

JVN Reports

大学VLBI連携研究成果報告書

2008年7月1日 第1巻 第2号

目次

強電波狭輝線セイファート1型銀河核の JVN-VLBA 位置天文観測 土居明広(宇宙航空研究開発機構) 浅田圭一(宇宙航空研究開発機構)、永井洋(国立天文台)、輪島清昭(山口大学)	・・・	1
大質量星形成領域 Cepheus A における 6.7 GHz メタノールメーザの発生領域の 解明 杉山孝一郎(山口大学大学院)	・・・	8
鹿島-小金井 8 Gbps 光結合観測システムが稼動を開始 川口則幸 (国立天文台)、光結合 VLBI 研究チーム	・・・	14
2007 年度大学 VLBI 連携観測の実績 藤沢健太 (山口大学 理学部)	・・・	15
編集担当者より	・・・	16

発行者 : 大学VLBI連携観測事業

編集 : 山口大学

強電波狭輝線セイファート 1 型銀河核の JVN-VLBA 位置天文観測

土居明広 (宇宙航空研究開発機構)

浅田圭一 (宇宙航空研究開発機構)、永井洋 (国立天文台)、輪島清昭 (山口大学)

2008 年 6 月 1 日

1 研究の背景

狭輝線セイファート 1 型銀河中心核 (Narrow-Line Seyfert 1 galaxies: NLS1s) は、小さなブラックホール質量・高い質量降着率という極端なパラメータを持つ ($m_{\text{BH}} \sim 10^5\text{--}10^7 M_{\odot}$, $L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}} \sim 10^{-2}\text{--}10^1$) 活動銀河核 (Active Galactic Nuclei: AGNs) の種族である。そのため、急激な成長を始めた若いブラックホールである可能性があり、大変注目されている。また、AGN の性質がこの 2 つのパラメータにどう影響を受けているかを研究する場合、大変有効なターゲットであると考えられる。図 1 で示すとおり、ブラックホール質量が小さく、高い降着率をもっている NLS1 種族は、Radio-loudness R ($\equiv L_{5\text{GHz}}/L_{B\text{-band}} \sim L_{\text{jet}}/L_{\text{disk}}$) が小さく radio-quiet ($R < 10$) である。可視光や X 線では明るいので、降着円盤の研究は盛んにおこなわれている一方、電波では非常に暗いので研究はほとんどおこなわれてこなかった。近年、VLA の FIRST サーベイデータを使った電波対応天体の調査から、radio-loud ($R > 10$) な NLS1 はたった 7% しか存在せず、他の AGN 種族と比較して有意に少ないことが判明している (e.g., Whalen et al. 2006, Komossa et al. 2006)。一方で、radio-loud NLS1 も少数ながら確かに存在している。このような性質を生み出すメカニズムは明らかになっていない。

AGN よりも研究が進んでいる X 線連星 ($m_{\text{BH}} \sim 10^1 M_{\odot}$) では、降着率の変動による降着円盤の状態変化とジェット形成が密接に関係していることが観測的によく知られている。高い降着率ではジェットが出なくなる high/soft state となる。また、極端に高い降着率の very high state では、相対論的ジェットが断続的に発生する状態遷移が見られる。AGN でも同様の現象

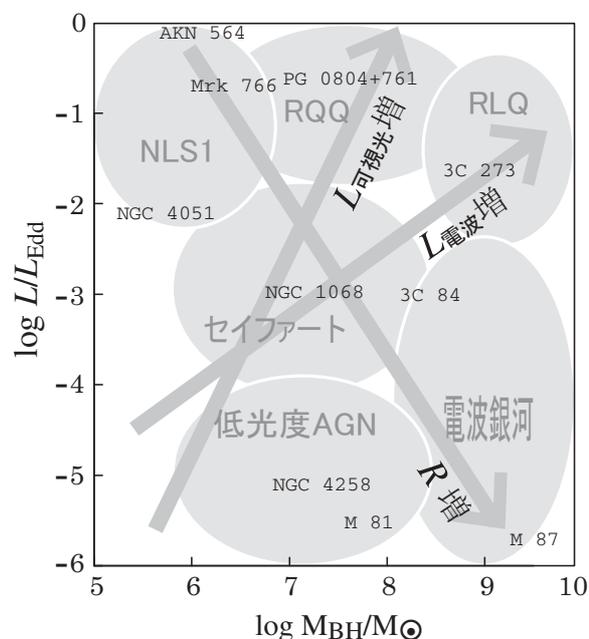


図 1: ブラックホール質量-エディントン比 (質量降着率) 空間における AGN 種族の分布。様々な AGN 種族は、ある程度この 2 つのパラメータで特徴付けられる。降着円盤光度を反映する可視光光度は $L_{\text{opt}} \propto m_{\text{BH}}(L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}})$ 、ジェット光度を反映する電波光度は $L_{\text{radio}} \propto m_{\text{BH}}^{1.52}(L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}})^{0.61}$ なので、 $R \equiv L_{\text{radio}}/L_{\text{opt}} \propto m_{\text{BH}}^{0.52}(L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}})^{-0.39}$ となる (土居 2005 博論)。NLS1 は極端に軽いブラックホールと高い降着率の円盤から成ると考えられている。

表 1: Radio-loud NLS1 JVN-VLBA 観測ターゲット

Date	Antenna*	ν (GHz)	Target	z	$S_{1.4\text{GHz}}^{\text{VLA}}$ (mJy)	R
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
2006Feb07	VLBA×10	1.667	RXS J08066+7248	0.098	49.6	85.1
2006Feb10	VLBA×10	1.667	RXS J08066+7248	0.098	49.6	85.1
			RXS J16290+4007	0.27195	11.9	182.0
			RXS J16333+4718	0.11605	65.0	104.7
			RXS J16446+2619	0.14426	90.8	199.5
			B3 1702+457	0.0604	118.6	10.7
2006Mar17	VMI VIR VIS GIF Ks Ud YMG	8.424	RXS J08066+7248	0.098	49.6	85.1
2006Mar26	VERA×4 GIF Ks TKB YMG	8.424	RXS J08066+7248	0.098	49.6	85.1
			RXS J16290+4007	0.27195	11.9	182.0
			RXS J16446+2619	0.14426	90.8	199.5
2006May20	VERA×4 GIF Ks Ud TKB YMG	8.424	RXS J16333+4718	0.11605	65.0	104.7
			B3 1702+457	0.0604	118.6	10.7

Col. (1) observation date; Col. (2) array; Col. (3) observing frequency at band center; Col. (4) target name; Col. (5) redshift; Col. (6) VLA flux density at 1.4 GHz; Col. (7) radio loudness.

* Station code — Ks: Kashima 34 m of NICT, Ud: Usuda 64 m of JAXA, YMG: Yamaguchi 32 m of NAOJ, TKB: Tsukuba 32 m on GSI, GIF: Gifu 11 m of Gifu University, VMI: VERA Mizusawa 20 m of NAOJ, VIR: VERA Iriki 20 m, VOG: VERA Ogasawara 20 m, and VIS: VERA Ishigaki 20 m.

が存在するかどうかを確認できれば、X 線連星での状態変化の知識を AGN における現象の解釈に利用することができるため、興味を持たれている。Radio-quiet NLS1 が high/soft state に、radio-loud NLS1 が very high state に相当するかどうかを知るには、ジェットの詳細な研究が必要である。しかしながら、NLS1 の電波ジェットの性質はほとんどわかっていない。干渉計では、VLA による Ulvestad et al. (1995), Moran (2000) の観測のみで、ほぼ点源 (< 300 pc) に見えている。ミリ秒角スケールでは、セIFAート VLBI サーベイの中に紛れ込んでいた radio-quiet NLS1 の 3 天体について報告があるのみである (Midderbelg et al. 2004, Lal et al. 2004)。

我々は、VLBA および JVN を用いて、世界で初めて NLS1 についての系統的な VLBI 撮像サーベイをおこなっている。まずはじめに、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) で発見された全天で最も電波で明るく最も radio-loud な NLS1 である SDSS J094857.3+002225 (Zhou et al. 2003) を VLBA

で観測し、ドップラーファクター $\delta > 2.7\text{--}5.5$ のビーミングを受けた相対論的ジェット (視線角が 22 度以下、光速の 76% 以上) の存在を明らかにした (Doi et al. 2006a, PASJ, **58**, 829)。NLS1 のセントラルエンジンが相対論的な非熱的ジェットを生成できる能力を持つことを初めて示し、ドップラービーミングが radio-loudness に影響しうることを示したのである。しかしながら、この天体は NLS1 として極端な個体であり、NLS1 の一般的な性質を知るためには、さらに多くの NLS1 を調査する必要がある。

2 観測と結果

そこで我々は、観測計画当時知られていた radio-loud NLS1 5 天体 (Zhou & Wang 2002) について、JVN と VLBA を用いて調査した。JVN での撮像結果は既に Doi et al. 2007, PASJ, **59**, 703 で報告済みである。このサンプルでも NLS1 のセントラルエンジン

が非熱的ジェットを生成していることが示され、うち 2 天体はドップラービーミングの影響を受けている可能性を示した。本レポートでは、同じサンプルについて新たに得られた VLBA による撮像結果と、JVN イメージとの重ね合わせから導き出された性質について報告する。JVN および VLBA の観測は、2 段階位相補償法 (Doi et al. 2006b, PASJ, **58**, 777) を用いた注意深い位置天文計測をおこなっており、連続波多周波イメージ重ね合わせをおこなった珍しい研究となっている。この重ね合わせが、天体構造を解釈するうえでの鍵となった。

2.1 JVN 8.4 GHz 観測

2006 年 3-5 月、5 つの radio-loud NLS1 について、JVN 8.4 GHz で 2 段階位相補償観測がおこなわれた。観測の結果、5 天体全てが検出された。全て点源で、輝度温度 $> 10^7$ K を示していた。

2.2 VLBA 1.7 GHz 観測

2006 年 2 月、同じ 5 つの radio-loud NLS1 について、VLBA 1.7 GHz で 2 段階位相補償観測をおこなった。JVN 観測との観測時期とは最大 3 か月の違いしかなく、構造の時間変化の影響を最小限に抑える狙いがある。また、空間分解能は JVN 8.4 GHz と同程度であり、空間分解能のミスマッチを最小限に抑える狙いがある。JVN イメージではすべてのターゲットが点源であったが、より低周波で観測することで、ジェットの広がりを検出する狙いもあった。VLBA 1.7 GHz による観測の結果、全ての天体で構造を見出した (図 2)。輝度温度 $> 10^7$ K の非熱的ジェットの構造が見えていると考えられる。RXS J16446+2619 では、片側だけに顕著に伸びたような構造が見られた。また、RXS J08066+7248 では、北東方向へ広がった低輝度の構造が見られた。

2.3 2 周波イメージ重ね合わせ

位置計測精度は、JVN 8.4 GHz で ~ 70 - $300 \mu\text{as}$ 、VLBA ~ 20 - $70 \mu\text{as}$ であった。いずれもビームサイズよりも 1 桁以上小さく、イメージの重ね合わせに十分

な精度であるといえる。図 2 の VLBA コントアイメージの中に、十字で示したのが JVN で検出した点源の位置である。いずれも最も明るい成分 C0 に一致した。AGN ジェットは一般的に、コア-ジェット構造からなり、ジェットの付け根付近で光学的に薄くなり見え始める ($\tau \approx 1$) のがコアであると考えられる。見えるジェットの最も上流がコアであり、フラットスペクトル ($\alpha \sim 0$; $S_\nu \propto \nu^\alpha$) のコアは、ステープスペクトル ($\alpha < 0$) のジェットに対して、高周波ほど卓越して見える。そのため、JVN 8.4 GHz で見えた点源はコアと解釈される。JVN イメージとの重ね合わせにより、VLBA 1.7 GHz で見えた構造のうち最も明るい成分がコアであることが確定した。おかげで、カウンタージェット成分の同定が確実におこなえる。これが位置天文を用いた多周波イメージの重ね合わせの威力である。

カウンタージェット成分は、RXS J08066+7248 と B3 1702+457 の C3 であると同定された。また、RXS J16446+2619 は片側にしかジェットが見えないことがわかった。RXS J16290+4007 と RXS J16333+4718 については、それぞれ 2 つしか成分が見られないことから、構造についての議論はおこなわないことにする。なお、1 mas に相当するリニアスケールは各天体について、1.8, 4.1, 2.1, 2.5, 1.2 pc である (表 2 の順で)。

3 議論

Radio-quiet な種族にあつて、なぜ radio-loud NLS1 は強い電波を放射しているのであろうか。X 線連星の類推から、radio-loud NLS1 の降着円盤は very high state にあるのかもしれない。この状態では、相対論的ジェットが発生し得る。相対論的ジェットは我々の視線に近い方向に噴き出している場合、ドップラービーミング効果によってフラックスが増幅され、強い電波源になる。噴き出す方向が違っていても、ジェットが高密度ガスに衝突した場合には運動学的エネルギーが効率よく放射に変換されて強い電波源になる。前者はブレイザータイプ、後者は若い電波銀河タイプの AGN 電波源である。

いずれにしても、調査にはパーセクスケールに相当する空間分解能が必要であり、VLBI が NLS1 の研究

表 2: VLBI 観測結果

Name	ν (GHz)	Astrometric position (J2000.0)		S_{ν}^{VLBI} (mJy)	I_{ν}^{VLBI} (mJy beam $^{-1}$)	σ	$\theta_{\text{maj}} \times \theta_{\text{min}}$ (mas \times mas)	PA (deg)
(1)	(2)	RA (3)	Dec (4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
RXS J08066+7248	1.667	08 06 38.95732	72 48 20.4071	23.0	9.6	0.117	4.7×8.4	-20.5
	8.424	08 06 38.95744	72 48 20.4042	5.0	4.3	0.543	3.9×7.1	-17.1
RXS J16290+4007	1.667	16 29 01.31065	40 07 59.9067	10.5	10.4	0.148	4.1×10.7	-10.1
	8.424	16 29 01.31060	40 07 59.9061	23.3	26.8	1.820	3.1×4.7	-28.8
RXS J16333+4718	1.667	16 33 23.58080	47 18 58.9285	55.5	48.9	0.114	4.8×11.6	35.3
	8.424	16 33 23.58079	47 18 58.9298	22.1	15.8	0.926	3.0×7.3	-34.1
RXS J16446+2619	1.667	16 44 42.53403	26 19 13.2266	100.6	78.4	0.176	4.5×9.2	-4.1
	8.424	16 44 42.53399	26 19 13.2257	150.3	146.4	1.940	2.4×6.5	-32.2
B3 1702+457	1.667	17 03 30.38309	45 40 47.1683	74.4	59.5	0.177	4.7×11.4	-47.5
	8.424	17 03 30.38302	45 40 47.1679	18.5	15.3	0.951	3.0×7.3	-73.6

Col. (1) target name; Col. (2) observing frequency at band center; Col. (3), (4) astrometric position, measured by our VLBI observations; Col. (5) total flux density in VLBI image; Col. (6) peak intensity; Col. (7) image R.M.S noise; Col. (7) synthesized beam sizes; Col. (8) position angle of synthesized beam.

分野において大いに貢献できる場所である。NLS1の研究分野で論争となっている inclination の問題や(広輝線成分の速度場が球状ではなくむしろ円盤状で、それを face-on からみたものが NLS1 であるという説。小さなブラックホール質量+高い降着率という説との論争)、ブラックホールの成長進化の問題についても観測的な示唆を与えることのできる貴重な機会を VLBI は与えてくれる。

3.1 構造の非対称性

位相補償観測によってコアが同定され、すべての天体について構造に非対称性が見られた。ジェットの本質的な対称性を仮定すると、見た目の非対称性を生み出す原因として、(a) 自由-自由吸収と、(b) ドップラービーミング効果が可能性として考えられる。いずれも、明るい側が近づくジェットであり、暗い側が遠ざかるジェットとなる。単純な論理で言うと、自由-自由吸収が非対称性の原因だとすると、中心核領域の高密度環境のなかでジェットの運動学的エネルギーが効率的に散逸されて radio-loudness に有効に寄与する可能性を考えることができる。また、ドップラービーミングが非対称性の原因だとすると、ドップラービーミ

ングによるフラックス増幅が radio-loudness に有効に寄与する可能性を考えることができる。

3.2 自由-自由吸収の可能性

カウンタージェットを覆い隠すほどの自由-自由吸収体が中心核に存在しうるかを考える。観測されている光度が周囲のガスを電離できる範囲を計算する。ガスの密度 ($\approx n_e$) と中心核からの電離光子供給率 (N_*) における Strömngren 半径 r を考える。また、電離領域を横切る距離 L と電波の光学的厚み (τ) を考えると、cgs 単位系で、

$$N_* = 1.5 \times 10^{-9} r^3 n_e^2 T_e^{-0.73} \quad (1)$$

$$\tau = 0.2 T_e^{-1.35} \nu^{-2.1} n_e^2 L \quad (2)$$

完全電離 $T_e > 8000$ K、また幾何学的に厚いプラズマトーラス ($L \sim r$) を最も吸収が効果的となる場合として仮定しよう。ターゲットについて観測されている X 線光度 $\sim 10^{44}$ ergs s^{-1} を Lyman 限界まで photon index $\Gamma = 2.0$ で外挿すると、 $N_* = 1.5 \times 10^{54}$ photons s^{-1} が得られる。すると半径 60 pc 以内の領域が 1.7 GHz において $\tau > 1$ になり得るとい

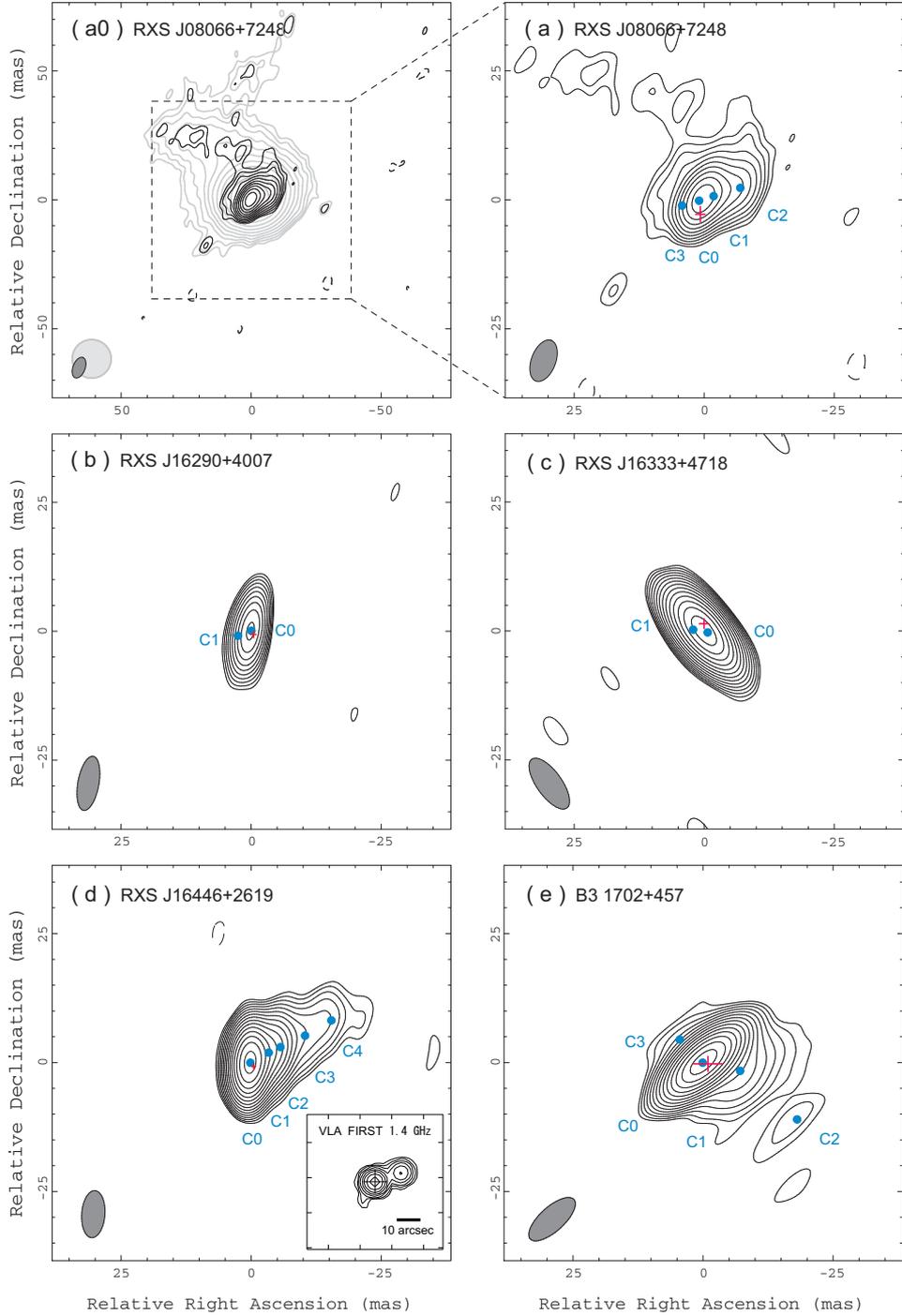


Figure 2: VLBA images of radio-loud NLS1s at 1.7 GHz. Source names are indicated at the left upper corners in each panel. All images were made using natural weighting and self-calibrated. Contour levels are separated by factors of $\sqrt{2}$ beginning at 3 times the rms noise (Table 2). Negative and positive contours are shown as dashed and solid curves, respectively. Half-power beam sizes are given in the lower left corners. The gray-contour map in panel (a0) was made by convolution using a restored beam of 15 mas for easy recognition of low surface brightness emissions. The positions of model-fitted components are shown as points and labeled; the strongest component in each source is named “C0.” The relative position of unresolved emission detected in a phase-referenced JVN observation (Doi et al. 2007) is shown as a cross, whose horizontal and vertical lengths indicate 10-times the measurement errors of Ra and Dec directions, respectively.

う結果となる。60 pc に広がる 8000 K のプラズマガスは、ビリアル半径を考えると $10^6 M_\odot$ 以上の質量のブラックホールで束縛できるため、この条件は非現実的ではない。我々のサンプルの中で最も顕著な構造を示す RXS J16446+2619 でも、ジェットの高さは約 50 pc しかない。同じ長さのカウンタージェットがあったとしても、プラズマガスによって全て覆い隠されている可能性は否定できない。すなわち自由-自由吸収によって構造の非対称性が発生している可能性は残った。しかしながら、この結論には影響を受けない形で、ドップラービーミング効果の考察から、これらの radio-loud NLS1 について重要な結論が導かれる(次節)。

3.3 ドップラービーミングの可能性

ドップラービーミングが非対称性の原因である場合を考える。ローレンツファクターは $\Gamma \equiv (1 - \beta^2)^{-0.5}$ であり、ここで $\beta \equiv v/c$ (v と c はそれぞれジェット成分と光の速さ) である。ドップラーファクターは、

$$\delta \equiv \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \Phi)} \quad (3)$$

である。ここで Φ はジェットの高さと視線とのなす角(視線角)である。天体の系での周波数 ν_{rest} とフラックス密度 $S_{\nu_{\text{rest}}}^{\text{rest}}$ は、観測者の系では $\nu_{\text{obs}} = \delta \nu_{\text{rest}}$ と $S_{\nu_{\text{obs}}}^{\text{obs}} = \delta^3 S_{\nu_{\text{rest}}}^{\text{rest}}$ とにそれぞれ観測される。スペクトル指数 α を仮定すると、 $S_{\nu_{\text{obs}}}^{\text{obs}} = \delta^{3-\alpha} S_{\nu_{\text{rest}}}^{\text{rest}}$ となる。よって、近づいてくるジェットと遠ざかるジェットとのフラックス比は次のようになる：

$$\begin{aligned} r_f &= \frac{S_{\nu_{\text{obs}}}^{\text{rest}}(\beta, \Phi)}{S_{\nu_{\text{obs}}}^{\text{rest}}(\beta, \Phi + \pi)} \\ &= \left(\frac{1 + \beta \cos \Phi}{1 - \beta \cos \Phi} \right)^q, \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $q = 3 - \alpha$ とおいた。原理的に $\beta < 1$ 、 $\cos \Phi < 1$ であるので、

$$\begin{aligned} \beta &> \frac{r_f^{1/q} - 1}{r_f^{1/q} + 1} \\ \cos \Phi &> \frac{r_f^{1/q} - 1}{r_f^{1/q} + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。このように、近づくと遠ざかるジェットのフラックス比を測定することで、ジェットの

速さと視線角に制限をつけることができる。たとえば、 $r_f = 1000$ 、 $\alpha = -0.5$ ならば、 $\Phi < 40.9 \text{ deg}$ 、 $v > 0.756c$ ($\Gamma > 1.5$) が要求される。さらに、あり得る最大のドップラーファクター δ_{max} を知ることができる。ドップラーファクターが最大になるのは $\cos \Phi = \beta$ 、つまり $\delta_{\text{max}} = \Gamma$ のときであるので、

$$\delta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{r_f^{1/q} + 1}{2}}. \quad (6)$$

となる。たとえば、radio-loudness に影響を与え得る 10 倍のフラックス増幅 ($\delta^{3-\alpha} > 10$) を実現するためには、少なくとも $\delta_{\text{max}} > 1.93$ 、すなわち $r_f > 690$ である必要がある。このように、近づくと遠ざかるジェットのフラックス比を測定することで、ドップラービーミング効果が radio-loudness に影響を与えているかを判定することができる。

RXS J16446+2619 ではジェットが片側しか見えない。C0 が近づくとジェットの最初に見える成分、対応するカウンタージェットが 3 倍のノイズレベル以下の明るさとする、 $\beta > 0.75$ 、 $\Phi < 42 \text{ deg}$ が得られる。すなわち、比較的または非常に相対論的な速度のジェットが、非常にまたは比較的の小さい視線角で放出されていることを意味する。カウンタージェットが受かっていないために、ドップラーファクターには制限は付けられない。このような pc スケールジェットの考察には、自由-自由吸収の可能性を否定できていない状態では、意味がない。しかしながら、VLA FIRST イメージでは、pc スケールジェットと同じ方向に光学対応天体のない電波成分が写っており(成分 K1; 図 2)、30 kpc スケールでもジェット構造の非対称性が続いていることを示唆している。これほど大きなスケールの自由-自由吸収体は考えることができないため(存在するとすれば $\sim 4 \text{ Jy}$ の自由-自由放射が観測されていない)、RXS J16446+2619 は kpc スケールにわたってドップラービーミング効果を受けた非対称性構造をもっているといえる。RXS J16446+2619 は右上がりスペクトル ($\alpha > 0$) を示しており、これもドップラー効果 $\nu_{\text{obs}} = \delta \nu_{\text{rest}}$ で発生しやすい現象である。本質的にはずっと弱い電波源であり、radio-quiet NLS1 なのかもしれない。ドップラービーミング効果が推定された NLS1 は、SDSS J094857.3+002225 (Doi et al. 2006a) に続いて 2 例目である。

RXS J08066+7248 と B3 1702+457 には、顕著な

構造が見え、カウンタージェット成分 C3 が検出された。対応する近づくジェットの成分 C0 (または C1, C2, ...) とのフラックス比を考えると、最も強い場合でも、RXS J08066+7248 について $\beta > 0.31$ と $\Phi < 72$ deg、B3 1702+457 について $\beta > 0.46$ と $\Phi < 63$ deg となり、実質的には価値がない弱い制限しか得られない。しかしながら、取り得る最大のドップラーファクターの式から、フラックス増幅は RXS J08066+7248 について 1.8 倍以下、B3 1702+457 について 3.2 倍以下と、非常に強い条件が導き出される。自由-自由吸収が併発していた場合には、この条件はさらに厳しくなる方向に働く。すなわち、これらの天体では、ドップラービーミング効果の寄与は、あったとしても弱いと結論される。電波スペクトルはステープ ($\alpha < 0$) であり、また構造も比較的低輝度で広がっており、これらからもドップラービーミング効果の寄与は小さいことが支持される。本質的に強い電波源であるといえる。

4 まとめ

VLBA 1.7 GHz 観測によって、5 つの radio-loud NLS1 に非熱的ジェットが存在することが直接イメージングによって示された。JVN 8.4 GHz との位相補償イメージ重ね合わせによって、ジェット構造のなかからコアを同定することができ、カウンタージェットの同定に成功した。ジェット構造の非対称性として、自由-自由吸収とドップラービーミング効果の可能性を検討した結果、(1) RXS J16446+2619 ($\alpha > 0$) には $\beta > 0.75$ 、 $\Phi < 42$ deg の相対論的 pole-on ジェットが付随し、ドップラービーミングが有効に寄与している、(2) RXS J08066+7248 と B3 1702+457 ($\alpha > 0$) ではドップラービーミングによるフラックス増幅はそれぞれ 1.8 倍以下、3.2 倍以下とほとんど寄与がなく、本質的に強い電波源であるといえる。すなわち、radio-loud NLS1 には、ドップラービーミング効果が有効に働いているものと、ほとんど効いていないものの両方が存在する。

大質量星形成領域 Cepheus A における 6.7 GHz メタノールメーザの発生領域の解明

杉山孝一郎 (山口大学大学院)

2008 年 6 月 3 日

概要

我々は、大質量星形成領域 Cep A において、JVN を用いた 6.7 GHz メタノールメーザの VLBI 観測を行った。その結果、1400 AU に拡がって分布する円弧状の構造が得られた。その中には、今回の VLBI 観測で初検出されたスポットも含まれている。位相補償法により、メタノールメーザの絶対位置座標を 1 mas よりも良い精度で計測することに成功し、分子輝線、電波連続波との位置の重ね合わせを行った。その結果、以下のことが得られた; 1) 電波ジェットにはほぼ垂直 (位置角差 $\sim 65^\circ$)、2) 中心星の位置に相当する 43 GHz 電波連続波のピークが、円弧状構造のほぼ中心に一致、3) CH_3CN , NH_3 輝線が示す分子回転円盤に大きさ・位置角・傾斜角ともに良く一致。これらの結果から、Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザは回転円盤に付随している可能性を示せた。中心星の光度から算出されるダスト温度 (~ 110 K) も、理論的に予測されているメタノールメーザの励起に適切な温度に矛盾しなかった。Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザは、中心に存在する一つの励起源からの赤外線放射により励起されることが可能であることが伺える。

1 研究背景

太陽の 8 倍以上の質量を有する大質量星は、銀河進化および宇宙における元素合成において重要な役割を担っている。しかし、形成過程という基本的な物理が理解されていない。大質量星の形成シナリオとしては、“複数の小質量星が合体して形成^{1),2)}”、“周りのガス円盤からの質量降着^{3),4)}”の 2 説が主に考えられている。 NH_3 や CH_3CN などの分子輝線の観測により、大質量原始星の周囲に回転する円盤が存在していることが示唆されている^{5),6)}が、それらは空間分布および速度勾配から推測される間接的結果であるため、降着円盤の決定的証拠にはなっていない。直接的に降着現場を観測するためには、数ミリ秒角 (mas) の高角度分解能で固有運動を観測する必要がある。そのためのプローブとしては、放射サイズがコンパクト (数 AU) であり、原始星のごく近傍から検出されるメーザ源が適当である。

6.7 GHz メタノールメーザ ($5_1 \rightarrow 6_0 A^+$ 三軸不等回転遷移) は、水メーザや OH メーザとは異なり、大質量星形成領域においてのみ放射が行われている唯一のメーザである^{7),8)}。また、このメーザの寿命の長さ (4 年以上安定⁹⁾, 150 年程度¹⁰⁾)、発生時期 (Ultra-compact (UC) HII 領域が生成するよりも前の段階; $\sim 10^4 \text{yr}$)^{11),12)} も考慮すると、このメーザの発生領域の理解が、大質量星形成機構の解明において重要な鍵になってくると言える。しかし、このメーザ自身の基本的描像が未だにはっきりしていない。

中でも、メタノールメーザが大質量星形成周囲の

円盤とアウトフローのどちらに付随しているのかということは重要な問題である。これまでの干渉計観測により、6.7 GHz メタノールメーザ天体の約 40% は直線的な空間構造・速度勾配を有することが知られており、真横向きから見たケプラー回転円盤として解釈されてきたが、メタノールメーザに一般的な特徴であるとは言い難い。このメーザのみでは発生領域の解釈が困難であるため、我々は水メーザや分子輝線、電波連続波などの他プローブとの空間位置関係を調査することによる、6.7 GHz メタノールメーザの付随場所の特定を目指した。

1.1 観測天体：Cepheus A

今回、他プローブとの空間位置関係調査の観測天体として、大質量星形成領域 Cepheus A (Cep A) を選出した。Cep A は、725 pc の距離に存在する大質量星形成領域で、その中に少なくとも 9 個の UC HII 領域が存在しており^{13),14)}、それぞれ HW1-9 とラベル付けされている。メタノールメーザは HW2 に付随していることが知られているが、この HW2 には水・OH メーザも付随しており、また分子輝線や電波連続波での研究も非常に多く行われているため、ジェットの噴出している方向¹⁵⁾⁻¹⁷⁾ や分子回転円盤の存在^{6),18),19)}、中心天体の質量などが既に明らかになっている。そのため、位置の重ね合わせによるメタノールメーザの付随場所の特定という観点においては、最適のターゲット天体と言える。

2 観測

6.7 GHz メタノールメーザの VLBI 観測は、2006 年 9 月 9 日に大学連携 VLBI 観測網 (JVN; Japanese VLBI Network) を用いて行った。参加局は、山口 32 m, 白田 64 m, VERA-水沢・石垣 20 m の 4 局である。データは 128 Mbps の転送効率で記録し、2 ビットで量子化している。観測した 16 MHz 帯域の内、Cep A が観測されている 6668-6670 MHz の 2 MHz を切り出し 512 点分光しているため、速度分解能は 0.176 km s^{-1} に相当する。総オンソース時間は約 3 時間であり、1 チャンネル当たりのイメージ感度 (1σ) は $160 \text{ mJy beam}^{-1}$ を達成している。また、生成された合成ビームサイズは $9.0 \times 3.5 \text{ mas}$ であり、その Position angle (PA) は -70° であった。データ解析は NRAO の作成した Astronomical Imaging Processing System (AIPS) を用いて行った。

この観測では、高速スイッチングでの位相補償法を適用しており、その参照電波源としては、離角 $2^\circ.19$ の J2302+6405 (絶対座標精度: 0.55 mas)²⁰⁾ を用いている。ターゲットに 120 秒、参照電波源に 100 秒のサイクルを、 $EL > 40^\circ$ の時間帯に 23 回繰り返して観測している。16 MHz 帯域の連続波データではイメージ感度 (1σ) 30 mJy beam^{-1} を達成した。

3 結果：空間分布

117 個のメーザスポットを検出し、それらの強度は 0.7 Jy beam^{-1} から $121.7 \text{ Jy beam}^{-1}$ の範囲内の値を示していた。この観測での周波数 1 チャンネル当たりのイメージ雑音レベル 1σ は、典型的には $160 \text{ mJy beam}^{-1}$ である。検出したメーザスポットのフラックス密度は、ほとんどのスポットが検出感度 5σ 以上の値を示している (視線速度 -1.24 km s^{-1} の 1 スポット、 -4.93 km s^{-1} の 3 スポットは 4σ 程度)。

得られた空間分布を図 1 に示す。ここで図 1 の空間分布図は、視線速度 -2.64 km s^{-1} チャンネルのピークスポットを原点にしており、その位置に対する相対位置として描いている。450 mas 東、100 mas 南の位置に存在しているスポット群と、100 mas 東、500 mas 北の位置に存在しているスポット群は、今回の VLBI 観測で初検出したメーザスポットである。メーザスポットは 1900 mas (1400 AU at 725 pc) 程度に拡がって分布していた。また検出されたメタノールメーザスポットは、少なくとも 5 つのメーザスポット群を形成し、それぞれのスポット群は 100 AU 以上分離していた。視線速度を考慮すると、視線速度の大きいスポット群を、視線速度の小さい

スポット群が包囲している様子が見て取れる。全体的なスポットの分布を考えると、楕円でフィッティングできそうな円弧状の構造が見て取れる。

位相補償法を用いた結果、6.7 GHz メタノールメーザの絶対位置座標の計測に成功した。図 1 に示す空間分布の原点の絶対位置座標を、 1 mas よりも良い精度で $RA(J2000.0) = 22^{\text{h}}56^{\text{m}}17^{\text{s}}.90421$, $Dec(J2000.0) = +62^\circ 01' 49''.5769$ と計測した (表 1 参照)。ダイナミックレンジは 11 を達成している。

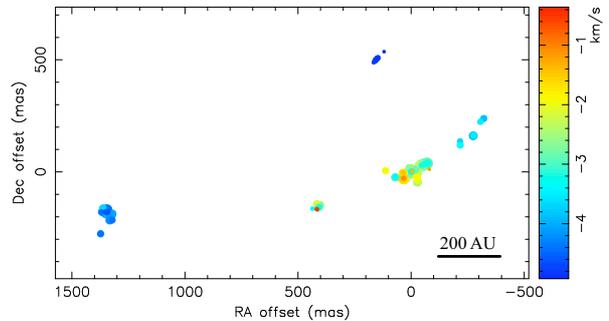


図 1: 6.7 GHz メタノールメーザの空間分布。色は視線速度に対応 (カラースケールは右参照)。丸の大きさはスポットの強度に対数スケールで比例。

4 考察：重ね合わせ

4.1 分子輝線・電波連続波

今回の観測で得られたメタノールメーザの空間分布を、過去の観測で得られている分子輝線および電波連続波と重ね合わせる。表 1 には、今回求めたメタノールメーザの絶対位置座標の他に、43 GHz 電波連続波のピークおよび CH_3CN 輝線の絶対位置座標も記載している。それらを元に、重ね合わせたものを図 2(上) に示す。43 GHz 電波連続波のピーク (図 2 上の星印) は、Cep A-HW2 領域の中心星の位置を表していると考えられている¹⁷⁾ が、それがメタノールメーザの円弧状分布のほぼ中心に位置していることが見て取れる。また、43 GHz ピークを中心として北東-南西方向 ($PA \sim 45^\circ$) に伸びている等高線は 22 GHz 電波連続波を示しており、熱的ジェットをトレースしていると考えられているが、メタノールメーザの円弧状分布はこれにほぼ垂直であるように見える。さらに、 CH_3CN 輝線が示す分子回転円盤 (中心をアスタリスクで表示) は、メタノールメーザの分布に、大きさ・位置角などがほぼ重なるように分布していた。

それらの結果を、メタノールメーザの円弧状分布を楕円でフィッティングすることにより定量的に表 2 に示す。メタノール楕円と 43 GHz ピークは完全

表 1: Cep A-HW2 領域における各プローブの絶対位置座標

プローブ	絶対座標 (J2000.0)		位置精度		V_{ref} (km s^{-1})	Ref.
	RA (h m s)	Dec ($^{\circ}$ ' ")	RA (mas)	Dec (mas)		
メタノールメーザ	22 56 17.90421	+62 01 49.5769	0.86	0.68	-2.64	1
水メーザ	22 56 17.97635	+62 01 49.3591	0.62	0.62	-13.24	4
連続波 (43 GHz)	22 56 17.982	+62 01 49.57	10	10	...	3
CH ₃ CN 輝線	22 56 17.96	+62 01 49.6	100	100	...	2

Col. 6: 絶対位置座標に相当するメーザスポットの視線速度; Col. 7: 絶対位置座標のリファレンス。

Ref. — (1) this paper; (2) Patel et al. (2005); (3) Curiel et al. (2006); (4) Sugiyama et al. in prep.

表 2: 楕円フィッティングにより得られたパラメータ

	相対位置		長径 (mas)	短径 (mas)	位置角 ($^{\circ}$)	傾斜角 ($^{\circ}$)	Ref.
	RA (mas)	Dec (mas)					
メタノール	442	122	955	287	110	73	1
連続波	550	-7	45 ^a	...	2, 4
CH ₃ CN	420	-5	800	300	124	68	3

Col. 2-3: メタノールメーザの絶対位置座標を原点とした相対位置; Col. 8: パラメータのリファレンス。

^a 電波ジェット的位置角。

Ref. — (1) this paper; (2) Torrelles et al. (1996); (3) Patel et al. (2005); (4) Curiel et al. (2006).

には一致していないが、中心付近に存在していることは示している。CH₃CN 分子円盤とは、サイズ・傾斜角的にはほぼ一致している。位置角を見ると、電波ジェットとは 65 $^{\circ}$ の差があるため、高い垂直性が伺える。また、NH₃(青の等高線)、SO₂(赤の等高線) の分子輝線、および 335 GHz 帯のサブミリ連続波 (白の等高線) と重ね合わせたものを図 2(下) に示す。これらの分子輝線は CH₃CN 輝線と同様、分子回転円盤をトレースしていると考えられており^{18),19)}、サブミリ連続波はダストからの放射だと考えられている。ただし、SO₂ の大きさは、CH₃CN や NH₃ に比べて半分程度である。メタノールメーザ (黒点) は、NH₃ 円盤に重なるように分布しているのが見てとれる。また、メタノールメーザが示す視線速度範囲は -4.93 から -0.36 km s^{-1} であるが、上記の分子輝線の視線速度 (CH₃CN: -10 to 0 km s^{-1} ; NH₃: -7.5 to -2.6 km s^{-1} ; SO₂: -7.8 to -2.8 km s^{-1}) は、メタノールの視線速度に類似しており、CH₃CN の視線速度はメタノールの視線速度を完全にカバーしている。

これらの事実、即ちメタノールメーザ空間構造の電波ジェットとの垂直関係性、中心星の存在場所、分子回転円盤との空間的一致から、Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザは回転円盤に付随していることが推測される。これを、メタノールメーザスポットが存在している場所のダスト温度を推定することにより検証する。HW2 領域の中心星の光度 L が $1.3 \times 10^4 L_{\odot}$ である²¹⁾ ことを考慮し、中心星が等方的な放射をしていると仮定すると、半径 $R = 700$ AU

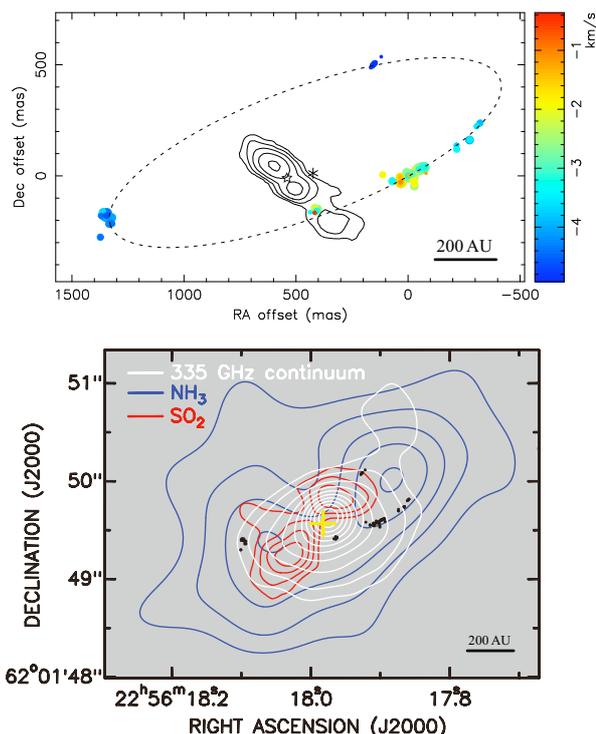


図 2: Cep A における 6.7 GHz メタノールメーザの分子輝線および電波連続波との重ね合わせ。(上) 丸の色・大きさの定義は図 1 と同様。星印 (☆) は 43 GHz ピーク、アスタリスク (*) は CH₃CN 円盤の中心、等高線は 22 GHz 電波ジェットに相当。点線の楕円はメタノール分布に対するフィッティング結果。(下) NH₃((4, 4) 遷移: 青い等高線) および SO₂(赤い等高線) との重ね合わせ。白い等高線は 335 GHz 帯のサブミリ連続波に相当。メタノールメーザスポットは黒点で表示。

の同心円上におけるダスト温度 T_d は以下の式 (1) を用いて算出される。

$$T_d = (16\pi\sigma)^{-1/4} \cdot R^{-1/2} \cdot L^{1/4} \quad (1)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.6705 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) を表す。計算の結果、ダスト温度 T_d は 114 K と算出された。この値は、理論的に算出されているメタノールメーザの励起に適当な温度 100-200 K²²⁾ に矛盾しない温度である。そのため、Cep A のメタノールメーザは、中心に存在する一つの励起源からの赤外線放射により励起されることが可能であることが伺える。

この分子円盤の中心質量 (enclosed mass) M は CH_3CN 輝線に見られる速度勾配から $19 \pm 5 M_\odot$ と推定されている。半径 $r = 700 \text{ AU}$ のメタノール円盤におけるケプラー回転 ($v = \sqrt{GM/r}$) を考えると、その回転速度 v は 4.9 km s^{-1} と予想される。これは Cep A のメタノールメーザの視線速度範囲 $\sim 4.6 \text{ km s}^{-1}$ にほぼ一致する。ただし、メタノールメーザの観測データから描かれる P-V 図 (Position-Velocity diagram) では、単純なケプラー回転を示す特徴は見られていない。予想される回転速度は、725 pc の距離では約 1.4 mas yr^{-1} の運動に相当するので、メタノールメーザ自身の内部固有運動を計測することによって検証する必要がある。内部固有運動計測を目的とした 3 エポックの観測自体は既に終了しており、現在解析中である。

4.2 水・OH メーザ

4.1 節にて、円盤に付随している可能性を示した 6.7 GHz メタノールメーザを、22.2 GHz 水メーザ^{15),16),23)-25)}、および 1.6 GHz OH メーザ^{1665, 1667 MHz^{26),27)}} と重ね合わせを行った。重ね合わせの結果を図 3 に示す。以下、それぞれのスポットの存在位置から 50 AU 以内にスポットが存在している場合に、“空間的に一致”と表現している。

4.2.1 水メーザ

重ね合わせを行うデータとして、Very Large Array (VLA) を用いて干渉計観測されたもの¹⁵⁾(図 3a 中の赤丸) と、VLBI Exploration of Radio Astrometry (VERA) を用いて VLBI 観測されたもの (2006 年度 VERA 共同利用観測: Sugiyama et al. in preparation, 図 3a 中の赤三角) を用いた。

VLA で観測された水メーザは、22 GHz 電波ジェット付近に分布しているスポットが直線的に分布しており、電波ジェットに垂直であること、またその直線上に速度勾配を有していることから、edge-on なケ

プラー回転円盤をトレースしているのではないかと考えられている。この水メーザ円盤は、 SO_2 分子輝線が示す回転円盤に大きさが類似しており、 CH_3CN および NH_3 分子輝線が示す回転円盤の半分程度の大きさに相当している。メタノールメーザ (図 3a 中の緑丸) の分布は、上記の水メーザ円盤と位置角は類似しているが、大きさは 2 倍程度に拡がっている。

VERA を用いた観測では、Missing flux や感度リミット、もしくは水メーザスポット自身の本質的な消滅などにより、VLA で観測されていた水メーザ円盤に付随している水メーザスポットを検出することはできなかった。しかし、Vlemmings et al. (2006) による Very Long Baseline Array (VLBA) を用いた観測²⁵⁾ で検出された 1400 mas 東、150 mas 南のスポット群 (図 3a 中の点線かつこ I) の検出には成功した。また、1100 mas 東、100 mas 南のスポットは、VERA を用いた観測で初めて検出されたスポットであり、視線速度 -46 km s^{-1} と、他の成分に比べて非常に高速である。メタノールメーザと空間的に一致しているスポット群は、図 3(a) の点線で囲んでいる部分 (I, II) であるので、それらの拡大図を図 3(b) および (c) に示す。ただし、どちらもスポット同士が重なるほど厳密に一致しているわけではない。

I の水メーザスポットに関して、視線速度は -16.62 km s^{-1} から -13.03 km s^{-1} の範囲であり、この部分に付随しているメタノールメーザの -4.40 km s^{-1} から -3.70 km s^{-1} という視線速度範囲とは一致していない。これは奥行き方向への空間的ズレの可能性を示唆している。これは驚くべきことではない。理論研究により、水メーザは、様々な速度のアウトフローにより生成される、高密度な暖かい領域 ($\geq 10^6\text{-}10^7 \text{ cm}^{-3}$, $\geq 400 \text{ K}$) を伝播するショック層において衝突励起されると言われている²⁸⁾ が、一方メタノールメーザは、比較的暖かく ($100\text{-}200 \text{ K}$) 高密度 ($10^6\text{-}10^9 \text{ cm}^{-3}$) な領域において、中心星により暖められたダストからの赤外線放射によって励起されると言われている^{22),29)}。今回の観測で得られた視線速度の不一致という結果は、理論研究で提唱されている励起環境の違いを反映していると考えられる。

水メーザスポット群 II は、過去の内部固有運動観測の結果から、北東方向に膨張するショック波をトレースしていると言われている^{23),24)}。II に付随しているメタノールメーザスポット群は、視線速度的にも一致するスポットが存在している。しかし、II に付随しているメタノールメーザスポットは、全スポットのわずか 12% 程度 (14/117) であるため、この事実から、6.7 GHz メタノールメーザはショック領域に付随しているとは言えない。ちなみに、上記

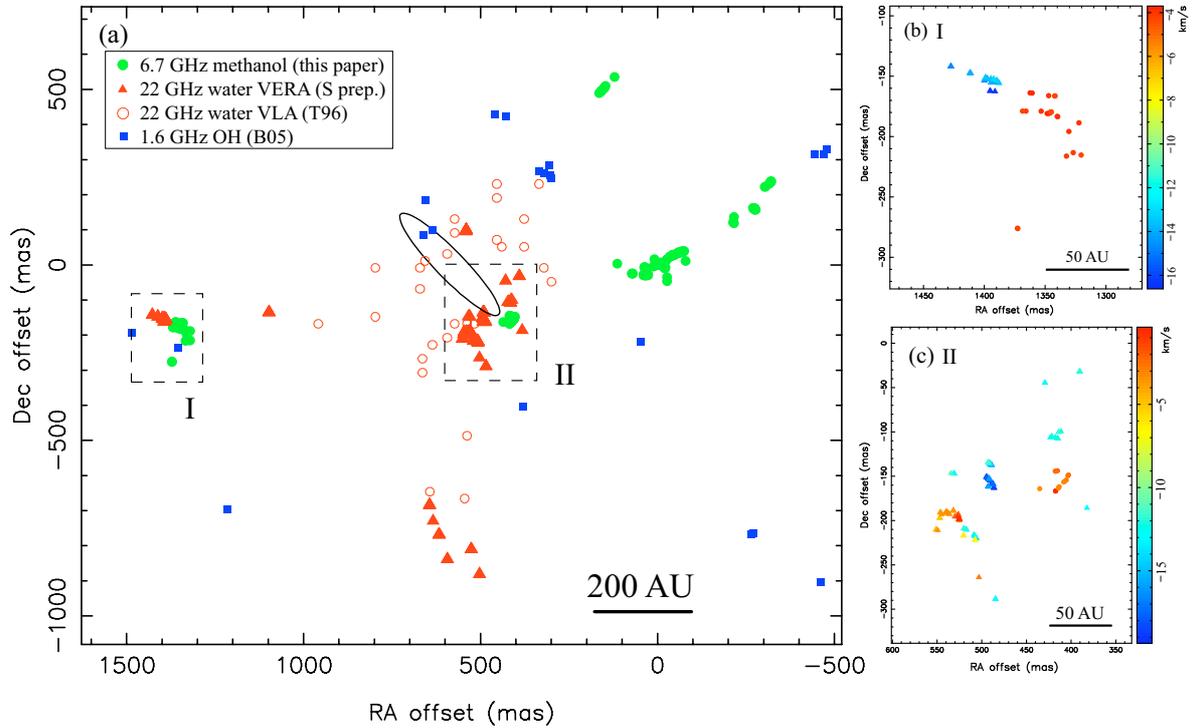


図 3: Cep A における 6.7 GHz メタノールメーザの、22.2 GHz 水メーザおよび 1.6 GHz OH メーザとの重ね合わせ。原点はメタノールメーザの絶対位置座標に相当。(a) 緑丸 (●): 6.7 GHz メタノールメーザ、赤三角 (▲): 22.2 GHz 水メーザ with VERA (Sugiyama et al. in prep.), 赤丸 (○): 22.2 GHz 水メーザ with VLA¹⁵⁾、青四角 (■): 1.6 GHz OH メーザ。中央付近の楕円は 22 GHz 電波ジェットに相当。(b), (c) それぞれパネル (a) 中に点線で囲んだ I, II 部分の拡大図。色は視線速度に対応 (カラースケールはそれぞれの右バー参照)。丸 (●) はメタノールメーザ、三角 (▲) は水メーザに相当。

のショックを生成している励起源は、図中に楕円で示している電波ジェットとは別の場所 (II の南西方向) にある別の星であると考えられている。

上記の議論は、水メーザスポット、特にまだ運動が計測されていない領域 I のスポット群、および VERA 観測で初検出された高速度スポット (1100 mas 東、100 mas 南) の内部固有運動を計測することによってさらなる検討を加える必要がある。この水メーザの内部固有運動は、メタノールメーザが示す楕円構造が、本当に円盤をトレースしているのか、もしくは全スポットが同じ系をトレースしているのではなく、個々に異なる系をトレースしているのかどうかを議論する上で、必要な情報となってくる。既に VERA による 3 エポックの VLBI 観測は終了している。

4.2.2 OH メーザ

1.6 GHz OH メーザは、図 3(a) に青い四角 (■) で示しているように、6.7 GHz メタノールメーザおよび 22.2 GHz 水メーザを取り囲むように分布している。これら OH メーザスポットの内部固有運動は Multi-Element Radio-Linked Interferometer Network (MERLIN) を用いた観測で計測されてお

り²⁶⁾、中心星から遠ざかるような、即ち膨張する運動が検出されている。この膨張運動は、CO や HCO⁺ が示すパーセクスケールの分子アウトフロー (速度 $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$)^{30),31)} に起因していると考えられている。OH メーザは、図 3(a) 中の領域 I において、メタノールメーザと空間的に一致している。この領域 I に存在する OH メーザスポットは、中心星から遠ざかるように東側へ運動しているが、視線速度は -13.3 km s^{-1} を示しており、メタノールメーザの示す -4.5 km s^{-1} とは大きく異なっているため、東端のメタノールメーザが分子アウトフローに付随しているとは、この結果からは断定できない。これも、今後のメタノールメーザ自身の内部固有運動の計測により検証する必要がある。

5 まとめ

我々は、大質量星形成領域 Cep A において、JVN を用いた 6.7 GHz メタノールメーザの VLBI 観測を行った。その結果、1400 AU に広がって分布する円弧状の構造が得られた。その中には、今回の VLBI 観測で初検出されたスポットも含まれている。位相補償法により、メタノールメーザの絶対位置座標を 1 mas よりも良い精度で計測することに成功し、分

子輝線、電波連続波との位置の重ね合わせを行った。
その結果、以下のことが得られた。

1. 22 GHz 電波連続波が示す熱的ジェットにほぼ垂直 (位置角差 $\sim 65^\circ$)
2. 円弧状構造のほぼ中心に、43 GHz 電波連続波のピーク (中心星の位置に相当) が一致
3. CH_3CN , NH_3 輝線が示す分子回転円盤に大きさ・位置角・傾斜角ともに良く一致 (SO_2 輝線とも一致しているが、 SO_2 の大きさが半分)

これらの結果から、Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザは回転円盤に付随している可能性を示せた。中心星の光度から算出されるダスト温度 (~ 110 K) も、理論的に予測されているメタノールメーザの励起に適切な温度に矛盾しなかった。水・OH メーザとの位置の重ね合わせも行い、空間的に一致するスポットもいくつか存在したが、視線速度の不一致や、運動の不確定性から、発生場所に関する明確な情報は得られなかった。今後は、これらの結果をメタノールメーザ自身の内部固有運動を計測することにより検証していく。内部固有運動計測を目的とした 3 エポックの観測自体は既に終了しており、現在解析中であるため、その結果は追って報告、さらには査読論文への投稿を行う予定である。

本研究は、藤澤健太、輪島清昭、澤田-佐藤聡子、磯野靖子 (山口大学)、本間希樹、小林秀行 (国立天文台)、村田泰宏、望月奈々子、土居明広 (宇宙航空研究開発機構) の各氏 (敬称略) との共同で行われたものである。

<参考文献>

- 1) Bonnell, I. A., et al. 1998, MNRAS, 298, 93
- 2) Bonnell, I. A., et al. 2004, MNRAS, 349, 735
- 3) McKee, C. F., & Tan, J. C. 2002, Nature, 416, 59
- 4) McKee, C. F., & Tan, J. C. 2003, ApJ, 585, 850
- 5) Beltrán, M. T., et al. 2006, Nature, 443, 427
- 6) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 7) Minier, V., et al. 2003, A&A, 403, 1095
- 8) Xu, Y., et al. 2008, ArXiv e-prints, 803, arXiv:0803.2232
- 9) Goedhart, S., et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- 10) Ellingsen, S. P. 2007, MNRAS, 377, 571
- 11) Walsh, A. J., et al. 1998, MNRAS, 301, 640
- 12) van der Walt, J. 2005, MNRAS, 360, 153
- 13) Hughes, V. A., & Wouterloot, J. G. A. 1984, ApJ, 276, 204
- 14) Hughes, V. A., et al. 1995, MNRAS, 272, 469
- 15) Torrelles, J. M., et al. 1996, ApJ, 457, L107
- 16) Torrelles, J. M., et al. 1998, ApJ, 509, 262
- 17) Curiel, S., et al. 2006, ApJ, 638, 878
- 18) Torrelles, J. M., et al. 2007, ApJ, 666, L37
- 19) Jiménez-Serra, I., et al. 2007, ApJ, 661, L187
- 20) Petrov, L., et al. 2005, AJ, 129, 1163
- 21) Evans, N. J., II, et al. 1981, ApJ, 244, 115
- 22) Cragg, D. M., et al. 2005, MNRAS, 360, 533
- 23) Torrelles, J. M., et al. 2001, ApJ, 560, 853
- 24) Gallimore, J. F., et al. 2003, ApJ, 586, 306
- 25) Vlemmings, W. H. T., et al. 2006, A&A, 448, 597
- 26) Migenes, V., et al. 1992, MNRAS, 254, 501
- 27) Bartkiewicz, A., et al. 2005, MNRAS, 361, 623
- 28) Elitzur, M., et al. 1989, ApJ, 346, 983
- 29) Sobolev, A. M., et al. 1997, MNRAS, 288, L39
- 30) Rodríguez, L. F. 1980, ApJ, 240, L149
- 31) Gómez, J. F., et al. 1999, ApJ, 514, 287

鹿島一小金井 8 Gbps 光結合観測システムが稼動を開始

川口則幸 (国立天文台)、光結合 VLBI 研究チーム

情報通信研究機構 (NICT)の鹿島 VLBI グループと国立天文台 (NAOJ)の光結合 VLBI 推進室は、協力して鹿島 3 4 m - 小金井 1 1 m間の実時間 VLBI 観測システムを立ち上げ、試験観測に成功した (3月18日)。この試験観測は3月26日、27日の両日に APEC-TEL (アジア太平洋経済協力会議・電気通信ワーキンググループ) 会合 (会場: 新宿京王プラザホテル) でも公開された。

この観測システムでは、望遠鏡および観測装置、相関処理装置はすべて遠隔で制御が可能で、望遠鏡の駆動状態、相関処理結果が実時間で遠隔監視できるのが特徴である。観測者はどこからでも居ながらにして観測状況を確認できる。これは、VLBI 観測のこれまでの常識 (観測から数週間後に初めて観測結果が分かる) を覆すものである。このような光結合・実時間 VLBI 観測システムは、いつ発生するか分からない未知の天体フレア現象を常時モニタ観測することで解明するなど今後の活躍が期待できる。観測の機動性、柔軟性、速報性に難があった VLBI 観測に新たな可能性を付け加えた。また、伝送路には情報通信研究機構が運用する超高速テストベッドネットワーク (JGNII) が使用され、最大 8 Gbps の観測データ伝送が可能である。実験観測では、8 GHz 帯 3 チャンネル (1 チャンネル 2 Gbps)、2 GHz 帯 1 チャンネルの 2 周波数帯同時の観測が行われた。

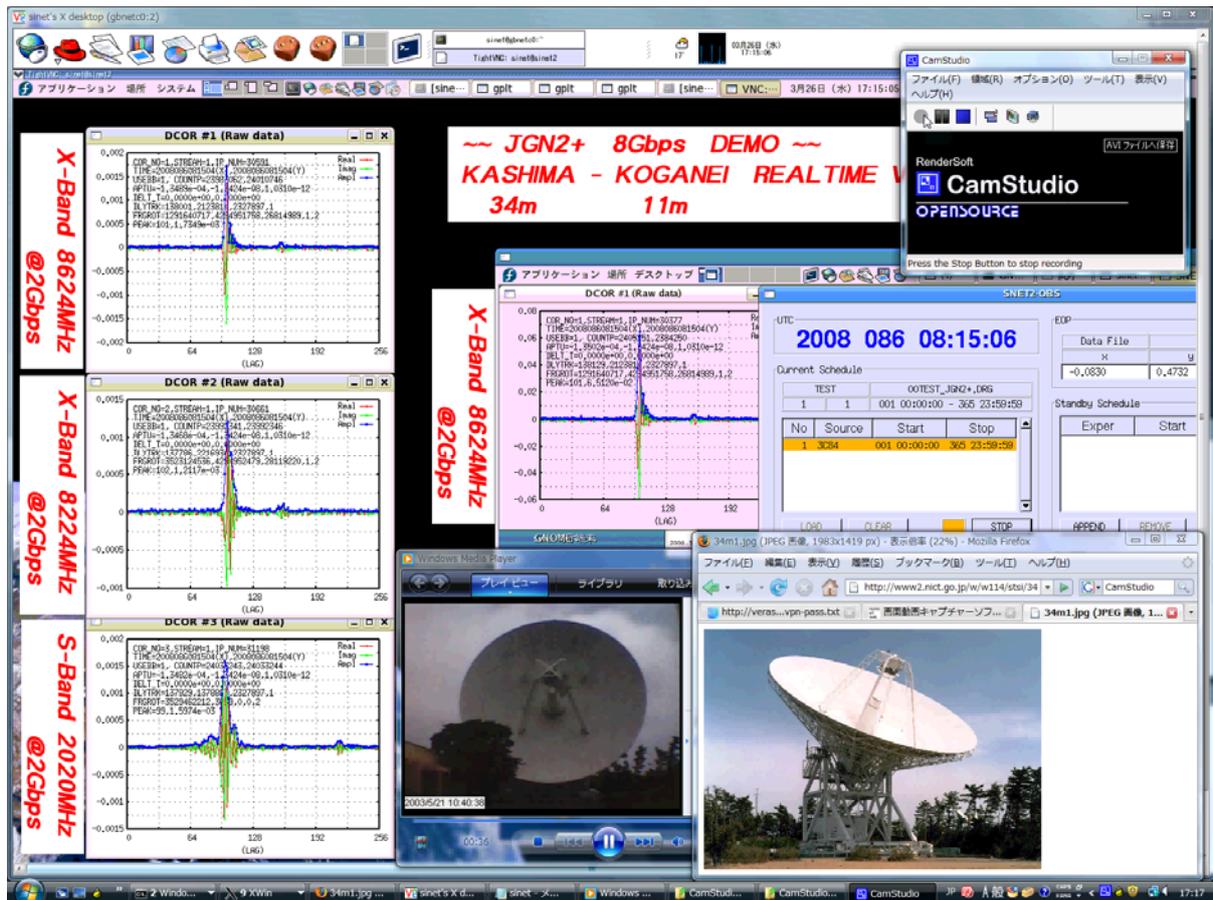


図 実時間観測のモニタ画面

2007 年度大学 VLBI 連携観測の実績

藤沢健太 (山口大学 理学部)

2008 年 6 月 1 日

2007 年度 (2007 年 4 月～2008 年 3 月) に実施された、大学 VLBI 連携観測 (光結合 VLBI 観測を含む) の一覧を表 1 に示す。

表 1. 2007 年度大学 VLBI 連携観測実績

date	time	time	freq	PI	code
4 月 29 日	7:00 -	14:00	7 8GHz	永井	U07119A
4 月 30 日	3:00 -	11:00	8 22GHz	元木	U07120A
4 月 30 日	17:00 -	25:00	8 22GHz	永山	U07120B
5 月 28 日	0:00 -	7:00	7 8GHz	須藤	U07148A
6 月 2 日	0:00 -	7:00	7 8GHz	小山	S07152A
6 月 2 日	23:00 -	30:00	7 8GHz	河野	S07153A
6 月 10 日	23:00 -	30:00	7 8GHz	川口	S07161a
7 月 28 日	23:00 -	30:00	7 6GHz	杉山	
7 月 29 日	18:00 -	24:00	6 6GHz	土居	
7 月 30 日	18:00 -	24:00	6 6GHz	望月	
7 月 31 日	23:00 -	30:00	7 6GHz	本間	
10 月 21 日	13:00 -	24:00	11 22GHz	元木	
12 月 2 日	14:00 -	21:00	7 8GHz	土居	S07336A
12 月 9 日	15:30 -	22:30	7 8GHz	藤澤	S07343A
12 月 20 日	23:30 -	30:30	7 8GHz	Sohn	U07354A
1 月 19 日	23:45 -	30:45	7 8GHz	永井	U08019A
1 月 27 日	11:00 -	18:00	7 8GHz	河野	S08027a
2 月 9 日	23:00 -	30:00	7 8GHz	川口	
2 月 17 日	7:45 -	14:15	6.5 8GHz	徂徠	U08047B
3 月 8 日	17:45 -	24:00	6 8GHz	廣田	S08074A
3 月 15 日	8:00 -	15:00	7 8GHz	梅本	S08076A

観測回数は、大学 VLBI 連携が 12 回、光結合 VLBI が 9 回、合計 21 回である。バンドごとの観測回数は、6.7GHz が 4 回 (これは連続して実施されている)、8GHz が 14 回、22GHz が 3 回である。観測の合計時間は 149.5 時間 (6.7GHz=26 時間、8GHz=96.5 時間 22GHz=27 時間) である。

JVN Reports (大学V L B I 連携研究成果報告書) 原稿募集のお知らせ

(1) JVN Reports とは

大学V L B I 連携観測事業の一環として、定期的に発行する研究成果報告書が JVN Reports です。内容は研究報告、実験のメモ、開発メモ、対外的・政治的な取り組み、各種情報などです。この報告書の目的は、連携事業の成果を公表・共有・保存すること、研究内容を文書にすることで研究を促進すること、連携事業の活力を維持・発展させること、将来の展開の素地となることです。発行は1年に4回、投稿資格者は大学V L B I 連携観測事業のメンバーです。査読は行いません。

(2) 原稿募集

JVN Reports は、連携の研究に参加する多くの方に寄稿されることで成立します。ぜひ、多くの方に原稿を書いていただきたいと思います。内容は、連携運用会議に出される資料の程度、またはそれ以上の内容であることとします。具体的な内容の例を挙げます。

- **研究報告** 連携の観測で行った研究に加え、他のアレイで行った研究も歓迎する。V L B I でなくても良い。観測提案にかかわる研究報告でも良い。論文のドラフトでも良い。
- **実験・開発メモ・各種情報** 連携に関連した各種実験や開発の報告、もっと小さなメモなどでも良い。
- **対外的・政治的な取り組み** V L B A問題など外部の情勢の報告、東アジア観測網の構築やV S O P - 2 対応などの取り組みに関する報告なども良い。

次回の原稿締め切りは2008年9月1日です

JVN Report 原稿のスタイル

- 入稿：印刷可能状態の原稿、ファイル形式は基本としてPDFとする。
- 原稿サイズ：A4、横書き。上下左右には20mm以上の余白を作る。
- フォント：以下は例。およそこのようなスタイルとなっていれば良いとする。
 - タイトル=ゴシック、12ポイント
 - 著者名、所属、本文=明朝系、10ポイント
 - 章の表題=ゴシック、10ポイント
 - 段組、図=特に指定しない。カラーでも良いが、印刷は白黒。
- 章立て：以下の規則とする。
 - 先頭にタイトル、次の行に著者と所属、次に日付。それに続けて本文。
 - 本文の章立ては原則として任意。アブストラクト、謝辞などはあってもなくてもよい。

藤沢健太、中川亜紀治 (編集担当)