

星形成領域 Mon R2 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動

杉山 孝一郎、藤沢 健太、志野 渚 (山口大学)、土居 明広 (宇宙研)

概要

我々は Japanese VLBI Network (JVN) を用いて、大質量星形成領域 Monoceros R2 (Mon R2) に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動の検出に成功した。そもそも、Mon R2 のメタノールメーザーからは、視線速度のドリフト運動が検出されており、それぞれのスペクトル成分が空間分布上で何らかの加速機構を有していることが示唆されていた。今回検出された内部固有運動は、視線速度ドリフトを示しているメーザースポットが、リファレンスとしたスポットから北東方向へ遠ざかる運動を示していた。北東方向には、近赤外線観測の輝度ピークから示唆されている原始星が存在しているため、今回検出されたメーザースポットの北東方向への固有運動は、星周円盤から原始星へ落ち込むガスの降着現象をトレースしている可能性が考えられる。この降着現象が、メタノールメーザーの視線速度上に観測されたドリフトを引き起こす加速機構の一つである可能性が考えられる。

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)–3)}。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、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は、大質量星形成領域においてのみ検出され^{4),5)}、原始星段階に安定して存在していることが知られている^{6)–9)}。それ故、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ってくると言える。

2 観測天体: Monoceros R2

大質量星形成領域 Monoceros R2 (Mon R2) は、太陽系から 0.83 kpc 離れた距離に存在しており、太陽系から 3 番目に近い大質量星形成領域として良く知られている。この領域からは、多数の星雲や IRAS 点源が見つかっており、中でも Mon R2 分子雲からは少なくとも 9 つの近赤外線源 IRS1-9 が検出されている (Carpenter & Hodapp 2008 参照¹⁰⁾)。その中でも一番明るい IRS3 からは、水、メタノール分子を始めとした様々なメーザー放射が検出されている。我々は、その中でも 6.7 GHz メタノールメーザー放射に注目しており、過去の観測か

ら Mon R2 の 6.7 GHz メタノールメーザーは、近くの UC HII 領域から ~ 0.1 pc 程度分離しており、近赤外線源の輝度ピークに近い場所に位置している¹¹⁾。赤外線から予想される光度と中心質量は、それぞれ $\sim 1.4 \times 10^4 L_{\odot}$, $\sim 15 M_{\odot}$ である。これらのことから、Mon R2 IRS3 に付随している 6.7 GHz メタノールメーザーは、非常に若い進化段階にある大質量原始星から出現している、であろうことが予想される。

IRS3 における近赤外線の偏光観測から、北西-南東方向に伸びた星周円盤の存在が示唆されてきた¹²⁾。その後の speckle 赤外干渉計を用いた高空間分解能な観測により、この領域が 3 つの原始星に切り分けることができ、それぞれ北東-南西方向へ噴出するジェット/アウトフローを有することが分かってきた¹³⁾ が、どの原始星が星周円盤を形成する中心星であるかを判断出来るほどの絶対位置精度は有していない。

2.1 メタノールメーザー in Mon R2

Mon R2 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーに特徴的なのは、1999 年から継続した単一鏡モニター観測によって検出された、視線速度のドリフト現象である (図 1)。 $V_{\text{lsr}} = 10.8 \text{ km s}^{-1}$ の成分に対して、 $V_{\text{lsr}} = 12.7, 13.2 \text{ km s}^{-1}$ の 2 成分は、それぞれ $0.08, 0.05 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で赤方偏移方向へ加速している様子が観測された。同様の傾向は、3ヶ月の密なモニター観測においても検出された¹⁴⁾。

今回は、この Mon R2 に付随する 6.7 GHz メタ

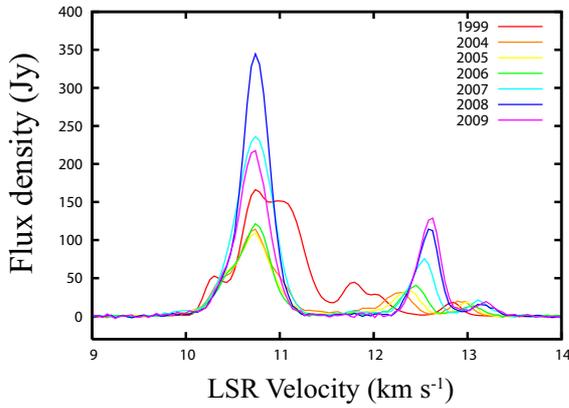


図 1: 1999 年の Torun 32-m の結果を加えた、2004-2009 年までの山口 32-m モニター結果。

ノールメーザーの視線速度ドリフトを引き起こす加速機構の解明を目指して、複数回の VLBI 観測による内部固有運動の計測を行った。

3 観測

VLBI 観測は、2008 年 10 月 28 日 (山口, VERA4 局), 2009 年 5 月 20 日 (山口, 臼田, VERA4 局), 2010 年 8 月 29 日 (日立, VERA4 局) の 3 回に亘って JVN を用いて行った。観測した 16 MHz 帯域の内、Mon R2 が観測されている 4 MHz を切り出し 1024 点分光しているため、速度分解能は 0.18 km s^{-1} に相当する。1ch 当たりのイメージ感度 (1σ) はそれぞれ典型的に $100 \text{ mJy beam}^{-1}$ であった。また、生成された合成ビームサイズは典型的に $6 \times 3 \text{ mas}^2$ であり、その位置角は -34° 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・考察

4.1 EVN の結果との比較

今回の 1epoch 目で得られた Mon R2 のメタノールメーザースポットの空間分布と、1998 年の EVN (European VLBI Network) を用いた観測で得られた空間分布¹⁵⁾ とを比較し、検出された内部固有運動を図 2 (中) に示す。内部固有運動計測の際のリファレンススポットとしては、視線速度ドリフト計測の際にもリファレンスとして用いた $V_{\text{lsr}} = 10.8 \text{ km s}^{-1}$ のピークスポットを用いた (図 2 中の原点)。その結果、 $0.08 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ の視線速度ドリフトを示していた $V_{\text{lsr}} = 12.7 \text{ km s}^{-1}$ の成分 (緑色) の北東方向への内部固有運動の検出に成功した。その大きさは、 $\sim 2.5 \text{ mas yr}^{-1}$ であり、これは $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ の速度に相当する。

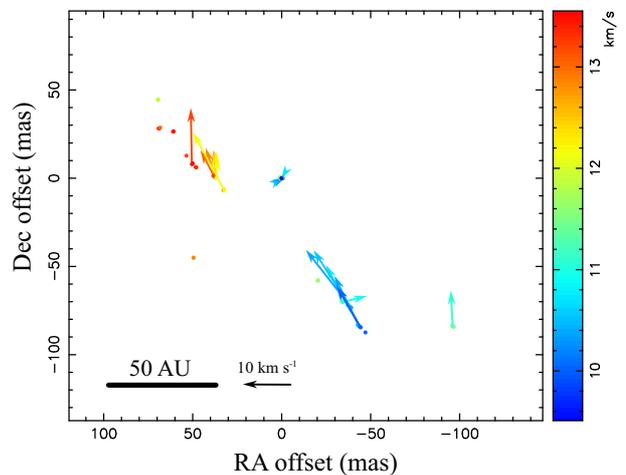
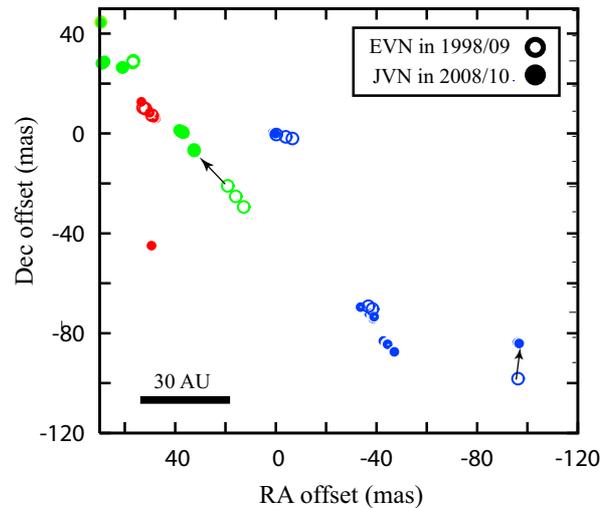
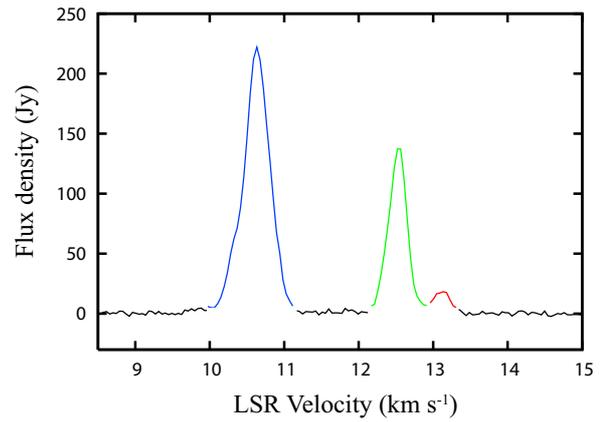


図 2: (上) 2009 年に得られた Mon R2 メタノールメーザースペクトル。(中) JVN の 1epoch 目の観測結果 (●) と、10 年前の EVN の観測結果 (○) との空間分布比較。色の違いは“上”のスペクトル図と対応して視線速度の違いを表しており、矢印は 10 年間で検出された内部固有運動を示している。(下) JVN の 3 回の VLBI 観測間で検出された内部固有運動。矢印の長さは固有運動の速度の大きさに比例 (スケールは図の左下参照) しており、色は視線速度に相当 (右のカラーバー参照)。

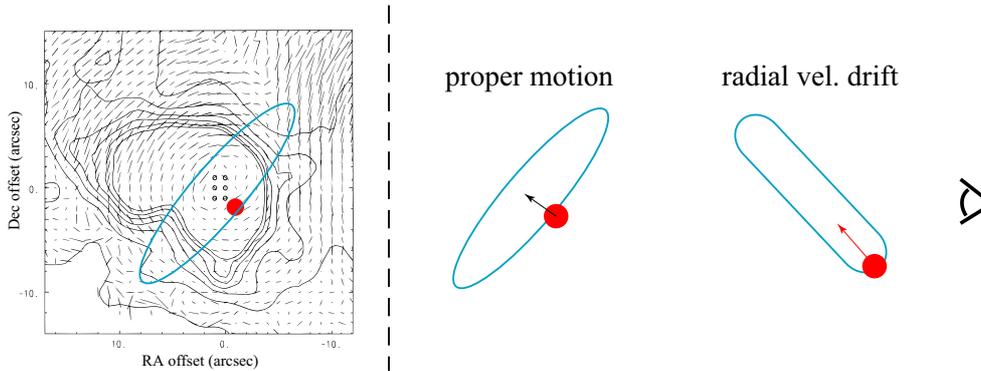


図 3: (左) 近赤外線の偏波イメージ¹⁵⁾との重ね合わせ。水色の楕円は偏波観測から予想される星周円盤を、赤丸はメタノールメーザーの絶対位置を表している。(中), (右) それぞれ星周円盤上にメタノールメーザースポットが存在している場合の固有運動と視線速度加速の解釈モデル。それぞれの図における矢印は、観測により得られた固有運動と視線速度加速の方向に相当。

4.2 JVN 3epoch

今回 JVN を用いて行った 3 回の VLBI 観測間においても同様に北東方向への内部固有運動の検出に成功した(図 2 下)。その際のリファレンススポットは、先ほどと同様である。検出された固有運動の大きさは $\sim 2\text{-}3 \text{ mas yr}^{-1}$ であり、これは $\sim 8\text{-}12 \text{ km s}^{-1}$ の速度に相当する。

4.3 加速機構の要因: 降着?

メタノールメーザーは、図 3(左) に示しているように、IRS3 の近赤外源ピークの位置から $\sim 500 \text{ mas}$ 南西に位置している。視線速度上で加速運動を示しているメーザー成分が北東方向へ、即ち原始星の方向へ固有運動していることを考慮すると、星周円盤上から原始星へ向かうガス降着に起因して加速現象が生じている可能性が考えられる。もしこの仮説が正しければ、ドリフト成分の赤方偏移方向への加速も説明可能である(図 3 右)。

今回検出された固有運動の典型的速度 $\sim 10 \text{ km s}^{-1}$ と、原始星までの距離 $\sim 500 \text{ mas} \simeq 415 \text{ AU}$ を用いると、自由落下を仮定した $M = rv^2/G$ より enclosed mass $M \sim 45 M_{\odot}$ と求まる。これは、近赤外線の光度から予想される質量 $15 M_{\odot}$ より重たいが、enclosed mass であるので、星周円盤および領域内に含まれるエンベロープの質量も含んでいることを考慮すると、矛盾はないと考えられる。一方で、視線速度ドリフトから導出された加速度 $0.08 \text{ km s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ を用いて $M = ar^2/G$ から中心質量を求めると、 $M \sim 75 M_{\odot}$ となり、固有運動から導出した enclosed mass と factor 2 以内で一致する。

以上より、Mon R2 に付随するメタノールメーザーで観測された視線速度ドリフトは、星周円盤上

から中心星へ向かうガス降着が引き起こす加速機構に起因している可能性が示唆された。これは同時に、形成中の大質量原始星周囲で星周円盤からのガス降着が生じている直接的な証拠になり得る、という意味でも有益な結果と言える。

5 今後の展望

- 絶対固有運動計測によるリファレンススポットの固有運動の除去
- 4 epoch 目との比較による固有運動上での加速運動の計測
- 高い絶対位置精度を有する高空間分解能な近赤外線イメージの取得

— 真の励起星特定のため

< 参考文献 >

- 1) Patel, N. A., et al. 2005, Nature, 437, 109
- 2) Beltran, M. T., et al. 2006, Nature, 443, 427
- 3) Kraus, S., et al. 2010, Nature, 466, 339
- 4) Minier, V., et al. 2003, A&A, 403, 1095
- 5) Xu, Y., et al. 2008, A&A, 485, 729
- 6) Goedhart, S., et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- 7) Ellingsen, S. P. 2007, MNRAS, 377, 571
- 8) Walsh, A. J., et al. 1998, MNRAS, 301, 640
- 9) van der Walt, J. 2005, MNRAS, 360, 153
- 10) Carpenter, J. M., & Hodapp, K. W. 2008, *Handbook of Star Forming Regions*, Volume I, 899
- 11) Walsh, A. J., et al. 1998, MNRAS, 301, 640
- 12) Yao, Y., et al. 1997, ApJ, 490, 281
- 13) Preibisch, T., et al. 2002, A&A, 392, 945
- 14) Shino, N., et al. 2010, Vcon Symp.
- 15) Minier, V., et al. 2000, A&A, 362, 1093