

觀測的宇宙論

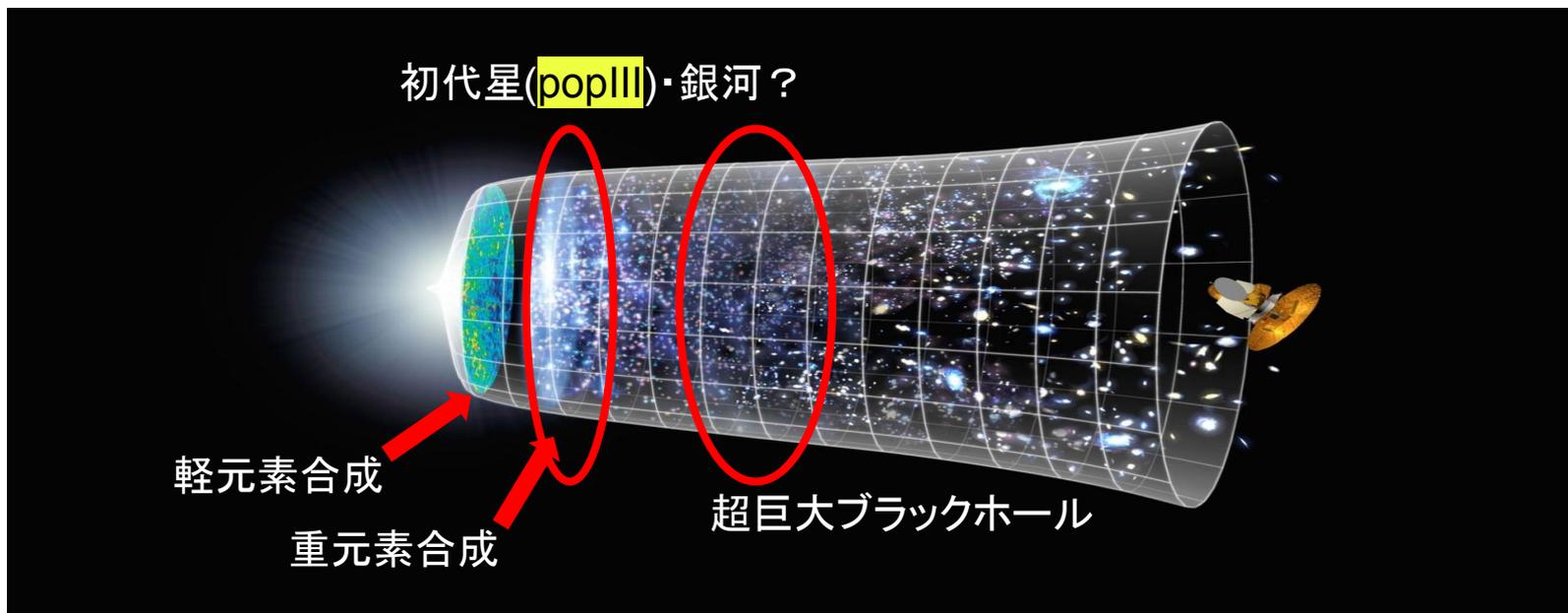
石井、上田、江川、上條、博田

イントロダクション

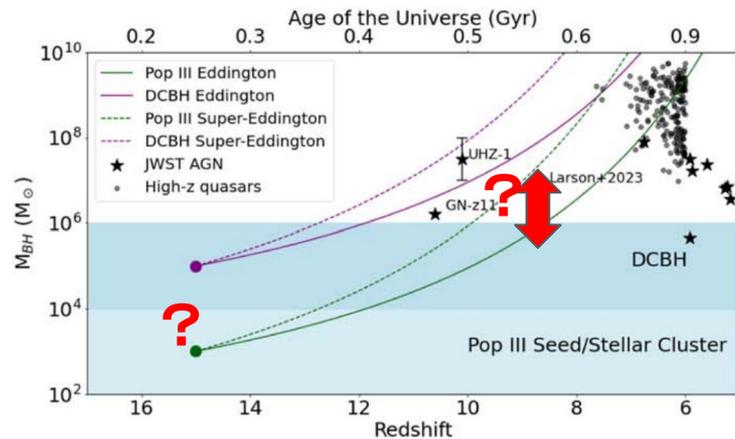
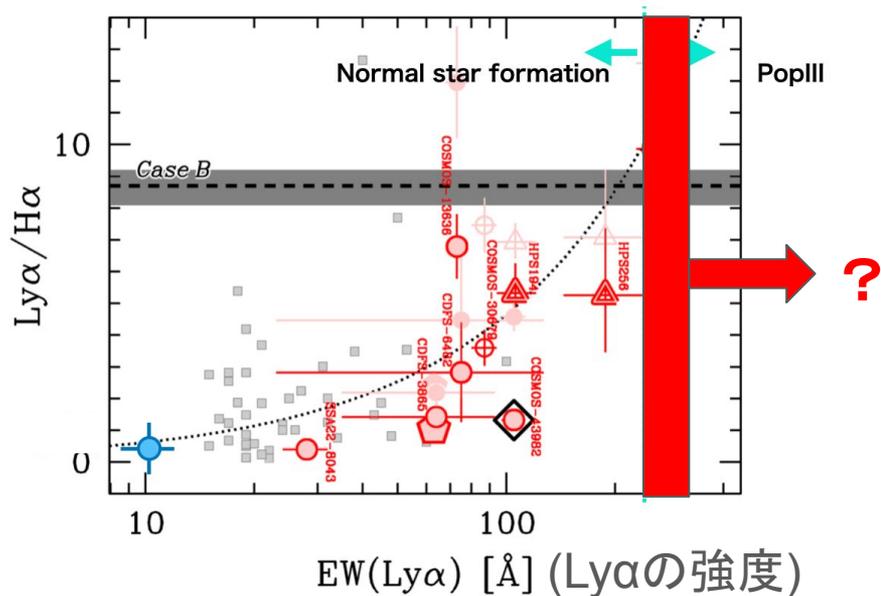
上田

初期宇宙の謎

- ・どのように星や銀河が進化するか
- ・どのように超巨大ブラックホール(BH)が形成されたのか
- ・現在と同じ物理が成り立っているのか など



具体的な課題



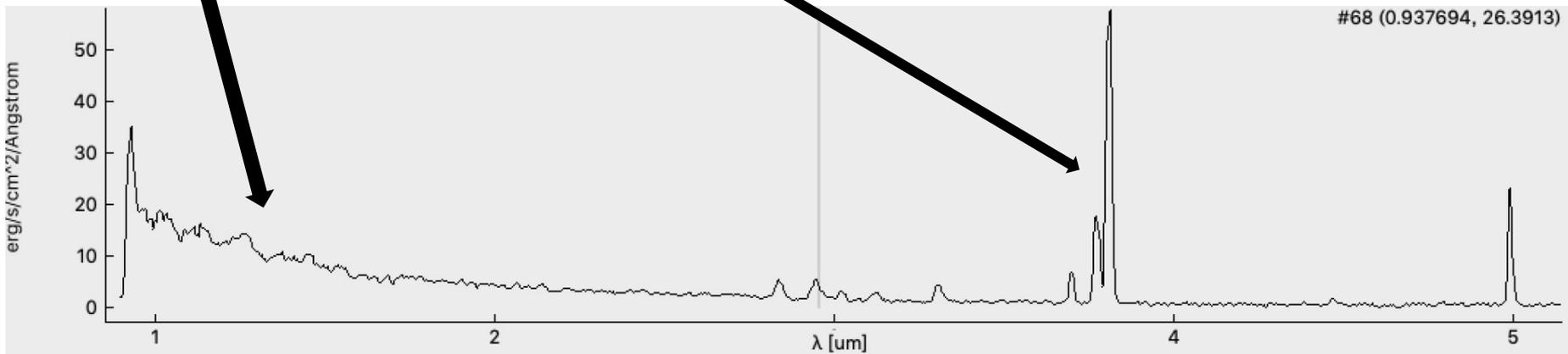
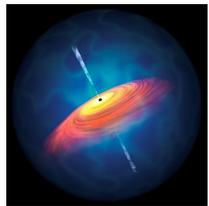
・popIII・銀河探索

等価幅 $EW = f / f_c$ (Ly α のEW > 240 \AA ならPopIII)

- ・超巨大ブラックホールの成長過程(合体、ガス降着?)
- ・物理法則が初期宇宙で成り立っているか

銀河とブラックホール

- ・中心部には巨大ブラックホールがあることが多い
- ・ガスの組成や運動が大きな特徴の一つ



観測とデータ 江川

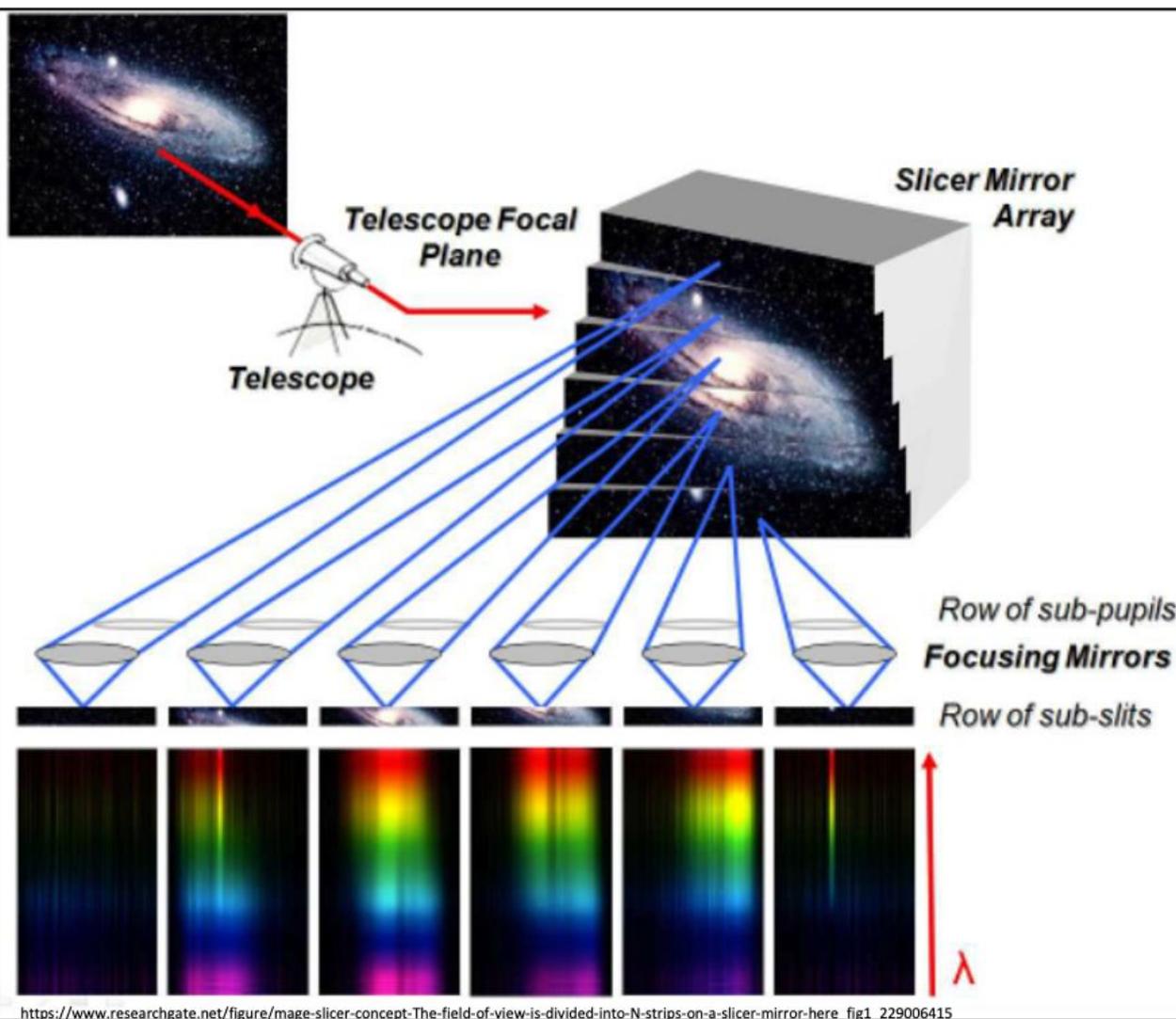
観測

初期宇宙にあ
→大型の赤外

銀河、ブラック

GA-NIFS探

うち、観測的

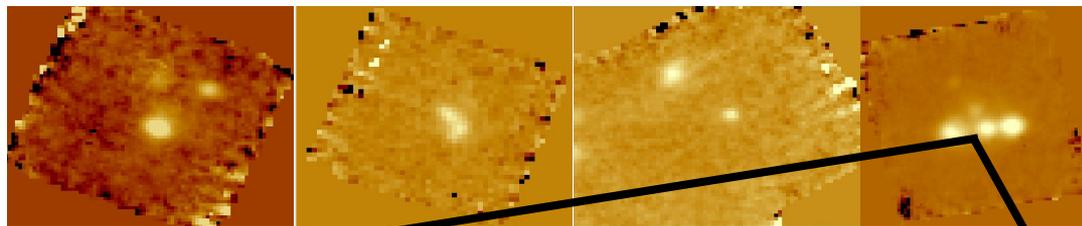


6 μ m)

本研究のサンプル

天体名 (z)

- ・SPT-0346 (5.70): サブミリ波銀河
- ・Himiko (6.59): 合体中の銀河
- ・CR7 (6.6): 合体中の銀河
- ・COS-298730247 (6.81): 遠方銀河

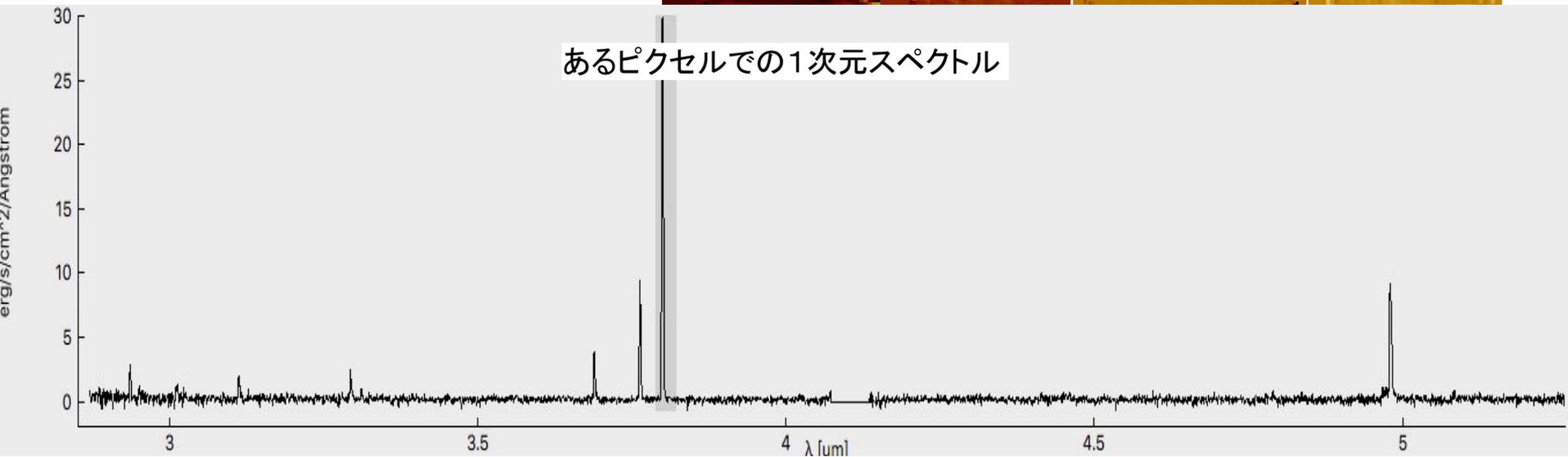


CR7

COS-298730247GNz-11

Himiko

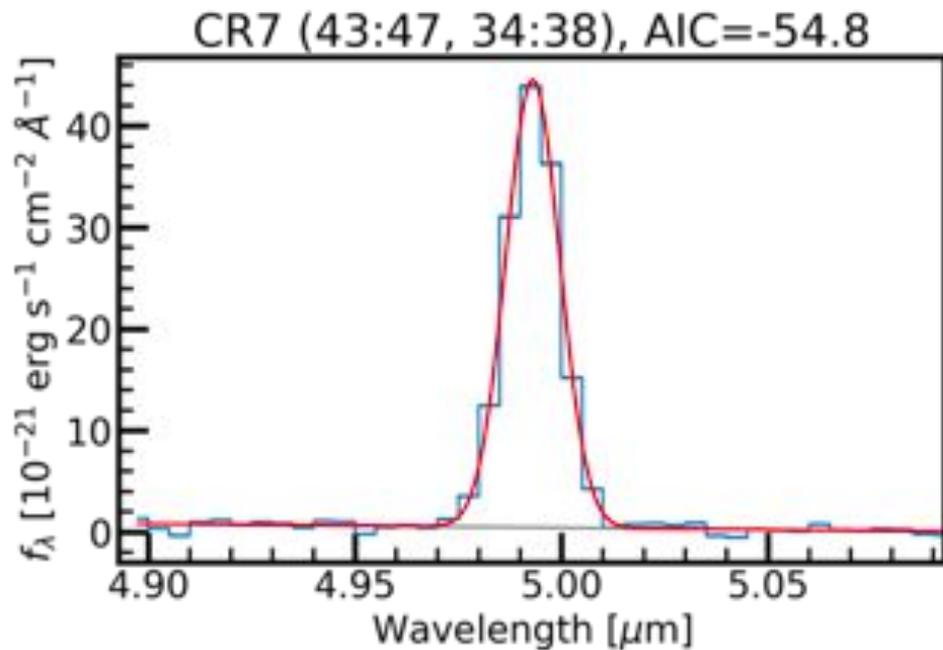
あるピクセルでの1次元スペクトル



解析と結果・考察

1. 銀河形成
2. ブラックホール形成
3. 宇宙初期での物理法則

Fittingによる解析



・輝線

1. 中心波長

2. フラックス

3. 波長幅

→ カイ2乗 gaussian-fitting で求める

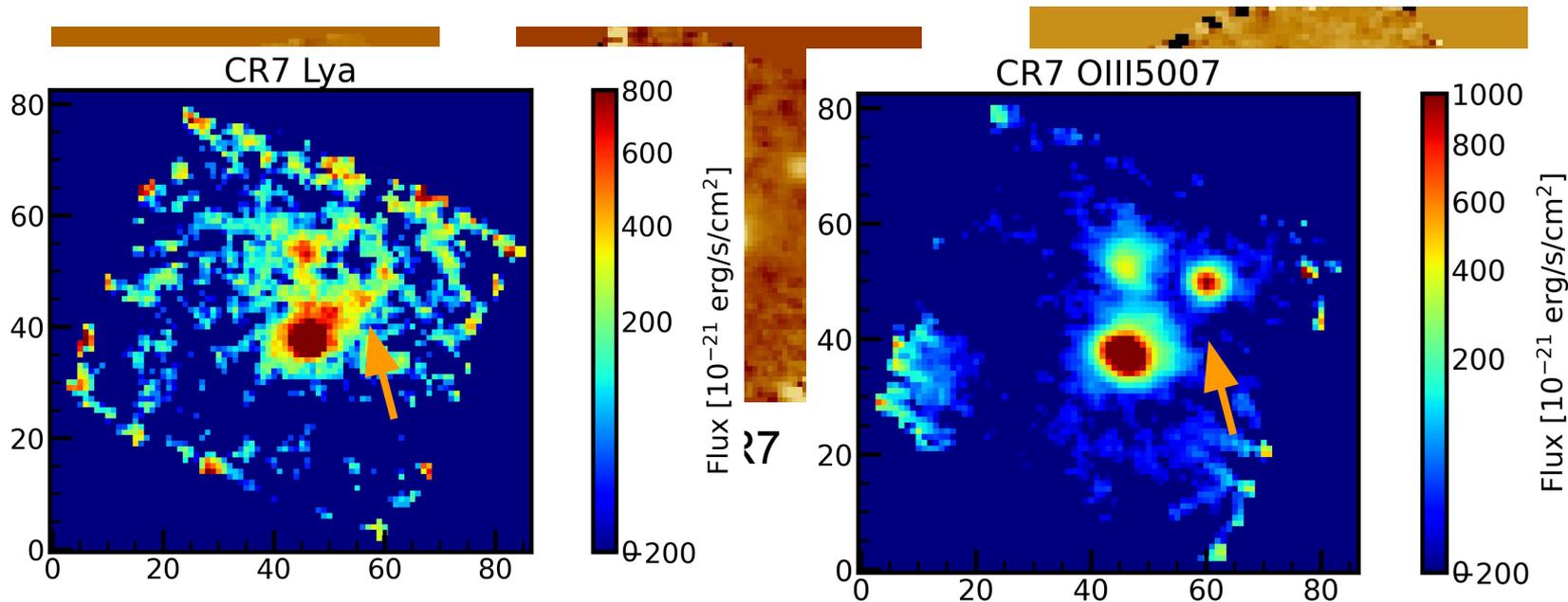
輝線の起源が2つ以上の場合

→ 2つ以上の gaussian で fitting

1. 銀河形成 (Ly α に基づく) 石井

初代星・銀河 (PopIII) はどこにあるのか？

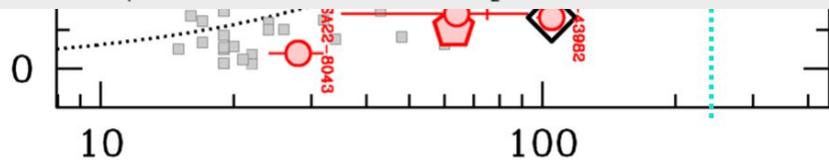
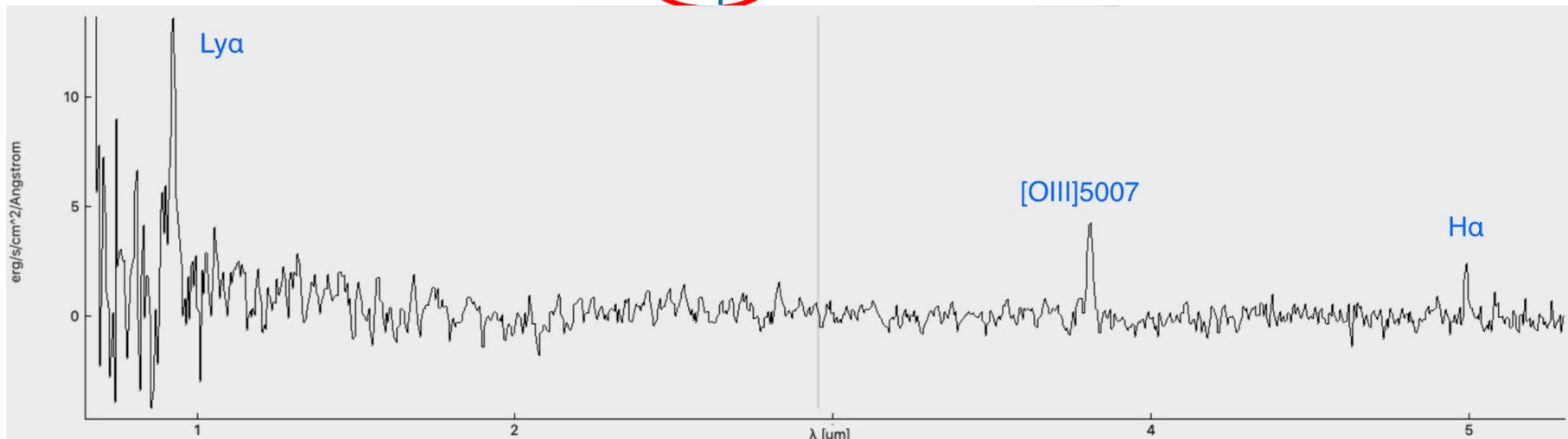
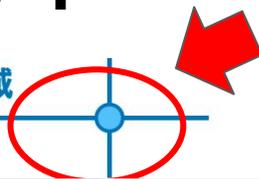
Ly α が観測できているデータ→Himiko, CR7, GNz11



CR7でLy α のみが強い領域を見つけた!
→石井Ly α 領域

石井Ly α 領域はPopIIIか？

石井Ly α 領域



EW(Ly α) [\AA]

Nakajima + 2013

重元素量 (O/H) の評価

直接電子温度法

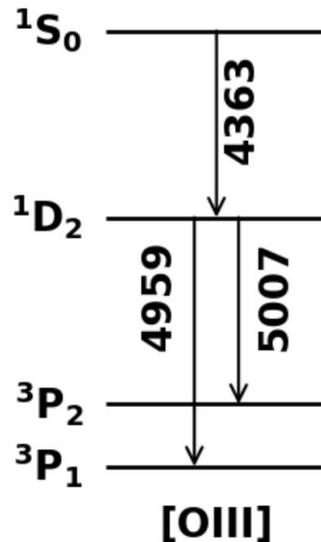
輝線比(観測量) $\frac{[\text{OII}]3727}{\text{H}\beta}, \frac{[\text{OIII}]5007}{\text{H}\beta}$

↓

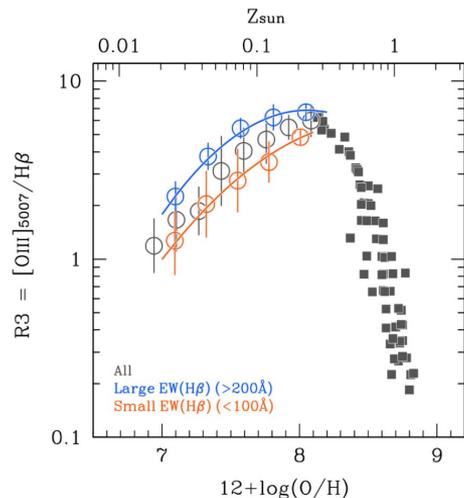
元素組成比 $\frac{\text{O}}{\text{H}} = \frac{\text{O}^+}{\text{H}^+} + \frac{\text{O}^{2+}}{\text{H}^+}$

T_e : 電子温度

$\frac{[\text{OIII}]4363}{[\text{OIII}]4959,5007}$



強輝線法



Nakajima + 2023

石井Ly α 領域

→O/H ~ 0.2-0.3太陽金属量

→PopIIIではない、では何か？

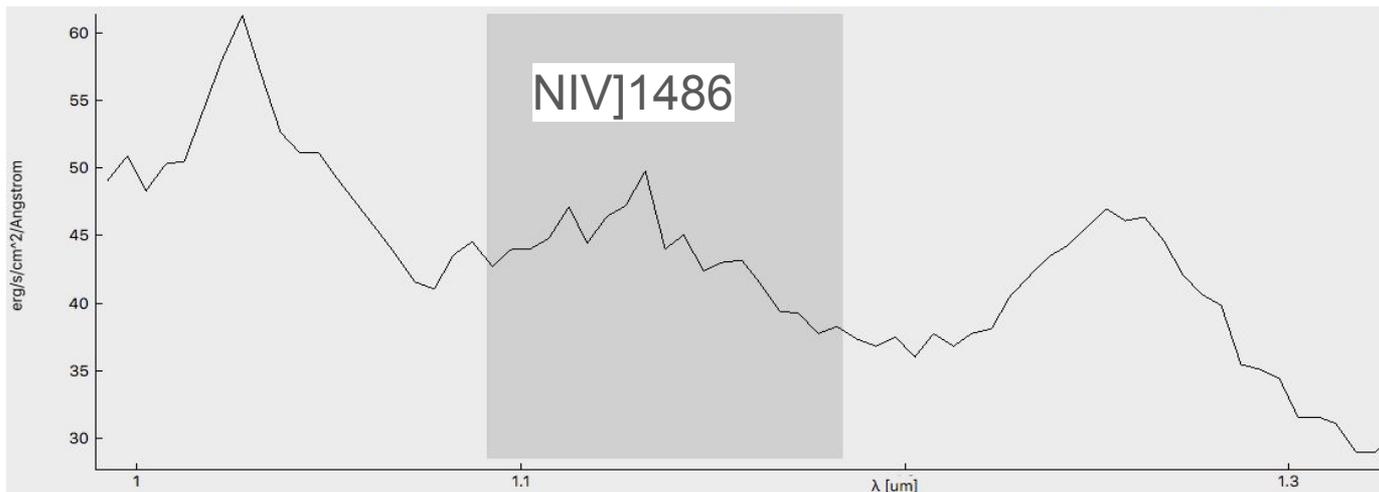
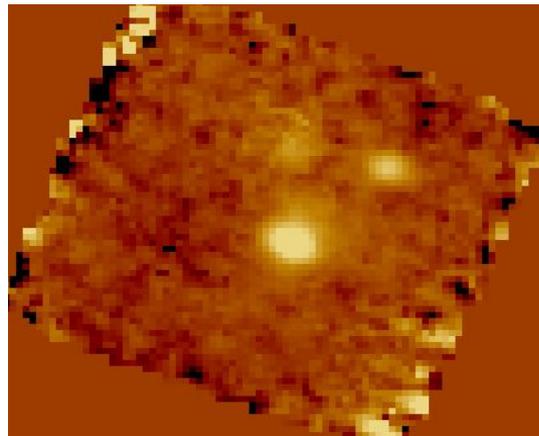
1. 銀河形成(重元素に基づく) 江川

CR7の重元素の組成は？

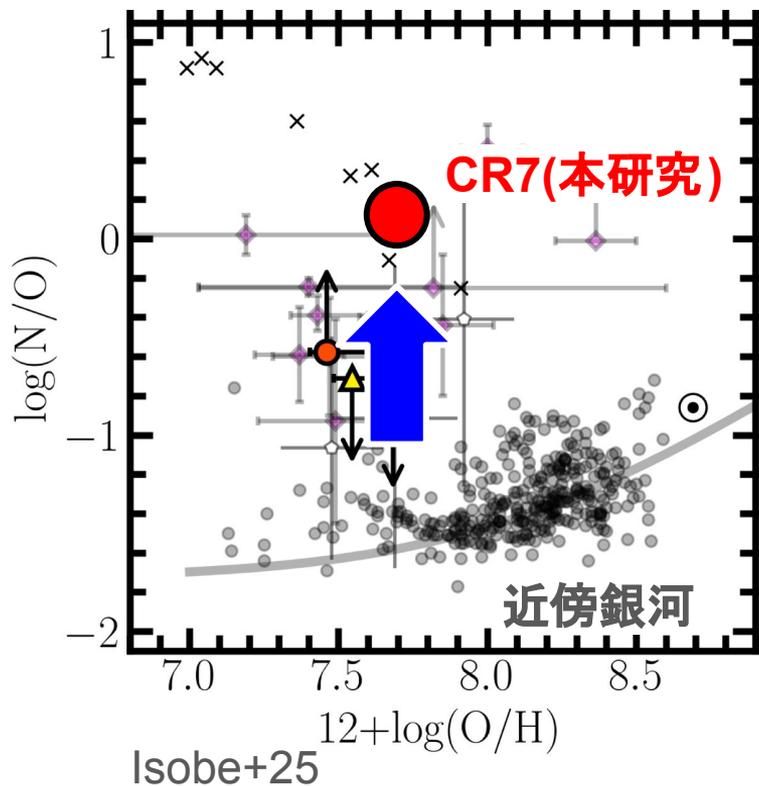
強いNIV]輝線が検出

直接電子温度法を用いてN/Oを求める

→ $\log(N/O)=0.14\pm 0.01$

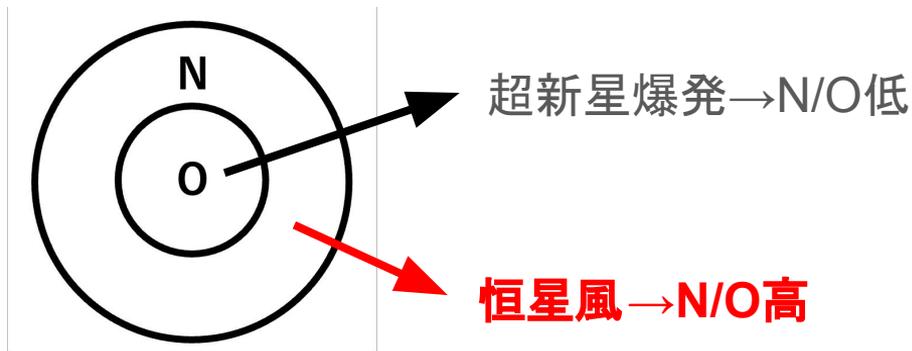


結果



N/Oが近傍銀河よりも一桁程度大きい

なぜ高いN/O?
→大質量星の寄与?



考察

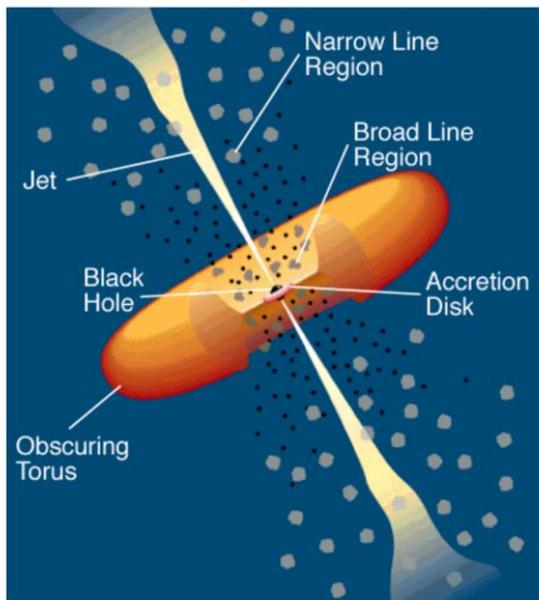
- ・石井Ly α 領域EW=299 +/- 214 Å(強いLy α 輝線)
O/Hは太陽の0.2~0.3倍(高い)→popIIIではなかった
- ・N/O=0.14±0.01 (高い)→恒星風→大質量星の存在？

形成初期の銀河:大質量星が多い→大量の電離光子→水素を電離→強いLy α

2. ブラックホール形成(SPT0311)

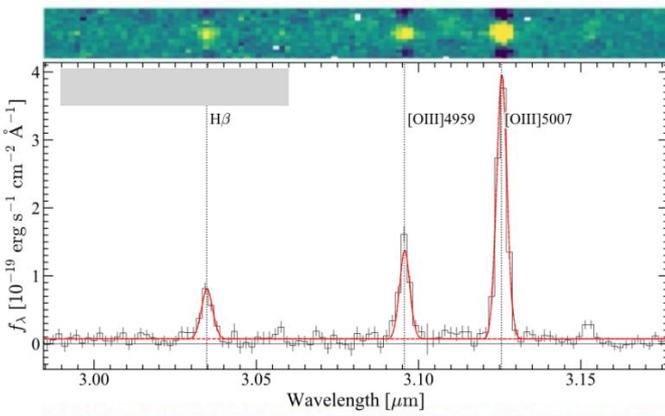
上田

初期宇宙におけるブラックホールの見つけ方

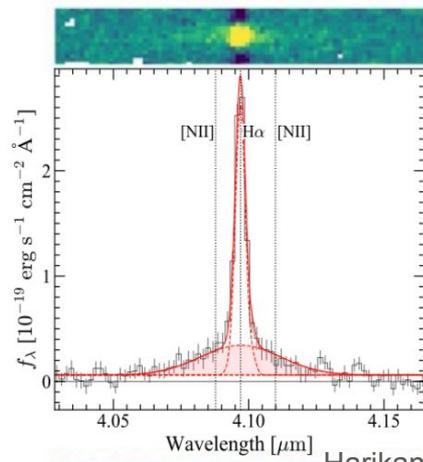


<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/AGN/agn.html>

[OIII]5007 (禁制線)



H α (許容線)



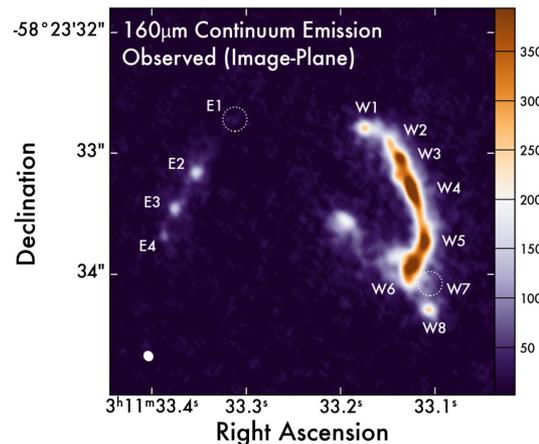
Harikane+23

- ・許容線(例:H α)が広がって見える
>1000 km/s
- ・禁制線(例:[OIII])は広がらない
- ・アウトフローで輝線が広がることもある

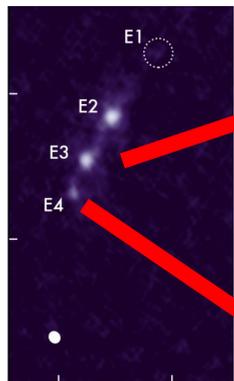
ブラックホールの徴候がみられる天体

天体名 (z)

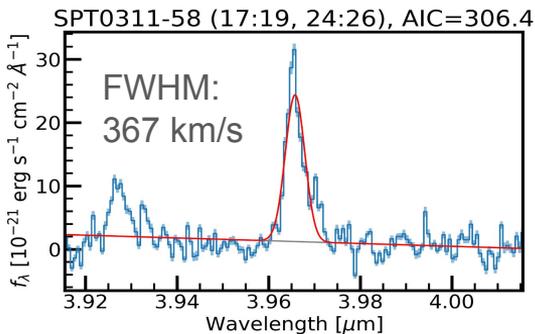
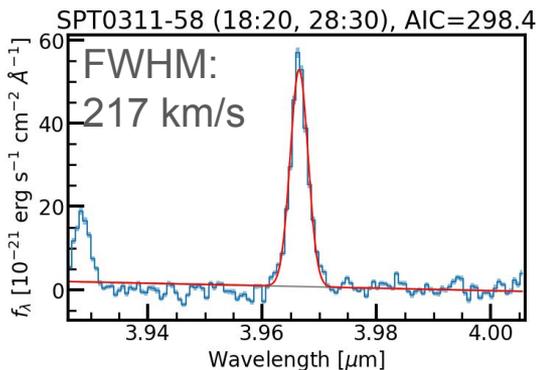
- ・SPT-0346 (5.70): サブミリ波銀河
- ・Himiko (6.59): 合体中の銀河 ← 既に存在を確認
- ・CR7 (6.6): 合体中の銀河
- ・COS-298730247 (6.81): 遠方銀河
- ・**SPT-0311 (6.90): 合体中の銀河** ← **本研究で存在を検証**
- ・J1120 (7.09): クェーサー ← 既に存在を確認
- ・J1342 (7.54): クェーサー ← 既に存在を確認
- ・EGSY8p7 (8.68): 遠方銀河 ← 本研究で存在を検証
- ・JD1 (9.11): 遠方銀河
- ・GNz11 (10.6): 遠方銀河



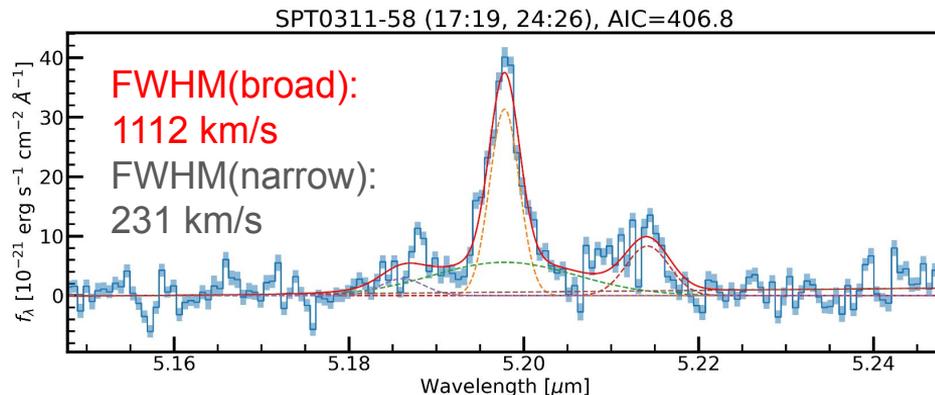
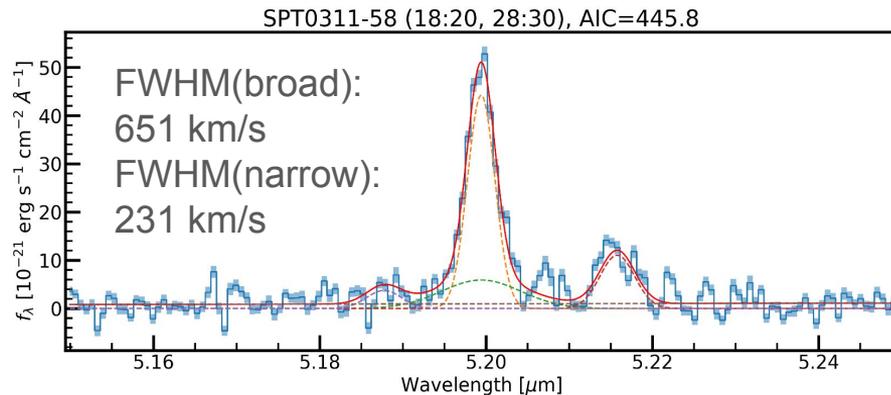
[OIII]5007 (禁制線)



Spilker+22



Hα (許容線)



BH合体の証拠はなかった (Himiko, CR7も同様)

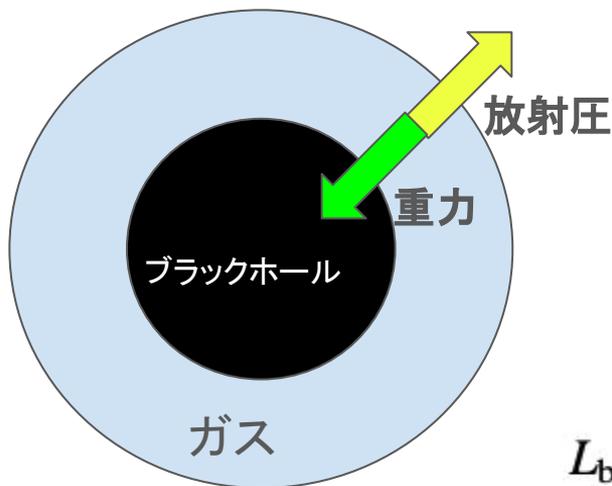
→BH合体による成長はあまりない?

$$M_{\text{BH}} = (2.0^{+0.4}_{-0.3}) \times 10^6 \left(\frac{L_{\text{H}\alpha}}{10^{42} \text{ ergs s}^{-1}} \right)^{0.55 \pm 0.02} \left(\frac{\text{FWHM}_{\text{H}\alpha}}{10^3 \text{ km s}^{-1}} \right)^{2.06 \pm 0.06}$$

Greene&Ho 05

M_{\odot}
E4のBH質量 : 6.3×10^6 [太陽質量]

ブラックホールの成長



エディントン光度 L_{Edd}

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T}$$

BHの明るさ L_{bol}

$$L_{\text{bol}} = 9.8 \times L_{5100} = 9.8 \times 10^{44} \left(\frac{L_{\text{H}\alpha}}{5.25 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{\frac{1}{1.157}} \text{ erg s}^{-1}$$

エディントン比 $\Gamma = L_{\text{bol}} / L_{\text{Edd}}$

E4のエディントン比 : 0.23

2.ブラックホール形成(EGSY8p7)

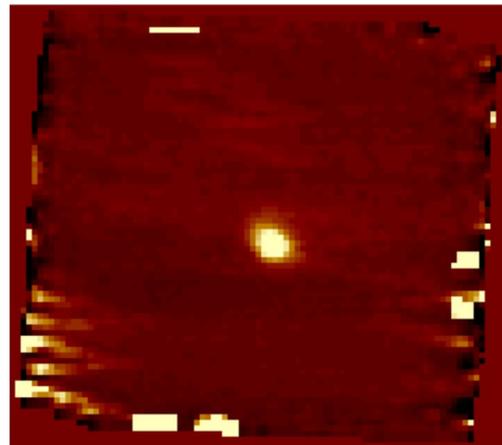
博田

最遠方のブラックホール候補天体

天体名 (z)

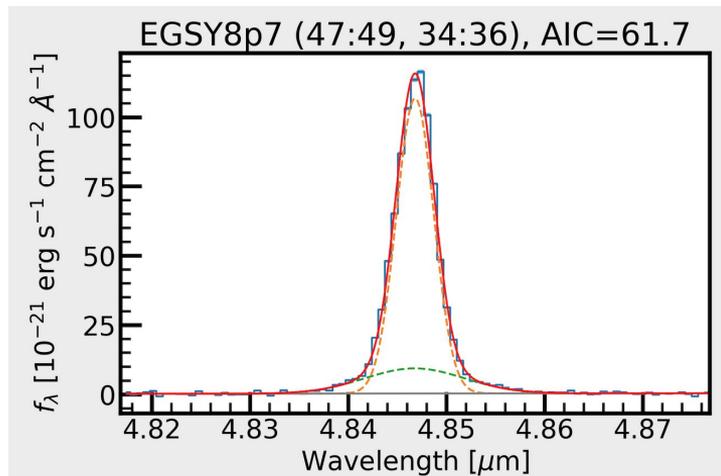
- ・SPT-0346 (5.70): サブミリ波銀河
- ・Himiko (6.59): 合体中の銀河 ← 既に存在を確認
- ・CR7 (6.6): 合体中の銀河
- ・COS-298730247 (6.81): 遠方銀河
- ・SPT-0311 (6.90): 合体中の銀河 ← 本研究で存在を検証
- ・J1120 (7.09): クェーサー ← 既に存在を確認
- ・J1342 (7.54): クェーサー ← 既に存在を確認
- ・**EGSY8p7 (8.68): 遠方銀河** ← **本研究で存在を検証**
- ・JD1 (9.11): 遠方銀河
- ・GNz11 (10.6): 遠方銀河

EGSY8p7

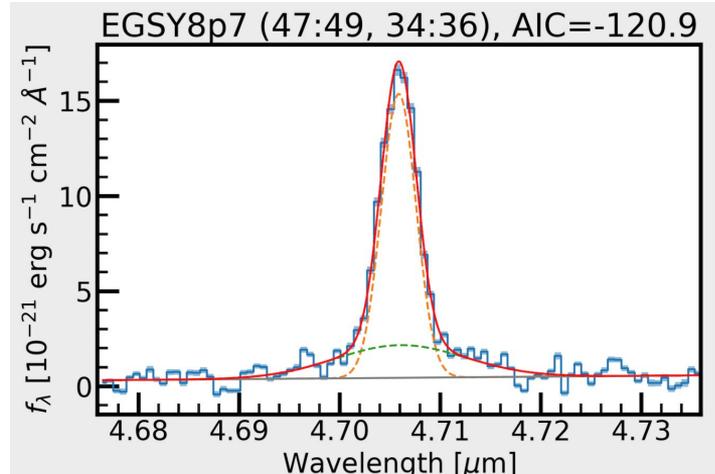


EGSY8p7にブラックホールは存在するか？(その1)

[OIII]5007 (禁制線)



H β (許容線)



広輝線のFWHM

700 \pm 50(km/s)

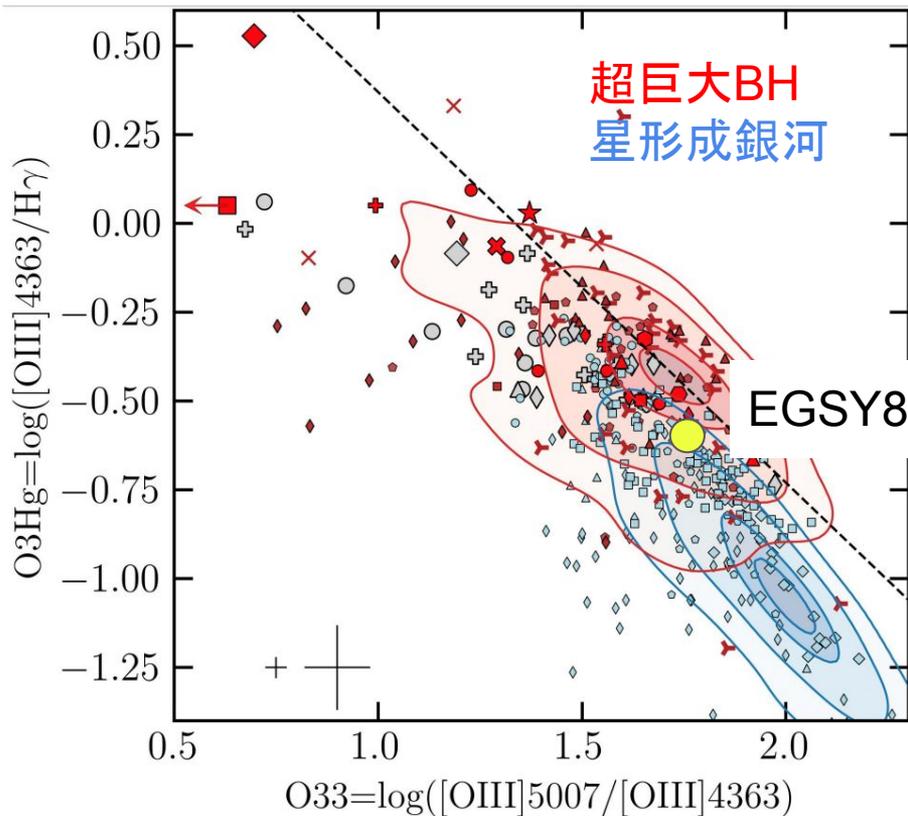
<

1000 \pm 200(km/s)

⇨ 禁制線での outflow による広輝線の広がりを考慮しても、許容線の方が広輝線が広い

⇨ **ブラックホールが存在する可能性がある**

EGSY8p7にブラックホールは存在するか？（その2）



超巨大BHがある場合

電離光子が多い→ $\text{OIII}\lambda 4363/\text{H}\gamma$ が高い

温度が高い→ $\text{OIII}\lambda 5007/\text{OIII}\lambda 4363$ が低い

→超巨大BHを輝線比から見分けられる

超巨大BHが多く存在する領域に含まれる

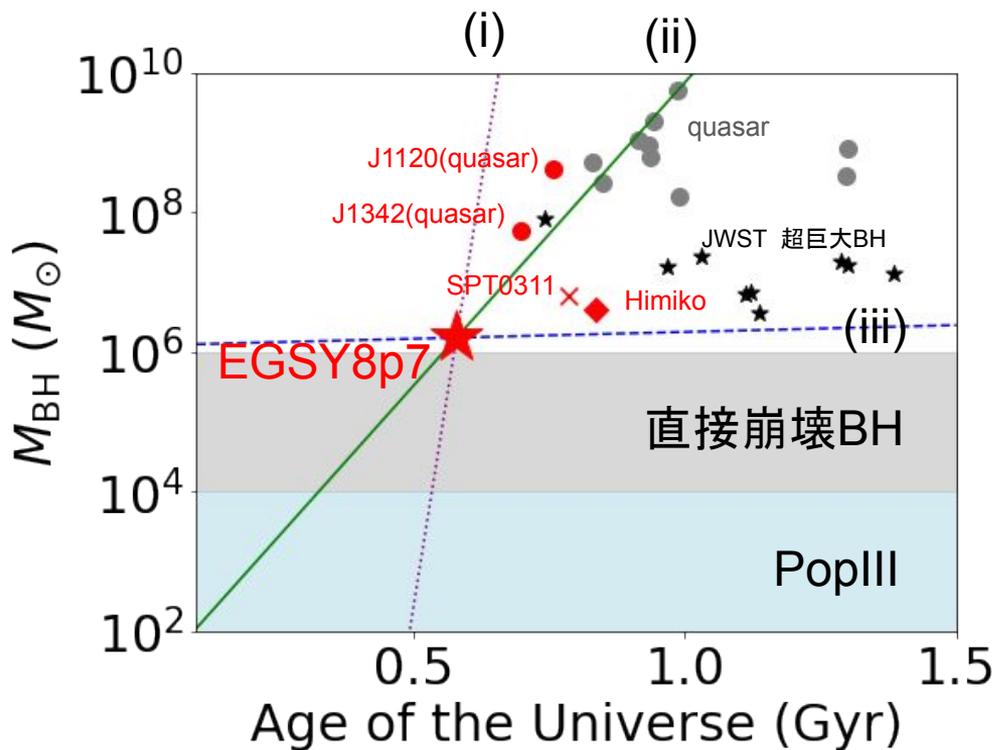
⇒ **ブラックホールが存在することと無矛盾**

⇒ **ブラックホールがあってよい**

・BH質量： 1.6×10^6 [太陽質量]

・エディントン比：5.6

考察:ブラックホール の成長過程



BH合体による成長はあまりない
→ガス降着のみを考える

EGSY8p7BHの成長シナリオ3つ

(i) $\Gamma=5.6$ (観測値)

成長した先に天体なし→可能性低い

(ii) $\Gamma=1$ (エディントン光度)

起源: PopIII or 直接崩壊BH

その後: クェーサー

(iii) $\Gamma=0.45$ (JWST 超巨大BHの平均値)

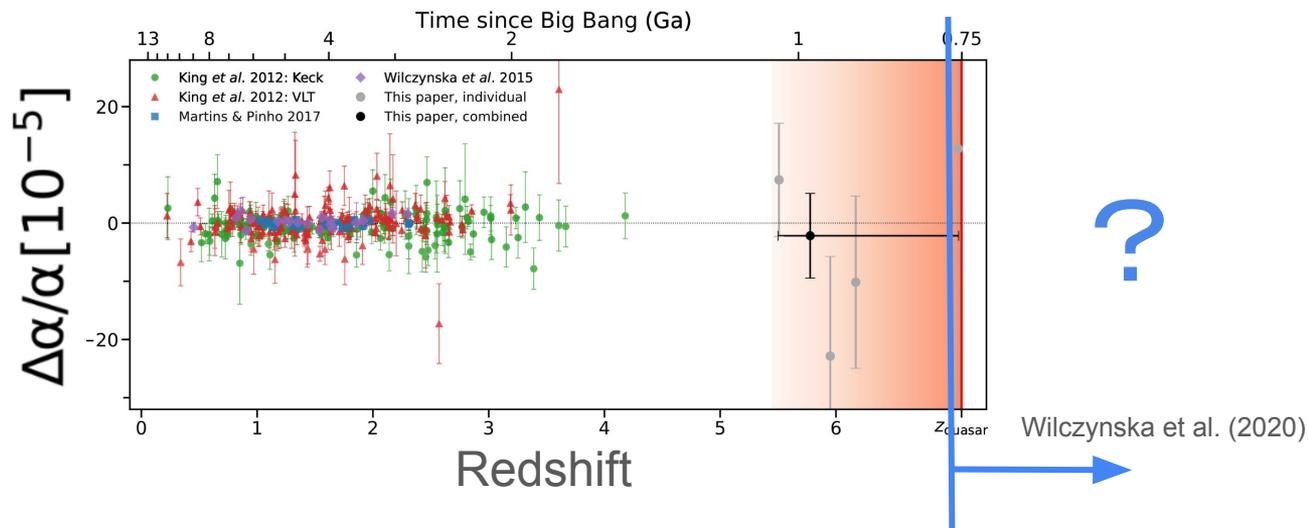
起源: 直接崩壊BH

その後: 他のJWST 超巨大BHと同様

微細構造定数の時間依存性 上條

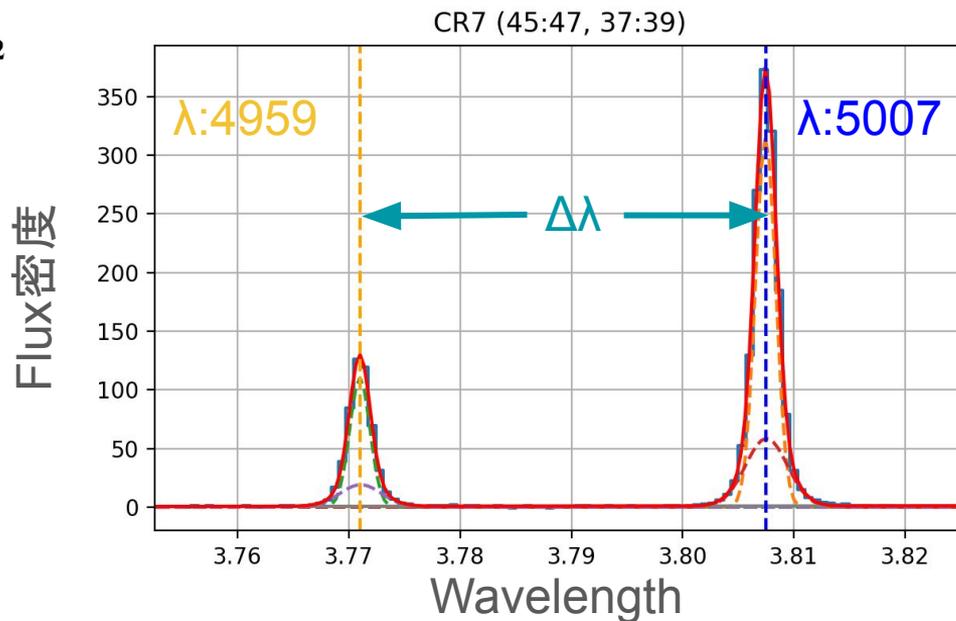
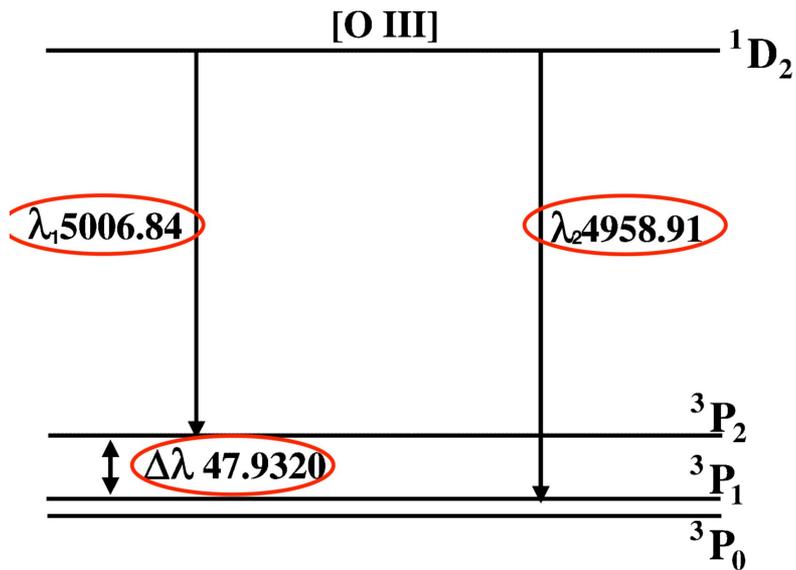
微細構造定数と宇宙論

- 微細構造定数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$ 多くの量子重力理論では変化
→ 初期宇宙での観測から理論を制限
- 先行研究は赤方偏移7以下



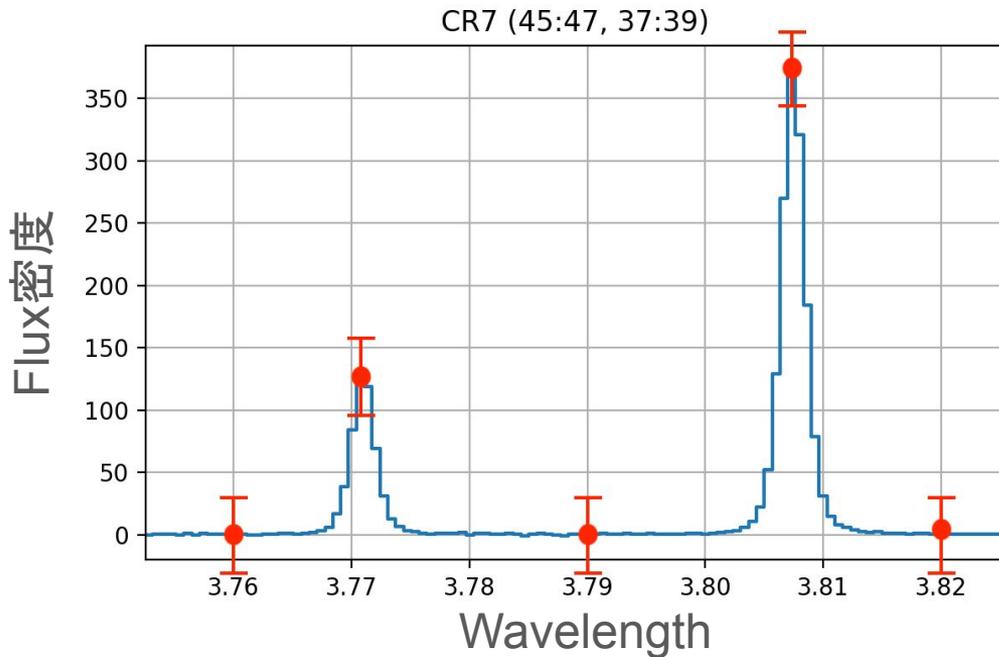
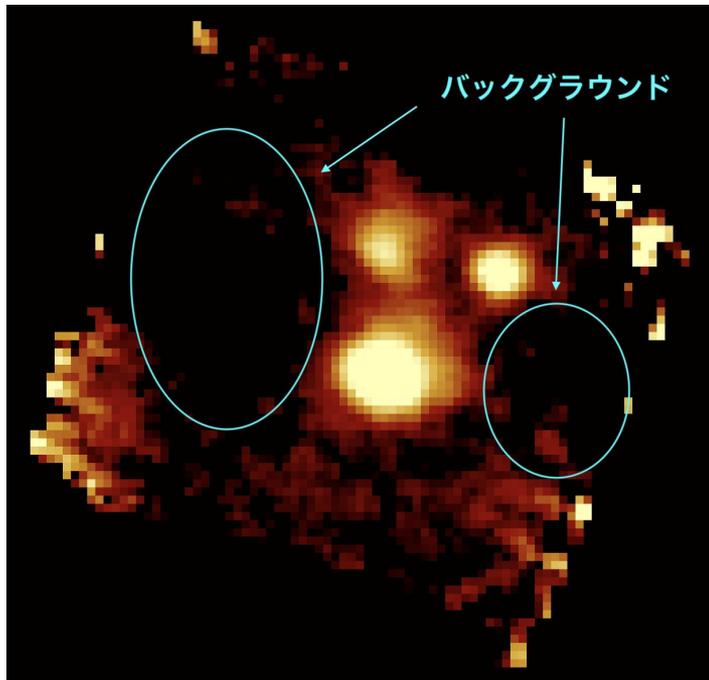
解析手法:[O III]中心波長とその差に注目

- 分裂幅 $\propto \alpha^2$ $\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1 + \lambda_2} \Big|_z / \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1 + \lambda_2} \Big|_{z=0} - 1 \right)$



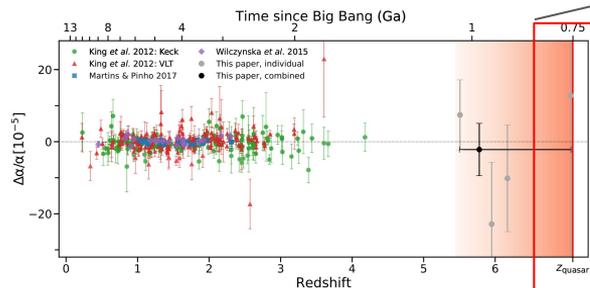
中心波長の誤差評価

- バックグラウンドエラーを用いてモンテカルロフィッティング
 - 5000回の試行→頻度分布の分散＝誤差



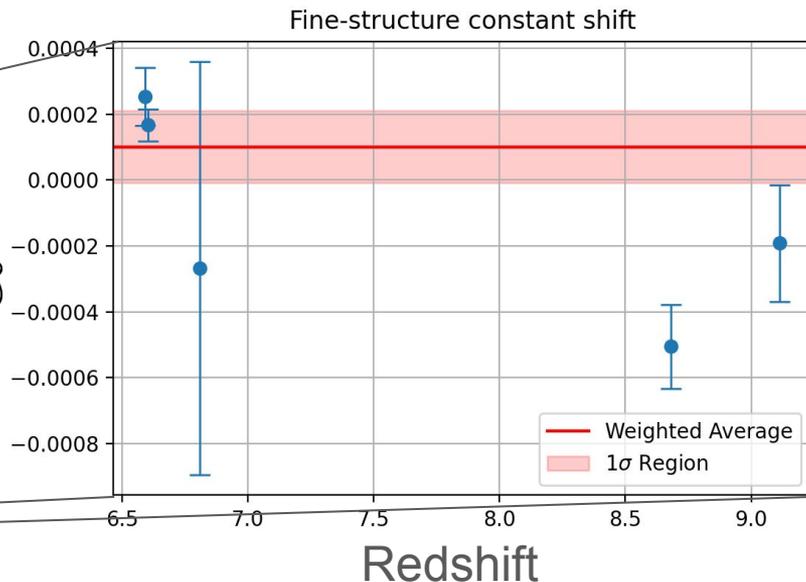
結果

- 赤方偏移7以上で微細構造定数を制限
- 微細構造定数は変化していない



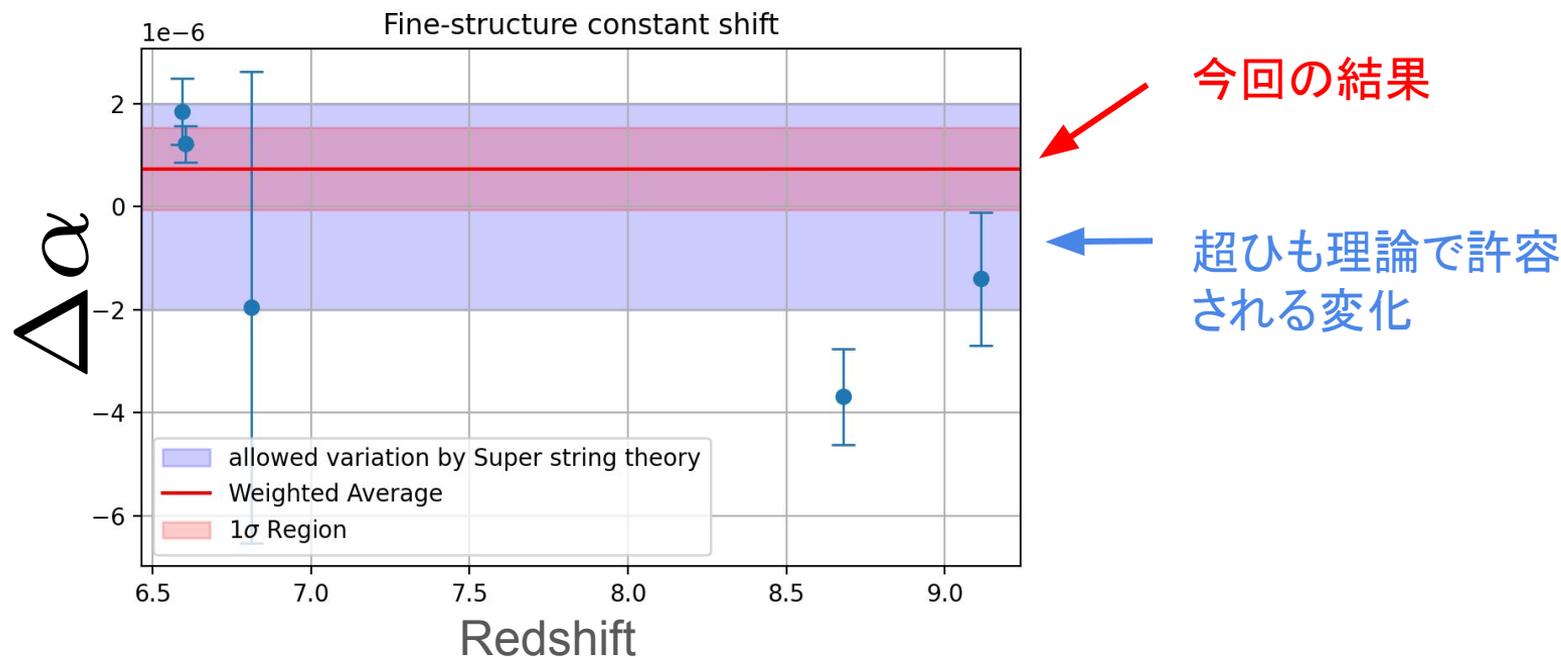
?

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$$



考察：理論モデルとの比較

- 超ひも理論の予言 $\Delta\alpha \lesssim 2 \times 10^{-6}$ (2003))と無矛盾



まとめ

JWSTの分光・撮像データを解析

- 形成初期の銀河
 - 強いLy α と大きいN/O: 大質量星が多い→大量の電離光子→水素を電離→強いLy α
- 形成初期のブラックホール
 - ブラックホール合体は頻繁には起こっていなさそう→ガス降着: 3つのシナリオ
- 微細構造定数は現在と有意な変化なく、 $z=6.5\sim 9$ で超ひも理論と無矛盾

今後行うべき研究

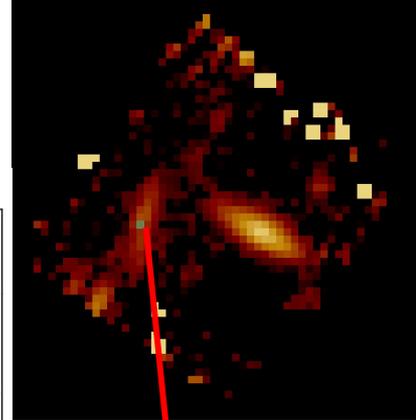
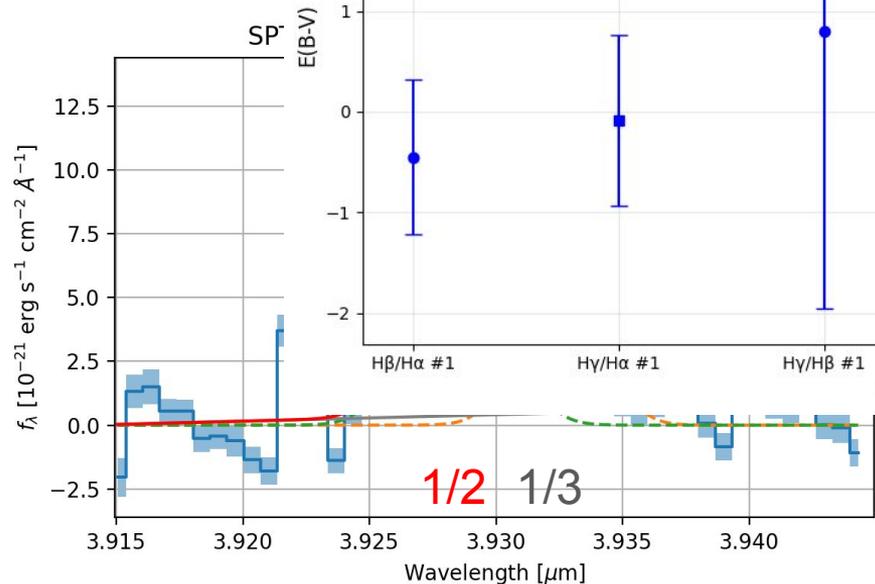
SPT-0311の明るい領域・OIII5007が2つ→2つの天体

OIII4959も2つ:た

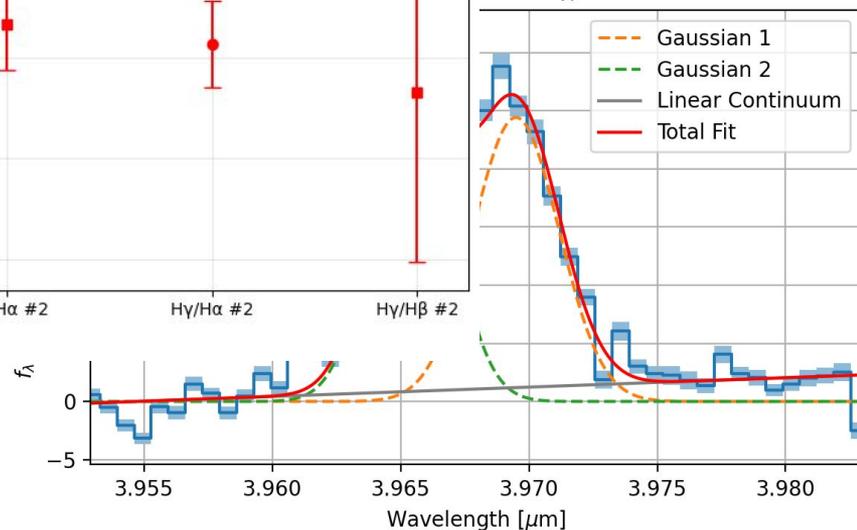
量子力学: $f(\text{OIII4}$

ダスト減光か? —

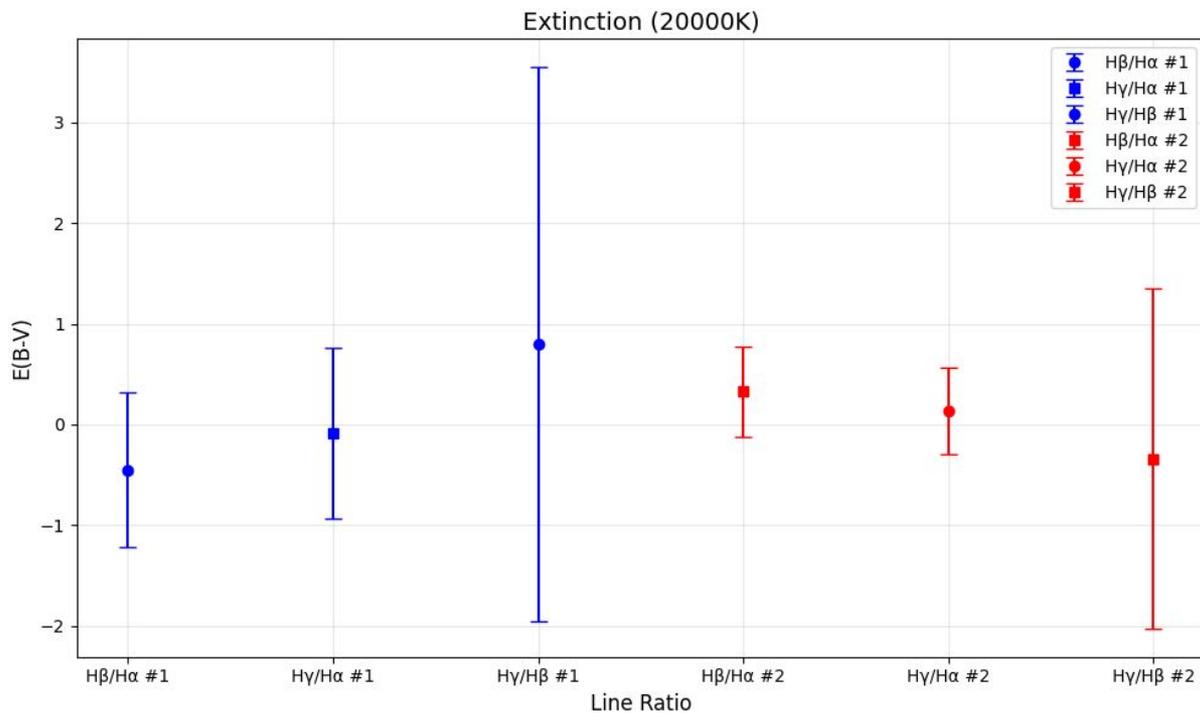
理由は分からず:



27:29), AIC=63.03

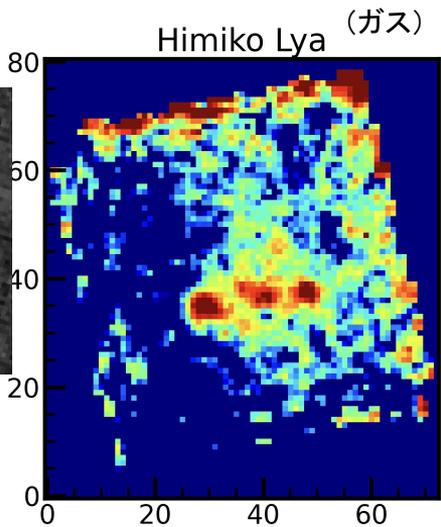
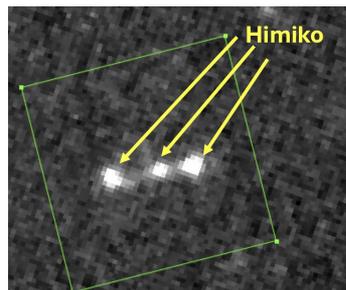


今後行うべき研究

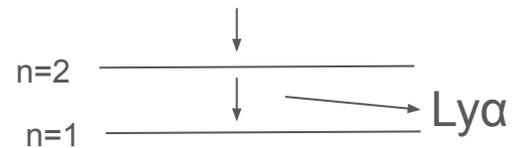
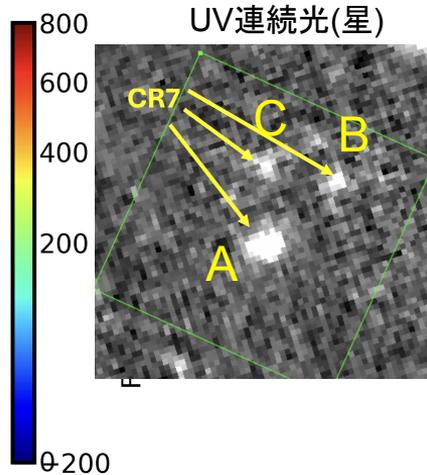


バックアップスライド

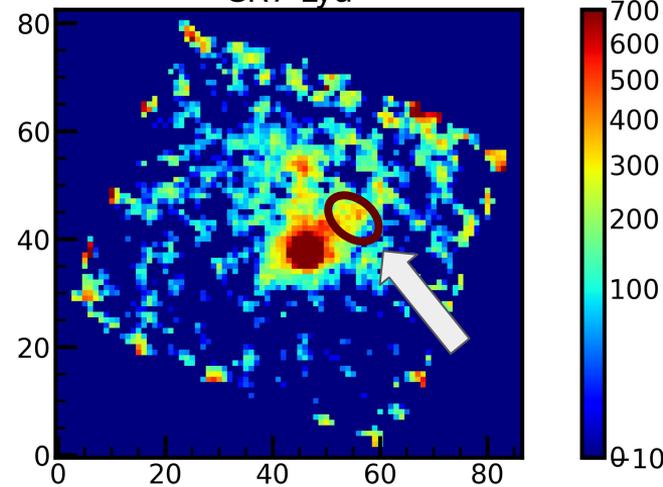
UV連続光(星)



UV連続光(星)



CR7 Ly α (ガス)



CR7 A, B間でLy α のみが強い領域を見つけた!

スペクトルの評価方法

- Ly α のEquivalent Width (EW, 等価幅)

$$EW = f / f_c \text{ (EW > 240ならPopIIIか衝突励起)}$$

ガスの光 \nwarrow \nearrow 星の光

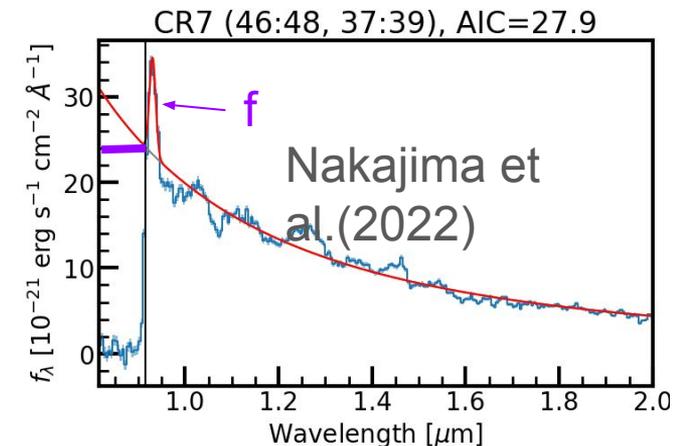
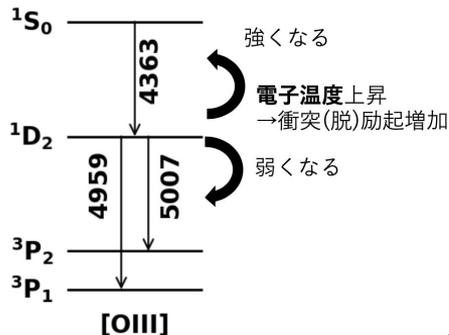
- Ly α /H α の値

通常 < 8.6 衝突励起で > 8.6

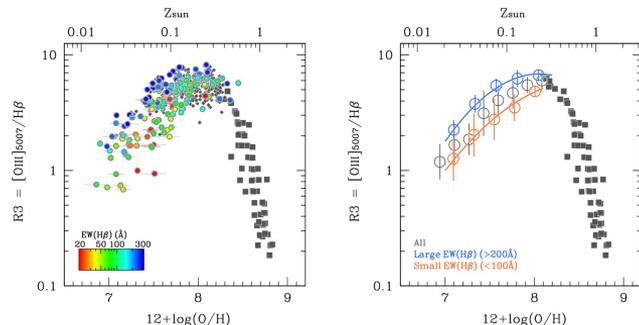
- 重元素の量 (O/Hの値)

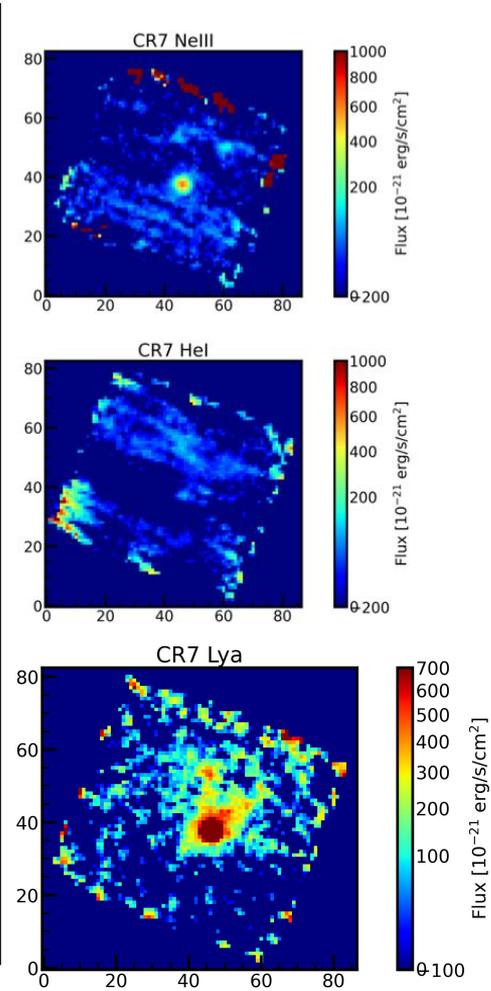
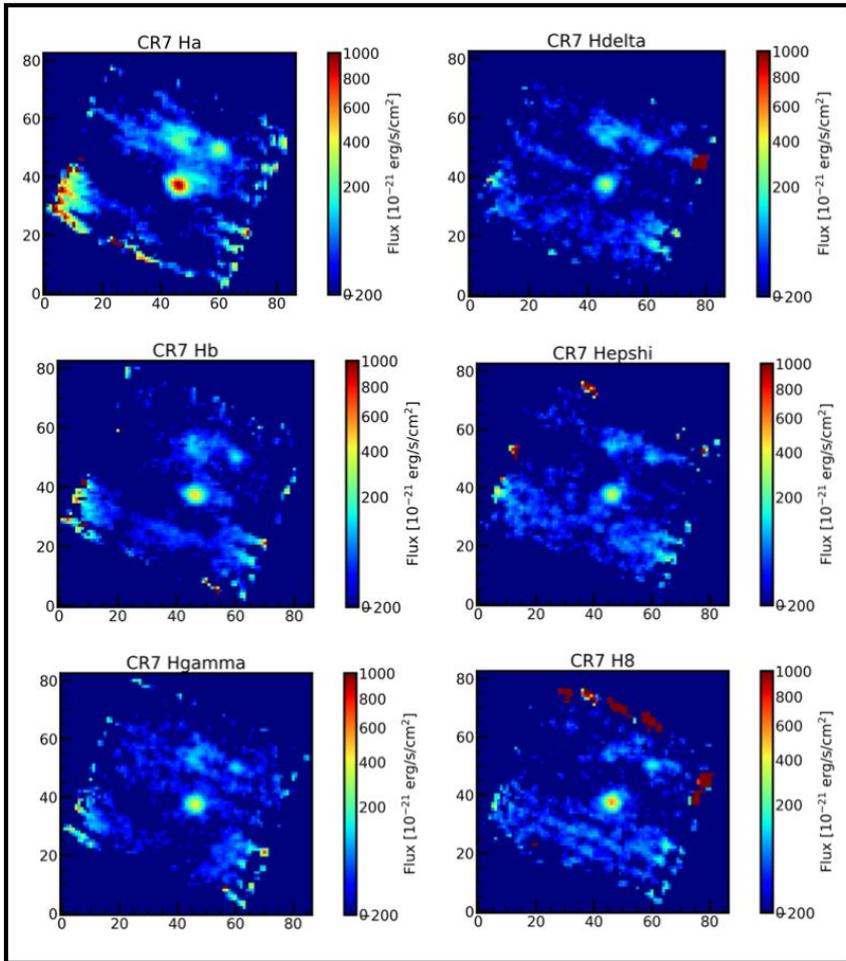
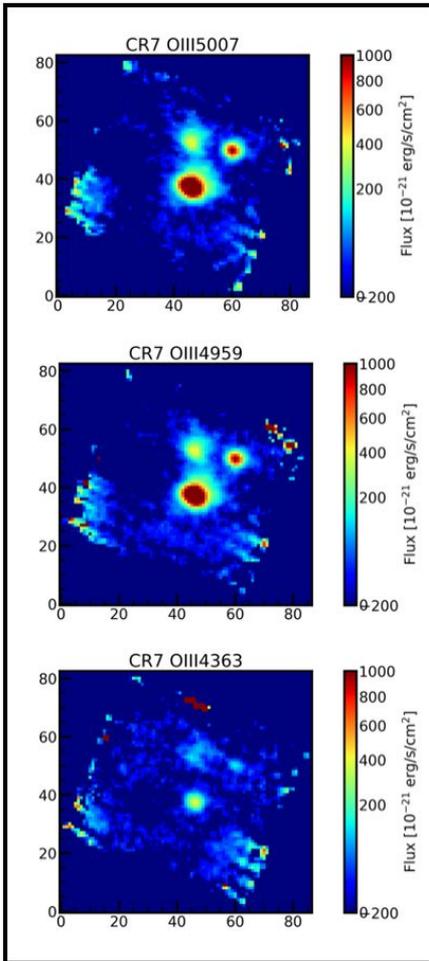
直接電子温度法

$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{2+}}{H^+}$$



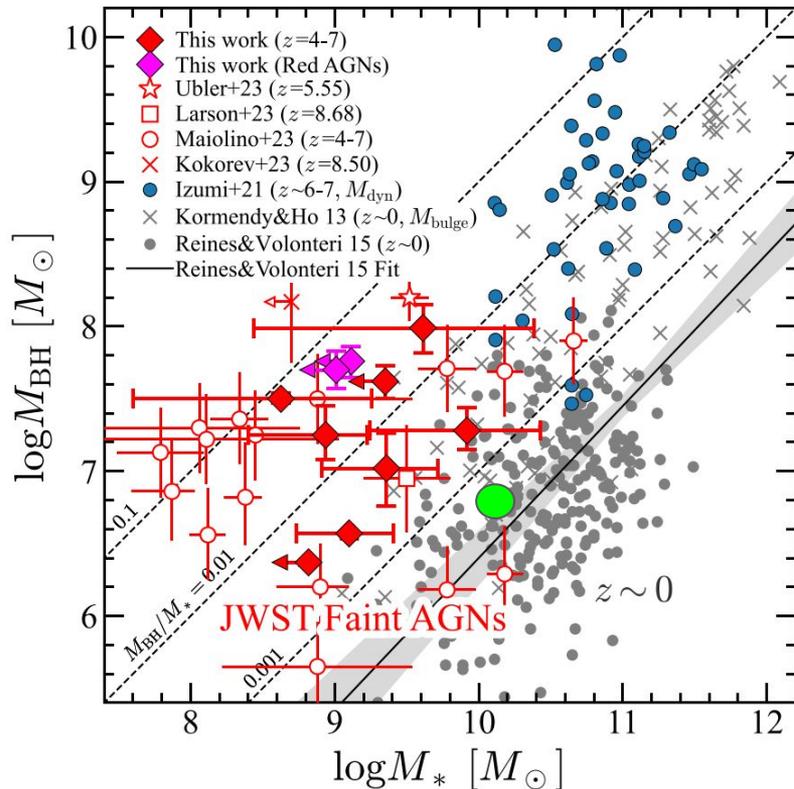
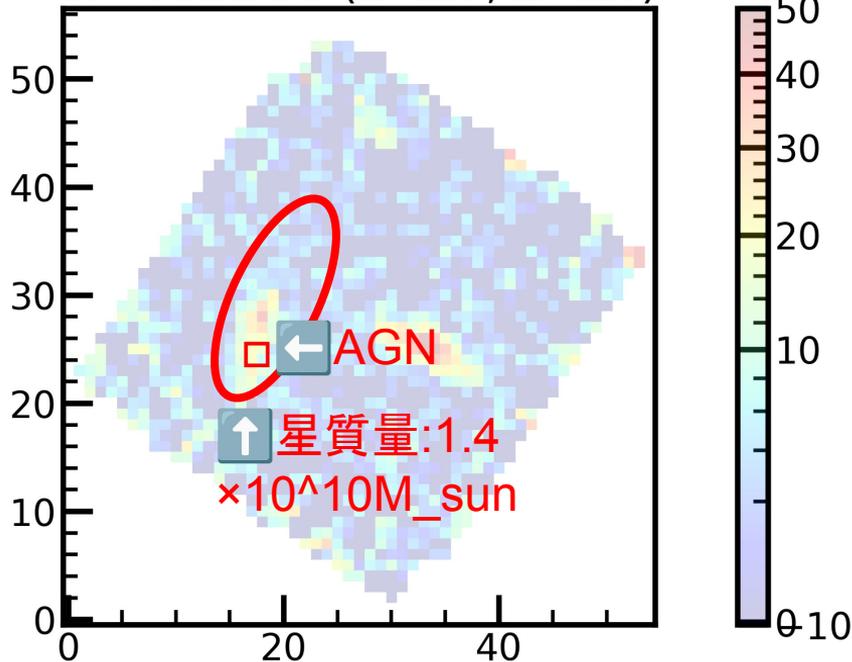
強輝線法





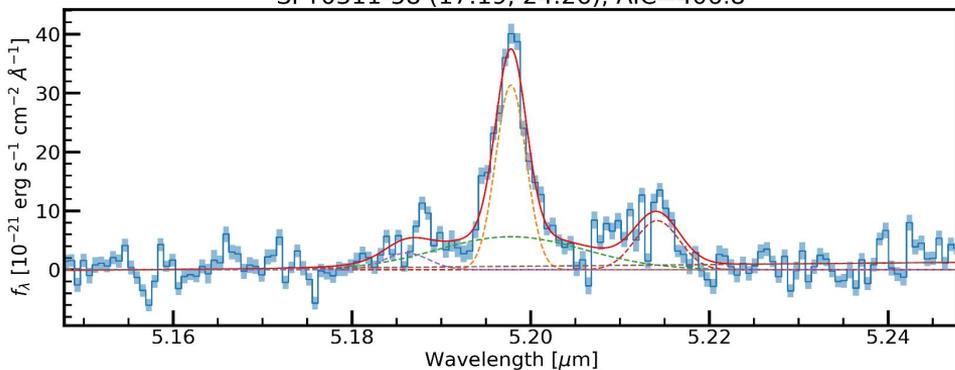
銀河合体による星形成？

SPT0311-58 (17:19, 24:26)



SPT0311にブラックホールがありそう(E4)

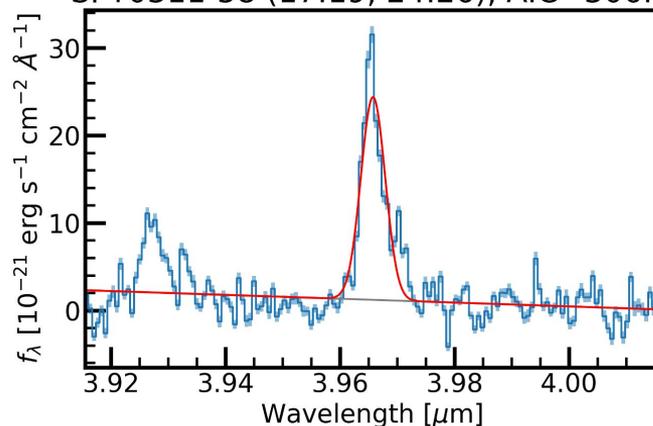
SPT0311-58 (17:19, 24:26), AIC=406.8



FWHM(broad): 1112 km/s

FWHM(narrow): 231 km/s

SPT0311-58 (17:19, 24:26), AIC=306.4



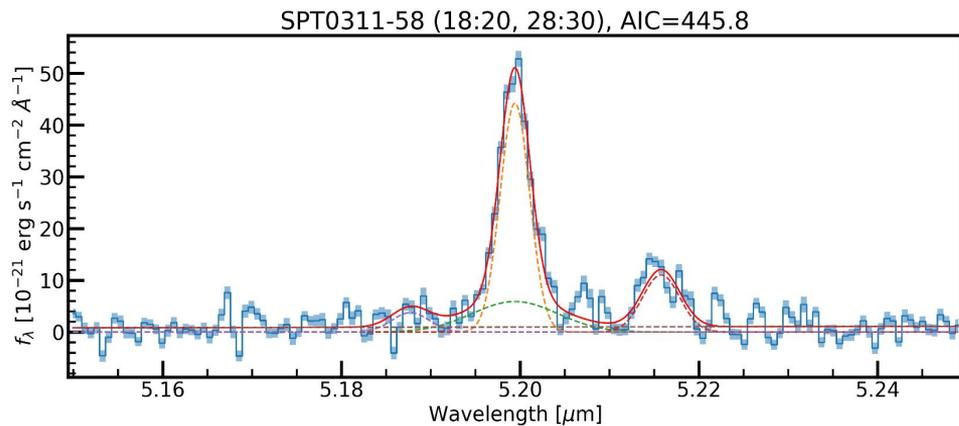
FWHM: 367 km/s

$$M_{\text{BH}} = (2.0^{+0.4}_{-0.3}) \times 10^6 \left(\frac{L_{\text{H}\alpha}}{10^{42} \text{ ergs s}^{-1}} \right)^{0.55 \pm 0.02} \left(\frac{\text{FWHM}_{\text{H}\alpha}}{10^3 \text{ km s}^{-1}} \right)^{2.06 \pm 0.06} M_{\odot}$$

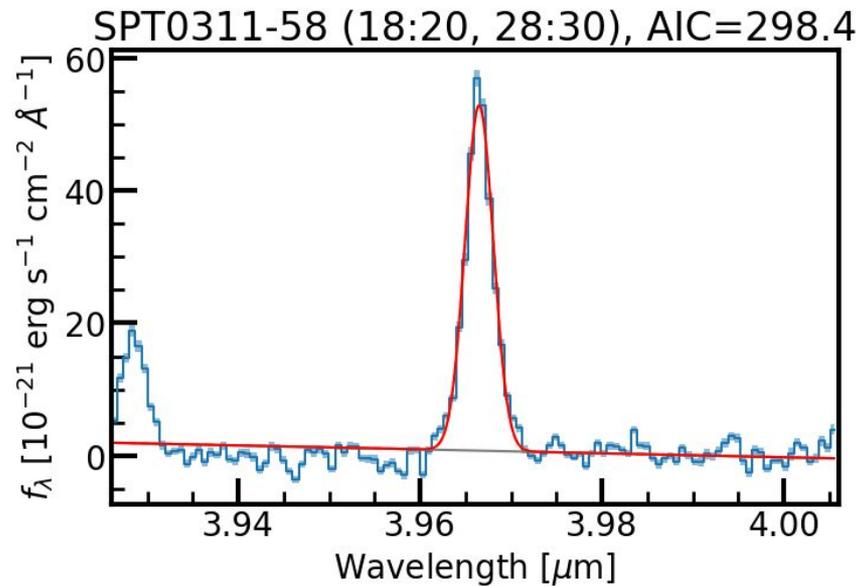
ブラックホールの質量: 6.3×10^6

E2, E3にはあり
そう、image
planeの画像、E1
からE4まで調べ

E3



H α



ブラックホールの質量: $7.3 \times 10^6 M_{\text{sun}}$

球対称降着とした場合のブラックホール 質量

$$M = M_{\text{obs}} \cdot \exp(\Gamma \cdot 20 \cdot (\text{age of universe} - 0.579))$$

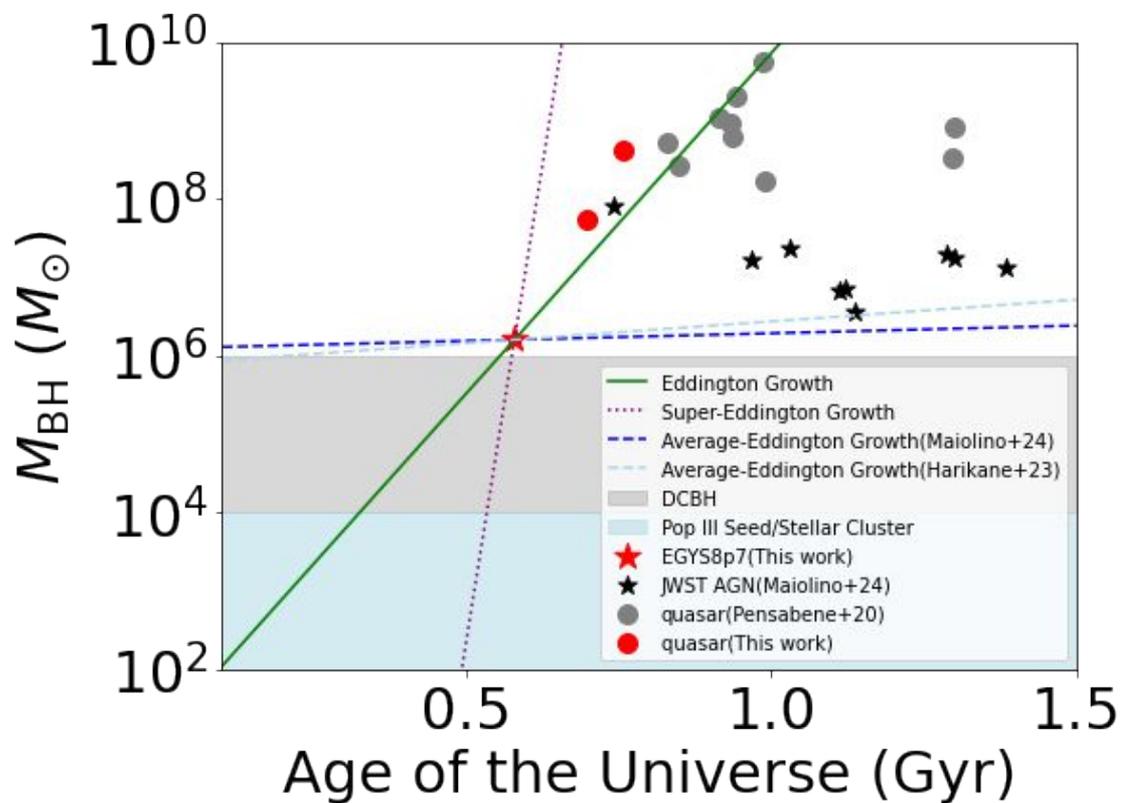
$$M_{\text{obs}} = 1.6 \cdot 10^6 [\text{太陽質量}]$$

$$t_{\text{obs}} = 0.579 [\text{Gyr}]$$

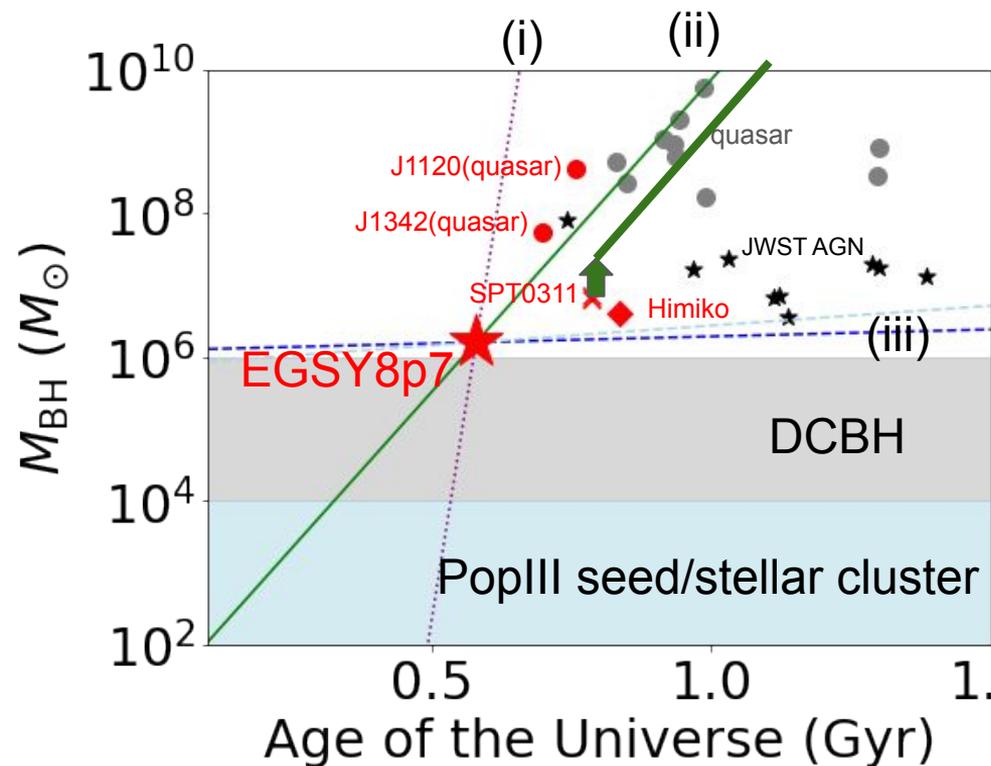
$$M = M_0 \exp(\Gamma \cdot \varepsilon / (1 - \varepsilon) \cdot (\text{age of universe} - t_0) / t_E)$$

用いた仮定

- ・エディントン比 Γ 一定(実際にはエディントン比は時間依存するが、簡単のため)
- ・ $\varepsilon = 0.1$
- ・球対称降着(実際にはスーパーエディントンがおきているので球対称降着ではないだろうが、簡単のため)



考察: ブラックホール の成長過程



EGSY8p7ブラックホールの成長シナリオ

(i) $\Gamma=5.6$ (観測値)

成長した先に天体なし \rightarrow 可能性低い

(ii) $\Gamma=1$ (エディントン限界)

起源: Pop III or DCBH

その後: クェーサー

(iii) $\Gamma=0.45, 1.3$ (JWST AGNの平均値)

起源: DCBH

その後: 他のJWST AGNと同様

※もし今後他のBHと合体したら?

\rightarrow 成長曲線が僅かに上に平行移動するだけ

\square 成長シナリオに大きな影響を与えない

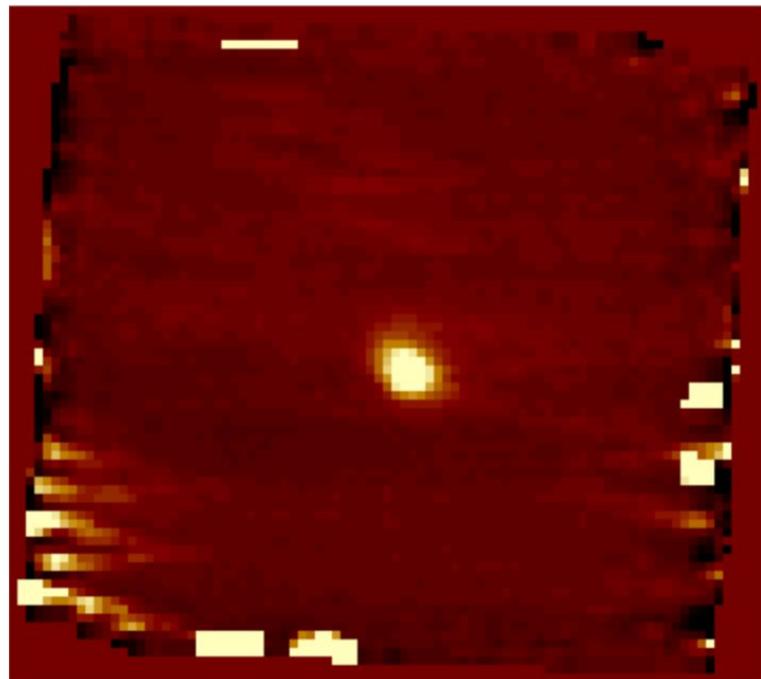
ブラックホール

すでにブラックホールの存在が分かっている銀河

- Himiko ▪ J1120
($z=6.59$) ($z=7.09$)
- J1342
($z=7.54$)

ブラックホールが存在する銀河の候補

- SPT0311-58
($z=6.90$)
- **EGSY8p7**(最遠方！)
($z=8.68$)



ブラックホール

すでにブラックホールの存在が分かっている銀河

- Himiko ▪ J1120
($z=6.59$) ($z=7.09$)
- J1342
($z=7.54$)

ブラックホールが存在する銀河の候補

- SPT0311-58(複数?)
($z=6.90$)
- EGSY8p7
($z=8.68$)

