

大質量星形成領域 G028.83-00.25 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動

林 京之介¹、藤澤 健太¹、杉山 孝一郎²、元木 業人³、蜂須賀 一也¹、

米倉 覚則²、澤田-佐藤 聡子²、松本 尚子^{1,3}

所属機関 1: 山口大学 2: 茨城大学 3: 国立天文台

概要

我々は 2010 年から 2013 年にかけて東アジア VLBI 観測網 (EAVN) を用いたモニター観測プロジェクトを実施した。現在は観測した 36 天体の空間分布を楕円・直線・円弧・ペア・複雑の 5 形状に分類し、内部固有運動の調査を行っている。上記の分類の中で円弧形状に分類される天体は内部固有運動の検出例がなく、円弧形状の分布が示す付随領域は明らかになっていない。本集録では 6.7 GHz メタノールメーザーのスポットが円弧を描いて分布している天体 G028.83-00.25 の内部固有運動の計測結果を報告する。この天体に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動はほぼ Edge-on で見た星周円盤の回転運動と思われる結果が得られた。この天体のメーザースポットは円盤の異なる半径に付随しており、メーザーの 3 次元運動から見積もった中心星の質量は $19 M_{\odot}$ であった。

1 研究背景と研究目的

太陽の 8 倍以上の質量を持つ大質量星は周囲に濃い星間物質が存在するなどの理由からその形成過程は謎に包まれている。近年の電波・赤外波長帯の観測技術の発展に伴い大質量星にも小質量星と同様に星周円盤やアウトフローが付随していることが明らかになってきた^{[1][2]}。しかし、星周円盤からのガスの降着のプロセスやアウトフローなどの質量放出機構は未解明であり、これらの現象を理解するためには大質量原始星周囲のガスの 3 次元運動 (視線速度+固有運動) を直接測定する必要がある。

大質量原始星周囲のガスの 3 次元運動を直接検出する良いツールとして 6.7 GHz メタノールメーザーがある。このメーザーは大質量星形成領域のみに付随し、原始星周囲の回転円盤または円盤から放出されるアウトフローに付随していることが示唆されている。このメーザーの放射は高輝度で、その放射サイズは非常にコンパクトであるため、VLBI モニター観測をすることで内部固有運動を検出が可能である。実際にこのメーザの内部固有運動には円盤の回転運動^[3]やアウトフローのような膨張運動^[4]が捉えられている。しかし、これまでに報告されている 6.7 GHz メタノールメーザの内部固有運動の検出例は 11 天体しか報告されていないため、このメーザの付随領域や運動起源に関しては理解が進んでいない。上記のような 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動の系統的な調査を行うため、我々は 2010 年から 2013 年にかけて東アジア VLBI ネットワーク (EAVN) を用いた 6.7 GHz メタノールメーザーの VLBI モニター観測プロジェクトを実施した^[5]。現在は観測した 36 天体の空間分布を楕円・直線・円弧・ペア・複雑の 5 形状に分類し、内部固有

運動の調査を行っている^{[5][6]}。

これまでに 6.7 GHz メタノールメーザーのスポットが円弧形状を描いて分布している天体の空間分布が複数報告されている^[7]。しかし、円弧形状に分類されている天体の内部固有運動の検出例はなく、形状が示す付随領域は明らかになっていない。本研究では EAVN 観測プロジェクトでメーザーが円弧形状の分布を示していた天体 G028.83-00.25 の内部固有運動を検出し、6.7 GHz メタノールメーザーの付随領域と運動起源の解明を目的としている。

2 観測天体 G028.83-00.25

本観測天体 G028.83-00.25 は 4.6 kpc の距離に存在する大質量星形成領域であり、この系の系統速度は H^{13}CO^+ の観測から $87.06 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ という結果が報告されている^{[8][9]}。この天体には若い大質量原始星からのアウトフローによるショック領域の指標である EGO と呼ばれる $4.5 \mu\text{m}$ の広がった放射が付随しており、EGO 先端には同じくアウトフロートレーサーである 44 GHz メタノールメーザーが付随している^[10]。6.7 GHz メタノールメーザーは原始星トレーサーである $24 \mu\text{m}$ の放射のピークに位置し、J-VLA で得られた空間分布は南東-北西方向に約 3000 AU のスケールでスポットが円弧を描いて分布している^[10]。また、6.7 GHz メタノールメーザーのスペクトルはアウトフロートレーサーである HCO^+ 、 H^{13}CO^+ 、44 GHz メタノールメーザーのスペクトルの両脇にピークがあることから、この天体のアウトフローは天球面上に張り付いており、6.7 GHz メタノールメーザーは直径 3000 AU 以上の星周円盤に付随していることが示唆されている^[10]。

3 観測・データ解析

VLBI 観測は 2010 年 8 月 29 日 (水沢、入来、小笠原、石垣、日立、上海)、2011 年 10 月 5 日 (水沢、入来、小笠原、石垣、日立、山口)、2012 年 9 月 20 日 (水沢、入来、小笠原、石垣、日立、山口、上海)、2013 年 10 月 29 日 (水沢、入来、小笠原、石垣、日立、山口、蔚山) の 4 回に亘って行われた。データ記録は VSOP ターミナルの DIR1000 系記録を用いた。1ch 当たりの速度分解能は観測帯域 16 MHz からメーザーが含まれる 4 MHz 帯域を切り出し、1024 点分光しているため $0.178 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ である。イメージ感度は 1 時間積分で第 1 エポックが $65.4 \text{ mJy} \cdot \text{beam}^{-1}$ 、第 2 エポックが $71.3 \text{ mJy} \cdot \text{beam}^{-1}$ 、第 3 エポックが $44.6 \text{ mJy} \cdot \text{beam}^{-1}$ 、第 4 エポックが $79.4 \text{ mJy} \cdot \text{beam}^{-1}$ であった。

4 結果

2012 年 9 月の観測で得られたスポットの空間分布と内部固有運動を図 4.1 に示す。今回は 2010 年から 2013 年までの 4 エポック間とスポット数が多い 2011 年から 2013 年の 3 エポック間で内部固有運動の検出を行った。内部固有運動の検出は位置と視線速度が連続して分布している 3 つ以上のスポットで形成されるフィーチャーを対象に行った。4 エポック間に共通して現れていたフィーチャーは 8 個で 3 エポック間に共通して現れていたフィーチャーは 9 個であった。

検出された内部固有運動の大きさは 4 エポック間で $0.7 \sim 6.9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 、3 エポック間で $1.3 \sim 7.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。検出した内部固有運動はどちらも内部固有運動を求める際に不動点として仮定したメーザーフィーチャーの幾何中心付近を回転するような運動が検出された。

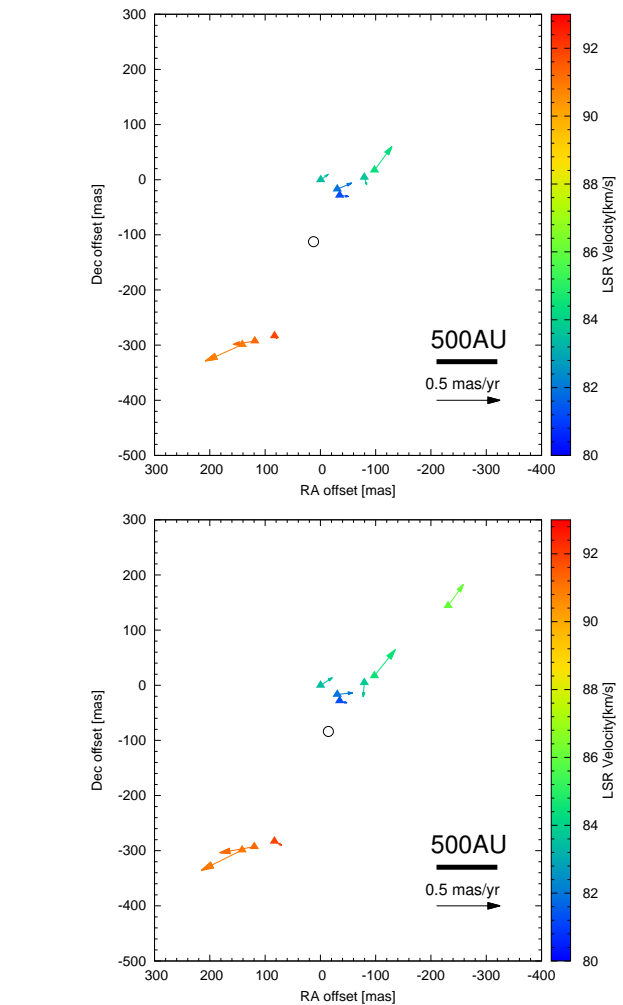
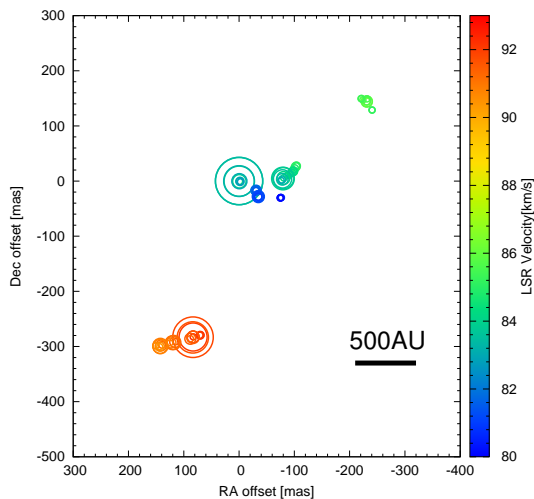


図 4.1: (左): 2012 年 9 月の観測で得られた G028.83-00.25 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布。図中のリングの中心がスポットの位置を示している。リングの大きさは放射強度に比例し、色は右のカラーバーに従う視線速度を表している。(上): 4 回の VLBI 観測によって検出された内部固有運動。(下): 3 回の VLBI 観測によって検出された内部固有運動。ベクトルは内部固有運動の大きさと向きを示している。白丸は共通フィーチャーの幾何中心座標の位置である。

5 考察

5.1 位置-速度図

今回観測された内部固有運動は赤方偏移成分が南東方向に、青方偏移成分が北西方向にメーザーの分布の方向に沿った運動を示した。この天体の 3 次元運動を定量的に理解するために視線速度または内部固有運動に対する位置-速度図を作成する。位置-速度図の横軸は 2012 年 9 月のフィーチャーの座標を 1 次関数の最小二乗法によって近似し、フィーチャーの近似直線上での位置のズレをとったものである。

この天体の視線速度の位置-速度図の分布は赤方偏移成分と青方偏移成分が $R' = 300 \text{ AU}$ 付近で無限大に発散するような双極的な分布が得られた。これは円盤がケプラー回転している場合、この天体に付随している 6.7 GHz メタノールメーザーが異なる半径に付随していることを示唆している。

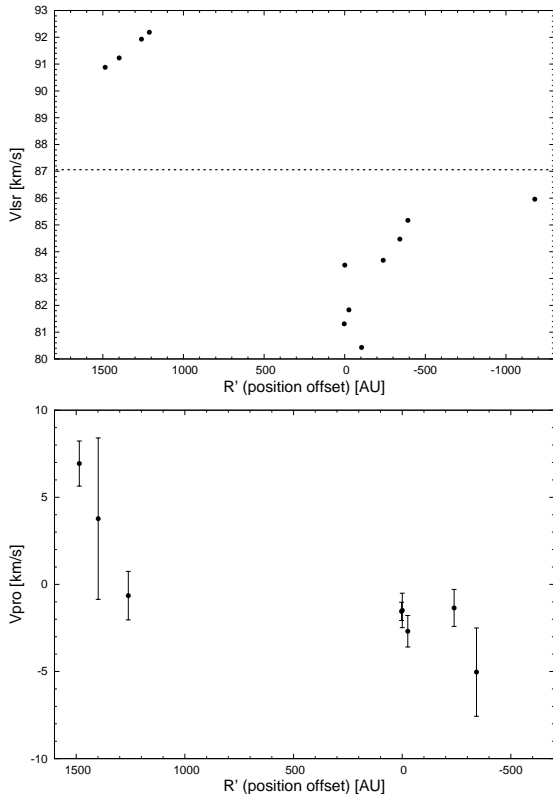


図 5.1: (上): 2012 年 9 月の観測で得られたフィーチャーの視線速度の位置-速度図。破線は系統速度 $V_{\text{sys}} = 87.06 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ を示している [8]。 (下): 4 エポック間の内部固有運動の位置-速度図。

5.2 中心星の位置の推定

質量 M の中心星に付随する円盤が視線方向に i° の傾き ($i = 0^\circ$ の時 Edge-on) を持っており、ケプラー回転をしていると仮定する。6.7 GHz メタノールメーザーは中心星から半径 R の位置に付随し、回転速度 $V_{\text{rot}} = GM/R$ で円盤上を回転している場合、観測によって得られる内部固有運動と視線速度は以下の式で表される。

$$V_{\text{pro-RA}} = -\sqrt{\frac{GM}{R}} \sin \theta \quad (5.1)$$

$$V_{\text{pro-Dec}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} \cos \theta \sin i \quad (5.2)$$

$$V_{\text{LSR}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} \cos \theta \cos i + V_{\text{sys}} \quad (5.3)$$

式 5.3 の $V_{\text{pro-RA}}$ と $V_{\text{pro-Dec}}$ は観測された内部固有運動の赤経成分と赤緯成分、 θ はメーザーフィーチャーの円盤上での方位角、 G は万有引力定数、 V_{sys} は系統速度である。また、推定には 4 エポック間の共通フィーチャーを用いて行った。

式 5.3 の内部固有運動の赤緯成分と視線速度を用いて円盤の傾斜角をフィッティングによって求めた結果、円盤の傾斜角は $i = -11 \pm 8^\circ$ となった。これは、6.7 GHz メタノールメーザーの分布がほぼ Edge-on の円盤を見ているということになる。したがって、このメーザーフィーチャーの円盤上での方位角 θ を

測定することは困難であるため、式 5.3 のメーザーの内部固有運動 $V_{\text{pro}} = \sqrt{V_{\text{pro-RA}}^2 + V_{\text{pro-Dec}}^2}$ とメーザーの視線速度 $V_{\text{lsr}} = V_{\text{LSR}} - V_{\text{sys}}$ を 2 乗し、和を取ることによって $V_{\text{lsr}}^2 + V_{\text{pro}}^2 = GM/R$ の形に変形した。図 5.1 に用いている近似直線上で $V_{\text{lsr}}^2 + V_{\text{pro}}^2$ が無限大に発散する位置を求めたところ、 $R' = 320 \pm 90 \text{ AU}$ であった。したがって、図 5.1 の $R' = 320 \text{ AU}$ の付近に中心星があると考えられる。

5.3 中心星の質量の推定

空間分布上での中心星の位置が得られたので、各メーザーフィーチャーの半径 R を求めることができた。次に各メーザーフィーチャーの視線速度と内部固有運動の 2 乗の和と半径を用いて中心星の質量の導出を行った。フィッティングによって得られた中心星の質量は $19 \pm 2 M_\odot$ であった。

先行研究でこの天体の中心星の質量は Spitzer の銀河面サーベイ GLIMPSE のデータと観測装置 MIPS の $24 \mu\text{m}$ のデータを用いた SED Fitting によって $10.5 M_\odot$ と推定されている [11]。これは本研究の 6.7 GHz メタノールメーザーの 3 次元運動から推定された質量の約半分である。この差は図 5.1 の内部固有運動の不定性が大きいこと、固有運動解析の際にメーザーフィーチャーの分布形状によって発生する系統的誤差によるものだと考えられる。

6 今後の展望

今後の展望としては降着/膨張成分を伴う回転円盤モデルをこの天体に適用し、降着現象の有無を調査する。

参考文献

- [1] Sánchez-Monge, Á., Cesaroni, R., Beltrán, M. T., et al. 2013b, A&A, 552, L10
- [2] Kraus, S., Hofmann, K. H., Menten, K. M., et al. 2010, Nature, 466, 339
- [3] Sanna, A., Moscadelli, L., Cesaroni, R., et al. 2010a, A&A, 517A, 71S
- [4] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., et al. 2011, PASJ, 63, 53
- [5] Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., et al. 2014, PASJ, 66, 31
- [6] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Hachisuka, K., et al. 2015, PASJ, accepted
- [7] Bartkiewicz, A., Szymczak, M., van Langevelde, H. J., et al. 2009, A&A, 502, 155
- [8] Green, J. A., & McClure-Griffiths, N. M. 2011, MNRAS, 417, 2500
- [9] Purcell, C. R., Balasubramanyam, R., Burton, M. G. et al. 2006, MNRAS, 367, 553
- [10] Cyganowski, C. J., Brogan, C. L., Hunter, T. R., & Churchwell, E. 2009, ApJ, 702, 1615
- [11] Watson, C., Povich, M. S., Churchwell, E. B., et al. 2008, ApJ, 681, 1341