

大質量星形成領域 Cepheus A における 6.7 GHz メタノールメーザーのインフォール内部固有運動検出

杉山 孝一郎 (山口大学 D3)、藤沢 健太、輪島 清昭、澤田-佐藤 聡子 (山口大学)
本間 希樹 (国立天文台)、村田 泰宏、望月 奈々子、土居 明広 (宇宙研)

概要

我々は大質量星形成領域 Cepheus A (Cep A) の 6.7 GHz メタノールメーザーを Japanese VLBI Network (JVN) を用いて 776 日のスパンに亘って 3 回 VLBI 観測することによって、その内部固有運動を検出することに成功した。Cep A の 6.7 GHz メタノールメーザースポットは 5 つのスポット群を形成しており、全体的には約 1400 天文単位 (AU) に広がる円弧状の空間分布を示していた。今回検出できた内部固有運動は、全体的な円弧状構造上に沿うような軌道を示しており、回転を示唆する結果に至った。視線速度情報も加えた 3 次元メーザースポット運動に対して、膨張/インフォールを伴う回転円盤モデルを用いて最小二乗フィッティングを行った結果、インフォール速度 $V_{\text{inf}} = 2.5 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1}$ 、回転速度 $V_{\text{rot}} = 1.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}$ 、系統速度 $V_{\text{sys}} = -4.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1}$ が得られた。これは、大質量原始星の周囲でインフォール運動を直接検出できた非常に稀なケースである。上記のインフォール速度を用いて算出されるインフォール運動量率と、Cep A からの光度を仮定した輻射圧との比較による質量降着の可能性も議論する。

1 研究背景

これまで大質量星 ($\geq 8 M_{\odot}$) の形成理論として、“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きた。しかし、最近の分子輝線の観測により、大質量原始星の周りにもインフォールを伴うガス回転円盤が存在することが間接的に示唆されてきた^{5),6)}。そこで次なるステップとして、その回転およびインフォール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ー源を、超長基線干渉計 (VLBI) を用いてモニタリング観測を行うことである。

6.7 GHz メタノールメーザー ($5_1 \rightarrow 6_0 A^+$ 三軸不等回転遷移) は、大質量星形成領域においてのみ検出されている唯一のメーザーである^{7),8)}。また、このメーザーの寿命の長さ (4 年以上安定⁹⁾、150 年程度¹⁰⁾、発生時期 (Ultra-compact (UC) HII 領域が形成されるよりも前の段階; $\sim 10^4 \text{ yr}$)^{11),12)} も考慮すると、このメーザー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ると言える。

このメーザーの空間的形態・発生場所に関しては、様々な解釈 (ショック領域、リング構造、インフォール、回転トロイド) が得られてきたが、中でも $\sim 40\%$ 程度の天体で直線空間構造および直線速度勾配が観測されており、edge-on ケプラー回転円盤

に付随していることが広く考えられてきた^{e.g.,13)}。さらに、最近の EVN (European VLBI Network) でのメタノールメーザー VLBI マッピングサーベイ観測によって、単純な回転ではなく、膨張もしくはインフォールを伴っている可能性が示唆された¹⁴⁾。

以上の理由により、6.7 GHz メタノールメーザーを VLBI を用いて複数回観測することが、大質量星周囲に存在し得るガス円盤の回転・降着運動を検出する上での最良法であると考えられる。

1.1 観測天体：Cepheus A-HW2

今回、インフォールを伴う回転内部固有運動の検出を目指す観測天体として、大質量星形成領域 Cepheus A-HW2 (Cep A-HW2) を選出した。Cep A は、 $0.70 \pm 0.04 \text{ kpc}$ の距離¹⁵⁾ に存在しており、複数の星形成場が存在する活発な大質量星形成領域である。中でもメタノールメーザーが付随している HW2 天体には、 CH_3CN 、 NH_3 、 SO_2 輝線の干渉計観測により、ガス回転円盤が存在することが示唆されている^{16),17),18)}。さらに、 HCO^+ 輝線の単一鏡観測により、この領域にインフォールを伴うガスが存在していることも示唆されてきた^{5),6)}。

この天体のメタノールメーザーは、 $\sim 1400 \text{ AU}$ の範囲に広がって 5 つのスポット群を形成しており、全体的に円弧状に分布している¹⁹⁾。その円弧状構造は、上記の分子輝線が示す回転円盤に重なるように分布していた²⁰⁾ (図 1 参照)。さらに、¹⁴⁾ のモデル

を適用することで、Cep A–HW2 のメタノールメーザーはインフォール ($V_{\text{inf}} \sim 0.4 \text{ km s}^{-1}$) を伴う回転円盤に付随している可能性が示唆されてきた²¹⁾。従って、この Cep A–HW2 のメタノールメーザーの内部固有運動を計測することで、回転およびインフォール運動を検出できる可能性が考えられる。

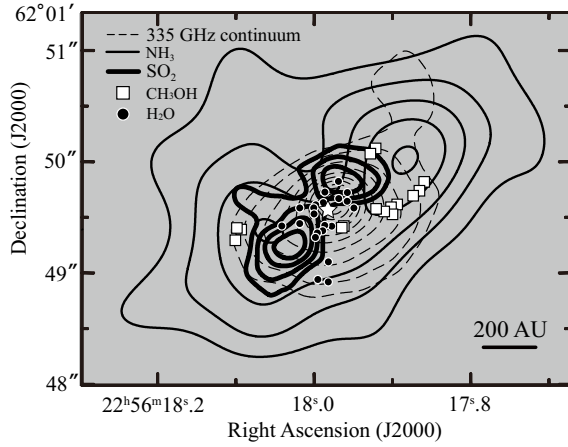


図 1: Cep A–HW2 のメタノールメーザーと分子輝線との重ね合わせ²⁰⁾。星印は 43 GHz 連続波による励起星の位置に相当。

2 観測

VLBI 観測は、2006 年 9 月 9 日 (山口, 白田, 水沢, 石垣), 2007 年 7 月 28 日 (山口, VERA4 局), 2008 年 10 月 25 日 (山口, VERA4 局) の 3 回に亘って Japanese VLBI Network (JVN) を用いて行った。観測した 16 MHz 帯域の内、Cep A が観測されている 6668–6670 (or 6666–6670) MHz の 2 (or 4) MHz を切り出し 512 点 (or 1024 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それぞれ 2.8, 2.1, 1.6 時間であり、1ch 当たりのイメージ感度 (1σ) は $\sim 100 \text{ mJy beam}^{-1}$ 程度であった。また、生成された合成ビームサイズは $\sim 9 \times 4 \text{ mas}^2$ (平方ミリ秒角) であり、その位置角は -70° 程度であった。データ解析は NRAO の作成した AIPS を用いて行った。

3 結果

各エポックで、それぞれ 100, 97, 71 個のメーザースポットを検出した。検出した各スポットのピーク強度は全て検出感度 5σ 以上の値を示し、周波数 2 ch 以上で検出されている。

本観測では、1) 速度分解能 0.176 km s^{-1} 以内で一致、2) 相対位置精度 σ の 3 倍以上の動き、3) 視線速度範囲の 2 倍 $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ 以上の動きを示し

たスポットは除外、の三条件を満たしたものを同スポットおよびその間での内部固有運動とした。ここで相対位置精度については、2 次元ガウシアンフィッティングの際の S/N 比およびスポット構造に起因するものと、クロックパラメータ較正の際のキャリブレーションとの離角に起因するものを考慮している。

その結果、3 エポック間、および 2 エポック間で内部固有運動は 42 個のスポットで検出された。その運動のプロットを図 2 に示す。なおプロットしている運動は、上記の条件により検出された 42 個の運動の平均値 (RA: 1.13 mas, Dec: -0.11 mas) を RA, Dec 方向共に引いた後の運動を表している。その運動は、大まかには空間分布に対して最小二乗フィッティングされた円弧状構造上に沿うような軌道を示していた。

4 考察

4.1 回転 & インフォールモデル

上記の結果で示したように、本 VLBI モニタリング観測によって楕円に沿うような内部固有運動が検出された。そこで、以下の式 (1)–(3) で示される膨張/インフォールを伴う回転モデルでの最小二乗フィッティングを行った。

$$v_x = V_{\text{exp}} \sin \theta + V_{\text{rot}} \cos \theta \quad (1)$$

$$v_y = (V_{\text{exp}} \cos \theta - V_{\text{rot}} \sin \theta) \cos i \quad (2)$$

$$v_z = (V_{\text{rot}} \sin \theta - V_{\text{exp}} \cos \theta) \sin i + V_{\text{sys}} \quad (3)$$

ここで、 v_x, v_y : RA, Dec 方向それぞれの固有運動の大きさ、 v_z : 視線速度、 θ : 円盤上での方位角、 i : 楕円の傾斜角である。フィッティングの際には、メタノールメーザー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。その結果、膨張速度 $V_{\text{exp}} = -2.5 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1}$ 、回転速度 $V_{\text{rot}} = 1.0 \pm 1.0 \text{ km s}^{-1}$ 、系統速度 $V_{\text{sys}} = -4.8 \pm 0.8 \text{ km s}^{-1}$ が得られた。ここで、膨張速度が負の値を示しているため、これはインフォール現象として扱うことができる (即ち $V_{\text{inf}} = 2.5 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1}$)。

このインフォール速度から $M = (rv_{\text{inf}}^2)/(2G)$ で求まる中心質量 M は $3 M_{\odot}$ 程度であり、大質量星の質量 ($\geq 8 M_{\odot}$) に満たなかった (ここで、 r : 円盤半径、 G : 万有引力定数)。この要因としては、中心に存在する励起星からの輻射圧によって、インフォール速度が実際の値よりも低く見積もられている可能性が考えられる。

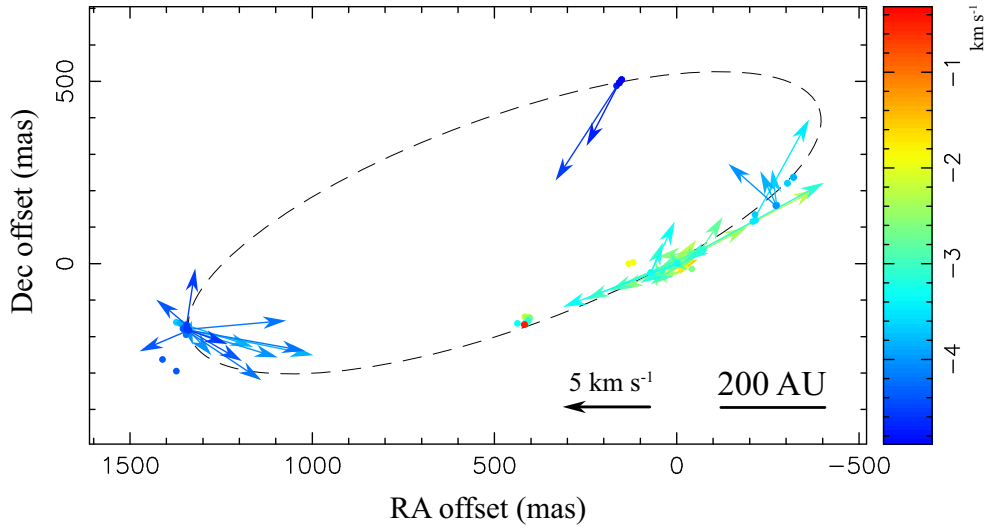


図 2: Cep A-HW2 における 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動。色は視線速度、矢印は内部固有運動の向きと大きさを表している。点線楕円は空間分布のみに対して最小二乗フィッティングして得られたもの。

4.2 輻射圧 vs インフォール運動量率

ここでは、Cep A-HW2 からの輻射圧と、メタノールメーザーのインフォール速度から求まるインフォール運動量率とを比較することによって、円盤から中心へ質量降着できるかどうかを議論する。

まず Cep A-HW2 からの光度 L_* を、赤外線データから見積もられている光度 $2.5 \times 10^4 L_\odot$ (22) の半分であると仮定して輻射圧を算出する。輻射圧は $(L_*\tau)/(4\pi c)$ から $2.1 \times 10^{-4} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ と算出される (光学的厚み $\tau = 10$ を仮定)。

一方、インフォール運動量率は $2\pi R^2 \rho v_{\text{inf}}^2$ から算出できるが、水素分子質量密度 ρ 、即ち数密度 n_{H_2} の決定が困難であるため、ここでは“輻射圧を押し返して質量降着できる”場合を考える。インフォール速度 $V_{\text{inf}} = 2.5 \text{ km s}^{-1}$ 、円盤半径 $R = 670 \text{ AU}$ を適用すると、 $10^{-3} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ を達成するためには、 $n_{\text{H}_2} \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ が必要であることがわかる。この値は、理論的に考えられている 6.7 GHz メタノールメーザーの励起に適する数密度範囲 (23) に矛盾しない。しかし、この領域の CO 分子輝線のフラックス密度 (24) を用い conversion factor を考慮して算出される n_{H_2} は 10^6 cm^{-3} 程度である (ただし、CO のフラックス密度は単一鏡観測で得られた値)。この時インフォール運動量率は $4.2 \times 10^{-5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$ となり、中心星からの輻射圧を押し返して質量降着はできない、という結果になる。

今回計測されたインフォール速度では、数密度 n_{H_2} を正確に決定しない限り、輻射圧との関係までは正確にはわからない、という見解に至った。

5 まとめ・今後の展望

我々は大質量星形成領域 Cep A-HW2 において 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動を JVN を用いた 3 エポック間で検出することに成功した。今回の観測で検出された内部固有運動は、全体的な空間分布が示す円弧状構造上に沿うような軌道を示していた。その運動を、膨張/インフォールを伴う回転モデルで最小二乗フィッティングを行った結果、インフォールを伴う回転円盤に付随している可能性を見出すことができた。しかし、輻射圧との関係を議論する上では、インフォール運動量率が n_{H_2} の値に強く依存しているため、今後は CO 分子輝線を 1 秒角以内の空間分解能を達成できる SMA, CARMA, PdBI で干渉計観測し、メタノールメーザーが存在している空間範囲での n_{H_2} を精度良く決定することが必要である。

< 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) Klaassen, P. D., & Wilson, C. D. 2007, ApJ, 663, 1092
- 6) Sun, Y., & Gao, Y. 2009, MNRAS, 392, 170
- 7) Minier, V., et al. 2003, A&A, 403, 1095
- 8) Xu, Y., et al. 2008, A&A, 485, 729
- 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) Minier, V., et al. 2000, A&A, 362, 1093
- 14) Bartkiewicz, A., et al. 2009, A&A, 502, 155
- 15) Moscadelli, L., et al. 2009, ApJ, 693, 406
- 16) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 17) Jiménez-Serra, I., et al. 2007, 661, L187
- 18) Torrelles, J. M., et al. 2007, ApJ, 666, L37
- 19) Sugiyama, K., et al. 2008, PASJ, 60, 1001
- 20) Sugiyama, K., et al. 2008, 9th EVN Symp., p.99
- 21) Sugiyama, K., et al. 2009, 7th VERA UM.
- 22) Evans, N. J., II, et al. 1981, ApJ, 244, 115
- 23) Cragg, D. M., et al. 2005, MNRAS, 360, 533
- 24) Rodríguez, L. F., et al. 1980, ApJ, 240, L149