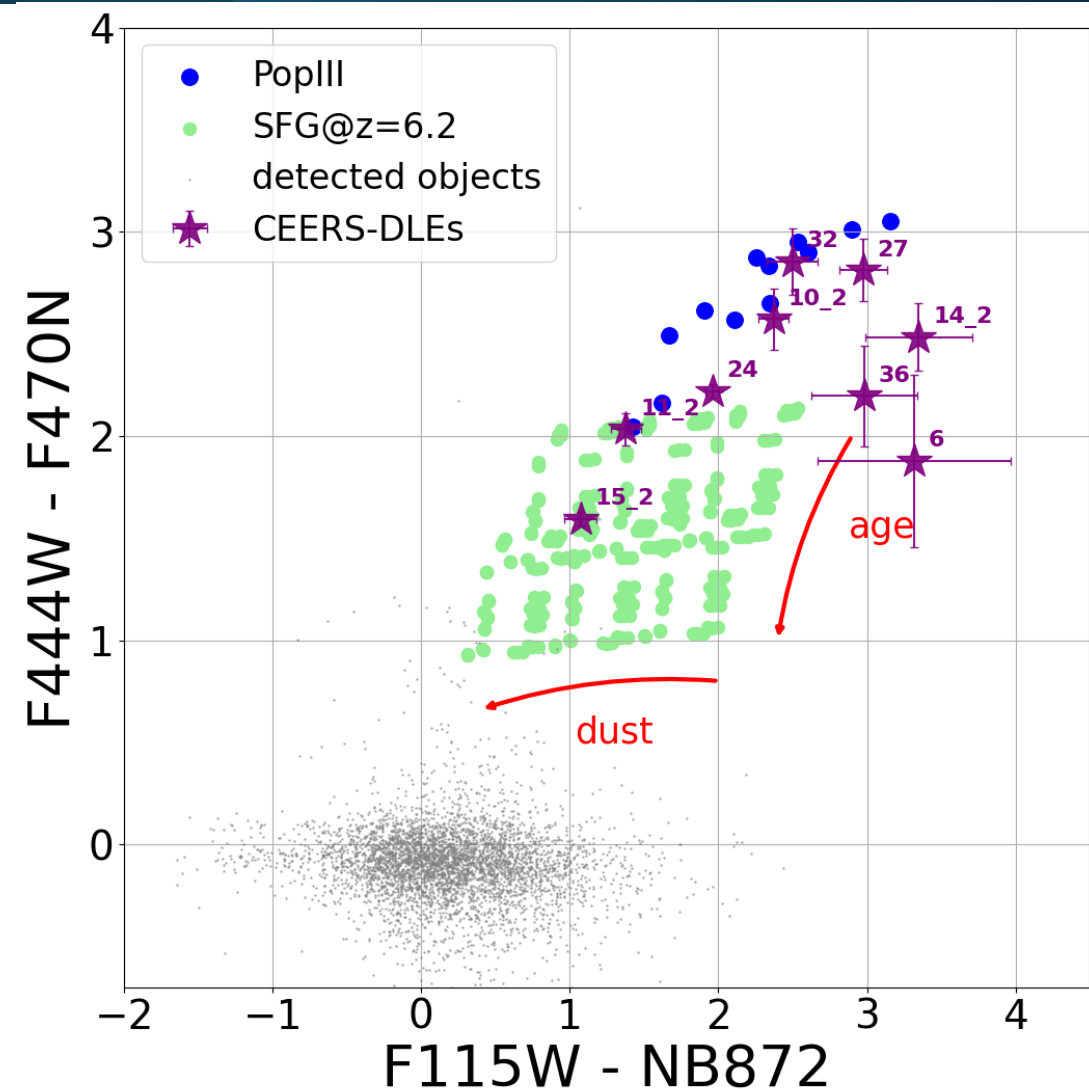
- DLEとした56天体のうち、low-zコンタミやゴミを除く
- 原因の多く：
  - 検出のoffset
  - NB872とF115Wのaperture sizeの違い(広がった天体)
  - F470NのSNが悪い部分
  - F470Nで近傍で広がった天体の一部を誤検出

→ **9/56 天体**を最終的に**DLE**とした



# PopII-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**<sub>(Bruzual & Charlot 03)</sub>

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

## ○**Inoue11モデル**<sub>(Inoue11)</sub> **(SFH+SSP+nebular)**

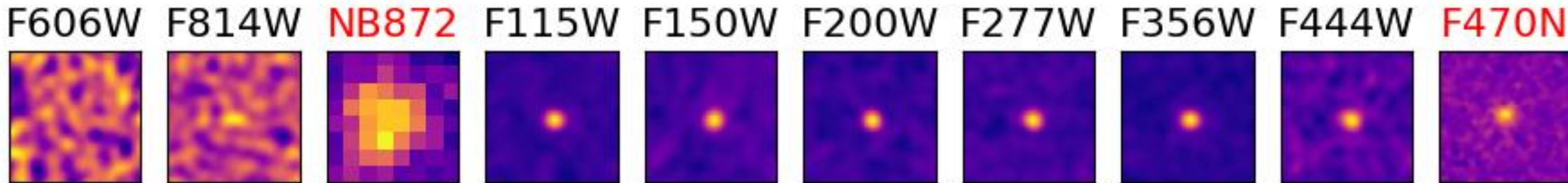
- $Z=0.0, 10^{-7}, 10^{-5}, 0.0004, 0.004, 0.008, 0.02$  → 低金属量をカバー
- ベイズ推定した物理量:age,  $E(B-V)$ ,  $\beta$ ,  $Z$
- **selection条件** :  
•  $E(B-V) < 0.1$  &  $\beta < -2.2$  & bayes. $Z < 10^{-3}$  & best. $Z < 10^{-5}$

# 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

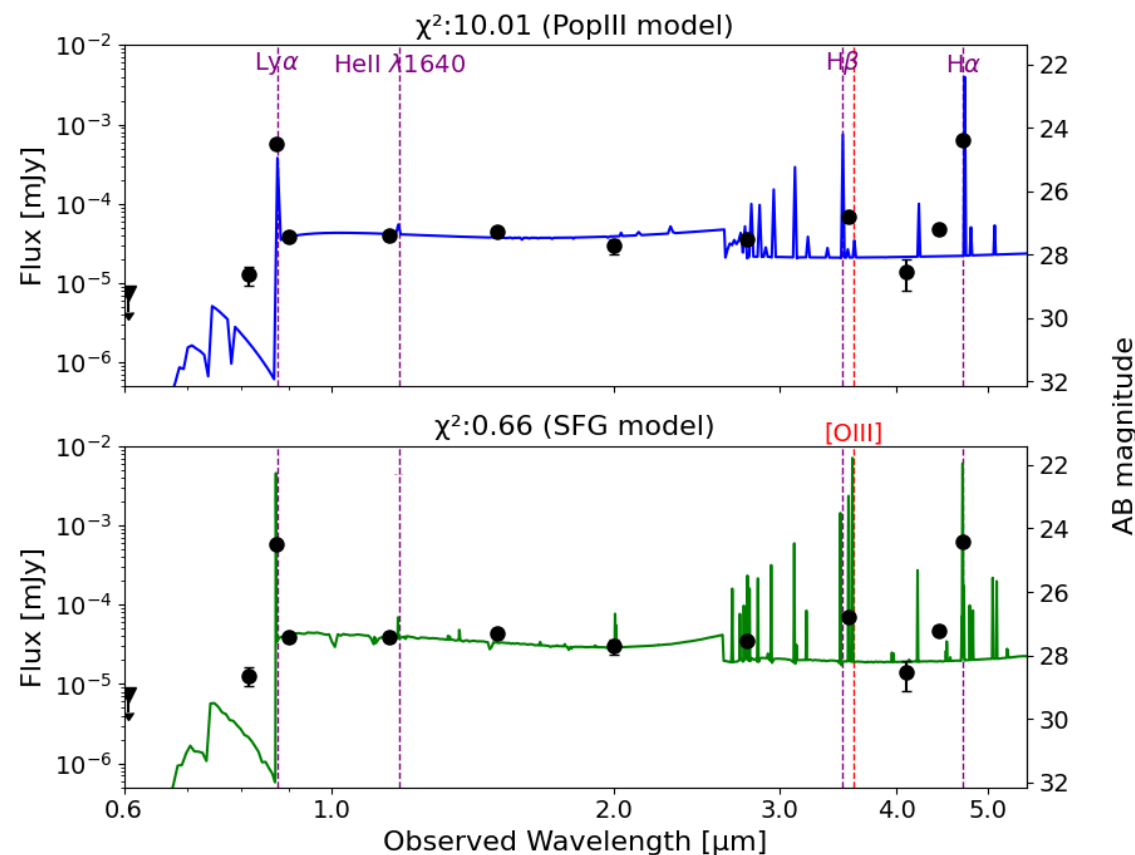


## • BC03モデル

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

## • PopIII モデル

- age =  $10.90 \pm 18.94$ ,  $E(B-V) = 0.0029 \pm 0.0074$ ,
  - $\beta = -2.30 \pm 0.14$ ,  $Z = (1.4 \pm 7.5) \times 10^4$
  - $\text{EW}_0(\text{Ly } \alpha) = 371^{+60}_{-53} \text{ \AA}$ ,  $\text{EW}_0(\text{H } \alpha) = 1992^{+325}_{-262} \text{ \AA}$
- 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	$\sim 0$	$\sim 0$	$\sim 0$	0.015	$\sim 0$	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)
- HeII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  $\text{Ly}\alpha$  と  $\text{H}\alpha$  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(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