観測的宇宙論

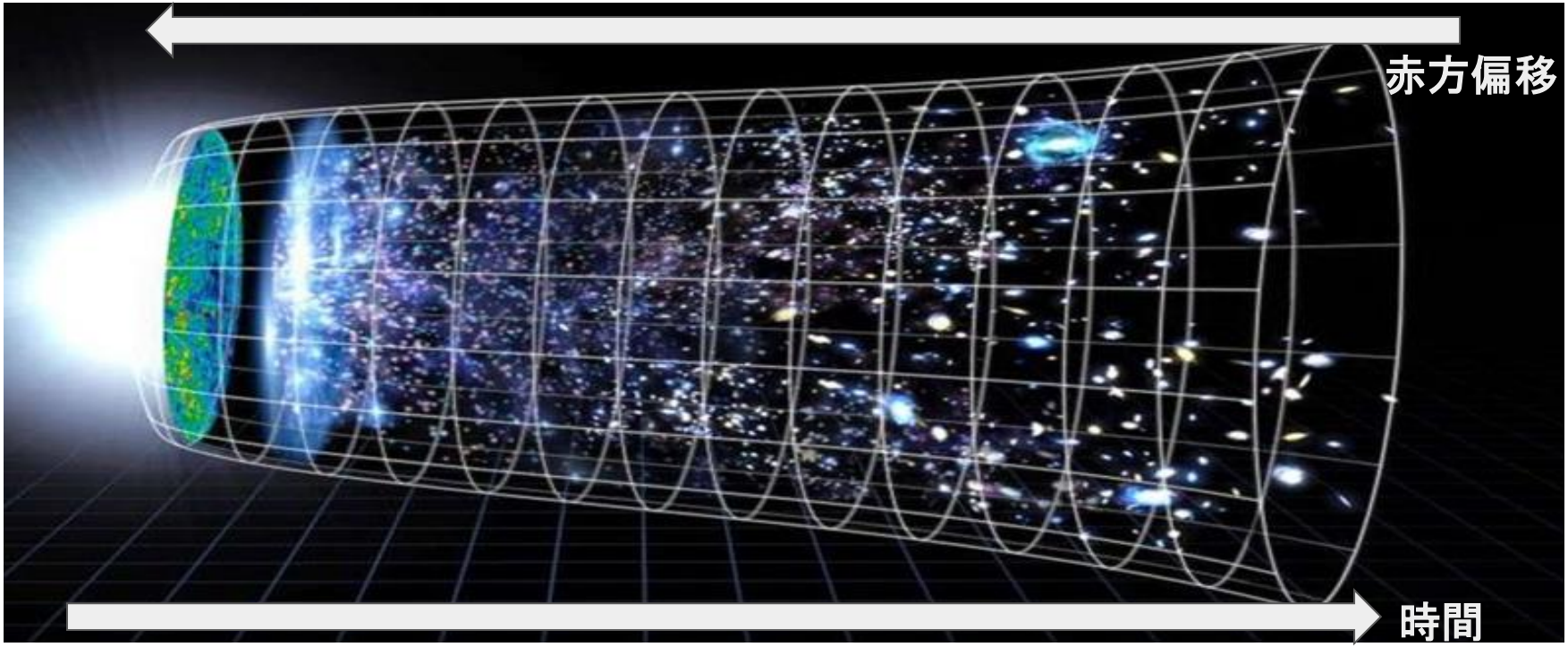
俊成、張、林、早川、澁谷

Supervisor: 大内
TA: 影浦, 武知, 中根, 柳澤, 上條, 梅田

イントロダクション

宇宙の歴史

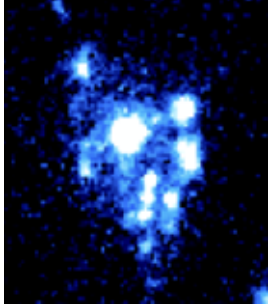
credit: NASA



・ビッグバン、インフレーション：密度揺らぎが重力的に成長→天体形成(星, BH, 銀河)
・天体形成は複雑なバリオン物理を含む：理論モデルによる理解が難しい
→観測研究

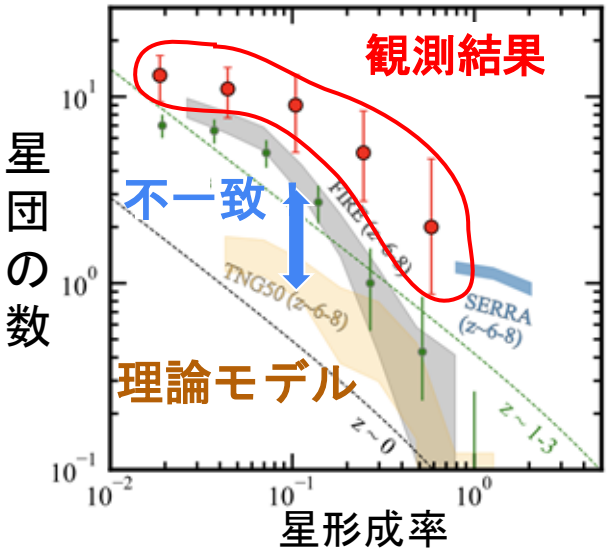
具体的な課題

1. 星団が多い銀河



Fujimoto+25

Fujimoto+25



形成起源

1. 銀河内ガスの重力不安定性
2. 銀河合体

2. 星の進化のモデルの検証

credit: Yoshio Sakiyama



恒星

星の進化

正しい？

credit: M. Weiss

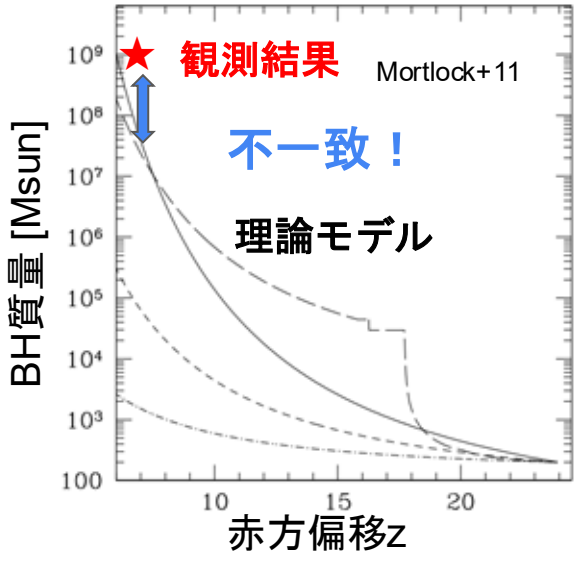


超新星

具体的な課題

3. 超巨大ブラックホール(BH)の形成起源

Volonteri & Rees18





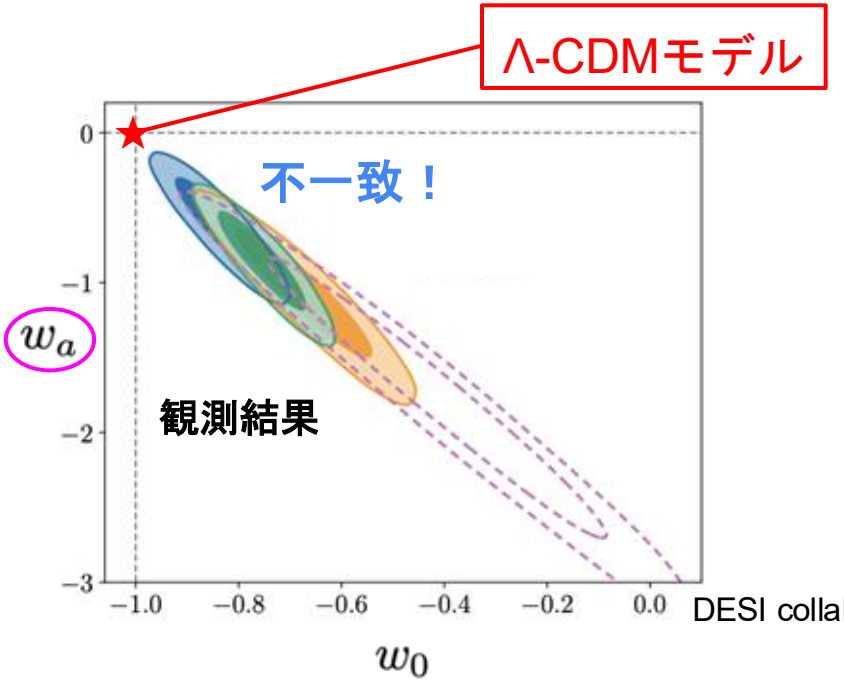
Little Red Dots (LRD)

Matthee+24

4. 現在の標準的な宇宙論の検証

$p = w\rho$ (状態方程式)

$$w_\phi(z) = w_0 + \frac{w_a \cdot z}{1+z}$$



DESI collaboration25

→動的暗黒エネルギー(DDE)を示唆？

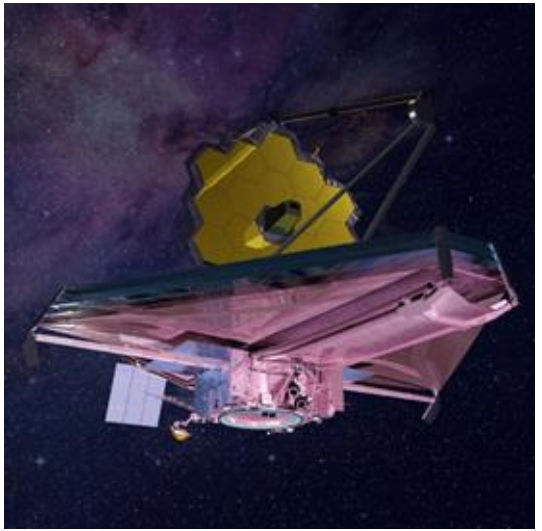
観測とデータ

課題解決に必要なこと

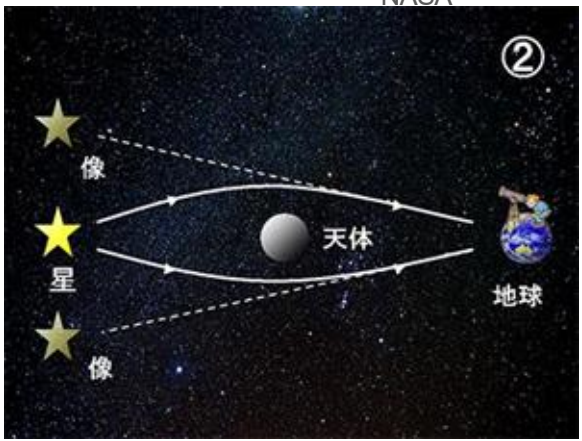
1. 宇宙進化を調べる
   →**大望遠鏡 James Webb Space Telescope (JWST)**
   →初期宇宙の遠い天体を解析

1. 星団や星、ブラックホールを空間的に解像、
   高SNで観測
   →**重力レンズ効果**を利用
   →暗い天体、天体の小さな構造まで

   増光率：重力レンズ後のflux / 重力レンズ前のflux



NASA

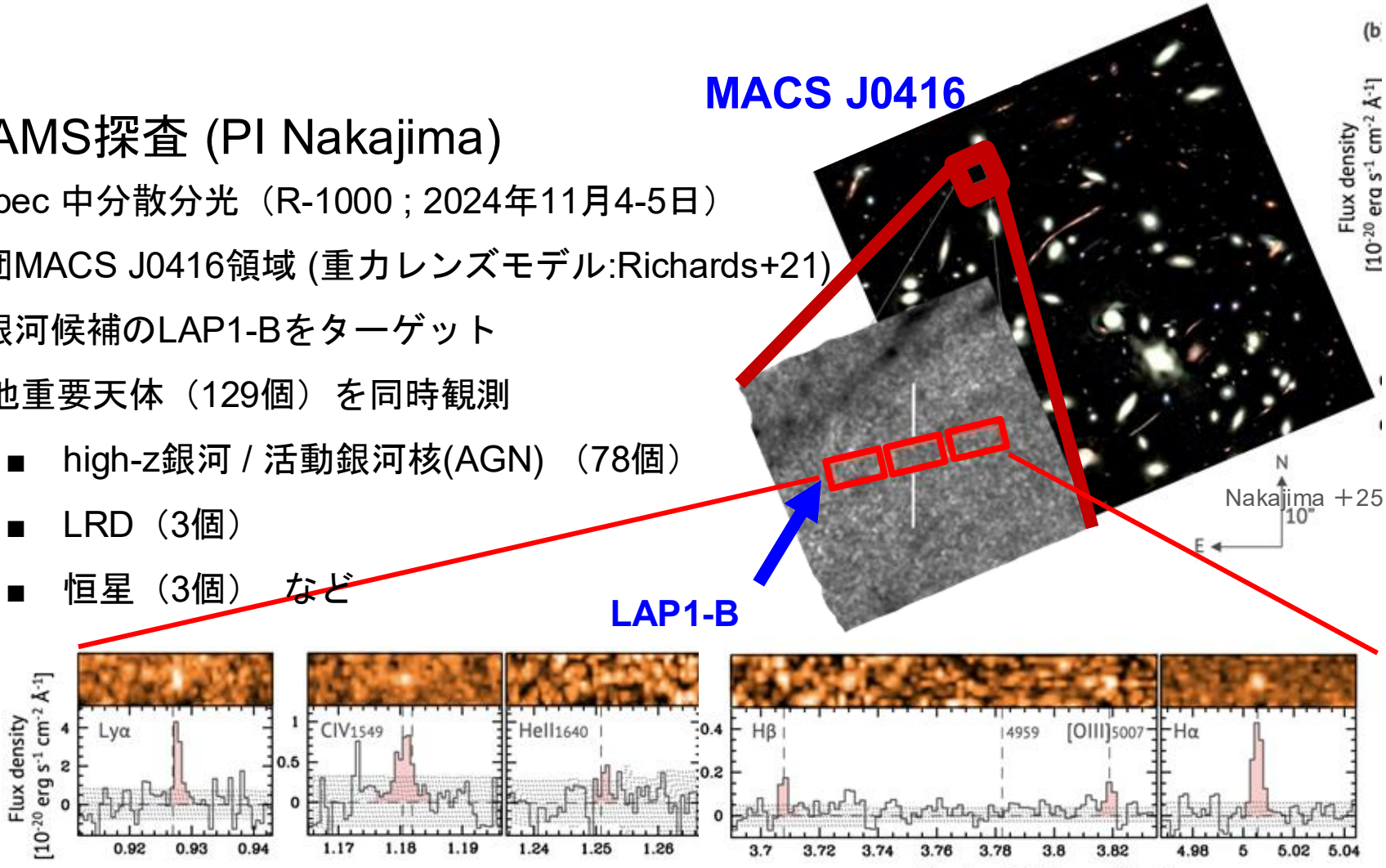


https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/200724.php

観測

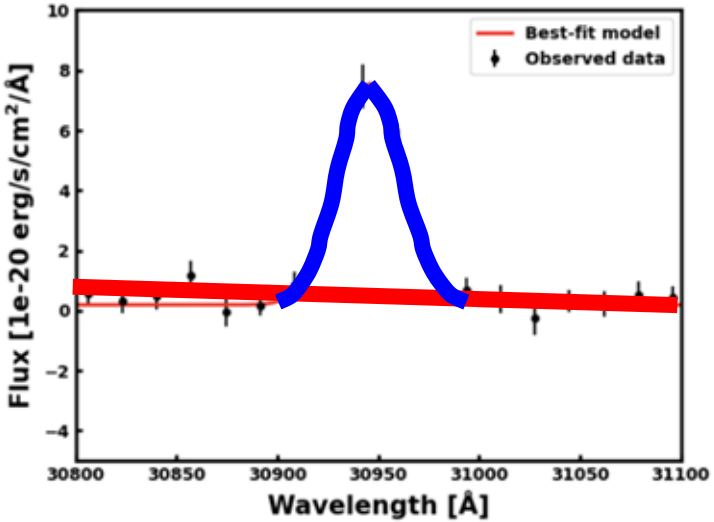
DREAMS探査 (PI Nakajima)

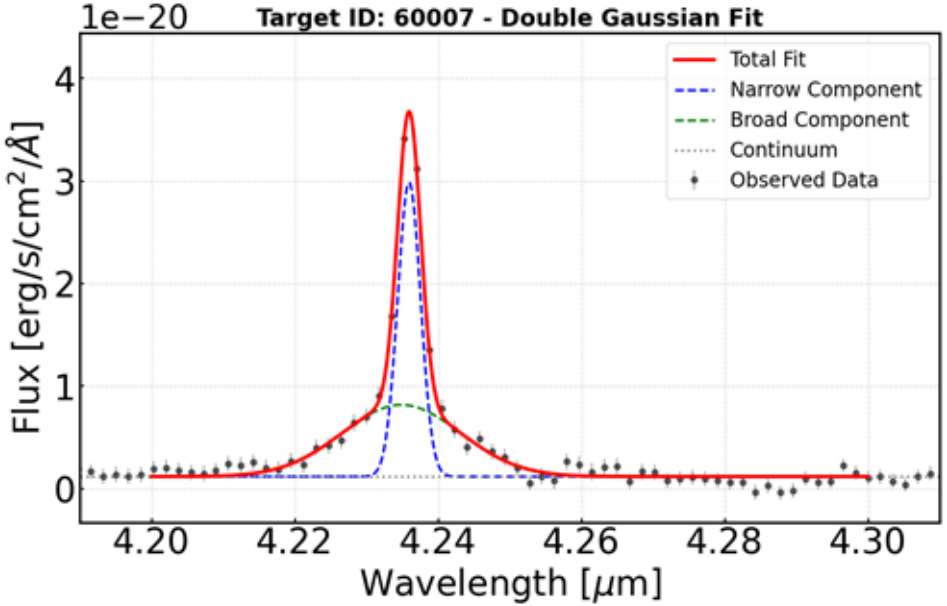
- NIRSpec 中分散分光（R-1000 ; 2024年11月4-5日）
- 銀河団MACS J0416領域 (重力レンズモデル:Richards+21)
- 初代銀河候補のLAP1-Bをターゲット
  - 他重要天体（129個）を同時観測
    - high-z銀河 / 活動銀河核(AGN) （78個）
    - LRD（3個）
    - 恒星（3個） など



基本的な解析手法

ガウシアンフィッティング





輝線を中心波長、輝線幅、フラックスをパラメータとしてガウシアンフィッティング

１次関数：連続光

ガウジアン：輝線

$$y = a\,exp\left[-\frac{(x-b)^2}{2\sigma^2}\right] + cx + d$$

２つのコンポーネントの方がスペクトルをよく表現できる場合に２つのガウシアンを用いた。

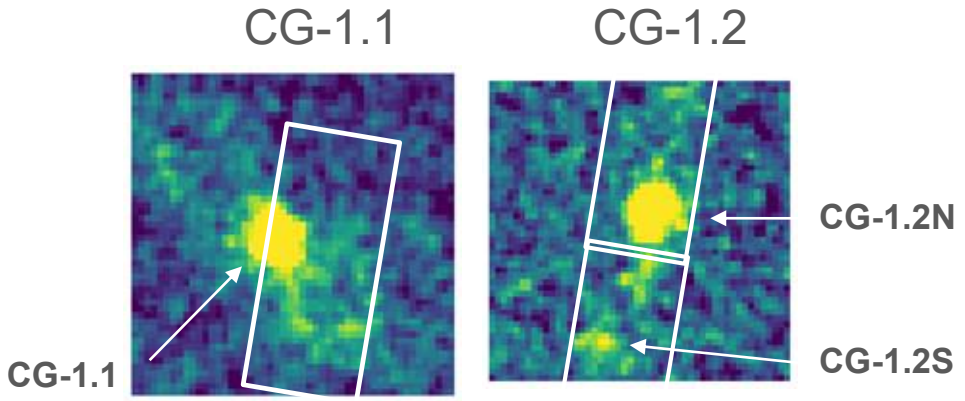
結果と考察

1. high-z銀河の構造と物理状態

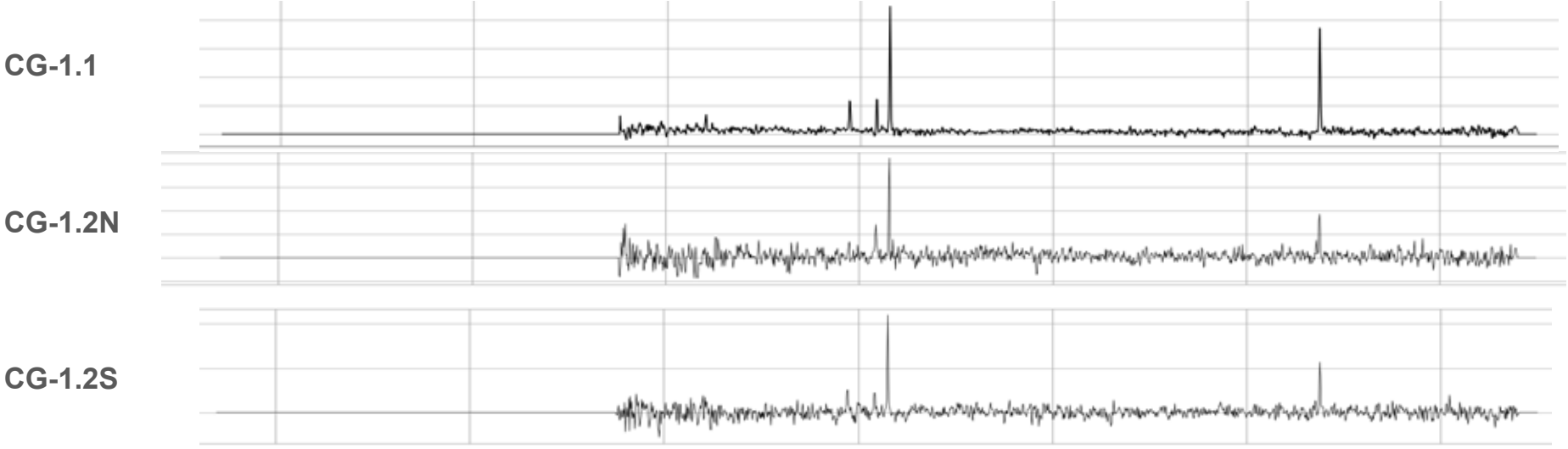
澁谷幸寛

high-z銀河 CG-1

- 78個のhigh-z銀河
- 唯一3箇所で分光できた銀河→”CG-1”
- z=6.14の星団の多い銀河
- 重力レンズ効果によって分裂した像
  - CG-1.1 (増光率 8.7)
  - CG-1.2N (増光率 4.9)
  - CG-1.2S (増光率 1.6)



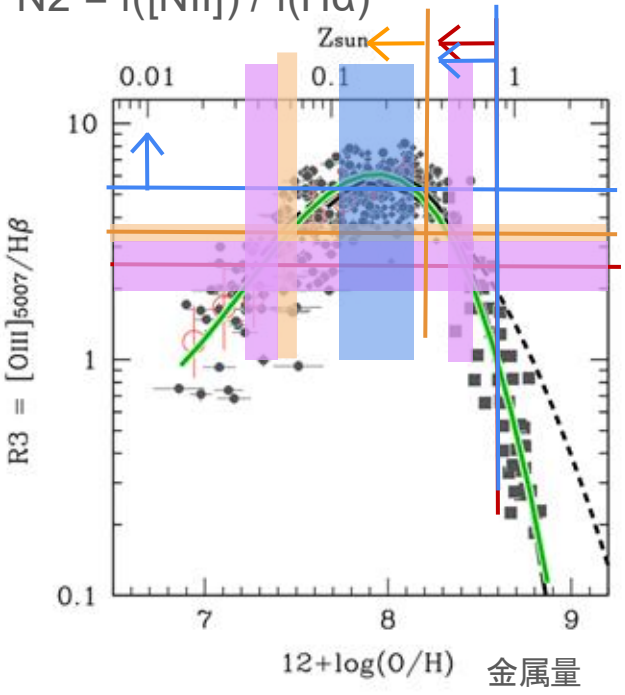
1Dスペクトル

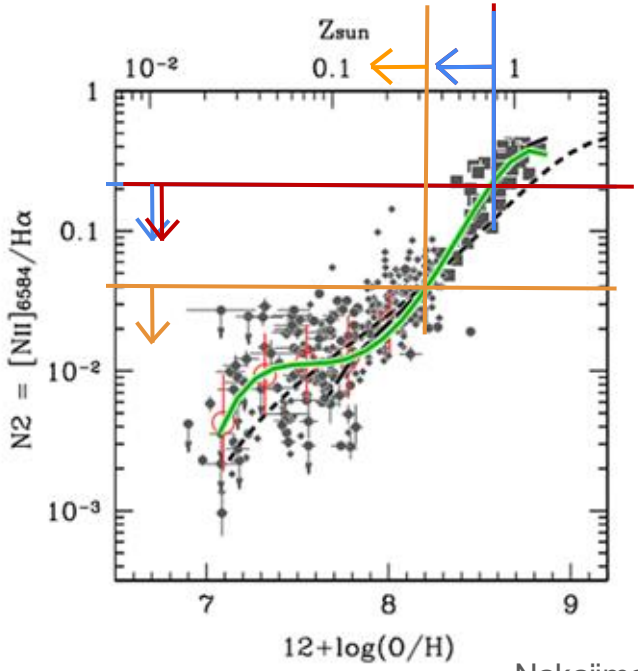


重元素汚染の指標：金属量

- 金属量(Z)：Hに対するOの存在比
- 輝線のフラックス比を使う
  - R3 = f([OIII]) / f(Hβ)
  - N2 = f([NII]) / f(Hα)

CG-1.1
CG-1.2N
CG-1.2S

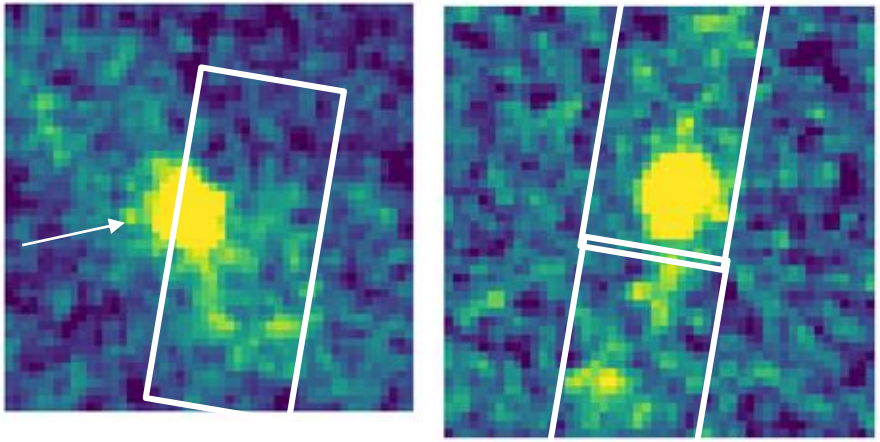




Nakajima et al. (2022)

結果

CG-1.1
Z = 0.05-0.07 Zsolar



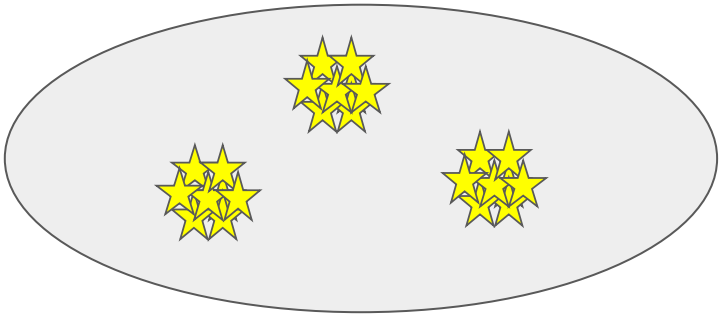
CG-1.2N
Z = 0.1-0.3 Zsolar

CG-1.2S
Z = 0.04-0.05 Zsolar
or
Z = 0.4-0.6 Zsolar

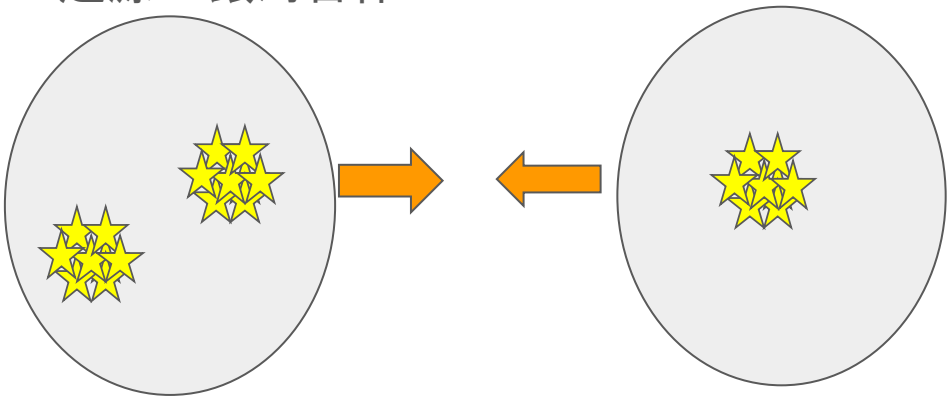
金属量が3か所で有意に異なる

考察：high-z銀河(星団が多い)の形成

起源1: 銀河内ガスの重力不安定性



起源2: 銀河合体



同じ銀河のガスから多数の星団が形成
→金属量は同程度

異なる銀河のガスから星団が形成
→銀河同士の合体
→金属量は異なる可能性もある

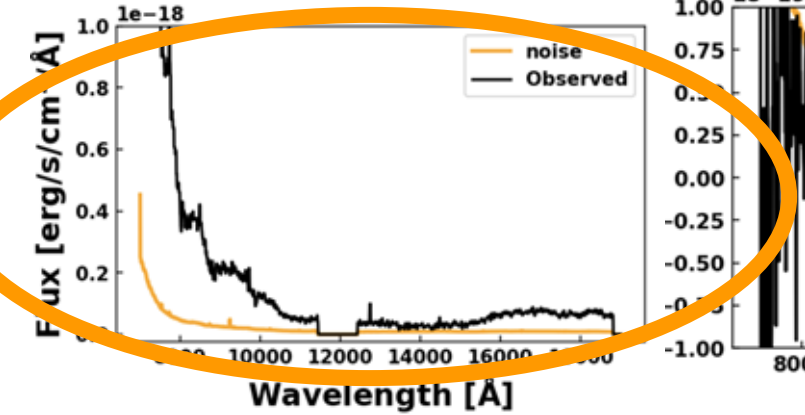
CG-1: 金属量は星団ごとに異なる
→CG-1のような星団の多いhigh-z銀河の形成起源は銀河合体？

2. high-z 銀河内の恒星

林遼祐

恒星のスペクトル

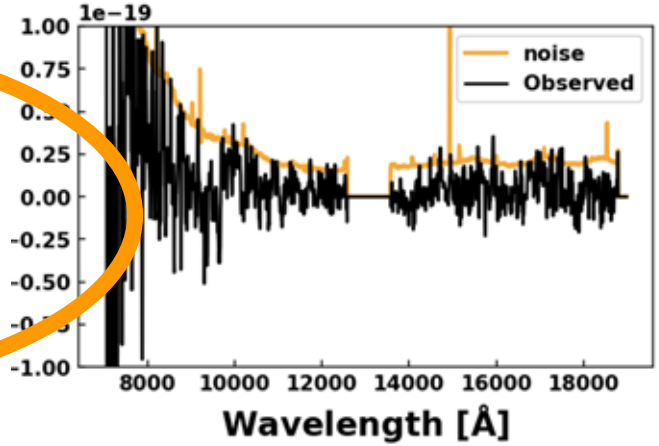
恒星1



SN = 6.4

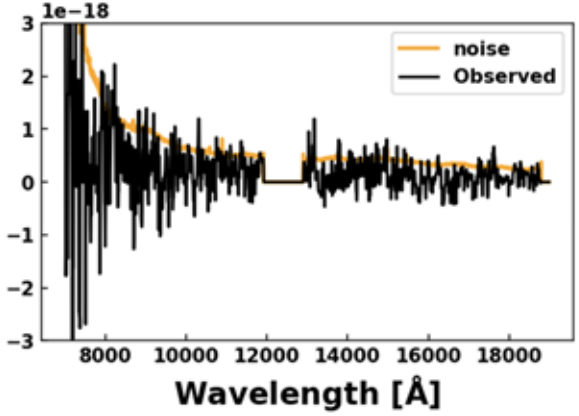
z = 0.94

恒星2



SN = 0.5

恒星3

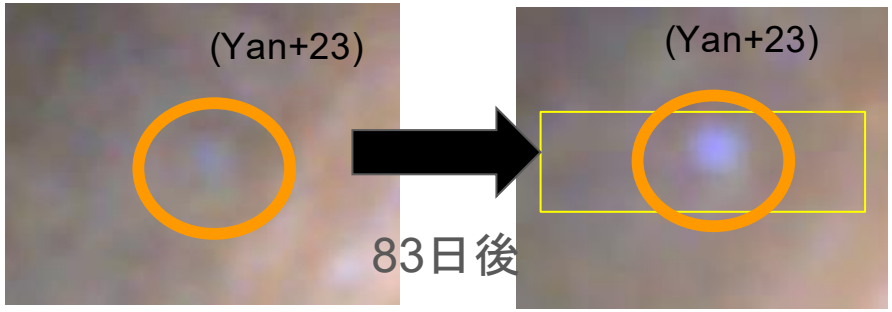


SN = 0.67

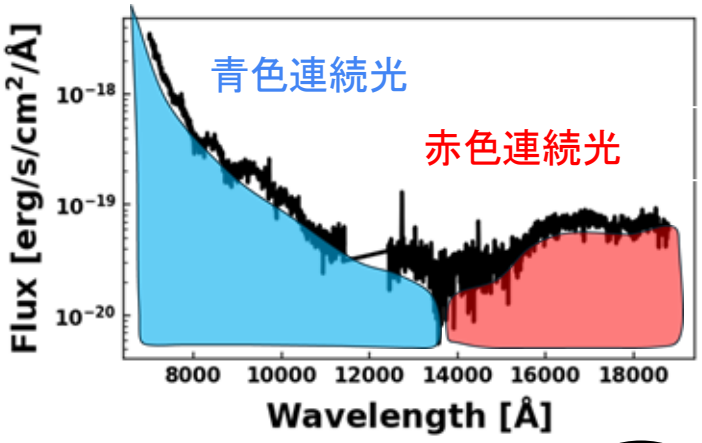
恒星 1

過去の研究 (2022年8月)
画像

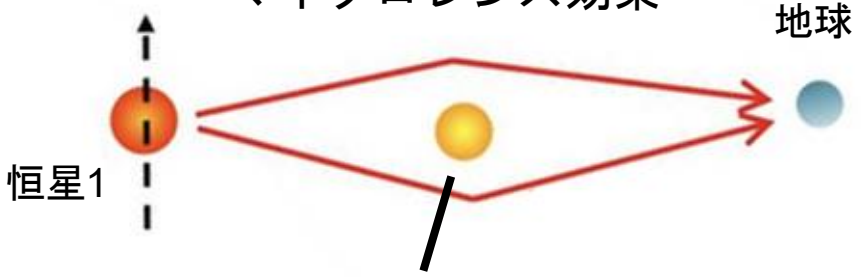
過去の研究 (2022年12月)
画像

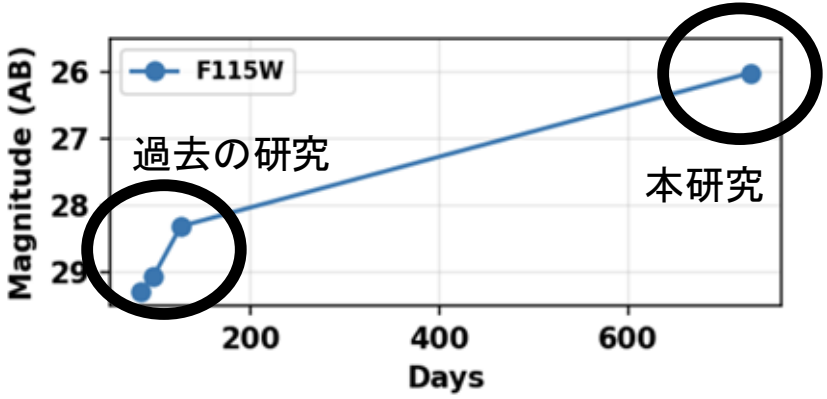


本研究　(2024年)
スペクトル



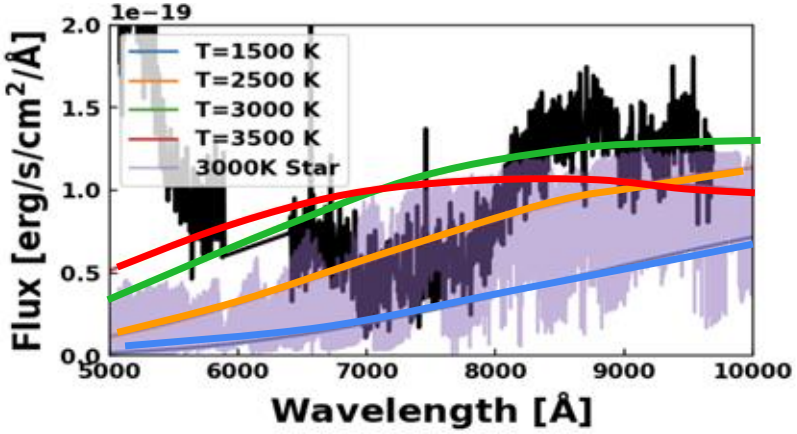
マイクロレンズ効果

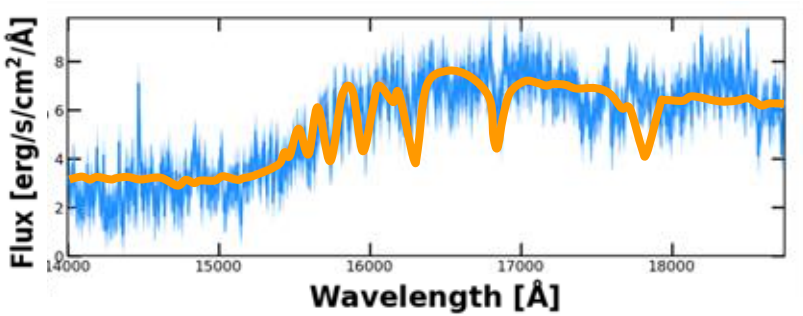




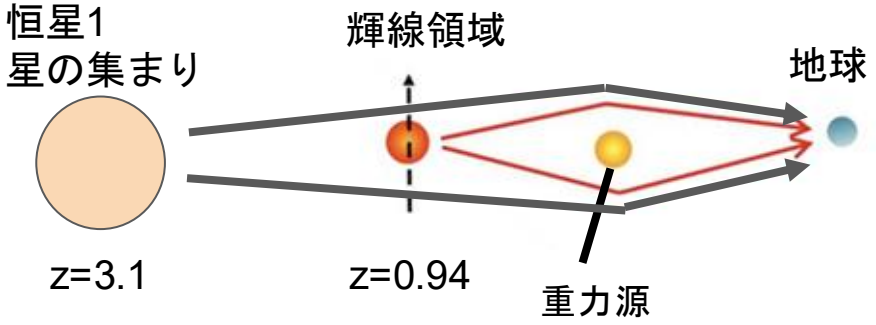
赤色連続光

~~単一の黒体放射でフィット~~ ➡ 複数の星の合成モデル





z~3.1 !!



星質量 ~ 10^6–$10^7\,M_\odot$

サイズ : 1 ~ 40 pc

Age = 0.5 Gyr

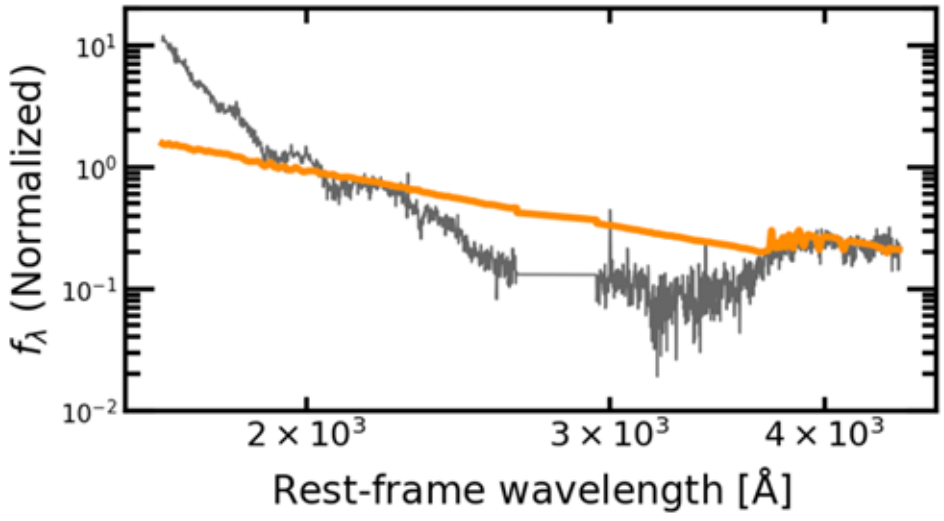
誕生直後の**球状星団**

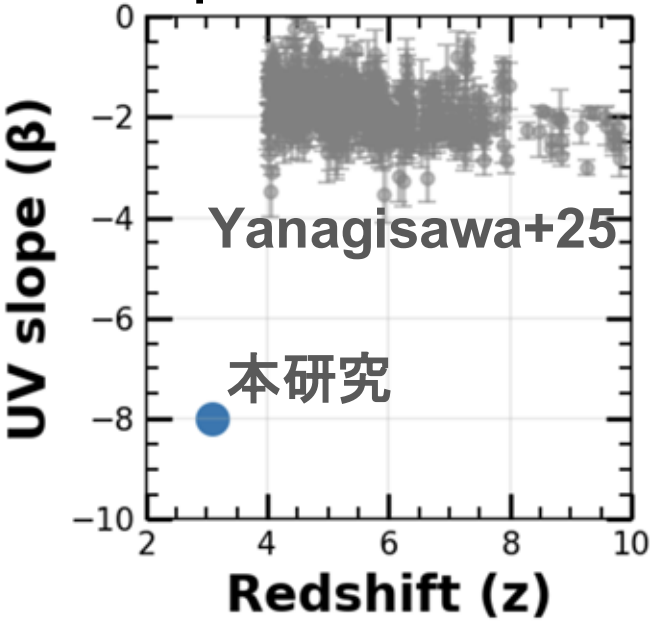
青色連続光

~~星の集団でフィット~~

$$f(\lambda) = A\lambda^{\beta}$$

→ β ~ -8 !





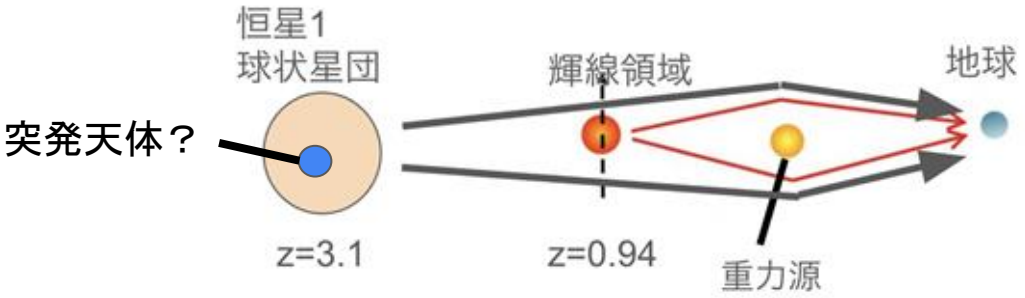
銀河/AGN/ダストでもβ~-3
→超新星爆発のような突発天体か？

本恒星研究のまとめ

わかったこと

・マイクロレンズされたz=3.1の形成直後の球状星団？

・球状星団内に異常に急な傾きのスペクトルを示す突発天体？



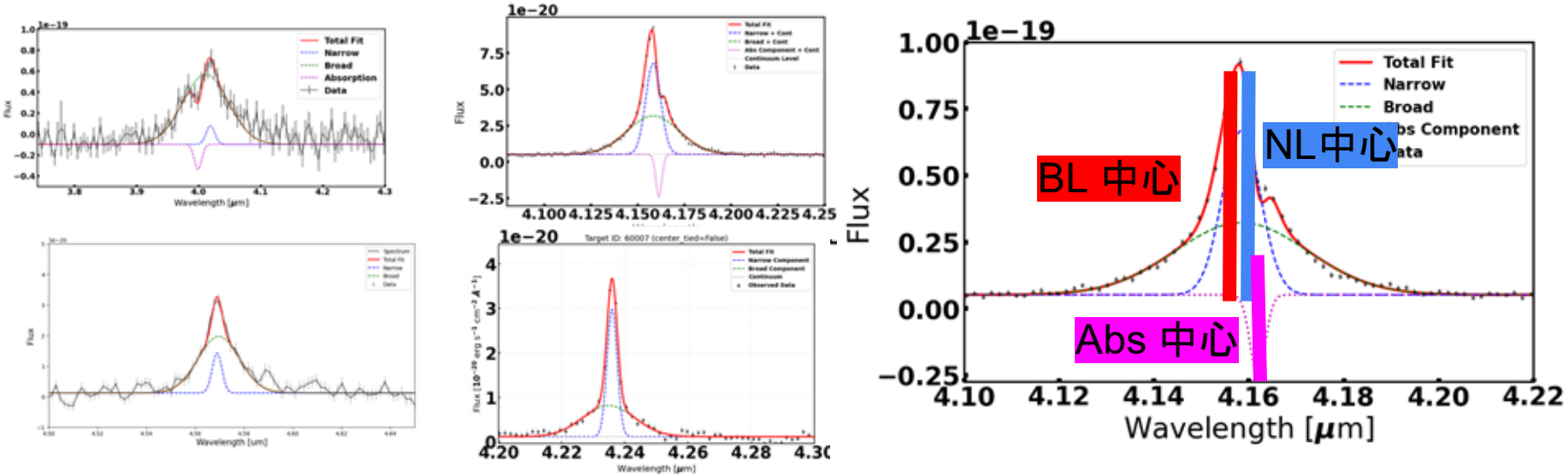
今後

・球状星団の進化過程を明らかにする
・継続観測で光度プロファイルから構造を突き止める

3. BHの成長

早川友理、俊成哲

BHの成長：Ha （Hb）輝線とガスの運動



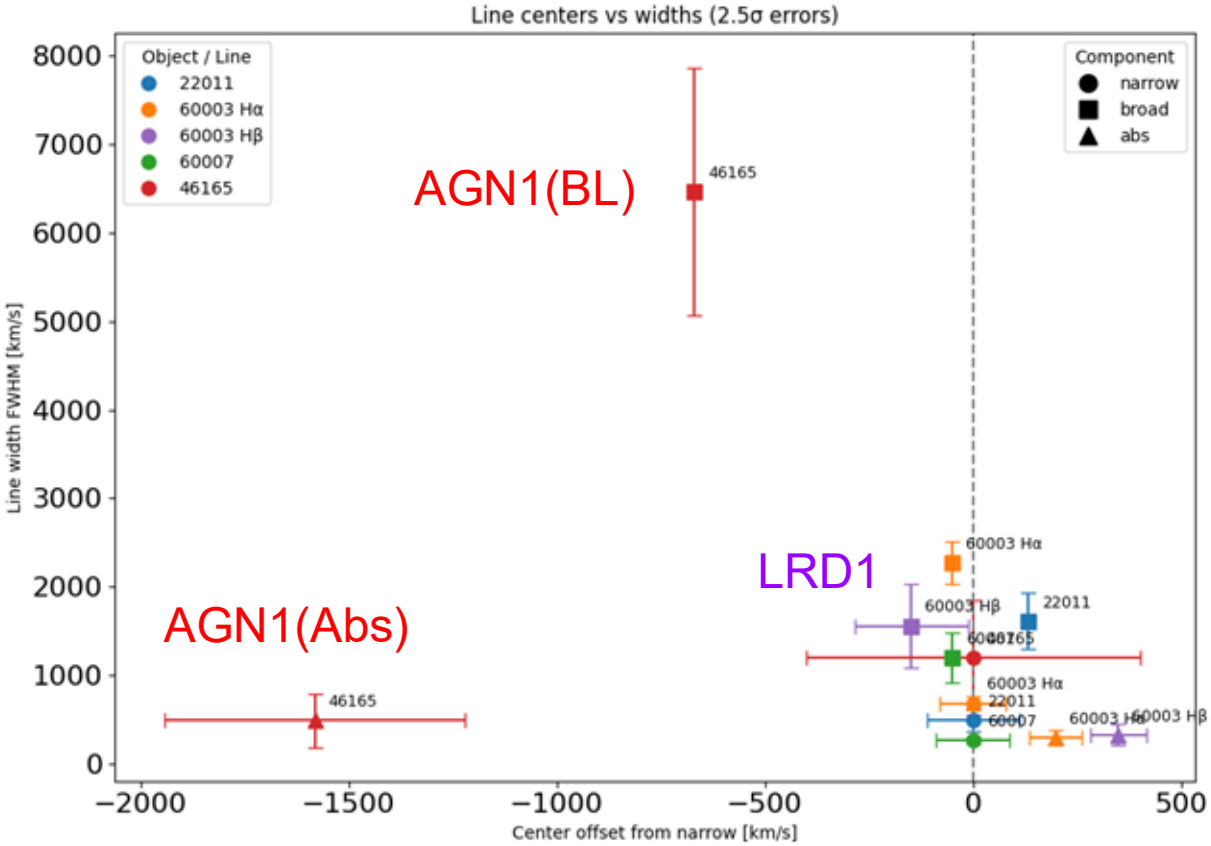
129個のhigh-z銀河の中に2つの活動銀河核AGN： AGN1, AGN2
3個のLRD候補の中に2つのLRD： LRD1, LRD2

AGN:
中心に超巨大BHを持つ天体

Ha, Hb輝線からブラックホール周りのガスの運動を知る:

1. Narrow Line (NL): 銀河全体から放射
2. Broad Line (BL) : BH周りのガスからの放射
3. Absorption (Abs) : BH近くのガスによる吸収

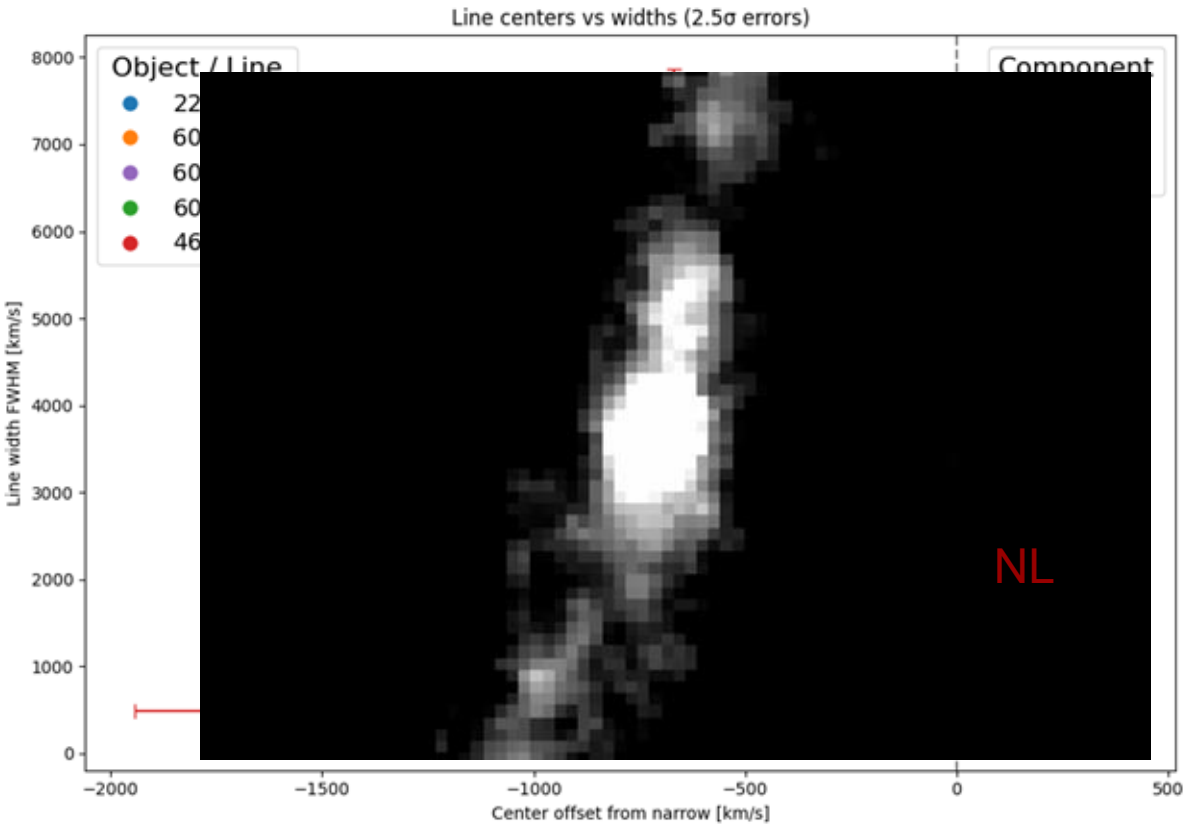
BHの成長：Ha （Hb）輝線とガスの運動



・有意な差：**AGN1**, **LRD1**

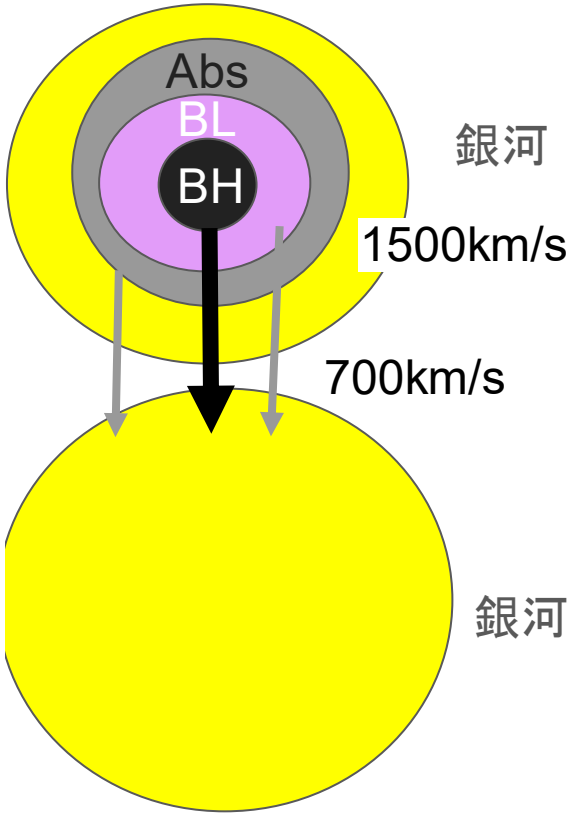
→この2つの天体について調べる

多数の特徴量が得られた2天体（AGN1）

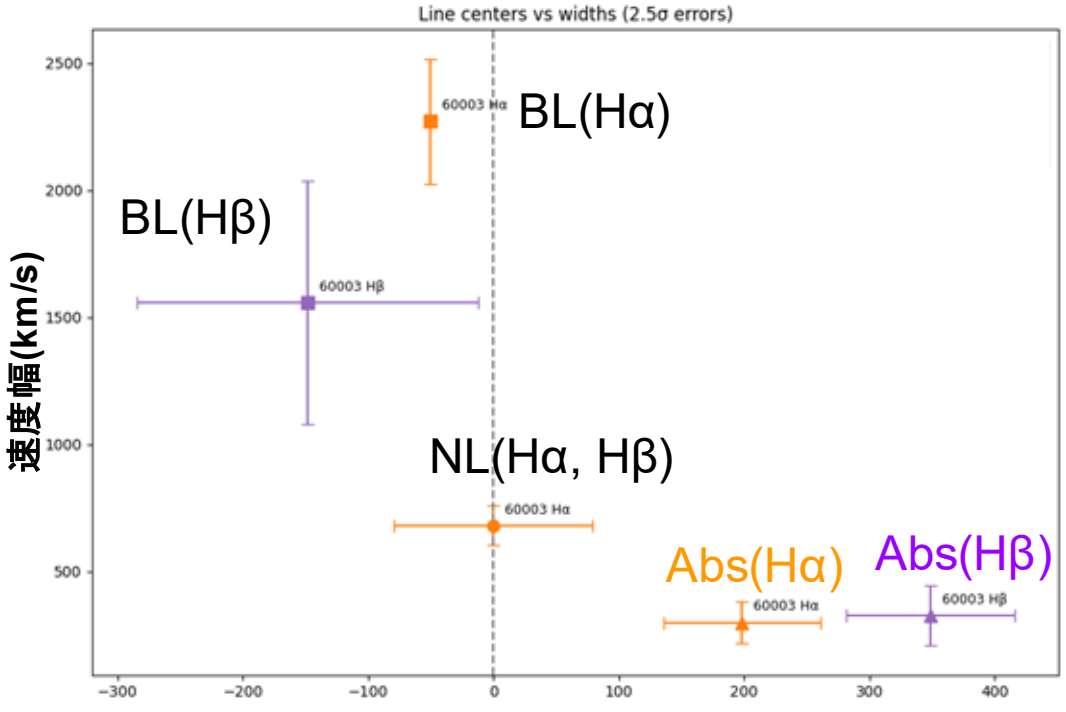


速度幅(km/s)

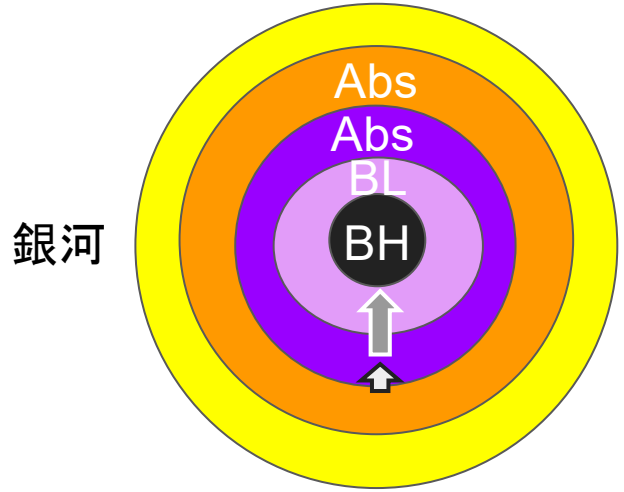
Narrow Lineとの相対速度(km/s)



多数の特徴量が得られた2天体（LRD1）



Narrow Lineとの相対速度(km/s)



・BLの相対速度に有意な差なし
・Absは内側ほど速く落ち込む

→BHの成長現場か？

4.微細構造定数の宇宙論的進化

張皓勤

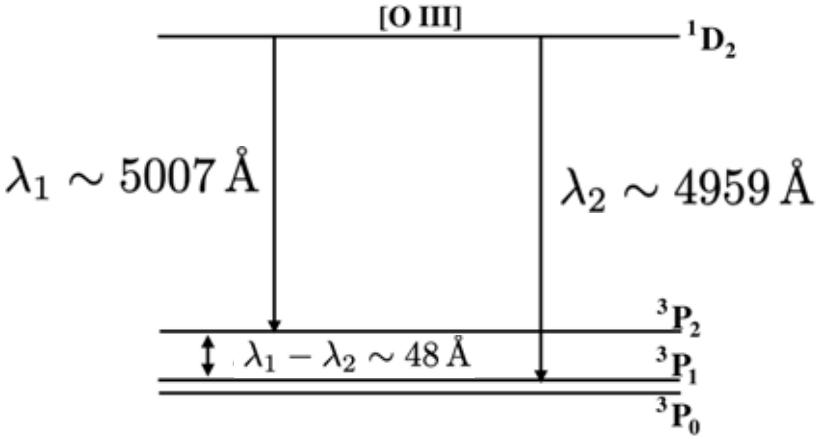
微細構造定数と宇宙論

- 微細構造定数 $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c}$ は
  電磁相互作用の強さを表す

- 標準模型 + ΛCDMモデル
  では定義より $\Delta\alpha = 0$

- 弦理論やDDEでは α が変化
  →観測から理論モデルを検証！

α と観測量の関係



Bahcall, Steinhardt, & Schlegel (2004)

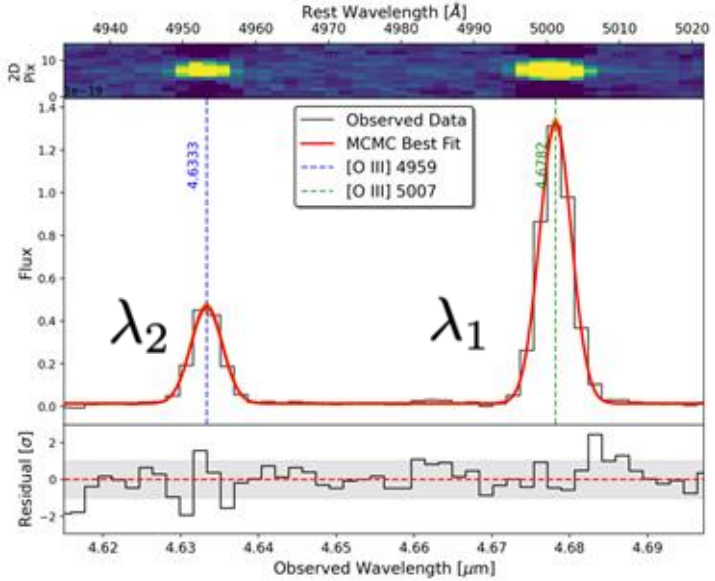
- 磁気相互作用による
  分裂幅 $\lambda_1 - \lambda_2 \propto \alpha^2$

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(z) = \sqrt{\frac{R(z)}{R(0)}} - 1, \quad R(z) = \frac{\lambda_1(z) - \lambda_2(z)}{\lambda_1(z) + \lambda_2(z)}$$

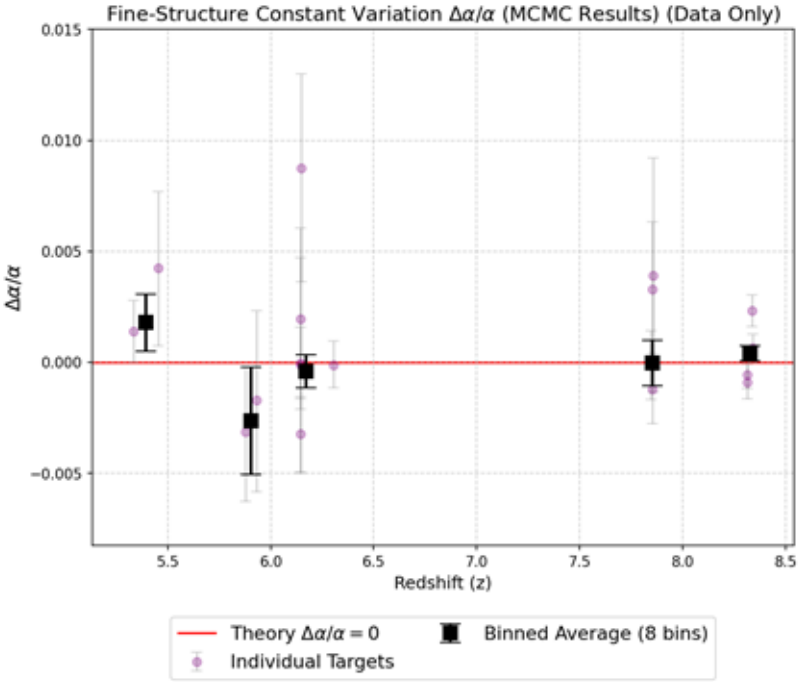
解析手法と結果

- [OIII] 輝線のスペクトルに対して λ_1 , λ_2

→ $\Delta\alpha/\alpha$ をMCMCで推定



129天体から有意に輝線が見えた21天体



z=5~9で $\Delta\alpha/\alpha$ =0と無矛盾な結果

理論との比較(high-z 21天体)

ハドロンとの結合定数に制限をかける！！

1.Runaway Dilaton Model

(Martins et. al., 2015)

・弦理論で登場するDilaton場

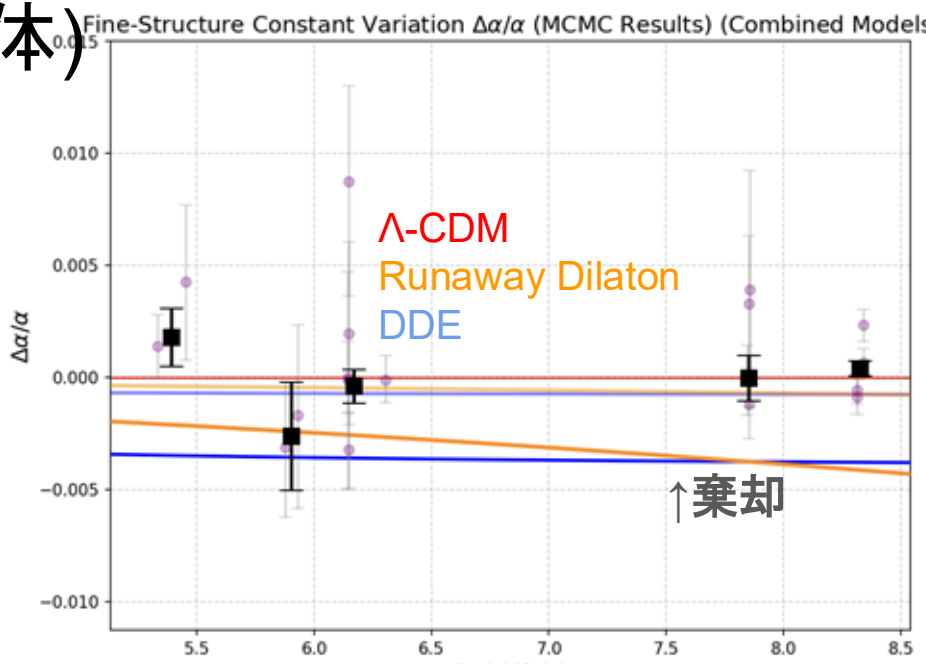
$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(z) = \frac{\alpha_{\mathrm{had},0}}{40}\left[1 - e^{-(\phi(z)-\phi_0)}\right]$$

2.DDE Model

(Martins et. al., 2016 , DESI DR2, 2025)

・DDEを表すスカラー場

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}(z) = \pm\zeta\int_0^z \sqrt{3\Omega_\phi(z')|1+w_\phi(z')|}\,\frac{dz'}{1+z'}$$



結合定数につけられた制限（1σ）

Model Parameter	MCMC (high-z, 21 天体) [$\times 10^{-3}$]
Dilaton ($\alpha_{\mathrm{had},0}$)	$-8.1^{+14.2}_{-14.9}$
DDE (ζ)	$-1.36^{+2.39}_{-2.41}$

理論

ハドロ

1.Ru

(Martin

・弦理

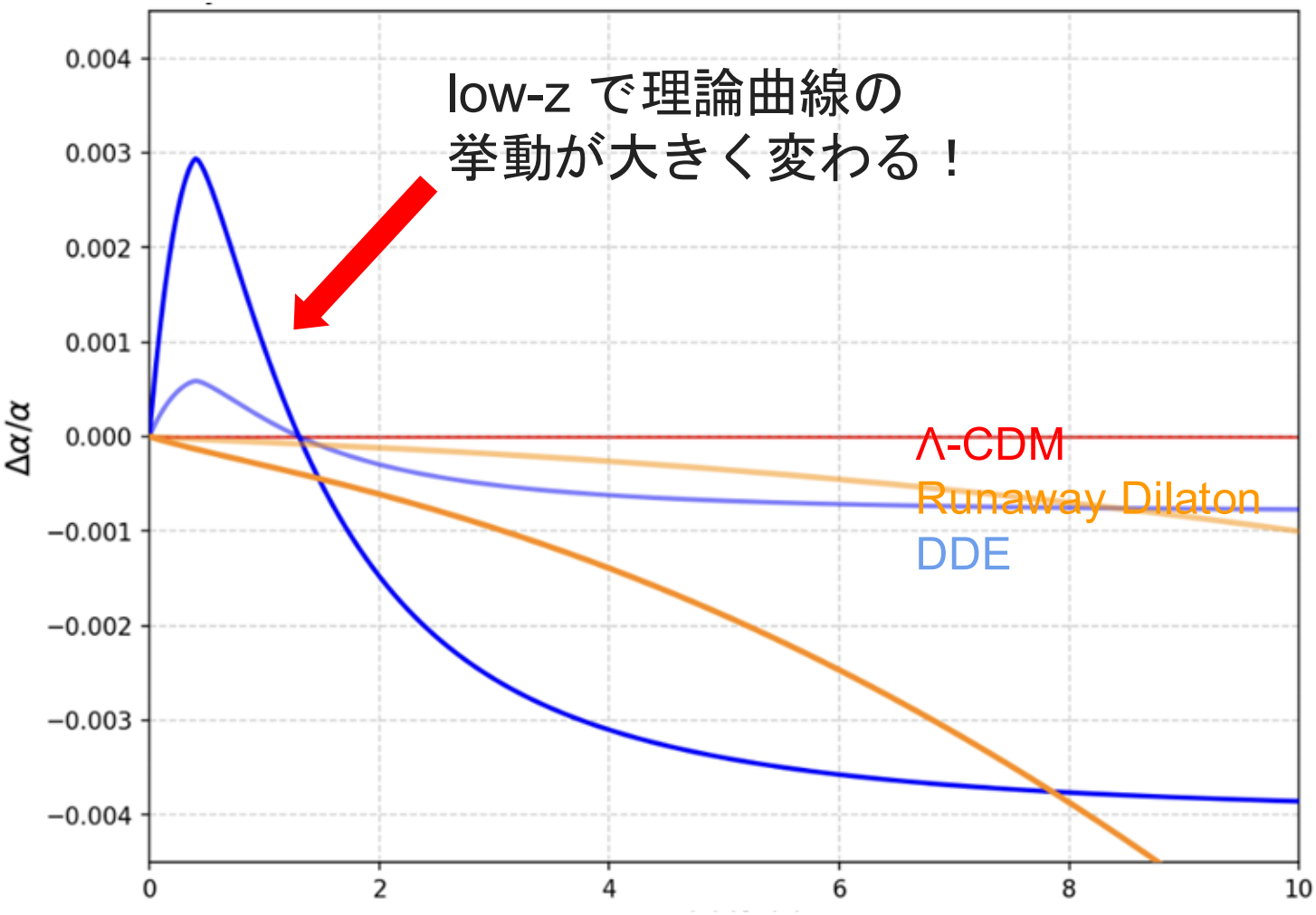
$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$

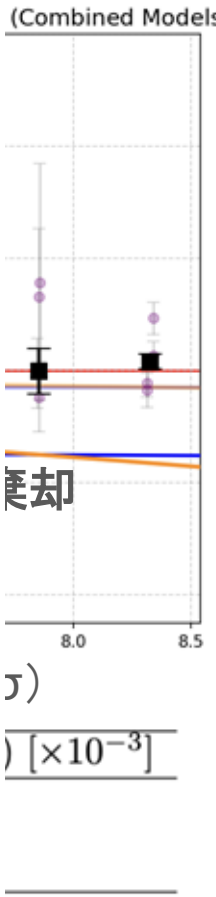
2.DI

(Mart

・DD

$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$(z





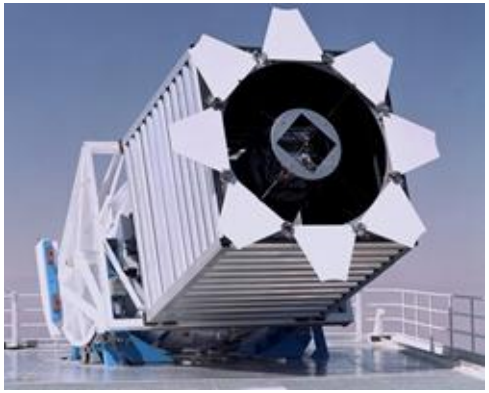
Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

- 最大の宇宙地図を作る観測
- データリリース(DR7) 約93万天体から

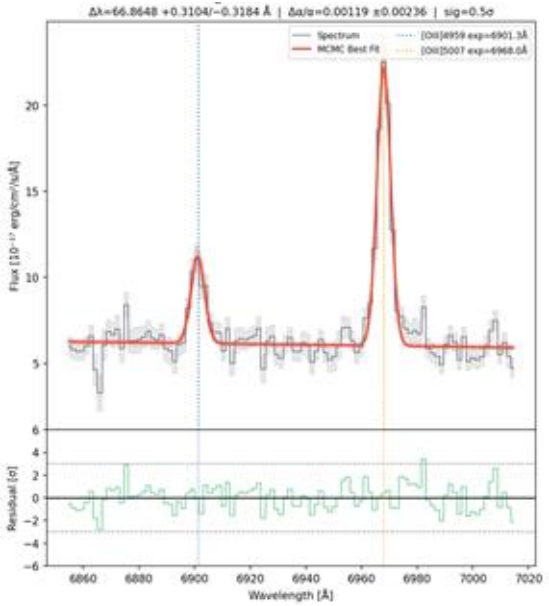
  以下の基準で選択

- 0.02<z<0.6の銀河 (AGN, BH なし)
- [OIII]輝線 信号強度/ノイズ強度＞10
- zの各ビンで均等にサンプリング

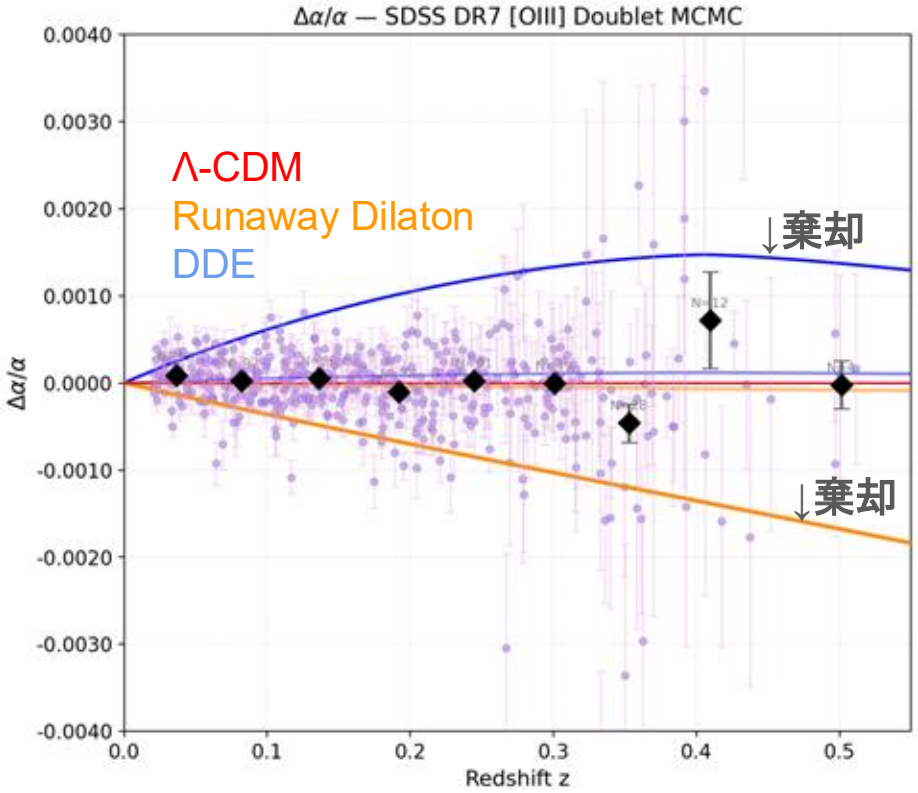
→477天体



SDSS



理論との比較(low-z 銀河 477天体)



結合定数につけられた制限（1σ）

Dataset $[\times 10^{-3}]$	Dilaton $(\alpha_{\mathrm{had},0})$	DDE (ζ)
MCMC (high-z, 21 天体)	$-8.1^{+14.2}_{-14.9}$	$-1.36^{+2.39}_{-2.41}$
MCMC (low-z, 477 天体)	$30.3^{+74.3}_{-73.0}$	$-0.29^{+0.53}_{-0.56}$

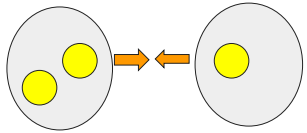
- 10^{-3} 精度で $\Delta\alpha/\alpha$ =0
- 異なる赤方偏移天体で相補的に結合定数を制限
- 系統誤差の評価が課題

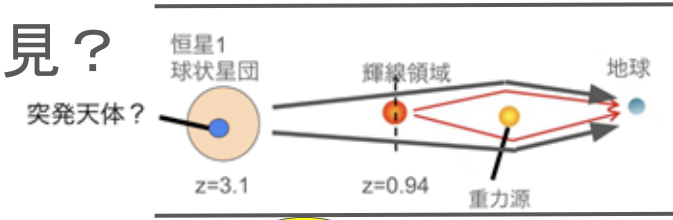
まとめ

JWST 等の分光・撮像データを解析→宇宙の様々なスケールでの進化

high-z 銀河の星・星団

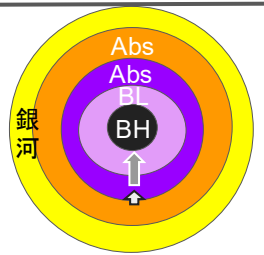
- 銀河合体に由来する、星団が多い構造の形成を示唆
- z=3.1の球状星団＋未知の突発天体を発見？

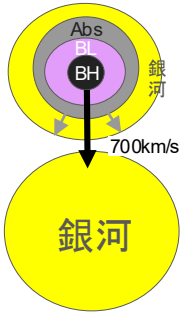




high-z AGN・LRD

- 銀河合体・ガスの降着→超巨大BHの成長





low-z / high-z 宇宙

- αの進化から弦理論/DDEを検証。$\alpha_{\mathrm{had},0}$, ζに制限

まとめ

JWST 等の

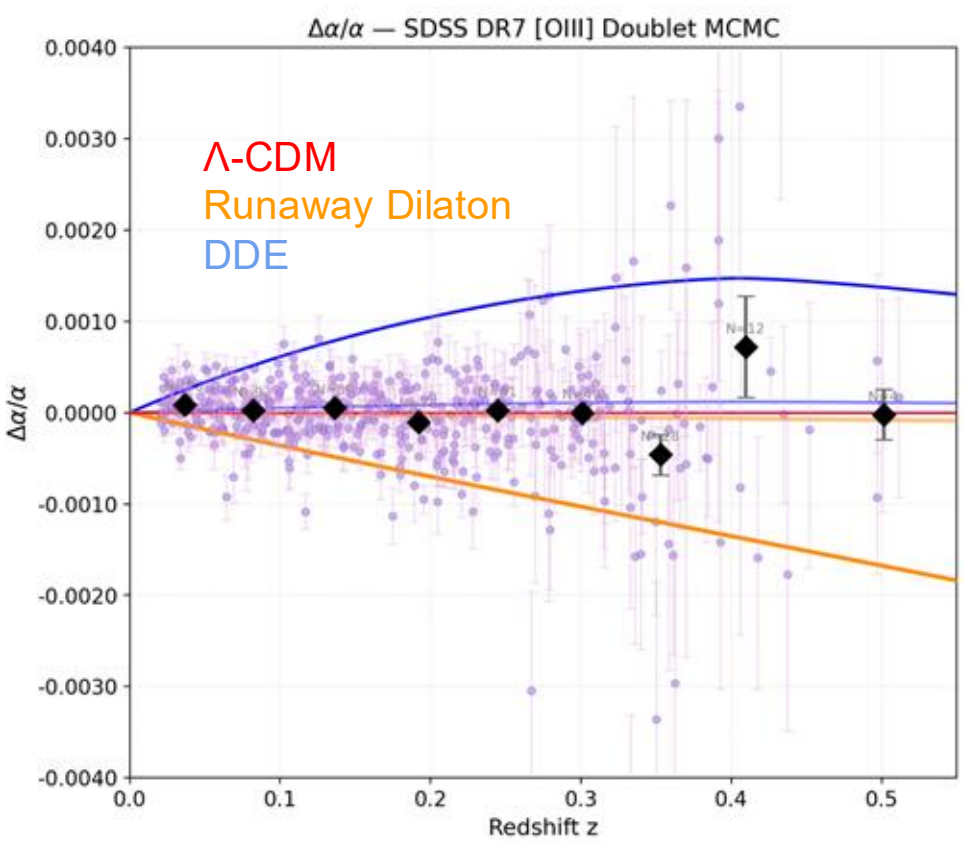
ルでの進化

high-z 銀河

- 銀河合
- z=3.1

high-z AGN

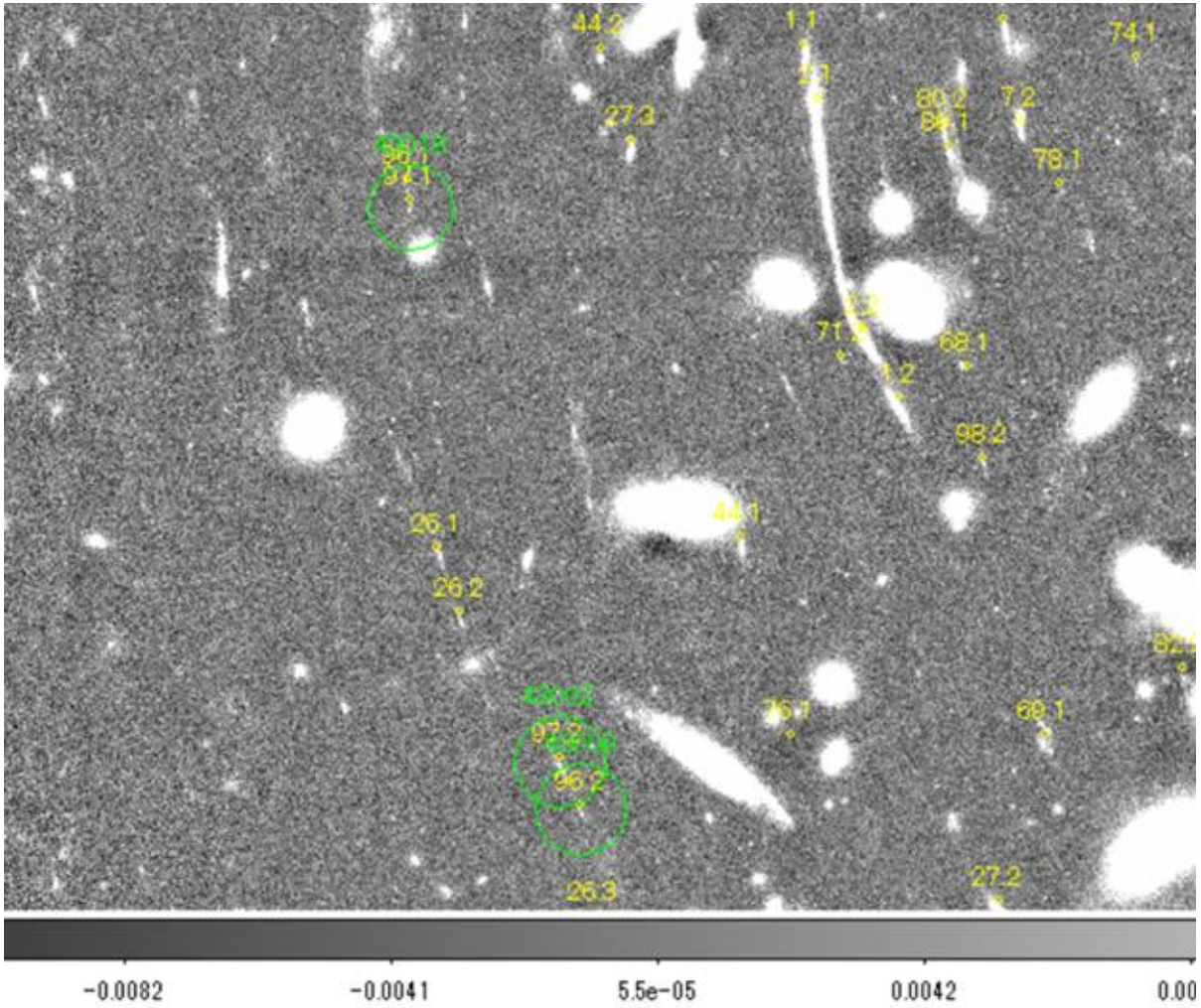
- 銀河合



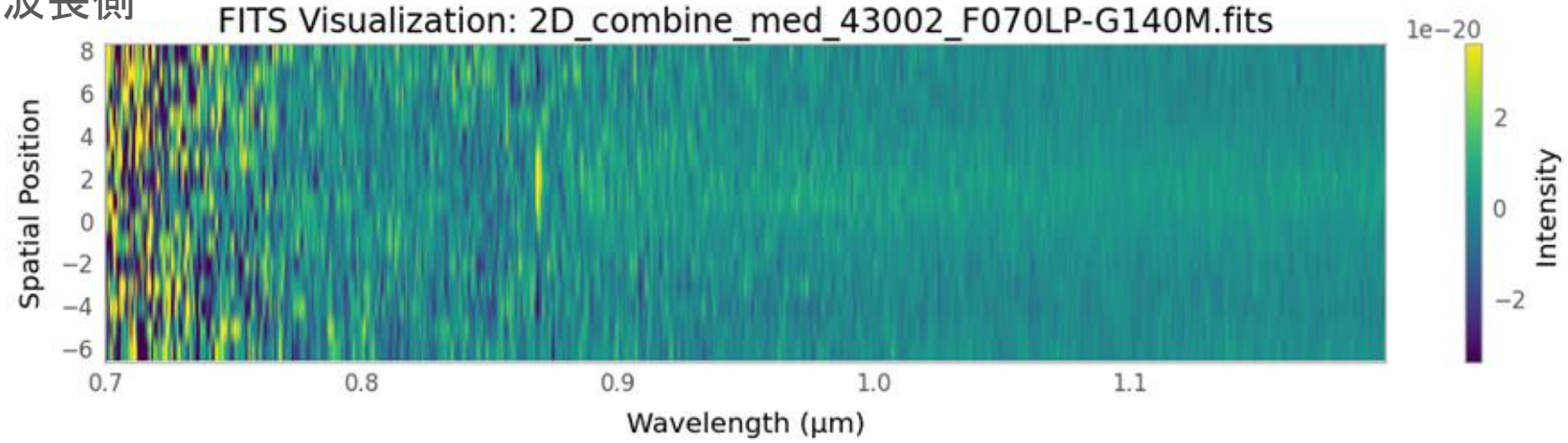
low-z / high-z 宇宙

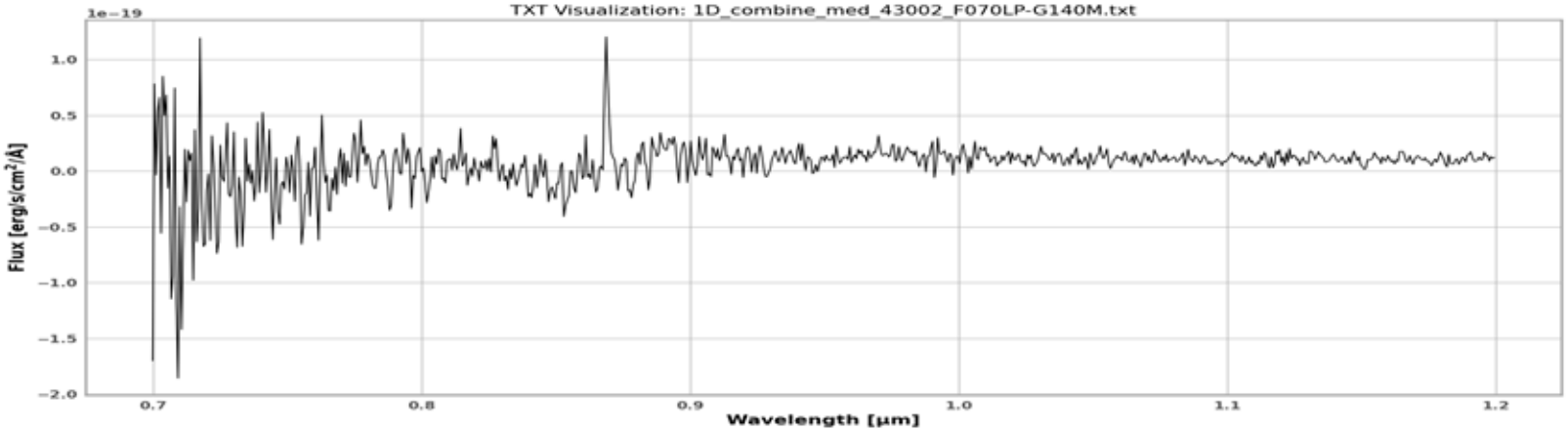
- αの進化から弦理論/DDEを検証。$\alpha_{\mathrm{had},0}$, ζに制限

Back up

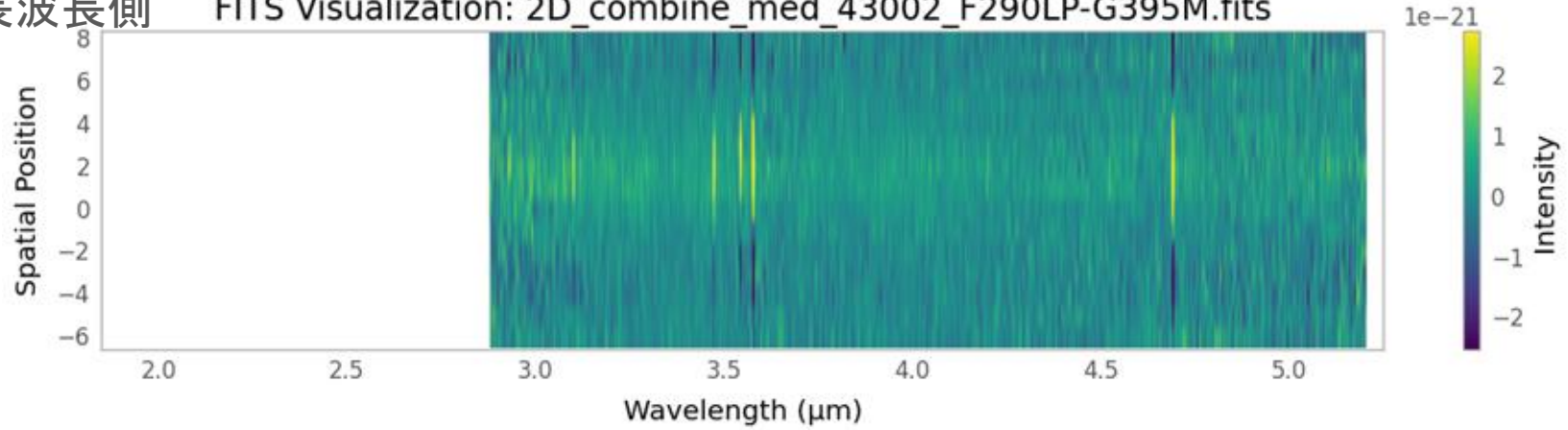

44.2
1.1
74.1
27.3
78.1
68.1
98.2
44.1
26.1
26.2
96.2
26.3
27.2
-0.0082
-0.0041
5.5e-05
0.0042
0.00

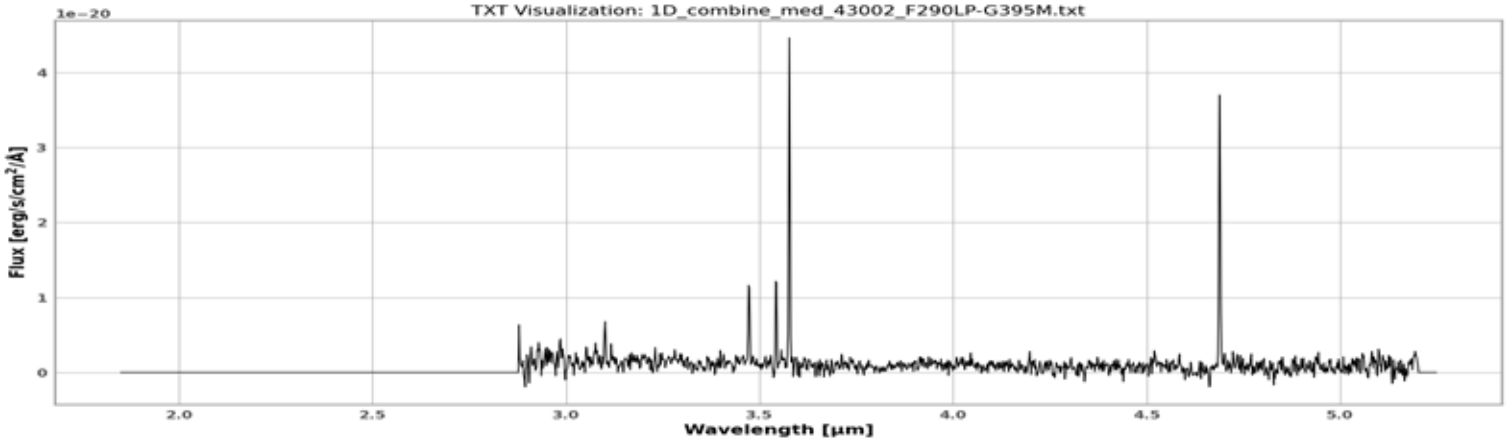
CG1短波長側

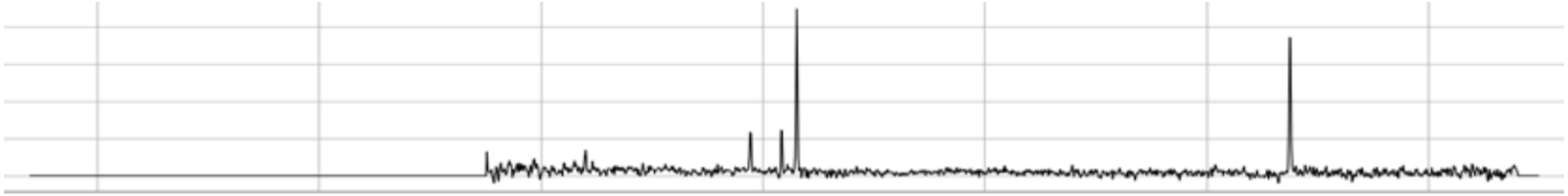

FITS Visualization: 2D_combine_med_43002_F070LP-G140M.fits
Spatial Position
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
Wavelength (μm)
1e−20
2
0
−2
Intensity

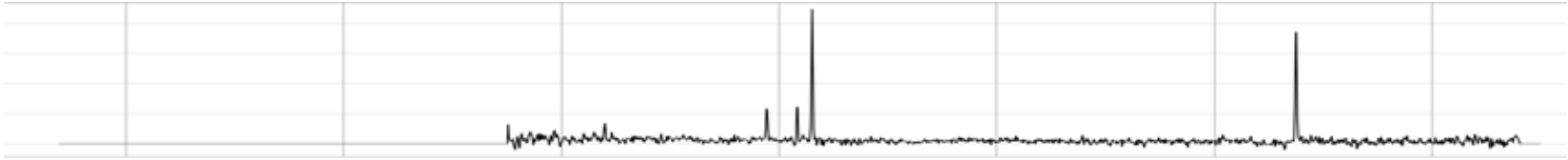

TXT Visualization: 1D_combine_med_43002_F070LP-G140M.txt
1e−19
Flux [erg/s/cm²/Å]
1.0
0.5
0.0
−0.5
−1.0
−1.5
−2.0
0.7
0.8
0.9
1.0
1.1
1.2
Wavelength [μm]

CG1長波長側


FITS Visualization: 2D_combine_med_43002_F290LP-G395M.fits
Spatial Position
8
6
4
2
0
−2
−4
−6
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
Wavelength (μm)
1e−21
2
1
0
−1
−2
Intensity


TXT Visualization: 1D_combine_med_43002_F290LP-G395M.txt
1e−20
Flux [erg/s/cm²/Å]
4
3
2
1
0
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0
Wavelength [μm]

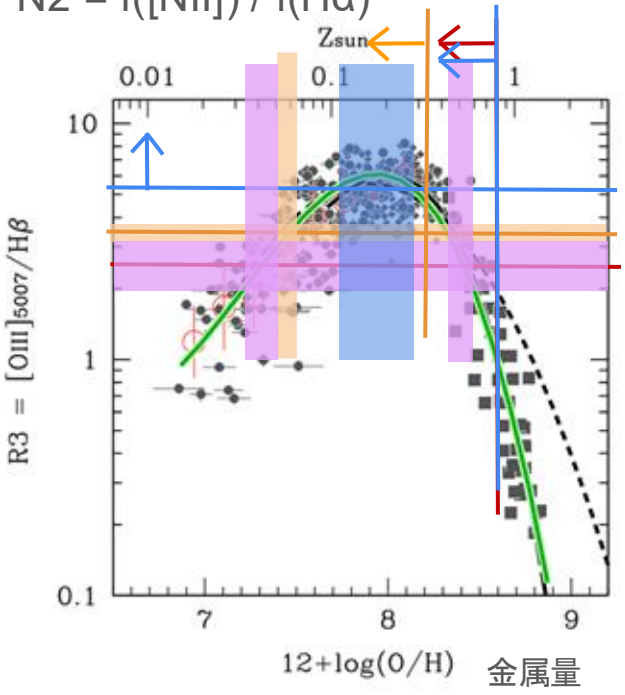


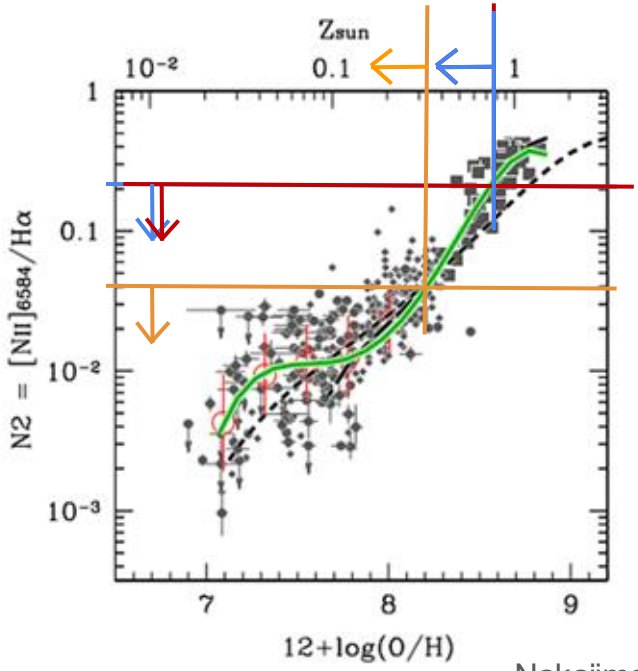


重元素汚染の指標：金属量

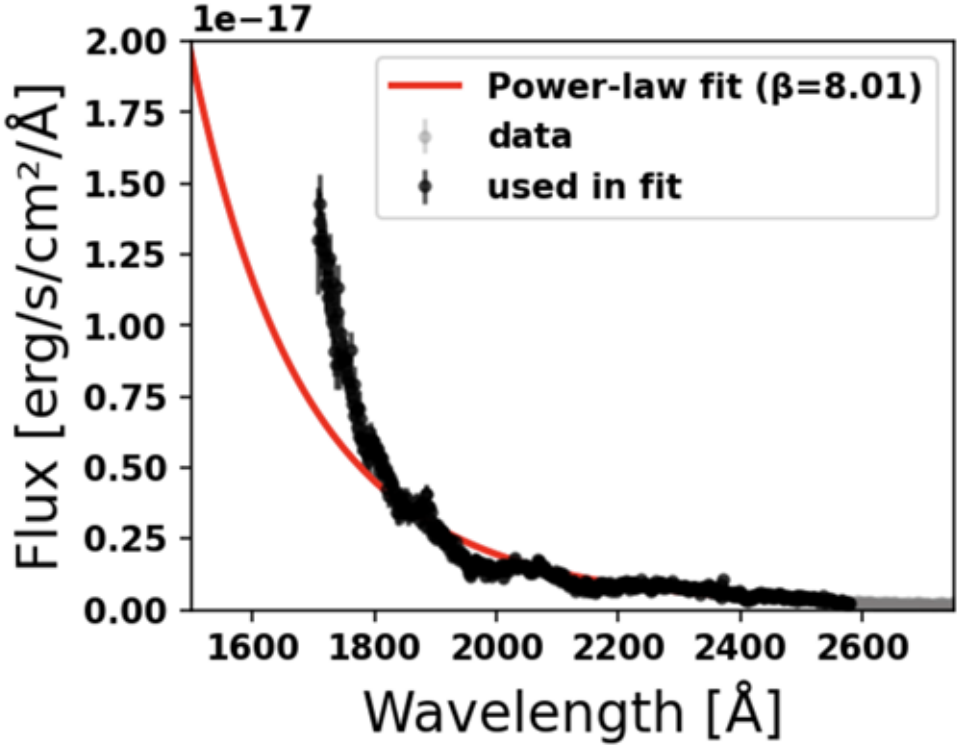
- 金属量(Z)：Hに対するOの存在比
- 輝線のフラックス比を使う
  - R3 = f([OIII]) / f(Hβ)
  - N2 = f([NII]) / f(Hα)

CG-1.1
CG-1.2N
CG-1.2S

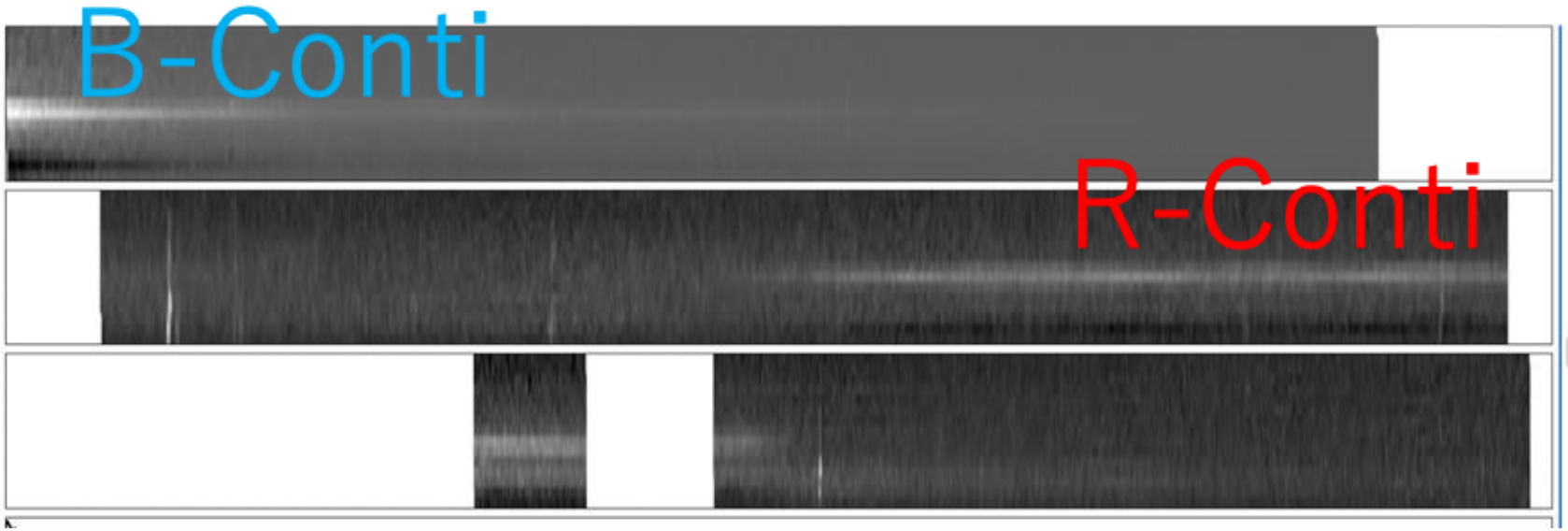




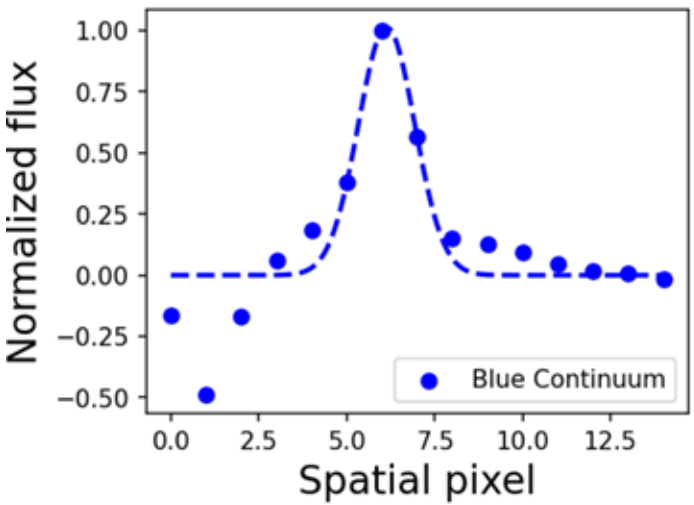
Nakajima et al. (2022)

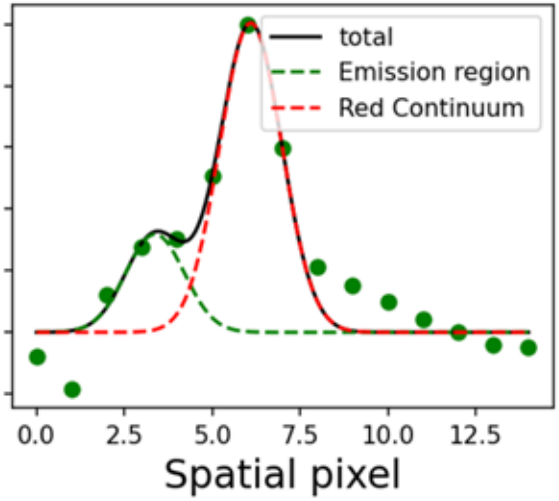

1e−17
2.00
1.75
1.50
1.25
1.00
0.75
0.50
0.25
0.00
Flux [erg/s/cm²/Å]
Power-law fit (β=8.01)
data
used in fit
1600
1800
2000
2200
2400
2600
Wavelength [Å]

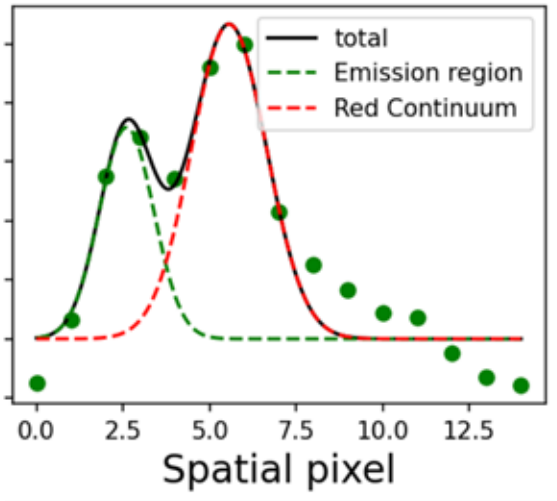




- B-ContiとR-Cotniは空間的に同じ位置
- 輝線放射源は少し異なる位置



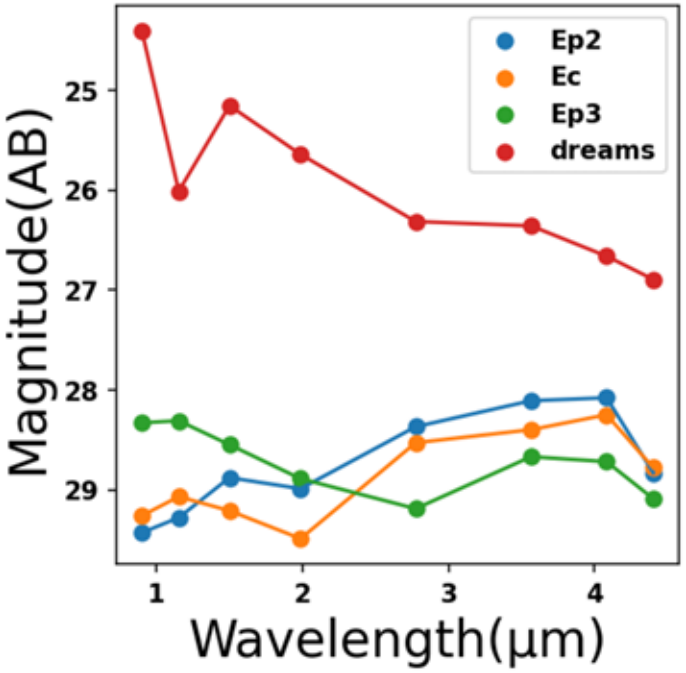


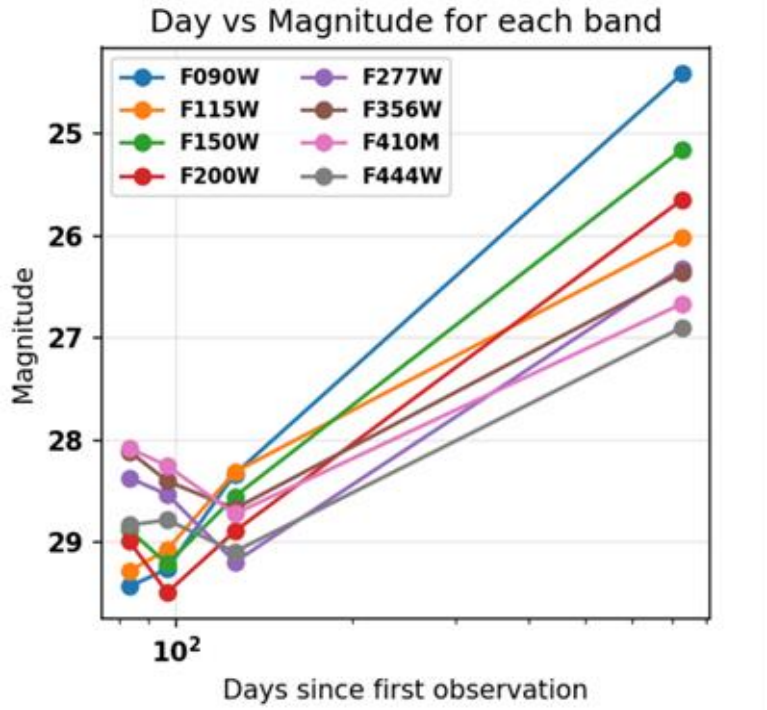


$\mathrm{FWHM_{blue}} = 0.19$ arcsec $\quad \mathrm{Center_{blue}} = 6.1$

$\mathrm{FWHM_{red}} = 0.21$ arcsec $\quad \mathrm{Center_{red}} = 5.9$

$\mathrm{FWHM_{emi}} = 0.19$ arcsec $\quad \mathrm{Center_{emi}} = 3$


Ep2
Ec
Ep3
dreams
Magnitude(AB)
25
26
27
28
29
1
2
3
4
Wavelength(μm)


Day vs Magnitude for each band
F090W
F115W
F150W
F200W
F277W
F356W
F410M
F444W
Magnitude
25
26
27
28
29
10^2
Days since first observation

Status	Bounds	Ellipses	Networks	Calls	f_live	N_eff	log Z
Finished	52	1	4	31000	N/A	4885	-452.81

Completed in 1421.6 seconds.

Parameter	Posterior percentiles		
	16th	50th	84th
delayed:age	0.383	0.409	0.442
delayed:massformed	9.992	9.997	9.999
delayed:metallicity	0.384	0.403	0.426
delayed:tau	0.014	0.023	0.033
dust:Av	0.004	0.015	0.039
nebular:logU	-3.681	-3.011	-2.305
redshift	3.105	3.106	3.107
veldisp	488.661	495.384	498.751

3. 輝線から探る
超大質量ブラックホール周辺の構造

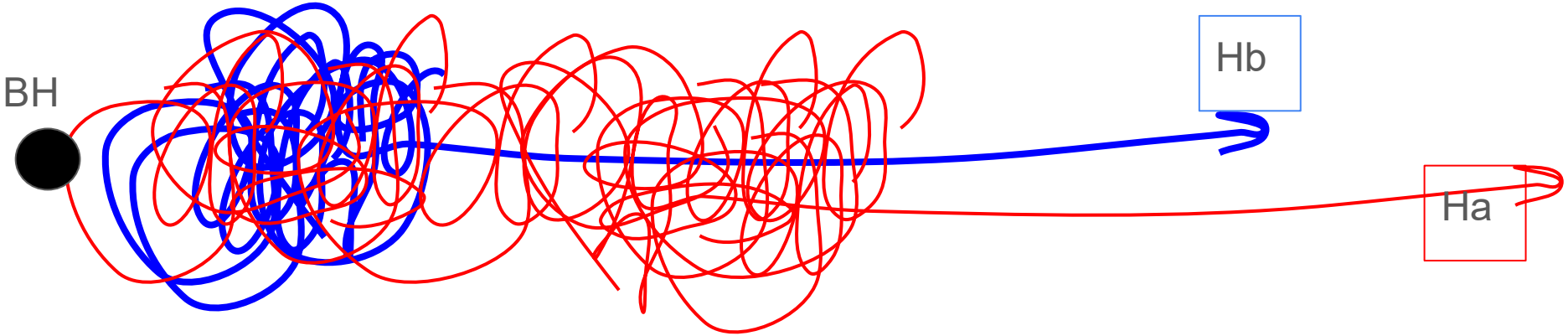
早川友理、俊成哲

R-1000　：分解能

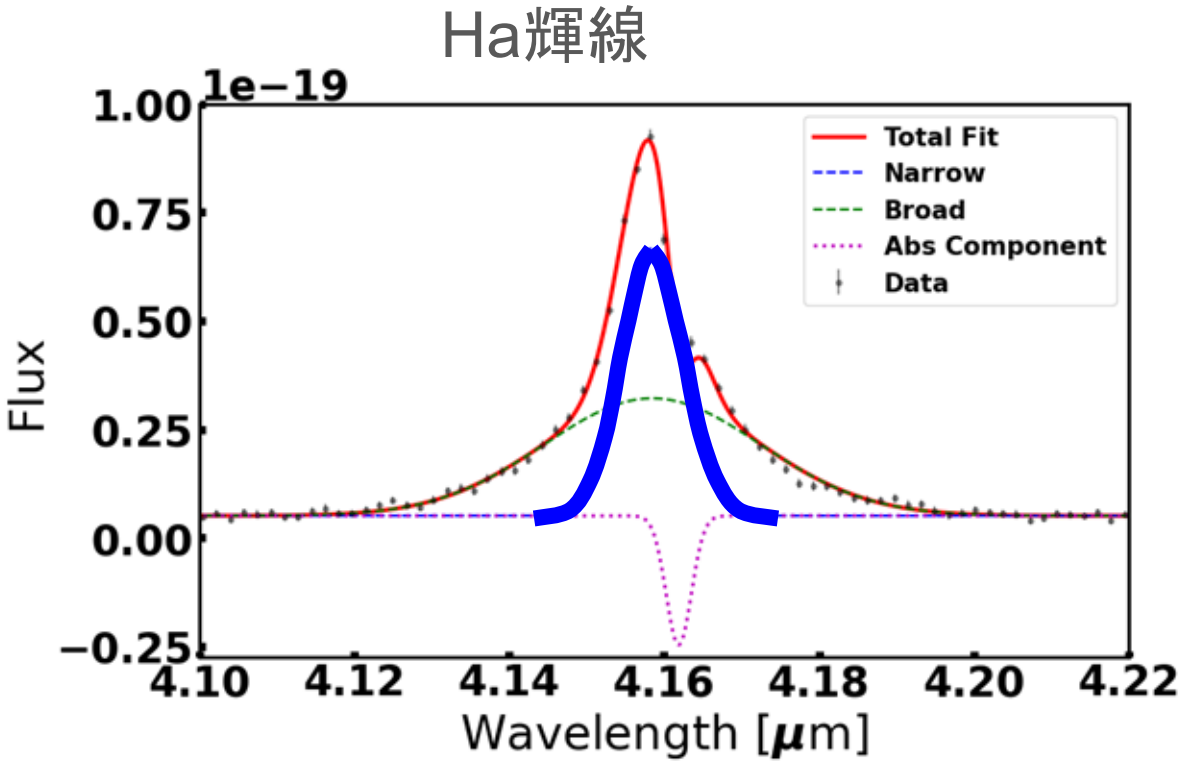
$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

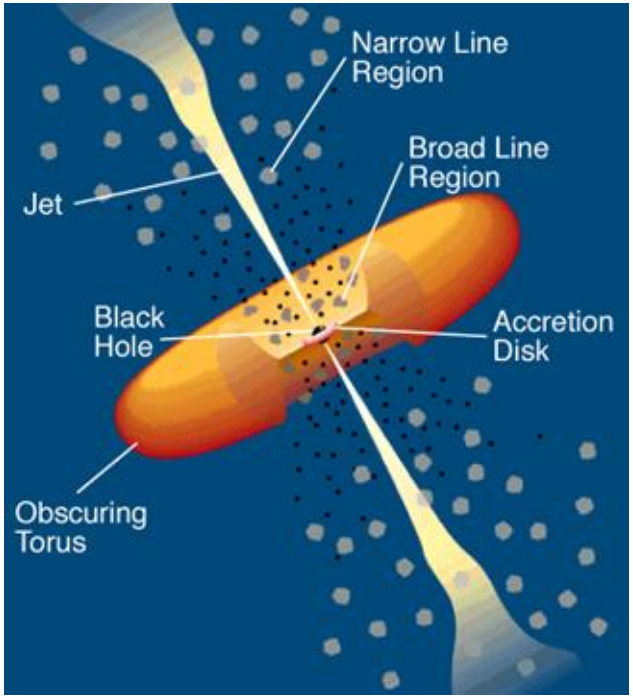
λ　：観測波長

$\Delta\lambda$　：分離できる最小の波長差


BH
Hb
Ha

Narrow Line, Broad Line, Absorption



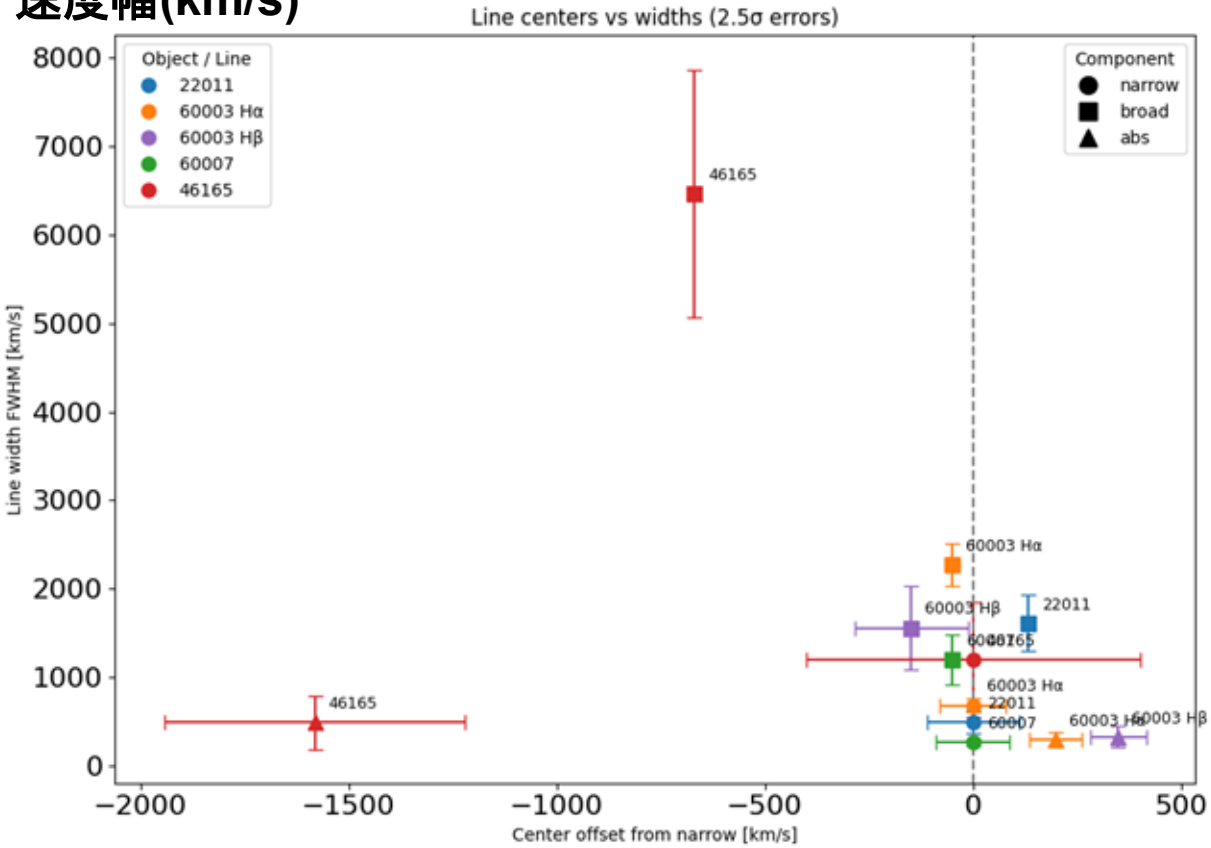


https://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~iwamuro/LECTURE/AGN/agn.html

2天体のおもしろ銀河

エラーは2.5σを表示

速度幅(km/s)



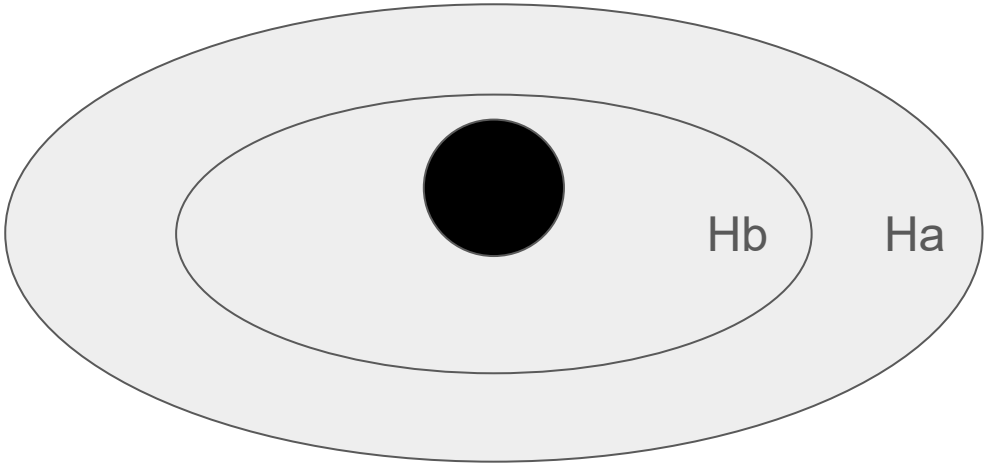
Narrow Lineとの相対速度(km/s)

- 46165
  - Broadline : blushift
  - 吸収体 : blueshift

  → たくさんのガスが約7000km/sで中心に落ちている

- 60003
  - Hb ,Haの速度分散はほぼ同じ→BHからの距離はほぼ同じ
  - v_Hb = 2 * v_Ha

→脈動銀河？



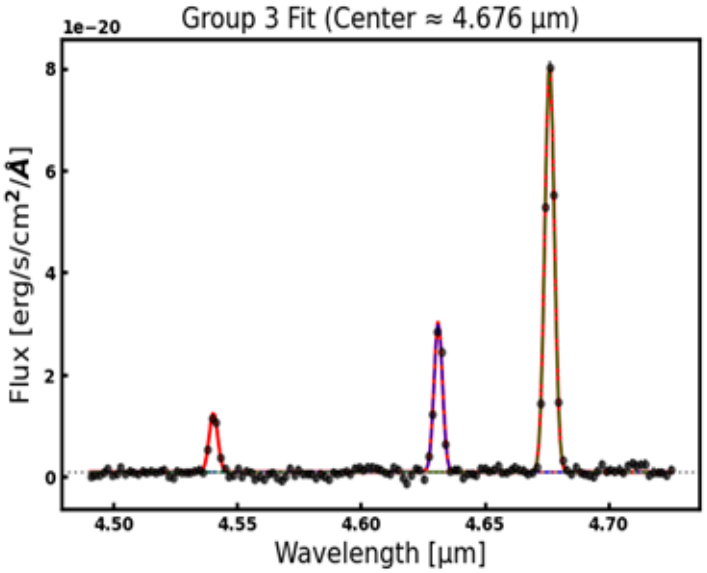
- 46165
  - Broadline : blushift
  - abs吸収体 : blueshift

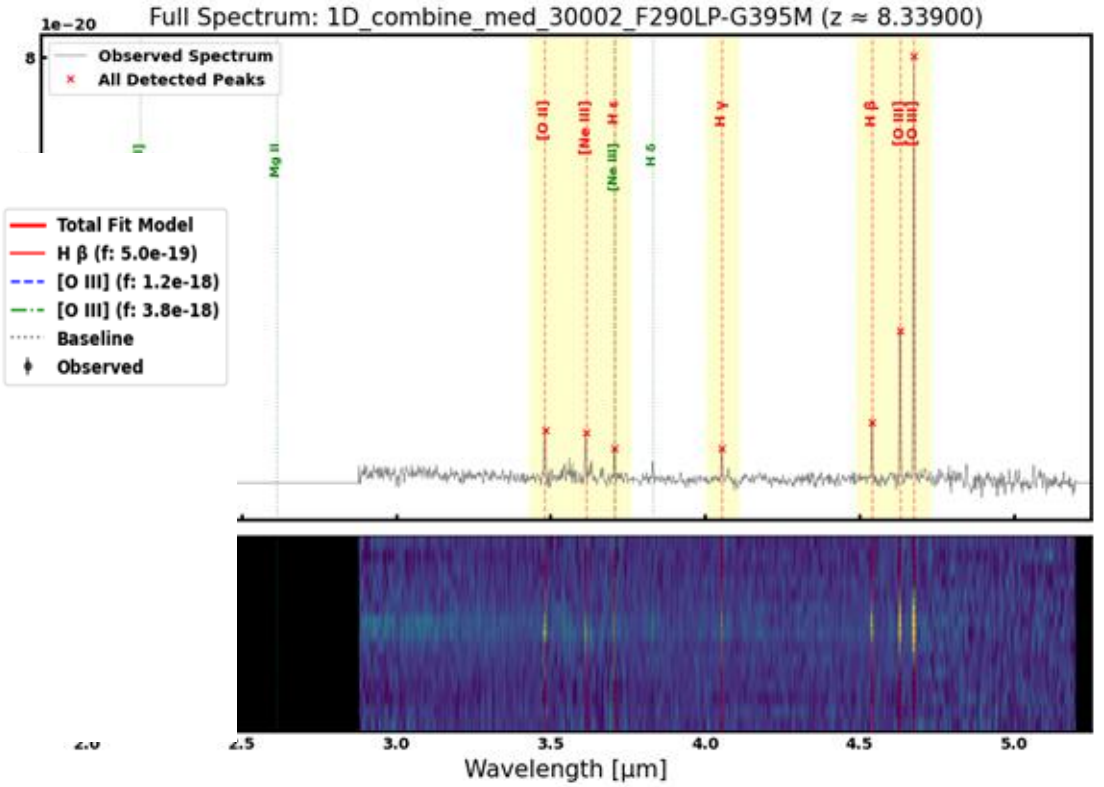
  → たくさんのガスが約7000km/sで中心に落ちている

- 60003
  - Hb ,Haの速度分散はほぼ同じ→BHからの距離はほぼ同じ
  - v_Hb = 2 * v_Ha

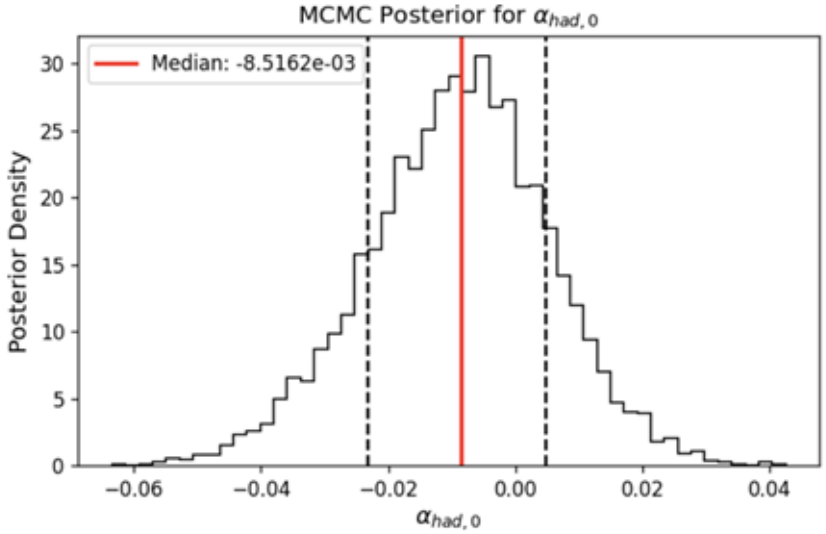
→脈動銀河？

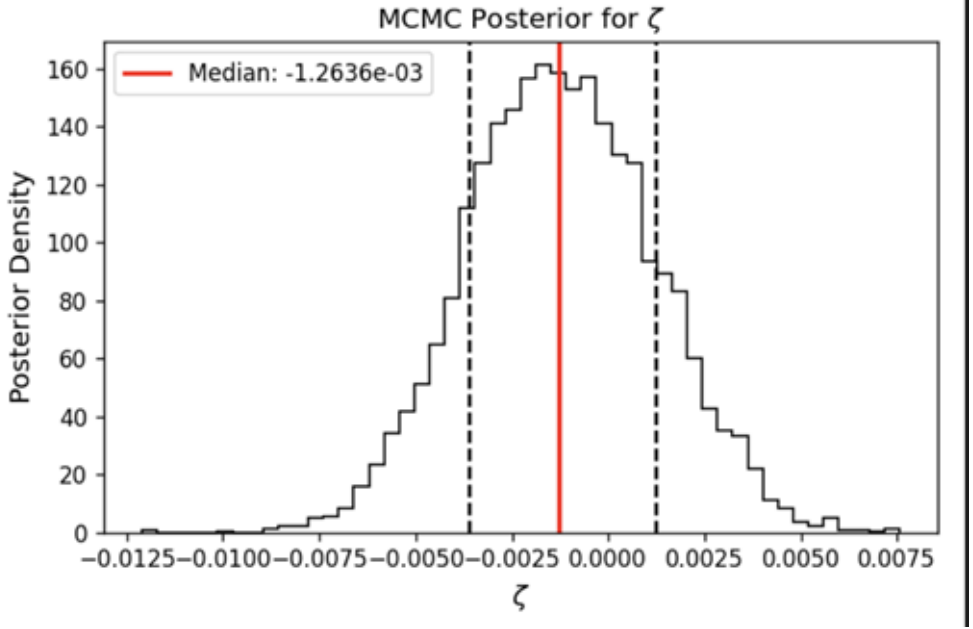
輝線の同定


Group 3 Fit (Center ≈ 4.676 μm)
1e−20
Flux [erg/s/cm²/Å]
Wavelength [μm]
4.50
4.55
4.60
4.65
4.70
0
2
4
6
8

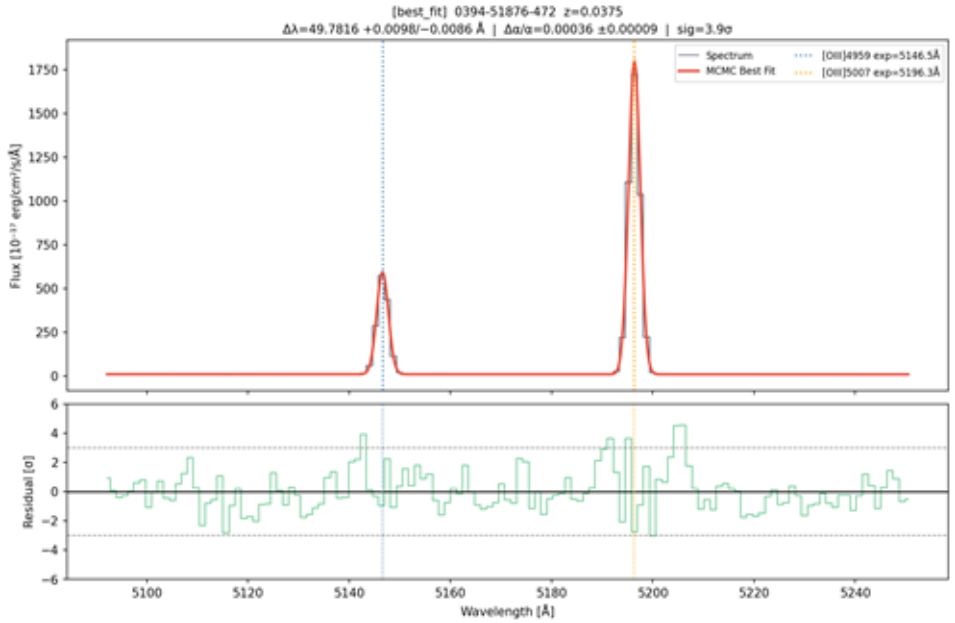

Full Spectrum: 1D_combine_med_30002_F290LP-G395M (z ≈ 8.33900)
1e−20
Observed Spectrum
All Detected Peaks
Total Fit Model
H β (f: 5.0e-19)
[O III] (f: 1.2e-18)
[O III] (f: 3.8e-18)
Baseline
Observed
[O II]
[Ne III]
H ε
[Ne III]
H δ
H γ
H β
[O III]
[O III]
Mg II
Wavelength [μm]
2.5
3.0
3.5
4.0
4.5
5.0

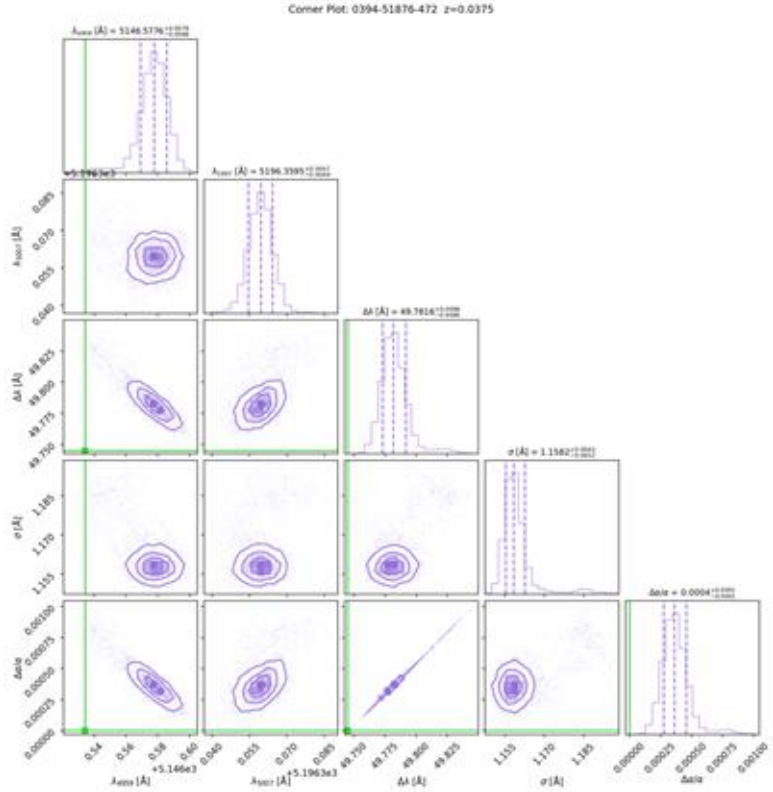
結合定数への制限


MCMC Posterior for $\alpha_{had,0}$
Median: -8.5162e-03
Posterior Density
$\alpha_{had,0}$


MCMC Posterior for ζ
Median: -1.2636e-03
Posterior Density
ζ

O3輝線へのフィッティング

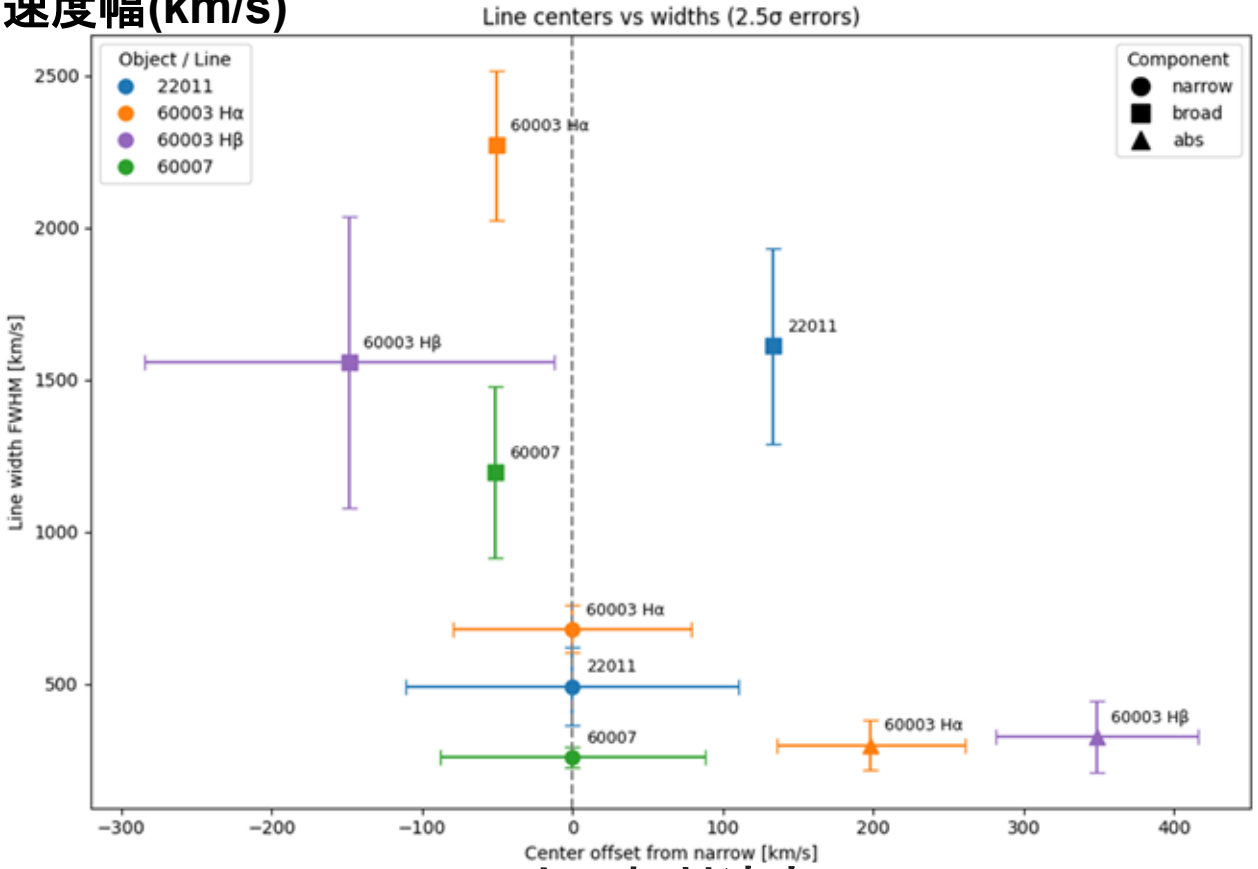




LRD候補天体について

エラーは2.5σを表示

速度幅(km/s)



Narrow Lineとの相対速度(km/s)

・オレンジと紫と緑はLRD候補天体

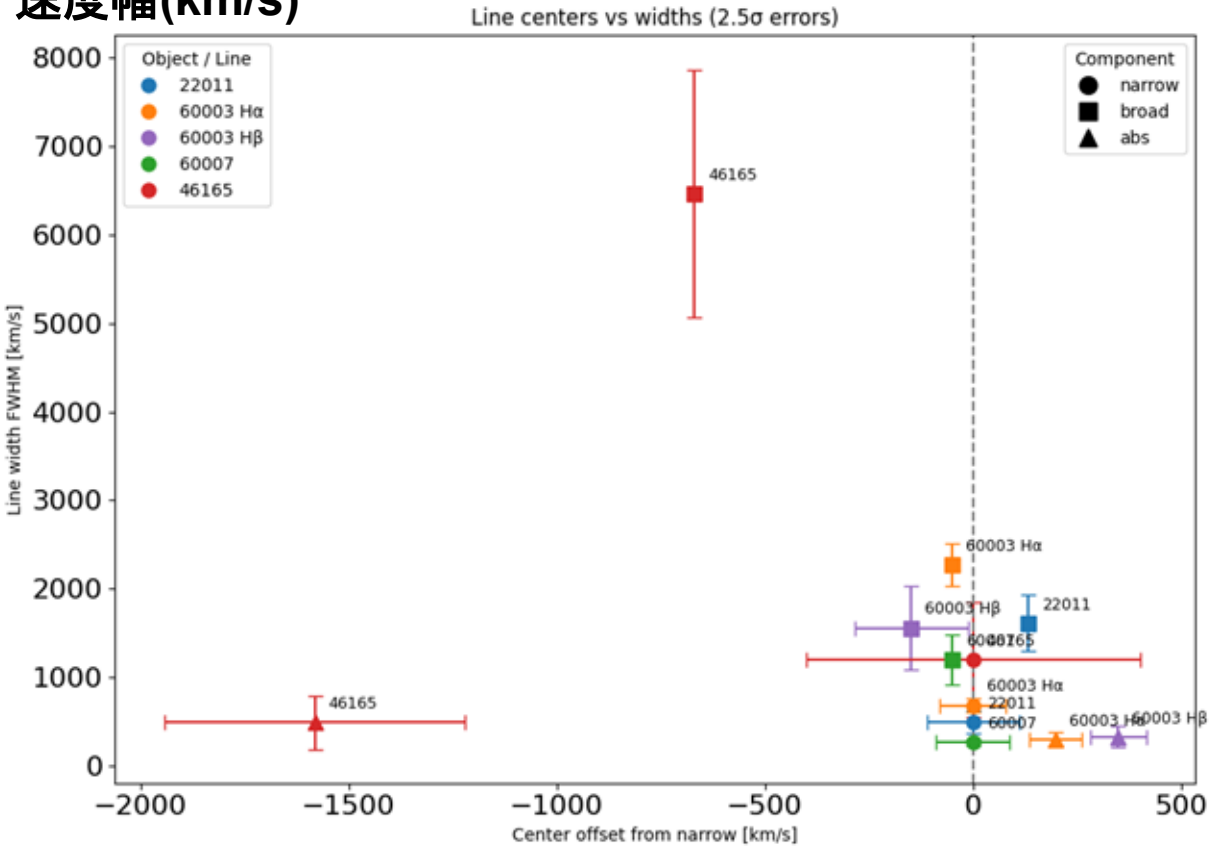
Broad lineに注目すると、ややblue shiftの傾向がある
⇨BHがこちら側に近づいていることを示唆

吸収体と同じように脈動している可能性も

AGN候補天体について

エラーは2.5σを表示

速度幅(km/s)



Narrow Lineとの相対速度(km/s)

・赤と青がAGN候補天体

赤色の速度幅がとても大きいことから銀河のmergerでの説明も納得