

# 觀測的宇宙論班

奧村、玉置、武知、平山、田中

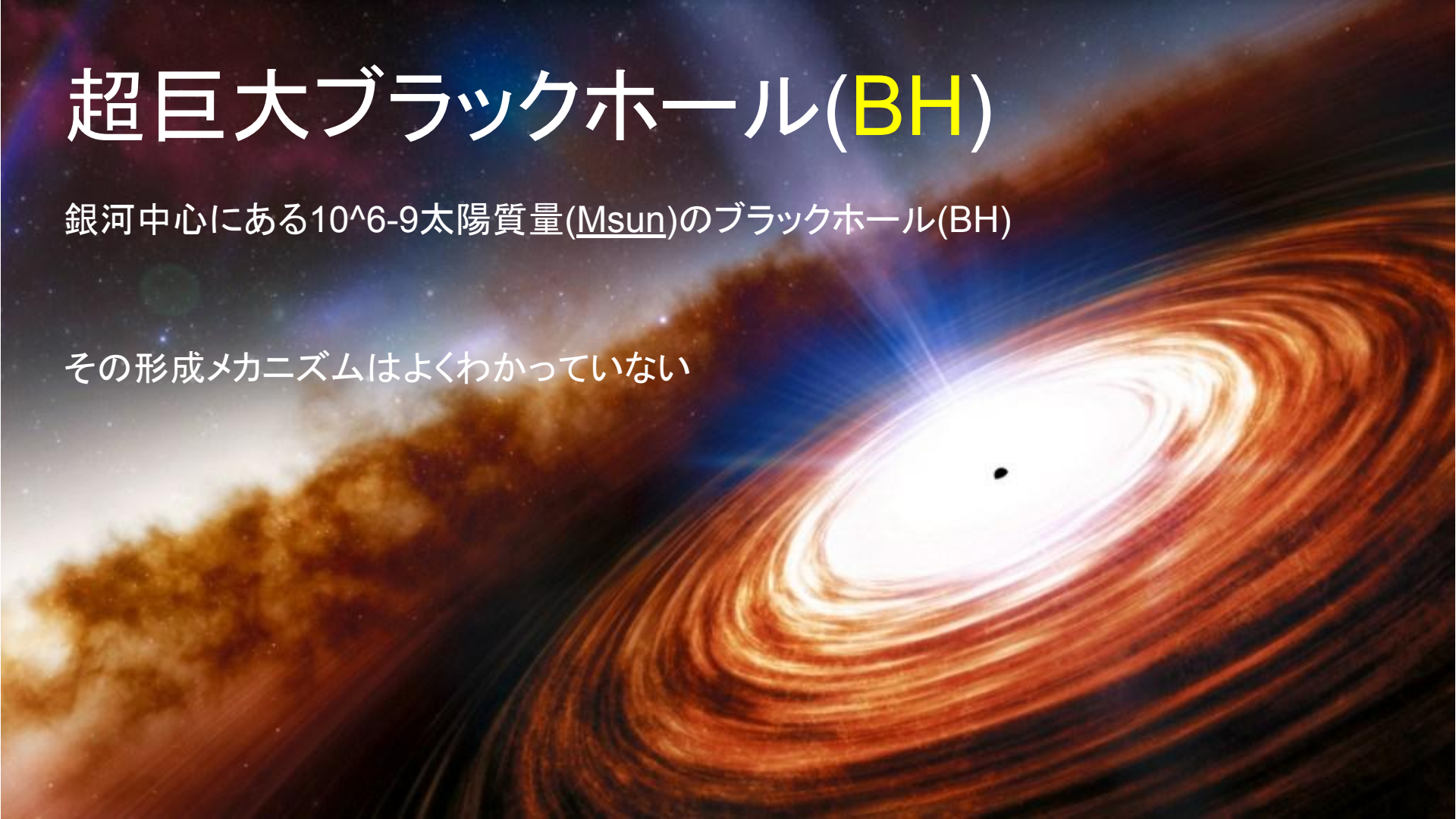
# イントロダクション

奥村

# 超巨大ブラックホール(BH)

銀河中心にある $10^6$ - $9$ 太陽質量(Msun)のブラックホール(BH)

その形成メカニズムはよくわかっていない



# BHの形成過程

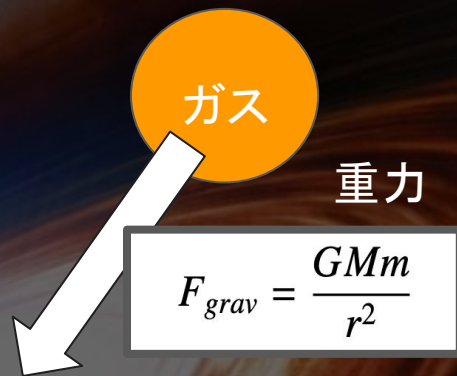
重力によるガス降着

→降着率に応じて質量獲得

→同時に(摩擦)降着率に比例し光放射

明るく輝きながら質量降着に

より成長⇒AGN



$$\frac{dM_{BH}}{dt} = (1 - \epsilon)\dot{M}_{acc}$$
$$L = \epsilon\dot{M}_{acc}c^2$$

# BHの形成過程

重力によるガス降着

→降着率に応じて質量獲得

→同時に(摩擦)降着率に比例し光放射

明るく輝きながら質量降着に

より成長⇒AGN

輻射圧を受け、降着率に上限

⇒エディントン光度 ( $L_{\text{Edd}}$ )

$$\frac{dM_{BH}}{dt} = (1 - \epsilon)\dot{M}_{acc}$$
$$L = \epsilon\dot{M}_{acc}c^2$$

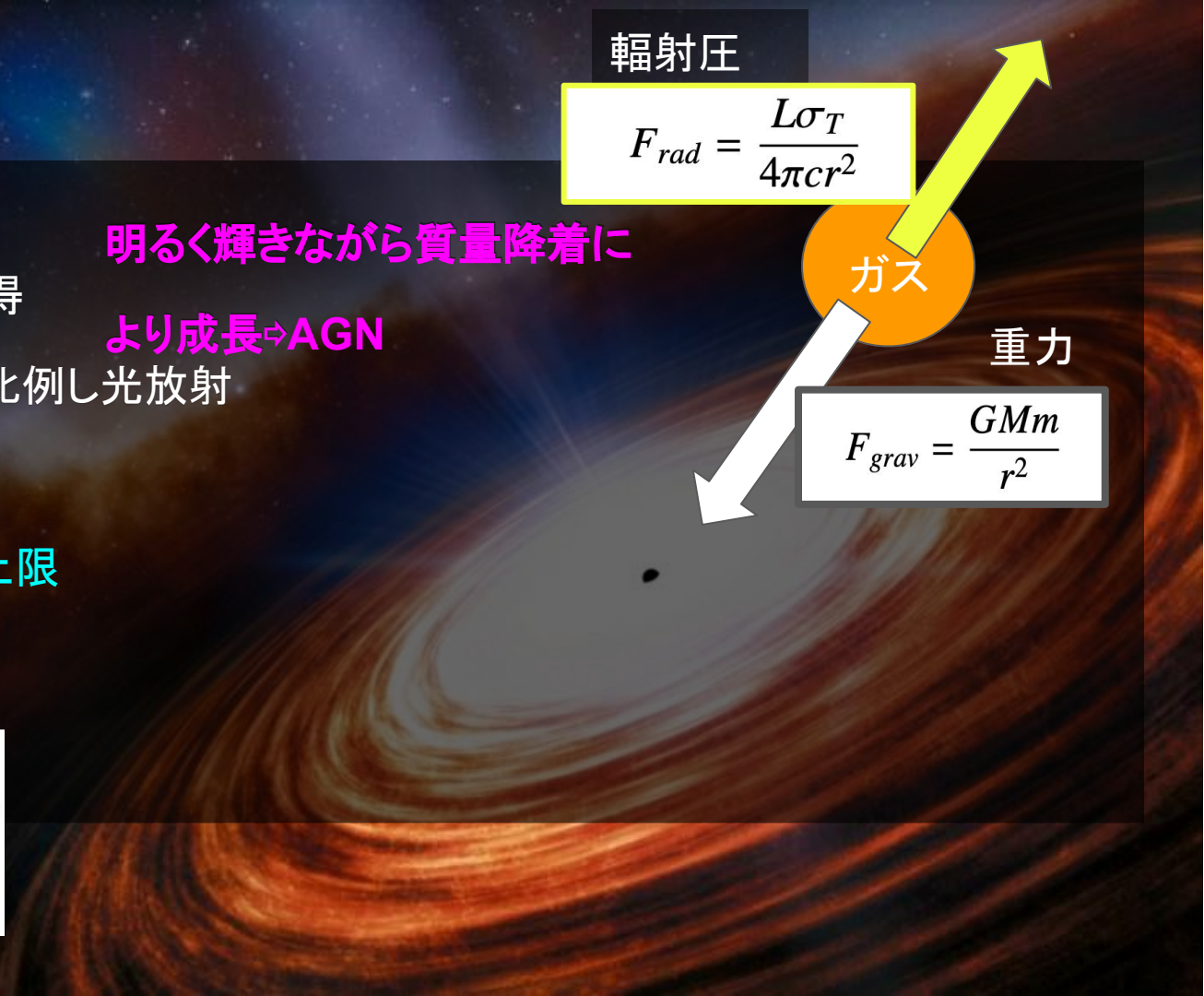
輻射圧

$$F_{rad} = \frac{L\sigma_T}{4\pi cr^2}$$

ガス

重力

$$F_{grav} = \frac{GMm}{r^2}$$



# BHの形成過程

重力によるガス降着

→降着率に応じて質量獲得

→同時に(摩擦)降着率に比例し光放射

明るく輝きながら質量降着に

より成長⇒AGN

輻射圧を受け、降着率に上限

⇒エディントン光度 ( $L_{\text{Edd}}$ )

$$\frac{dM_{BH}}{dt} = (1 - \epsilon)\dot{M}_{acc}$$
$$L = \epsilon\dot{M}_{acc}c^2$$

実際の光度と $L_{\text{Edd}}$ の比

⇒エディントン比( $r_{\text{edd}}$ )

質量降着の効率の良さの指標

$$r_{\text{edd}} = \frac{L}{L_{\text{edd}}}$$

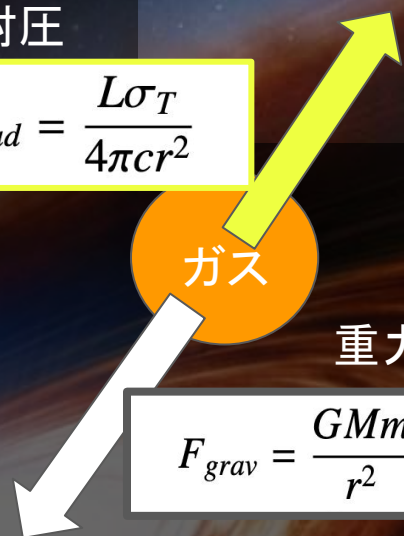
輻射圧

$$F_{\text{rad}} = \frac{L\sigma_T}{4\pi cr^2}$$

ガス

重力

$$F_{\text{grav}} = \frac{GMm}{r^2}$$



# BHの形成過程

重力によるガス降着

→降着率に応じて質量獲得

→同時に(摩擦)降着率に比例し光放射

明るく輝きながら質量降着に

より成長⇒AGN

輻射圧

$$F_{rad} = \frac{L\sigma_T}{4\pi cr^2}$$

ガス

重力

$$F_{grav} = \frac{GMm}{r^2}$$

輻射圧を受け、降

$$\therefore M_{BH} = M_0 \exp\left(r_{edd} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{t_1 - t_2}{\tau}\right)$$

⇒エディントン光度 ( $L_{Edd}$ )

実際の光度と $L_{Edd}$ の比

⇒エディントン比( $r_{edd}$ )

質量降着の効率の良さの指標

$$\frac{dM_{BH}}{dt} = (1 - \epsilon)\dot{M}_{acc}$$
$$L = \epsilon\dot{M}_{acc}c^2$$

$$r_{edd} = \frac{L}{L_{edd}}$$

# 超巨大BH成長の問題

最初にできたBH=種BH(~100Msun:恒星BH)

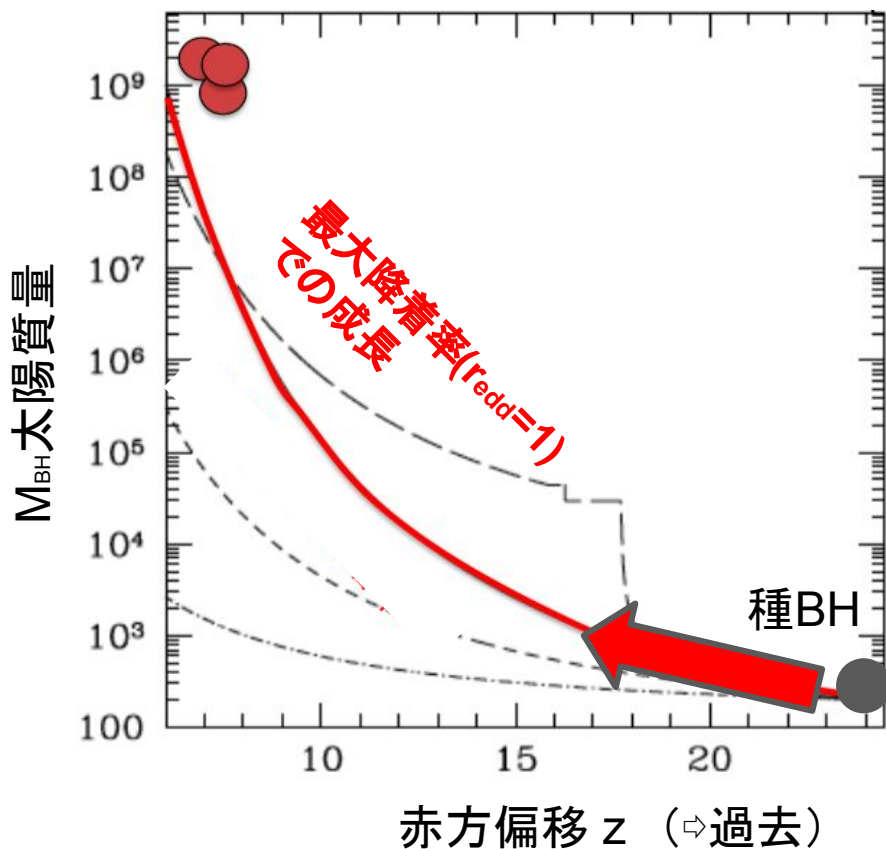
先行研究:遠方超巨大BHの発見

⇨常にエディントン降着

( $r_{\text{edd}}=1$ 、質量降着の上限)

でも説明できない

$$M_{BH} = M_0 \exp\left(r_{\text{edd}} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{t_1 - t_2}{\tau}\right)$$





# 超巨大BH成長の問題

最初にできたBH=種BH(~100Msun:恒星BH)

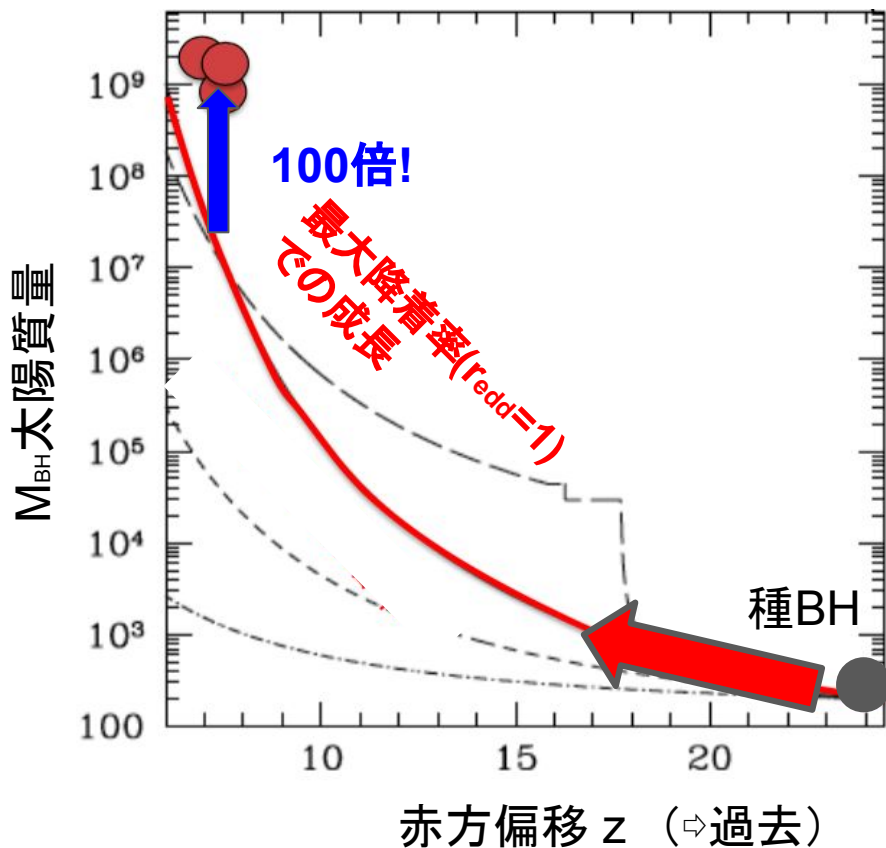
先行研究:遠方超巨大BHの発見

⇨常にエディントン降着

( $r_{\text{edd}}=1$ 、質量降着の上限)

でも説明できない

$$M_{BH} = M_0 \exp\left(r_{\text{edd}} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{t_1 - t_2}{\tau}\right)$$



# 我々の考えた4つの可能性

提案する成長シナリオ

## 1. BH同士の合体頻度 $p$ を上げる

ブラックホール同士の衝突合体により質量降着以上に成長

## 2. エディントン比 $r_{\text{edd}}$ を上げる

降着率がエディントン降着よりも大きい

## 3. 放射効率 $\epsilon$ を下げる

ガスがあまり光にならない

## 4. 種BHの質量 $M_0$ を上げる

より重い種BH

$$M_{BH} = M_0 \exp\left(r_{\text{edd}} \frac{1 - \epsilon t_1 - t_2}{\epsilon \tau}\right)$$

1.)



# 我々の考えた4つの可能性

提案する成長シナリオ

## 1. BH同士の合体頻度 $p$ を上げる

ブラックホール同士の衝突合体により質量降着以上に成長

## 2. エディントン比 $r_{\text{edd}}$ を上げる

降着率がエディントン降着よりも大きい

## 3. 放射効率 $\epsilon$ を下げる

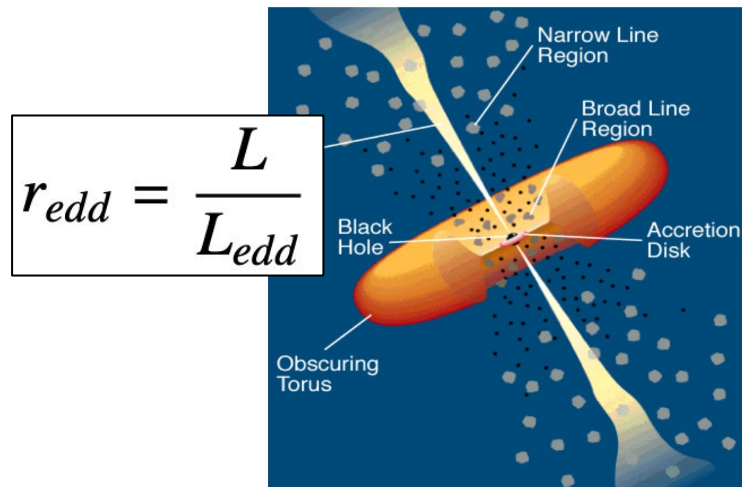
ガスがあまり光にならない

## 4. 種BHの質量 $M_0$ を上げる

より重い種BH

$$M_{BH} = M_0 \exp\left(r_{\text{edd}} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \frac{t_1 - t_2}{\tau}\right)$$

1.)



$$r_{\text{edd}} = \frac{L}{L_{\text{edd}}}$$

# 我々の考えた4つの可能性

提案する成長シナリオ

## 1. BH同士の合体頻度 $p$ を上げる

ブラックホール同士の衝突合体により質量降着以上に成長

## 2. エディントン比 $r_{\text{edd}}$ を上げる

降着率がエディントン降着よりも大きい

## 3. 放射効率 $\epsilon$ を下げる

ガスがあまり光にならない

## 4. 種BHの質量 $M_0$ を上げる

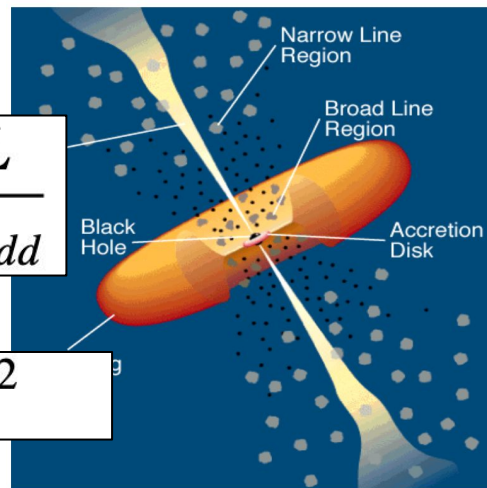
より重い種BH

$$M_{BH} = M_0 \exp\left(\frac{r_{\text{edd}}}{2.}) \frac{1 - \epsilon t_1 - t_2}{\epsilon 3.) \tau}\right)$$

1.)



$$r_{\text{edd}} = \frac{L}{L_{\text{edd}}}$$



$$L = \epsilon \dot{M}_{\text{acc}} c^2$$

# 我々の考えた4つの可能性

提案する成長シナリオ

## 1. BH同士の合体頻度 $p$ を上げる

ブラックホール同士の衝突合体により質量降着以上に成長

## 2. エディントン比 $r_{\text{edd}}$ を上げる

降着率がエディントン降着よりも大きい

## 3. 放射効率 $\epsilon$ を下げる

ガスがあまり光にならない

## 4. 種BHの質量 $M_0$ を上げる

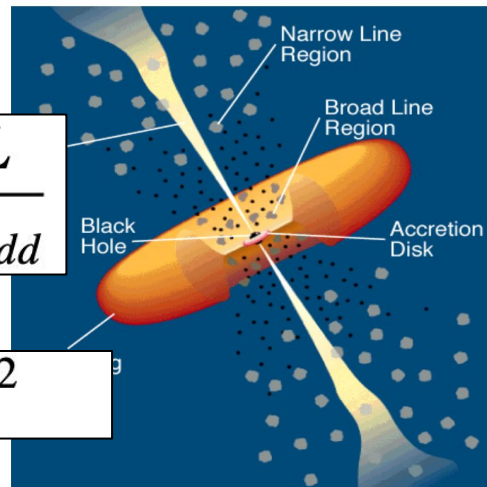
より重い種BH

$$M_{BH} = \underbrace{M_0}_{4.)} \exp\left(\underbrace{r_{\text{edd}}}_{2.)} \frac{1 - \epsilon \underbrace{t_1 - t_2}_{3.)}}{\tau}\right)$$

1.)



$$r_{\text{edd}} = \frac{L}{L_{\text{edd}}}$$



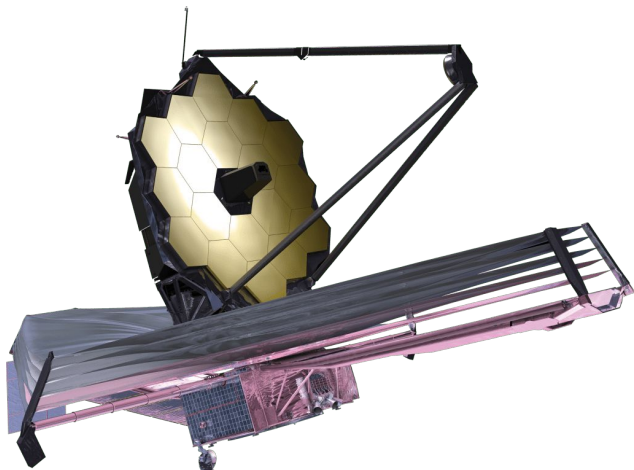
$$L = \epsilon \dot{M}_{\text{acc}} c^2$$

# ジェームスウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)による遠方BHの発見

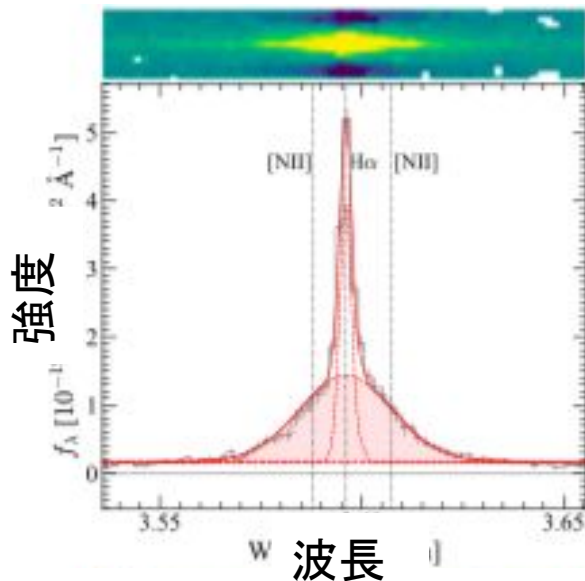
口径6.5mの赤外望遠鏡

2022年から観測開始⇒多くの遠方BHが見つかる

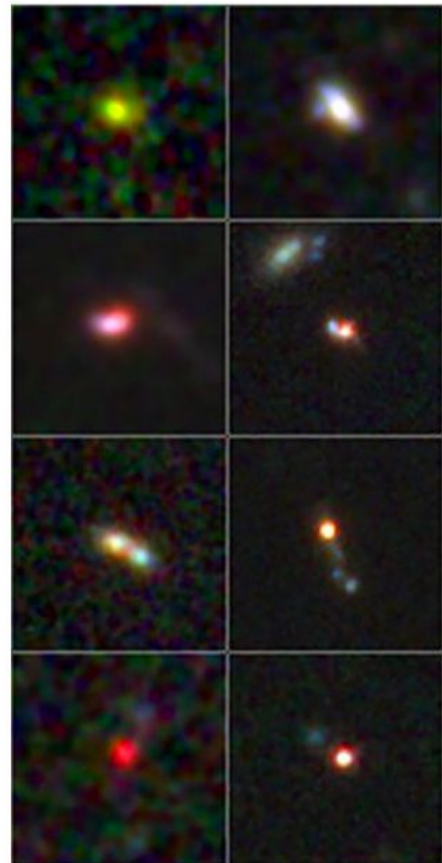
輝線の幅がBHの証拠になる



JWST



Hrikane et al.

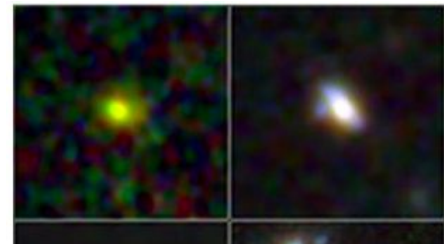
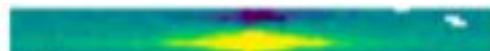


# ジェームスウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)による遠方BHの発見

口径6.5mの赤外望遠鏡

2022年から観測開始⇒多くの遠方BHが見つかる

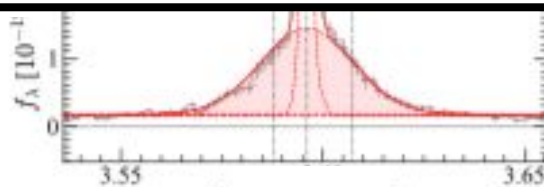
輝線の幅がBHの証拠になる



## JWSTで沢山見つかった超巨大BH の成長は説明可能か？

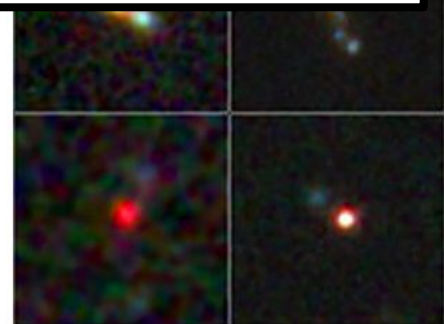


JWST



波長 [μ]

Hrikane et al.



## 本研究の目的

# JWSTで沢山見つかった超巨大BH の成長は説明可能か調べる

## 我々の研究の大まかな流れ

- JWSTのデータから遠方BHを探す
- 発見したBHの特徴を調べる(質量、光度など)
- 成長シナリオを検討



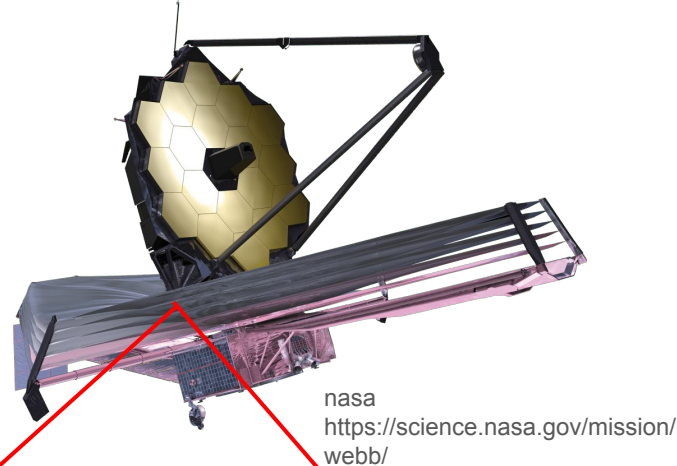
# データとサンプル

玉置

# 観測装置とプログラム

## JWSTの観測装置

- ・分光装置NIRSpec 波長域は近赤外線(0.6-5.3  $\mu\text{m}$ )  
分散素子 prism(R=100), medium resolution(R=1000), high resolution(R=2700)
- ・撮像装置NIRCam  
(本研究では一部ハッブル宇宙望遠鏡の撮像データを代用)



NIRSpec

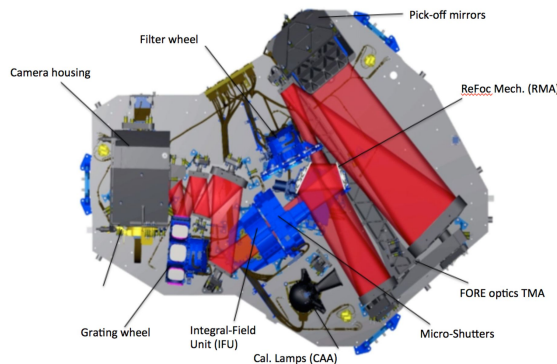
NIRCam

## 初期銀河をターゲットとする

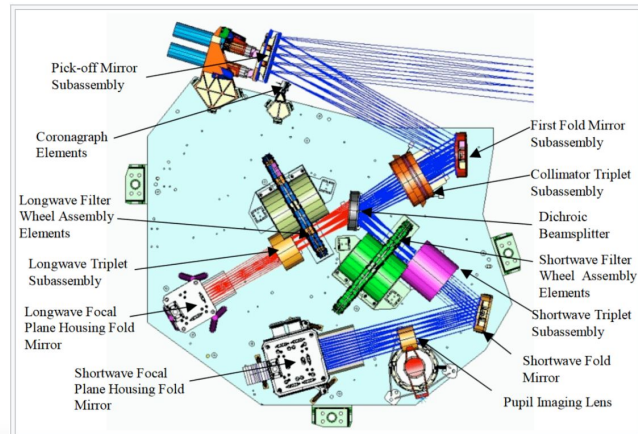
## 観測プログラム

- ・CEERS 79天体
- ・GLASS 16天体
- ・ERO 4天体
- ・JADES 253天体

NIRSpec Optical Design



<https://blogs.nasa.gov/webb/2022/03/03/checking-out-the-mechanisms-in-webbs-nirspec-instrument/>



<https://en.wikipedia.org/wiki/NIRCam>

# データ

分光データ

2次元スペクトル

撮像データ

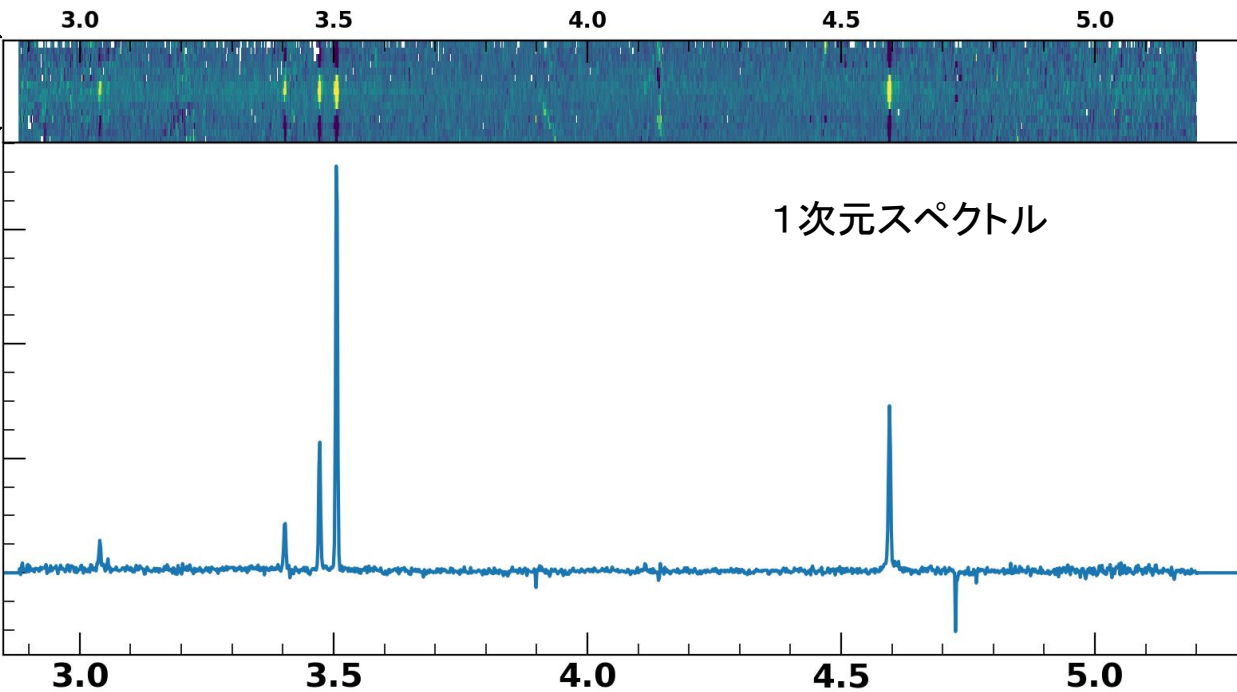
空間方向

光の強度

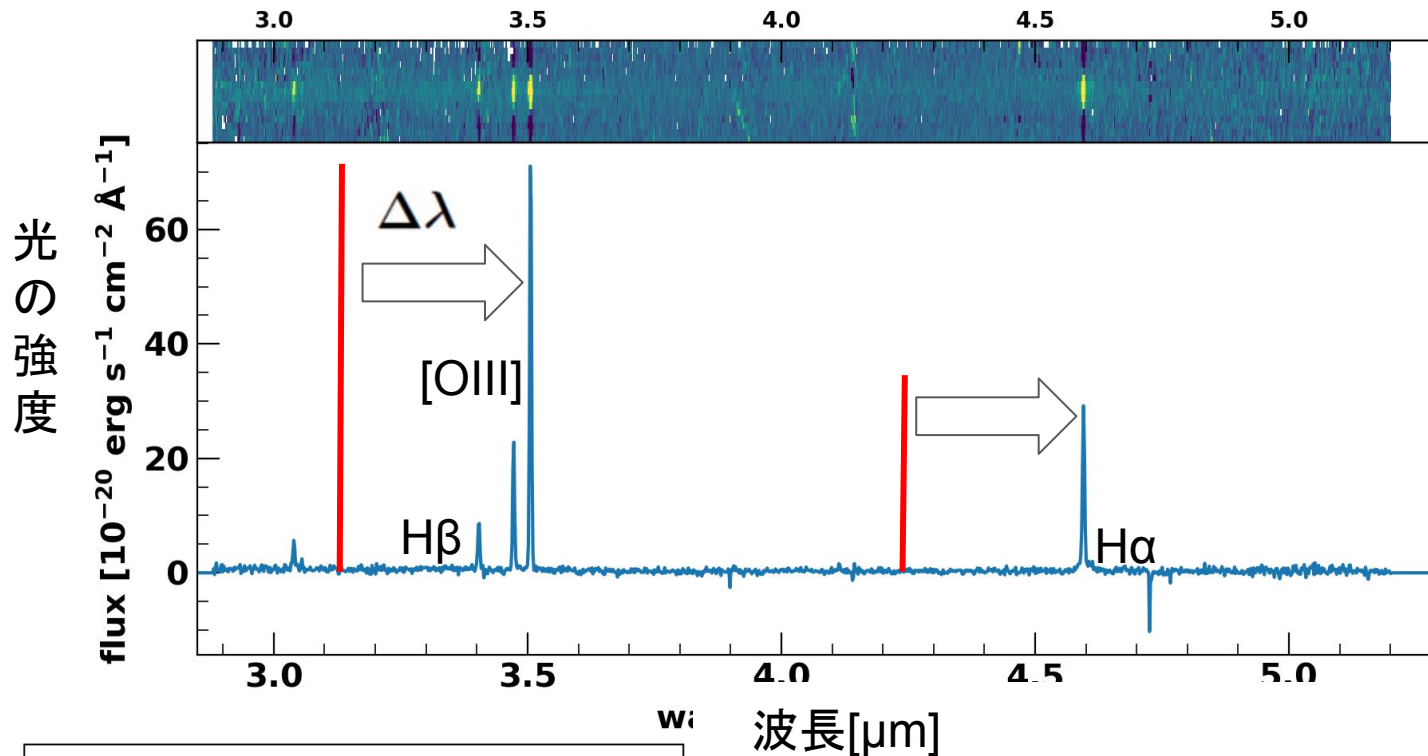
$[10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}]$

1次元スペクトル

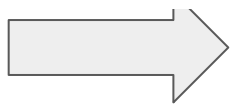
波長 $[\mu\text{m}]$



# データ解析: 赤方偏移



赤方偏移  $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_0} - 1$



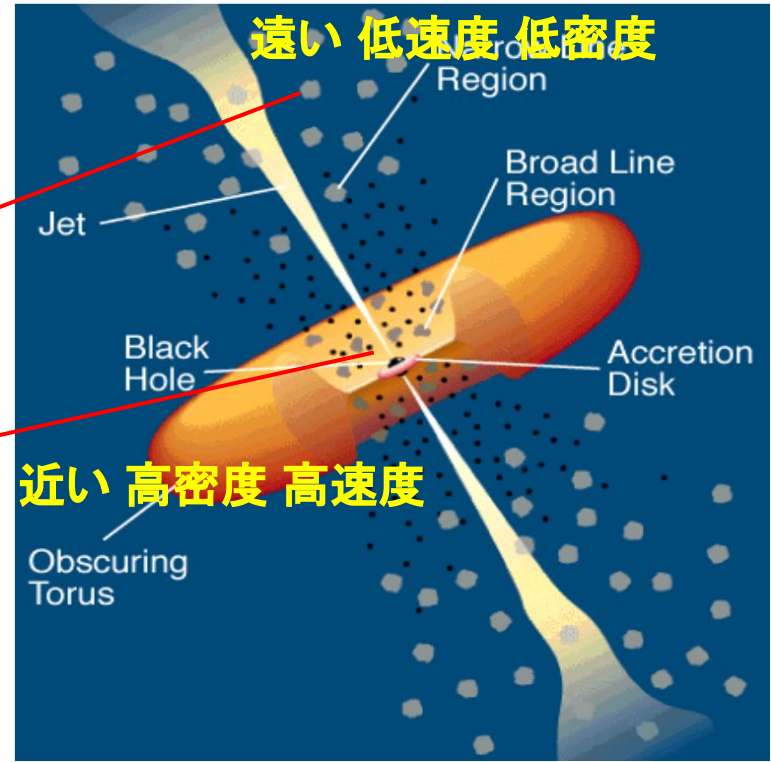
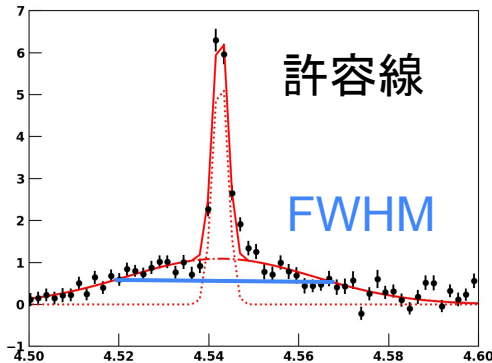
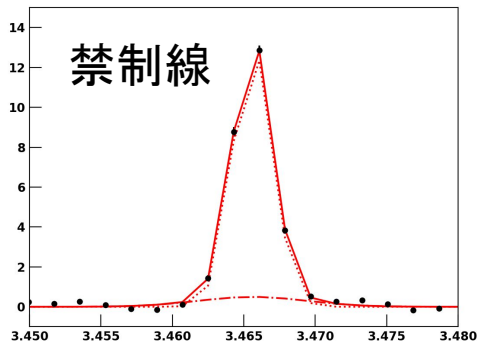
今回の観測  $z=4\sim 6$

# データ解析: 禁制線と許容線

禁制線: 低密度領域からのみ出る([OIII]..

許容線: 高密度領域からも出る( $H\alpha$ ,  $H\beta$ ..

速度分散からBHの近くからの輝線のみ  
広輝線が見える



# データ解析: BHの広輝線

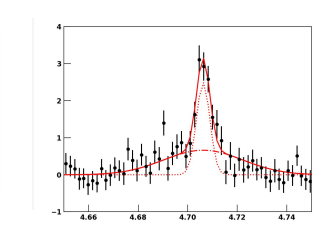
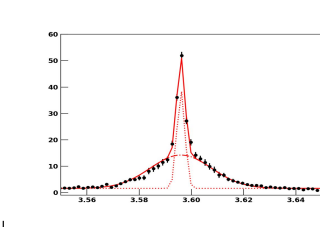
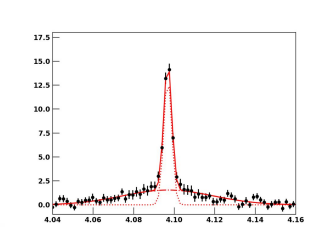
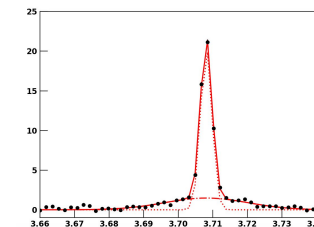
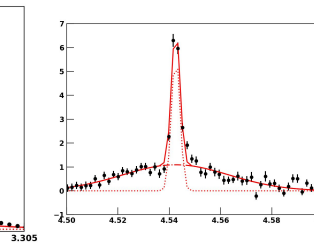
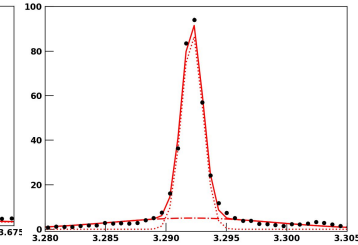
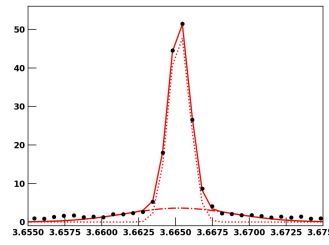
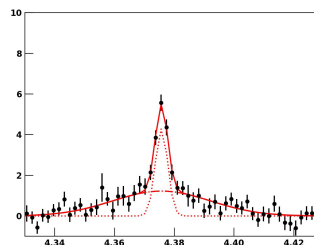
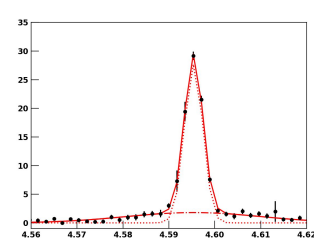
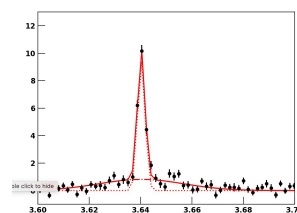
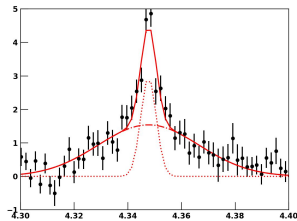
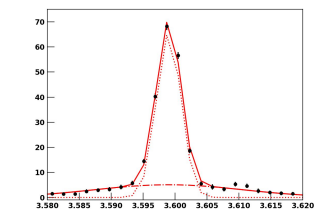
CEERS: 8/79

GLASS: 2/16

ERO : 0/4

JADES : 2/253

合計 12/352



# 解析と結果

武知

# BH質量求め方

BH質量  $\propto$  半径  $\times$  速度<sup>2</sup> (ニュートン力学)

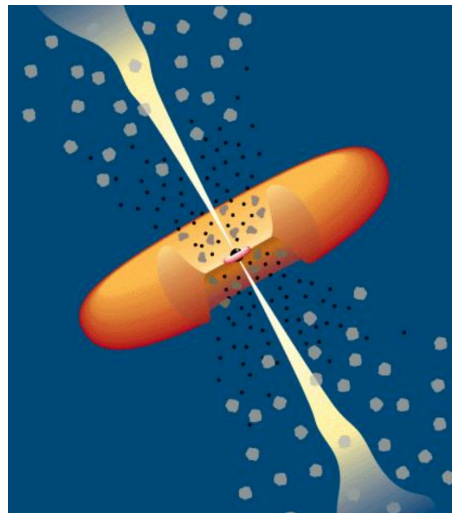
BHまわりのダストは光学的に厚い $\Rightarrow$ 光度 $\propto$ 表面積 $\propto$ 半径<sup>2</sup>

$\Rightarrow$  BH質量  $\propto$  光度<sup>0.5</sup>  $\times$  速度<sup>2</sup>

$\propto$  速度

$$M_{BH} = 2.0 \times 10^6 \left( \frac{L}{10^{42} \text{ ergs}^{-1}} \right)^{0.55} \left( \frac{FWHM}{10^3 \text{ kms}^{-1}} \right)^{2.06} M_{sun}$$

↑観測をもとに補正された係数

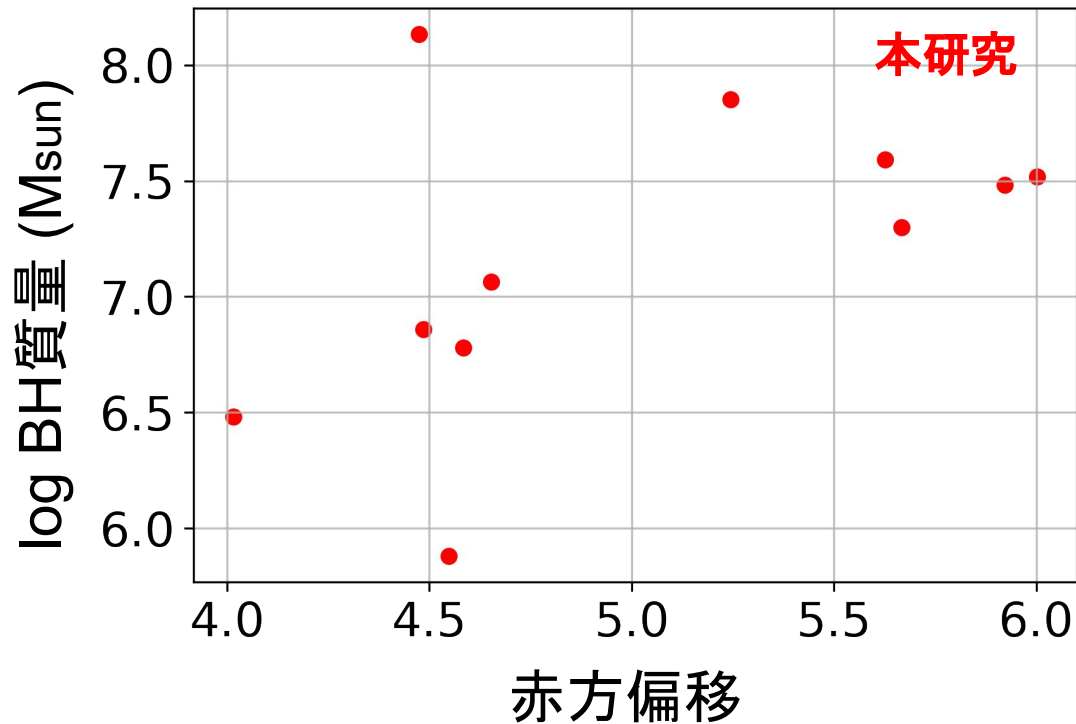


<https://urrylab.yale.edu/supermassive-black-holes-agn-and-grand-unification-hypothesis>

Greene&Ho 2005



# BH質量



BH質量範囲:  $10^6 - 10^8$  Msun

~ 1/100過去(JWST以前)にみつかった超巨大BH

## エディントン比 (～ 質量降着の効率)

- 光度(全波長での光度)

$$L = 4000 \times \left( \frac{L_{OIII}}{10^{43} \text{ ergs}^{-1}} \right)^{1.39} \times 10^{43} \text{ ergs}^{-1} \quad (\text{Stern \& Laor 2012})$$

- エディントン光度

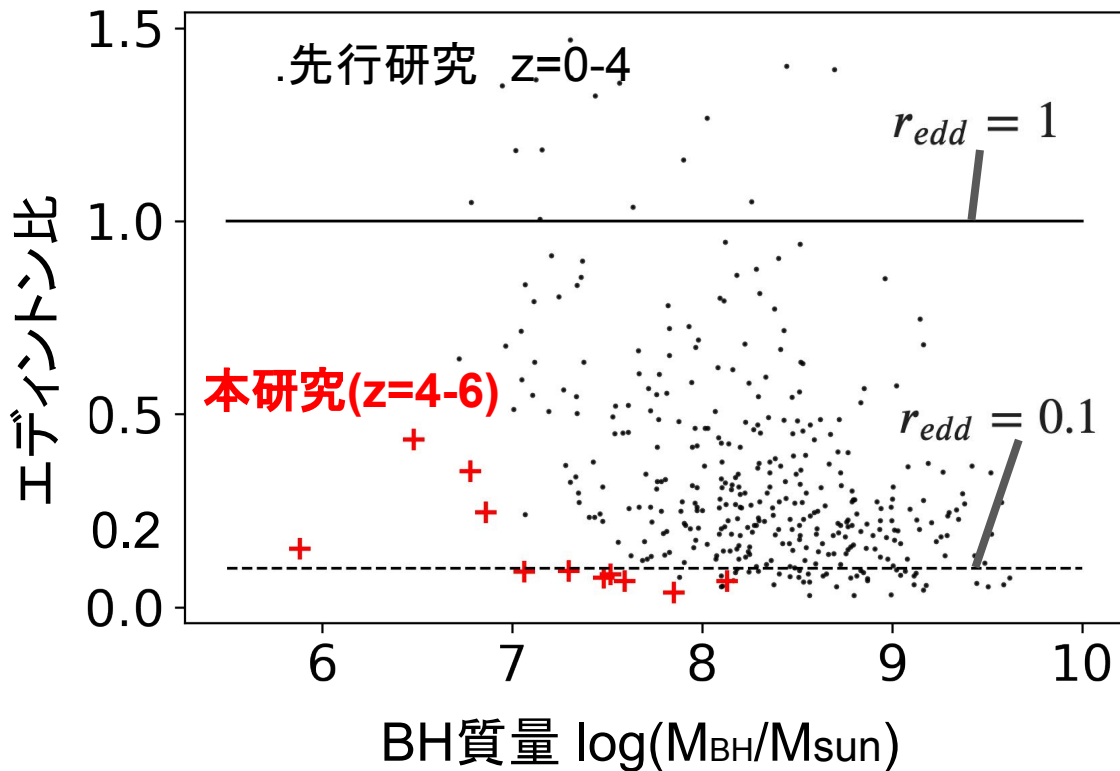
$$L_{Edd} = \frac{4\pi GM_{BH} m_p c}{\sigma_T} = 1.26 \times 10^{38} \left( \frac{M_{BH}}{M_{sun}} \right) \text{ erg/s}$$

- エディントン比

$$\tau_{edd} = \frac{L}{L_{Edd}}$$

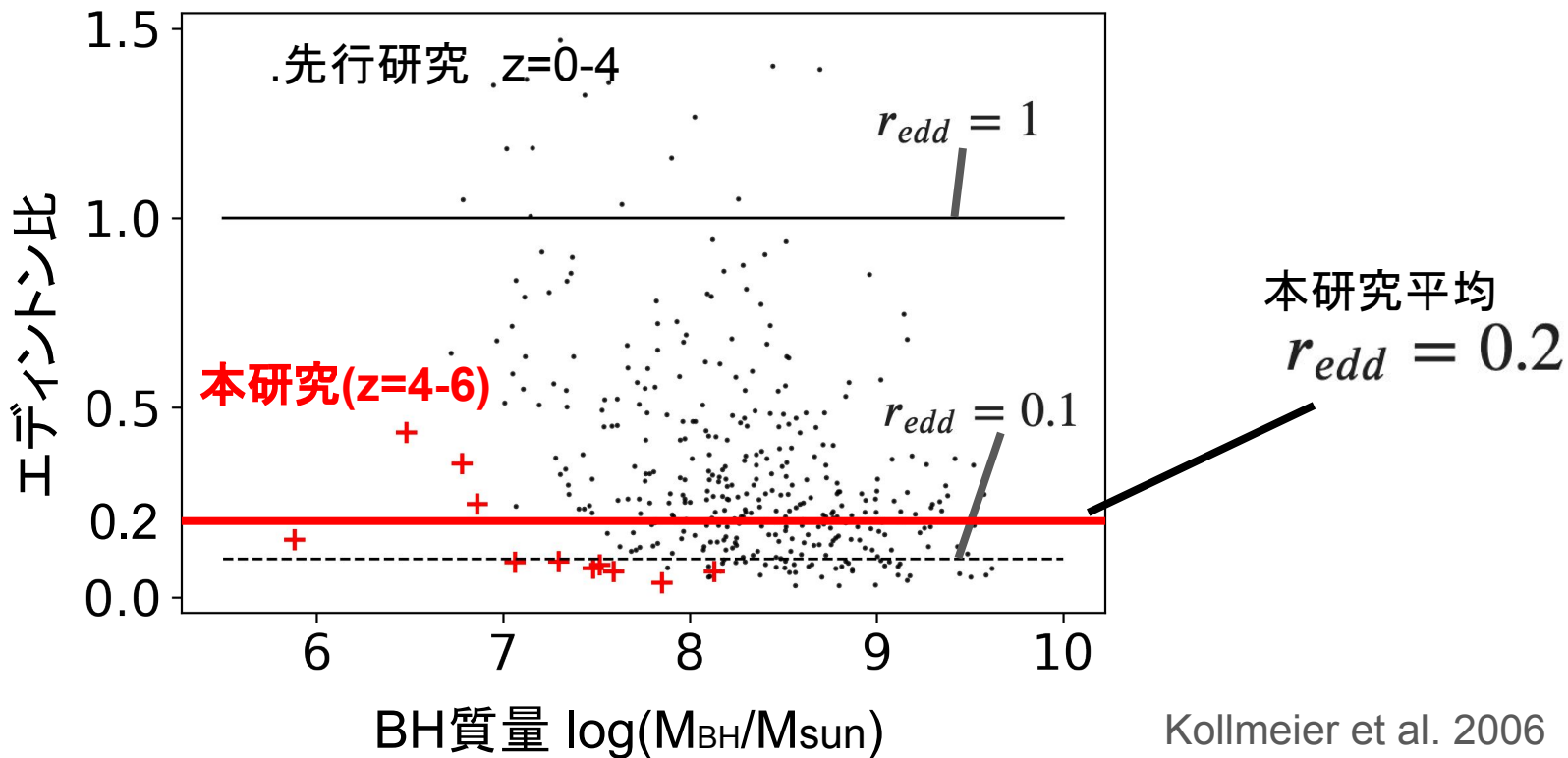
# エディントン比とBH質量の関係

平均値:0.2 => 比が低い (1を超えるようなものがない): 非効率な降着



# エディントン比とBH質量の関係

平均値:0.2 => 比が低い (1を超えるようなものがない): 非効率な降着



## 質量獲得2 :BH-BH合体

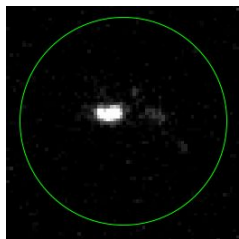
JWST NIRcam 撮像データ

母銀河の合体をBHの合体とみなす=> 1kpc以内で合体中と判断

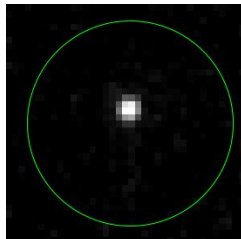
## 質量獲得2 : BH-BH合体

JWST NIRcam 撮像データ

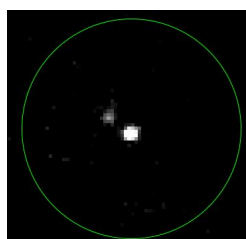
母銀河の合体をBHの合体とみなす=> 1kpc以内で合体中と判断



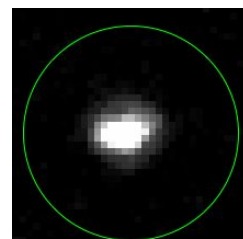
CEERS\_P4M\_00397



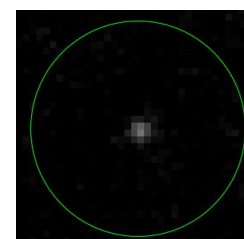
CEERS\_P4M\_00746



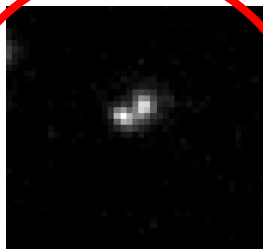
CEERS\_P4M\_02782



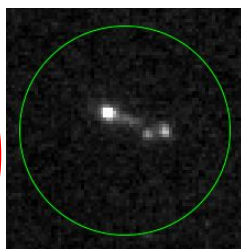
CEERS\_P9M\_01019



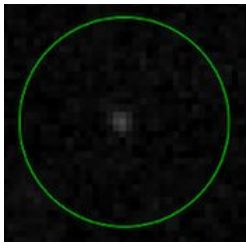
CEERS\_P10M\_00672



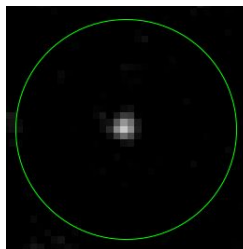
GLASS\_150029



GLASS\_160133



JADES\_8083



JADES\_10013704

合体1/9

# 母銀河の星質量

恒星が多いほど銀河が明るい

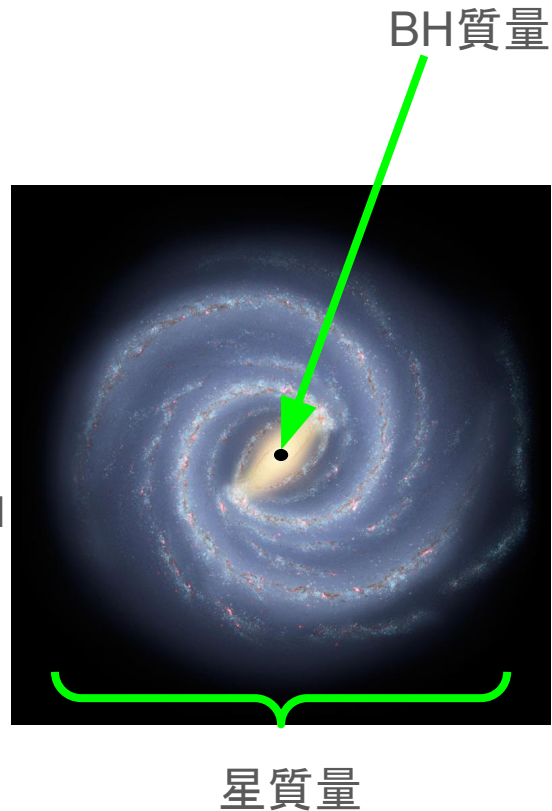
銀河の光度 / 1恒星あたりの光度 = 個数

個数 x 1恒星あたりの質量 = 星質量

$$\log(M_{\text{star}}/M_{\text{sun}}) = -0.345M_i + 2.02 \quad \text{Isobe et al. 2021}$$

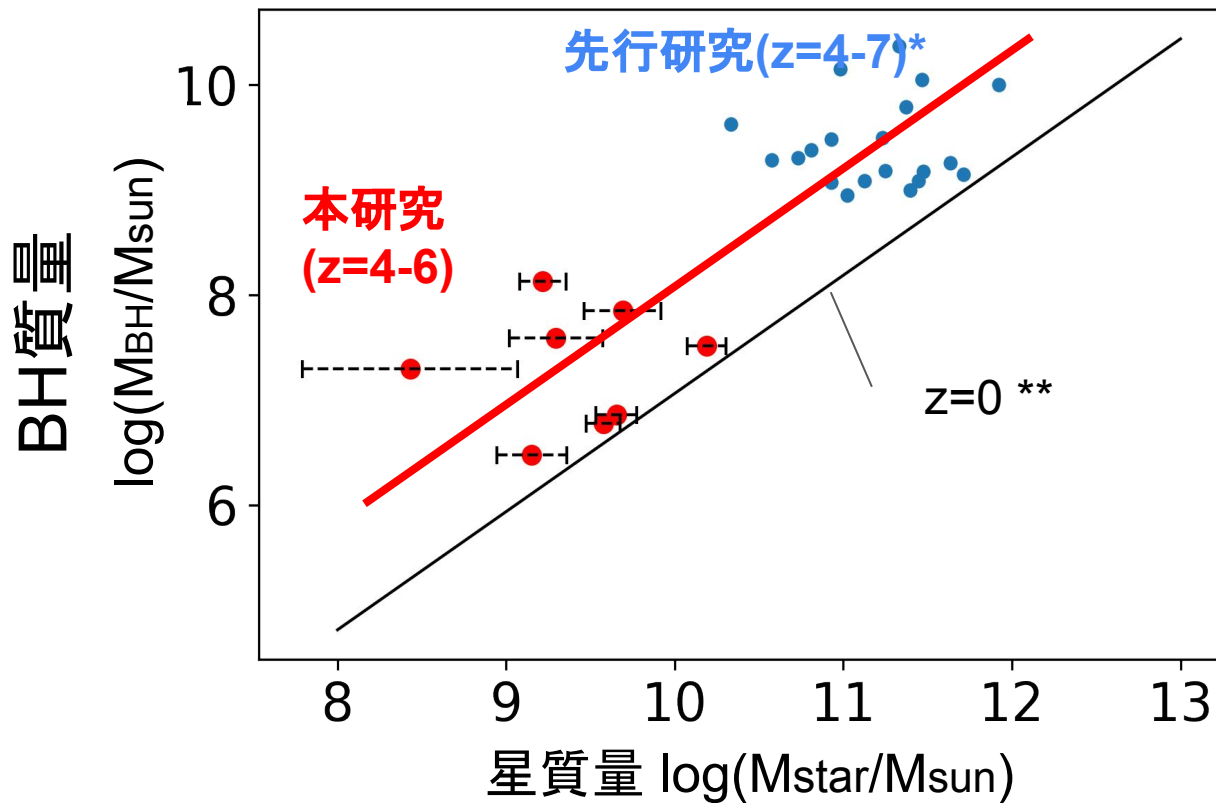
↑明るさに対応

( $M_i$  iバンド絶対等級)



# BH質量 vs. 母銀河の星質量

z=0 と比べてBH質量が星質量に対して大きい



(\*)Kormendy & Ho 2013

(\*\*)Häring & Rix 2004



# 考察

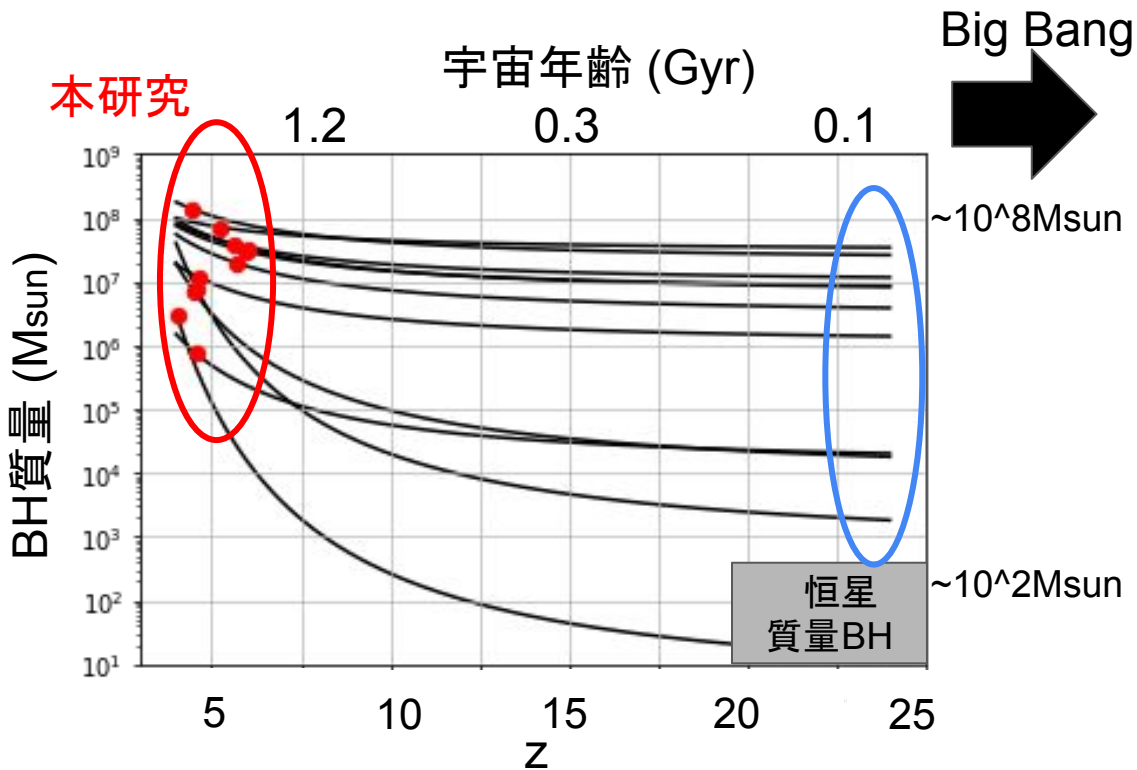
平山、田中

# 観測結果で説明できない種BH質量

観測されたエディントン比のみでは恒星質量BHからの進化を説明できない

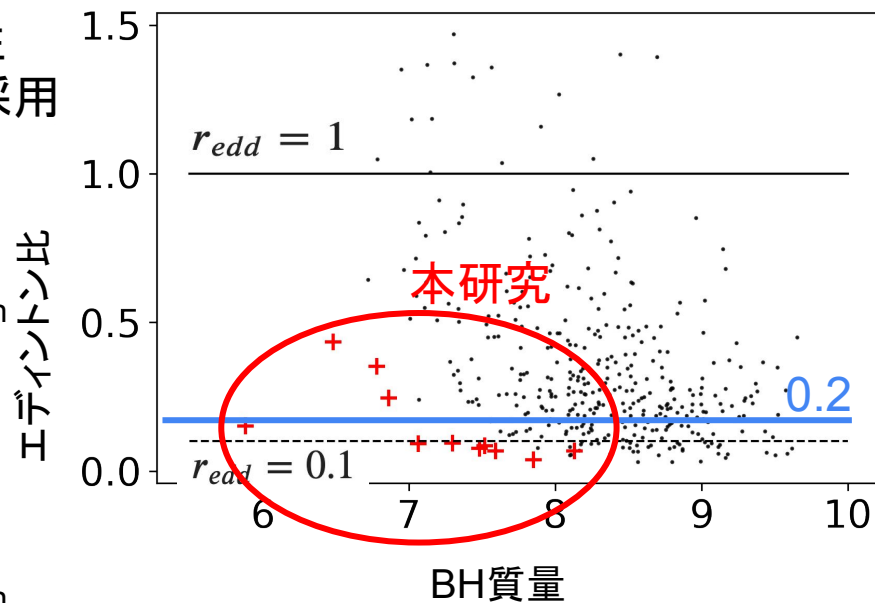
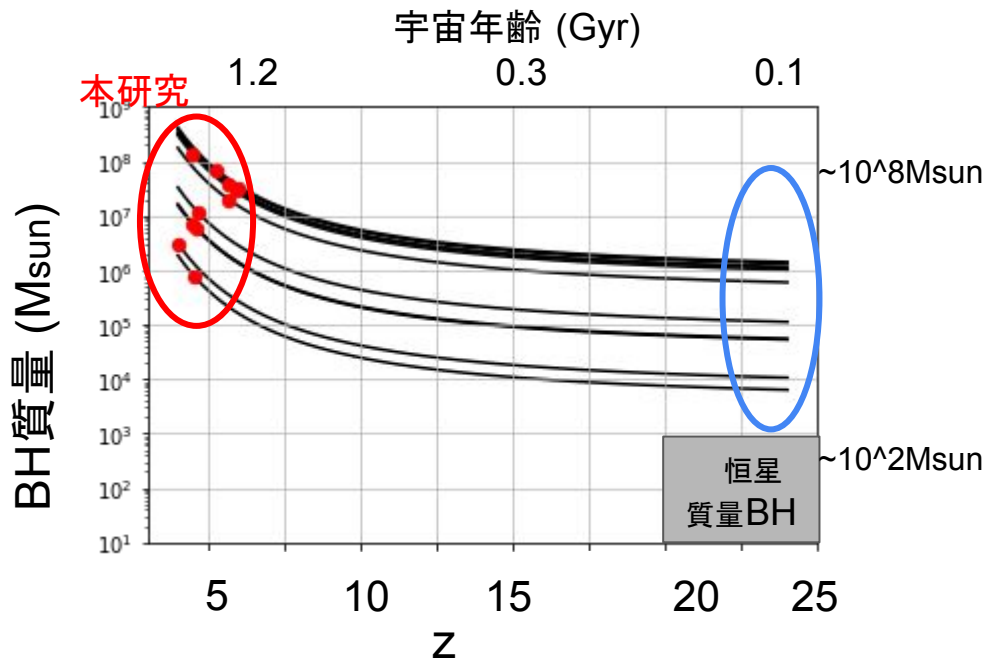
4つの可能性:

- (1) 高いエディントン比  $r_{\text{edd}}$
- (2) BH同士の合体頻度  $p$
- (3) 放射効率  $\epsilon$
- (4) 種BH質量  $M_0$



# (1) 高いエディントン比

エディントン比  $r_{edd}$  が過去には高かった可能性  
 $r_{edd}$  の時間平均として観測値の平均値 **0.2** を採用



Kollmeier et al. 2006

種BH質量が大きくないと( $> 10^3 M_{sun}$ )説明不可能

## (2) BH同士の合体頻度

1.  $z=4-6$ でBHの合体頻度 $p=1/9$

$$\frac{\text{一回の合体にかかる平均時間}^*}{\text{合体から次の合体までの時間}} = \frac{0.02 \text{ Gyr}}{t} = \frac{1}{9}$$

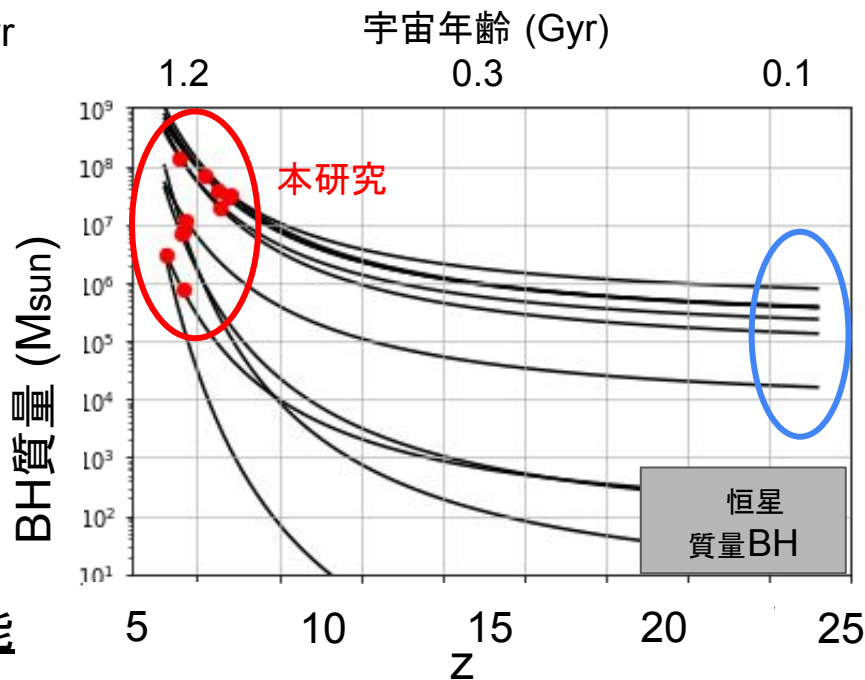
→合体から次の合体までの時間 $t=0.02 \times 9=0.18 \text{ Gyr}$

2. 衝突回数 $n=T/t \sim 3-4$ 回 (T: BH成長にかかる時間)

$$\rightarrow M = 2^n \times M_0 \exp\left(r_{\text{edd}} \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \frac{t_1-t_2}{\tau}\right)$$

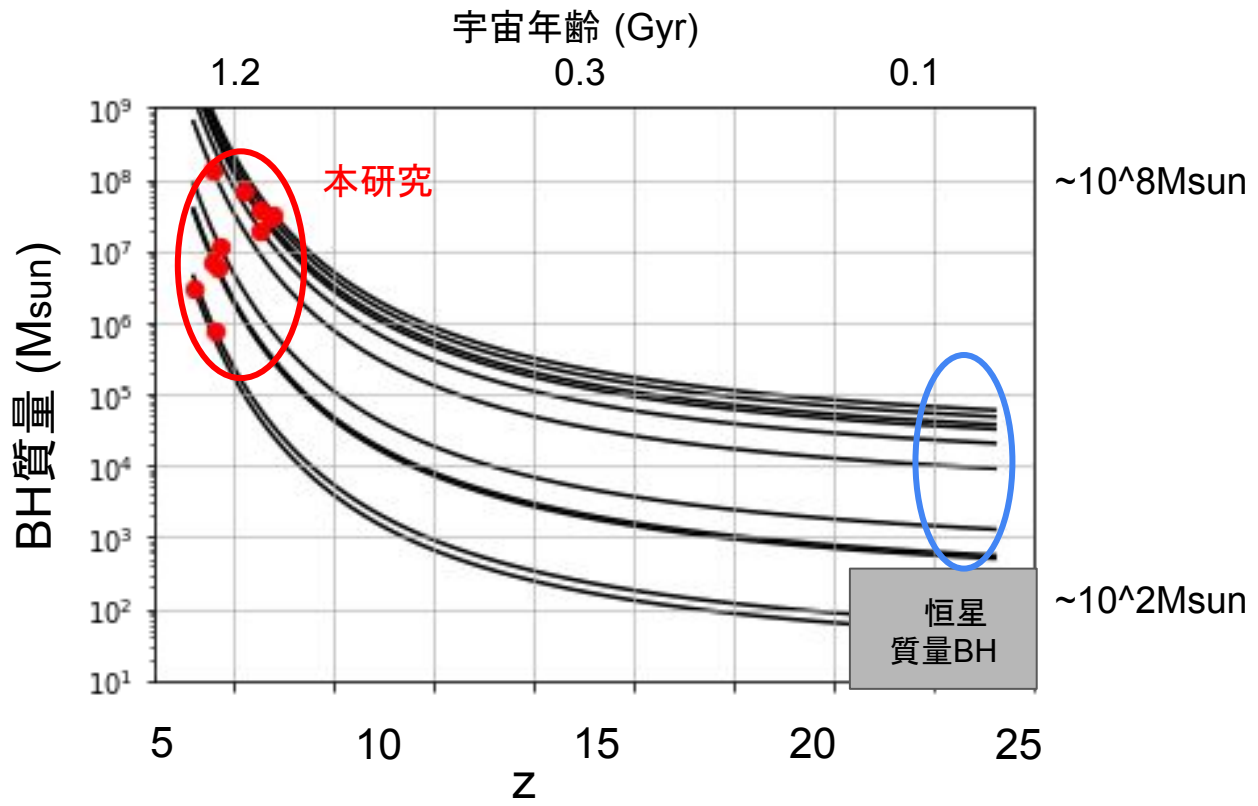
エディントン比 $r_{\text{edd}}$ は一定を仮定

(\*) Sobolenko et al. 2021



種BH質量が大きくない(>10<sup>3</sup>Msun)説明不可能

# 高いエディントン比+合体



種BH質量が大きくなると(>10<sup>3</sup>Msun)説明不可能

### (3) 放射効率 $\epsilon$

- 放射効率 $\epsilon$ とエディントン比 $r_{\text{edd}}$ に負の相関
- 観測されたエディントン比 $r_{\text{edd}} \sim 0.2$

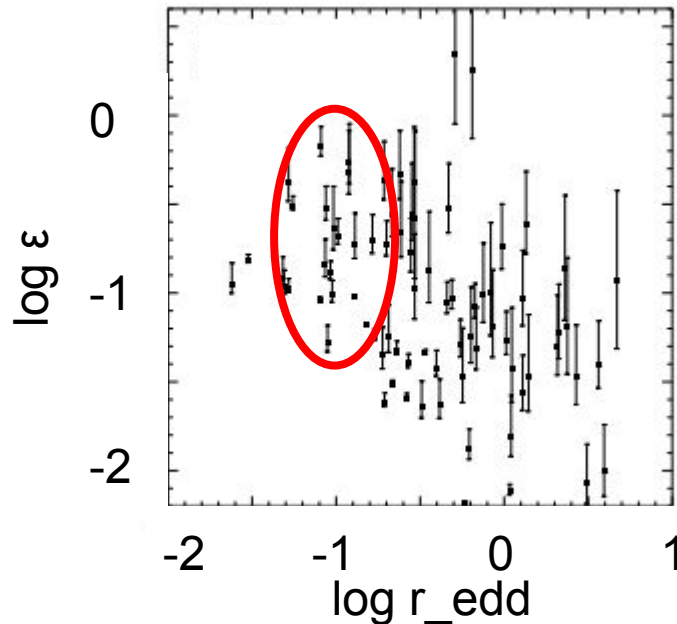
→放射効率 $\epsilon > 0.1$

BHの光度 $L$ と質量降着率  $\dot{M}_{\text{acc}}$  の関係:

$$\dot{M}_{\text{acc}} = \frac{L}{\epsilon c^2}$$

→ $\epsilon$ が大きいと  $\dot{M}_{\text{acc}}$  が下がる

→BHの成長は遅くなり、急激な成長を説明できない



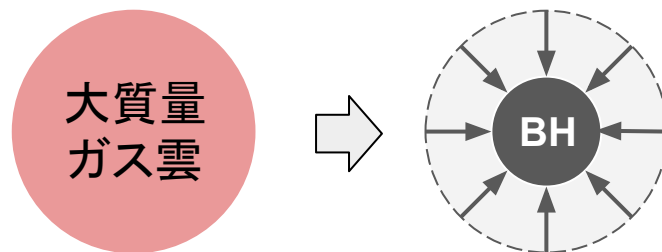
## (4) 種BH質量 $M_0$

$z \sim 20$ で $>1000$ 太陽質量の種BHが必要( $M_0 > 1000 M_{\text{sun}}$ )

→恒星質量( $< \sim 100 M_{\text{sun}}$ )の種BHから進化では説明できない

### 可能性1: 直接崩壊

大質量ガス雲の崩壊によるBHの形成



### 可能性2: 原始BH

原始BHの質量は大きかったかも？

### 可能性3: 星団で形成

密度な星団内でたくさんのBHが形成

→合体し $1000 M_{\text{sun}}$ のBHへ

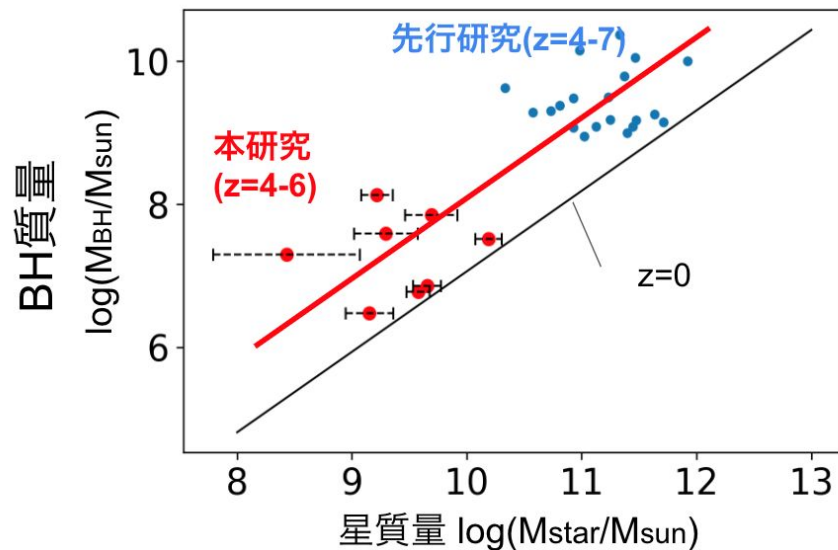


高密度な星団

$1000 M_{\text{sun}}$ のBH

# $M_{\text{BH}}$ と母銀河の関係

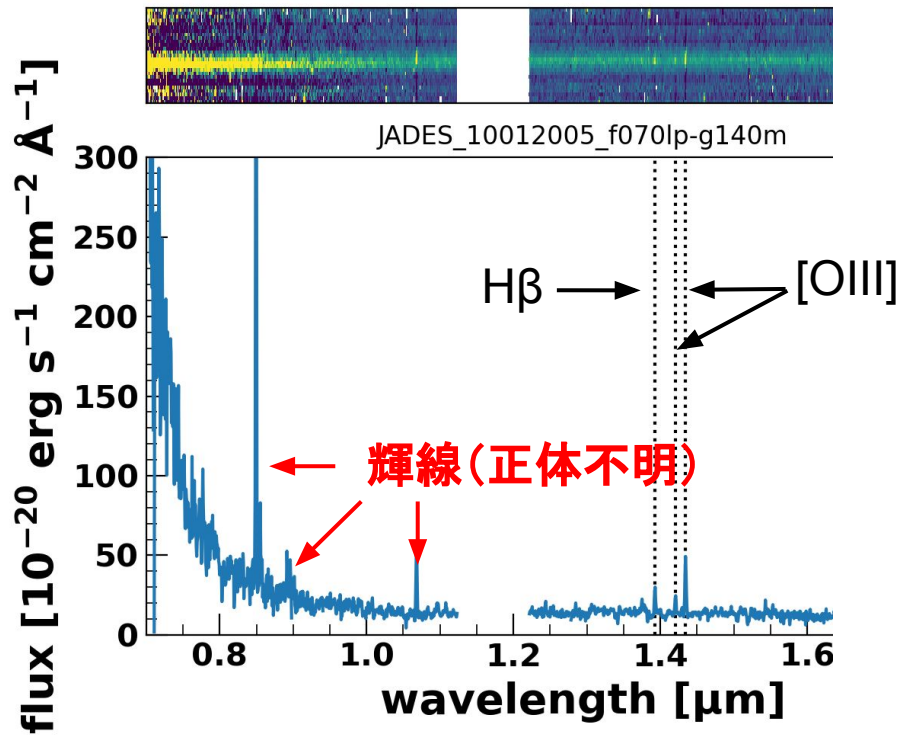
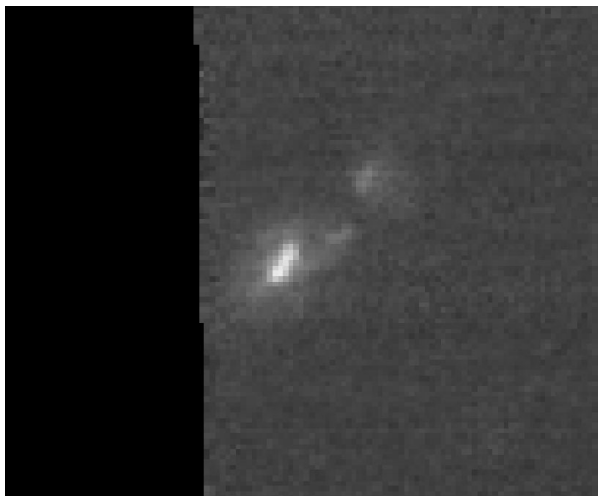
- $z=0$ よりも星質量に対するBH質量の比が大きい  
⇒BHが初期宇宙の短い期間に成長
- 初期宇宙と現在では、BHの進化過程が違うのでは？  
⇒種BH質量が大きかった  
( $M_0 > 1000 M_{\text{sun}}$ )  
と矛盾しない





# 新たな問題: JADES 10012005

- 輝線がないはずのところ(対応する元素なし)に輝線を発見
- ノイズや偽天体でないことを確認
- この輝線は何か?



# まとめ

## JWSTの分光・撮像データを解析

- $z = 4\sim 6$ で  $10^6 - 10^8 M_{\odot}$ のBHを12天体発見  
→ これまで知られているBH質量の1/100
- 銀河合体: 1/9
- エディントン比(平均 0.2) → 非効率な降着
- BH質量と母銀河の質量 → BH質量の方が卓越

## これらのBHの形成は？

- 超巨大BHの進化の過程で、銀河合体・質量降着などによる説明は難しい
- 初期宇宙の短い期間に  $M_0 > 1000 M_{\odot}$ の種BHから進化した可能性

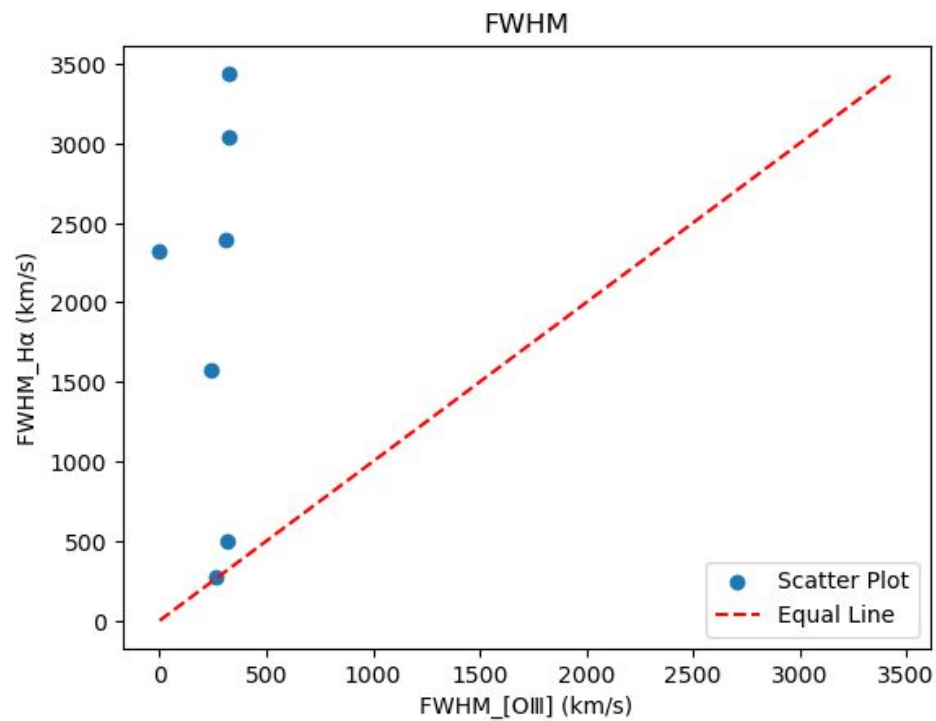
## 課題

- 宇宙初期にできた  $M_0 > 1000 M_{\odot}$ の種BHの起源は？
- 正体不明の輝線は何か？

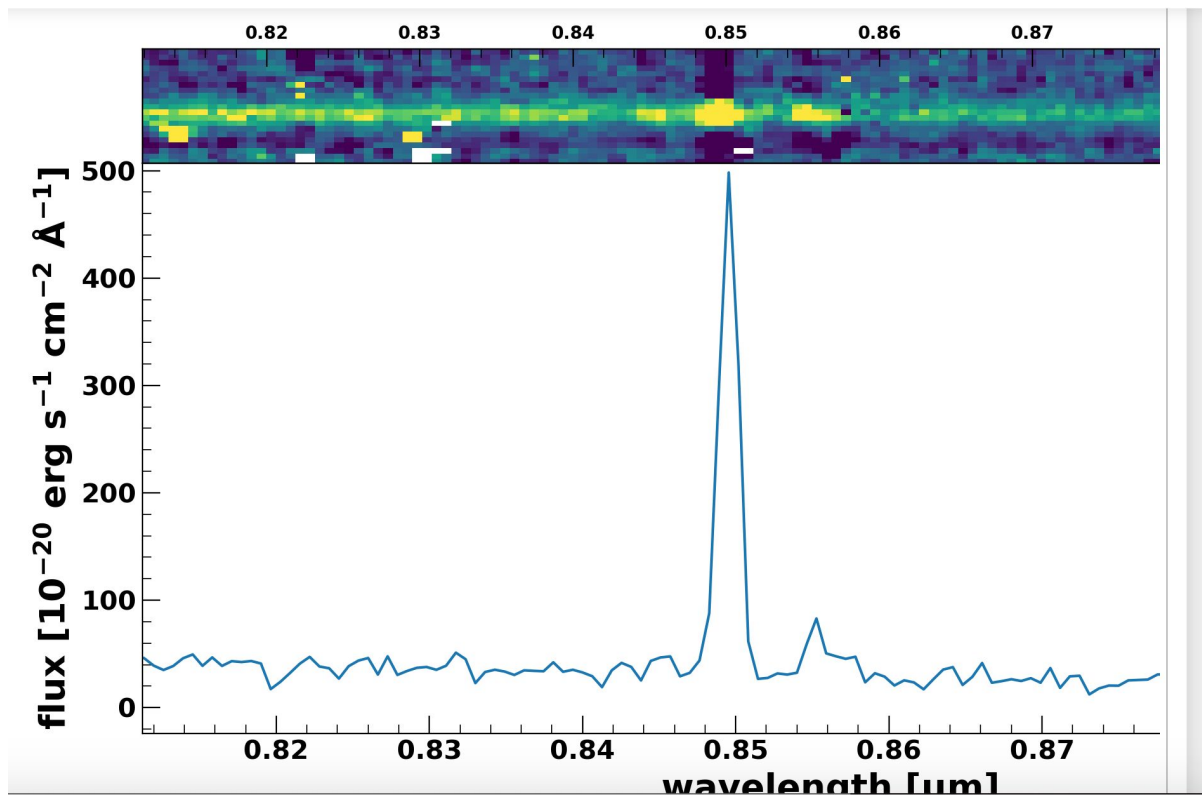


backup

# セレクション



# 謎の輝線について



# 星質量計算

$$m = -2.5 \log_{10} (f_{\nu} 10^{-23}) - 48.6$$

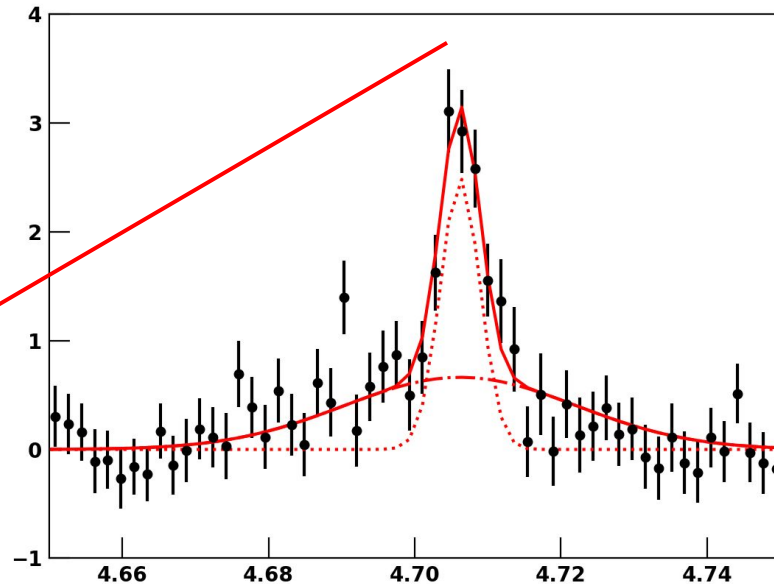
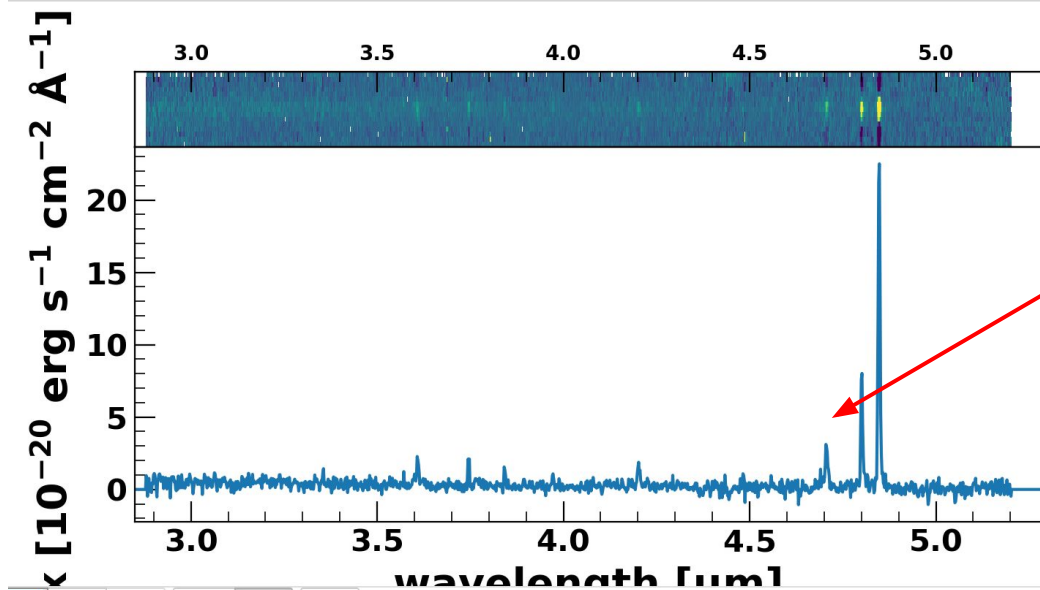
$$M = m + 5 - 5 \log_{10}(L_{dist} 10^6)$$

$$M_{star} = 10^{(-0.345M + 2.02)}$$

Isobe et al. 2021

# CEERS\_P7M\_01019

$z = 8.6$



Reset