

卒 業 論 文

6.7GHz メタノールメーザーと 22GHz 水メーザーが
反相関周期的変動を示す天体の探査

2017 年度
(平成 29 年度)

茨城大学理学部理学科
学際理学コース

14S6029Y

山口祥子

論文要旨

電波が増幅される現象であるメーザーを引き起こすメーザースポットは分子によって異なり、特にメタノール分子と水分子によるメーザー現象は非常に顕著に観測される。6.7GHz のメタノールメーザーをクラス II メタノールメーザーと呼び、これと 22GHz 水メーザーでは発生場所や励起機構が異なるため両者に相関性はないと考えられていた。しかし、近年の研究では両メーザーのメーザースポットの位置や速度成分が一致している天体が発見され、さらに強度変動の挙動が反相関周期的を示す天体 G107.298+5.639 が報告された。

よって本研究では、上記のような挙動を示す天体の探査を行うため、茨城県日立市と高萩市に位置する 2 台の 32m 電波望遠鏡を用いて 6.7GHz メタノールメーザー及び 22GHz 水メーザーを用いたモニター観測を実施した。観測期間は 2017 年 10 月 12 日から 2017 年 11 月 16 日の 36 日間で、対象とする天体は先行研究で発見された天体を含む 10 天体である。なお、これらの天体は 2012 年 12 月 30 日から行われているメタノールメーザーのモニター観測によって得られた、周期 15.2 日から 33.4 日の短周期天体を選出した。

結果として、反相関周期的変動を検出できた天体は先行研究で発見されていた 1 天体のみであり、反相関性を示す可能性がある候補天体が 4 天体、両者の関係性を検出できない天体が 5 天体であった。

候補天体に関して、先行研究に則ってメーザースポットの位置と速度成分と比較したが、必ずしも位置と速度成分が一致していることが反相関的で周期的な強度変動を持つ天体であるという指標にはならないことが判明した。また、メタノールメーザーでの周期性が水メーザーと同値であると仮定できる場合にのみ非常に反相関性がよく検出された。しかしながらすべての天体に当てはまる仮定ではなく、本観測データからは両メーザーの周期が一致していないものも多かった。以上のことを踏まえて、本観測データにはいくつかの誤差や仮定を含むことを考慮しながら追観測をする必要性が高い。

先行研究で発見されたようなモデル天体数を増加させることで、大質量原始星やその物理状態について様々なアプローチの考察をすることが可能になるため、今後さらなる観測によってサンプルを増やしていきたい。

目次

1	研究背景	2
1.1	レーザー現象	2
1.1.1	レーザーの原理	2
1.1.2	メタノールレーザーと水レーザー	2
1.2	先行研究	4
1.2.1	相関関係の発見	4
1.2.2	理論的解釈	5
1.3	本研究の目的	7
2	観測	8
2.1	6.7GHz メタノールレーザーモニター観測	8
2.2	22GHz 水レーザー観測	8
3	解析	10
3.1	LSR 速度	10
3.2	解析方法	11
3.2.1	観測データの取得	11
3.2.2	データ解析のながれ	11
3.3	選出条件	12
4	結果	13
4.1	反相関性を示す天体	14
4.1.1	IRAS22198+6336	14
4.2	反相関性を示す候補天体：Marginal な検出例	16
4.2.1	G012.88+00.48	16
4.2.2	G012.90-00.26	17
4.2.3	G035.79-00.17	17
4.2.4	G034.39+00.24	19
5	考察	21
5.1	速度・位置と強化変動の関係性について	21
5.1.1	G035.79-00.17	21
5.2	メタノールレーザー変動の周期性について	25
5.2.1	G012.88+00.48	26
5.2.2	G034.39+00.26	27
5.3	水レーザーのデータについて	28
5.4	候補天体及び非検出天体について	29
6	まとめ	30

1 研究背景

本章は「シリーズ現代の天文学 6(星間物質と星形成)、及び同シリーズ 16(宇宙の観測 II –電波天文学)」を参考に記述する。

1.1 メーザー現象

1.1.1 メーザーの原理

地上のようなガス密度高いところでは通常、粒子同士の衝突によって各エネルギー準位に存在する粒子数は決定される（熱平衡状態）。二つの準位（準位 1、準位 2）間の粒子数、統計的重率をそれぞれ $(n_1, n_2), (g_1, g_2)$ とすると、これらの比はボルツマン分布に従う式 (1) が与えられる。

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (1)$$

上式は必ず 1 より小さくなり、統計的重率あたりの粒子数は下のエネルギー準位の方が多くなる。しかし、粒子数密度が希薄な宇宙空間ではガス密度が非常に低いため、粒子同士の衝突よりも自然放射や放射によって遷移する誘導放射、吸収の方が卓越する場合がある。したがって二つのエネルギー準位間で下ではなく上の準位に粒子数が多く分布する状態が生じうる。このような状態を反転分布と呼ぶ。

このような状態は非常に不安定であるため、外からこの 2 準位間のエネルギー差に相当する周波数の電波が入射してくると上位の粒子がすぐに下の準位に落ち、同じ周波数帯の電波を誘導放射する。それらがまた隣の分子に入射して同様の放射を起こし、これがカスケード的に生じることで非常に強い放射を出す。このような増幅がメーザー（MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation）と呼ばれる現象である。一般にメーザーは次のような特徴を持つ。

- 強度が局所熱平衡状態に比べて大きい。
- 電波源の広がり（メーザースポット）が極めて小さい点状である。
- 直線偏光または円偏光している。
- 線幅は熱運動による幅よりも小さい場合が多い。
- 電波の位相がそろっている。

1.1.2 メタノールメーザーと水メーザー

大質量星形成領域ではしばしば、水 (H_2O) メーザーやメタノール (CH_3OH) メーザーなどのメーザー源を伴うことが知られている。メタノールメーザー源の分布は輝線によって大きく異なり、クラス I(25GHz など) とクラス II(6.7GHz, 12GHz など) の 2 種類に分類されている。

表 1 は水メーザーとクラス II メタノールメーザーに関して、それぞれの発生領域や励起機構、メーザースポットサイズ、典型的輝度温度について比較しまとめたものである。これによると、両者が検出される条件はすべての項目で大きく異なっているとわかる。

さらに水メーザーやクラス I メタノールメーザーは、超コンパクト H_{II} 領域や赤外線点源などの大質量星形成の指標となる天体との位置的な相関必ずしも良くなく、水メーザーでは 0.1pc 程度、

種類	水メーザー	メタノールメーザー (クラス II)
発生領域	アウトフローと分子雲の境界	降着円盤上
励起機構	衝突励起	赤外線放射による放射励起
メーザースポットサイズ	数 100au	数 au
典型的輝度温度	$10^6 - 10^8$	$> 10^{10}$

表 1 メーザー種の分類

クラス I メタノールメーザーに至っては 1pc 程度離れているものもある。これに対してクラス II メタノールメーザーは大質量星形成の指標となる天体との位置的な相関が良いと言われており、近年、超コンパクト H_{II} 領域が形成されるよりも前の段階から生じると考えられている。

現在までにクラス II メタノールメーザーは現在までに大質量星形成領域以外での検出例がないため、近年では大質量星形成の指標として精力的な観測が行われている一方で、水メーザーは中小質量星形成領域や晩期型星の周囲などでも検出されるため、必ずしも大質量星形成の指標とはならない。

1.2 先行研究

1.2.1 相関関係の発見

現在、水メーザーとクラス II メタノールメーザーの関係性について様々な研究が行われている。

前述した通り、これらはお互いに密度や温度が異なる分子雲の励起を起源としているため励起機構などの性質の違いは大きく、相関関係はないと考えられてきた。

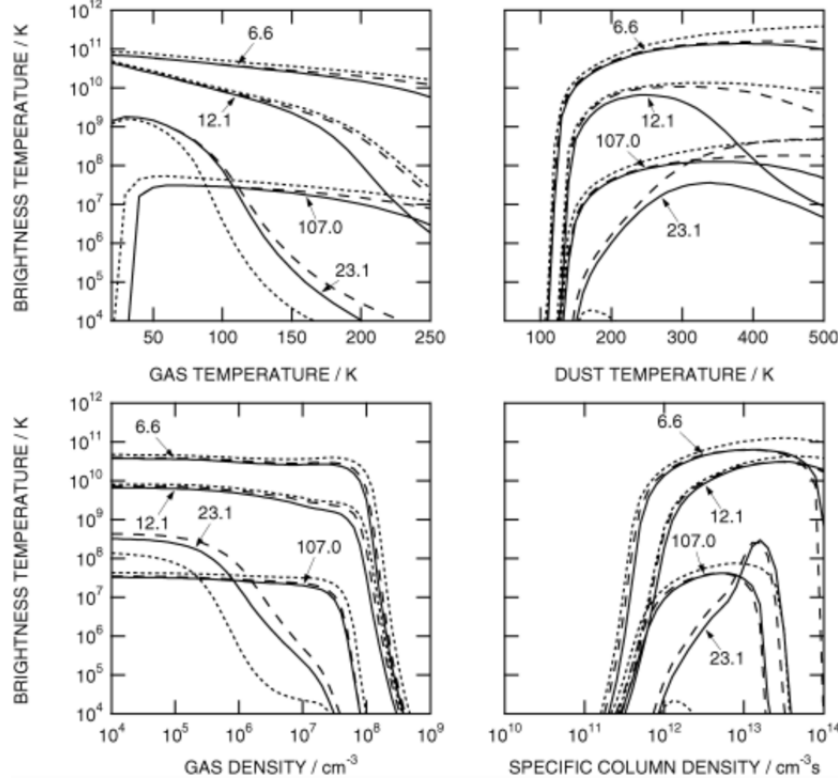


図1 メタノールメーザーの各周波数帯に対応する、それぞれのガス温度（左上）、ダスト温度（右上）、ガス密度（左下）、輻射柱密度（右下）に対する輝度温度。線の種類は各運動量子数 J とねじれ状態 v_t の違いである。

図1はメタノールメーザーに関して、それぞれの周波数帯での挙動の違いを表した図である。今回対象としているのは6.7GHzメタノールメーザーと22GHz水メーザーではあるが、メーザー種の違いを許し周波数帯にのみ着目する。つまりこの中に示されている6.6GHzメタノールメーザーと、22GHz水メーザーの代わりとして23.1GHzのメタノールメーザーを比較していく。

メタノールメーザーは密度 $= 10^4 [\text{cm}^{-3}] - 10^8 [\text{cm}^{-3}]$ の領域で赤外線放射によって励起され、ダスト温度 T_d が120[K]でその輝度温度が急増し、500[K]まで放射が強い範囲が広がっている。また、気体中の分子の熱運動の度合いを表すガス温度（運動学的温度） T_k が30[K]から250[K]に上昇するにつれてメーザー強度が徐々に低下し、 $T_d < T_k$ でメーザー放射は消滅する。一方、水メーザーでは密度 $= 10^4 [\text{cm}^{-3}] - 10^8 [\text{cm}^{-3}]$ 、ガス温度 $T_k = 200 [\text{K}] - 2000 [\text{K}]$ の領域内で衝突によって励起される。ダスト温度 $T_d < 100 [\text{K}]$ では T_d 依存性が小さく、300[K]に達すると水メーザーの強度が1桁小さくなるため、 $T_d < T_k$ で効率的に励起されることが分かる。

しかしいくつかの大質量原始星について両メーザーを観測したところ、それぞれの速度及び場所

が一致するという事実が発見された。図 2 は A.Bartkiewicz et al. (2011) で観測された一例に過ぎないが、水メーザーとメタノールメーザーの励起の位置と速度範囲が一致している天体が存在していることが分かる。

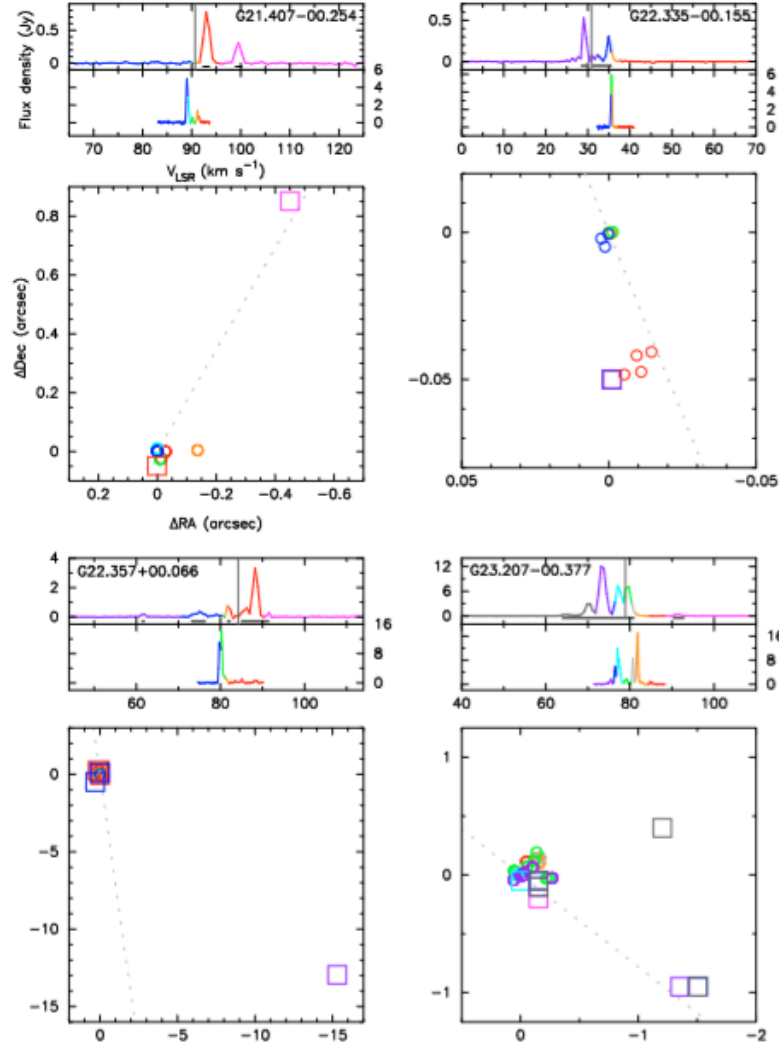


図 2 観測天体に対してのスペクトル（上）とマップ（下）。それぞれ 22GHz 水メーザーは上段、□ で表し 6.7GHz メタノールメーザーは下段、○ で示している。

さらにメタノールメーザーでの周期 34.4 日を示す中間質量原始星 G107.298.5.639 について約 6 ヶ月間の長期間のモニター観測を実施したところ、図 3 に示すように、 $-7.4[\text{km/s}]$ 、 $-11.0[\text{km/s}]$ 、 $-16.4[\text{km/s}]$ 付近のいくつかの速度成分に関して水メーザーとメタノールメーザーの双方で強度変動を確認できる成分が検出された。さらに時系列強度変動を比較してみると、水メーザーのピークがメタノールメーザーの最大値より約半位相 (17-22 日) 遅れて観測された (図 4) ことから、双方のフレア現象が同一周期でかつ交互に生じる、反相関的な周期変動を示すことが明らかになった。

1.2.2 理論的解釈

前章で示した数値的範囲から、両メーザーは $10^4[\text{cm}^{-3}] - 10^8[\text{cm}^{-3}]$ 、運動温度 $200[\text{K}] < T_k < 250[\text{K}]$ の領域内で共存可能だということは自明であろう。ではこのような領域内でなぜ反相関性

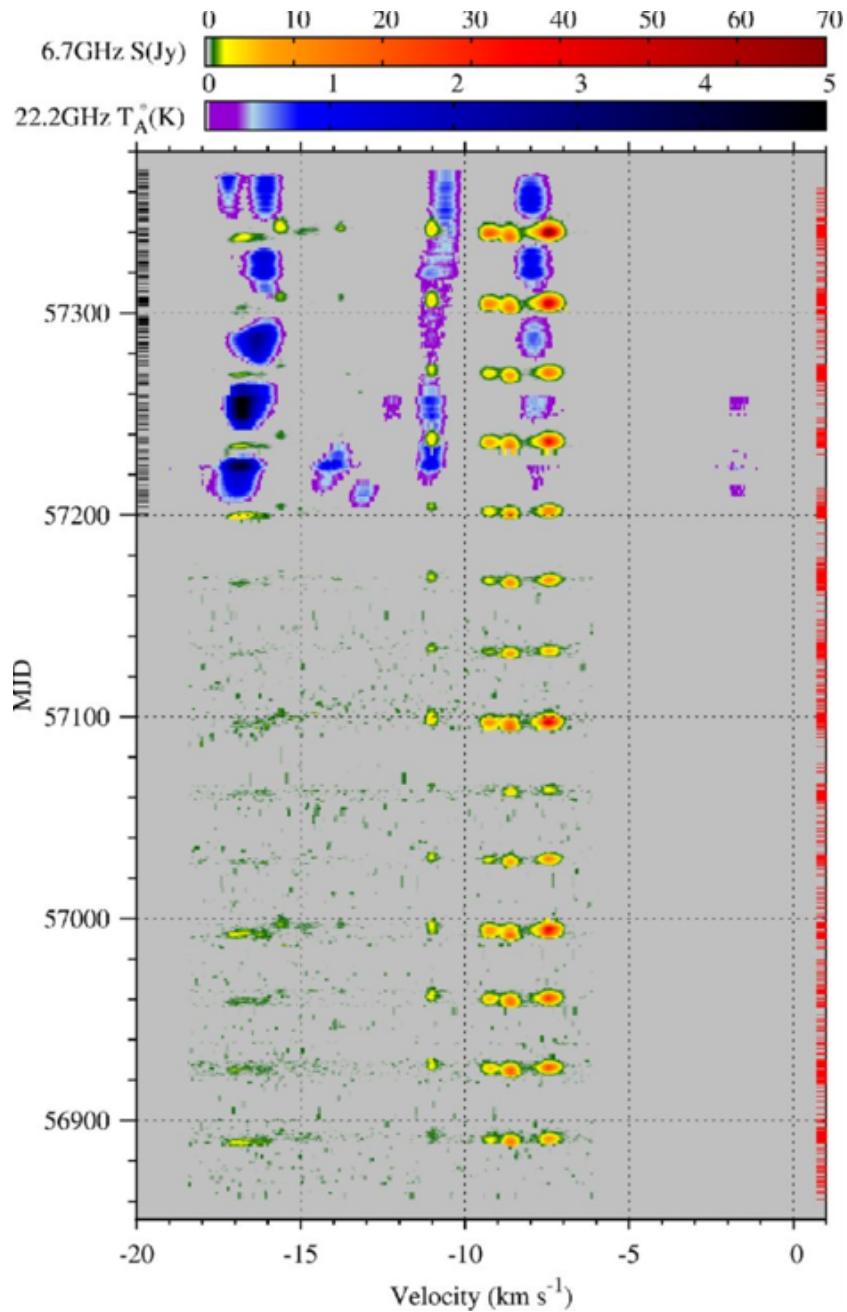


図3 G107 観測によって得られた各速度成分に対応する 6.7GHz メタノールメーザーのフラックス密度（上）と 22GHz 水メーザーのアンテナ温度（下）。[4] 参照。

が生じるのであろうか。その理論的な解釈について M. Szymczak et al. (2016) では以下のような見解が示されている。

原始星が連星系である場合、それらに付随する磁気圏と降着円盤との相互作用（bow shock）に起因する降着不安定性、もしくは連星系の公転運動に起因する周期的な降着不安定性が起こると期待される。降着率が上昇するとそれに伴いダスト温度 T_d も上昇し、赤外線放射励起のメタノールメーザーは強くなる一方で衝突励起の水メーザーは弱くなるといった反相関性が期待できる。降着円盤とは、天体にガスが落ち込む場合に主星の周りにリングを形成し広がってできる円盤のことを指し、円盤ガスの粘性により回転の運動エネルギーが熱エネルギーへと転化し円盤ガスを加熱させる。よって放射物質の中心部に関する温度変化を大きく左右するダスト温度は、運動温度と比べて

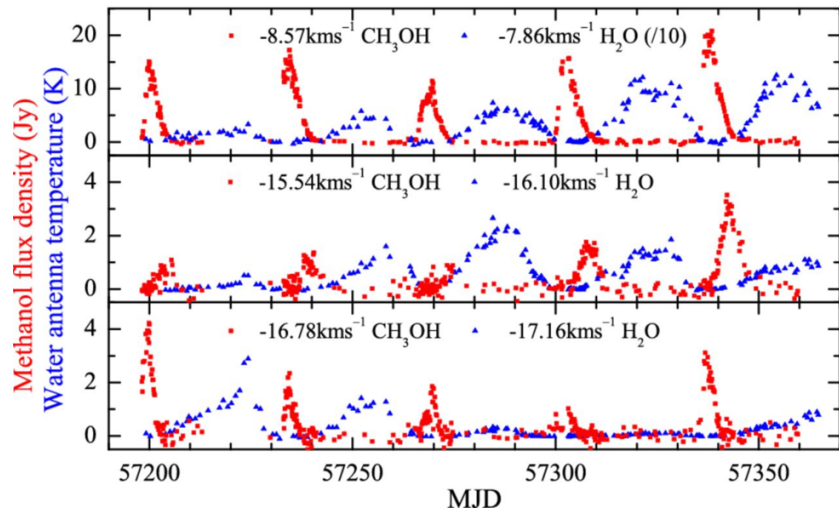


図4 速度成分差 1.1km/s 以内で検出された 6.7GHz メタノールメーザー（赤）と 22GHz 水メーザー（青）の光度曲線。[4] 参照。

も十分速く反応することが可能となる。以上よりダスト温度が水メーザーとメタノールメーザーの強度をコントロールしているため、このダスト温度を変化させるような要因について明らかにすることで大質量原始惑星周囲の物理状態を解明する手がかりを与え得る。

1.3 本研究の目的

大質量原始惑星の周囲の物理状態を知ることは、今後の電波天文学において大きな意味を持っている。しかしながら先行研究のように 1 天体でのみしか検出されていないため、この理論解釈が普遍的に正しいかは断言できない。周波数帯の異なる水メーザーとメタノールメーザーが反相関周期的変動を示すかどうかを明らかにするためには、同様の挙動を示す天体をより大きなサンプルから探すことで統計的調査を行っていく必要がある。そこで本研究では、先行研究と同じような変動を示す天体の探査を行い、大質量原始惑星周囲の物理状態についてより普遍的な知見を得ることを目的とした。

2 観測

2.1 6.7GHz メタノールメーザーモニター観測

茨城大学の電波天文観測グループでは、茨城県日立市・高萩市にある 2 台の 32m 電波望遠鏡のうち、日立市に位置する望遠鏡を用いて 2012 年 12 月 30 日から現在にかけて 4 期に分けてメタノールメーザーを用いたモニター観測を行っている。モニター観測とは同一天体について、ある期間で複数回継続して観測を行うことである。以下に示すように、これまでに 4 つの各モニター期間を設けてきた。

第 1 期	2012/12/30-2014/01/10
第 2 期	2014/05/07-2015/08/24
第 3 期	2015/09/18/2017/03/07
第 4 期	2017/06/14-

このうち第 3 期までの観測結果を用いた解析では、短周期的な強度変動をしている天体が 39 天体検出されている [9]。

2.2 22GHz 水メーザー観測

第 3 期までの観測でメタノールメーザーが検出された大質量星のうち、本研究の観測期間に対応する 15.2 日-33.4 日の周期をもつ 10 天体を選出した。[9] これらに校正天体を加えた合計 13 天体を高萩市に位置する電波望遠鏡で観測し、その期間に対応する同一天体の第 4 期のメタノール観測と比較を行う。

表 2 に観測諸元をまとめる。

電波望遠鏡	日立 32m	高萩 32m
対象メーザー源	6.7GHz メタノールメーザー	22GHz 水メーザー
観測周波数	6664[MHz]-6672[MHz]	22219[MHz]-22251[MHz]
観測対象天体	10 天体 (水メーザー +3 天体)	
観測期間	2017/10/12-1017/11/16	
積分時間	5[min/source]	20[min/source]* ¹
分光点数	8192	2048
速度分解能	0.044[km/s]	1.21[km/s]
3 σ ノイズレベル	0.9[Jy]	1.1[Jy]

表 2 観測諸元

なお、各天体の観測頻度は 4-5 日に 1 回もしくは 1 日 1 回である。しかし、アンテナ保守やグリスアップ作業との兼ね合いもあり、MJD が 58042 から 58055 あたりのメタノールメーザーのモニ

*¹ 5 分積分を 4 回行い平均化

ター観測頻度が落ちている天体もある。

year/month/day	DOY	MJD
2017/10/12	17285	58038
2017/10/18	17291	58044
2017/10/23	17296	58049
2017/10/31	17304	58057
2017/11/01	17305	58058
2017/11/02	17306	58059
2017/11/03	17307	58060
2017/11/08	17312	58065
2017/11/09	17313	58066
2017/11/10	17314	58067
2017/11/11	17315	58068
2017/11/12	17316	58069
2017/11/13	17317	58070
2017/11/14	17318	58071
2017/11/15	17319	58072
2017/11/16	17320	58073

表 3 水メーザー観測日時

水メーザーの観測日時は表 3 の通りであり、観測日数は 36 日間中 16 日である。ここで DOY とは西暦 2017/01/01 を 17001 とした時の通算日を示し、MJD は修正シリウス日と呼ばれるもので 1858/11/17 を 0 とした通算日である。表からわかる通り、水メーザー観測を実施した前半期間は特に観測頻度が低くなっている。

3 解析

3.1 LSR 速度

太陽近傍の星は銀河系内の大局的な回転運動成分と星固有のランダムな運動成分をもっている。この銀河系の回転を加味した対象天体の視線速度成分を測る際には、局所静止基準 (LSR; Local Standard of Rest) を用いる。この局所静止基準の定義は「太陽の近傍における平均的銀河系回転運動にのった慣性座標」であり、銀河系の回転を考慮する際の基準となる重要な概念である。LSR と銀河系中心の距離を R_0 、LSR が持つ銀河系回転速度を Θ_0 とした時、これらを銀河定数と呼び、1985 年の国際天文学連合の決議により推奨値 $R_0 = 8.5[\text{pc}]$ 、 $\Theta_0 = 220[\text{km/s}]$ が与えられている。

この LSR 系と併せて太陽円の概念を導入する。これは銀河中心を原点として、半径 R_0 の円上に太陽が存在する。この太陽円を境界に銀河円盤を二つに分類すると、太陽円の内側を内銀河、外側を外銀河と呼ぶことができる。以下では、天体が内銀河に位置する場合について考察する (図 5)。

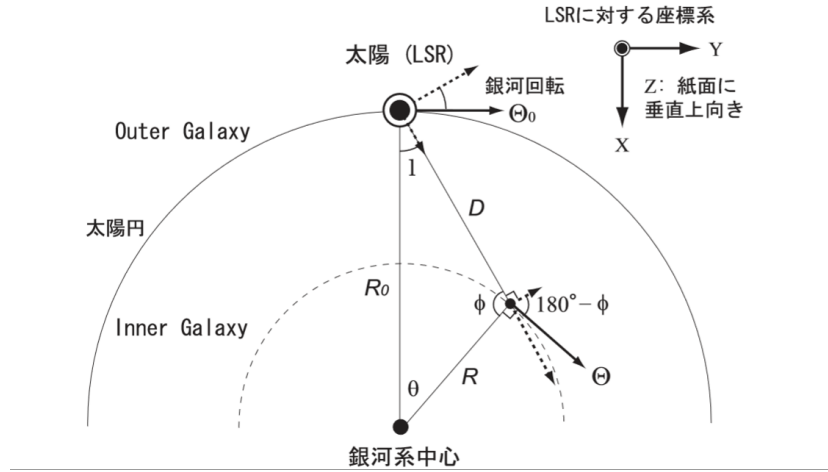


図 5 円盤上空から銀河系円盤を見た時の模式図。

天体が銀河系回転によって完全な円運動をしている状況について、視線方向の速度を V_r は観測天体と LSR の速度成分の差として与えられているため、

$$V_r = \Theta \sin(180^\circ - \phi) - \Theta_0 \sin l \quad (2)$$

と表せる。ここで、 Θ は銀河系の回転速度、 l は銀経と呼ばれ、天球上の経度に相当する。また、三角関数の性質により、

$$\sin(180^\circ - \phi) = \sin \phi \quad (3)$$

$$\frac{\sin \phi}{R_0} = \frac{\sin l}{R} \quad (4)$$

となるため、これらの式を整理すると、

$$V_r = \left(\frac{\Theta}{R} - \frac{\Theta_0}{R_0} \right) R_0 \sin l \quad (5)$$

が導かれる。

3.2 解析方法

実際に観測される視線速度は、天体の視線速度と観測者自身の視線速度を考えなければならない。この観測者自身の視線速度とは地球の公転や自転、太陽系の運動によって生ずる成分であり、これらが先の LSR に対してどのように動いているかを求めることが必要とされる。こうして求められたドップラー効果を用いて周波数から視線速度へと換算することが可能となり、この作業を踏まえて観測データを解析していく。

3.2.1 観測データの取得

それぞれのメーザー源と天体に関して、天体の「ON 点」と「OFF 点」、そして基準点となる「黒体」の 3 種類のデータを取得する必要がある。ここで「OFF 点」とは観測点ではないところを指し、単一鏡においてビーム 1 つの受信機で観測している場合は、その光軸上のデータしか取得することができない。よって、点状の電波源やその位置の情報にだけ着目しているため、その天体にアンテナを指向させ（ON 点）、またその周辺の天体のない点（OFF 点）を観測し、その差分をとり大気と望遠鏡の放射・吸収を補正する。

3.2.2 データ解析のながれ

取得したデータの解析方法は以下のとおりである。

- 観測した各天体について、縦軸を輝度温度、横軸を LSR における天体の視線速度としてグラフを作成した。輝度温度とは電波強度を黒体放射にて同じ周波数での同じ強度をだす黒体温度に変換したものである。ここで各メーザーにフレアのようなスペクトルが観測されているかどうかを確認した。
- これらの放射を示している速度成分 $\pm 10[\text{km/s}]$ を求め、この速度をもとに放射を示さない速度部分を一次式で近似した。生のデータはスペクトルにオフセットが加わりベースラインがうねってしまうため、このように一次式近似したもので適合させて差し引くことでより正確なスペクトルを得ることができる。
- 以上の作業を踏まえて一日に観測したすべてのデータを平均化し、改めて横軸速度、縦軸強度に関するグラフを作成した。1 日 1 天体あたり 1 個のスペクトルを得た。
- それぞれの天体に対して観測日毎のピーク値を持つ速度成分と強度を求めた。天体によっては複数個のピーク値を持つものもあるが、それらすべての成分について調査した。
- 以上の作業を踏まえて得られた各成分に対応する強度変動プロットを横軸観測日で作成し、メタノールメーザーと水メーザーの強度変動の様子を比較した。

3.3 選出条件

本研究の目的である「6.7GHz メタノールメーザーと 22Ghz 水メーザーが反相関周期的変動を示す天体」の探査条件として以下の項目にそって調査を行った。

- 1 メタノールメーザーと水メーザーで検出された速度成分に速度差が $\pm 1[\text{km/s}]$ 以内の成分が両者に存在する。
- 2 両者の時系列強度変動プロットを比較する。
- 3 両メーザーについて双方が強度変動を示しているかを確認した。
- 4-1 強度変動が見られた場合には、
 どちらか一方のメーザーに複数の強度極大日が存在している場合には、その中間付近の日にもう一方のメーザー強度が極大を迎えている、
 または強度極大日が 1 つしか存在しない場合には立ち上がりや減少の様子に反相関性がみられる。
- 4-2 強度変動が見られない場合には、相対的に一方のメーザーの強度が増加、もしくは減少の場合に他方が逆の変動を示している。

上記は先行研究 [4] で用いられていた条件を踏襲した。しかしながら、本観測では先行研究ほど長い観測期間のデータを得ることができなかったため、さらに強度変動の周期的な大きな変化によってのみではなく、各観測日での小さな挙動に関しても調査を行った。

4 結果

今回の観測の結果、観測対象天体 10 天体のうち選出条件を確実に満たしている天体は 1 天体であり、これは先行研究で発見されている天体だった。また、本観測では確実に周期性が見られるとは断言できないが、挙動が反相関性を示す可能性がある予備天体は 4 つ検出された。以下の表 4 で全対象天体の結果をまとめる。なお、表中の周期はメタノールメーザーでの観測結果をもとに得られたものである。

検出あり		
検出タイプ	天体名	周期 (日)
A	IRAS22198+6336	34.6
候補天体		
検出タイプ	天体名	周期 (日)
Ba	G012.88+00.48	29.5
Ba	G012.90-00.26	25.4
Bac	G035.79-00.17	33.4
Bbc	G034.39+00.24	29.2
検出なし		
検出タイプ	天体名	周期 (日)
a	G024.64-00.33	15.2
c	G014.23-00.50	23.9
	G052.66-01.09	14.9
d	G019.75-00.12	21.9
	G033.40+00.01	31.4

表 4 対象天体の観測結果

なお、表の検出タイプは以下に従っている。

- A どちらかのメーザーのピークがもう一方のピークの間付近で検出。
- B 両者の強度の増減の挙動が一致している。
- a 変動に反相関性がない。
- b 変動に周期性がみられない。
- c 両者に対応する速度成分が存在しない。
- d 水メーザーでの検出成分が存在しない。

4.1 反相関性を示す天体

反相関周期性を示す天体についてまとめていく。以下解析結果を示すグラフに関して、強度変動の様子を観察したいため状況に応じて縦軸のスケールは異なっているが、本研究では強度の変動を調べるため問題ではない。

4.1.1 IRAS22198+6336

本研究で唯一水メーザーとメタノールメーザーの反相関性を検出できた天体である。これは M. Szymczak による先行研究で示された G107.298+5.639 と同一天体である。6.7GHz メタノールメーザーでは 7 つの視線速度成分、22GHz 水メーザーでは 6 つの視線速度成分で強度変化がみられ、このうち 4 成分 ($-16.8[\text{km/s}]$, $-15.9[\text{km/s}]$, $-11.5[\text{km/s}]$, $-7.8[\text{km/s}]$) で両メーザーの強度変動が観測された。これらについて時系列強度変動の図を作成したところ、すべての速度成分で似たような挙動が検出された。(図 6)。

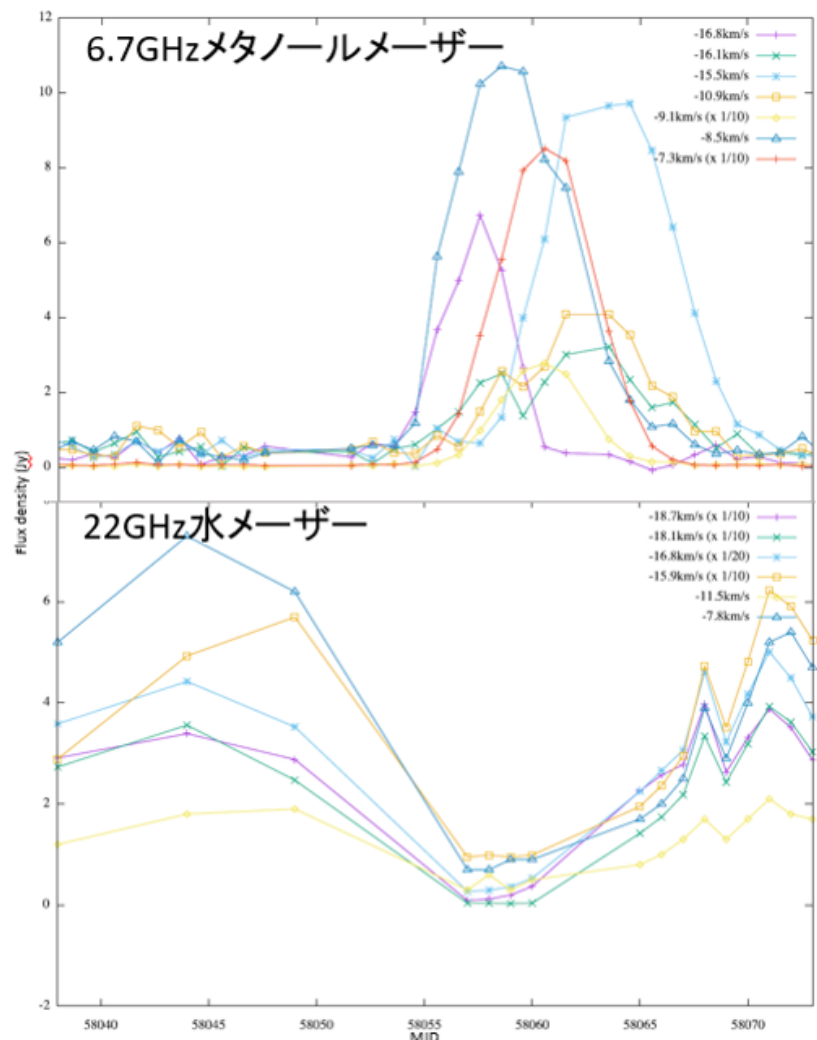


図 6 IRAS22198+6336 の時系列強度変動プロット。上図がメタノールメーザー、下図が水メーザーを示す。

この図 6 は、それぞれのメーザー線で観測されたピーク値を示す速度成分と強度を求め、横軸の

観測日時 (MJD) に対する各速度成分の強度をフラックス密度 (Jy) で表したものである。下の水メーザーでは MJD が 58044 と 58070 付近でピーク値を取っており、この期間は 34 日とメタノールメーザーで求めた周期とおおよそ一致している。一方のメタノールメーザーではピーク値が 1 つしか検出されていないためそれ自身で周期性を確認することはできないが、約 MJD が 58057 から 58063 の近傍でピークをとっている。先行研究で得られた周期の半分の 17.3 日を仮定してみると、この両者のピークはだいたい 13 日から 19 日程度ずれていることが分かるためこの仮定を満たしている。両者のピークが半位相ずれているという事実から、本天体の反相関周期変動天体であると推定することができる。

4.2 反相関性を示す候補天体：Marginal な検出例

先行研究に則って解析を行った場合では反相関性を示しているとは言えないが、挙動の様子に反相関性と矛盾しない挙動をみることができた天体についてまとめていく。先の IRAS22198+6336 では全成分で似たような変動をしていたが、その他の天体では変動の様子が各速度成分で大きく異なる場合が多かった。そのため以降は、両メーザーの ± 1.0 [km/s] 以内に対応する成分を選出それぞれ 1 つのグラフにまとめることとする。

4.2.1 G012.88+00.48

G012.88+00.48 はメタノールメーザーの変動周期 29.5 日の天体で、メタノールメーザーで 11 成分、水メーザーで 2 成分の速度成分のスペクトルを得ることができた。水メーザーでの速度成分に対応するメタノールメーザーの成分を取り出し比較した結果が図 7、図 8 と表 5 である。

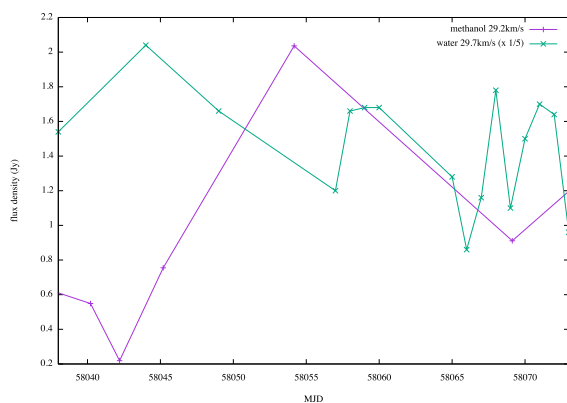


図 7 29.7km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

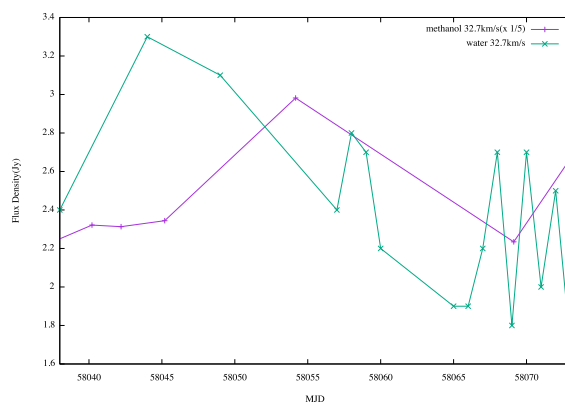


図 8 32.7m/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

タイプ	水メーザー視線速度 [km/s]	メタノールメーザー視線速度 [km/s]
B	29.7	29.2
a	32.7	32.7

表 5 G012.88+00.48 の解析結果

なお、先でも述べたアンテナ運用の兼ね合いにより、メタノールメーザーでの観測データが観測期間前半で非常に少なくなっている。そのため周期 29.5 日を示すような強度変動をグラフから確認することはできない。さらに、水メーザーのピーク値が見られる MJD=58045 付近からメタノールメーザーでのピーク値までのズレはおおよそ 10 日程度である。周期の半分が約 15 日であるため、半周期の位相ズレとは言えない。しかしながら、周期性はないが速度 29.7km/s に関する図では MJD=58043, 58055, 58069 付近でのそれぞれの増減の様子が反相関性を示唆するようにもとれる。

4.2.2 G012.90-00.26

G012.90-00.26 はメタノールメーザーの変動周期 25.4 日の天体で、メタノールメーザーでは 8 成分、水メーザーでは 2 成分の強度変動を示す速度成分が検出された。

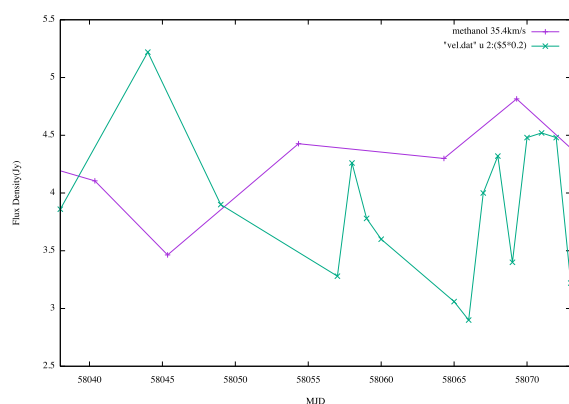


図 9 34.8km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

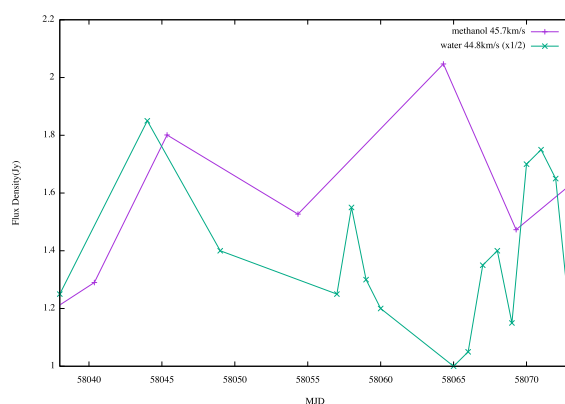


図 10 44.8m/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

タイプ	水メーザー視線速度 [km/s]	メタノールメーザー視線速度 [km/s]
B	34.8	35.4
a	44.8	45.7

表 6 G012.90-00.26 の解析結果

周期が 25.4 日に対して、十分な観測点がないため周期性、及び半周期分の位相のズレを見出すことはやはり難しい。しかし、特に図 9 であらわした 35.4[km/s] 近傍の時系列強度変動プロットをみると、水メーザーは MJD=58038 で極大、MJD=58067 で極小を迎え、対するメタノールは MJD=58038 で極小、MJD=58070 で極大を迎えているとおおまかにだがみなせる。つまり、ピーク値のズレは周期の半分ではないが、極小・極大値の増減の挙動は反相関性を示している可能性がある。

4.2.3 G035.79-00.17

G035.79-00.17 はメタノールメーザーの変動周期 33.4 日の天体であり、メタノールメーザーで 13 成分、水メーザーで 4 成分の強度変動を示す速度成分がみられた。

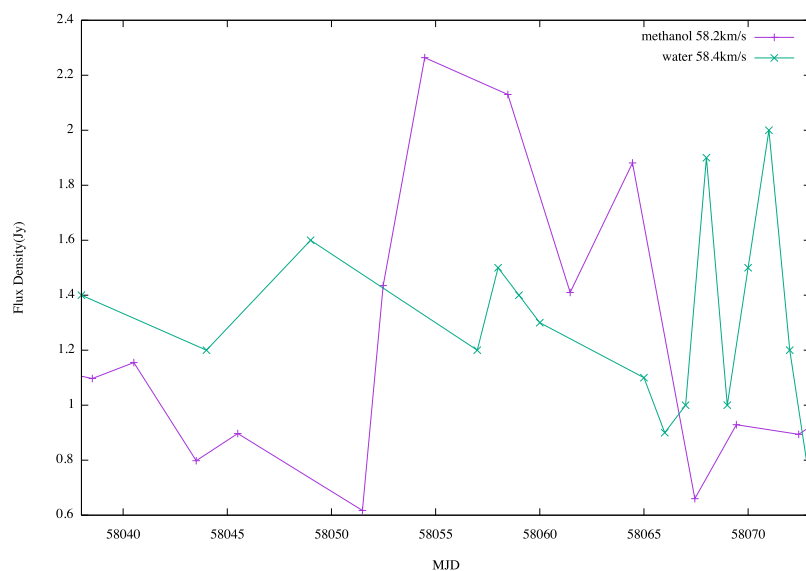


図 11 58.4km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

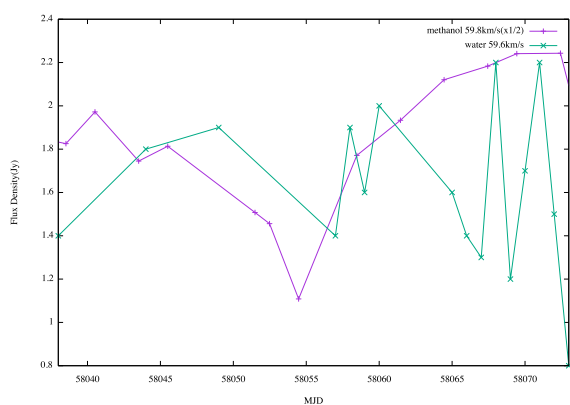


図 12 59.6km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

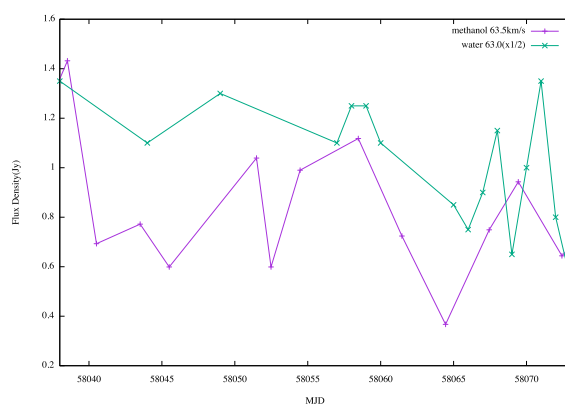


図 13 63.0m/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

タイプ	水メーザー視線速度 [km/s]	メタノールメーザー視線速度 [km/s]
B	58.4	58.0
B		58.2
B		58.7
a		57.8
a	59.6	59.8
a	63.0	63.5
c	76.5	-

表 7 G035.79-00.17 の解析結果

メタノールメーザーの強度は様々であるためスケールの違いもあるが、水メーザーの速度成分 $\pm 1[\text{km/s}]$ 以内の成分でも挙動には差がある。最も反相関的な挙動に近い図が図 11 である。メタノールメーザーのピークが MJD=58055 から 58060 でとるとした場合、ピークの立ち上がる瞬間の MJD=58053 付近と最も静穏になった瞬間の MJD=58068 付近で、水メーザーと反相関的になっているとみることができる。メタノールの周期 33.4 日と水メーザーが近いと仮定すると、観測期間の少し前の MJD=58030 周辺でピークをとることが期待され、ピークの半周期分の位相ズレも示唆される。

その他、図 12 と図 13 はところどころ正反対の挙動を示しているように見える部分もあるが、大きな周期変動関数をみなした場合にはほぼ変動の仕方が同じであるか、周期性を見出せない。

4.2.4 G034.39+00.24

G034.39+00.24 はメタノールメーザーの変動周期 29.2 日の天体であり、メタノールメーザーでは 8 成分、水メーザーでは 7 成分の強度変動を示す成分が観測された。

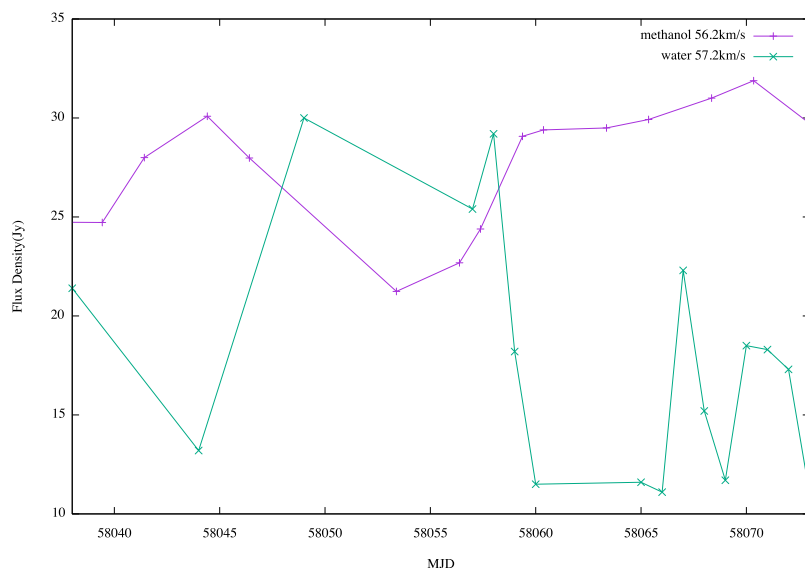


図 14 57.2km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

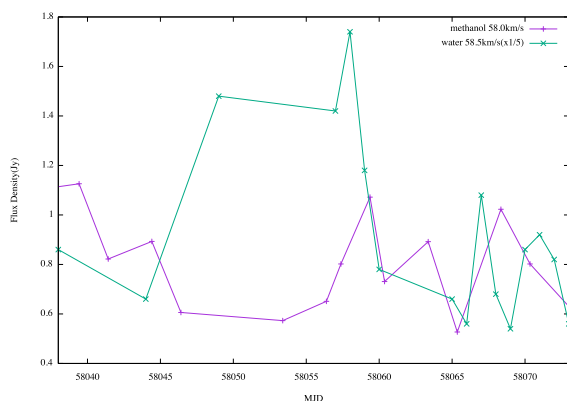


図 15 58.5km/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

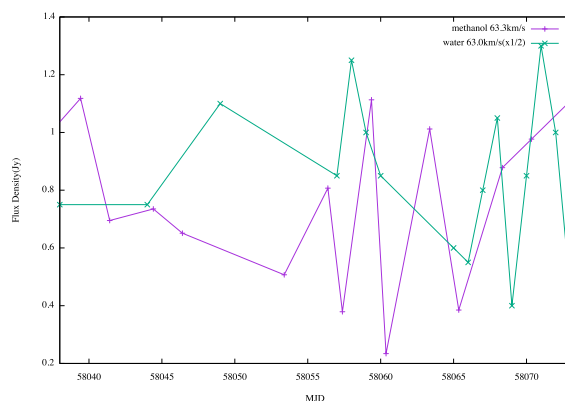


図 16 63.0m/s 近傍の時系列強度変動プロット。紫がメタノールメーザー、緑が水メーザーを示す。

タイプ	水メーザー視線速度 [km/s]	メタノールメーザー視線速度 [km/s]
B	57.2	56.2
b	58.5	58.0
b	63.0	62.5
b		63.3
c	46.0	-
c	52.0	-
c	66.8	-
c	101.2	-

表 8 G034.39+00.24 の解析結果

図 14 の時系列強度変動プロットの挙動は、メタノールのピークが MJD=58045 と MJD=58073 でとるとすると、おおよそ理論値の周期 29.2 日に近い 28 日であると導ける。対する水メーザーの変動の様子を見てみると、こちらには周期性があると断言は厳しいがメタノールメーザーの周期変動の極小値にあたるところで観測期間内のピークを迎えている。その他の速度成分では必ずしも当てはまらないが、水メーザー 57.2[km/s] での反相関周期変動を示す可能性は高いと考えられる。

5 考察

5.1 速度・位置と強化変動の関係性について

先行研究 [1] で報告されたメーザー源の位置と視線速度成分が一致しているという研究をふまえて、反相関周期性を示す候補天体との関連性を調査する。これにより両者の関係性が導ければ、メタノールメーザーが付随する大質量星の解明や新たな物理状態の発見へつながることが期待される。

5.1.1 G035.79-00.17

候補天体 4 天体の内、A. Bartkiewicz による先行研究で対象天体になっていた G035.79-00.17 天体について詳しく調査を行った。

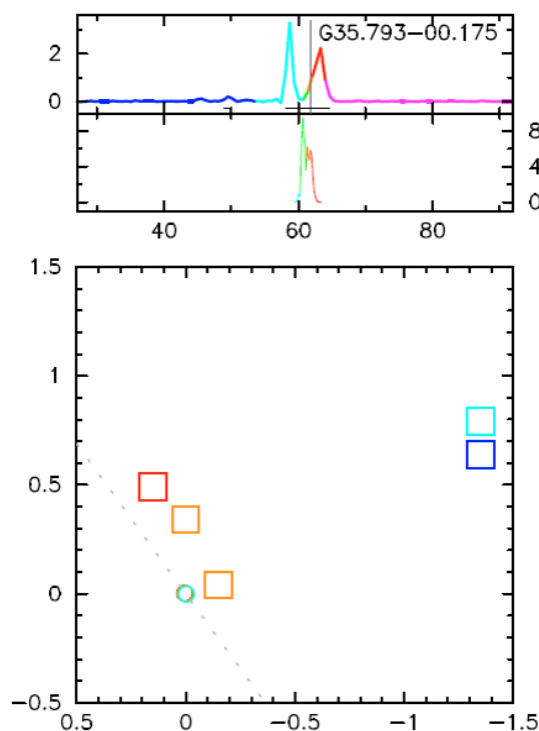


図 17 G035.79-00.17 に関する水メーザー (上段、□) とメタノールメーザー (下段、○) のスペクトルとマップ。スペクトルに関する図は縦軸フラックス密度 (Jy)、横軸視線速度 (km/s) であり、灰色の線はシステム速度を表す。水メーザースペクトルの下に書かれている細いアンダーラインは水メーザー源の速度範囲を示している。マップに関しては縦軸赤緯 ($\Delta \text{Dec} [\text{arcsec}]$)、横軸赤経 ($\Delta \text{RA} [\text{arcsec}]$) であり、点線は中赤外線での位置角を示している。A.Bartkiewicz et al(2011) 図 1 より抜粋。

図 17 は、図 2 から本天体についての結果を抜き出したものである。スペクトルに関しては本研究で検出された 58.4[km/s]、59.6[km/s]、63.0[km/s] 近傍に水メーザーでの成分が検出されているため、速度成分に関する条件は満たしているとする。メタノールの速度成分では 60.0[km/s] 近傍での検出が顕著であるが、本研究で検出した速度成分でも同様の範囲の速度成分が相対的に大き

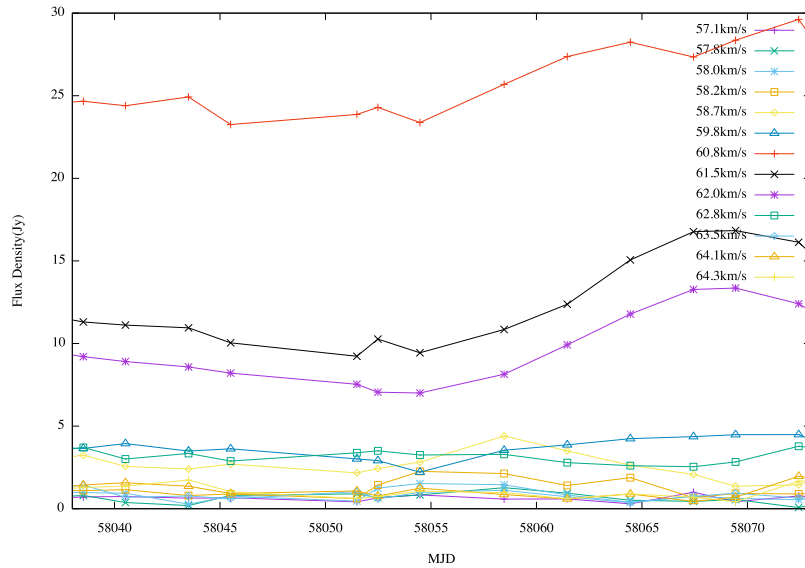


図 18 G035.79-00.17 のメタノールメーザーで観測された全速度成分に対する強度変動プロット。

かった (図 18) ため矛盾はない。よって、A.Bartkiewicz の研究に基づいて考察をすると、顕著に表れている速度成分がメタノールメーザーと水メーザーでは異なっているが、それぞれの速度成分に対応していることは確認できた。

次に、マップに関して考察する。マップの赤経赤緯で示された各メーザー放射源はそれぞれの速度成分と色に対応しているが、約 60.0[km/s] 付近の黄色と黄緑色の □ と ○ に着目する。それぞれ水メーザーとメタノールメーザーの位置は最も近いところで赤経 0.1[arcsec] ほどのズレしか観測されなかった。その他の速度成分に関しては対応するメタノールメーザーでのデータがないため比較できない。

これらを踏まえて本研究の結果と比較していく。まず、メタノールメーザーでの強度変動が顕著であった速度成分に最も近い 59.6[km/s](図 12) について改めて注目すると、水メーザーの強度変動の様子に周期性を見出しことが難しく、反相関性を示しているとは考えにくい。しかし、水メーザーのノイズレベルの大きさを考慮すると、観測期間後半の変動をある程度の周期でフィッティングできる可能性がある。つまり水メーザーの変動が MJD=58048 で極大を迎え、MJD=58073 で極小を迎えているようなサイン曲線であるとすれば、理論値に当たる半周期の 17 日に近い 15 日という値が見出されるはずで、その場合、メタノールメーザーの強度変動の極大・極小値を反相関的な挙動であるとみなすことができる。

果たしてこの可能性は正しいのでしょうか。図 19 は先行研究の G107.298+5.639 のスペクトルの様子を各観測日ごとであらわしたものである。この図をみると、最も顕著に反相関性が現れている速度成分 -8.0 [km/s] と -16.7 [km/s] では、両メーザーの静穏時とフレア発生時が交互に起きていることがみてとれる。具体的に数値で見えてみると、速度成分 -8.0 [km/s] に関して MJD=57315 から 57311 までは青で示された水メーザーのスペクトルが顕著にみられるが、その後は静穏状態を維持している。対する赤のメタノールメーザーは MJD が 57336 以降で急激に強度が大きくなっており、まさに反相関的な変動を示しているといえるだろう。

このような挙動が確認できれば、本研究の G035.79-00.17 についても適用できるため、同様のスペクトルを作成した (図 20)。今回の対応速度成分である 59.6[km/s] 付近に着目すると、メタノール

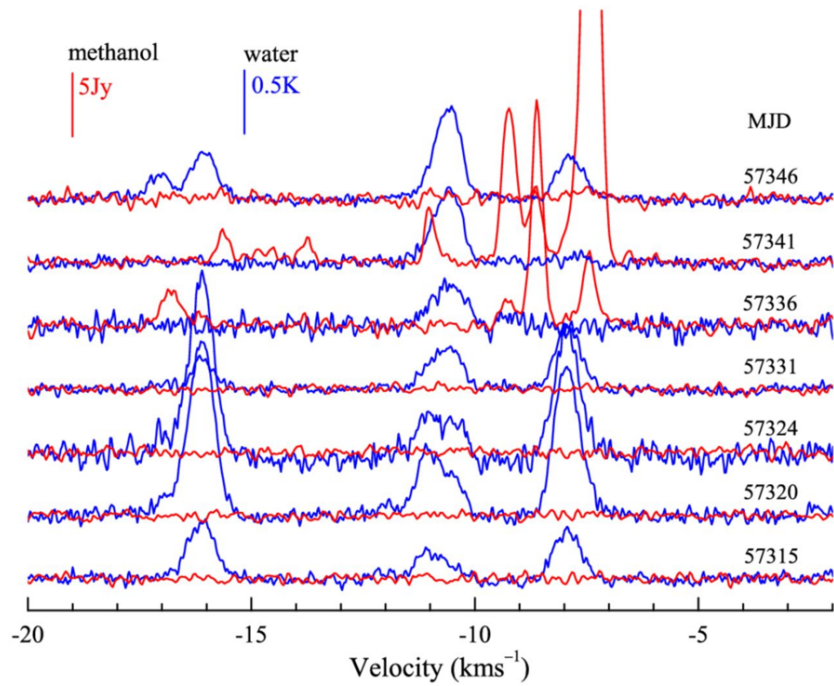


図 19 天体 G107 に対する 6.7GHz メタノールメーザー（赤）と 22GHz 水メーザー（青）スペクトル変化の様子。M.Szymczak et al.(2016) の図 2 より抜粋。

ルメーザーは常に励起された状態が継続していることが確認できる。この状態で多少の変動はしているが、先の図 19 と比べてると変動を示しているとは言い難い。

一方で § 4.2.3 で最も反相関性が顕著であった図 11 に関しても同様に調査を行った。こちらでもかなり変化の様子が小さいため明らかにすることは難しいが、観測中間付近でメタノールメーザーが少し励起状態になっていることが確認できる。水メーザーは逆に静穏になっているとは見れないが、観測期間の終盤あたりに少し強度が大きくなっているようにも見られるため、やはり 59.6[km/s] 成分と比べると反相関性を示している可能性は比較的高い。しかしながらこの速度成分では、マップから速度と位置に同一性を見出すことができていない。

以上のことを踏まえると、一概にメーザースポットの視線速度と位置が一致していることが反相関性を示す指標とはならないといえるだろう。しかしながら、反相関周期的変動を生じさせるメカニズムの解明にはこれらの関係性を明らかにすることが期待されているため、追観測等でさらに検証していく必要がある。

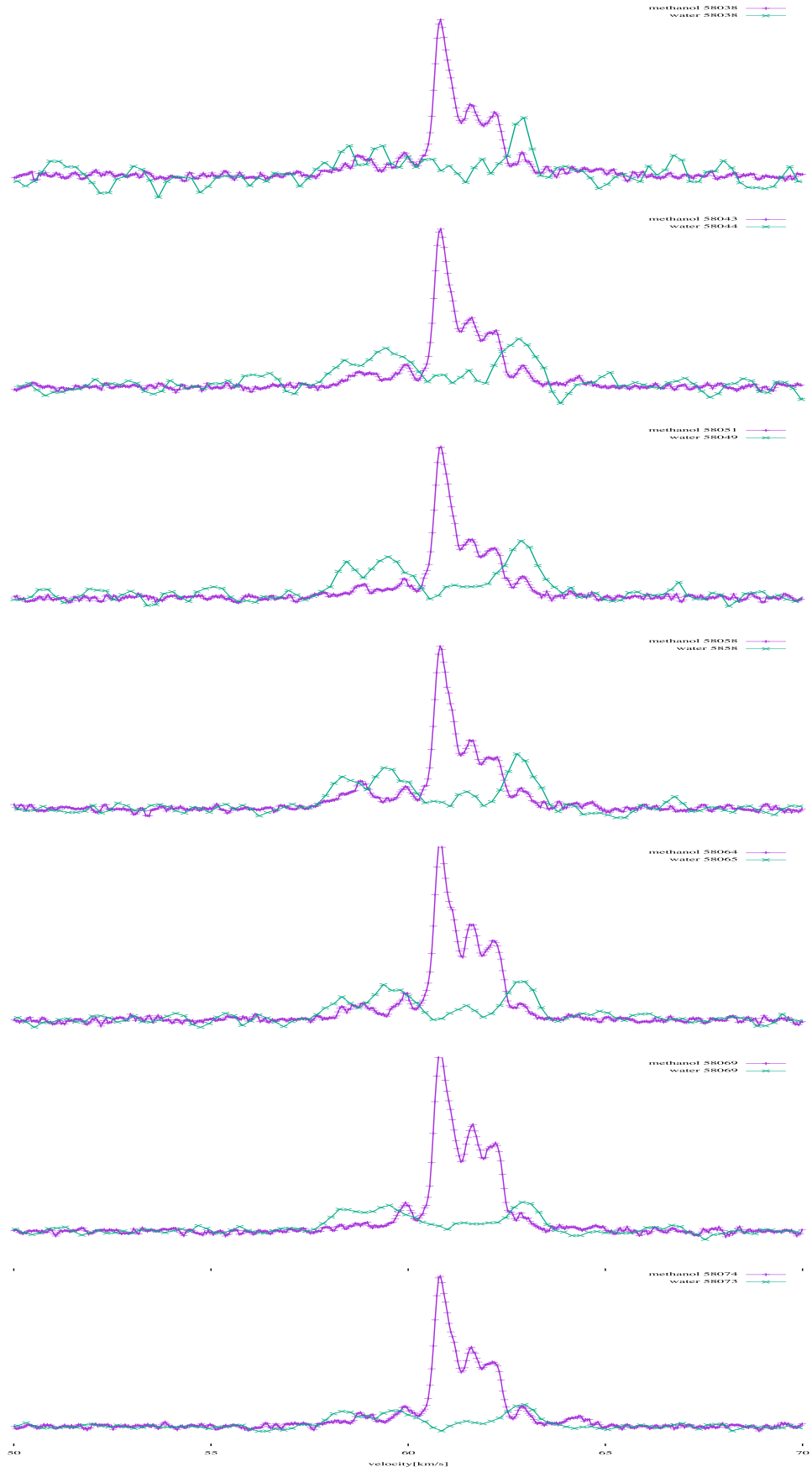


図 20 G035.79-00.17 の各観測日におけるスペクトル。縦軸は強度を示しており、それぞれ 0[Jy]-8[Jy] である。メタノールレーザーが紫、水レーザーが緑であらわされている。

5.2 メタノールメーザー変動の周期性について

G035.79-00.17 の考察より、周期性が発見されている天体あったとしてもすべての成分に周期性が当てはまらないということが分かった。これは先行研究 [9] の指摘を再確認したことになる。ここではさらに本研究の目的である反相関「周期的」変動という点を考察するため、メタノールメーザー観測で発見された各天体のそれぞれの周期性をもつ速度成分に対応があるかどうかを確認する。今回考察するのは候補天体の 4 天体であるため、これらについて [9] を参考にして一覧を表 9 にした。

天体名	視線速度 [km/s]	周期 (日)
G012.88+00.48	31.74	29.6
	31.85	
	32.75	
	33.43	
	33.65	
	34.66	
	36.57	
	37.81	
	38.71	
	39.16	
G012.90-00.26	36.95	25.4
G034.39+00.24	55.67	29.3
	60.46	
	61.45	
	62.53	
G035.79-00.17	61.55	33.4
	62.02	

表 9 6.7GHz メタノールメーザー観測より得られた周期一覧。[9] より抜粋。

表 9 に示されている視線速度に対応して ± 1.0 [km/s] 以内で一致する成分には周期性が見られると予想した。先の § 4.2 でまとめた表 5 から表 8 に関して一致しているか否かを調査した結果を表 10 に示す。メタノールメーザーの周期性を持つ速度成分に対応する成分が検出されたのは 2 天体で、かつ反相関性がみられたものは G034.39+00.24 のみであった。これら 2 天体に対してメタノールメーザーの周期性を明確にすることにより、結果では直ちに得られなかった関係性が発見される可能性がある。この点を次章で詳しく見る。

天体名	水メーザー速度 [km/s]	メタノールメーザー速度 [km/s]	タイプ	周期性
G012.88+00.48	29.7	29.2	B	×
	32.7	32.7	a	○
G012.90-00.26	34.8	35.4	B	×
	44.8	45.7	a	×
G034.39+00.24	57.2	56.2	B	○
	58.5	58.0	b	×
	63.0	62.5	b	○
		63.3	b	○
G035.79-00.17	58.4	58.0-57.8	B,a	×
	59.6	59.8	a	×
	63.0	63.5	a	×

表 10 候補天体についての反相関周期性の有無と対応するメタノールメーザーで周期変動をする速度成分であるかどうかに関して。

5.2.1 G012.88+00.48

図 8 で示されている水メーザーの強度変動と、変動周期 29.6 日の近似線を比較したのが図 21 である。

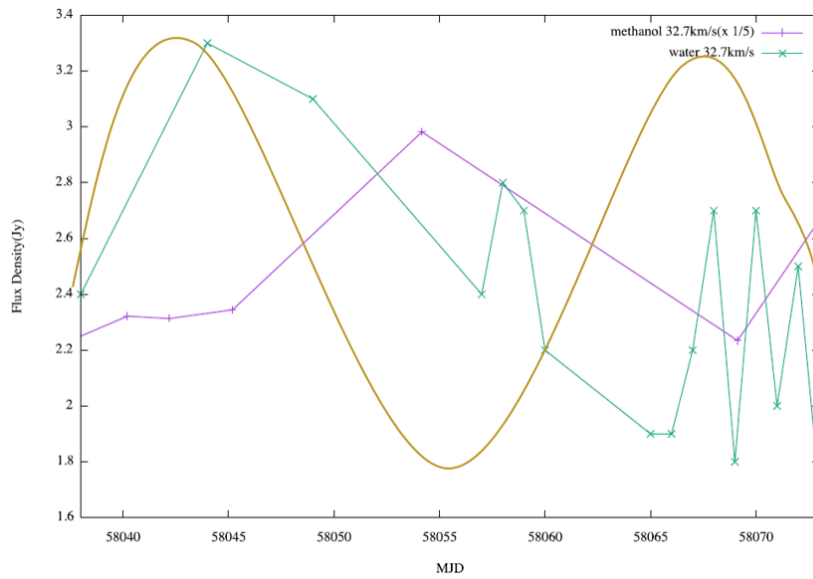


図 21 G012.88+00.48 の 32.7[km/s] 成分の水メーザーに変動周期 29.6 日の近似線を加えたもの。

メタノールメーザーに関しては観測期間前半部での観測頻度が低いため結果としては不十分ではあるが、おおまかに周期に沿った変動が確認できる。ここで 1 つ考慮すべき点は水メーザーにメタノールメーザーと同じ周期を持つとは限らないという点である。もし水メーザーでもメタノールメーザーと同様に周期 29.6 日であったとすると、MJD=58045 と 58070 付近で極大値をもつと仮定することができるのだが、その場合極小値が MJD=58065 付近であるため sin 関数のよう

な形にはならない。一般的には必ずしも立ち上がりと減少の様子が対称的である必要はないが、MJD=58058 付近で一時的に強度が大きくなっていることを考慮できていない。つまりこの図に周期性をあてはめるとすれば、MJD=58045, 58058, 58070 付近で極大値をもつ周期約 14-15 日の変動であるとみなすのが尤もらしく、図 22 で示した。この仮定が正しいとすれば、MJD=58065 付近で極小値を持つことは論理的であると考えることができる。なお、MJD=58045 と 58058 間の極小値が見られていないが、これは観測期間が空いているためデータを取得できなかったと考えられる。

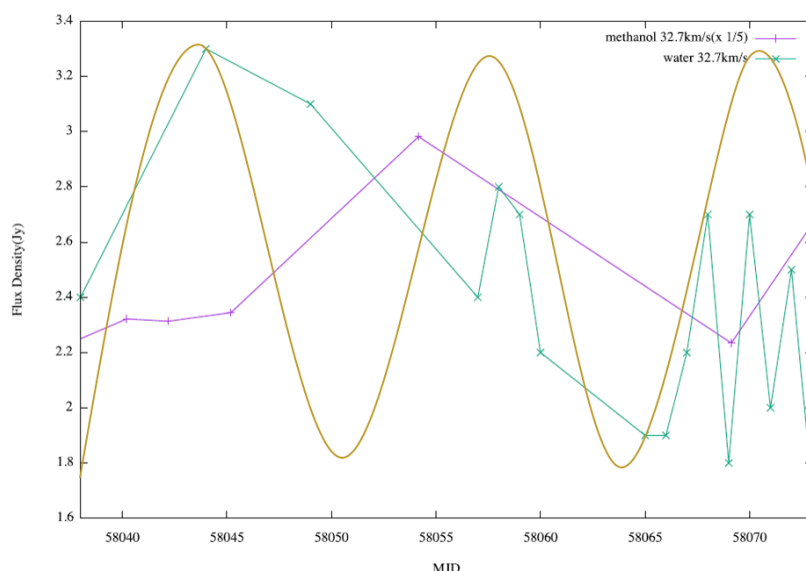


図 22 G012.88+00.48 の 32.7[km/s] 成分の水メーザーに変動周期 15 日の近似線を加えたもの。

以上のことより、メタノールメーザーと水メーザーの周期性に関しては一致していないため、両者に反相関周期変動はないと考えることができる。

5.2.2 G034.39+00.26

§ 5.2.1 と同様の考え方で図 23 を作成した。もしメタノールメーザーと同じ周期性を水メーザーがもっていたと仮定すると、こちらは非常によく近似することができた。赤い線は水メーザーが仮に周期 29.3 日を持っているとした場合に引ける近似線であるが、メタノールと非常によく反相関性を示している。

以上より、水メーザーとメタノールメーザーが同一周期を持っている場合に反相関性が示される可能性が高いと考えられる。

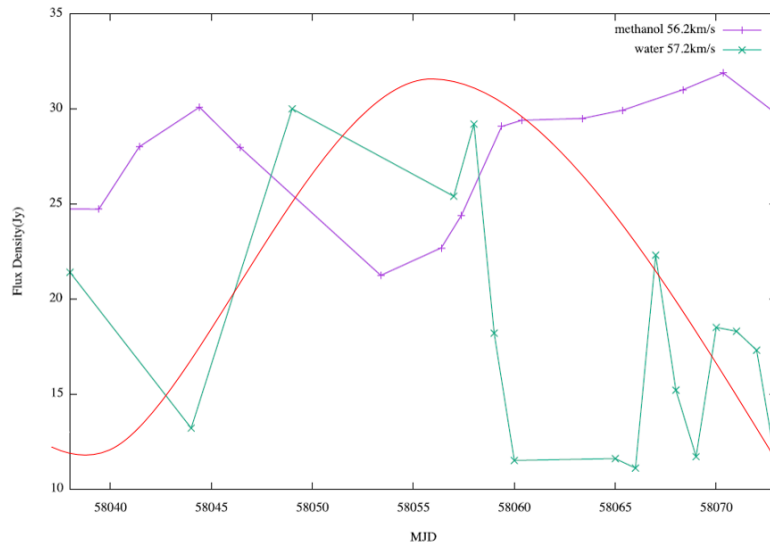


図 23 G034.39+00.24 の 57.2[km/s] 成分の水メーザーが周期 29.3 日で変動していると仮定して近似線 (赤) を加えたもの。

5.3 水メーザーのデータについて

水メーザーに関する時系列強度変動プロットの多くの天体から共通して MJD=58069 で急激に強度が減少している様子が検出された。今回校正天体として観測していた G213.7 についての結果を図 24 に示す。



図 24 校正天体 G213.7 の水メーザーで観測された時系列強度変動プロット。

校正天体でも同様に MJD=58069 で大きく強度が減少していた。水メーザーは地球大気中に含まれる水分子の吸収が生じるため、天候の影響を受けやすいと考えるのが一般的である。しかしながら、対応する 2017 年 11 月 16 日に観測値である高萩市に降水は観測されていない。他の要因で

減少した可能性も高いため、調査をする必要がある。

多くの天体でこの MJD=50969 のデータが使用不可、もしくは大きな誤差を含んでいることが明らかになれば、観測期間終盤のデータにある大きな変動について無視することができ、周期性の発見や反相関性の検出につながることを期待される。

5.4 候補天体及び非検出天体について

本研究で反相関周期性を検出できなかった理由について、以下のことが挙げられる。

- すべての天体に対して反相関周期性が当てはまらない。
- すべての速度成分に対して反相関周期性が当てはまらない。
- 周期に対して観測期間が不十分である。
- 周期に対して観測頻度が不十分である。
- 検出速度成分が不鮮明、不十分である。
- データに誤差が反映できていない。

○で示した原因は本研究の目的と派生するところであるため、追研究の必要性を示している。対する●であらわした項目は、本研究から生じた課題であると言い換えることができる。

本研究で対象とした天体の周期は 15.2 日から 33.4 日であることに対して、観測期間が 35 日間であったためほとんどの天体に対して 1-2 周期の変動しかとらえることが出来なかった。また観測頻度が 5 日に 1 回程度である期間が存在したため、短周期の周期変動を捉えるには不十分であったと考えられる。最も反相関周期変動を如実に立証するためには、周期に対して 3-4 倍程度でかつ高頻度な観測を行う必要がある。上記の条件を満たせばそれぞれレーザー線の静穏時とフレア時の様子をより確実に表すことができ、周期が明らかになるためより比較しやすくなるだろう。

検出速度成分は各観測日のデータでピーク値を取る成分が若干変動しており本研究ではその平均値をとったが、実際にはそれぞれ ± 0.5 [km/s] 程度のエラーバーが含まれているため相対的には ± 1.0 [km/s] 以上の誤差があるだろう。さらに明確な速度成分を調査する、もしくはエラーバーを考慮した ± 2.0 [km/s] 以内の速度成分を比較するなど、不確定性に対する解析を行う必要があるだろう。

6 まとめ

本研究では、6.7GHz メタノールメーザーと 22GHz 水メーザーが反相関周期的変動を示す天体の探査を目的に、日立、高萩市の 2 台の電波望遠鏡を用いた観測を実施した。観測期間は 2017/10/12-2017/11/16 の 36 日間で、メタノールメーザーで短周期的変動を示す 10 天体に関してデータを解析した。各メーザーの強度変動が見られる速度成分と強度を検出し、それらを時系列強度変動プロットすることで変動の様子の比較を行った。その結果、

- 検出天体 1 (=先行研究で検出済み)
- 候補天体 4
- 非検出 5

を導いた。確実な反相関周期変動を検出することはできなかったが、新たに 4 つの候補天体を挙げることに成功した。

特に候補天体の G035.79-00.17 に関しては先行研究で両メーザー源の位置と速度が近くに存在しているということが明らかにされている天体ではあるが、それに対応する速度成分では強度変動に反相関周期性を見いだすことはできなかった。よって本研究の結果のみ考慮した場合、メーザー源の位置・速度と、それらが示す強度変動に関係性はない。

また、今回の研究はメタノールメーザーで検出された周期をもとに天体を選出し観測を実施したが、必ずしも水メーザーでも同様の周期を持っていることは確認できていない。本対象天体に関して結論を述べると、メタノールメーザーと水メーザーが同一周期を持たない天体については周期性を見出すことができなかった。一方ある程度周期的な変動をしているとみなせる天体に関しては非常によい近似が可能であり、両者に同一の周期性があるということは反相関性を示す指標となりうる可能性が高い。本研究のデータに含まれる誤差や観測期間の短さ、頻度の低さといった問題点も考慮したうえで、追観測を行い正誤性を確認する必要がある。

これらの候補天体をはじめ、それぞれ励起機構の異なるメーザー源に相関関係が発見されることは大質量原始星やその周囲の物理状態の解明に大きな寄与を与えることが期待できる。より十分な期間と頻度の観測、及び観測天体数の増加によって、モデル天体数を増加させていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、非常にたくさんの方々のご指導、ご協力をいただきました。

指導教員の百瀬宗武教授には天文学を基礎から教えていただき、本研究の土台を築く知識を与えてくださいました。米倉覚則准教授にはデータ処理をはじめとして、研究をするうえでの必要な御指導やアドバイスをたくさんいただき何とか本研究を成し遂げることが出来ました。本当にありがとうございました。

研究員の齋藤悠さんをはじめ、研究室の皆様にはたくさんアドバイスをいただくだけに留まらず、何かと気にかけて声をかけてくださり有意義な時間を過ごすことができました。この場を借りて感謝申し上げます。改めまして、本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Bartkiewicz,A.,Szymczak,M.,Pihlstrom,Y.M.,van,Lasgevelde,H.J.,Brunthaler,A.,Reid,M.J.,2011,A & A 525,A120
- [2] Cragg,D.M.,Sobolev,A.M.,Godfrey,P.D.,2005,MNRAS,360,533
- [3] Sanna,A.,Moscadelli,L.,Cesaroni,R.,Tarchi,A.,Furuya,R.S.,Goddi,C.,2010,A & A,517,A78
- [4] Szymczak,M.,Olech,M.,Wolak,P.,Bartkiewicz,A.,Gawronski,M.,2016,MNRAS,459,L56
- [5] 福井康雄、他 (2008) 「星間物質と星形成 シリーズ現代の天文学 第 6 巻」 日本評論社
- [6] 中井直正、他 (2009) 「宇宙の観測 II-電波天文学 シリーズ現代の天文学 第 16 巻」 日本評論社
- [7] 石井翔太 (2014) 茨城大学大学院理工学研究科、修士論文
- [8] 宮本祐輔 (2016) 茨城大学大学院理工学研究科、修士論文
- [9] 山口貴大 (2017) 茨城大学大学院理工学研究科、修士論文