

JVN/EAVN を用いた 6.7GHz メタノールメーザの VLBI モニタープロジェクト ～ G006.79–00.25 における内部固有運動の計測 ～

杉山 孝一郎¹、藤沢 健太¹、蜂須賀 一也²、米倉 覚則³、元木 業人¹、齋藤 貴文³、平野大樹¹、
本間 希樹⁴、廣田 朋也⁴、澤田-佐藤 聡子⁴、松本 尚子⁴、村田 泰宏⁵、土居 明広⁵、
小川 英夫⁶、新沼 浩太郎¹、Shen, Zhi-Qiang²、他、大学連携研究グループ

所属機関：1. 山口大学、2. 上海天文台、3. 茨城大学、4. 国立天文台、5. 宇宙研、6. 大阪府立大学

概要

我々は、2010年8月から Japanese VLBI Network (JVN)、および East Asian VLBI Network (EAVN) を用いた 6.7 GHz メタノールメーザの VLBI モニタープロジェクトを 36 天体に対して開始した。本プロジェクトは、大質量原始星周囲に存在し得る回転円盤からの降着現象の直接検出、および円盤自身の進化を調査および解明することを最終目的としている。今回は、36 天体の内、回転円盤の有力候補である、“楕円形状の空間分布”を示していた G006.79–00.25 に対する内部固有運動の計測結果を報告する。2010-2012 年に亘る 3 回の VLBI 観測の結果、本天体から膨張を伴う回転運動が検出された。この回転 + 膨張運動は、中心星からの輻射圧、もしくは磁気圧に伴う円盤風のどちらでも説明がつかうことが分かった。

1 研究背景

最近の分子輝線、および赤外線干渉計観測により、大質量星 ($\geq 8 M_{\odot}$) は小質量星と同様に、形成中に周囲にガス・ダストの回転円盤を有することが分かってきた^{1),2)}。そこで次なるステップとして、その回転および降着運動を直接的に検出することが必要と考えられる。その唯一の方法は、放射サイズが数天文単位 (AU) とコンパクトであり、原始星のごく近傍 (~ 10 -1000 AU) から検出されるメーザ源を、VLBI を用いてモニター観測することで、固有運動を検出することである。

そのためのプローブとして、我々は 6.7 GHz メタノールメーザに注目した。かねてより、その空間分布および視線速度に見られる速度勾配から、大質量原始星周囲に存在し得る回転円盤に付随している可能性が示唆されてきた³⁾⁻⁵⁾などが、最近 2 年間で、6.7 GHz メタノールメーザの内部固有運動が検出され始め、その運動は励起星を中心とした回転 (+ 膨張 or 降着) 運動を示していた^{6),7)}。しかし、そもそも 6.7 GHz メタノールメーザの内部固有運動が検出されているのはわずか数例のみである。

そこで我々は、独自に選出した 36 天体に対して、2010 年 8 月から JVN/EAVN を用いた 6.7 GHz メタノールメーザの VLBI モニタープロジェクトを開始した。本プロジェクトにより得られる 6.7 GHz メタノールメーザの空間分布と固有運動の系統的調査を通して、以下の事項の解明を目的としている；

1) 大質量原始星周囲の回転円盤からの降着現象の系統的な直接検出、2) ALMA, ATCA, VLA とのコラボレーションを通じた、大質量原始星の進化と回転円盤自身の進化の理解。今回は、3 エポックの VLBI データを用いた内部固有運動計測の初期成果として、回転円盤の有力候補である“楕円形状の空間分布”を示していた G006.79–00.25 に対する内部固有運動の計測結果を報告する。

2 本講演の目的

本講演で紹介する G006.79–00.25 は、3.8 kpc の距離に存在 (アンモニア輝線の視線速度 $+21 \text{ km s}^{-1}$ から導出された近運動学的距離) しており、近くの超新星残骸 W28 と相互作用している若い大質量星形成領域である⁸⁾。この天体に付随する 6.7 GHz メタノールメーザは、2010 年 8 月の VLBI 観測から、“楕円形状の空間分布”を示していることが分かり、我々の天体サンプルの中でも回転円盤の有力候補に挙げられている天体である (図 1, 中パネル参照)。しかし、De Buizer et al. (2012) は、アウトフローキャビティをトレースする近・中赤外線と、楕円形状を示すメタノールメーザ空間分布との比較を行い、楕円形状天体が必ずしも回転円盤付随を示唆しているわけではない、ということを示した⁹⁾。

そこで、本講演では以下の事項の解明を目的とする；1) G006.79–00.25 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザの発生場所を内部固有運動計測から理

解、2) 楕円形状天体は本当に回転円盤付随なのかどうかを内部固有運動計測で検証。

3 観測

VLBI 観測は、2010 年 08 月 29 日 (日立, 上海, VERA4 局), 2011 年 10 月 05 日 (山口, 日立, VERA4 局), 2012 年 09 月 23 日 (山口, 日立, 上海, VERA4 局) の 3 回 (756 日スパン) に亘って JVN/EAVN を用いて行った。観測した 16 MHz 帯域の内、G006.79–00.25 のメタノールメーザ輝線が含まれる 4 MHz ($\sim 180 \text{ km s}^{-1}$) を切り出し 1024 点分光しているため、チャンネル分解能は 0.18 km s^{-1} に相当する。1ch 当たりのイメージ感度 (1σ) は 1 時間積分でそれぞれ典型的に $30\text{--}60 \text{ mJy beam}^{-1}$ であった。また、生成された合成ビームサイズは典型的に $7.5 \times 3.5 \text{ mas}^2$ (ミリ秒角²) であり、その位置角は -3° であった。データ解析は NRAO の作成した AIPS を用いて行った。

4 結果: 内部固有運動

2010-2012 年の 3 回の VLBI 観測全てで空間分布を得ることができたため、3 エポック全てで検出できたメーザスポットのみを内部固有運動計測の対象とし、以下の条件を適用した; 1) スポットの視線速度がチャンネル分解能 0.18 km s^{-1} 以内で一致、2) 756 日間で空間位置が 4.3 mas 以内で一致 (視線速度範囲の 2 倍 (37.62 km s^{-1}) に相当)。なお、内部固有運動計測の際には視線速度 $V_{\text{lsr}} = 26.27 \text{ km s}^{-1}$ のピーク成分を基準スポットとしている。上記の条件を満たした 86 個のメーザスポットについて、赤経、赤緯方向の時間変動に対し直線フィットを行った結果、傾きがフィット誤差の 2 倍を超えた 65 個のスポットを、今回内部固有運動を検出出来たスポットとして扱うことにする (図 1, 下パネル参照)。

検出された固有運動の大きさは $0.1\text{--}1.4 \text{ mas yr}^{-1}$ であり、これは距離 3.8 kpc で接線速度 $1.8\text{--}24.9 \text{ km s}^{-1}$ に相当する。

5 考察

5.1 回転円盤モデル

今回検出された内部固有運動は、図 1(下) から、空間分布から予想される楕円上を反時計回りに沿うような方向への運動を示しており、少なくとも双極/球状な膨張では説明がつかないと考えられる。

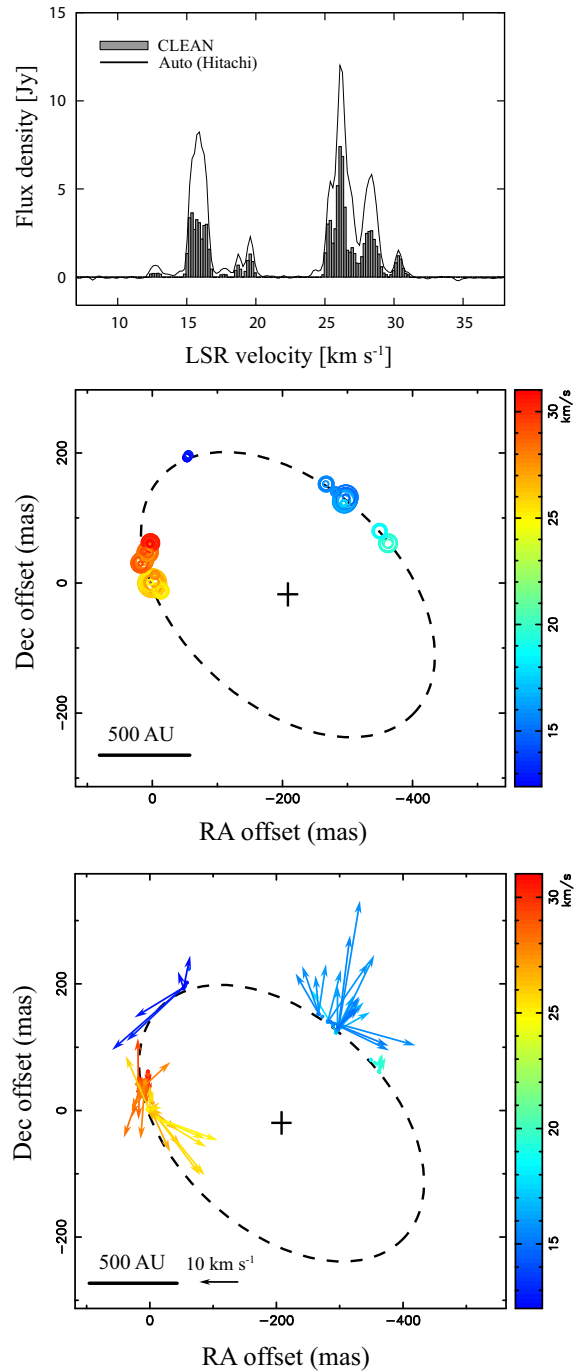


図 1: G006.79–00.25 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザ; (上) 2010 年 8 月の JVN/EAVN 観測で得られたスペクトル (実線: 日立局のトータルパワー; 網掛けボックス: 全 CLEAN 成分); (中) 2010 年 8 月の JVN/EAVN 観測で得られたスポット (丸印) の空間分布。丸印の大きさはフラックス密度に対数で比例し、色の違いは視線速度の違いに対応 (右のカラースケール参照)。点線の楕円はメタノールメーザの空間分布に対する最小二乗フィットの結果に相当し、十字印は楕円の中心に相当; (下) JVN/EAVN の 3 回の VLBI 観測間で検出された内部固有運動。矢印の長さは固有運動の速度の大きさに比例 (スケールは図の左下参照)。なお、表示しているベクトルは、基準スポットの固有運動を除去するために検出された 65 個の運動の平均値を差し引いたものである。

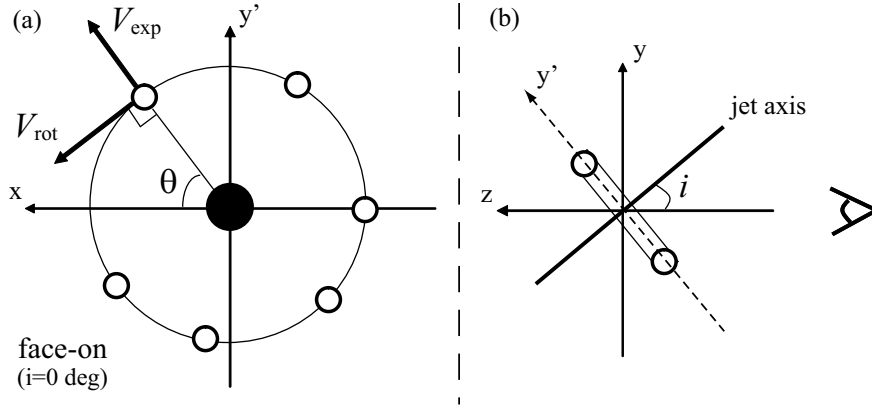


図 2: 膨張/降着成分を考慮した回転円盤モデル。(a) 真上 (傾斜角 $i = 0^\circ$) から見た場合のモデル。黒塗りの丸印は中心の励起星、白抜き丸印はメーザスポットに相当。(b) 傾斜角 i の定義。実線はアウトフロー/ジェット軸に相当し、右側が観測者の方向に相当。

そこで、今回図 2 に示すような、膨張/降着成分を考慮した回転円盤モデルの 3 次元速度への適用を試みた。その際に、回転速度 V_{rot} 、膨張速度 V_{exp} 、系統速度 V_{sys} を考慮した以下の式を用いた;

$$\begin{aligned} v_x &= V_{\text{rot}} \sin \theta + V_{\text{exp}} \cos \theta \\ v_y &= -(V_{\text{rot}} \cos \theta - V_{\text{exp}} \sin \theta) \cos i \\ v_z &= -(V_{\text{rot}} \cos \theta - V_{\text{exp}} \sin \theta) \sin i + V_{\text{sys}} \end{aligned}$$

ここで、 v_x 、 v_y は赤経、赤緯方向それぞれの接線速度、 v_z は視線速度、 θ は円盤上での方位角、 i は円盤の傾斜角である。なお、本モデルを適用するには、メーザスポットが同心円状に分布しており、平面上で運動していることを仮定している。上記の式を用いた最小二乗フィットの結果、 $V_{\text{rot}} = 2.3 \pm 2.3$ 、 $V_{\text{exp}} = 4.9 \pm 2.2$ 、 $V_{\text{sys}} = 21.9 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1}$ が得られた。これより、回転方向についてはフィットエラーが大きく判断が難しいが、少なくとも膨張していることが明らかとなった。

5.2 膨張の要因

メーザスポットの膨張運動を引き起こす要因として、以下の 2 説を考える; 1) 中心星の輻射圧、2) 磁気圧に伴う円盤風。まず、輻射圧説について、 $\dot{P}_{\text{exp}} = (4\pi \sin \theta_0) R^2 n_{\text{H}_2} m_{\text{H}_2} V_{\text{exp}}^2$ から予想される膨張の運動量流速 \dot{P}_{exp} は $1.3 \times 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ (個数密度 $n_{\text{H}_2} = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ を仮定) であった。一方で、近-遠赤外線データを用いた SED フィットから推定される中心星の光度 $L_* = 1.1 \times 10^4 L_\odot$ より導出される輻射圧の運動量流速は $1.8 \times 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ であったため、メーザスポットの膨張運動は輻射圧で十分説明可能である。次に、円盤風説について、膨張に伴うエネルギー密度 $u_k = (1/2)n_{\text{H}_2} m_{\text{H}_2} V_{\text{exp}}^2$ と磁気エネルギー密度 $u_m = B^2/(2\mu_0)$ (B : 磁場強度, μ_0 : 真空の透

磁率) との比較から、膨張速度 4.9 km s^{-1} を達成するためには磁場強度 $B \sim 10 \text{ mG}$ が必要であることが予想される。この値は、6.7 GHz メーザのゼーマン分裂観測により実測されている磁場強度の典型値 $\sim 15 \text{ mG}^{(10)}$ と factor で一致している。これより、メーザスポットの膨張運動は磁気圧に伴う円盤風でも十分説明可能であると言える。

6 まとめ・展望

2010 年 8 月の JVN/EAVN 観測で、既に“楕円形状の空間分布”を示していた G006.79–00.25 の 6.7 GHz メーザに対して、2012 年までの 756 日間で 3 回の VLBI 観測を行った。その結果、楕円上を反時計回りに沿うような方向への運動が検出され、膨張成分を伴う回転円盤モデルに良くフィットした。これより、楕円形状天体は、内部固有運動計測から円盤付随の傾向を示すことが伺えた。ただし、明確な結論を得るにはより多くの天体に対して、同様な運動計測を行う必要がある。上記の狙いも視野に入れ、引き続き JVN/EAVN 天体サンプルの残り 35 天体の内部固有運動検出を目指す。

< 参考文献 >

- 1) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 2) Kraus, S., et al. 2010, Nature, 466, 339
- 3) Minier, V., et al 2000, A&A, 362, 1093
- 4) Sugiyama, K., et al. 2008, PASJ, 60, 23
- 5) Bartkiewicz, A., et al. 2009, A&A, 502, 155
- 6) Sanna, A., et al. 2010a, A&A, 517, 71
- 7) Goddi, C., et al. 2011, A&A, L535, 8
- 8) Nicholas, B., et al. 2011, MNRAS, 411, 1367
- 9) De Buizer, J. M., et al. 2012, ApJ, 754, 149
- 10) Vlemmings, W. H. T., et al. 2011, A&A, 529, 95