

G9.62+0.20 の強度周期変動レーザー放射源の空間分布について

佐藤宏樹

2015 年 5 月 18 日

概要

6GH z メタノールレーザー観測によって星形成領域の物質の運動を探っている。今回の研究は大質量星周辺に付随するメタノールレ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。変動周期は 246 日とされ (Goedhart et al. 2004), 日立局の観測でも 246 日の周期が示された。G9.62+0.20 の約 10 秒角南西に大質量星 G9.61+0.19 が存在する。日立局の観測では G9.62+0.20 のスペクトル成分と G9.61+0.19 のスペクトル成分を同時に受信してしまう。本研究では初めに G9.62+0.20 のスペクトル成分を特定した。結果, 周期変動成分が G9.61+0.19 に付随せず G9.62+0.20 に付随していると判明し, さらに, 本研究において周期変動を示す成分が 3 つ新たに検出された。

目次

1	序論	4
1.1	電波天文学の概論	4
1.2	メーザー (maser:microwave amplification by stimulated emission of radiation) とは	5
1.3	メーザー強度周期変動天体の調査目的	6
1.4	VLBI の基礎	6
2	観測	6
3	解析と結果	7
3.1	日立局スペクトルの速度成分定義	7
3.2	日立局観測のスペクトル成分と文献のスペクトル成分の照合	8
3.3	サイドローブからのメーザー混入の可能性について	9
3.4	強度変動の有無	9
3.5	スペクトル成分の空間分布決定	9
3.6	周期性の判定	10
3.7	結果のまとめ	11
4	考察	12
4.1	新検出のスペクトル成分	12
4.2	新検出スペクトル成分の分布	13
4.3	励起源の位置	13
4.4	今後の研究	13
付録 A	アンテナ温度とフラックス密度の関係	14
付録 B	離角の算出方法	14
付録 C	Goedhart et al.(2003) の強度変動パラメーター I について	14

1 序論

1.1 電波天文学の概論

天文学は古くから存在するが、電波天文学は Karl G. Jansky が 1932 年に宇宙からの電波を発見して以来と、その歴史は浅い。電波による観測が行われるようになって、可視光では見えなかった天体の様子が明らかになったり、宇宙背景放射が発見されたりと、電波天文学の功績は大きい。可視光に対する電波の利点は、大気の透過率が高い周波数帯であるため地上からの観測で十分な感度を得られることや、干渉計を構築することで高い角度分解能を得られる点にある。

宇宙電波の放射機構

恒星の放射は黒体放射でよく近似される。一方でガス雲や星形成領域などから放射される電波は、放射源の物質の温度や密度などの物理状態を反映しているため黒体放射と異なるスペクトルを示す。これらのスペクトルのうち、周波数に対して連続的にエネルギー分布が変化するものは連続スペクトルと呼ばれ、特定の狭い周波数幅において吸収や放射をもつスペクトルは線スペクトルと呼ばれる。線スペクトルは原子または分子の異なるエネルギー準位間の遷移によって発生し、その周波数は遷移エネルギー

$$E_{mn} = h\nu \quad (1)$$

によって決まる。電波領域の線スペクトルに関する遷移は、分子の回転遷移、原子・分子の微細構造線、原子の再結合線などがある。これらは線スペクトルと呼ばれるが、実際には量子力学的エネルギーの不確定性による線幅、放射源の物質の運動によるドップラー効果に起因する線幅をもつ。線スペクトルの尖った形状を記述する関数 $\varphi(\nu)$ をプロファイル関数と呼ぶ。

観測される電波

宇宙空間に漂うガスから放射された電波は、様々な物質が存在する空間を通過して地球に到達する。簡単のため、散乱は考えずに放射・吸収のみが起こる物質中を電波が通過した場合を考える。強度 I_ν の電波が通過

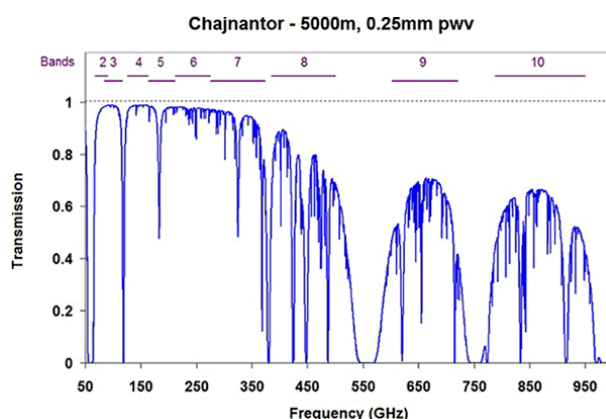


図 1 電波の大気透過率

(国立天文台先端技術センター HP より。

<http://atc.mtk.nao.ac.jp/ALMACartrige/aboutAlma.html>)

する物質の放射係数 j_ν , 吸収係数 α_ν ^{*1}としたとき, 距離 ds を通過する電波の輻射輸送の基本方程式は

$$dI_\nu = j_\nu ds - \alpha_\nu I_\nu \quad (2)$$

となる。物質の j_ν が大きければ電波は強まり, $\alpha_\nu I_\nu$ が大きければ電波は弱まることを表している。

電波の放射機構で述べた通り, 線スペクトルは原子・分子の遷移に起因する。低い準位 1 と高い準位 2 があるとき, 入射する電波が存在しなくても準位 2 から 1 へ遷移する“自然放射”, 入射した電波のエネルギーを得て準位 1 から 2 へ遷移する“吸収”, エネルギーを吸収せずに通過する電波と同じ周波数・位相の光子を放出する“誘導放射”と呼ぶ。このうち吸収と誘導放射はどちらも入射する電波強度に依存するため, 吸収係数と見なせる。準位 1, 2 の粒子数をそれぞれ n_1, n_2 とし, その統計的重率を g_1, g_2 とすると吸収係数は

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} \varphi(\nu) n_1 B_{12} \left(1 - \frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} \right) \quad (3)$$

と表せる。ここで B_{12} は吸収における Einstein 係数である。

1.2 メーザー (maser: microwave amplification by stimulated emission of radiation) とは

準位 1 と 2 の粒子数 n_1, n_2 の比はボルツマン分布に従う。

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (4)$$

大気のように密度の高いガスの熱平衡状態では, エネルギーの低い準位の粒子数が多く, この比が必ず 1 より小さくなる。吸収係数 (式 (3)) は正, すなわち“吸収”が起こる。星間空間のようにガスの密度が低い領域では, エネルギーの高い状態の粒子がより多い反転分布となりやすい。そこでは比が 1 より大きくなり誘導放射が卓越し, 吸収係数が正となる。すると式 (2) より, 自発放射に誘導放射が加わり, 結果として通過する電波が連鎖的に増幅される。このしくみがメーザーである。

メーザー観測の利点

- 輝線または吸収線の特徴 (周波数) から, そこにある物質ガス種を特定できる。
- スペクトルの線幅が熱運動による線スペクトルの幅より狭く, 熱運動によるドップラー効果が見えるので, 線スペクトルの周波数成分から分子の運動の様子を知ることができる。
- 輝度が高いので, さほど高くない感度の VLBI (後述) 観測でも検出可能。
- メーザーの放射源の広がり がほぼ点状であるため, 位置変化 (固有運動) からガスの運動を調べられる。

水酸基 (OH) メーザー, 水 (H₂O) メーザー, メタノール (CH₃OH) メーザーなどが, 大質量星形成領域に付随するとされるメーザー源である。これらのメーザー源の分布は輝線周波数毎に大きく異なり, クラス I (25GHz など) とクラス II (6GHz, 12GHz など) の 2 種類に分類されている。クラス II メタノールメーザーは大質量形成領域以外での検出例がないため, 大質量星形成の指標として観測されている。本研究もクラス II メタノールメーザーである 6GHz の観測を行っている。

^{*1} 物質が吸収する割合なので, α_ν は正の値。輸送方程式に負の符号が付いているのは“電磁波の減衰”を表しているからである

1.3 メーザー強度周期変動天体の調査目的

メタノールメーザーの観測によって初めて、大質量星周辺の光度の周期変動に起因していると思われる現象が発見された。メタノールメーザーの周期変動が最初に見つかった天体が G9.62+0.20 で、その周期は 246 日である [3]。変動要因と励起メカニズムについては未解明な点も多いため、メーザー強度の変動の様子を詳しく調査することで、大質量星形成領域周辺の現象の解明につながると期待されている。

1.4 VLBI の基礎

超長基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometry) が VLBI と呼ばれている。数千 km と離れた位置にある複数のアンテナで受信した電波を干渉させて、数ミリ秒角という高い分解能を得る技術である。

アンテナの角度分解能は、通常はアンテナのビーム半値全幅 (HPBW:Half Power Band Width) で表される。

$$\text{HPBW} = K \times \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

K はアンテナ 1 次放射器の照度パターンによる係数で 1.2 程度、 λ は観測する電磁波の波長、 D はアンテナ開口部の物理的な直径である。電波の観測では、HPBW/2 より小さいサンプリング間隔でデータを取得した場合、式 (5) で表される最良の角度分解能 (回折限界) を得られる。VLBI では基線長 (アンテナ同士の間隔) が D に相当するため、例えば 6GHz ($\lambda = 5\text{cm}$) の電波を 2400km の基線長をもつ干渉計で観測するとき、その角度分解能は約 5 ミリ秒角となる。

2 観測

日立局 32m 電波望遠鏡を用いて左円偏波成分、数波数 6.67GHz の観測を行っている。観測のパラメーターは表に示す。観測期間は 2012 年 12 月 30 日から 2014 年 01 月 10 日及び 2014 年 05 月 07 日から現在まで、他のメーザー観測の強度校正天体*2として毎日観測している。

現在も観測が続いているためサンプル数は日々増加しているが、本解析に用いたサンプルは 2014 年 10 月 22 日以前のもの、かつ方位各を揃えたサンプルのみを選出しているため、サンプル数は 178 個である。各観

表 1 日立局と HartRAO*3(Goedhart et al.2003) 観測パラメータ

	日立局	HartRAO
受信周波数 [MHz]	6668.518	666.518
システム雑音温度 [K]	30	51
半値幅 (ビームサイズ [arcmin])	5	8
チャンネル数	8192	256
帯域幅 [MHz]	8	0.64
1σ [Jy]	0.316	0.5

*2 観測毎の受信強度の誤差校正のために観測される、強く安定したメーザー強度をもつ天体

*3 Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory; 南アフリカのヨハネスブルグにある 26 m 望遠鏡。

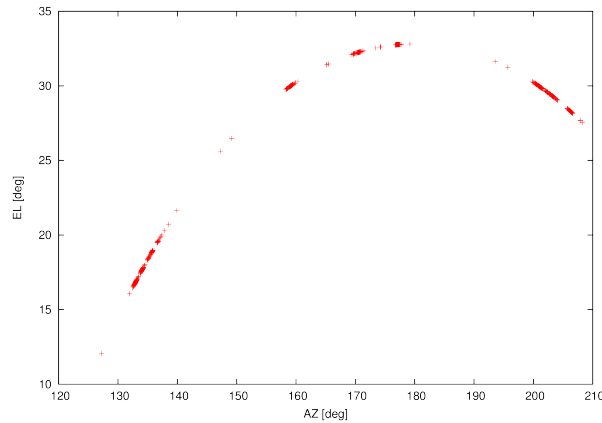


図2 2012年12月30日から2014年10月22日の各観測でのポインティング

測は天体をビーム内に捉えた ON 点観測（300 秒）と天体をビームから外して空の電波を捉えた OFF 点観測（300 秒）とを交互に行う，ポジションスイッチング法と呼ばれる方法で観測を行っている。（ON 点の強度） - （OFF 点の強度）により，大気とアンテナ自体の放射・吸収を補正する。

使用データはキャリブレーション，ベースラインフィット，3 チャンネル合算^{*4}を行った各観測日毎のデータファイルと，それらのファイルから各スペクトル成分の視線速度 (V_{LSR})・強度ピーク・シグナル-ノイズ比 (S/N) を抜粋し集約したデータファイル，観測時のアンテナ情報が記録されたファイルを解析に使用した。アンテナのスペクトルデータはアンテナ温度として出力される。日立局の場合，3.43 倍でフラックス密度に換算している（アンテナ温度からフラックス密度への換算は付録参照）。

観測データの選別

アンテナは自重により歪みが生じる。その歪みは仰角方向で大きい，キャリブレーションにより補正されたデータを扱っている。対して，方位角方向の補正は現段階では行っていない。方位角方向に依存した振幅誤差は主にアンテナレールの歪みによるポインティング誤差である。アンテナ方位角による受信感度の分散を減らすため，解析に用いる 2014 年 05 月 07 日以前の観測データは，2014 年 05 月 07 日以降の観測の方位角方向（方位角：178°，仰角：32°）に近いもの（170° ≤ 方位角 ≤ 180°）を選出（ポインティング情報と観測時刻が記録されたデータと，観測時刻が記録されたスペクトルデータを対応付けて抜粋）している。

3 解析と結果

3.1 日立局スペクトルの速度成分定義

過去の論文と比較する上で重要となる速度成分を，ここでは視線速度の小さい成分から順に，A から P のラベル付けをした。スペクトルピークの速度成分の決定方法は，全ての観測における各スペクトルピークの速度成分平均値を採用した。観測日による T_{sys} のゆらぎや方位角によるアンテナのポインティング誤差，相関処理の際に生じる誤差を考慮した上でも，各観測日のスペクトルピーク速度成分の平均値が重なることはなく，

^{*4} 全ては観測後に自動実行されるプログラムにより完了

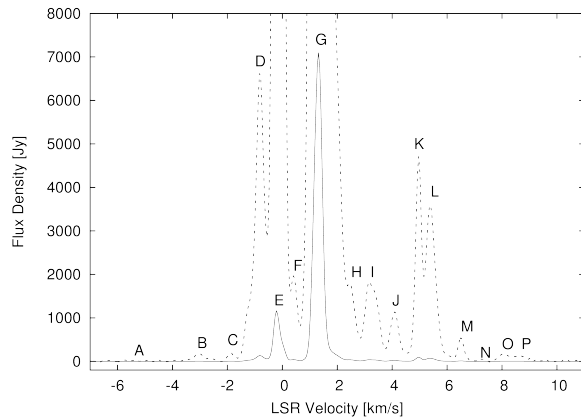


図3 実線：日立局 2013/10/22 観測スペクトル，破線：50 倍

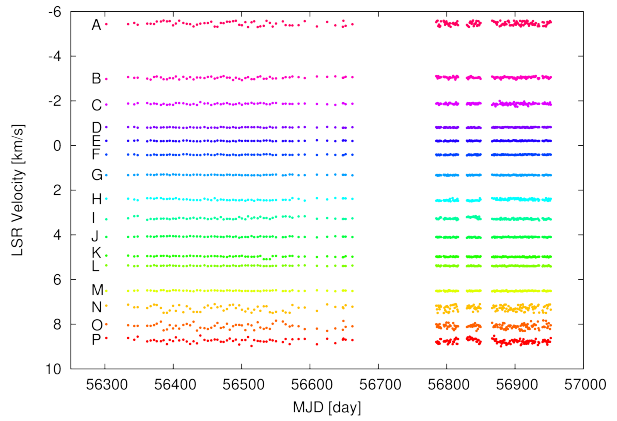


図4 各スペクトルピーク強度の速度成分の時間変動プロット

表2 サイドロープで受信した場合の受信感度の設定		
G9.62+0.20 からの		
離角 [arcmin]	受信感度 [dB]	受信感度 [%]
$6 < \theta \leq 11$	-14	3.98
$11 < \theta \leq 21$	-22	0.63
$21 < \theta \leq 32$	-25	0.32
$32 < \theta$	-30	0.10

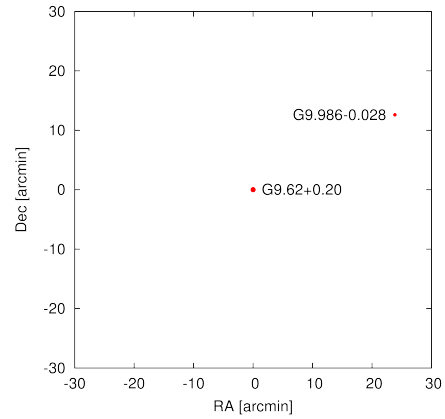


図5 メーザー天体分布
受信強度を点の大きさに表している。中心に検出感度の 1σ の点を置いた

速度成分の混同はない。^{*5}

3.2 日立局観測のスペクトル成分と文献のスペクトル成分の照合

メーザー強度変動周期の調査やメーザースポットの分布調査のために、今回日立局で観測されたスペクトル成分と文献のスペクトル成分の対応付けを行った。G9.60+0.20 自体継続的に調査されている天体のため、一部スペクトル成分については複数の論文で扱われている。比較結果（表3）の“掲載論文”はそのスペクトル成分を扱っている最新の論文とした。観測された16のスペクトル成分のうち、未調査の成分は7つであると判明した。成分Cより視線速度の小さい成分、成分Mより視線速度の大きい速度成分が未調査であり、さらにメーザー強度の大きい成分と視線速度に近い成分F、Kが未調査であった。

^{*5} Goedhart et al. (2004) では、「メーザー源の運動機構が解明されていないため隣接する速度成分の混同を極力避ける必要があり、各観測のスペクトルピークの速度成分平均を取らずに最大値を採用」としている。

3.3 サイドローブからのメーザー混入の可能性について

成分照合の結果、未調査であると判明した成分について、日立局ビームパターン観測実験結果を用いて、G9.62+0.20 にポインティングをした場合のサイドローブによる受信で有意に検出されるメーザーが存在するかを調査した。

G9.62+0.20 からの離角による受信感度を表 2 のように設定し、マスターカタログ^{*6}の各メーザー天体の最大メーザー強度を用いて、サイドローブで受信した場合の強度上限値を算出した。上限値に応じた点のサイズでプロットした結果図 5 のようになる。 1σ を基準（中心点）の大きさとした。最も近い天体 G9.986-0.028 であっても検出感度以下であり、したがって日立局による G9.62+0.20 の観測においてサイドローブからの混入による検出は存在しないと断定した。

3.4 強度変動の有無

恒星付随のメタノールメーザーの急激な強度変動をフレアと呼ぶ。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。

$$\sigma_{VI} = \frac{\sigma_m - \sigma_n}{\bar{m}} \quad (6)$$

ここで、 σ_m はスペクトル成分のフラックス密度の標準偏差、 σ_n ノイズ成分のフラックス密度の標準偏差であり、 σ_{VI} は平均値を基準とした標準偏差を表す。すなわち、強度平均値に対して $(\sigma_{VI})\%$ の比を持つ強度が、全観測日における強度分布の 68% を占めると評価できる。 σ_{VI} が大きいほど、強度平均値に対する変動幅が大きい。

各成分において $2 \leq \sigma_{VI}$ かつ、 $3 \leq (\text{Signal-Noise 比 (S/N)})$ 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考察を行う。各速度成分に式 (6) を適用すると、有意な強度変動成分は C,K,O,P であった。その他の成分は過去に強度周期変動が報告されている速度成分であっても、日立局の観測では有意な強度変動とはならなかった。

3.5 スペクトル成分の空間分布決定

日立局の角分解能では G9.62+0.20 にポインティングをしても、G9.62+0.20 のスペクトルとその南西 10 秒角に存在する G9.61+0.19 のスペクトルを同時に受信してしまう。毎日の観測により強度の時間変動をモニターできるが、その放射源がどこにあるかは特定できない。そこで、VLBI 観測（角分解能：受信数波数 6.7GHz の場合約 4 ミリ秒角）によるマッピングとスペクトル成分の視線速度との比較を行う。これにより日立局のスペクトルデータに位置情報を加味して議論する。

空間分布から、成分 L, M は G9.61+0.19 のスペクトルであると判明した。それ以外の成分が G9.62+0.20 のスペクトルである。すなわち、日立局において有意に強度変動を示しているのは G9.62+0.20 の成分のみである。

成分 K, O, P は過去に報告のない速度成分であり、新検出の可能性がある。

^{*6} Caswell et al.(2010), Green et al.(2010), Green et al.(2012), Pandian et al.(2007), Pandian et al.(2011), Xu et al.(2009) のメタノールメーザー天体情報をまとめたカタログ

表 3 日立局観測のスペクトル成分の諸数値

第一列：スペクトル成分の速度成分平均，第二列：各スペクトル成分の平均 S/N，
第三列：変動指数，第四列：この論文における識別記号

$V_{\text{LSR}} [\text{km s}^{-1}]$	S/N	σ_{VI}	識別記号	掲載論文
-5.46	1.6	3.3	A	
-3.04	10.9	1.3	B	
-1.87	9.1	2.1	C	Wal98
-0.81	426.1	0.9	D	Goed14
-0.21	3275.8	0.7	E	Goed14
0.41	122.5	1.0	F	
1.32	18073.3	0.9	G	Goed14
2.42	95.6	0.9	H	Goed14
3.27	95.9	0.8	I	Goed14
4.09	72.8	0.9	J	Goed14
4.98	128.0	6.0	K	
5.39	231.2	0.8	L	Goed14
6.51	31.8	0.8	M	Goed14
7.28	2.0	2.4	N	
8.09	4.2	6.2	O	
8.75	4.8	3.2	P	

3.6 周期性の判定

周期的であるかの判断は，同程度のピーク強度を持つ強度変動が等間隔で出現しているかどうかによる。強度変動の時系列プロットから視覚的に判断する範囲では，先に強度変動を示す成分として選出した C, K, O, P 全てが何らかの周期を持って変動していると考えられる。

HartRAO を用いた観測を行った Goedhart et al. (2003) では 6.7GHz と 12.2GHz の観測データを元に，

- (i) 不規則な変動に比べてフレアの増加量が多い
- (ii) 成分 A, B, C の 6.7GHz と 12.2GHz におけるフレアが同時に発生している

これらを満たすものを周期強度変動として単なる強度変動と区別している。

周期解析の結果得られたフレアの強度ピークの周期は 246 ± 6 日であるとされる。ユリウス日 (JD)，2002 年 6 月のフレアの強度ピークを $N = 5$ としたとき， N 回目のフレアが起こる時刻が

$$\text{JD} = 2451195 + 246 \times N \quad (7)$$

により与えられる。JD から修正ユリウス日 (MJD) への変換は

$$\begin{aligned} \text{MJD} &= \text{JD} - 2400000.5 \\ &= 51194.5 + 246 \times N \end{aligned} \quad (8)$$

これより， N 回目のフレアが起こる MJD を導出できる。

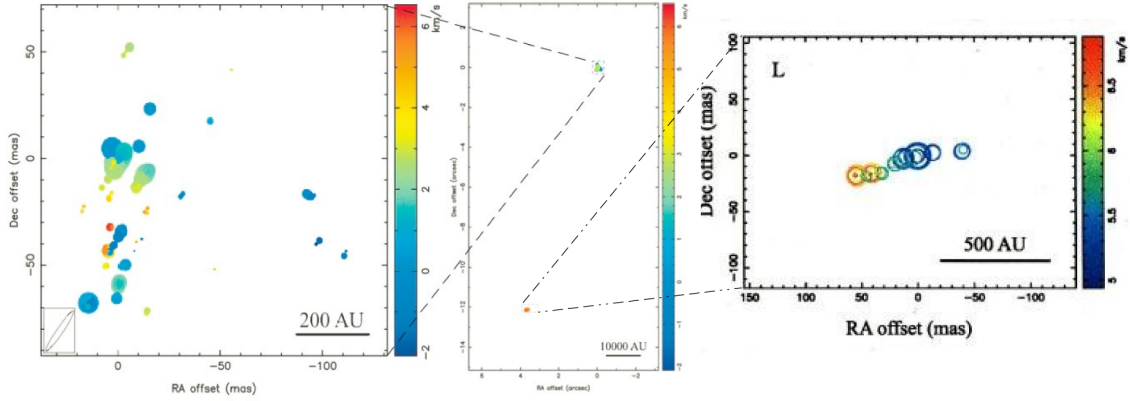


図6 G9.62+0.20 と G9.61+0.19 の分布 (中央), G9.62+0.20 の VLBI マップ (左) (Satoko Sawada-Satoh,2008), G9.61+0.19 の VLBI マップ (右) (Fujisawa et al.2014)

式 (8) を用いて変動成分の周期性を判別する。日立局による G9.62+0.20 の観測ではサイドロープからの混入はなく、強度変動のあるスペクトル成分は全て G9.62+0.20 であることが判明している。246 日の変動周期を維持して現在に至った場合に訪れた周期の推定回数 ($N = 21$, $N = 22$, $N = 23$) をそれぞれ式 (8) に代入し、時系列速度成分プロットと重ねると、図 8 のようになる。強度ピーク日時 (成分 C については強度の極小日時) とフレア強度ピーク予想日に差はあるが、 246 ± 6 日の周期が存在する。

強度ピークの日時とフレア強度ピーク予測日の差は表 5 の通りである。

3.7 結果のまとめ

日立局で G9.62+0.20 を観測した際の 16 のスペクトル成分 (V_{LSR} の小さい方からアルファベット順に識別記号付け) のうち、成分 L, M が G9.61+0.19 のものであると判明した。成分 K, O, P は新検出であり、246 日周期でフレアを起こす強度変動が確認されたが、放射源分布は未特定であった。成分 C は成分 K などの変動と逆相関の可能性がある。

表 4 各スペクトル成分のフレア強度ピークの間隔 (C は強度極小までの間隔)。

速度成分	フレア強度ピーク間隔		平均
	1-2 回目	2-3 回目	
C	262.3	252.3	257.3
K	235.4	257.3	246.4
O	240.3	255.3	247.8
P	249.3	246.3	247.8

表 5 フレアの強度ピークの予測日からの差 [day] (成分 C は強度極小の日時との差)。予測日より前ならマイナス、後ならプラスとする。

速度成分	周期推定回数			平均
	$N_1 = 21$	$N_2 = 22$	$N_3 = 23$	
C	25.3	41.6	47.9	38.3
K	-12.6	-23.2	-11.9	-15.9
O	-26.5	-32.2	-22.9	-27.2
P	-26.5	-23.2	-22.9	-24.2

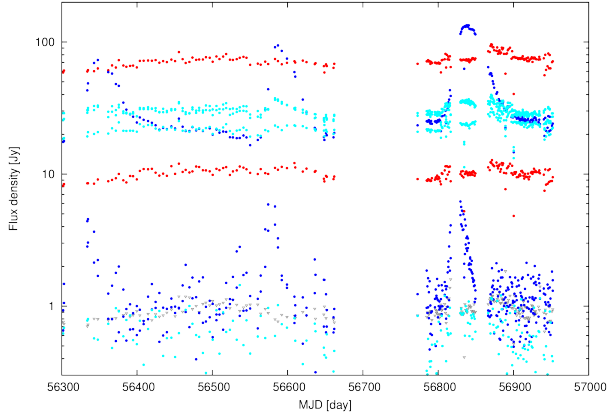


図 7 日立局観測の一部スペクトル成分の時間変動
赤色 : G9.61+0.19 の成分, 青色 : G9.62+0.20 の強度周期変動のある成分, 水色 : G9.62+0.20 のその他の成分

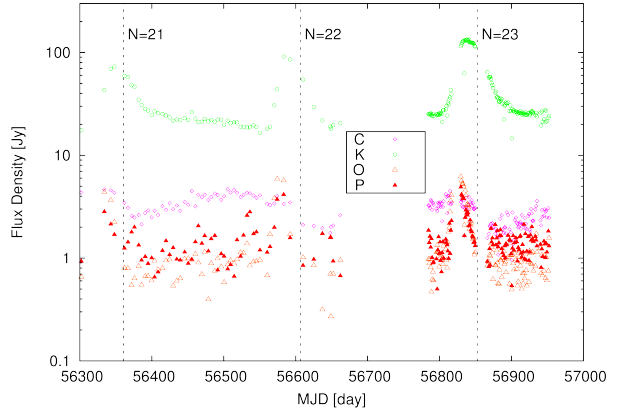


図 8 変動成分の時系列プロットとフレア強度ピークの予測日

4 考察

4.1 新検出のスペクトル成分

フレア強度ピークの 3 回の予想日付近にフレアが発生しているため, G9.62+0.20 に付随するメーザースポットからの放射であると思われる。新検出の可能性のある周期強度変動成分 K, O, P の平均強度は日立局において十分に大きい ($3 < S/N$) にも関わらず, 過去 (主に Goedhart et al.2014) に調査・研究または報告されていない理由について, 次の 3 つの可能性を提示する。

1. 観測条件により, メーザーの受信強度が検出感度以下であった

HartRAO を用いている Goedhart et al.(2014) では $1\sigma = 0.5$ [Jy] であるとしている。この場合, 日立局に対する HartRAO の感度比は 1.58 となる。それぞれの観測において 3σ 以下の信号は非検出とするならば, 日立局で 4.7σ の信号 ($S/N = 4.7$) は HartRAO で 3σ ($S/N = 3$) となり, 非検出となる。すなわち, 成分 O, P は Goedhart et al.(2014) の観測条件においては非検出である。

2. 速度分解能不足で隣の成分と混合して検出されていた

成分 K が成分 L と混合して検出されていたと考える。2 つの視線速度差は $0.42[\text{km s}^{-1}]$ である。システムの速度分解能 δv は, 1ch あたりの周波数幅 B_{ch} , 観測周波数 f , 光速 c としたとき,

$$\delta v = \frac{c}{f} \times B_{\text{ch}} \quad (9)$$

で表される。G9.62+0.20 の強度周期変動成分について記録された Goedhart et al.(2003) で用いている HartRAO の速度分解能は, $5.62 \times 10^{-2}[\text{km s}^{-1}]$ であり, 一方で日立局は $4.39 \times 10^{-2}[\text{km s}^{-1}]$ である。この差により成分 K が検出されなかったとは考えにくい。

3. 周期解析のための速度成分選出条件を満たさなかった

周期解析が行われた速度成分の詳しい選出方法は不明だが、最も強度の大きい成分（本論文では成分 G）がフレア強度ピークに達した時刻で存在するスペクトルピークのみを解析対象としたために、時間差をもってフレアが発生しているスペクトル成分 K は隣の成分 L に埋もれて解析対象とならなかった可能性がある。

成分 O, P については観測時の検出感度以下であったと判断でき、成分 K については速度成分選出条件を満たしていなかった可能性が高いと考えられる。

4.2 新検出スペクトル成分の分布

G9.62+0.20 のメーザースポットの分布が2つの直線的な分布であり（図 6（左）参照）、 $4.9[\text{km s}^{-1}]$ の速度成分 K は、西側の直線分布領域に存在すると考えられる。O, P 成分は今回用いた VLBI マップの視線速度範囲外のため位置の特定はできない。より広い視線速度範囲をもつ VLBI マップで、成分 O, P の分布特定を行いたい。

4.3 励起源の位置

現段階では新検出メーザーの放射源の詳細位置が不明であり、得られる情報はフレア強度が最大となる時刻の差のみである。VLBI 観測によって強度周期変動のあるメーザースポットの位置が特定できれば、励起源の位置を特定できる可能性がある。

4.4 今後の研究

過去に周期強度変動成分として報告されていて、今回変動成分に分類されなかった成分について、変動指数による強度変動条件の値を引き下げるなどの変更を行い、周期強度変動の有無を再調査する。逆相関が予想される成分 C について、相関関係を明らかにしていく。さらに、新検出の成分の分布を明らかにすることで、励起源の位置に制限をかけていくつもりである。

謝辞

本研究を進めるにあたってお世話になった、百瀬宗武先生、米倉覚則先生、杉山孝一郎さん、宮本裕介さん、斉藤悠さん、Soon Kang Lou さんその他関係者の皆さまにこの場を借りて感謝申し上げます。

付録 A アンテナ温度とフラックス密度の関係

日立局観測スペクトルデータはアンテナ温度 T_A で記録されている。解析を行う際にはフラックス密度 F_ν に換算する。

$$F_\nu = \frac{2k_B}{A_e} \times T_A(\nu) \quad (10)$$

ただし、 k_B はボルツマン定数、 A_e は有効アンテナ開口面積。日立局の場合、 A_e は物理的アンテナ開口面積と等価としてフラックス密度に換算する。

付録 B 離角の算出方法

離角とは地球上から天体を観測した場合に、基準とする天体とどれほどの角度離れているかを表す。天球面上での離角の導出において注意すべきなのは、赤緯が大きくなるほど赤経の幅が圧縮される点にある。それを踏まえた離角の算出式は、中心に置く天体（赤経，赤緯）＝（ RA_1, Dec_1 ），離角を知りたい天体（ RA_2, Dec_2 ）としたとき、

$$\theta = \sqrt{\cos^2\left(\frac{Dec_2 + Dec_1}{2}\right) (RA_2 - RA_1)^2 + (Dec_2 - Dec_1)^2} \quad (11)$$

となる。ただし、赤経の圧縮率を赤緯方向に積分することせず、平均赤緯のときの圧縮率を用いている。

付録 C Goedhart et al.(2003) の強度変動パラメーター I について

変動を特徴づけるパラメーター I を導入する。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N (m(t_i) - \bar{m})^2 - \sum_{i=1}^N (n(t_i) - \bar{n})^2}{\bar{m}} \quad (12)$$

N は観測回数、 $m(t_i)$ は各観測での 1 つのスペクトルピークのフラックス密度、 $n(t_i)$ は各観測でのノイズ成分のフラックス密度、 $\bar{m}$ 、 $\bar{n}$ はそれぞれ $m(t_i)$ の平均、 $n(t_i)$ の平均である。ピークの強度変化がほとんどない場合 I はほぼゼロとなり、 I が負となる場合は S/N が小さく十分な感度で検出されていないときである。

この式は観測日全日における強度平均値との差の 2 乗を足し続けた後に強度平均値で正規化しているだけなので、僅かな変動の蓄積により観測回数が多くなるほど変動強度が大きくなってしまいうちに問題がある。観測回数によらない変動指数とするために、スペクトル成分強の標準偏差とノイズ標準偏差を用いて修正をしたものが式 (6) である。

参考文献

- [1] Fujisawa et al., 2014, PASJ 66,31
- [2] Goedhart S., Gaylard M.J and van der Walt D.J., 2003, MNRAS 339,L33
- [3] Goedhart et al., 2004, MNRAS 355,553G
- [4] Goedhart et al., 2014, MNRAS 437,1808G
- [5] Satoko Sawada-Satoh, 2008,Proceedings of Science p.92
- [6] Walsh et al., 1998, MNRAS 301,640W