


$z > 4$ Radio-loud クエーサーの 電波構造に基づく種族推定

山口大学大学院 創成科学研究科 基盤科学系専攻

電磁宇宙物理学研究室 修士2年

古谷 庸介

共同研究者 新沼浩太郎, 藤澤健太 (山口大学), Z.-Q. Shen (上海天文台)

A large satellite dish antenna is the central focus, mounted on a concrete base. The dish is white with a blue 'KDDI' logo. It is set against a backdrop of a clear blue sky with scattered white clouds. In the distance, a small village with several houses is visible, surrounded by rolling hills and mountains. The overall scene is a mix of technology and nature.

導入

High-zの基本構造

高赤方偏移クエーサーの電波構造は大きく2つに分けられる。

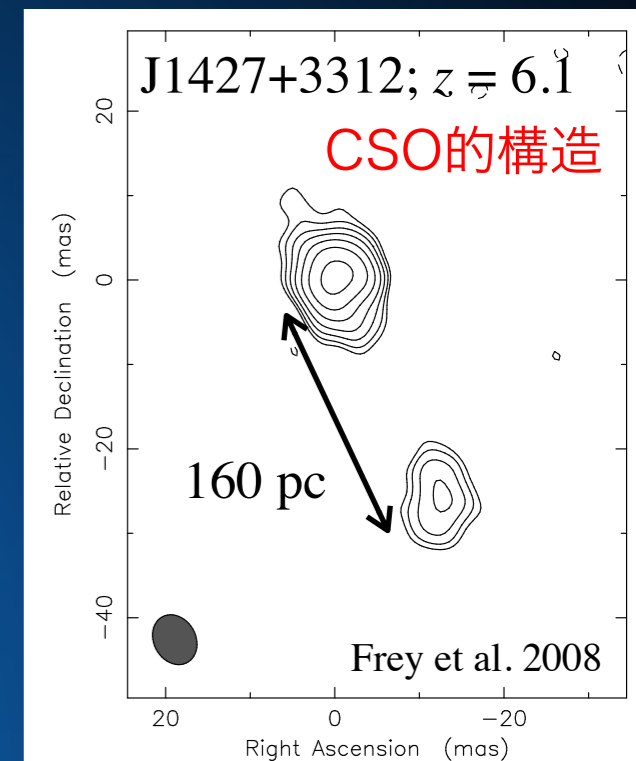
CSO構造

core-jet構造

High-zの基本構造：CSO構造とスペクトル

CSO: Compact Symmetric Object (Wilkinson et al. 1998)

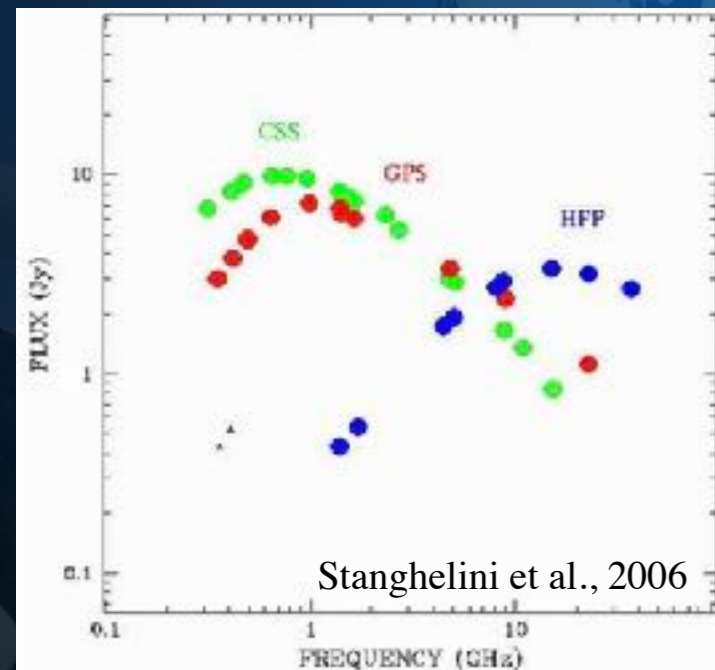
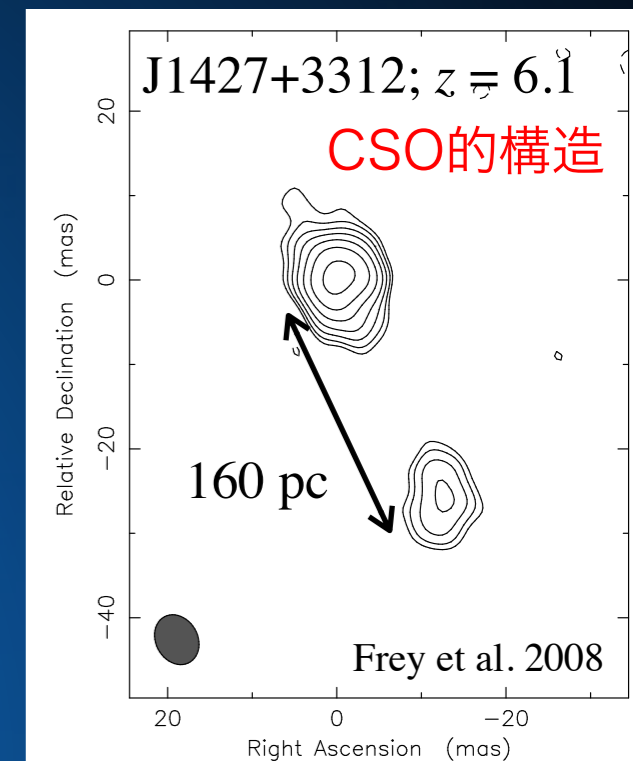
- 両サイドにホットスポットを持ったdoubleまたはtriple構造をしている。
- ホットスポット間の距離が ~ 160 pcで低赤方偏移クェーサーよりも1/1000倍以下の実スケールである。
- ドップラーブーストが効かないことから強度変動はせず、静的なスペクトル指数を示す。



High-zの基本構造：CSO構造とスペクトル

CSO: Compact Symmetric Object (Wilkinson et al. 1998)

- 両サイドにホットスポットを持ったdoubleまたはtriple構造をしている。
- ホットスポット間の距離が ~ 160 pcで低赤方偏移クェーサーよりも1/1000倍以下の実スケールである。
- ドップラーブーストが効かないことから強度変動はせず、静的なスペクトル指数を示す。



CSS (Compact Steep Spectrum; $\nu_c < 500$ MHz, $d = 1 - 20$ kpc)

GPS (Gigahertz Peaked Spectrum; $\nu_c = 1 - 5$ GHz, $d < 1$ kpc)

HFP (High Frequency Peaker; $\nu_c > 5$ GHz, $d < 1$ kpc)

$\nu < \nu_c$

→ シンクロトロン自己吸収... $\alpha = 5/2$

$\nu > \nu_c$

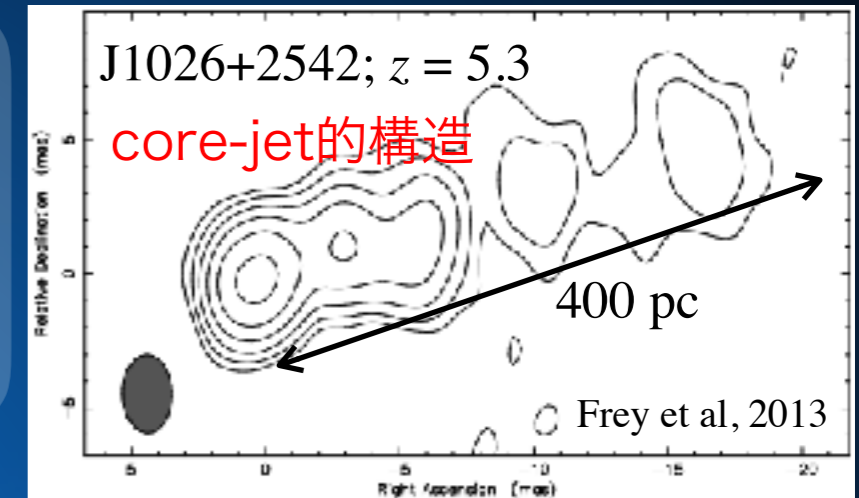
→ シンクロトロン放射

若いクェーサーの特徴と考えられている

High-zの基本構造：core-jet構造とスペクトル

core-jet的構造 (Blazar的構造)

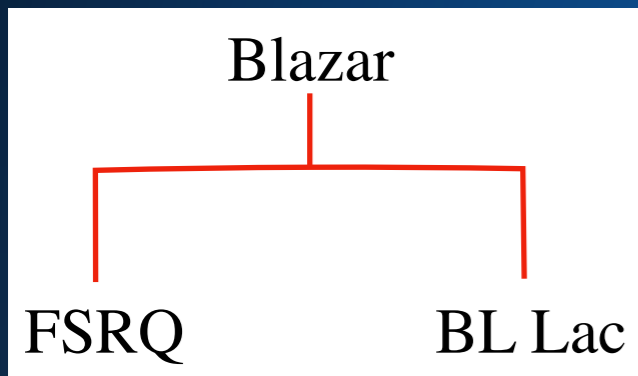
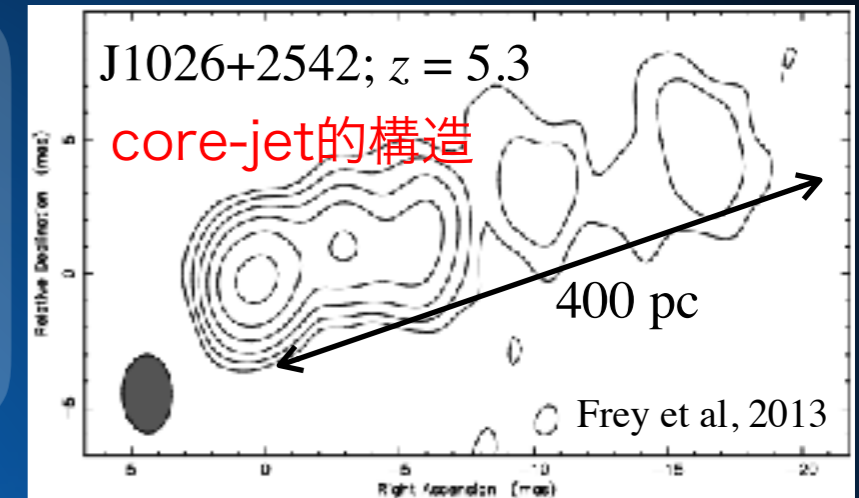
- ジェットをフェイスオンで観測しているとされている.
- ドップラーブーストによって激しい強度変動を示す.
- $\beta_{\text{app}} = 10c$ (7年間隔)



High-zの基本構造：core-jet構造とスペクトル

core-jet的構造 (Blazar的構造)

- ジェットをフェイスオンで観測しているとされている。
- ドップラーブーストによって激しい強度変動を示す。
- $\beta_{app} = 10c$ (7年間隔)



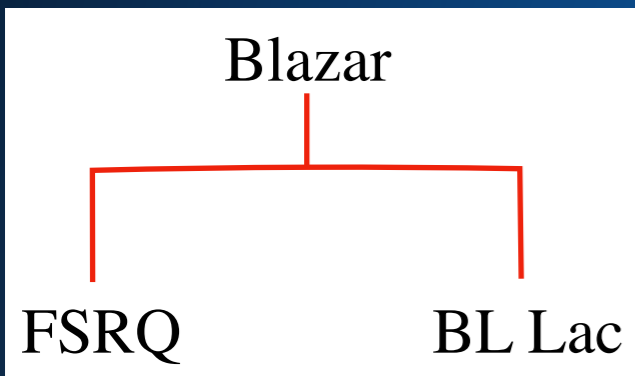
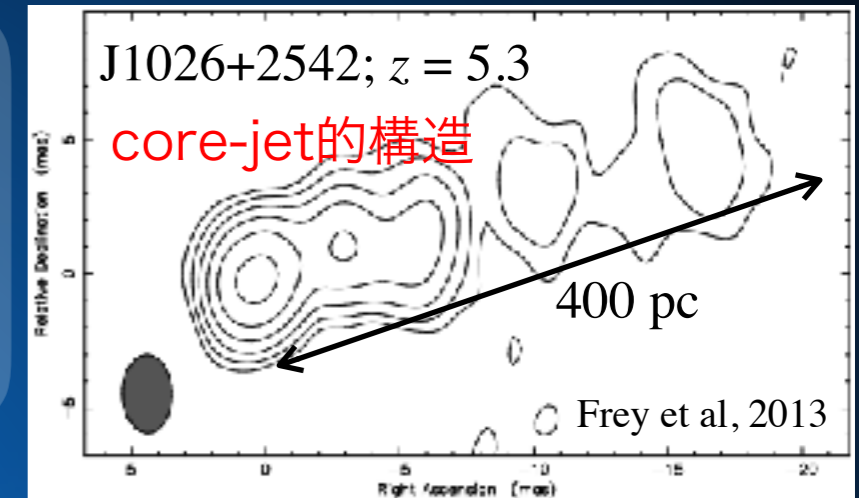
FSRQ (Flat Spectral Radio Quasar)

- スペクトルがフラットであり，激しい強度変動をする。
- $z > 4.5$ においてVLBIでの検出率は14/31 (Coppejans et al. 2016)

High-zの基本構造：core-jet構造とスペクトル

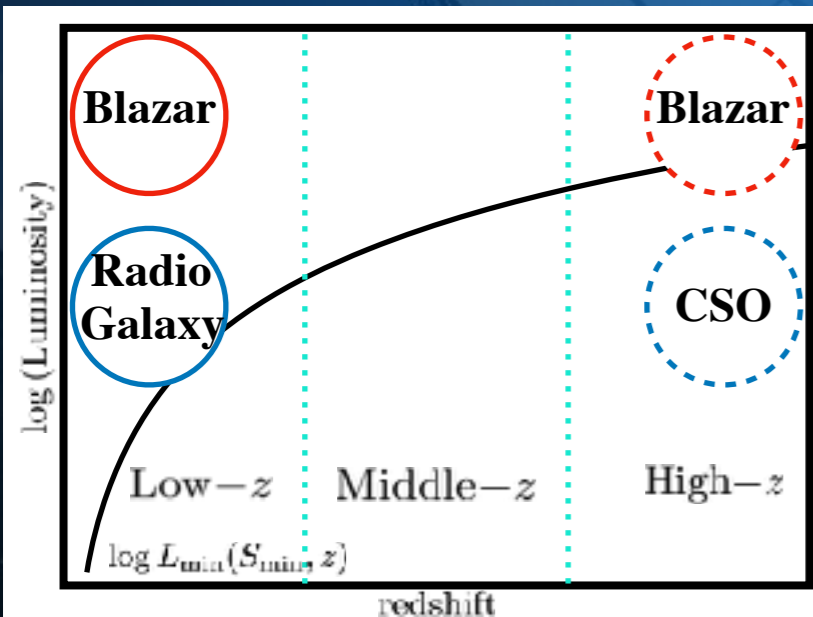
core-jet的構造 (Blazar的構造)

- ジェットをフェイスオンで観測しているとされている。
- ドップラーブーストによって激しい強度変動を示す。
- $\beta_{app} = 10c$ (7年間隔)



FSRQ (Flat Spectral Radio Quasar)

- スペクトルがフラットであり，激しい強度変動をする。
- $z > 4.5$ においてVLBIでの検出率は14/31 (Coppejans et al. 2016)



クェーサーの種族分布

高赤方偏移ではドップラーブーストでブレーザーの検出割合が他種族より多いと予想。

- 実際のVLBIによるブレーザー検出率は~5/50 ($z = 4 - 6$; e.g. Romani et al. 2006).

高赤方偏移クェーサーに対するより多くのVLBI観測が必要!!

研究目的

先行研究からの問題点:

高赤方偏移クェーサーのVLBI検出数は~50天体($z > 4$)しかなく観測的バイアスがかかっていると考えられる.

(選出条件: 高光度が予想される天体, 赤方偏移が観測時点で最も高い天体, etc.)

“高赤方偏移クェーサーのVLBI観測からの 種族推定”

- ▶▶▶ 多数の高赤方偏移クェーサーに対し8.4GHzでのJVN観測を行い, 電波構造とスペクトル指数から高赤方偏移クェーサーの種族を推定.

	Structure		Spectrum	
	Blazar	CSO	FSRQ	CSS/GPS/HFP
Spectrum	Flat/Inverted	SteepConvex	Flat/Inverted	Steep/Convex
Variability	(yes)	(no)	(yes)	(no)
Structure	core-jet	double	point/core-jet	point/double
Boost	yes	no	yes	no

A large satellite dish antenna is mounted on a concrete base on a hillside. The dish is white with the KDDI logo in blue. The background shows a valley with houses and trees, and mountains in the distance under a blue sky with scattered clouds.

天体選出と観測

天体選出と観測概要

1.4 GHzで観測されたAGNのうち、赤方偏移 $z > 4$ にある13天体を選出

選出条件

- ① 1.4 GHz電波カタログ(FIRST)より、8.4 GHzでの予想フラックス密度が12 mJy以上の天体を選出
- ② SDSSクエーサーカタログから $z > 4$ の天体を選出

観測概要

- 観測周波数：8.4 GHz (帯域幅:32 MHz/512MHz)
- 偏波：右回円偏波
- 観測天体数：3天体 × 3観測
- 観測時間：12時間 × 3回

	水沢 [20 m]	小笠原 [20 m]	石垣 [20 m]	入来 [20 m]	日立 [32 m]	筑波 [32 m]	鹿島 [34 m]	山口 [32 m]
EPOCH 1 [32 MHz]		○	○	○	○		○	
EPOCH 2 [32 MHz]	○	○	○		○	○		
EPOCH 3 [512 MHz]	○	○	○		○	○	○	○

Name	z	$f_{1.4\text{GHz}}$ (mJy)	$f_{8.4\text{GHz}}$ (mJy)	$\log R$
J0835-1825	4.421	52.35	21.4	3.64
J0839-5112	4.403	41.64	17.0	2.47
J0940-0526	4.475	58.48	23.9	3.02
J1021-2209	4.262	139.81	56.9	3.54
J1026-2542	5.304	239.44	97.8	3.72
J1325-1123	4.412	71.05	29.0	2.94
J1348-1935	4.404	49.92	20.4	2.97
J1412-0624	4.467	43.47	17.7	2.93
J1420+1205	4.034	87.30	35.6	3.28
J1430-4204	4.705	215.62	88.0	3.78
J1510-5702	4.309	254.97	104.1	4.13
J1535-0254	4.348	80.25	32.8	3.29
J1548-3335	4.669	37.84	15.4	3.19



A large satellite dish antenna is the central focus, mounted on a concrete base and a metal support structure. The dish is white with the KDDI logo in blue. The background features a valley with scattered houses and fields, surrounded by forested mountains under a blue sky with scattered clouds. A semi-transparent white banner is overlaid on the right side of the image, containing the text '結果と考察' in white Japanese characters.

結果と考察

8天体をVLBIで検出

9天体観測したうち8天体をVLBIで検出

- VLBIイメージが得られた天体: 5天体 (帯域幅が512 MHzの天体 or 明るい天体)
- 本観測でSEDが得られた天体: 5天体 (イメージ3天体, 基線検出のみ2天体)

非検出天体: J1548+3334について

- EVN観測から, 1.7 GHz, 4.9 GHzのフラックス密度とスペクトル指数からJVNの検出限界以下であることはコンシステント

Epoch	Name	Detection	Peak flux (mJy/beam)	r.m.s.	Beam size (mas×mas)	SED
1	J0835+1825	△	54.2 ± 1.2	18.1	25.4×9.4	×
	J0839+5112	△	44.6 ± 1.9	8.1	69.9×43.3	○
	J0940+0526	△	34.9 ± 1.4	8.1	101.0×38.9	○
2	J1430+4204	○	204.6 ± 15.8	0.1	3.81×2.4	○
	J1510+5702	○	568.0 ± 62.1	6.7	5.81×5.6	○
	J1548+3334	×	< 70.8	50.6	-	×
3	J1325+1123	○	40.1 ± 2.5	0.2	44.5×6.0	○
	J1348+1935	○	28.6 ± 1.9	0.1	30.7×6.1	×
	J1412+0624	○	16.0 ± 1.6	0.2	62.0×5.8	×

光度とドップラー係数の導出

楕円ガウシアンフィットから輝度温度とドップラー係数の下限値を推定

- 基線検出のみの場合, $d_{\text{core}} = d_{\text{beam}}$ と仮定
- $d_{\text{core}} < d_{\text{min}}$ の場合, $d_{\text{core}} = d_{\text{min}}$ と仮定

Minimum resolvable size

$$d_{\text{min}} = \frac{2^{1+\beta/2}}{\pi} \left[\pi ab \ln 2 \ln \frac{(S/N)}{(S/N) - 1} \right]^{1/2}$$

β : weight, S/N: Signal to Noise Ratio (Fomalont 1999)

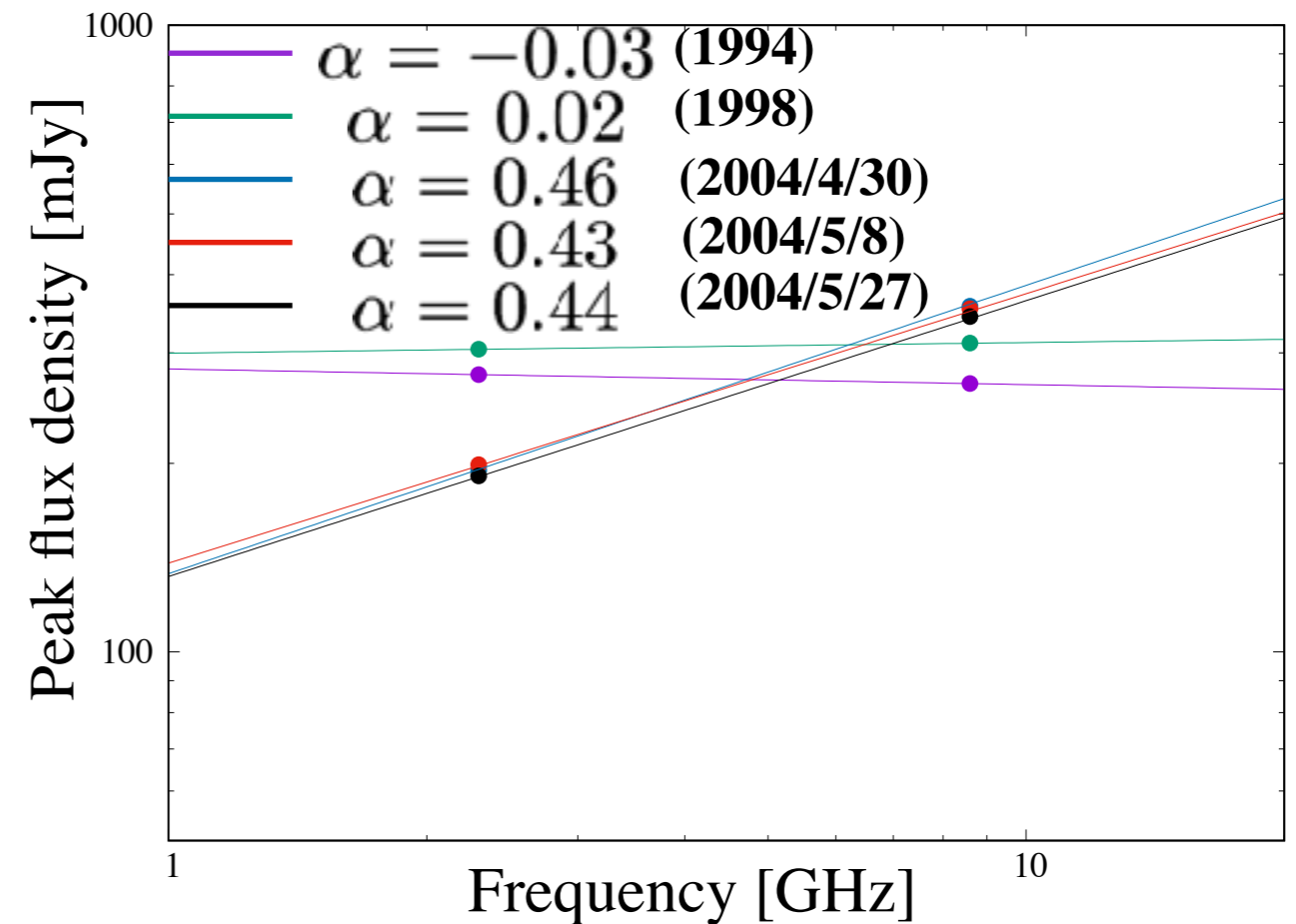
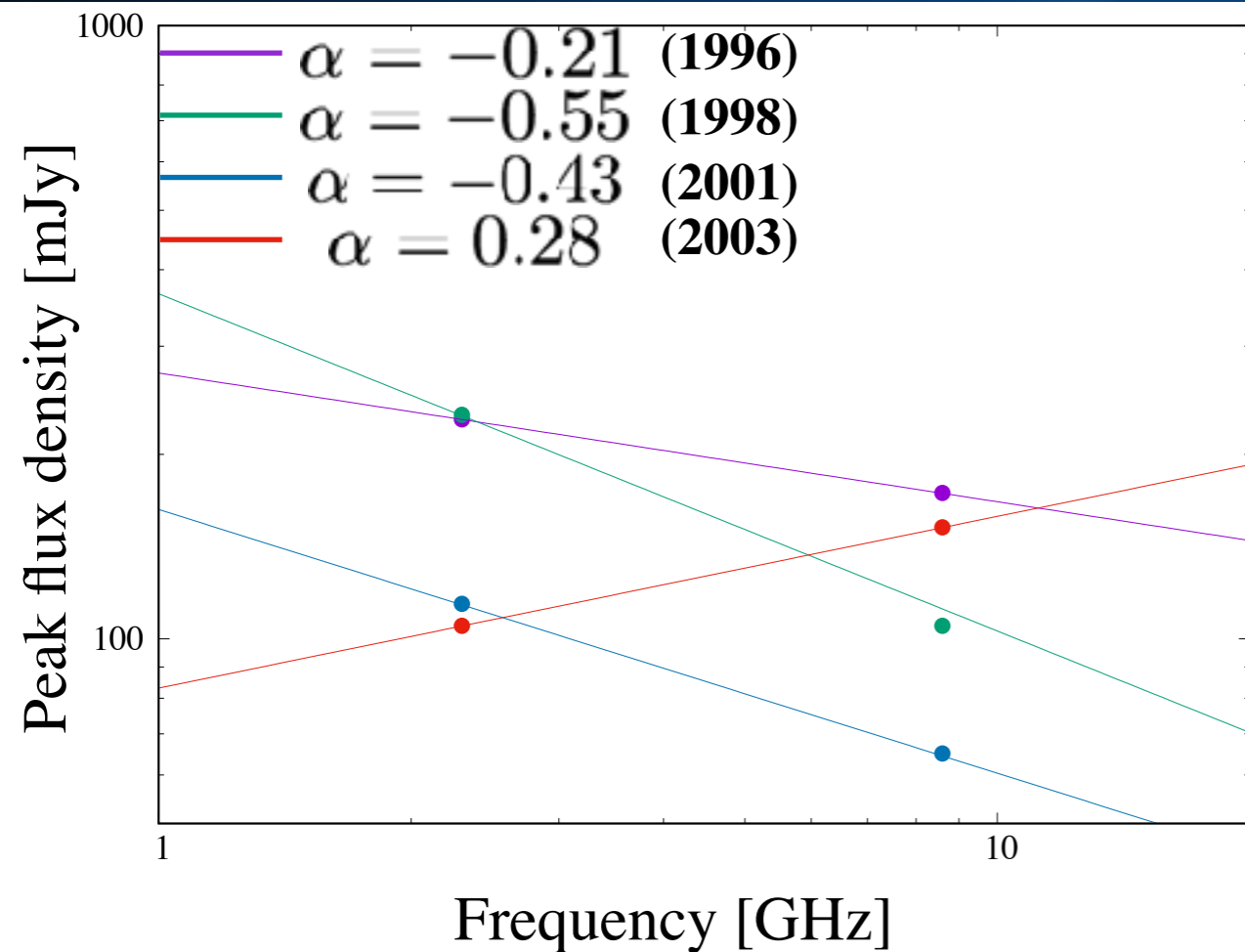
δ の推定

$$\delta = \frac{T_B}{T_{B,\text{eq}}} = \frac{T_B}{5 \times 10^{10} \text{ K}}$$

$T_{B,\text{eq}} = 5 \times 10^{10} \text{ K}$; Readhead 1994

Epoch	Name	Core size (mas)	Total flux (mJy)	T_b (K)	δ	L (10^{26} WHz^{-1})
1	J0835+1825	$< (25.4 \times 9.4)$	54.2 ± 1.2	$> 2.1 \times 10^7$	$> 1.3 \times 10^{-4}$	23.1
	J0839+5112	$< (69.9 \times 43.3)$	44.6 ± 1.9	$> 1.4 \times 10^6$	$> (8.7 \pm 0.4) \times 10^{-6}$	14.1
	J0940+0526	$< (101.0 \times 38.9)$	34.9 ± 1.4	$> (8.3 \pm 0.3) \times 10^5$	$> (5.3 \pm 0.2) \times 10^{-6}$	7.5
2	J1430+4204	0.35×0.22	204.6 ± 15.8	$(25 \pm 3) \times 10^{10}$	1.6 ± 0.2	69.4
	J1510+5702	< 0.58	568.0 ± 62.1	$> (15 \pm 2) \times 10^{10}$	$> 1.0 \pm 0.2$	148.5
3	J1325+1123	< 0.94	40.1 ± 2.5	$> (4.3 \pm 0.4) \times 10^9$	$> (2.7 \pm 0.2) \times 10^{-2}$	5.8
	J1348+1935	< 2.1	28.6 ± 1.9	$> 6.5 \pm 0.6 \times 10^8$	$> (4.1 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	18.2
	J1412+0624	< 1.8	16.0 ± 1.6	$> 4.7 \pm 0.7 \times 10^8$	$> (2.9 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	16.3

J1430+4204, J1510+5702について



J1430+4204, J1510+5702について

VLBA calibrator searchよりSバンドとXバンドによる同日観測が複数エポック行われており、スペクトル指数の変動が起こっている。

コンパクト, $\delta > 1$, $\alpha > -0.5$, 強度変動

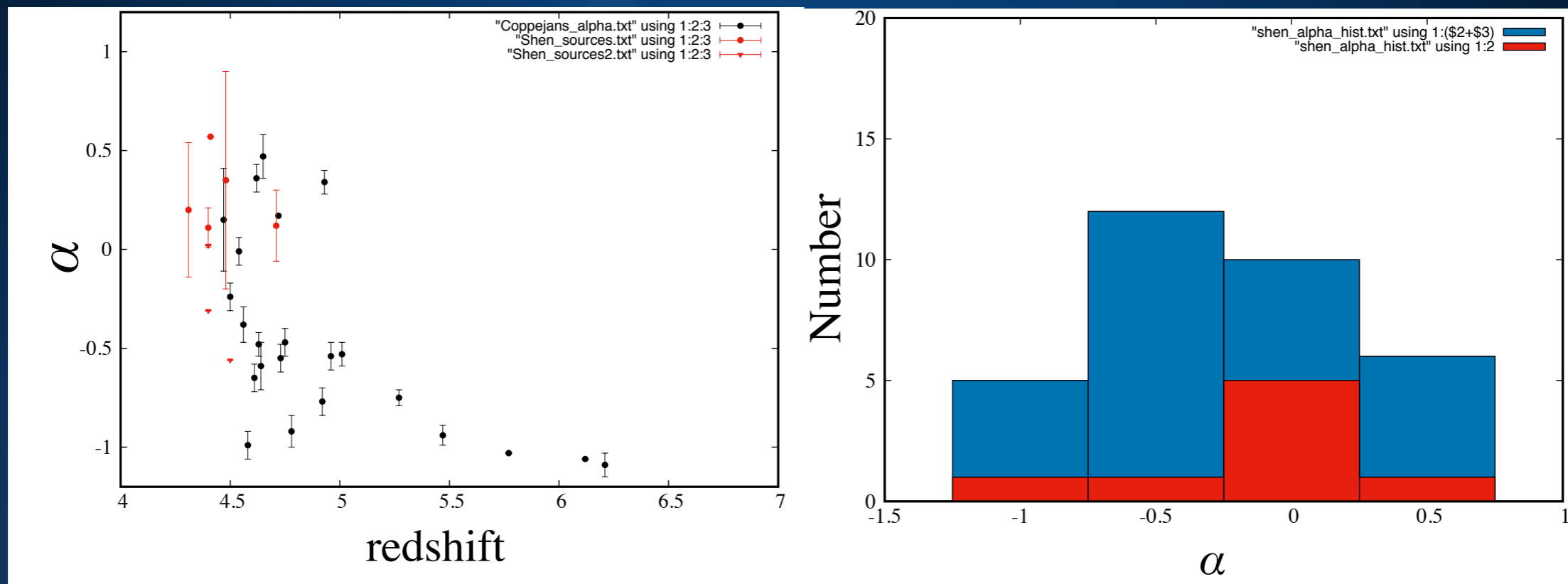
→ FSRQであると考えられる

検出天体の種族推定

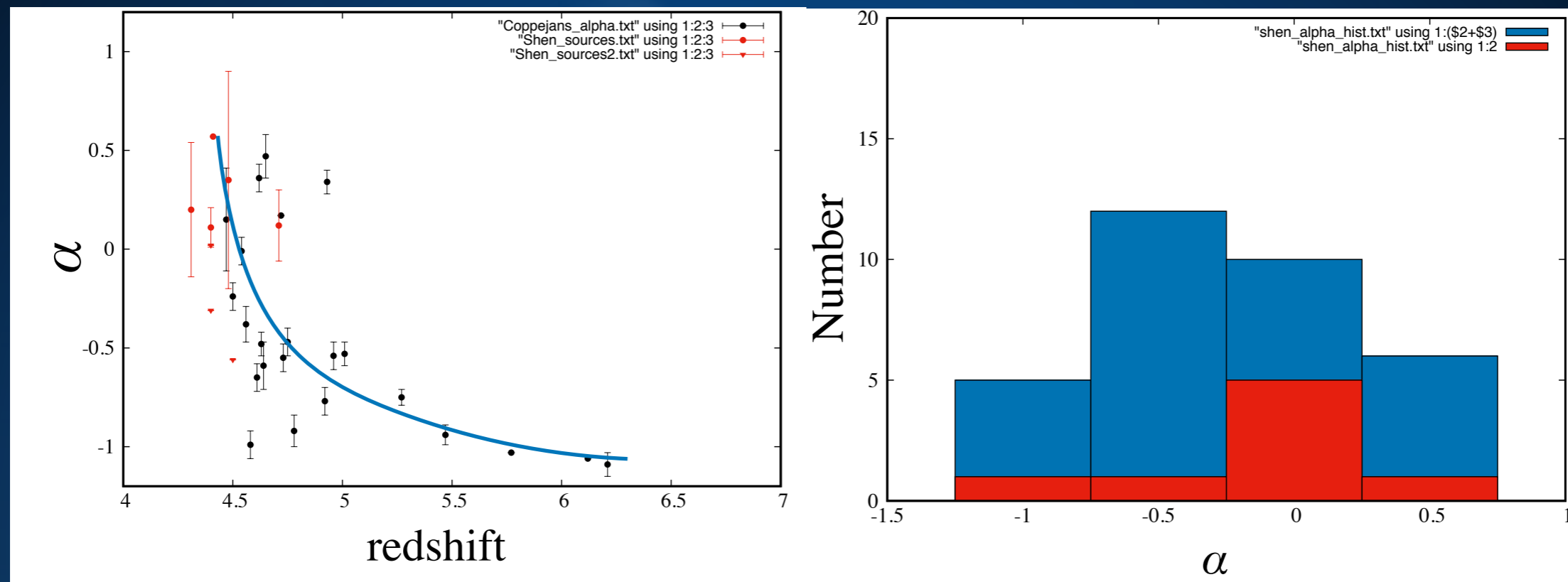
電波構造, ドップラー係数, スペクトル指数, 強度変動による種族推定まとめ

- J0835+1825 : 25.4 × 9.4 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)
- J0839+5112 : 点源, $\delta > 10^{-6}$, フラットスペクトル
→ FSRQ or HFP 候補
- J0940+0526 : 点源, $\delta > 10^{-6}$, フラットスペクトル
→ FSRQ or HFP 候補
- J1325+1123 : 点源, $\delta > 10^{-2}$, フラットスペクトル
→ FSRQ or HFP 候補
- J1348+1935 : 30.7 × 6.1 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)
- J1412+0624 : 62.0 × 5.8 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)
- J1430+4204 : 点源, $\delta > 10^{-2}$, フラットスペクトル, 強度変動あり
→ FSRQ
- J1510+5702 : 点源, $\delta > 10^{-2}$, フラットスペクトル, 強度変動あり
→ FSRQ

$L_{8.4\text{GHz}}$, α の赤方偏移依存性



$L_{8.4\text{GHz}}$, α の赤方偏移依存性



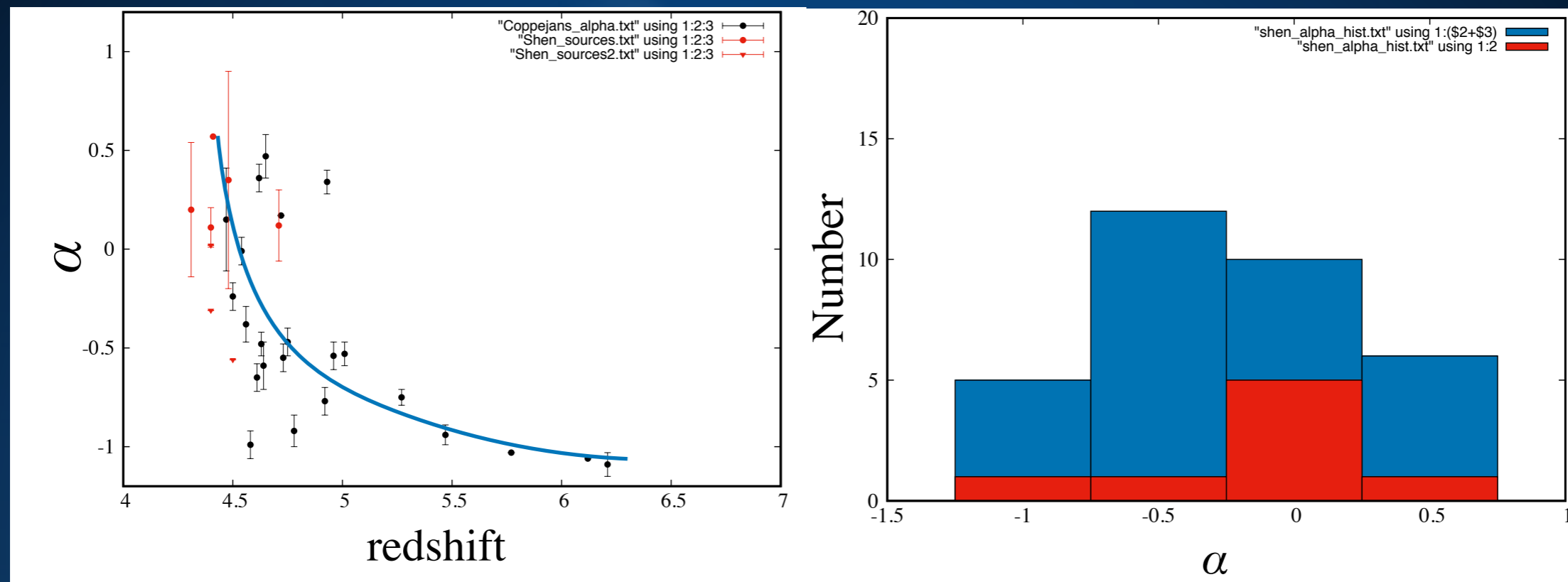
スペクトル指数の変化 → 低赤方偏移に行くにかけてスティーブからフラットへ遷移

▶▶ $z=4-5$ では $\alpha \sim 0$, $z > 5$ では $\alpha \sim -1$

クェーサーの周辺環境が $z \sim 4$ と $z \sim 6$ で異なっているある可能性がある。

→ 高赤方偏移クェーサーに対してより大規模なVLBI観測が必要

$L_{8.4\text{GHz}}$, α の赤方偏移依存性



スペクトル指数の変化 → 低赤方偏移に行くにかけてスティーブからフラットへ遷移

▶▶ $z=4-5$ では $\alpha \sim 0$, $z > 5$ では $\alpha \sim -1$

クェーサーの周辺環境が $z \sim 4$ と $z \sim 6$ で異なっているある可能性がある。

→ 高赤方偏移クェーサーに対してより大規模なVLBI観測が必要

▶▶▶ JVN + EAVNによるコラボレーション観測を計画中...

まとめ

- これまでにわかっている高赤方偏移クェーサーの性質は観測によるバイアスが強くかかっている可能性がある。
- $z > 4$ の9天体のクェーサーに対してVLBI観測を行った。
→ 9天体中8天体をVLBIで検出（うち5天体はVLBIイメージを取得：全て点源）
- スペクトル指数は全てFlat or Invertedで特にJ1430+4204とJ1510+5702はVLBA観測よりFSRQと推定。

J0835+1825 → 25.4 × 9.4 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)

J0839+5112 → FSRQ or HFP 候補天体

J0940+0526 → FSRQ or HFP 候補天体

J1325+1123 → FSRQ or HFP 候補天体

J1348+1935 → 30.7 × 6.1 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)

J1412+0624 → 62.0 × 5.8 mas以下のコンパクトな構造 (VLBI初検出)

J1430+4204 → **FSRQ**

J1510+5702 → **FSRQ**