

周期的な強度変動を示すメタノールメーザー放射源 G9.62+0.20 のモニター観測

佐藤 宏樹 (茨城大学大学院 理工学研究科)

Abstract

大質量原始星 G9.62+0.20 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動観測について報告する。大質量星形成領域のみから検出される 6.7 GHz メタノールメーザーのうち、大質量原始星周辺では珍しい周期的な強度変動メーザーが初めて観測された G9.62+0.20 を対象とした。この天体から放射されるメーザーの強度変動周期は 244.4 日である (Goedhart et al. 2014)。この天体を日立 32 m 電波望遠鏡 (以下、日立局) を用いて観測を行い、16 のスペクトル成分を検出した。そのうち 11 成分の強度変動を確認した。強度変動が確認できた 11 成分のうち、3 成分は新検出の周期的強度変動成分で、変動周期は平均して 247.5 日であった。周期解析結果により、3 つの新検出速度成分は対象天体に付随していると判断できた。今後は新検出成分についての天球面上での空間分布の把握と、より詳細な周期解析を目標としている。

1 Introduction

6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域のみで検出される。特に HII 領域形成前に本メーザーが多く観測される。そのため、大質量星形成過程を明らかにする上で良い観測プローブとなり得る。今回の研究では、大質量原始星の周辺では珍しい、メーザーの周期的強度変動が初めて観測された G9.62+0.20 を対象とした。この天体は太陽から 5.2 kpc の距離にある。Garay et al. (1993) で空間成分 E と名付けられた HII 領域からの電波連続波源は、0.5 pc ほどの大きさであり、見つかっているものの中でもサイズが小さい。天の川銀河内から検出されている 6.7 GHz メタノールメーザーの中で最も強い放射源 (日立局観測においておよそ 5000~6000 Jy) が、対象天体の空間成分 E に付随している (Menten 1991)。この放射源からのメーザー強度変動周期は 246 ± 6 日とされ (Goedhart et al. 2004)、後に 10 年間の観測結果から 244.4 日周期と修正された (Goedhart et al. 2014)。

メーザーの周期的変動の原因として、中心にある原始星の光度変化による周辺ガスの状態反転分布の増減や、連星系を成す原始星の運動に起因した種光子の増減などがある。周期的強度変動現象を説明するために、様々な研究が成されている。本研究の目的は日立局を用いた高頻度モニター観測により、上

表 1: 日立局観測パラメータ

受信周波数 [MHz]	6664 - 6672
システム雑音温度 (典型値) [K]	30
半値全幅 [arcmin]	4.6
チャンネル数	8192
速度分解能 [km s^{-1}]	0.044
ノイズレベル (1σ) [Jy]	~ 0.3

記理論の基礎となる周期的強度変動の周期の解析および考察を行うことである。

2 Observations

G9.62+0.20 の観測は 2012/12/30~2014/01/10, 2014/05/07~2015/06/08 まで、期間中毎日 1 回行った。日立局観測パラメータを表 1 に示す。

2014/05/07 以降の観測では方位角 (AZ), 仰角 (EL) が各日同じになるようにスケジュールしたが、それ以前は統一されていない。AZ に依存する、アンテナレールの歪みなどを原因とするポインティング誤差や、EL が異なることによる大気吸収の違いの影響を避けるため、解析には $173^\circ \leq AZ < 183^\circ$ ($EL \approx 32^\circ$) の観測結果 (サンプル数 314) を用いた。

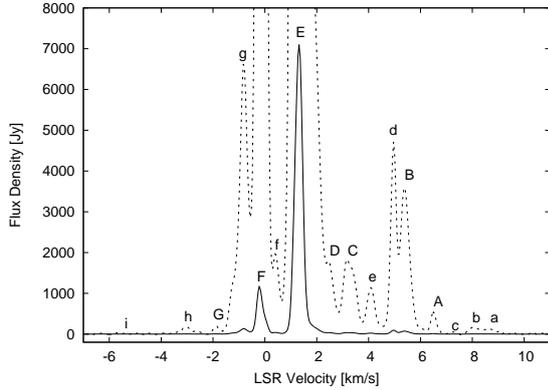


図 1: 日立局で観測した各速度成分と識別記号。実線：日立局 2013/10/22 観測スペクトル，破線：実線の 50 倍

3 Results

本研究では大質量星形成領域からのメタノールメーザーの急激な強度増加から減少までをフレアと呼び、大きな変動を示さない期間を静穏期と呼ぶ。日立局で検出したスペクトルを図 1 に示す。各々の視線速度成分に識別記号を付けて、以降は各速度成分は識別記号で表す。大文字は Walsh et al.(1998) で付けられた識別記号で、小文字は本研究で追加した、各成分に対する識別記号である。

変動指数による変動成分決定

まず、メーザー強度の変動を定量的に評価するために、変動指数 σ_{VI} を導入する。1 日の観測により、ノイズレベル及び各速度成分のフラックス密度を求め、観測期間全体 (314 サンプル) の平均及び標準偏差を求めた。各速度成分のフラックス密度の平均を \bar{m} 、標準偏差を σ_m 、ノイズレベルの標準偏差を σ_n とすると、 σ_{VI} は次のように表せる。

$$\sigma_{VI} = \frac{\sigma_m - \sigma_n}{\bar{m}} \quad (1)$$

この σ_{VI} は平均値を基準とした標準偏差を表す。各成分において $\sigma_{VI} \geq 2$ かつ、(Signal-Noise 比 (S/N)) ≥ 3 となるものを有意な強度変動を示す成分とし、有意に強度変動を示す成分についてのみ変動周期の解析を行う。各速度成分毎に式 (1) を適用すると、有意な強度変動を示す速度成分は a, b, d であった。その他の成分は Goedhart et al. (2004) で強度周期変

表 2: 日立局の観測で得られた各速度成分の諸数値
1 列目：速度成分の平均速度,
2 列目：各速度成分の平均 S/N,
3 列目：変動指数, 4 列目：識別記号

V_{LSR} [km s ⁻¹]	S/N	σ_{VI}	
8.75	5.0	2.4	a
8.09	4.5	4.7	b
7.28	2.0	1.7	c
6.51	31.6	0.6	A
5.39	237.8	0.5	B
4.98	128.0	3.9	d
4.10	75.6	0.5	e
3.26	98.7	0.6	C
2.43	96.8	0.6	D
1.32	18855.8	0.6	E
0.41	125.0	0.6	f
-0.21	3430.8	0.5	F
-0.81	444.3	0.6	g
-1.86	8.1	1.8	G
-3.05	12.2	0.7	h
-5.46	1.8	2.1	i

動が報告されている速度成分であっても、静穏期のフラックス密度に対する変動幅が相対的に小さいため、今回の解析では有意な変動と評価できなかった。各々の変動指数は表 2 に記載する。

周期的強度変動成分の周期

周期の導出は、強度の時間変動をフーリエ変換して周波数スペクトルを得る方法や、関数近似で周期を求める方法がある。本研究では、Szymczak et al.(2011) において G9.62+0.20 と同様なメーザーの周期的強度変動 (フレアの形状が非対称かつ静穏期をもつ変動) に適用された関数 $s(t)$ (David et al. 1996) を用いて周期の導出を行った。強度の昇降が非対称な形状の近似曲線の関数 $s(t)$ は、 a を時間平均強度、 b を a に対する変動率、 $\omega = 2\pi/T$ (T は周期)、 ϕ を位相、 f を非対称性を表現する定数として、 $s(t) = [b \cos(\omega t + \phi)] / [1 + f \sin(\omega t + \phi)] + a$ で与えられる。強度の対数を取った場合、 A, C を定数とした、 $S(t) = A^{s(t)} + C$ が近似曲線の関数となる。

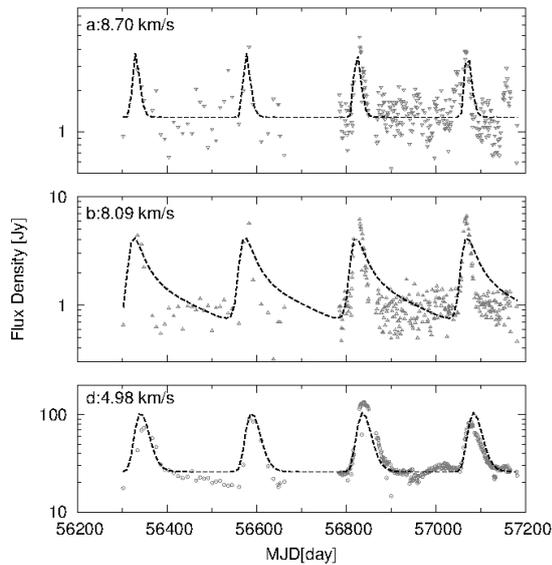


図 2: 有意な強度変動を示した成分の強度-日付の散布図とそれぞれの近似曲線

日立局の観測で強度変動を示した速度成分と分類された a,b,d について、強度-日付の散布図を $S(t)$ で最小二乗法で近似した結果を図 2 に示す。各々のフレアの強度ピークは表 3 と 4 (3 段目以降) にまとめた。成分 a,b,d は周期を持つことが確認できたので、周期的な強度変動を示す速度成分としては新検出となる。新検出成分の 3 つは速度成分 E の変動周期と同等な変動周期をもつことから、対象天体に付随する放射源からのものと判断できる。

4 Discussion

周期の比較

速度成分 E の変動周期と新検出速度成分の変動周期の比較を行った。以下に示す式 (2) はフレアの開始日を求めるもので、速度成分 E の 2002 年 6 月のフレア開始日を $N = 5$ として導出されたものである。 N 回目のフレアが起こる日付は、周期が T 日するとき、

$$\text{MJD} = 51194.5 + T \times N \quad (2)$$

により与えられる (Goedhart et al. 2003)。 $T = 246$ 日 (Goedhart et al. 2004) として式 (2) からフレアの開始日を求めると、日立局で観測された変動は速

度成分 E の 21 回目から 24 回目のフレアに対応すると考えられる。表 3 は速度成分 E のフレア開始日 (2 段目) と新検出成分 a,b,d のフレアの強度ピーク日 (3 段目以降)、及びそれらの差 (3 段目以降の括弧内。符号は速度成分 E のフレア開始日に対する「遅れ」が正、「先行」が負) をまとめたものである。表 4 は $T = 244.4$ 日 (Goedhart et al. 2014) として計算した結果を同様にまとめたものである。

ここで注意しなくてはならないのは、速度成分 E のフレアの日付は“開始日”であり、成分 a,b,d の日付は“強度ピークの日付”という点である。すなわち、表 3 と表 4 の括弧内に示した値には、成分 a,b,d それぞれにおけるフレアの開始から強度ピークに達するまでの約 20 日も含まれている。これらより、フレア開始日で比較した場合の差が 50 日程度になってしまう 246 日周期よりも差が小さい 244.4 日周期 (Goedhart et al. 2014) の方が好ましい周期と考えられる。フレアの開始日として統一した解析を行うためには、速度成分 a,b,d のフレア開始日を定義・導出する必要があるが、それらは今後の課題である。

メーザーの周期変動現象の原因は解明されていないが、先に述べた通り、中心にある原始星光度の脈動による周辺物質の状態反転分布を原因とする理論 (Inayosh et al. 2013)、連星を成した原始星の運動による種光子の増減を原因とする理論 (van der Walt 2011, Araya et al. 2010) がある。どちらの場合でもメーザー源の空間分布の把握が重要となる。各周期的変動成分のフレア開始日の差は、それらのメーザー放射源同士を中心星からの距離の差との相関があると考えられる。メーザーの伝搬速度は光速に等しいので、各変動成分のフレア開始日が決定できれば (光速) \times (フレア開始の時間的遅延) により距離の差を導出できる。

日立局で検出した成分 a,b のメーザーの強度は、曲線で良い近似ができるほどの S/N を持っていない。周期的強度変動の仕組みを説明する上で新検出成分の空間的広がり重要な役割を担うのであれば、検出感度を向上させた追観測をする必要が生じる。

より厳密な議論を可能にするための課題として、日立局観測スペクトルの強度の時間変動をフーリエ変換して得られる周波数スペクトルを用いた周期解析、新検出成分のフレア開始日の決定 (必要であれば高

表 3: 速度成分 E のフレア開始日 (2 段目), 成分 a,b,d のフレアの強度ピーク日 (3 段目以降), 括弧内は速度成分 E のフレア開始日と新検出成分のフレアの強度ピーク日の差。平均間隔は周期に相当する。

N 回目	21	22	23	24	間隔平均
E ₂₄₆	56360.5	56606.5	56852.5	57098.5	246
a	56329.7 (-30.8)	56579.1 (-27.4)	56823.5 (-29)	57070.8 (-27.7)	247
b	56325.8 (-34.7)	56573.1 (-33.4)	56821.5 (-31)	57068.9 (-29.6)	247.8
d	56341.6 (-18.9)	56589 (-17.5)	56836.3 (-16.2)	57084.7 (-13.8)	247.8

表 4: 速度成分 E の変動周期を 244.4 日として求めたフレア開始日 (2 段目)。他は表 3 と同様

N 回目	21	22	23	24	間隔平均
E _{244.4}	56326.9	56571.3	56815.7	57060.1	244.4
a	56329.7 (2.8)	56579.1 (7.8)	56823.5 (7.8)	57070.8 (10.7)	247
b	56325.8 (-1.1)	56573.1 (1.8)	56821.5 (5.8)	57068.9 (8.8)	247.8
d	56341.6 (14.7)	56589 (17.7)	56836.3 (20.6)	57084.7 (24.6)	247.8

感度観測), 新検出成分の天球上での空間分布の把握などが挙げられる。

5 Conclusion

日立局の観測において周期的強度変動成分 3 つを新検出した。今回の研究で追加した識別記号では成分 a,b,d が新検出の周期的強度変動成分で, 最小二乗法で近似した関数の極大値を元に導出した周期は順に 247 日, 247.8 日, 247.8 日である。この周期と速度成分 E の変動周期が近いから, 新検出成分のメーザー放射源は対象天体に付随していると考えられる。

速度成分 E のフレア開始日に対する新検出成分の強度ピーク日のずれは, 速度成分 E の変動周期が 246 日とした場合と 244.4 日とした場合で異なる。速度成分 E と新検出成分の周期的強度変動の原因が同じであると考えた場合, フレア開始日の時間差はメーザー放射源の空間的な広がりを決める要因となる。しかし, 今回は新検出成分のフレアの開始日が決定できていないため, 中心星から各速度成分の距離の差は導出はできない。

今後は VLBI を用いた新検出成分の天球面上での空間分布の把握や, より厳密な周期解析を行っていくつもりである。

Reference

- Araya, E. D., Hofner, P., Goss, W. M., et al. 2010, ApJL, 717,L133
- David, P., Etoaka, S., & Le Squeren, A. M. 1996, A&AS. 115,387
- Garay et al. 1993, ApJ, 418,368
- Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2003, MNRAS 339,L33
- Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2004, MNRAS 355,553G
- Goedhart, S., Maswanganye, J. P., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2014, MNRAS 437,1808G
- Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., Motogi, K., & Tanaka, K. E. I. 2013, ApJL, 769,L20
- Menten, K. M. 1991, ApJL, 380,L75
- Szymczak, M., Wolak, P., & van Langevelde, H. J. 2011, A&A, 531,L3
- van der Walt, D. J. 2011, AJ,141,152
- Walsh, A.J., Burton, M.G., Hyland, A.R., & Robinson, G. 1998, MNRAS 301,640W