



Introduction

AGNジェットの観測的特徴として相対論的速度の高エネルギープラズマ流・kpcスケールまで細く方向性を維持する構造・フレアに伴うジェット成分の噴出などが挙げられる。この形成メカニズムとして磁気駆動モデルが有力視されているが、加速・収束と関連していると考えられるpcスケールでの物理状態の観測結果が多くないため正確なメカニズムは未解明である。そこで我々はコアシフトと呼ばれる現象を用いて間接的にpcスケールまたはそれ以下の物理状態の時間変動を推定することを目的に研究を行った。

コアシフト

コアシフトとは光学的厚み τ の影響により電波コア($\tau \sim 1$)の位置が高周波ほどジェットの上流へシフトする現象のことである。光学的厚みは磁場や粒子密度などにより決まると考えられていることから、コアのシフト量もそれらの変化によって決まり以下の式で表される(Lovanov 1998, Pushkalev+ 2012)。

$$B_{1pc} \approx 0.025 \left(\frac{\Omega_{rv}^3 (1+z)^2}{\delta^2 \phi \sin^2 \theta} \right)^{\frac{1}{4}} [\text{G}]$$

$$N_{1pc} = \frac{B_{1pc}^2}{8\pi m_e c^2 \gamma_{\min} \ln(\gamma_{\max}/\gamma_{\min})} [\text{cm}^{-3}]$$

$$\Omega_{rv} = 4.85 \times 10^{-9} \frac{\Delta r_{\text{core}}, v_1, v_2 D_L}{(1+z)^2} \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1}$$

B_{1pc} : 中心エンジンから1 pcの位置での磁場,
 Ω_{rv} : コアのシフト量の尺度, z : 赤方偏移,
 δ : ドップラー因子, ϕ : ジェットの半開口角,
 θ : ジェットの放出角, m_e : 電子質量, c : 光速
 N_{1pc} : 中心エンジンから1 pcの位置での粒子密度,
 $\gamma_{\max}, \gamma_{\min}$: ローレンツ因子の最大値と最小値,
 Δr_{core} : 2周波間のコアのシフト量,
 v_1, v_2 : 周波間($v_2 > v_1$), D_L : 光度距離

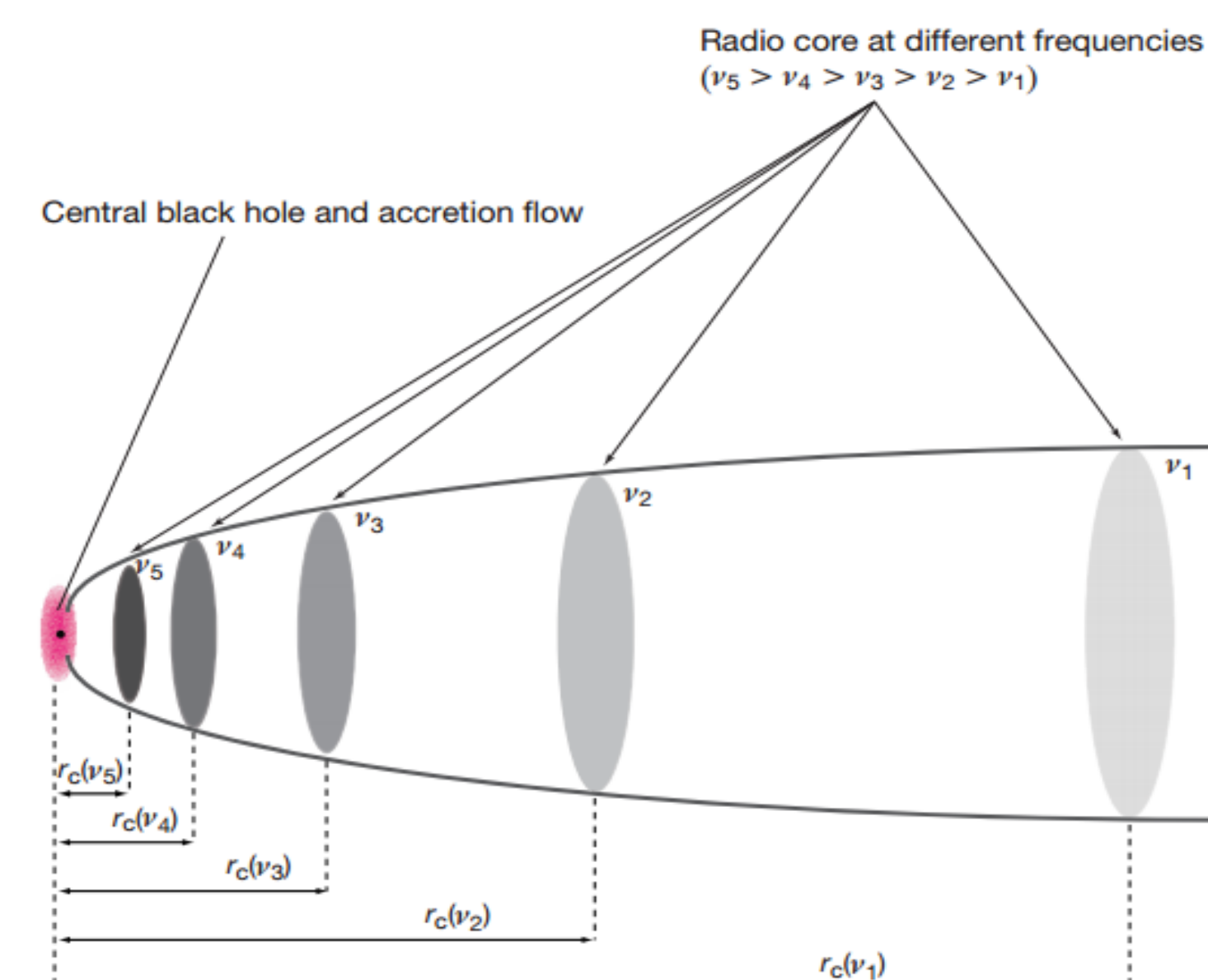


Fig 1. コアシフトの概念図(Hada et al. 2011)

さらに、コニカルなジェットでエネルギー等分配(磁場のエネルギー密度=粒子のエネルギー密度)の下ではジェットに沿った磁場と粒子密度はそれぞれ $B = B_{1pc} r^{-1} [\text{G}]$, $N = N_{1pc} r^{-2} [\text{cm}^{-3}]$ で表すことができ、中心エンジン近傍の物理状態を推定できる。さらに Δr_{core} はコアのフラックス密度に比例すると考えられており、フラックス密度の変動に伴う Δr_{core} の変動が期待されている(Kovalev+2008)。

Target 3C 111

★選出条件

- pcスケール以下を分解できる
- ジェットの視線に対する角度が大きい
- 強度変動を示す

選出条件から比較的近くにあり($D_L = 196 \text{ Mpc}$, $z = 0.048$ (Grandi+2012)), ジェットの視線角が大きく($\theta \sim 10^\circ$)活発な強度変動を示す**電波銀河3C 111**を観測天体とした。

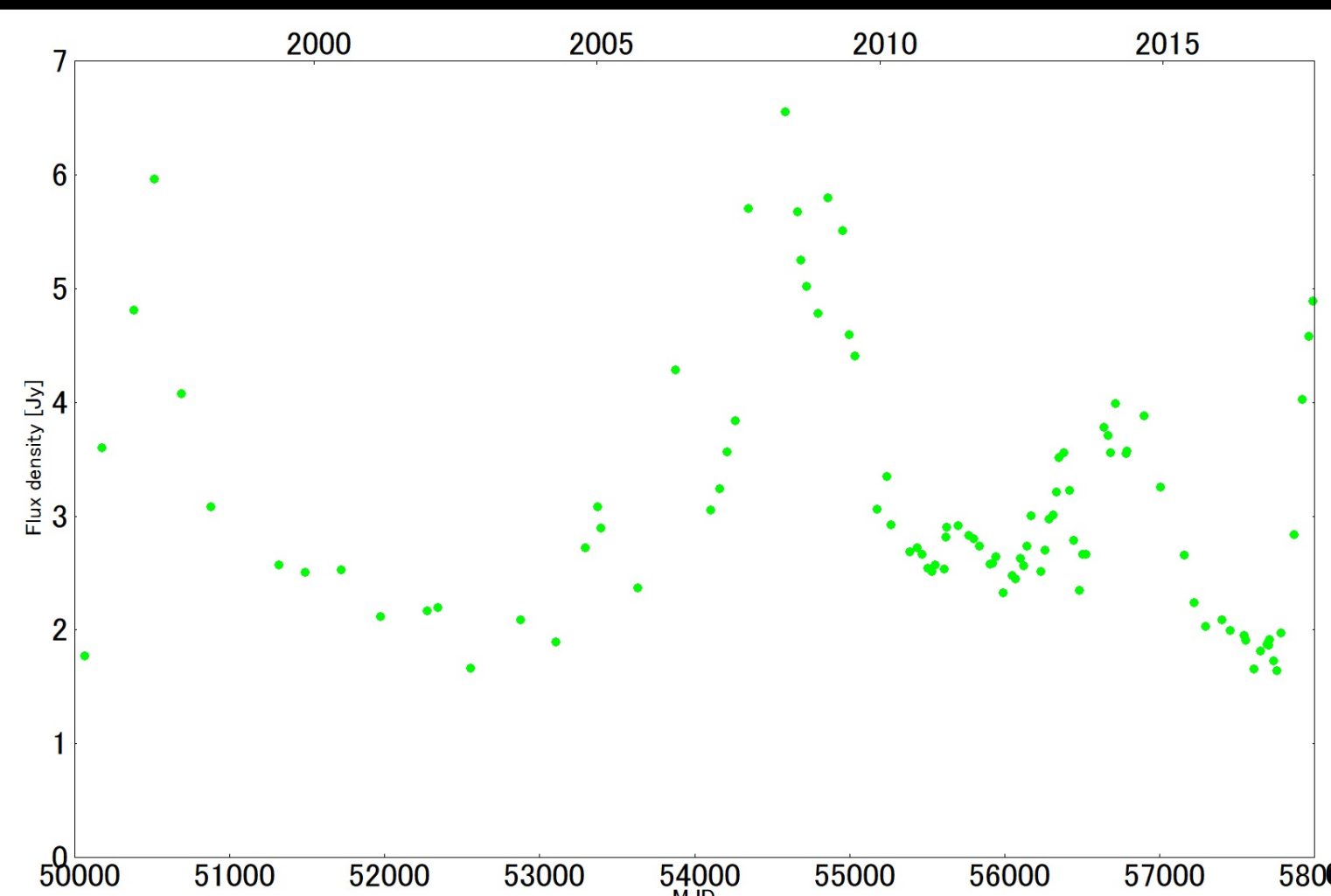
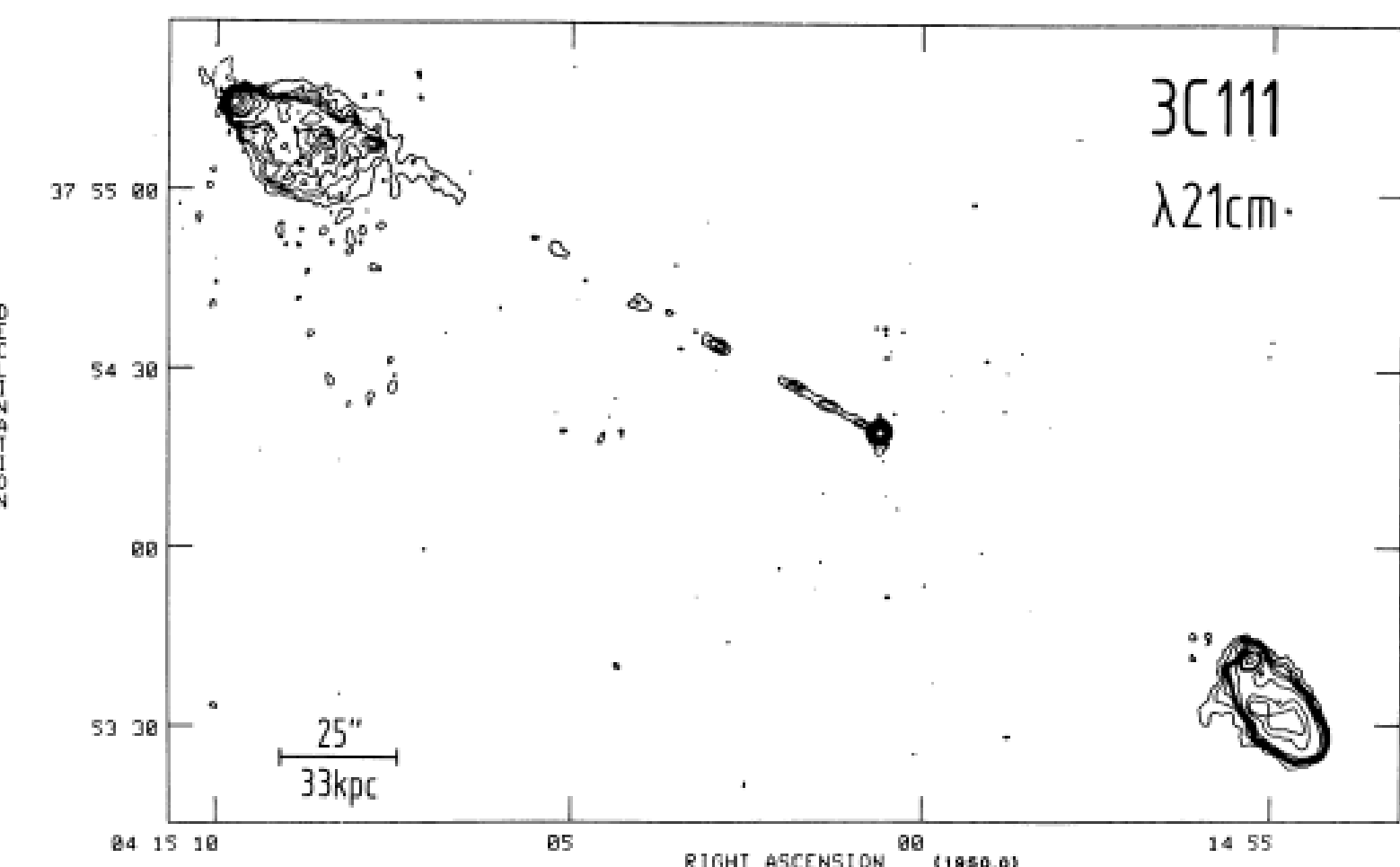


Fig 2. 電波銀河3C 111のVLBA 15 GHzの光度曲線。大きな強度変動を示すことが分かる。

Fig 3. VLA 1.4 GHzの電波イメージ。両サイドにローブと呼ばれるジェットの吹き溜まりが見え、視線角の大きな電波銀河であることがわかる。

Fig 4. 米国のVLBI観測網VLBAのアレイ配置図。角度分解能は5 GHzで1.4 mas, 15 GHzで0.47 mas, 43 GHzで0.17 masである。



Observation

以下の様にVLBAアーカイブデータを選択し解析を行った。
Epoch 1: 様々な周波数間のコアのシフト量から物理パラメータを求め同程度の値になるかの確認
Epoch 2-5: 物理状態の時間変化の推定

Table 1. 本研究で解析した観測概要。観測局のカッコ内は解析に使用していない局である。

Epoch	観測日時 (UT)	観測局	周波数 [GHz]
1	2009/12/28	VLBA(LA)	5,8,15,22
2	2012/05/24	VLBA(HW)	15
	2012/05/26	VLBA(LA)	43
3	2013/02/26	VLBA	43
	2013/02/28	VLBA	15
4	2013/12/15	VLBA	15
	2013/12/16	VLBA(HW)	43
5	2014/02/25	VLBA	43
	2014/02/27	VLBA(FD)	15

Result

★中心エンジンから1pcの位置での物理パラメータの推定

光学的に薄いと思われるジェット成分でピン止め

各周波数のジェット成分からのコアの相対位置のずれがコアのシフト量 Δr_{core}

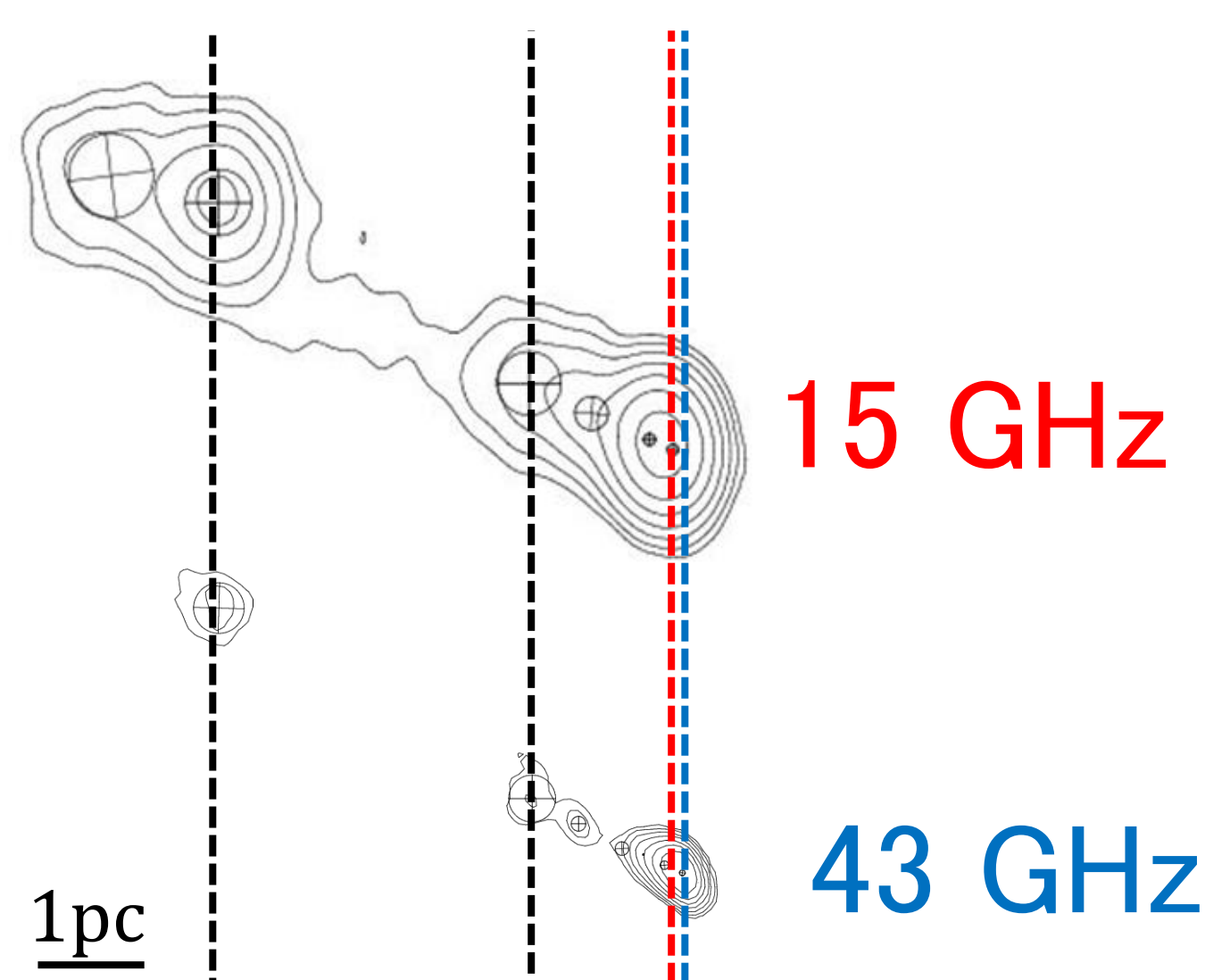


Fig 5. Epoch 2の15 GHzと43 GHzの電波イメージ。破線は黒:ピン止めたジェット成分、赤:15 GHzの電波コア、青:43 GHzの電波コアの位置をそれぞれ表している。

★中心エンジン付近の物理パラメータの推定

BH質量 $M_{\text{BH}} = 2.7 \times 10^9 B_{1pc} [M_{\text{sun}}]$
 $\Rightarrow (2.2 - 6.4) \times 10^8 [M_{\text{sun}}]$

シュバルツシルド半径 $r_g = \frac{2GM}{c^2} [\text{m}]$
 $\Rightarrow (0.59 - 1.8) \times 10^{12} [\text{m}]$

$B_{1rg} = (0.082 - 1.2) \times 10^4 [\text{G}]$

$N_{1rg} = (0.033 - 7.6) \times 10^{12} [\text{cm}^{-3}]$

フラックス密度の変化に起因?

Table 2. 本研究で解析したEpoch 1の結果。それぞれの値は $\theta = 10^\circ$ (塩谷卒業論文), $\delta = 3.11$, $\phi = 6.8^\circ$, $\gamma_{\min} = 1$, $\gamma_{\max}/\gamma_{\min} = 10^{4.34}$ (電子陽電子プラズマなコニカルジェットを仮定)を用いて計算を行った。

Frequency	$\Delta r_{\text{core}} [\text{mas}]$	$\Omega_{rv} [\text{pc GHz}]$	$B_{1pc} [\text{G}]$	$N_{1pc} [10^3 \text{ cm}^{-3}]$	
ν_1	ν_2				
5	8	0.51±0.13	5.9±1.5	0.22±0.08	2.4±0.3
5	15	0.94±0.15	6.1±1.0	0.23±0.06	2.6±0.2
5	22	1.08±0.08	6.1±0.4	0.23±0.03	2.6±0.1
8	15	0.44±0.12	6.5±1.7	0.24±0.09	2.8±0.4
8	22	0.57±0.05	6.2±0.5	0.23±0.04	2.7±0.1
15	22	0.19±0.07	7.8±3.0	0.28±0.13	3.8±0.9
Average			0.24±0.07	2.8±0.3	

Table 3. 本研究で解析したEpoch 2-5の結果。計算に用いたパラメータはTable 2.と同じである。

Epoch	$\Delta r_{\text{core}} [\text{mas}]$	$\Omega_{rv} [\text{pc GHz}]$	$B_{1pc} [\text{G}]$	$N_{1pc} [10^3 \text{ cm}^{-3}]$
2	0.090±0.013	1.80±0.27	0.092±0.010	0.41±0.10
3	0.172±0.027	3.43±0.55	0.150±0.018	1.09±0.27
4	0.200±0.037	4.00±0.74	0.168±0.023	1.37±0.40
5	0.046±0.009	0.92±0.18	0.056±0.008	0.15±0.05

Summary & Future Works

本研究ではpcスケールの物理状態を推定することを目的に、コアシフト現象を用いた物理状態の推定を行った。その結果対象とした3C 111において1pcの位置での磁場は47 - 239[mG]であった。中心エンジン近傍($1r_g$ 半径)の磁場は $10^3 - 10^4 [\text{G}]$ 程度であると推定でき、時間変動も確認できた。しかし3C 111の強度変動のタイムスケールに比べ観測間隔が大きくフラックス密度と物理状態の関係を調べるには至っていない。今後はKaVAで2ヶ月間隔で1年にわたるモニタリング観測を行い(観測提案中)、強度変動に伴う物理状態の推定を行うことで、フレア現象、加速・収束機構の解明の手掛かりが得られると考えられる。 Fig 6. KaVA logo (kasi HPより)

