

周期強度変動を示すメタノールメーザー源
G006.18–00.35 に対する東アジア VLBI 観測網を用
いた観測的研究

理工学研究科博士前期課程理学専攻宇宙物理学コース
20NM154T 高木奏人

概要

質量が太陽の 8 倍以上である大質量星の形成領域では、原始星近傍から様々な種類のメーザー現象が確認されている。その放射源の広がり（メーザースポット）は au スケールの非常にコンパクトなコア構造と、数百 au にまで広がるハロー構造の二つを持っていることに加え、輝度が非常に高いという特徴がある。そのため、超長基線電波干渉法（VLBI）を用いたミリ秒角スケールの高空間分解能観測によって、メーザー源の空間分布や固有運動、放射領域サイズを研究することができる。6.7 GHz メタノールメーザーは、その大部分が大質量星形成領域に付随しており、周期的な強度変動を示すものも発見されている。その周期変動機構は、急激な質量降着を前提とした、原始星の脈動に起因する Inayoshi et al. (2013) のモデルなどいくつか予想されているが、詳細は未解明となっている。そのため、メーザーの空間分布や、固有運動と視線速度の情報を組み合わせることで得られる、大質量原始星周辺ガスの 3 次元運動の特徴と、そこから推定される物理量をもとに、解析対象天体がどのような変動モデルで説明可能かを考察することが周期変動機構解明の手掛かりとなる。また、フラックスは天体のサイズ変化に起因する場合もあるため、放射サイズ推定も周期強度変動の謎にアプローチする手段の一つである。

そこで本研究の目的は、G006.18–00.35 に付随する周期強度変動を示す 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布、内部固有運動、及び放射サイズと、周期強度変動の関係性を明らかにする事とした。G006.18–00.35 は、(i) 日立局メタノールメーザーモニター観測により周期変動が検出されており、(ii) 東アジア VLBI 観測網 (EAVN) による複数回観測が行われ、かつ、(iii) EAVN による観測が周期変動の極大期もしくは極小期に近い時期に行われている、という 3 つの条件から選出された 4 天体の 1 つである。EAVN によるこの天体の観測は、2010 年から年に 1 回ほどの頻度で計 4 回行われた。

解析の結果導出した固有運動から、メーザーが付随すると考えられる円盤面の向きを求めた。固有運動を円盤正面から見ると、いくつかの仮定の下ではあるが、中心星に回転しながらインフォールする運動を捉えることに成功した。また、先行研究で変動周期が同定されている速度成分に対応するメーザーの円盤面上での位置を求め、それぞれのメーザーのダスト温度を計算した。その結果、求めたメーザーのダスト温度が、メーザー放射の輝度温度が著しく上昇するダスト温度の範囲と概ね一致していた。ダスト温度は中心星光度と中心星からの距離に依存するため、本天体に付随するメーザーの周期強度変動は、一つの大質量原始星に起因すると考えられる。以上より、本天体の周期強度変動機構は、急激な質量降着を前提とした原始星の脈動に起因する Inayoshi et al. (2013) のモデルで説明できる可能性がある。

また、強度変動に伴うメーザースポットのサイズ変化も調べた。解析の結果、本天体に付随するメーザースポットは、周期強度変動の静穏期ではコア構造のみを持ち、増光期ではメーザー放射の条件を満たす領域が広がり、コア構造に加えてハロー構造を持つ可能性が高いとわかった。また、推定したコア及びハローのサイズは、先行研究で得られた値と概ね一致した。

ABSTRACT

This thesis presents the results of multi-epoch imaging of the 6.7 GHz methanol masers showing periodic intensity fluctuations in the high mass star formation region G006.18–00.35 by East Asian VLBI Network. From the proper motion obtained, I estimated the orientation of the disk surface that the maser is supposed to be associated with. By determining the motion of the maser in the disk and its position relative to the central star, it was found that the maser’s periodic intensity variations associated with this object may be explained by the model of Inayoshi et al. (2013). I also found that the size of the emitting region of the maser spot is larger during the intensification phase of the periodicity variation than that during the quiescent phase.

目次

1	研究背景	1
1.1	大質量星	1
1.2	メーザー	5
1.3	VLBI	12
1.4	研究目的	14
2	対象天体 G006.18–00.35	15
2.1	天体選出条件	15
2.2	先行研究	16
3	観測概要	19
4	解析手法	21
5	結果	25
5.1	メーザースポット空間分布	25
5.2	メーザーフィーチャー	37
5.3	固有運動	45
6	考察	48
6.1	メーザーフィーチャー運動平面の推定	48
6.2	周期強度変動成分の分布	53
6.3	周期変動成分の励起の妥当性	54
6.4	メーザースポットサイズ	59
6.5	周期強度変動とメーザースポットのコア・ハロー構造	63
7	まとめ	65
付録 A	放射領域サイズ推定	69
付録 B	干渉計のイメージング	70
付録 C	SEFD とフラックス密度	73

付録 D 回転座標変換	75
付録 E 系の中心速度（システム速度）の推測	77
付録 F 中心星からの距離と黒体近似されたダスト温度	78

1 研究背景

1.1 大質量星

大質量星とは質量が太陽の 8 倍以上の恒星であり、星間物質や銀河とその進化に非常に大きな影響を与える。大質量星は表面温度が高いため、大量の紫外線を放射する。その結果、周囲のガスを電離し加熱する。また、星風と呼ばれるガス流を発生させ、周囲の物質を圧縮する。さらには進化の最終段階で超新星爆発を起こし、星間空間に膨大なエネルギーを放出すると同時に、大質量星内部で生成される重元素を爆発時に星間空間に供給する。

以上より、大質量星は少数でも星間空間に強く影響を及ぼす。したがって銀河規模での現象の理解には、大質量星の形成過程を解明することが重要となる。

1.1.1 大質量星形成

質量が太陽の 8 倍以下である中・小質量星の形成領域は大質量星と比べ太陽のより近傍に複数存在し、その過程は豊富な観測的証拠を踏まえた深い理解が得られている。また、理論的にはシミュレーションによって自己重力下にある星間物質の振る舞いが数値計算されており、観測との比較を通じて、標準的な形成過程のシナリオが確立されている。具体的な流れは以下の通りであり、簡略化したものを図 1.1 に示す。

1. 分子雲内の高密度領域である分子雲コアが、重力的に不安定になりガスが中心へと落下しはじめる。
2. 重力収縮により圧縮が続き、分子雲コアの中心密度が $5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ に達すると、重力収縮が止まり力学平衡の状態であるファーストコアが形成される。このファーストコアが原始星の芯に相当する。
3. 取り残された周囲のガスがファーストコアに降着することで質量が増加すると、ケルビン - ヘルムホルツ収縮に伴う自己重力エネルギーの解放によってファーストコア内部の温度が上昇し、約 2000 K になると水素分子が解離を始める。これは吸熱過程のためガスの圧力が低下し、平衡状態が破れることで再び重力収縮が始まる (second collapse)。
4. 3. の重力収縮後、水素分子の解離によって生じた水素原子が完全電離し、再び平衡状態であるセカンドコアが形成される。
5. セカンドコアにさらにガスが降着することで、原始星の質量が増加する。何らかの

機構で質量降着が停止すると、星の最終的な質量が決定される。

6. ケルビン - ヘルムホルツ収縮によって中心コアの温度が $1.5 \times 10^7 \text{K}$ に達すると、水素核融合が始まる。その後、核反応により圧力が保持され重力収縮が止まり主系列星となる。

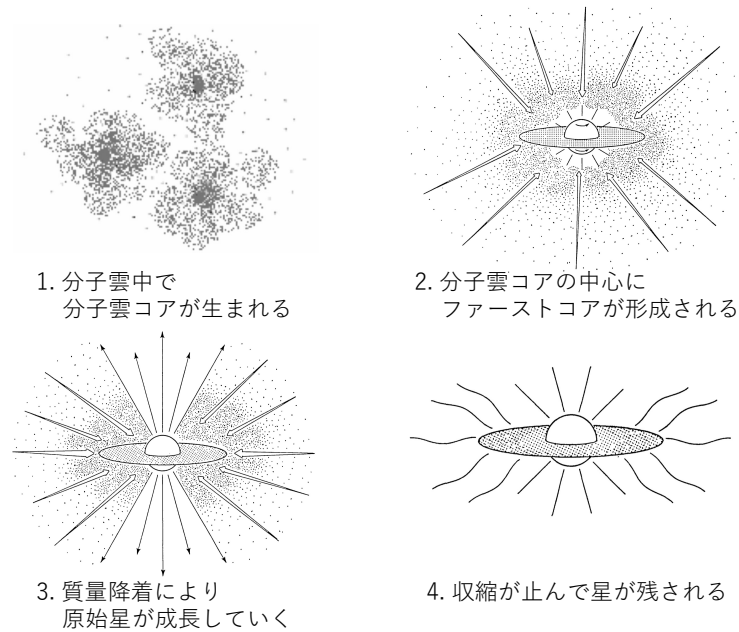


図 1.1: 中・小質量星の進化の様子 (Shu, Adams & Lizano 1987)。

一方で大質量星の場合、このシナリオで質量降着進化が長い時間をかけて続いた結果として形成されないと考えると、以下の二つの問題が発生する。

- 中・小質量星の際の典型的な質量降着率 $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 程度で、大質量星の典型的な寿命 200 - 300 万年程度の間質量降着が続いたとしても、30 - 40 $M_{\odot}$ 程度までしか成長することができないため、それ以上の質量を持つ大質量星が存在することを説明できない。
- 典型的な降着率で考えると、中心星は質量が 8 $M_{\odot}$ に達すると主系列星になり、以後、中心星からの膨大な輻射圧によって降着が妨げられる。そのため、典型的な降着率のもとでは、10 - 20 $M_{\odot}$ より大きな星を球対称な降着により形成することは困難である。

これらの理由より、小質量星形成のシナリオを単純に大質量星形成にも当てはめることはできない。

一方で、現在までの研究で 2 つの大質量星形成シナリオが提案されている。まず第 1 のシナリオが降着説である。降着説には、コア降着モデルと競争的降着モデルの 2 つが考えられている。コア降着モデルは、大質量星も小質量星同様に質量降着によって質量が増加するが、その降着率が放射圧を十分上回るほど大きいとするモデルである。この場合、放射圧による制限も小さくなり、数十 $M_{\odot}$ 以上の大質量星の形成が可能となる。また、実際の降着物質は角運動量を持っているために原始星の周りに降着円盤を形成する。そのため、原始星から見て円盤方向は光学的に厚く、それと垂直な極方向は比較的光学的に薄くなる。よって中心星からの輻射は、円盤方向には弱くなるため、降着が妨げられない。競争的降着モデルは、必ずしも巨大でない分子雲コアが複数形成された後、コア同士で競争的に降着がおき、最終的には一番重力ポテンシャルが大きい分子雲コアにほとんどの物質が降着し、その結果最初に形成された巨大でない分子雲コアが、巨大分子雲コアに成長するというモデルである。いずれのモデルも、自己重力的な大質量ガス塊を起点に星が形成されていくという特徴がある。

第 2 のシナリオは合体説である。この説は、大質量星が星団の特に星密度が高い中心部に存在することが知られていることから、星同士の合体・衝突が起こった結果、大質量星まで成長するというシナリオである。この過程が起こるには星密度が 10^8 個 pc^{-3} 以上であることが必要であるが (Bally & Zinnecker 2005)、現在までの観測ではこれほど高密度な領域は発見されていない。

上記の 2 つの説については、まだ決着がついていないものの、円盤を通じた降着モデル (Hosokawa et al. 2010)、EVN によって観測された大質量星形成領域 Cep A で検出された 6.7 GHz メタノールメーザーの回転・降着運動 (Sanna et al. 2017)、ALMA によって観測された大質量原始星 G353.273+0.641 を取り巻くガス円盤の回転・降着運動 (Motogi et al. 2019) 等の様々な研究から、降着説が有力である事がわかってきている。Sanna et al. (2017) については、1.2.3 章で詳しく記述する。

1.1.2 大質量星形成領域のメーザー

大質量星形成の理解が進んでいない原因として、以下の理由によって直接観測が困難であることも挙げられる。

- 誕生の頻度が低いことに加えて進化のタイムスケールが短いため、太陽系から最も近い観測対象 (オリオン座の巨大分子雲) でも約 400 pc (1 pc = 3.26 光年) 離れており、その詳細な調査には高空間分解能観測が要求される。
- 形成領域が高密度な星間物質に埋もれているため、可視光での観測が困難である。

一方で、大質量星形成領域ではしばしばメーザーが観測される。メーザーは可視光よりも波長の長い電磁波である電波での放射であるため、分厚い星周物質を透過し、原始星ごく近傍領域に対しても観測可能である。メーザーは周波数のドップラーシフトから得られる視線方向の速度と、VLBI などの高空間分解能観測から求められる固有運動による接線方向の速度の情報が獲得できるため、大質量星近傍の 3 次元運動を理解する上で非常に有益なプローブである。中でも 6.7 GHz メタノールメーザーは、そのほとんどが大質量星形成領域で検出されているため、大質量星形成領域を選択的に観測するプローブとして有用である。次節では、このメーザーの内、特に 6.7 GHz メタノールメーザーについて記述する。

1.2 メーザー

メーザー (MASER; Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) とは、二つの準位間で上の準位の方に統計的により多くの粒子が存在する (反転分布) 状態のとき、連続的に粒子が下の準位へ遷移して誘導放射し、強い放射を出す電波領域の特徴的な現象のことである。

1.2.1 メーザーの原理

地球の大気のようにガスの密度が高いところでは通常、粒子同士の衝突が支配的である熱平衡状態にあり、二つの準位間の粒子数の比は次式のようなボルツマン分布で与えられる。

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right).$$

ここで T_{ex} は励起温度であり、 n_u , n_l および g_u , g_l はそれぞれ上の準位と下の準位の粒子数および統計的重みである。この式を変形すると

$$\frac{n_u/g_u}{n_l/g_l} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT_{\text{ex}}}\right) < 1$$

となり、 T_{ex} が正の範囲では必ず 1 より小さくなる。つまり、統計的重みあたりの粒子数 $n_i/g_i (i = 1, 2)$ は下のエネルギー準位の方が多くなる。しかし、ガスの密度が低い希薄な宇宙空間では、粒子同士の衝突や放射を介したエネルギーのやりとりが釣り合った熱平衡状態からずれる場合がある。このような状況下ではしばしば $n_u/g_u > n_l/g_l$ となり、上の準位の方に粒子が多く分布する場合がある。このような粒子分布を反転分布と呼ぶ。

反転分布の状態は不安定であるため、上の準位の周波数を ν_u 、下の準位の周波数を ν_l として、準位系の外から 2 準位間のエネルギー差に相当するエネルギー $E_{ul} = h(\nu_u - \nu_l)$ を持った電波が入射すると、上準位の粒子が下準位に遷移して周波数 ν_{ul} の電波を誘導放射する。そしてこの放射電磁波がさらに上の準位に励起されている別の分子に入射することで、再度誘導放射を起こす。この現象が連続で起こり、入射放射がカスケード的に増幅されることで、メーザーとして観測される。一般にメーザー放射は以下のような特徴がある。

1. 通常、放射源の広がり小さく点状の構造 (メーザースポット) を持っている。
2. 輝度温度が非常に高い。
3. 指向性がある。

4. 強く偏光している。

1 のメーザースポットの構造をさらに詳しく分解すると、空間的にコンパクトな領域と、その周囲を取り巻く放射強度が弱い領域に分けられることもある。この、空間的にコンパクトな構造をコアと呼ぶ。コアは通常 1 - 10 au 程度の広がりを持ち、最小で 0.01 au 程度まで小さいものもある。一方、コアを取り巻く構造をハローと呼び、中には数 100 au 程度まで広がるものも存在する。コア、ハローについては 1.2.3 章で詳しく説明する。また、2. の輝度温度については通常 10^{10} K 程度であるが、最大で 10^{17} K にまで達する場合もある (Matveenko 1986)。

1.2.2 メタノールメーザー

大質量星形成領域では OH、メタノール、水などの様々な分子でメーザー放射が確認されている。その中でも メタノールメーザーは様々な周波数帯で検出されており、生成過程や付随領域の違いから、Class I, Class II の 2 つに分類されている (Muller et al. 2004)。表 1.1 にその代表的なものを示す。

Class I メタノールメーザーは、大質量星周りに存在するガス雲と外部からの分子流やジェットとの衝突によって分子が励起される衝突励起に起因する。そのため、コンパクト HII 領域の外側の境界領域でよく観測される。また、大質量星形成の兆候となる天体（大質量原始星候補天体）との距離が 1 pc 程度離れているものも確認されており、両者の位置的な相関が必ずしも良くない (Kurtz et al. 2004)。

対して Class II メタノールメーザーは、中心星の赤外線放射の影響による放射励起に起因するメーザーであり、大質量原始星候補天体との相関が良いことが分かっている (Cragg et al. 2005)。また、Beuther et al. (2002) では、Class II メタノールメーザーには、超コンパクト HII 領域や赤外線点源だけでなく、それらのごく近傍に位置するより若い天体 (超コンパクト HII 領域を伴わない大質量原始星やミリ波、サブミリ波連続波源など) との相関が良いものも多数存在することが明らかにされた。

表 1.1: メタノールメーザーの遷移周波数の例

Class		周波数 (GHz)						
I		9.9,	25.0,	36.2,	44.1,	84.5,	95.2,	146.6
II		6.7,	12.2,	20.0,	23.1,	37.7,	38.3,	38.5 107

1.2.3 6.7 GHz メタノールメーザー

Class II メタノールメーザーの 1 つである 6.7 GHz メタノールメーザーは、その大部分が大質量星形成領域に付随するため、大質量星形成領域の指標として精力的な観測が行われている。以下では先行研究で得られた観測結果を記述する。

■空間分布 Bartkiewicz et al. (2009) では、6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布が elliptical, arched, linear, paired, complex の 5 種類に分類できることが提案された。その内 paired, complex の物理的起源に対する解釈は簡単ではないが、elliptical, arched, linear は原始星周りの円盤に付随した 6.7 GHz メタノールメーザーを捉えていると考えられている (図 1.2)。

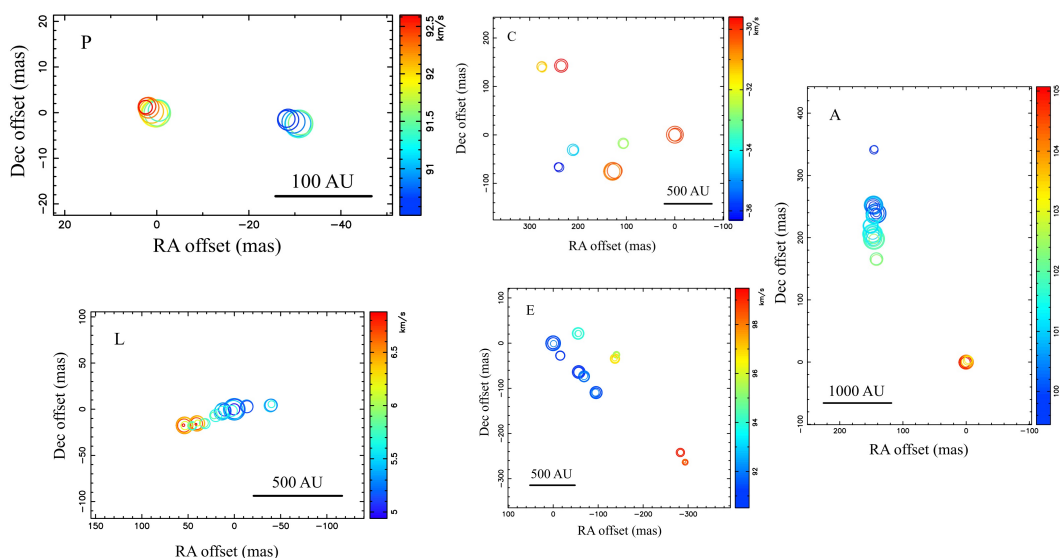


図 1.2: Fujisawa et al. (2014) によって得られた 6.7 GHz メタノールメーザースポット空間分布の例。左上から反時計回りに paired (ペア状), linear (線状), elliptical (楕円状), arched (弧状), complex (それ以外の複雑な分布) の 5 種類に分類されている。横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する相対座標軸であり、円の大きさは log スケールで表した強度に比例しており、色は視線速度に対応している。

■固有運動 6.7 GHz メタノールメーザーは寿命が4年以上と比較的長いため (Goedhard et al. 2004)、複数年にわたるマルチ epoch 観測により固有運動を推定できる。ここで epoch は、複数回観測の内、何回目の観測かを表すものである。また、6.7 GHz メタノールメーザーは大質量原始星周辺領域のガスから放射されると考えられているため、固有運動の計測によって得られた情報と、視線速度の情報とを組み合わせる3次元速度構造を明らかにすることができ、大質量原始星周囲の円盤の回転や、収縮（インフォール）もしくは膨張などの運動学的情報を直接得ることができると期待される。現在までの研究で、回転運動 (Sanna et al. 2010)、膨張を伴う回転運動 (Sugiyama et al. 2016)、インフォールを伴う回転運動 (Sugiyama et al. 2014, Sanna et al. 2017) などの固有運動が報告されている。Sugiyama et al. (2014) と Sanna et al. (2017) はどちらも大質量星形成領域 Cep A に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの固有運動を測定しており、Sugiyama et al. (2014) では、同心円状に放射が分布していると仮定した上でインフォールを伴う回転運動を導出している。一方、Sanna et al. (2017) では、それぞれのメーザーが異なる円盤半径上に分布しているとした上で、インフォールを伴う回転運動を導出した。その結果、インフォールが中心星から 900 au 程度離れた場所まで続いていて、中心星に最も近いメーザーは回転運動が支配的であると主張した (図 1.3)。これら2つで報告されたインフォールを伴う回転運動は、周囲のガスが中心星に向かって降着している様子を捉えている可能性があり、大質量星形成における降着説を支持する結果となっている。また、このようにメーザーの分布や速度構造を捉えれば、原始星の進化に大きく関わる星間物質の降着速度等の物理量を推定することができるため、6.7 GHz メタノールメーザーの固有運動の測定は、大質量星形成過程を研究する上で大変有意義である。

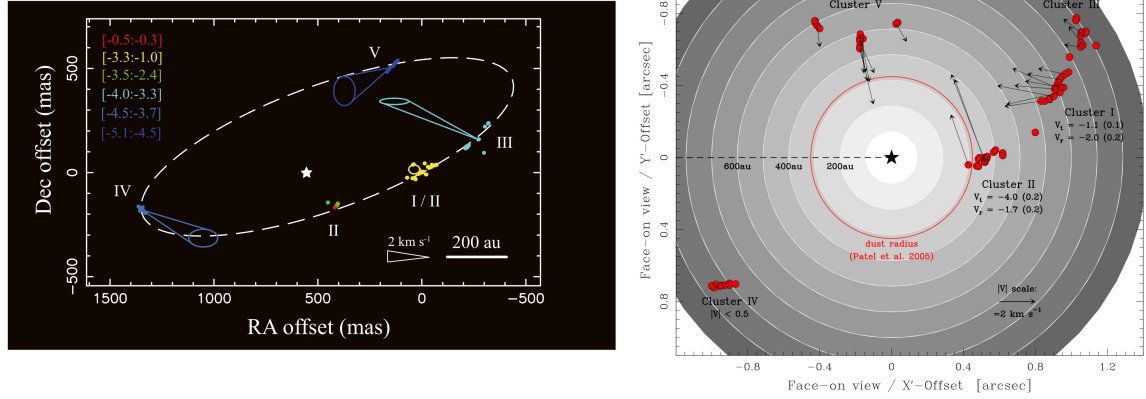


図 1.3: 大質量星形成領域 Cep A にて検出された 6.7 GHz メタノールメーザーの天球面上での固有運動（左：Sugiyama et al. 2014）と、推測される運動面での運動を Face-on でプロットした図（右：Sanna et al. 2017）。左図のコーンが各スポットの固有運動を表し、その開口は向きの不定性を表す。星印は中心星位置を表しており、塗りつぶした丸印がリファレンスとしたスポットに対する各スポットの相対位置座標であり、その色は視線速度に対応している。また、右図におけるグレーの階調で示された同心円は中心星からの距離の違いを表しており、赤い点が各メーザーの位置を表しており、矢印が運動面上での速度を表している。

■**周期強度変動** 6.7 GHz メタノールメーザーに対する長期的なモニター観測によって、周期的な強度変動（Goedhart et al. 2003）、G033.64-00.20 などに代表される突発的な強度変動（Fujisawa et al. 2012, 2014）などが確認された。

茨城大学では、6.7 GHz メタノールメーザーの強度変動について統計的に研究するため、日立 32m 電波望遠鏡を用いたモニター観測（日立モニター観測）を行っている。解析の結果、対象天体 G006.18-00.35 でも、いくつかの速度成分で周期的な強度変動が確認された。詳しくは 2.2 章で記述する。

周期強度変動の機構については未だ解明されていないが、大質量原始星近傍の何らかの変動現象に起因していると考えられている。具体的には、連星同士の恒星風衝突により増光する Colliding wind binary (CWB) (van der Walt 2011)、連星系周囲の円盤からの渦状の降着流と連星系の衝突により増光するスパイラルショック (Parfenov & Solbolev 2014) などのいくつかの理論モデルが提唱されている。その中でも Inayoshi et al. (2013) では、急激な質量降着 ($\dot{M}_* \geq 10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$) の下で成長する大質量原始星の

脈動によって周期強度変動が起こると説明している。このモデルでは原始星の脈動周期と光度との間に以下のような周期-光度関係 (Period - Luminosity Relation) があることを予測している。

$$\log \frac{L}{L_{\odot}} = 4.62 + 0.98 \log \left(\frac{P}{100 \text{days}} \right)$$

ここで、 L は原始星の光度、 $L_{\odot} = 3.839 \times 10^{26}$ [W] は太陽光度であり、 P は原始星の脈動周期である。さらに、この式から質量や半径、質量降着率といった原始星の各物理量も脈動周期に依存すると予測している (図 1.4)。そのため、1.2.4 章で述べた固有運動から推定される物理量とこのモデルで推定された 2 つの物理量が一致した場合、その天体の周期強度変動は Inayoshi et al. (2013) のモデルで説明可能となり、急激な質量降着を仮定している大質量星形成の降着説を支持する結果となる。

また、天体のフラックス密度 F は、輝度を B 、立体角を Ω として

$$F \sim B\Omega$$

と表すことができるため、天体のフラックス変動は輝度の変化と、立体角、つまり天体の放射領域サイズの変化の 2 つの原因が考えられる。次の章では、6.7 GHz メタノールメーザーの放射領域サイズについて詳しく見ていく。

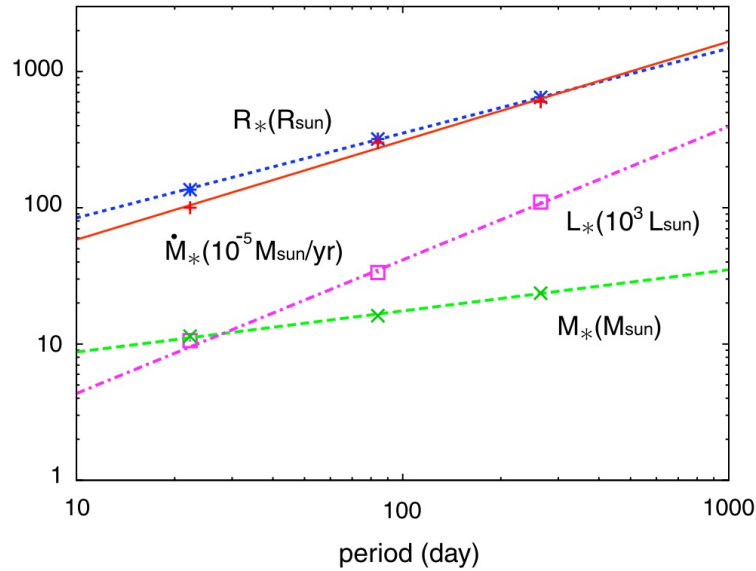


図 1.4: Inayoshi et al. (2013) で考案されたモデルにおける、脈動周期と各物理量の関係。 R_* が原始星の半径、 L_* が原始星の光度、 M_* が原始星の質量、 $\dot{M}_*$ が原始星への質量降着率を表している。

■メーザースポットサイズ Minier et al. (2002) では、複数天体に対して 6.7 GHz メタノールメーザーの観測を行うことで、メーザースポットの構造をコンパクトなコア構造と広がったハロー構造の組み合わせで説明している (図 1.5)。コアはメーザーの励起機構における不飽和領域であり、メーザーの増幅路に対して強度が指数関数的に増加し、強いメーザー放射をすると考えられている。一方でハローは、コアを包む飽和領域であり、コアに比べて粒子を励起して上の準位に組み上げる機構 (pumping) の働きが弱く、強度は増幅路に比例して増加し、弱いメーザー放射をする領域であると考えられている。

Minier et al. (2002) での解析の結果、コア構造とハロー構造の最小値 - 最大値はそれぞれ 2 - 20 au, 12 - 290 au であった。放射サイズ推定に必要なビジビリティと uv-distance はどちらも干渉計による観測で得られるものである。詳しくは付録 A で記述する。

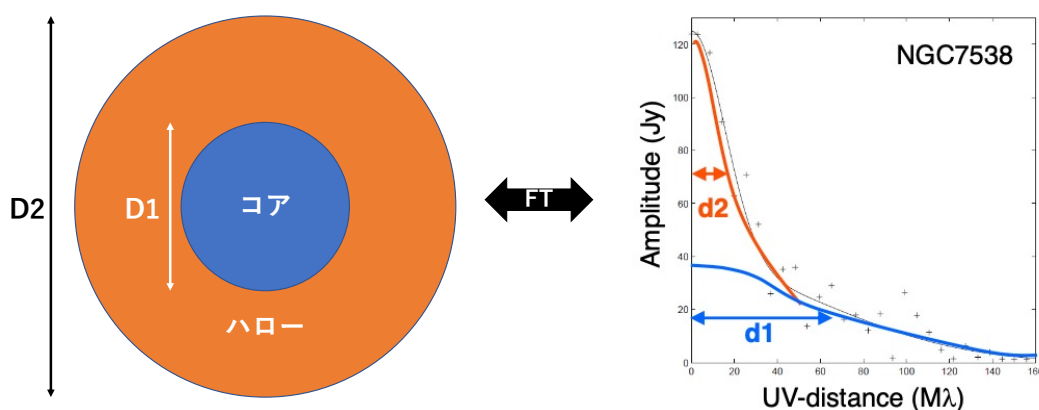


図 1.5: Minier et al. (2002) でのメーザースポットの構造推定の一例 (杉山孝一郎氏 [タイ国立天文学研究所] により一部改変)。uv-distance に対するビジビリティのプロット (右) が半値幅 d_1 , d_2 の2つのガウシアンでフィッティングできることから、天球面上での直径が D_1 のコア構造と D_2 のハロー構造の重ね合わせで説明できるとした (左)。

1.3 VLBI

望遠鏡の空間分解能は、観測波長を λ 、口径を D として

$$\theta \sim \frac{\lambda}{D}$$

で与えられる。例えば $D = 100$ m の単一鏡で、電波の波長帯である $\lambda = 1$ cm の観測を行ったとすると、その分解能は、 $\theta \sim 20.6$ 秒角となる。一方、メーザースポットの典型的な値として、広がりを 10 au、地球からの距離 1 kpc を仮定すると、その広がりは約 0.01 秒角となる。このように、メーザは放射サイズがコンパクトかつ遠方に存在するため、その詳細な空間分布などを得るためには単一鏡観測では空間分解能が不十分である。この問題を解決するには、複数の望遠鏡で同時に天体を観測することで、アンテナ間の距離である基線長と同等の口径を持った仮想的な望遠鏡を作成する干渉計の技術が必要になる（付録 B）。

本研究ではその中でもミリ秒角（milli-arcsecond; mas）スケールでの高空間分解能観測が実現可能である超長基線電波干渉法（Very Long Baseline Interferometry; VLBI）という観測手法で得られたデータを用いた。VLBI とは、アンテナ間で受信電波信号を伝搬するためのケーブルを直接結合することのできない程アンテナ同士が離れている、つまり超長基線を伴う干渉計観測技術のことである。VLBI では 0.1 mas を切る分解能が実現されており、6.7 GHz メタノールメーザーをはじめとした遠方の非常にコンパクトな天体の内部構造などの詳細な観測が可能である。

本研究で解析したのは EAVN（東アジア VLBI 観測網）という観測網で得られたデータである。EAVN は合計 16 局のアンテナで構成される VLBI 観測網であり、22 GHz の波長帯において 0.5 mas の空間分解能を実現している。図 1.6 に EAVN の一部の参加局位置を示す。



図 1.6: EAVN の一部の参加局位置と、各局で観測可能な周波数帯。EAVN ホームページから引用 (<https://www.kasi.re.kr/eng/index>)。

1.4 研究目的

1.2, 1.3 章で述べたように、6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布、固有運動、放射領域サイズ測定が VLBI によって可能である。その中でも 1.2.4 章で述べたような周期強度変動が確認されているものを対象とすることで、以下の 3 つの目的を設定することができる。

- 複数回観測の VLBI データがフラックス密度の極大期・極小期を少なくとも 1 度ずつ捉えている場合、スペクトルベースだけではなく空間分布ベースで周期変動成分を切り分けることが可能になる。その場合、強度変動が起きている空間的なサイズが、ひとつの大質量原始星により励起可能な範囲なのかを定量的に議論できる。
- 固有運動の解析から、回転運動に加えて降着現象の兆候を検出できた場合には、メーザーが確かに円盤に付随しており、中心星が「まだ降着の続く比較的若い原始星段階にある」ことの証明となり得る。これは Inayoshi et al. (2013) のモデルを支持し、間接的に大質量星形成における降着説を支持する結果とも位置付けられる。この場合、図 1.4 より、原始星の進化を特徴づける物理量が推定可能となる。
- フラックス密度の周期変動の極大期、または極小期に対応する VLBI データを比較することで、それぞれのメーザースポットのサイズ変化と強度変動との関係性が議論可能となる。

そこで本研究の目的は、周期強度変動する 6.7 GHz メタノールメーザー源に対する VLBI 観測によって取得されたデータ解析を行い、メタノールメーザー放射の空間分布の取得および固有運動の導出に加え、その放射領域サイズと周期強度変動の関係を明らかにすることとした。

2 対象天体 G006.18–00.35

本研究では周期的な強度変動を示す G006.18–00.35（以下 G6.18）に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの EAVN による VLBI 観測データの解析を行った。以下に天体選出条件および対象天体の詳細について記す。

2.1 天体選出条件

本研究の対象天体である G6.18 は以下の 3 つの条件から選出した。

- 日立 32m 電波望遠鏡による長期・高頻度モニター観測によって、周期強度変動が検出されたメタノールメーザー天体（杉山他 [投稿準備中]）
- EAVN によるマルチ epoch の VLBI 観測が実施されている天体
- フラックス密度の周期変動の極大期または極小期に近い時期に EAVN による観測が行われた天体

上記の条件から表 2.1 に示す 4 天体が選出された。

表 2.1: 選出された 4 天体

天体名
G006.18–00.35
G012.88+00.48 ^{*1}
G025.82–00.17 ^{*2}
G032.04+00.05 ^{*3}

*1 佐藤氏（2018 年度茨城大学大学院理工学研究科修了）が解析済

*2 伊藤氏（2021 年度茨城大学大学院理工学研究科修了予定）が解析中

*3 會川氏（2019 年度茨城大学大学院理工学研究科修了）が解析済

2.2 先行研究

茨城大学の日立モニター観測の結果をもとに解析した研究にて、天体信号と判断された 12 速度成分の内、表 2.2 に示す速度成分において強度変動周期が同定された（平野 2020）。表 2.2 における誤警報確率とは、簡潔には「同定した周期がどれほど信頼できるか」を表す量である。平野 (2020) では、誤警報確率が 1×10^{-4} 以下であるものを信用できる周期としているので、視線速度 $V_{\text{LSR}} = -32.71 \text{ km/s}$ における周期は正確ではない可能性がある。よって本研究においては、 $V_{\text{LSR}} = -32.71 \text{ km/s}$ の成分の周期強度変動は考慮しない。このことより、G6.18 の周期強度変動は、約 180 日周期で起こっていることが分かる。該当する速度成分に対する強度変動プロットと、強度が極大となっている日の内、epoch 4（3 章参照）に最も近いものを基準に 180 日毎に y 軸に平行な直線を引いた図を図 2.1 に示す。これを見ると、確かに該当する速度成分で 180 日周期で強度変動の極大が訪れている事が確認できる。

G6.18 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーは、EAVN と、アンテナ間で受信電波信号を伝搬するためのケーブルを直接結合する、結合型の電波干渉計である VLA（Very Large Array）を用いた観測でそれぞれ空間分布が明らかになっている。その結果を図 2.2, 2.3 に示す。ここで図 2.2 の矢印は、周期が約 180 日と同定された速度成分の内、スポットとしても確認されたものを示している。2 つを見比べると、メーザースポットの空間分布の広がり、どちらも 2000 au 程度であり違いはないが、VLA の方が多くのメーザースポットを取得していることが確認できる。これは、VLA の方が EAVN に比べて輝度温度に対する感度が高いため、より弱い放射成分まで検出できたからであると考えられる。また、いずれの結果からも規則的な分布は確認できず、図 1.2 の Fujisawa et al. (2014) の分類においても complex と判別されている。EAVN による観測は約 1 年おきに計 4 回観測されており、図 2.2 に示されているのはその内 1 回目の観測データを解析したものである。

表 2.2: 各速度成分で同定された変動周期

視線速度 (km/s)	強度変動周期 (日)	誤警報確率
-37.17	183.1	3.30×10^{-13}
-36.19	182.3	3.30×10^{-13}
-35.74	182.3	3.30×10^{-13}
-34.46	181.6	3.30×10^{-13}
-34.09	181.6	3.30×10^{-13}
-32.71	422.6	3.06×10^{-4}
-32.10	183.1	3.30×10^{-13}
-31.57	182.3	3.30×10^{-13}
-31.33	183.1	3.30×10^{-13}
-28.65	180.9	2.43×10^{-5}

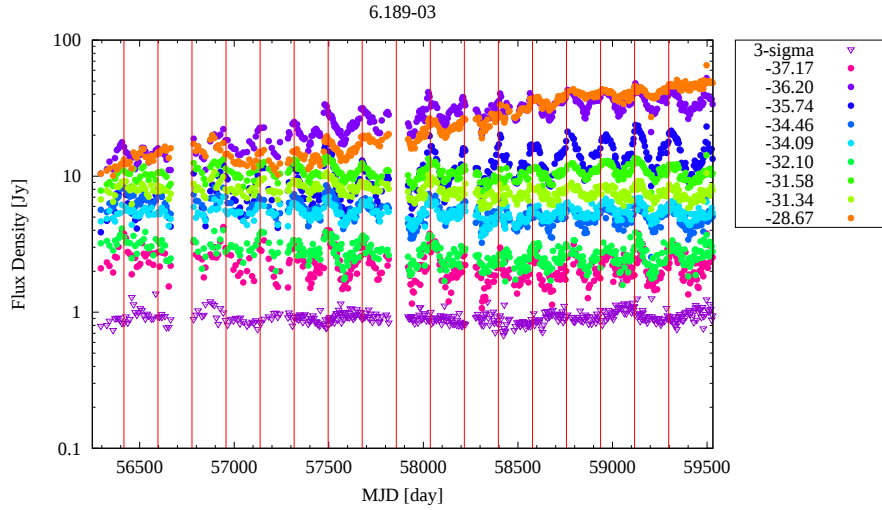


図 2.1: 日立モニター観測によって得られた G006.18–00.35 の速度成分の中で、周期が約 180 日と同定された成分に対する強度変動プロット。凡例はメーザーの視線速度 (km s^{-1}) に対応している。赤線は epoch 4 に最も近い強度極大日 (MJD=56600) を基準に 180 日毎に引いたものである。各速度成分のフラックス密度の極大が 180 日周期で訪れていることが確認できる。

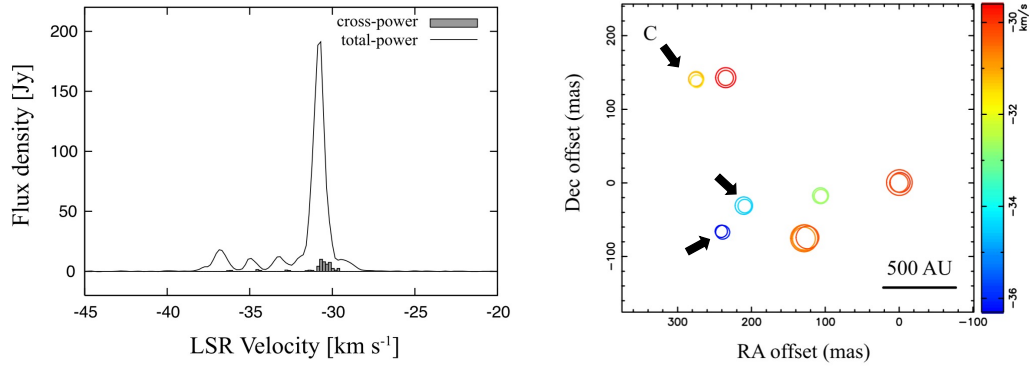


図 2.2: EAVN によって得られたスペクトル (左) とメーザースポット空間分布 (右) (Fujisawa et al. 2014)。左図は実線がトータルパワースペクトル、棒グラフが該当チャンネルにおいて、CLEAN (付録 B) で得られたメーザースポットのビジビリティを足し合わせたものである。右図の横軸と縦軸はそれぞれ、強度ピークメーザースポットに対する相対座標軸であり、円の大きさは log スケールで表した強度に比例しており、色は視線速度を示す。また、矢印は平野 (2020) で周期が 180 日と同定された速度成分に対応するスポットを示している。

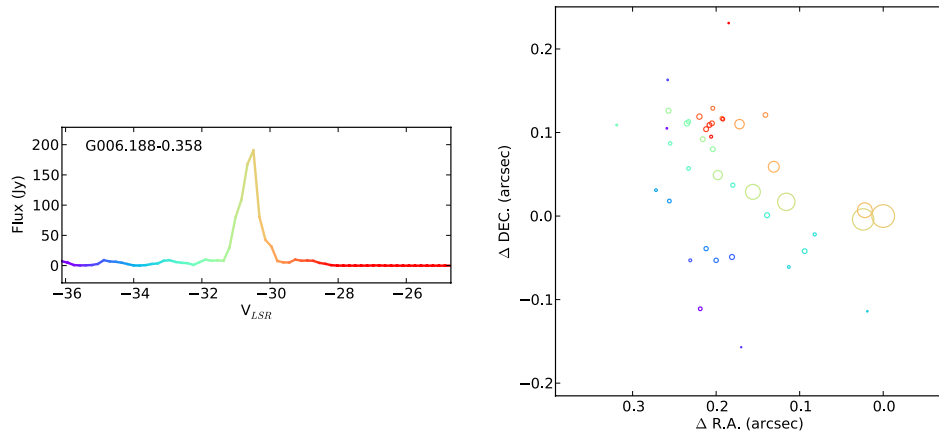


図 2.3: VLA によって得られたトータルパワースペクトル (左) とメーザースポット空間分布 (右) (Hu et al. 2016)。左図のスペクトルの色に対応するメーザースポットの空間分布が右図に示されている。右図の横軸と縦軸はそれぞれ、強度ピークメーザースポットに対する相対座標軸であり、円の大きさは log スケールで表した強度に比例しており、色は視線速度に対応している。

3 観測概要

本研究で使用した VLBI 観測データは、EAVN によって 2010 年 8 月 29 日から 2013 年 10 月 29 日までの間で観測された 4 epoch 分のデータである。観測参加局は、VERA (水沢局 20 m 鏡、入来局 20 m 鏡、小笠原局 20 m 鏡、石垣局 20 m 鏡から成る、最大基線約 2300 km に及ぶ干渉計)、日立 32m 鏡、山口 32 m 鏡、上海 (中国) 25 m 鏡、蔚山 (韓国) 21 m 鏡の計 8 局である。各アンテナの配置を図 3.1 に、観測参加局や観測パラメータを表 3.1 に示す。この観測におけるアンテナ配置での最高空間分解能は、約 4 mas である。各 epoch とも対象天体の積分時間は、15 分のスキャン 4 回からなる計 1 時間となっており、対象天体の他に遅延残差補正とバンドパス補正のための較正天体 NRAO530, 3C454.3 や、大気遅延の補正のための較正天体 J1845-28 も適宜観測している。

2.2 章でも述べたように、G6.18 に付随するメタノールメーザーの内、いくつかの速度成分については約 180 日の周期で強度変動することが先行研究により明らかになっているため、観測日と放射がピークであったと期待される日付との比較を行った (epoch 4 に関してはその期間に実施中であった日立モニター観測で得られたピーク日と比較した)。結果を表 3.2 に示す。この比較から epoch 1 は静穏期付近であるのに対して epoch 2, 3, 4 は増光期に相当していたと推定された。



図 3.1: アンテナ配置 (Google Map より一部改変)

表 3.1: 観測パラメータ

epoch	1	2	3	4
観測日 MJD	2010/8/29/ 55437	2011/10/5/ 55839	2012/9/23/ 56193	2013/10/29/ 56594
観測局	水沢、入来、小笠原、石垣、日立			
	上海	山口	山口、上海	山口、蔚山
雑音 rms (Jy/beam)	0.111	0.0881	0.0533	0.0757
合成ビームサイズ (mas ²)	6.94×2.82	7.35×3.37	7.22×3.15	7.87×3.88
PA (degree)	-7.09	-16.71	-8.07	-5.15
観測周波数帯	6666 – 6670 MHz			
分光点数	1024 点			
1 ch 速度幅	0.175 km/s			
記録偏波	左旋円偏波			

表 3.2: 観測日と推定されるピーク日との比較

epoch	観測日 (MJD)	推定ピーク日 (前)	観測日との差	推定ピーク日 (後)	観測日との差	予想される時期
1	55437	55322	115	55502	65	静穏期
2	55839	55682	157	55862	23	増光期
3	56193	56042	151	56222	29	増光期
4	56594	56406*	188	56597*	3	増光期

* 同時期に行われた日立モニター観測で得られたピーク日

4 解析手法

解析は Astronomical Image Processing System (AIPS)^{*1}および Difmap^{*2}を用いて行った。解析手順は以下の通りである。なおこの解析手順はタイ国立天文研究所の杉山孝一郎氏が作成した、JVN/EAVN データ解析フローチャート ver.1.8.1 in 2017/01/23 を参考にした。

1. FITS データ読み込み、データチェック

観測データを AIPS 内へ読み込ませファイルを作成した。その後、データに異常がないかどうかや、観測スケジュール情報、観測局情報などを確認した。また、異常のあるデータ点は適宜フラグ (使用しないデータとして印をつけること) した。

2. UV 再計算

相関局にて計算済みの UV 再計算解を読み込ませ、天球面上の絶対位置精度を上げることを目的とする較正である。epoch 1 については UV 再計算解が存在しなかったため、この手順を踏まずに解析を進めた。本研究の目的として、メーザーフリンジフィットの際に位相中心としたリファレンスメーザーの位置に対して、他の各メーザーの座標を相対的に導出することから、この解を読み込まずとも影響はない。

3. 振幅ゲイン較正 (ベースライン規格化およびバンドパス振幅補正)

自己相関のデータを用いてベースラインを規格化した。また、各アンテナのバンドパス振幅に見られる周波数特性を較正した。

4. 遅延時間残差およびその変化率の較正

初めに相関処理時の遅延時間補正の残差を、明るい連続波天体 (NRAO530, 3C454.3) を用いて較正した。次に大気揺らぎによる遅延時間残差を、対象天体に比較的近い連続波天体 (J1845-28) を用いて較正した。

5. バンドパス位相特性較正

明るい連続波天体 (NRAO530, 3C454.3) を用いて、各アンテナのバンドパス位相に見られる周波数特性を較正した。

6. ドップラー較正

解析対象天体 G006.18-00.35 のスペクトル線データを周波数方向にシフトさせる

^{*1} <http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>

^{*2} <ftp://ftp.astro.caltech.edu/pub/difmap/difmap.html>

ことでドップラー効果の追尾較正を行い、チャンネルと視線速度値の対応付けをした。周波数方向へのシフト量が 1 チャンネル分の間隔 (0.1757 km/s) よりも小さい値になるようにパラメータを設定した。

7. 振幅ゲイン較正 (テンプレート法)

「メーザーが観測中、つまり 1 日以内のタイムスケールでは時間変動が起こらず、自己相関スペクトルの振幅の時間変動は全てシステム起因である」という仮定の下で、システムゲインの時間較正を行った。この手法をテンプレート法と呼ぶ。これはつまり、フラックス密度 S が全局全時間で一定であると仮定して、全ての局のシステム等価雑音温度 SEFD を計算するということである。ある局の SEFD とフラックス密度 S は、システム雑音温度を T_{sys}^* 、有効開口面積を $A_{\text{eff}} = \pi r^2 \times \eta$ (r : アンテナ開口半径、 η : 開口能率)、自己相関振幅係数を ρ 、ボルツマン定数を k とすると次の式で表すことができる (付録 C)。

$$\text{SEFD} = \frac{2kT_{\text{sys}}^*}{A_{\text{eff}}},$$

$$S = \text{SEFD} \times \rho.$$

テンプレート法を行うためには、ある局のある時刻におけるスペクトルをテンプレートとして定めたうえで、その時刻における SEFD が必要になる。テンプレートとして選んだスペクトルは、観測中 T_{sys}^* の値が記録されている水沢、入来、小笠原、石垣の 4 局 (VERA) の中から、目視でノイズが少ない局、時刻を選択した。その後、該当時刻、局での開口能率を推測した。

開口能率の推測には、図 4.1 に示す VERA の有効開口面積と仰角の関係性を用いた。これを見ると、仰角が 30° 以上では、開口能率が 50 - 55 % 程度で安定していることがわかるが、それよりも低い仰角では徐々に開口能率が上がっていき、 20° 付近ではそれまでの一定値に対し、10% 程度増加している様子がわかる。よって、テンプレートとして選択した時間のアンテナ仰角が 30° 以上だった epoch 4 では 50 - 55 % の平均値である 52.5 % を開口能率として使用し、仰角が 20° 付近であった epoch 1, 2, 3 では、52.5 % の 10 % 増加を仮定して、開口能率を 57.8 % を使用した。各 epoch ごとにテンプレートとした局およびその時刻でのシステム雑音温度を表 4.1 に示す。

また、epoch 3 の水沢局のスペクトルが一部の時間帯で乱れていたため、該当時間の振幅ゲイン較正解は、アプリオリ較正と呼ばれる別の方法で求めた。これは、事前を取得されたゲインカーブ情報 (開口能率 η の仰角 EL 依存性を表した曲線) のファイルを別途読み込み、観測中に記録された T_{sys}^* の情報と組み合わせること

で、特定の局、時刻における SEFD を直接導出する手法である。

表 4.1: テンプレート局の情報

epoch	テンプレート局	T_{sys}^* [K]	開口能率 [%]
1	入来	130	57.8
2	小笠原	149.5	57.8
3	石垣	118.3	57.8
4	入来	124	52.5

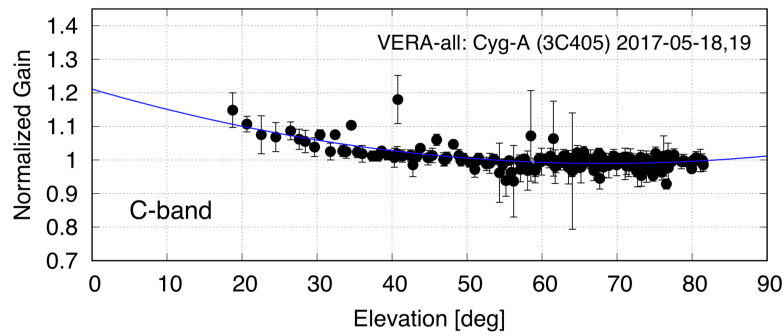


図 4.1: VERA C-band におけるアンテナ有効開口面積と仰角の関係 (EAVN Status Report for the 2022A Semester)。この図は、2017/5/18, 5/19 に Cyg-A (3C405) を観測し、VERA の全局データを積分することで測定されたものである。また、縦軸は仰角 50° の開口能率値で規格化した規格化振幅を表す。

8. メーザーピークによるフリンジフィッティング

各 epoch の強度ピークチャンネルにおけるメーザースポットの中で、最も明るいものをリファレンスとしてフリンジフィッティングを行い、位相解と遅延時間変化率の解を求めた。その結果得られた解をメーザー放射が見られるすべてのチャンネルのビジビリティに適用した。

9. Dirty Image 作成

今までに得た解を適用して、8. にてフリンジフィッティングに用いたメーザースポットが存在するチャンネルに対する Dirty Image および合成ビームマップを作成した (付録 B)。

10. CLEAN Image 作成 (ピークチャンネル)

self calibration を行うためには、一度強度ピークチャンネルの CLEAN Image を

作成する必要があるため、9. にて得られた Dirty Image を CLEAN する事で、強度ピークチャンネルの CLEAN Image を作成した。CLEAN の詳細は付録 B に記述する。

11. self calibration

10. で得られた強度ピークチャンネルの CLEAN Image をモデルとして、フリンジフィッティングに用いたメーザースポットの構造に起因するビジビリティの位相・振幅の較正を同時に行った。

12. CLEAN Image 作成（全チャンネル）

self calibration で得られた振幅および位相較正解をメーザー放射が見られる全チャンネルに適用した後に、1 ピクセル 2 mas の $8''.0 \times 8''.0$ の広範囲な CLEAN Image および 1 ピクセル 0.5 mas の高分解能な $2''.0 \times 2''.0$ の CLEAN Image の 2 つを作成した。

13. メーザースポットのパラメーター取得

作成した CLEAN Image 内からメーザースポットのピーク位置とその強度等のパラメータを取得した。この時、同一チャンネル内に、複数の分離した別々のスポットが見られる場合にも、それぞれ独立したメーザースポットとして同定・検出を行った。本研究ではメーザースポットの検出条件として、(1) 信号対雑音比 (S/N) ≥ 5 であること、(2) 2 チャンネル以上連続して同じ位置（合成ビームサイズ以内）にスポットが存在することの 2 つを課し、条件を満たしたものを 1 チャンネルごとにスポットとして同定した。

5 結果

5.1 メーザースポット空間分布

解析の結果、epoch 1, 2, 3, 4 でそれぞれ 26, 58, 69, 66 個のメタノールメーザースポットを検出した。得られた空間分布を図 5.1 に示し、各 epoch で検出されたスポットのパラメータを表 5.1 - 5.4 に示す。メーザースポットの空間的な広がりには最大 3000 au 程度であり、視線速度範囲は $V_{\text{LSR}} = -36.502 - -27.706$ km/s であった。図の原点はFRINGE フィッティングに用いたメーザースポットになっており、他の全スポットはその原点スポット（以下、リファレンススポット）に対する相対位置としてプロットされている。ここで表 5.1 - 5.4 を見ると、リファレンススポットの座標が (0,0) から僅かに離れている事が確認できるが、これには以下の理由が考えられる。

1. 各 epoch の強度ピークチャンネルにおいて、リファレンススポット以外のスポットも検出されたため、そのスポットがFRINGE フィットの解に悪影響を及ぼしている。
2. リファレンススポットが点源ではなく、有限の広がりを持っていたため、求めた座標が (0,0) から僅かに離れた。

しかし、リファレンススポットの座標のズレは最大で 1 mas 程度と、ビームサイズに比べて十分小さいため、後述する固有運動導出等の解析に影響はないと考えられる。

本研究で解析したデータのうち、epoch 1 のデータは Fujisawa et al. (2014) によって解析されたデータと同一のものである。解析の結果、メーザースポットの空間分布が Fujisawa et al. (2014) での結果（図 2.2）とおおよそ一致したため、解析手法に誤りがないことを確認することができた。一方、epoch 2, 3, 4 では epoch 1 に比べて検出されたメーザースポットの数が増える結果となった。これは、epoch 1 は大口径を持つ山口局が参加していなかった事による感度低下や、G6.18 のフラックス密度が周期変動の極小期に近いタイミングでの観測であったことなどが関係していると考えられる。

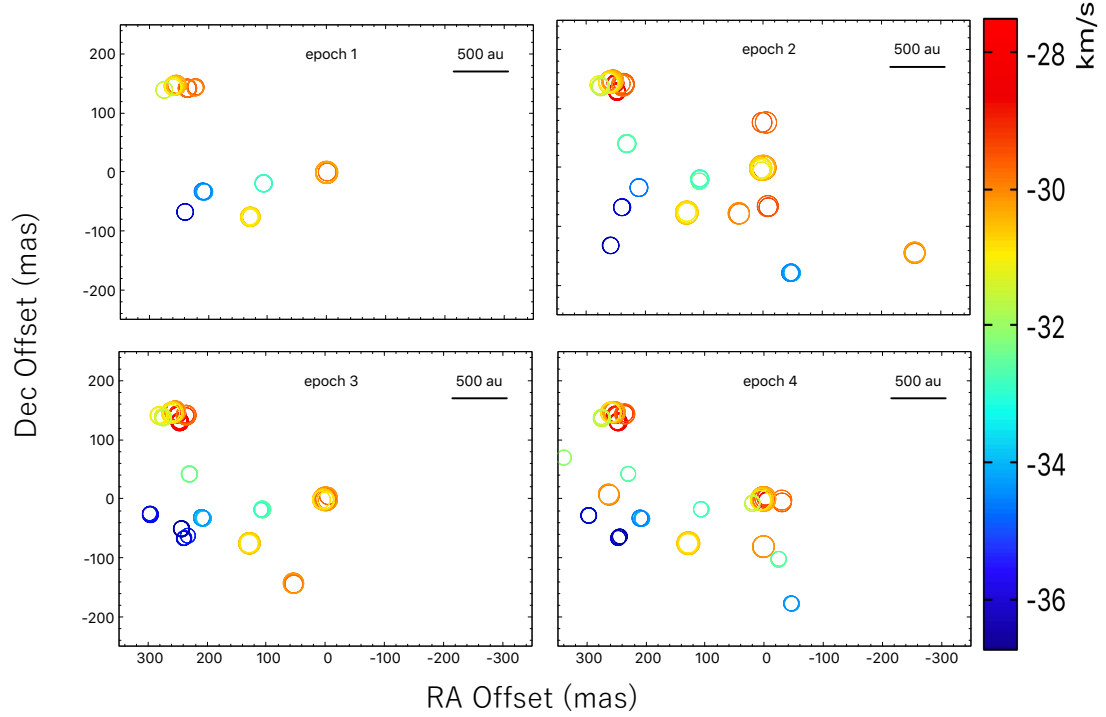


図 5.1: 検出された 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布。左上、右上、左下、右下がそれぞれ epoch 1, 2, 3, 4 の空間分布に対応している。カラーバーは視線速度に対応しており、円のサイズは log スケールで表した強度を表している。横軸と縦軸はそれぞれリファレンスメーザースポットに対する相対座標軸である。

表 5.1: epoch 1 で検出されたメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	235.364	0.195	141.844	0.443	-29.437	753.48	8.2
2	235.535	0.105	141.947	0.229	-29.613	1334.0	14
3	221.366	0.380	143.974	0.560	-29.613	492.03	5.5
4	235.800	0.145	142.109	0.277	-29.788	1068.00	12
5	221.878	0.205	143.657	0.375	-29.788	755.85	8.6
6	-1.102	0.164	0.164	0.292	-29.788	996.16	11

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
7	253.867	0.188	148.362	0.341	-29.964	993.90	11
8	222.417	0.236	142.715	0.486	-29.964	570.79	6.3
9	-0.561	0.046	-0.396	0.075	-29.964	3802.0	42
10	254.163	0.085	147.496	0.156	-30.140	1896.0	21
11 [†]	-0.106	0.028	-0.535	0.047	-30.140	6043.0	69
12	254.708	0.091	147.026	0.142	-30.316	2011.0	22
13	0.065	0.045	-0.783	0.075	-30.316	4020.0	44
14	127.887	0.203	-75.847	0.388	-30.316	718.48	7.9
15	254.818	0.121	146.824	0.260	-30.492	1164.0	12
16	258.565	0.077	145.849	0.179	-30.492	1549.0	16
17	128.584	0.083	-75.805	0.177	-30.492	1692.0	18
18	258.997	0.109	145.761	0.183	-30.667	1527.0	16
19	129.042	0.064	-75.781	0.145	-30.667	2126.0	23
20	259.658	0.132	145.490	0.288	-30.843	1078.0	12
21	129.240	0.105	-75.923	0.222	-30.843	1328.0	14
22	259.998	0.309	144.278	0.581	-31.017	484.32	5.4
23	129.618	0.254	-75.938	0.510	-31.017	478.27	5.3
24	274.879	0.222	139.239	0.472	-31.370	657.98	7.2
25	274.677	0.202	139.015	0.468	-31.546	659.47	7.3
26	106.775	0.209	-19.112	0.504	-32.601	669.93	7.3
27	106.530	0.152	-19.054	0.332	-32.777	916.86	10
28	106.671	0.243	-18.966	0.448	-32.952	625.18	6.9
29	206.293	0.267	-33.660	0.611	-34.181	516.97	5.7
30	207.910	0.353	-32.599	0.479	-34.359	549.94	6.2
31	209.717	0.227	-32.797	0.376	-34.535	743.16	8.4
32	239.502	0.199	-67.613	0.489	-35.941	616.36	7.0

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
33	239.491	0.190	-67.593	0.471	-36.117	625.68	7.1

(1) スポット ID 番号

(2)–(5) 原点に対するスポットの RA, Dec 相対位置オフセットおよびその位置誤差

(6) スポットの視線速度 V_{LSR}

(7) スポットの強度

(8) 信号雑音比

† リファレンスマーザースポット

表 5.2: epoch 2 で検出されたマーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	247.294	0.346	129.884	0.754	-28.166	557.81	5.7
2	247.373	0.373	127.978	0.724	-28.341	611.06	6.2
3	247.490	0.419	127.661	0.634	-28.517	644.08	6.5
4	249.754	0.370	141.751	0.689	-28.693	567.41	5.7
5	250.054	0.280	143.571	0.757	-28.869	658.13	6.5
6	235.696	0.576	140.821	0.721	-29.396	1891.0	8.1
7	-8.570	1.230	-66.896	1.022	-29.396	1279.0	5.4
8	236.628	0.373	140.911	0.480	-29.572	4840.0	13.2
9	1.839	1.060	76.472	0.927	-29.572	2097.0	5.7
10	-7.971	0.613	-65.401	0.598	-29.572	3371.0	9.2
11	237.462	0.488	139.562	0.630	-29.748	5105.0	10.7
12	-4.813	0.727	76.201	0.688	-29.748	3920.0	8.2
13	-2.028	0.321	-0.284	0.442	-29.748	6660.0	13.9

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
14	255.034	0.382	147.300	0.452	-29.923	1968.0	8.0
15	240.731	1.074	141.826	0.706	-29.923	1242.0	5.1
16	40.307	0.224	-78.169	0.367	-29.923	2405.0	9.8
17	-1.612	0.106	-0.624	0.105	-29.923	9085.0	37.2
18	-256.94	0.309	-145.357	0.459	-29.923	2147.0	8.8
19	254.296	0.271	147.524	0.374	-30.099	3680.0	10.1
20	41.058	0.193	-77.529	0.329	-30.099	4144.0	11.3
21	-1.022	0.086	-0.272	0.086	-30.099	15385	42.0
22	-256.504	0.258	-144.149	0.397	-30.099	4005.0	10.9
23	255.305	0.235	146.190	0.321	-30.275	4154.0	12.3
24 [†]	0.662	0.100	-0.156	0.079	-30.275	15508	46.1
25	-256.905	0.457	-143.306	0.588	-30.275	2498.0	7.4
26	258.267	0.737	144.830	0.735	-30.451	6653.0	8.0
27	129.907	0.461	-77.531	0.810	-30.451	5088.0	6.1
28	1.766	0.281	-0.732	0.254	-30.451	17736	21.3
29	259.569	0.305	144.749	0.437	-30.626	4227.0	8.2
30	129.119	0.149	-75.888	0.235	-30.626	7096.0	13.8
31	4.342	0.306	-1.240	0.240	-30.626	6476.0	12.6
32	260.915	0.403	143.479	0.393	-30.802	3503.0	9.5
33	129.194	0.164	-75.866	0.278	-30.802	4429.0	12.1
34	3.176	0.420	-1.520	0.331	-30.802	3679.0	10.0
35	261.469	0.380	143.332	0.353	-30.978	1602.0	9.6
36	129.199	0.246	-75.523	0.412	-30.978	1250.0	7.5
37	3.415	0.529	-2.178	0.446	-30.978	1357.0	8.2
38	278.022	0.395	139.853	0.394	-31.154	1021.0	9.8
39	2.577	0.537	-4.822	0.583	-31.154	662.86	6.4
40	275.416	0.269	138.751	0.493	-31.330	757.27	7.7

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
41	275.061	0.221	136.819	0.416	-31.505	932.35	9.4
42	274.847	0.225	136.229	0.424	-31.681	869.01	8.8
43	231.025	0.347	41.002	0.581	-32.384	919.00	7.7
44	107.991	0.618	-23.247	0.798	-32.384	578.00	4.8
45	230.660	0.291	40.550	0.423	-32.560	1242.0	9.3
46	106.797	0.372	-20.324	0.596	-32.560	978.00	7.3
47	230.654	0.253	40.122	0.456	-32.736	788.33	8.3
48	107.412	0.208	-19.728	0.331	-32.736	1203.0	12.6
49	107.256	0.252	-18.118	0.533	-32.912	686.90	7.2
50	-49.015	0.363	-178.509	0.622	-34.142	622.00	6.1
51	-47.417	0.354	-177.352	0.594	-34.318	657.72	6.5
52	210.252	0.212	-33.987	0.327	-34.494	1082.0	10.8
53	-45.725	0.357	-178.352	0.513	-34.494	737.75	7.3
54	210.486	0.273	-34.132	0.430	-34.669	859.56	8.7
55	238.648	0.331	-67.148	0.521	-35.900	733.50	7.5
56	239.432	0.423	-67.383	0.584	-36.076	630.04	6.5
57	257.989	0.466	-132.066	0.610	-36.251	535.93	5.5
58	258.367	0.341	-131.817	0.547	-36.427	655.61	6.6

(1) スポット ID 番号

(2)–(5) 原点に対するスポットの RA, Dec 相対位置オフセットおよびその位置誤差

(6) スポットの視線速度 V_{LSR}

(7) スポットの強度

(8) 信号雑音比

† リファレンスマーザースポット

表 5.3: epoch 3 で検出されたメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	246.635	0.178	131.606	0.500	-27.706	313.05	7.6
2	246.506	0.108	131.026	0.251	-27.882	593.82	13
3	246.322	0.072	130.729	0.168	-28.058	901.64	21
4	246.285	0.066	130.380	0.144	-28.234	1009.0	24
5	246.782	0.129	129.304	0.277	-28.410	565.05	13
6	250.290	0.250	142.192	0.437	-28.410	340.15	7.9
7	250.209	0.112	142.868	0.223	-28.585	684.45	16
8	250.246	0.126	143.534	0.278	-28.761	589.08	13
9	249.882	0.292	144.445	0.623	-28.937	260.01	6.3
10	250.189	0.192	144.862	0.549	-29.113	403.42	10
11	235.273	0.285	141.388	0.707	-29.289	359.09	7.7
12	235.154	0.140	141.952	0.285	-29.464	1619.0	15
13	235.504	0.132	141.718	0.245	-29.640	2395.0	17
14	-4.872	1.182	4.930	1.204	-29.640	736.00	5.4
15	-2.529	0.347	-1.745	0.278	-29.640	1505.0	10
16	253.580	0.155	148.032	0.388	-29.816	1515.0	11
17	236.187	0.283	142.021	0.377	-29.816	1542.0	11
18	53.187	0.318	-144.133	0.539	-29.816	1026.0	7.8
19	-4.189	0.366	-0.979	0.296	-29.816	1864.0	14
20	-0.979	0.103	-0.064	0.173	-29.816	2947.0	22
21	253.721	0.150	148.608	0.336	-29.992	2726.0	13
22	53.044	0.237	-143.499	0.452	-29.992	2075.0	10
23	-0.954	0.061	-0.183	0.081	-29.992	9092.0	45
24	254.195	0.137	148.153	0.265	-30.167	3442.0	16
25	53.808	0.161	-142.699	0.308	-30.167	2852.0	13
26 [†]	-0.572	0.057	0.071	0.075	-30.167	10463	50

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
27	257.997	0.171	146.317	0.235	-30.343	4170.0	17
28	128.293	0.129	-75.311	0.231	-30.343	3991.0	16
29	3.767	0.335	-0.938	0.224	-30.343	3547.0	14
30	258.078	0.201	146.273	0.264	-30.519	3980.0	14
31	128.139	0.143	-75.015	0.249	-30.519	4055.0	14
32	2.634	0.382	-0.852	0.245	-30.519	3765.0	13
33	259.216	0.114	146.039	0.210	-30.695	4107.0	18
34	128.560	0.141	-75.245	0.250	-30.695	3227.0	14
35	2.725	0.547	-1.350	0.347	-30.695	2120.0	9.5
36	281.549	0.228	141.279	0.358	-30.871	924.00	8.5
37	259.602	0.101	145.909	0.189	-30.871	2188.0	20
38	128.801	0.178	-75.655	0.325	-30.871	1191.0	11
39	-1.365	0.528	-2.419	0.512	-30.871	693.00	6.4
40	6.223	0.305	-1.159	0.441	-30.871	883.00	8.1
41	276.741	0.498	139.602	0.668	-31.046	305.22	5.0
42	281.951	0.203	141.262	0.388	-31.046	529.61	8.7
43	260.525	0.196	145.552	0.358	-31.046	697.05	11
44	274.850	0.111	138.921	0.228	-31.222	681.03	16
45	274.401	0.113	137.831	0.252	-31.398	637.14	15
46	274.205	0.180	137.341	0.396	-31.574	383.25	9.0
47	229.658	0.159	42.319	0.363	-32.101	417.84	10
48	229.827	0.121	42.282	0.263	-32.277	581.21	13
49	106.105	0.198	-18.256	0.434	-32.277	395.14	9.4
50	106.267	0.096	-17.877	0.230	-32.453	737.85	17
51	230.033	0.207	41.764	0.417	-32.453	394.49	9.4
52	106.804	0.122	-18.029	0.317	-32.628	585.05	14
53	107.977	0.190	-17.896	0.636	-32.804	317.15	7.9

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
54	108.694	0.230	-18.354	0.702	-32.980	248.77	6.0
55	205.541	0.229	-32.902	0.469	-33.859	341.87	8.3
56	206.690	0.165	-33.283	0.339	-34.035	457.59	10
57	208.820	0.157	-32.141	0.292	-34.210	526.27	12
58	209.521	0.137	-31.711	0.283	-34.386	557.18	12
59	232.565	0.151	-62.427	0.438	-35.265	331.36	8.0
60	297.414	0.278	-24.942	0.581	-35.441	244.66	5.9
61	232.454	0.186	-62.411	0.471	-35.441	319.18	7.7
62	296.923	0.223	-24.965	0.469	-35.617	310.61	7.6
63	296.130	0.133	-25.987	0.323	-35.792	465.87	10
64	238.389	0.302	-66.083	0.575	-35.792	280.94	6.5
65	295.960	0.122	-26.772	0.282	-35.968	472.40	11
66	239.928	0.362	-67.025	0.526	-35.968	258.01	6.1
67	243.124	0.157	-50.649	0.267	-36.144	535.65	12
68	243.420	0.123	-50.805	0.260	-36.320	556.62	13
69	243.674	0.191	-50.372	0.419	-36.495	340.93	8.2

(1) スポット ID 番号

(2)–(5) 原点に対するスポットの RA, Dec 相対位置オフセットおよびその位置誤差

(6) スポットの視線速度 V_{LSR}

(7) スポットの強度

(8) 信号雑音比

† リファレンスメーザースポット

表 5.4: epoch 4 で検出されたメーザースポットのパラメータ

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	247.795	0.251	130.367	0.404	-28.065	483.12	8.3
2	247.066	0.119	130.251	0.226	-28.240	936.04	15
3	246.944	0.112	130.455	0.236	-28.416	1006.0	16
4	251.782	0.180	142.279	0.293	-28.592	676.78	11
5	247.466	0.169	130.341	0.397	-28.592	632.65	10
6	-3.840	0.253	-2.414	0.586	-28.592	399.81	6.8
7	251.604	0.152	142.422	0.259	-28.768	848.31	13
8	249.077	0.259	130.110	0.511	-28.768	428.38	7.0
9	-4.508	0.257	-1.203	0.671	-28.768	446.54	7.3
10	251.139	0.242	142.879	0.387	-28.944	535.29	9.3
11	250.693	0.384	142.319	0.538	-29.119	348.28	6.0
12	235.625	0.501	144.146	0.613	-29.295	544.69	8.2
13	-2.523	0.815	2.671	0.924	-29.295	443.87	6.7
14	235.492	0.338	143.499	0.407	-29.471	1537.0	11
15	-2.742	0.781	2.148	0.880	-29.471	992.00	7.4
16	236.023	0.338	143.640	0.429	-29.647	2559.0	11
17	-1.356	0.398	1.243	0.493	-29.647	2549.0	11
18	-30.319	0.522	-6.039	1.181	-29.647	1405.0	6.3
19	253.112	0.321	146.510	0.534	-29.822	2611.0	9.0
20	-0.125	0.156	0.321	0.217	-29.822	6743.0	23
21	-29.932	0.572	-1.980	0.680	-29.822	2359.0	8.1
22	253.122	0.213	146.304	0.509	-29.998	3866.0	10
23	262.232	0.543	6.554	0.821	-29.998	2575.0	7.1
24	0.509	0.139	0.681	0.172	-29.998	10790	29
25	0.854	0.455	-80.478	0.469	-29.998	4090.0	11
26	253.407	0.241	146.559	0.441	-30.174	4062.0	11

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
27	263.485	0.440	7.949	0.736	-30.174	2739.0	7.9
28 [†]	1.083	0.120	0.456	0.140	-30.174	12839	36
29	1.357	0.350	-80.976	0.373	-30.174	4816.0	13
30	255.662	0.579	146.660	0.861	-30.350	3130.0	6.4
31	128.222	0.282	-75.295	0.451	-30.350	4814.0	9.8
32	0.697	0.179	-0.835	0.222	-30.350	11289	23
33	128.419	0.208	-75.125	0.365	-30.526	7820.0	11
34	3.576	0.497	-0.589	0.476	-30.526	7447.0	11
35	259.434	0.417	146.516	0.828	-30.701	3346.0	6.5
36	128.730	0.223	-75.163	0.383	-30.701	5407.0	10
37	5.002	0.570	-1.030	0.592	-30.701	4617.0	9.0
38	259.806	0.319	145.947	0.589	-30.877	1974.0	8.4
39	128.656	0.293	-75.323	0.545	-30.877	1808.0	7.7
40	5.827	0.420	-2.218	0.531	-30.877	2244.0	9.6
41	275.473	0.428	138.736	0.756	-31.229	333.14	5.6
42	274.794	0.180	137.396	0.366	-31.404	670.45	11
43	19.637	0.375	-5.849	1.396	-31.404	321.96	5.3
44	274.784	0.154	136.578	0.294	-31.580	797.73	13
45	19.994	0.335	-8.248	0.932	-31.580	350.53	5.7
46	274.652	0.308	136.533	0.734	-31.756	363.36	6.3
47	339.346	0.282	70.138	0.696	-31.932	313.38	5.4
48	338.910	0.304	69.674	0.735	-32.108	335.81	5.7
49	-24.551	0.252	-102.456	0.750	-32.459	407.59	6.9
50	229.996	0.337	42.000	0.917	-32.459	309.01	5.2
51	230.098	0.376	42.776	0.920	-32.635	313.14	5.3
52	-24.770	0.317	-101.500	0.868	-32.635	328.09	5.5
53	106.335	0.352	-17.677	0.592	-32.635	401.28	6.8

表は次ページに続く

前ページからの続き

ID	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	ピーク強度 (mJy beam ⁻¹)	S/N
	RA	σ_α	Dec	σ_δ			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
54	107.053	0.503	-17.543	0.837	-32.811	299.77	5.2
55	206.238	0.304	-33.428	0.624	-34.041	331.71	5.5
56	207.254	0.327	-33.420	0.537	-34.217	395.07	6.6
57	-47.124	0.370	-177.437	0.696	-34.217	335.39	5.6
58	209.611	0.261	-32.618	0.419	-34.393	519.67	8.9
59	-45.626	0.397	-176.941	0.781	-34.393	332.15	5.7
60	210.290	0.250	-32.567	0.523	-34.569	459.53	7.9
61	296.855	0.408	-28.281	0.674	-35.799	344.19	5.9
62	296.951	0.305	-27.970	0.459	-35.975	437.47	7.5
63	297.174	0.318	-27.895	0.466	-36.151	375.24	6.3
64	247.139	0.602	-66.401	0.869	-36.151	346.11	5.8
65	245.794	0.543	-64.621	0.675	-36.326	390.64	6.7
66	244.204	0.467	-63.641	0.980	-36.502	312.42	5.2

(1) スポット ID 番号

(2)–(5) 原点に対するスポットの RA, Dec 相対位置オフセットおよびその位置誤差

(6) スポットの視線速度 V_{LSR}

(7) スポットの強度

(8) 信号雑音比

† リファレンスメーザースポット

5.2 メーザーフィーチャー

メーザーは、原始星周りの局所的な領域から確認される。また、複数のメーザースポットが、連続して同じ領域に含まれることが知られている。この領域を以下では「メーザー放射領域」と呼ぶ（図 5.2）。そのため、大質量原始星近傍の運動を捉えるためには、メーザースポットではなく、メーザー放射領域の運動を推定する必要がある。よって、検出したメーザースポットを同じメーザー放射領域に含まれると思われるもの同士をクラスタとしてグループ分けし、そのクラスタごとに固有運動を求める事とした。

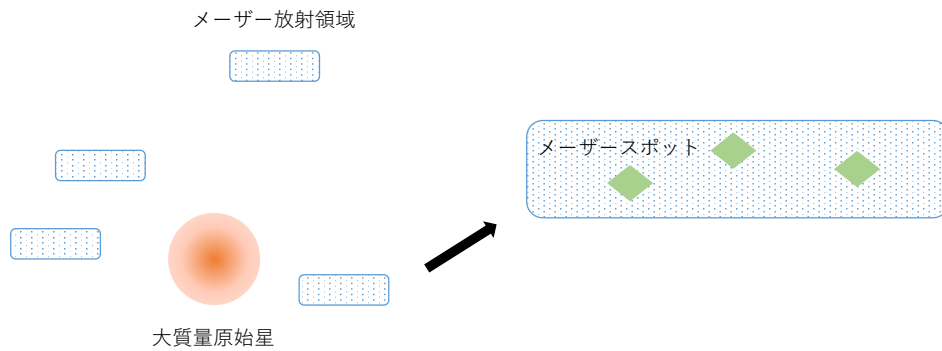


図 5.2: 大質量原始星に付随するメーザー放射領域、及びメーザースポットの関係。

一方で、1.2.2 章で記述した Minier et al. (2002) では、メーザースポットの構造をコンパクトなコア構造と広がったハロー構造の組み合わせで説明した（図 1.5）。また、その結果、導出されたコア構造とハロー構造の最小値 - 最大値はそれぞれ 2 - 20 au, 12 - 290 au であった。この先行研究結果を踏まえた上で、(i) 本研究における観測は広がった成分にに対して十分な感度がないという点と、(ii) 数 100 au にまで広がるハロー構造を考慮しても検出されたメーザースポットの適切な分類は不可能であるという二つの観点から、今回の解析ではコア構造に特化してメーザースポットのグループ分けを行なった。

以上より、本研究では「コアを伴うメーザーが観測されるために必要な物理条件」を満たす放射領域をメーザーフィーチャーと呼び、各フィーチャーごとに固有運動を求める事とした。メーザーフィーチャーの同定手順は次の 4 つである。

1. メーザースポットの強度ピーク位置に Minier et al. (2002) におけるコア領域最大値である 20 au に相当する円（本解析では 3.9 mas）を重ね、連続した 3 チャンネルでそれらの円が空間的に隣り合うチャンネル間で重なっているものは、同じフィーチャー内のスポットとみなす（図 5.3）。

2. 周波数スペクトル上で明らかに成分が分離している場合には、その視線速度情報も考慮してフィーチャーを分離、同定する（図 5.4）。
3. 複数 epoch に渡って確認されたフィーチャーを構成するスポット数が、各 epoch 間で異なる場合、該当する epoch 全てで検出されたスポットのみでフィーチャーを構成する（図 5.5）。
4. フィーチャーを代表する位置は内部のスポットの強度で重みをかけない単純位置平均で定義する。

3 番目の条件に基づいてフィーチャーを構成するスポットを決定し、スポットの明るさで重みをつけた位置平均ではなく、4 番目の条件に基づく代表位置を採用する事で、離角の小さいスポット同士の相対的な輝度の変化による偽の固有運動を導出してしまうこと（クリスマスツリー効果）を避ける効果が期待される。

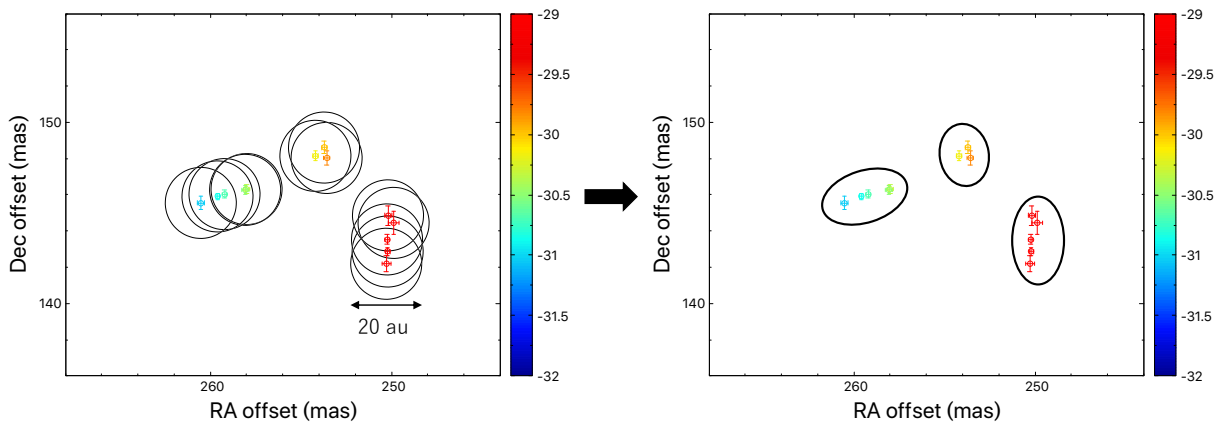


図 5.3: 位置情報によるメーザーフィーチャーの区別の一例。横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する赤経および赤緯の相対座標であり、色は視線速度に対応している。色付きの円は各メーザースポットの位置であり、十字はそのエラーである。各スポットの強度ピークを中心に 20 au に相当する円をプロットし（左）、その結果をもとにフィーチャーを同定している（右）。

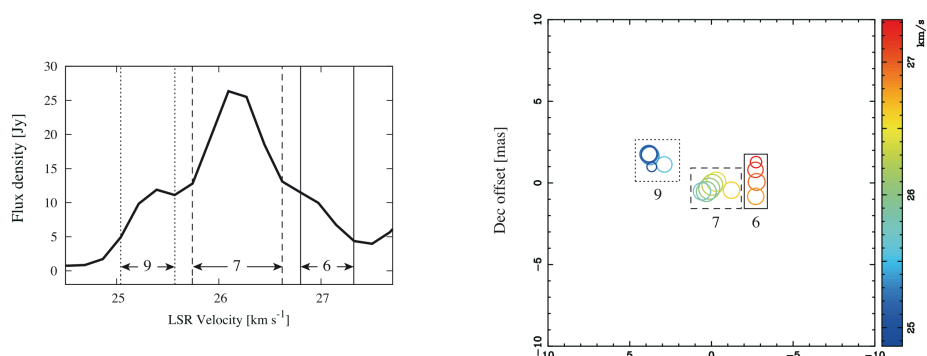


図 5.4: 視線速度によるメーザーフィーチャーの区別の一例 (Sugiyama et al. 2016)。左図が自己相関スペクトルで右図が空間分布である。左図の横軸と縦軸はそれぞれ、視線速度とフラックス密度を表す。右図の横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する赤経および赤緯の相対座標であり、色は視線速度に対応している。円の大きさは $\log$ スケールで表した強度に比例している。広い速度範囲においてスポットが隣接して確認できるが、スペクトルの各速度成分ごとにスポットをフィーチャーとして同定している。

手順 1, 2 に基づいて同定されたフィーチャー

手順 3 によって修正されたフィーチャー

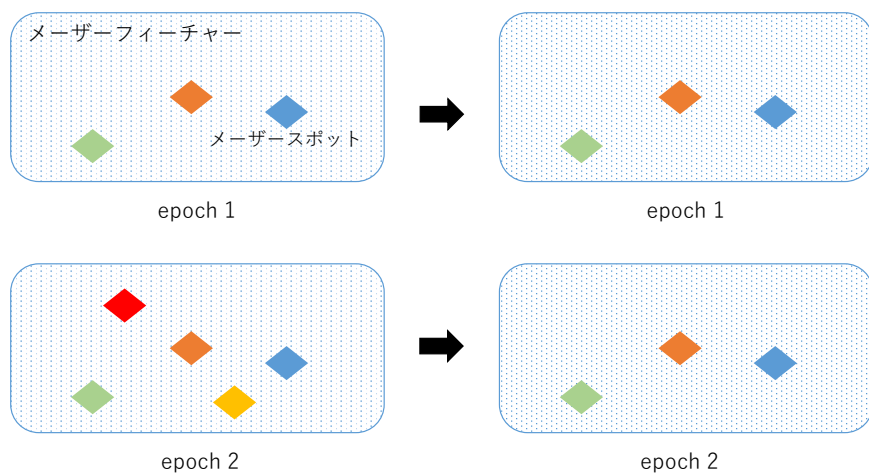


図 5.5: 手順 3 に基づくフィーチャー同定方法。点で塗りつぶされた長方形がフィーチャーを表し、ひし形がスポットを表している。また、各スポットの色の違いは視線速度の違いに対応している。この図の場合、手順 1, 2 によって epoch 1, 2 にわたって同じフィーチャーが同定されたが、手順 3 によって視線速度情報を元にフィーチャーを構成するスポットを epoch 1 に合わせている。

解析の結果、epoch 1, 2, 3, 4 でそれぞれ 8, 12, 14, 11 個のメーザーフィーチャーを同定した。同定したメーザーフィーチャーを図 5.6 に示し、そのパラメータを表 5.5 - 5.8 に示す。積分強度はフィーチャーに含まれる全スポットの強度の値を 1 ch あたりの速度幅 ~ 0.175 km/s で積分した値である。視線速度の値は、フィーチャーに含まれる全スポットの値を単純に平均した値である。座標のエラー σ_{feature} は、フィーチャーが n 個のスポットで構成されており、各スポットの座標とエラーが x_i, σ_i かつフィーチャーの座標を $\bar{x}$ として、

$$\sigma_{\text{feature}} = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}{n-1}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}\right)^2}$$

で与えた。右辺の平方根内の第一項と第二項はそれぞれ、フィーチャーを構成するスポットの座標の平均二乗誤差の二乗と分散を表す。また、epoch 間で共通するフィーチャーが複数同定されたため、フィーチャー ID を ID* として再びナンバリングした (表 5.9)。ID* は、フィーチャーが同定された epoch 間の視線速度の平均値が小さい順に定義した。表 5.9 から、同定されたフィーチャーのうち 4 epoch にわたり確認されたものは 4 個、3 epoch にわたり確認されたものは 5 個である事が確認できる。

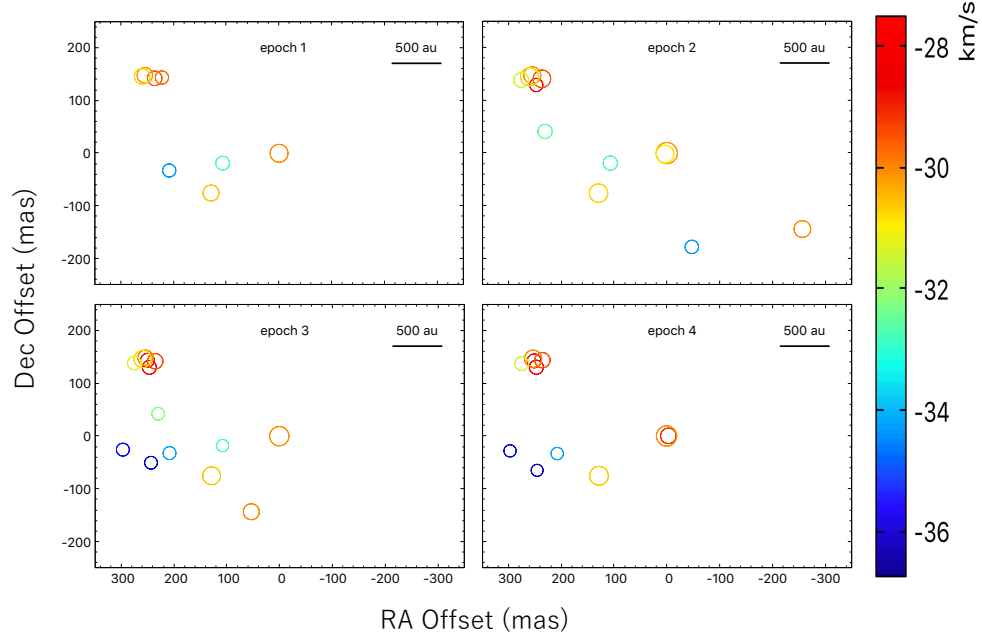


図 5.6: 同定されたメーザーフィーチャー。左上、右上、左下、右下がそれぞれ epoch 1, 2, 3, 4 での結果に対応している。横軸と縦軸はそれぞれ、原点に対する赤経および赤緯の相対座標であり、色は視線速度に対応している。円の大きさは log スケールで表したフィーチャーの積分強度に対応している。

表 5.5: epoch 1 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (mJy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1	3	235.566	0.222	141.966	0.305	-29.612	554.66
2	3	221.887	0.494	143.448	0.677	-29.788	319.68
3 [†]	4	-0.426	0.456	-0.387	0.362	-30.052	2612.2
4	3	254.246	0.366	147.628	0.588	-30.140	861.47
5	4	128.688	0.526	-75.839	0.175	-30.579	1030.8
6	4	259.3045	0.571	145.344	0.671	-30.754	815.32
7	3	106.658	0.203	-19.044	0.380	-32.776	388.82
8	3	207.973	1.420	-33.018	0.631	-34.358	318.17

† リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.6: epoch 2 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (mJy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1	3	247.385	0.419	128.507	1.181	-28.341	318.67
2	3	236.595	0.835	140.431	0.816	-29.571	2080.5
3	3	254.878	0.500	147.004	0.672	-30.099	1722.9
4	3	-256.783	0.363	-144.270	0.941	-30.099	1520.4
5 [†]	4	-0.051	1.345	-0.446	0.258	-30.186	10144
6	4	260.055	1.283	144.097	0.771	-30.714	2809.8
7	4	129.354	0.415	-76.202	0.846	-30.714	3139.9
8	3	3.056	0.595	-2.840	1.482	-30.977	1001.7
9	4	275.836	1.292	137.913	1.494	-31.417	629.22
10	3	230.779	0.312	40.558	0.556	-32.560	518.43
11	3	107.155	0.359	-19.390	1.027	-32.735	504.11
12	3	-47.385	1.378	-178.071	0.716	-34.317	354.63

† リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.7: epoch 3 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (mJy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1	3	246.463	0.240	130.137	0.631	-28.233	435.17
2	5	250.163	0.185	143.580	1.014	-28.761	400.26
3	3	235.310	0.225	141.686	0.462	-29.464	768.70
4	3	253.832	0.292	148.264	0.380	-29.991	745.48
5	3	53.346	0.394	-143.443	0.701	-29.991	1046.4
6 [†]	4	0.315	2.002	-0.278	0.404	-30.079	4578.8
7	4	128.448	0.272	-75.306	0.289	-30.606	2190.9
8	4	259.355	0.883	145.943	0.314	-30.782	1928.6
9	4	275.049	1.021	138.423	0.932	-31.309	352.72
10	3	229.839	0.210	42.121	0.397	-32.276	244.95
11	3	107.825	0.795	-18.093	0.535	-32.804	202.31
12	3	208.343	1.211	-32.378	0.714	-34.210	270.88
13	4	296.606	0.605	-25.666	0.817	-35.704	262.53
14	3	243.406	0.263	-50.608	0.332	-36.319	251.92

† リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.8: epoch 4 で同定されたメーザーフィーチャーのパラメータ

ID	スポット数	相対位置オフセット (mas)				視線速度 (km s ⁻¹)	積分強度 (mJy beam ⁻¹ km s ⁻¹)
		RA	σ_α	Dec	σ_δ		
1	3	247.158	0.252	130.349	0.270	-28.416	452.57
2	4	251.304	0.456	142.474	0.350	-28.855	423.39
3	5	-2.993	1.137	0.489	2.010	-29.154	849.23
4	3	235.713	0.413	143.761	0.508	-29.470	815.74
5	3	253.213	0.265	146.457	0.443	-29.998	1852.5
6 [†]	4	0.541	0.447	0.155	0.599	-30.086	7323.1
7	4	128.506	0.262	-75.226	0.306	-30.613	3489.0
8	4	274.925	0.374	137.310	0.971	-31.492	380.50
9	3	207.701	1.436	-33.155	0.598	-34.216	219.10
10	3	296.993	0.328	-28.048	0.498	-35.974	203.36
11	3	245.712	1.287	-64.887	1.359	-36.326	184.42

† リファレンススポットを含むフィーチャー

表 5.9: フィーチャー ID 対応表

ID*	視線速度 (km/s) (epoch 間平均)	ID (epoch 1)	ID (epoch 2)	ID (epoch 3)	ID (epoch 4)
1	-28.330		1	1	1
2	-28.808			2	2
3	-29.154				3
4	-29.529	1	2	3	4
5	-29.788	2			
6	-29.991			5	
7	-30.057	4	3	4	5
8	-30.099		4		
9 [†]	-30.100	3	5	6	6
10	-30.628	5	7	7	7
11	-30.750	6	6	8	
12	-30.977		8		
13	-31.406		9	9	8
14	-32.418		10	10	
15	-32.771	7	11	11	
16	-34.261	8		12	9
17	-34.317		12		
18	-35.839			13	10
19	-36.319			14	
20	-36.326				11

† リファレンススポットを含むフィーチャー

5.3 固有運動

本研究では、4 epoch 全てにわたって確認されたフィーチャーの単純位置平均を epoch 間で共通する重心と仮定し、この重心に対する固有運動を 3 epoch 以上にわたって存在しているフィーチャーについて計測した。これにより、各 epoch の空間分布において原点となっている強度ピークスポットを含むフィーチャーの固有運動も導出することが可能となる。導出方法は、横軸を観測日時、縦軸を赤経 (RA) もしくは赤緯 (Dec) の座標値としたグラフを用い、観測期間内に加速・減速が無いと仮定して直線による最小二乗フィッティングを採用した。導出された重心に対する相対的な固有運動と、各フィーチャーの重心に対する RA, Dec それぞれの相対位置オフセットの変化をそれぞれ図 5.7, 5.8 に示す。また、固有運動の速度の情報などのパラメータを表 5.10 に示す。導出した固有運動の絶対値の範囲は 0.543 - 21.874 km/s であった。

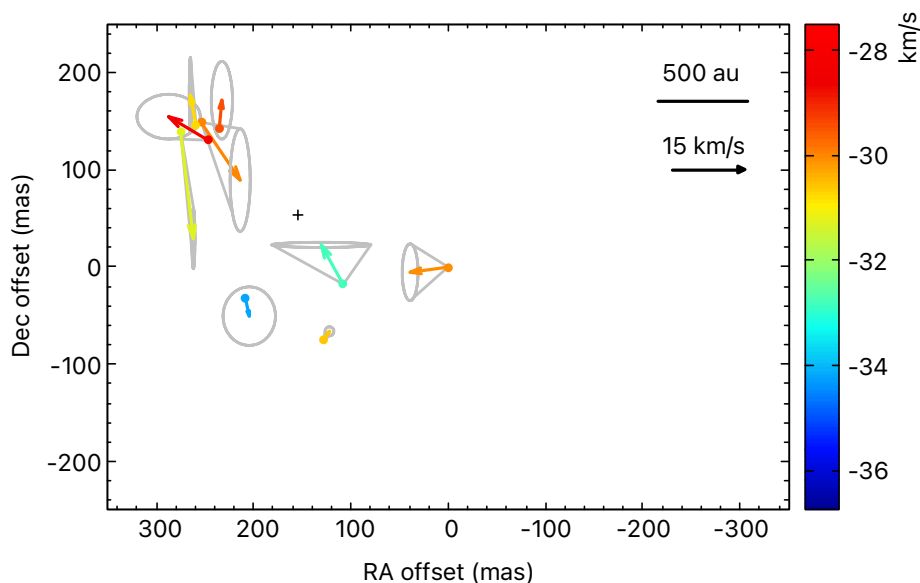


図 5.7: 導出された重心 (十字印) に対する各フィーチャーの固有運動。矢印が固有運動の速度を表しており、コーン底面の広がりでそのエラーを表している。丸の位置が各フィーチャーの位置を epoch 間で平均したものを表し、番号は表 5.9 における ID* に対応している。色は視線速度に対応している。空間スケールおよび速度スケールは図中右上に示してある。

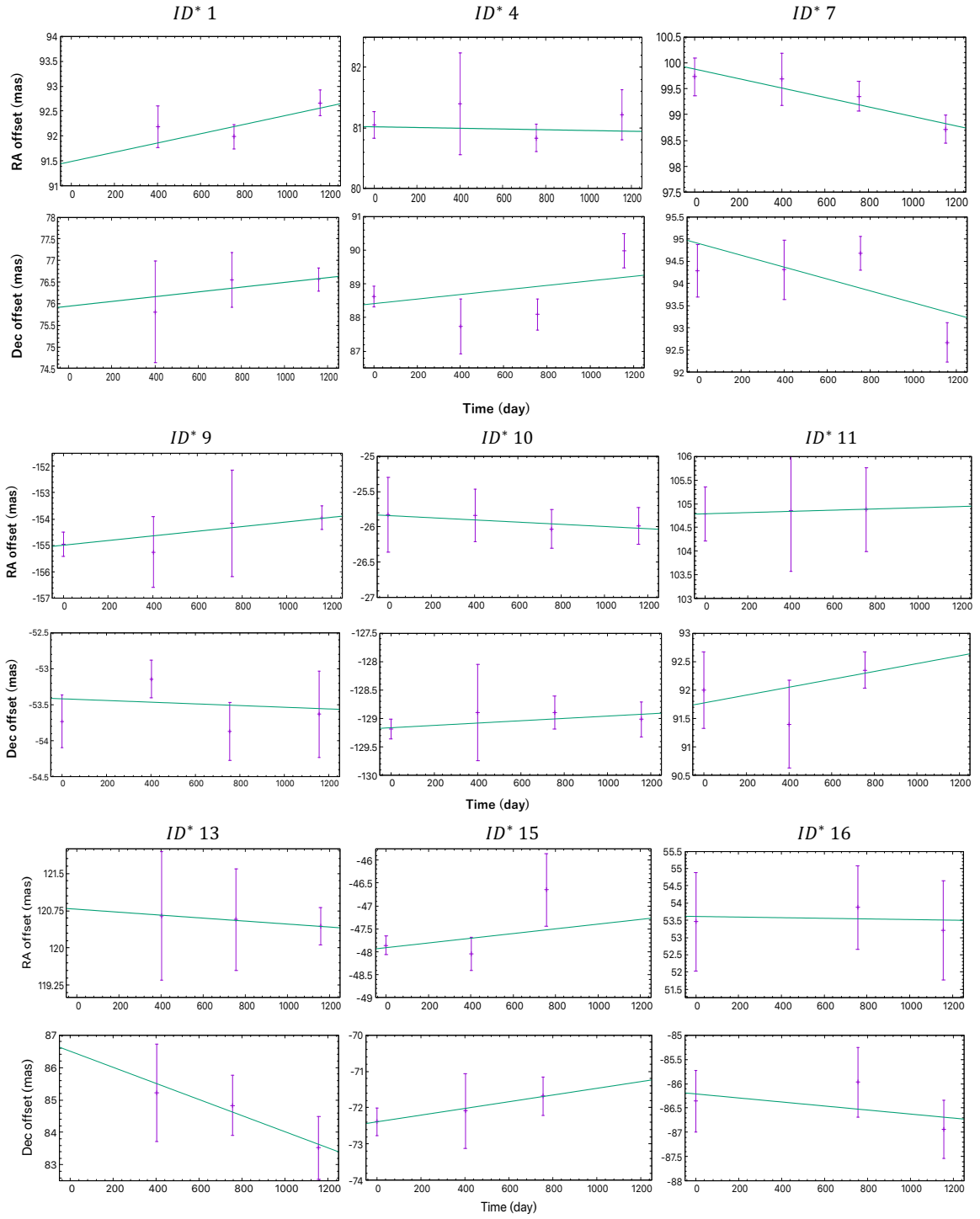


図 5.8: 各フィーチャーの時間（日付：epoch 1 からの通算日）に対する重心からの RA, Dec 相対位置オフセットの変化と、それに対する直線フィットの結果。ID* は表 5.9 に対応している。緑の実線が直線フィットの結果を表す。

表 5.10: 導出された固有運動のパラメータ

ID*	固有運動							
	μ_α	σ_{μ_α}	μ_β	σ_{μ_β}	V_x	σ_{V_x}	V_y	σ_{V_y}
	(mas yr ⁻¹)				(km s ⁻¹)			
1	0.337	0.269	0.201	0.190	8.156	6.506	4.864	4.597
4	-0.022	0.089	0.245	0.330	-0.543	2.168	5.948	7.986
7	-0.331	0.085	-0.488	0.436	-8.022	2.062	-11.815	10.555
9 [†]	0.320	0.067	-0.042	0.242	7.755	1.624	-1.031	5.859
10	-0.053	0.037	0.074	0.038	-1.305	0.902	1.803	0.928
11	0.046	0.009	0.252	0.321	1.124	0.221	6.099	7.768
13	-0.109	0.013	-0.904	0.256	-2.637	0.319	-21.874	6.194
15	0.187	0.421	0.336	0.021	4.525	10.185	8.129	0.521
16	-0.032	0.222	-0.150	0.248	-0.790	5.386	-3.645	6.014

† リファレンススポットを含むフィーチャー

6 考察

6.1 メーザーフィーチャー運動平面の推定

5.3 章で計測した固有運動 (図 5.7) から直接、回転等の規則的な運動は確認できなかったため、この結果からだけでは G6.18 で観測されるメーザーの本性を判断することは難しい。一方で、Sanna et al. (2010, 2017) や Sugiyama et al. (2014, 2016) 等の論文で円盤と思われる同一平面に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーが複数報告されているため、本天体におけるメーザーも同一平面に付随して運動していると仮定して Sanna et al. (2017) のモデル (図 1.3) を参考にメーザーフィーチャーの運動平面を推定した。

メーザーの運動平面を求めるにあたり、天球面の RA 方向に沿った x 軸、Dec 方向に沿った y 軸、視線方向に沿った z 軸からなる $x - y - z$ 座標を定義する。この $x - y - z$ 座標に二回の回転座標変換を施した $x'' - y' - z'$ 座標における、 $x'' - y'$ 平面が推定されるメーザーの運動平面となる。以下では具体的な手順を記述する。

まず、 $x - y - z$ 座標における $x - y$ 平面を z 軸周りに位置角 PA (Position angle : 天球面上で真北を 0 度、反時計回りに正) だけ回転させる。回転後の軸を $x' - y' - z$ 軸とする。次に、 $x' - z$ 平面を y' 軸の周りに傾斜角 i (inclination) だけ回転させることで $x'' - y' - z'$ という座標系を作成する。以上を図で表すと図 6.1 のようになる。ここで i は視線と $x'' - y'$ 平面のなす角を表し、図 6.1 に示されている方向に正とした。また、 $x'' - y' - z'$ 平面は回転行列を使うと以下の式で求められる (付録 D)。

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin i & 0 & \cos i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos PA & -\sin PA & 0 \\ \sin PA & \cos PA & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

V'_z は計算の結果求められる $x'' - y'$ 平面に垂直な (z' 軸に並行な) 速度成分であり、各フィーチャーにおける V'_z の二乗和が最小となるように PA, i を決定することで、 $x'' - y'$ 平面がメーザーの運動平面を推定する。ここで V_z は、視線速度から対象天体の推測されるシステム速度 $V_{\text{sys}} = -32.617 \text{ km/s}$ を引いたものである (付録 E)。なお、この推定方法は Sanna et al. (2017) における手法と同じものである。解析の結果、 $PA = 16.739^\circ \pm 18.42^\circ$, $i = -15.461^\circ \pm 11.71^\circ$ と求める事ができた。

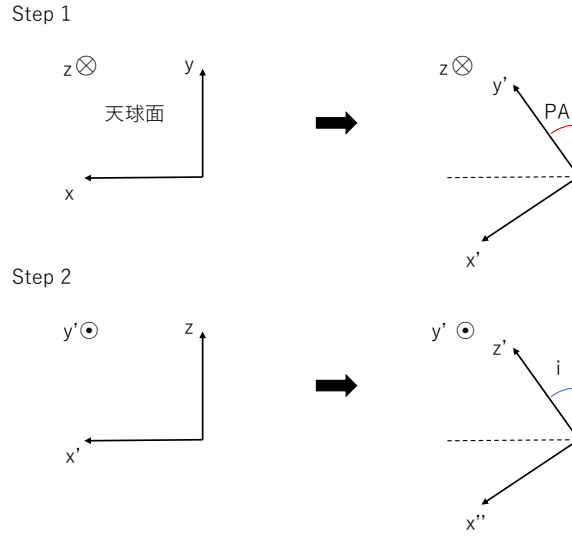


図 6.1: メーザーの運動面を推定するための座標変換。x - y 平面を z 軸（視線方向）周りに角度 PA だけ回転させた後に、x' - z 平面を y' 軸周りに角度 i だけ回転させることで、フィーチャーの運動面である x'' - y' 平面を推定する。

また、Sanna et al. (2017) と同様に、 V'_z と求めた x'' - y' 平面に平行な速度成分 $V_p = \sqrt{V_x'^2 + V_y'^2}$ の比を取ることで、メーザーフィーチャーが x'' - y' 平面にどの程度沿った運動をしているか推定した（図 6.2）。図中の各点が各フィーチャーにおける $|V'_z/V_p|$ の値であり、緑の実線がその加重平均を表している。これをみると、フィーチャーの運動はほとんど x'' - y' 平面に沿ったものになっており、G6.18 で観測されたメーザーが同一平面に付随しており、その面内を運動しているという仮定の正当性を支持する結果となった。よって、以下では x'' - y' 平面を、メーザーが付随する円盤面と仮定して議論を進める。

PA, i から円盤面の向きがわかったことで、固有運動を円盤面に投影した図の作成が可能である（図 6.3 左）。Sanna et al. (2017) では同様の図の原点を中心星の位置として円盤モデルを議論していたが、G6.18 は中心星の位置についての先行研究がないため、図 5.7 における重心を x'' - y' 平面に投影したものを中心星の位置と仮定して原点に採用した。図 6.3 左を見ると、フィーチャー ID* 1, 4, 7, 11, 13 が空間的に近い位置に存在し、それぞれがランダムな運動をしていることが確認できる。また、Motogi et al. (2019) 等で若い進化段階にある大質量原始星周囲の円盤は、不安定かつ温度や密度なども不均一な分布を示していることが観測的にも明らかになっている。よって、これらの近接した場所におけるランダムな運動が、局所的な乱流運動などに起因している可能性を考え、該当す

るフィーチャーの位置・速度を平均したものを求めた（図 6.3 右）。これを見ると、全体として中心星にインフォールしながら回転運動をしているようにも見える。ただし、5.3 章の固有運動導出の際に、フィーチャーは観測期間内で RA, Dec 方向の加速・減速が無いと仮定したため、図 6.3 右の運動を回転運動と解釈するには、観測期間 4 年が回転の周期に対して十分短く、その期間での運動が直線運動で近似できなければならない。この点について考察するため、各フィーチャーが回転運動をしていた場合の回転周期を推定した。以下ではその詳細を記述する。

初めに、6.3 章にて後述する中心星の光度 $L \sim 1.22 \times 10^4 L_{\odot}$ から、質量光度関係

$$\frac{L}{L_{\odot}} \sim 1.4 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{3.5}$$

を用いて中心星質量を $M \sim 13.36 M_{\odot}$ と推定した。次に、求めた M を用いて、該当するフィーチャーの回転運動の周期をケプラーの式

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}$$

から推定した。結果を表 6.1 に示す。ここで R は中心星とフィーチャーの距離、 T は回転運動の周期、 G は万有引力定数である。表 6.1 を見ると、どのフィーチャーの回転周期も 10^4 年のオーダーである事が確認できる。よって、観測期間である 4 年は回転周期に対して十分短く、この期間での回転運動を直線運動で近似して解釈することは問題ないと考えられる。

ただし、以上の解釈は中心星の位置を推定する際の仮定や、近接したフィーチャーのランダムな運動が、局所的な乱流運動などに起因しているといった仮定に基づいていることに注意が必要である。仮にこの回転・インフォールの運動が正しい場合、大質量原始星への激しい質量降着を仮定している Inayoshi et al. (2013) や、大質量星形成の降着説を支持する結果となり得る。

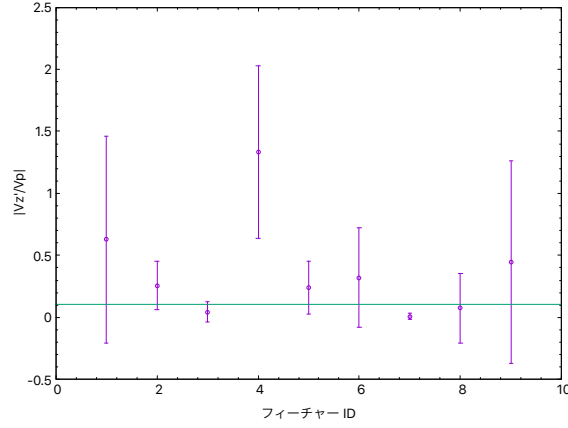


図 6.2: $x'' - y'$ 平面に垂直な速度成分 V_z' と平行な速度成分 V_p の比を、各メーザーフィーチャーごとに表した図。エラーバーは誤差伝搬で計算される $|V_z'/V_p|$ のエラーであり、緑の実線は各フィーチャーにおける $|V_z'/V_p|$ の加重平均である。

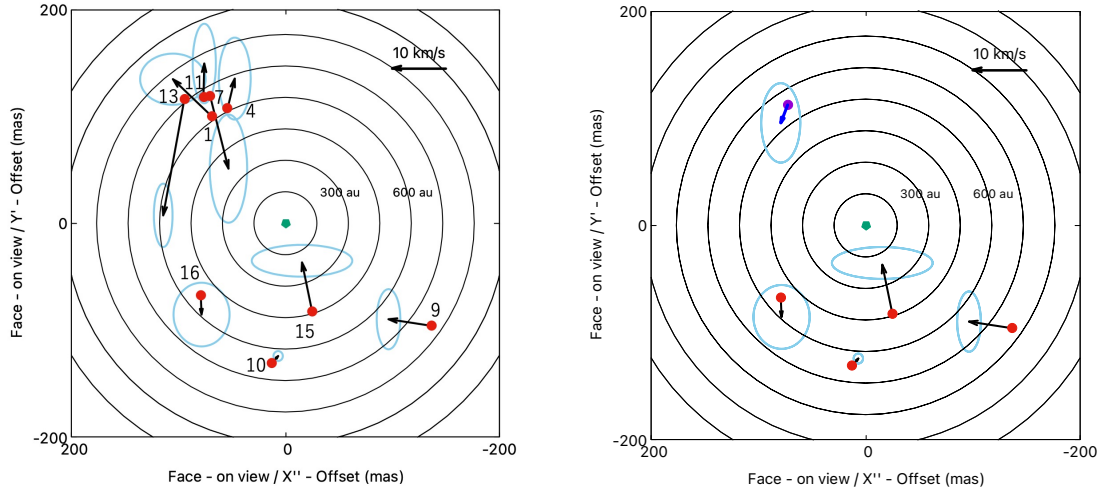


図 6.3: (左) $PA = 16.739^\circ$, $i = -15.461^\circ$ における $x'' - y'$ 平面を正面から見た Face-on view 図。緑の点と赤い点は、それぞれ図 5.7 における重心と各フィーチャーの位置 (epoch 間で平均を取ったもの) を $x'' - y'$ 平面に投影したものであり、黒い矢印と水色の楕円は、 $x'' - y'$ 平面でのフィーチャーの運動とそのエラーを表している。また、縦横軸は重心からの相対位置に対応している。(右) 紫丸、青矢印はそれぞれ、左図のフィーチャー ID* 1, 4, 7, 11, 13 の位置、および速度を平均したものを表す。

表 6.1: 推定される回転運動の周期

ID*	回転周期 (yr)
9	6.8×10^4
10	4.7×10^4
15	2.5×10^4
16	3.3×10^4
★	4.8×10^4

★ 図 6.3 右において紫丸で示されているフィーチャー

6.2 周期強度変動成分の分布

6.1 章で G6.18 に付随するメーザーフィーチャーの運動を特徴づける円盤面を推定したことで、中心星と各フィーチャーの位置関係が求められるようになった。そこで、表 5.9 で ID* を定義したフィーチャーの内、日立モニター観測の結果 G6.18 の天体信号と判定された速度成分に対応するフィーチャーを円盤正面から見た図 6.3 に重ねた (図 6.4)。図における番号は表 5.9 の ID* に対応している。また、赤い点は先行研究にて周期が 180 日と同定された速度成分に対応するフィーチャーであり、青点は周期が同定されていない速度成分に対応するフィーチャーである。これを見ると、フィーチャーは中心星からの最大で 2400 au 以内に分布している事が確認できる。次章 6.3 にて、6.7 GHz メタノールメーザーの励起に必要なダスト温度との関連性を元に、より定量的な議論を展開する。

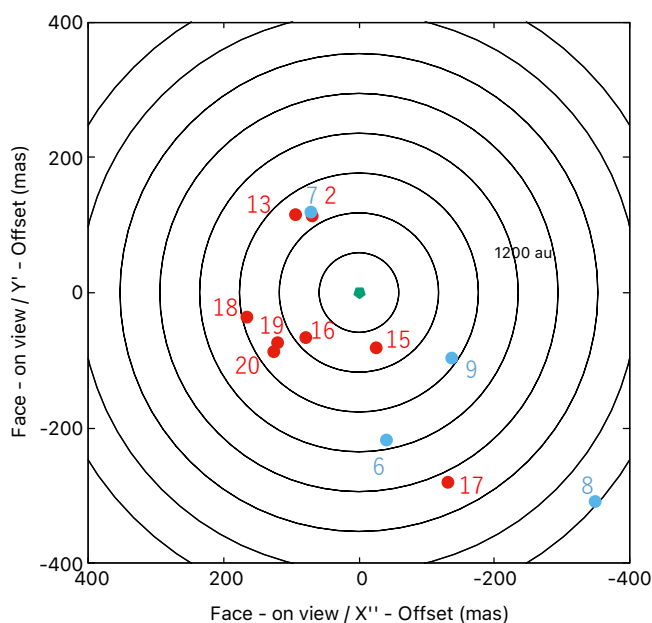


図 6.4: 図 6.3 の運動平面に、本研究における解析で同定されたフィーチャー全てを加えた図。赤点が先行研究で周期が 180 日と同定された速度成分に対応するフィーチャーを示しており、青点が周期が同定されていない成分を示している。

6.3 周期変動成分の励起の妥当性

Cragg et al. (2005) では、Class II メタノールメーザーの輝度温度とダスト温度の関係が報告されている (図 6.5)。これを見ると 6.7 GHz メタノールメーザーはダスト温度 $T_{\text{dust}} \sim 110$ K 付近でメーザー放射が始まり、そこから急激に輝度温度が上昇していき、 $T_{\text{dust}} \sim 140$ K 付近で輝度温度の上昇が緩やかになっている事が確認できる。この関係から、周期強度変動を起こすメーザーフィーチャーのダスト温度はメーザーの輝度温度が変化しやすい温度、つまり $110 \text{ K} \leq T_{\text{dust}} \leq 140 \text{ K}$ であると予想できる。

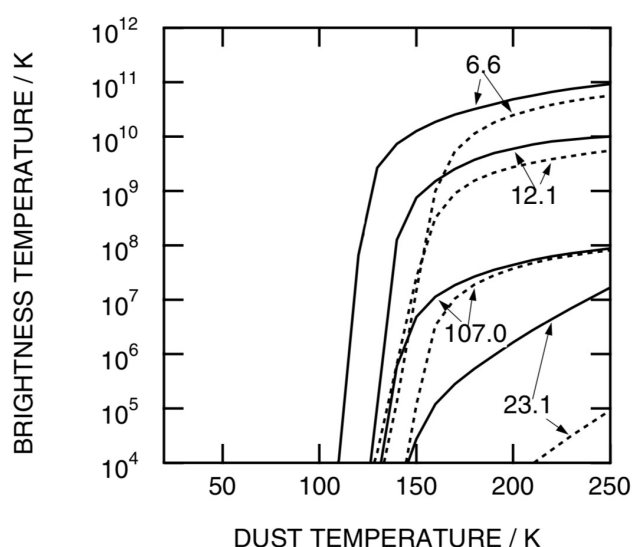


図 6.5: Class II メタノールメーザーの各遷移周波数における輝度温度とダスト温度の関係 (Cragg et al. 2005)。点線がこれまでに予想されていたモデルであり、実線が Cragg et al. (2005) で新たに提案されたモデルを表す。なお、このモデルではメーザー領域が密度 $n_{\text{H}} = 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 、運動温度 $T_{\text{k}} = 150 \text{ K}$ であると仮定している。6.7 GHz (図では 6.6 GHz) のメーザーは、ダスト温度 110 K 付近で急激に輝度温度が上昇している事が確認できる。

ここで、中心星からの距離を R 、その場所でのダスト温度を T_{dust} 、中心星の光度 L とすると、それらにはボルツマン定数を σ として

$$T_{\text{dust}} = (16\pi\sigma)^{-1/4} R^{-1/2} L^{1/4}$$

という関係が成り立つことがわかっている (付録 F)。この式から、 T_{dust} は R と L に依

存する事がわかる。 R は図 6.4 から求められるため、中心星の光度が分かれば各フィーチャーのダスト温度を計算する事ができる。その結果、変動周期が同定されている速度成分に対応するフィーチャーのダスト温度が $110 \text{ K} \leq T_{\text{dust}} \leq 140 \text{ K}$ であった場合、それは G6.18 に付随するメーザーの周期強度変動が 1 つの大質量原始星に起因するという可能性を示す事となり、原始星の脈動により周期強度変動が起こるとしている Inayoshi et al. (2013) のモデル支持する結果となり得る。

上記の方法で T_{dust} を求めるために、中心星光度を推定した。G6.18 の中心星に関する先行研究が見つからなかったため、中心星光度を求めるために IRAS 衛星による観測結果を用いた。G6.18 には IRAS 遠赤外線源 IRAS 17576-2342 が付随することが観測によって報告されており (Chen et al. 2013)、そのフラックス密度も測定されている (IRAS Catalog and Atlas)。また、Casoli et al. (1986) では、IRAS における観測波長 12, 25, 60, 100 μm でのフラックス密度 F_{12} , F_{25} , F_{60} , F_{100} と中心星の光度 L の間に以下の近似式が成り立つと報告している。

$$L = 5.44 \left(\frac{F_{12}}{0.79} + \frac{F_{25}}{2} + \frac{F_{60}}{3.9} + \frac{F_{100}}{9.9} \right) \left(\frac{D}{\text{kpc}} \right)^2 L_{\odot}.$$

以上の関係を用いて、距離 5.1 kpc にある G6.18 の中心星の光度は、 $L \sim 1.22 \times 10^4 L_{\odot}$ と求める事ができた。各観測波長帯におけるフラックスは表 6.2 に示す。しかし、G6.18 と IRAS 17576-2342 の離角は約 6 分角程度離れているため、IRAS 17576-2342 が G6.18 の励起源である、という仮定が成立する場合の概算であり、かつ上記計算値は IRAS 衛星の空間分解能が数分角であることから上限値に相当するということに注意が必要である。

求めた中心星の光度から、図 6.4 において $110 \text{ K} \leq T_{\text{dust}} \leq 140 \text{ K}$ である領域と、各フィーチャーのダスト温度を求めた。結果を図 6.6、表 6.3 に示す。ただし、求めたダスト温度の不確定性には、図 6.4 における中心星とフィーチャーの距離の誤差しか考慮されていない。中心星の位置や光度の誤差を考慮すると、ダスト温度の不確定性はさらに大きくなると考えられる。また、中心星の光度が上限値に相当するため、求めたダスト温度も上限値であることに注意が必要である。

以上を踏まえた上で図 6.6 を見ると、周期強度変動を示しているメーザーフィーチャーの内、ID* 17 以外は $110 \text{ K} \leq T_{\text{dust}} \leq 140 \text{ K}$ の領域内、または内部に存在していることが確認できる。すなわち、これらのフィーチャーの周期強度変動は、図 6.6 の原点にあると仮定した大質量原始星に起因している可能性がある。

一方、ID* 17 のダスト温度は $T_{\text{dust}} \sim 74 \text{ K}$ であり、図 6.5 におけるメーザーが起こるダスト温度の範囲と一致しない。これは、(i) ID* 17 のフィーチャーのダスト温度が、図

6.4 の原点にあると仮定した大質量原始星以外の要因で上昇している事や、(ii) 5.1 章におけるスポット検出の際に、ノイズを ID* 17 を構成するスポットとして検出してしまった可能性などが考えられる。(i) については今回の結果から判断することは難しいが、ID* 17 が他のフィーチャー同様に周期が 180 日と同定されている視線速度成分であることを考えると、その可能性は低いと考えられる。(ii) については、ID* 17 が epoch 2 でのみ同定されたフィーチャーである事や、該当するスポットの S/N が約 6.5 であり、検出条件 $S/N \geq 5$ の下限値付近であるため、ノイズを検出してしまった可能性は考えられる。

以上より、ID* 17 以外の周期が同定されているフィーチャーは、原始星の脈動で周期強度変動が起こるとしている Inayoshi et al. (2013) のモデルで説明できる可能性が高い。しかし、このモデルが原始星の脈動により周囲のメーザーが同時に強度変動を起こすことを予想している一方で、変動周期が同定されているフィーチャーと同程度のダスト温度であるフィーチャーでも、変動周期が同定されていないものも多数存在することが確認できる。これは日立モニター観測中に、周期が同定されていないフィーチャーの実際のダスト温度が、メーザー放射が起こり始める $T_{\text{dust}} = 110 \text{ K}$ の期間が存在し、突発的な変動に影響を受けて周期を同定できなかった可能性が考えられる。

表 6.2: IRAS 17576–2342 の各観測波長帯におけるフラックス密度

観測波長 (μm)	12	25	60	100
フラックス密度 (Jy)	2.889	3.990	42.460	688.9

Reference : IRAS Catalog and Atlas

(<https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/iras.html>)

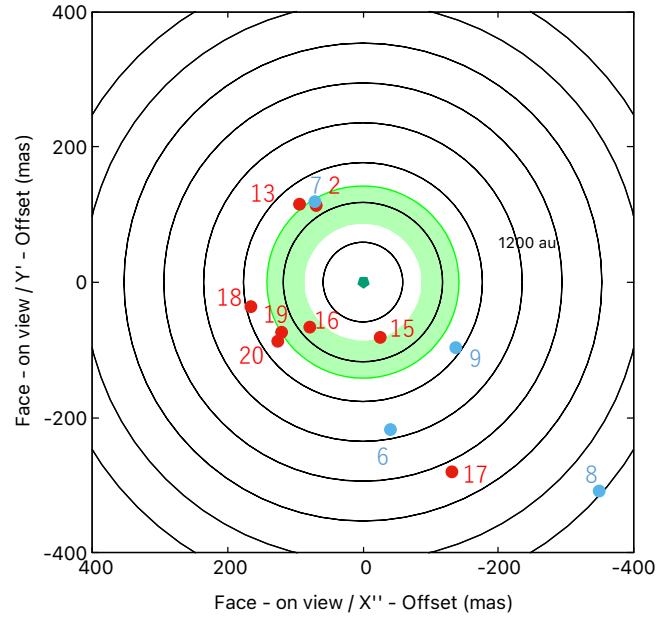


図 6.6: 図 6.4 に緑色で示した $110 \text{ K} \leq T_{\text{dust}} \leq 140 \text{ K}$ である領域を加えた図。変動周期が想定されているメーザーの内、ID* 17 以外は緑色の領域の内部、またはその付近に分布していることが確認できる。

表 6.3: 各メーザーフィーチャーのダスト温度

ID*	中心星からの距離 (au)	error	ダスト温度 (K)	error*
2 [◇]	676.28	3.020	112.496	0.251
6	1130.353	3.433	87.015	0.132
7	706.076	1.806	110.097	0.141
8	2374.313	3.464	60.039	0.044
9 [†]	852.989	7.996	100.168	0.469
13 [◇]	762.364	4.869	105.954	0.338
15	437.285	2.955	139.900	0.473
16 [◇]	528.211	5.093	127.290	0.614
17 [◇]	1576.423	4.600	73.682	0.107
18 [◇]	863.126	2.432	99.578	0.140
19 [◇]	716.902	1.427	109.262	0.109
20 [◇]	781.238	6.534	104.666	0.438

† リファレンススポットを含むフィーチャー

◇ 先行研究で周期が 180 日と同定された速度成分に対応するフィーチャー

★ 中心星とフィーチャーの距離のエラーのみ考慮

6.4 メーザースポットサイズ

1.2.3 章でも述べたように、メーザーのフラックス密度は

$$F \sim B\Omega$$

と表すことができる。この章では、フラックス変動についてサイズ変化の観点からも考察する。具体的なサイズ推定方法は付録 A に記述する。

ただし今回のデータから推定できるサイズは、チャンネル単位でのメーザーのサイズ、つまりメーザースポットのサイズである。5.2 章で説明した通り、メーザースポットはメーザー放射領域そのものを表しているわけではない。しかし、メーザースポット自体は「メーザーフィーチャーを構成する重要なひとつの要素であり、そのメーザーフィーチャーの中で個々に光っている放射の単位」と考えられるため、本研究においても Minier et al. (2002) と同様に、メーザースポットのサイズを推定を行った。ただし、本研究における観測は Minier et al. (2002) での観測よりも速度分解能が良くないため、1 つのチャンネルで空間的に離れた複数のメーザースポットが検出される場合がある。その場合、あるスポットに対するサイズの推定に対し別のスポットがどう影響を及ぼすかを、お互いの強度をもとに考察しなければならない。

本来であれば、周期強度変動が確認されている視線速度に対応するスポットのサイズを各 epoch ごとに推定し、そのサイズ変化を議論するべきであるが、該当するチャンネルのビジビリティプロットを確認したところ、強度が弱くうまくフィッティングができなかった。よって、

1. 変動周期が同定されているメーザーと、中心星からの距離が大きく異らず、同じ原始星の影響で強度変動が起こっていると考えられる。
2. 強度が強くフィッティングの精度が良いとみられる。
3. G6.18 の強度変動は、周期の定量的な同定方法により誤差の範囲内で周期が検出されていない視線速度成分も含めて、全速度成分において同様な周期的強度変動を示している可能性が高い (図 6.7)。

という三つの事情を考慮して、強度ピークチャンネルで検出したリファレンスメーザースポット (フィーチャー ID* 9 に含まれるスポット) のサイズのみを推定する事とした。3. については、図 6.7 (図 2.1 の強度変動プロットを全速度成分に拡張したもの) を見ると、多少のずれはあるが強度ピークチャンネルに対応する速度成分を含めた全ての速度成分で

変動周期が概ね揃っている事が確認できる。また、図 6.8 に各 epoch で取得された日立局の自己相関関数から作成されるトータルパワースペクトルと、各チャンネルで CLEAN によって取得したスポットの強度を足し合わせた図を示す。これを見ると確かにほとんどの速度成分で、3 章で推測した増光・静穏期の通り epoch 1 に比べて epoch 2, 3, 4 の強度が大きくなっていることが分かる。

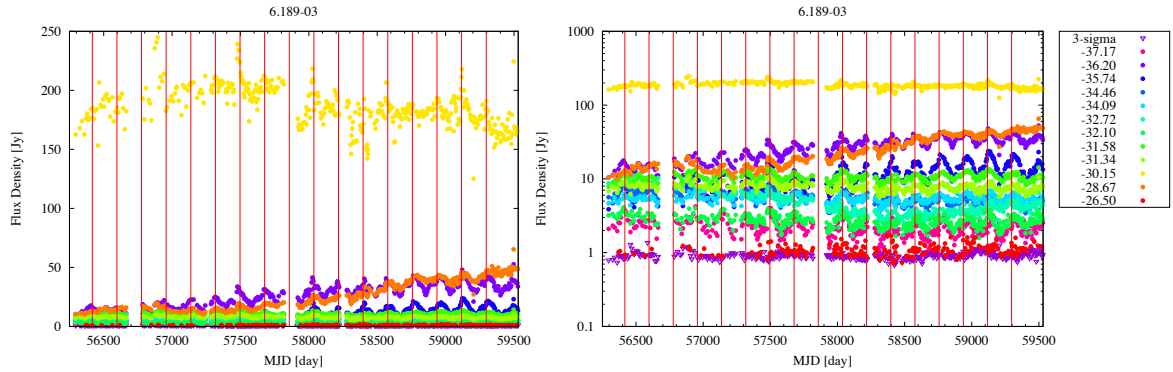


図 6.7: 日立モニター観測によって得られた G6.18 の全速度成分に対する強度変動プロット。左の縦軸はフラックス密度を linear スケールで表したので右の縦軸は log スケールで表したものである。凡例はメーザーの視線速度 (km s^{-1}) を示す。赤線は epoch 4 に最も近い強度極大日を基準に 180 日毎に引いたものである。全速度成分で概ね同じ周期で強度の極大が訪れている事が確認できる。

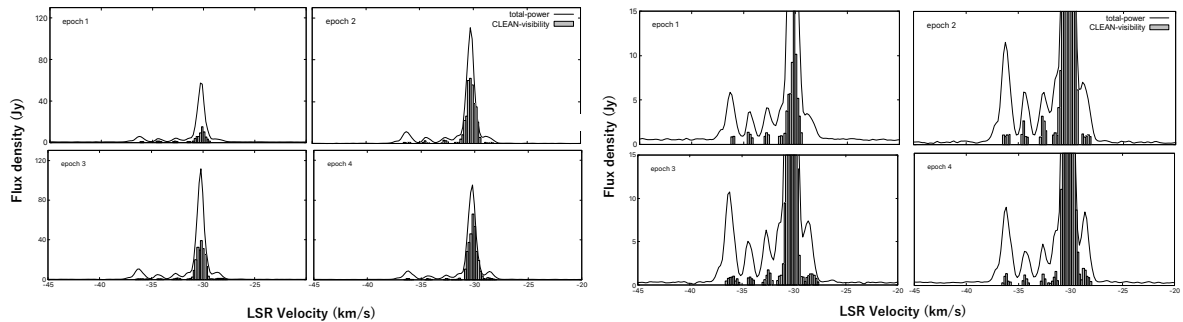


図 6.8: (左): 各 epoch で取得された日立局の自己相関関数から作成されるトータルパワースペクトルと各チャンネルで CLEAN によって取得した成分の強度を足し合わせた図。(右): (左)における放射の弱い成分についても各 epoch ごとの強度の違いをわかりやすくするために拡大した図。

各 epoch の強度ピークチャンネルのビジビリティプロットと、ガウシアンフィットの結果を図 6.9 に示す。なお、このプロットは、フィッティングの精度を良くするために横軸を $10 \text{ M}\lambda$ 毎に区切り、それぞれの区間で縦軸の値を平均したものである。全 epoch において、強度ピークチャンネルでは複数のメーザスポットが同定されたが、リファレンススポットは其中最も明るいメーザスポットであり、epoch 1, 2, 3 では、その強度 F_p がチャンネル内の全スポットの強度 F_{total} の 7 割程度を占めているため、以降のガウシアンフィッティングにより導出されるサイズは、この一番明るいスポットの構造を支配的に表していると仮定した。しかし epoch 4 については、 F_{total} に対して F_p が 5 割強とあまり支配的ではなかったため、注目したピークスポット以外のスポットの影響が他の epoch に比べて大きいと考えられる（表 6.4 参照）。

フィッティングは各 epoch ごとに、1 つのガウシアンと 2 つのガウシアンの足し合わせ、以上 2 パターンについて行い、reduced χ -square がより 1 に近い方を採用した。解析の結果、epoch 1 は広がった 1 つのガウシアン、epoch 2, 3, 4 は、広がったガウシアンとシャープなガウシアンの足し合わせでうまくフィッティングすることができた。これは、epoch 2, 3, 4 では大きな広がりを持つ構造、つまりハロー構造が捉えられたことを意味している（付録 A）。フィッティング結果から推定されるコア・ハローの大きさ等の情報を表 6.4 に示す。表 6.4 を見ると、Minier et al. (2002) で求められたコア構造とハロー構造の最小値 - 最大値の範囲である 2 - 20 au, 12 - 290 au と、今回の解析で求められたコア及びハロー構造の大きさが概ね一致している事がわかる。

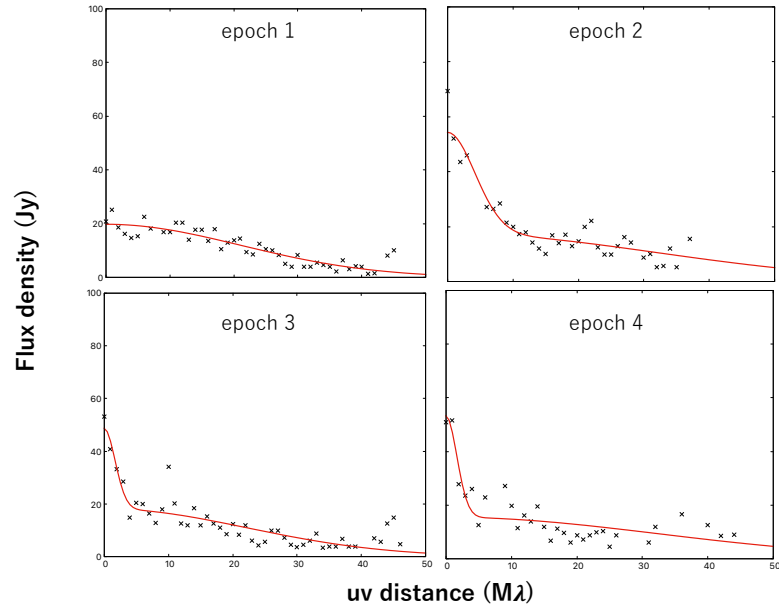


図 6.9: 強度ピークチャンネルにおけるビジビリティプロット (十字) と、そのフィッティング結果 (赤線)。epoch 1 は 1 つのガウシアン、epoch 2, 3, 4 は 2 つのガウシアンの足し合わせでうまくフィットする事ができた。

表 6.4: 放射領域のサイズ

epoch	1	2	3	4
F_p/F_{total}	0.762	0.770	0.673	0.559
推定コアサイズ (au)	21.183 ± 0.764	13.980 ± 2.069	20.178 ± 1.372	13.814 ± 2.210
推定ハローサイズ (au)		106.662 ± 8.960	261.929 ± 34.051	265.666 ± 32.146
reduced χ -square (1 gauss)	7.572	76.959	42.118	66.279
reduced χ -square (2 gauss)	7.836	17.483	20.372	26.591

6.5 周期強度変動とメーザースポットのコア・ハロー構造

表 3.2 で推定した各 epoch の増光・静穏期がリファレンススポットにも適用されるとすると、6.4 章の結果から、静穏期である epoch 1 ではリファレンススポットはコアのみが観測され、増光期である epoch 2, 3, 4 ではコアに加えてハローも観測されたという事になる。この結果は、以下の 2 通りの解釈をする事ができる。

1. リファレンススポットは静穏期ではコアのみの構造を持つが、増光期になるとコアの周りにハローが現れる。
2. リファレンススポットは静穏期、増光期共にコアとハローの構造を有しているが、静穏期はハローの強度が低くコアのみが観測される。一方で、増光期になるとハローの強度が上昇し、コアとハローの両方が観測される。

ここで、1.2.1 章で述べた、ハローが飽和領域であり領域内のメーザー放射の強度変動が小さいという点を考慮すると、1. の解釈が妥当であると考えられる。つまり、G6.18 に付随するメーザーの周期強度変動（少なくともリファレンススポット）は、コアの強度が変化することに加えて、メーザースポットがコアのみの構造の時と、コアとハローの 2 つの構造を持っている時の放射領域サイズの変化にも起因していると考えられる。このことから、G6.18 に付随するメーザーの強度が静穏期、増光期と観測される際の物理的状況の違いは、以下のように考える事ができる。

- 静穏期

メーザースポットのコアの周りにメタノール分子は存在するが、それらがメーザー放射条件を満たしておらず、コアのみがメーザーとして観測される。

- 増光期

ダスト温度が上昇し、メーザーコアの強度が上昇することに加え、静穏期にはメーザー放射条件を満たしていなかったコア周りのメタノール分子がメーザー放射の条件を満たすことでハローが出現し、コアとハローの両方がメーザーとして観測される。

図 6.10 に以上の状況の模式図を示す。

この状況が成り立つには、増光期にハローとなる場所のダスト温度が、メーザー放射が始まる境界である $T_{\text{dust}} \sim 110 \text{ K}$ 付近であることが必要である。対して、リファレンススポットを含む ID* 9 のフィーチャーのダスト温度は $T_{\text{dust}} \sim 100 \text{ K}$ であったため、原

始星の脈動等のきっかけでダスト温度がわずかに変化すれば、レーザー放射の条件を満たしていなかった領域がレーザー放射の条件を満たすようになることは十分考えられる。そのため、リファレンススポットの強度変動がスポットのサイズ変化に起因している可能性は極めて高い。また、リファレンススポットと同じ中心星の影響で強度が変動していると考えられるその他のフィーチャーも、同じようにハローがレーザー放射の条件を満たすことで周期強度変動を起こしている可能性がある。

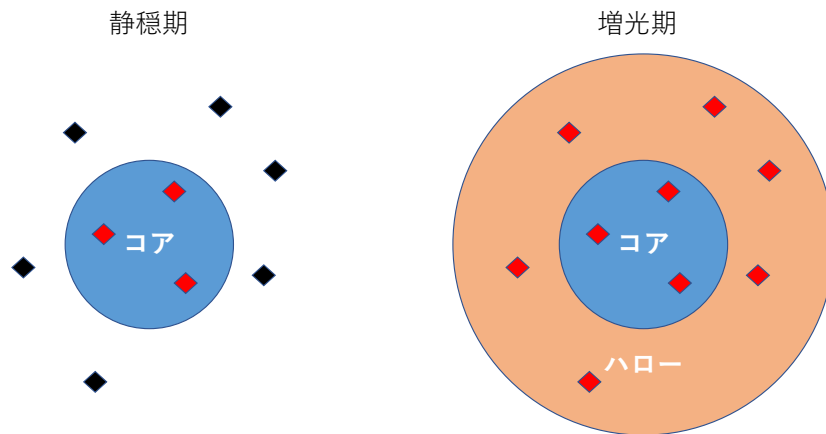


図 6.10: 静穏期と増光期のコア周りのメタノール分子の状況。赤いひし形がレーザー放射条件を満たしているメタノール分子であり、黒いひし形がレーザー放射の条件を満たしていないメタノール分子である。静穏期にはコアの周りのメタノール分子はレーザー放射の条件を満たしていないが、増光期になるとそれらもレーザー放射の条件を満たし、ハローが出現する。

7 まとめ

本研究では、EAVN を用いて 2010 年から年に 1 回ほどの頻度で計 4 回実施された VLBI 観測のデータを解析することで、G006.18–00.35 に付随する 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布、内部固有運動、及び放射サイズと、周期強度変動の関係性を調査した。G006.18–00.35 は日立モニター観測の結果からいくつかの視線速度成分にて、約 180 日で周期強度変動を起こすことが確認されているため、その周期から推定したところ、観測日の内、epoch 1 は静穏期で epoch 2, 3, 4 は増光期であると推定された。

解析の結果、epoch 1, 2, 3, 4 でそれぞれ 26, 58, 69, 66 個のメタノールメーザースポットを検出した。また、大質量原始星近傍の運動を捉えるため、検出されたメーザースポットをメーザーフィーチャーにグループ分けした。その結果、epoch 1, 2, 3, 4 でそれぞれ 8, 12, 14, 11 個のメーザーフィーチャーを同定した。その内 4 epoch にわたり確認されたものは 4 個、3 epoch にわたり確認されたものは 5 個であった。

その後、4 epoch 全てにわたって確認されたフィーチャーの単純位置平均を epoch 間で共通する重心と仮定し、この重心に対する固有運動を 3 epoch 以上にわたって存在しているフィーチャーについて計測したが、固有運動から直接、回転等の規則的な運動は確認できなかった。しかし、本天体におけるメーザーが同一平面に付随して運動しているという仮定の下で、円盤面の向きを推定したところ、メーザーは円盤内で中心星にインフォールしながら回転するような運動を示した。なお、円盤面の向きは、位置角 $PA = 16.739^\circ \pm 18.42^\circ$ 、傾斜角 $i = -15.461^\circ \pm 11.71^\circ$ であった。また、先行研究で変動周期が同定されている速度成分に対応するメーザーの円盤面上での位置を求め、それぞれのダスト温度を計算した。その結果、求めたダスト温度が、メーザー放射の輝度温度が著しく上昇するダスト温度の範囲と概ね一致していた。ダスト温度は中心星光度と中心星からの距離に依存するため、本天体に付随するメーザーの周期強度変動は、一つの大質量原始星に起因すると考えられる。以上より、本天体の周期強度変動機構は、急激な質量降着を前提とした原始星の脈動に起因する Inayoshi et al. (2013) のモデルで説明できる可能性が高い。

また、強度変動に伴うメーザースポットのサイズ変化も調べた。解析の結果、本天体に付随するメーザースポットは、周期強度変動の静穏期ではコア構造のみを持ち、増光期ではメーザー放射の条件を満たす領域が広がり、コア構造に加えてハロー構造を持つ可能性が高いとわかった。推定したコア構造とハロー構造の最小値 - 最大値の範囲は約、14 - 21 au, 107 - 266 au であり、先行研究で求められている範囲と概ね一致した。

謝辭

参考文献

- [1] Bally & Zinnecker 2005 AJ, 129, Issue 5, pp. 2281-2293.
- [2] Bartkiewicz et al. 2009 A&A 502, 155–173
- [3] Beuther et al. 2002, A&A, 390, 289
- [4] Casoli et al. 1986 A&A. 169, 281-297
- [5] Chen et al. 2013 ApJS, 206:9
- [6] Cragg et al. 2005, MNRAS, 360, 533
- [7] EAVN Status Report for the 2022A Semester^{*3}
- [8] Fujisawa et al. 2014 Publ. Astron. Soc. Japan, 66(2), 31
- [9] Goedhart, Gaylard & van der Walt 2003, MNRAS, 339, L33
- [10] Goedhard et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- [11] Green et al. 2011 MNRAS. 417, 2500–2553
- [12] Guzman et al. 2012 ApJ, 753:51
- [13] Hosokawa et al. 2010, ApJ, 721, 478
- [14] Hu et al. 2016 ApJ, 833:18
- [15] Inayoshi et al. 2013 ApJL, 769:L20
- [16] Kurtz et al. 2004 ApJS, 155, 149
- [17] Matveenko 1986 Astron. Zh. 63, 996-1000
- [18] Minier et al. 2002 A&A 383, 614–630
- [19] Motogi et al. 2019, ApJL, 877, L25
- [20] Müller, Menten & Mäder 2004, A&A 428, 1019–1026
- [21] Parfenov & Sobolev 2014, MNRAS, 444, 620
- [22] Sanna et al. 2010 A&A 517, A71
- [23] Sanna et al. 2011 A&A 536, A38
- [24] Sanna et al. 2017 A&A 603, A94
- [25] Shu, Adams & Lizano 1987 ARA&A, 25, 23
- [26] Sugiyama et al. 2014 A&A 562, A 82
- [27] Sugiyama et al. 2016 Publ. Astron. Soc. Japan, 68(5), 72

^{*3} https://radio.kasi.re.kr/status_report/files/status_report_EAVN_2022A_rev20211014.pdf

- [28] The Formation of Stars. Stahler and Palla
- [29] van der Walt 2011 AJ, 141, 152
- [30] Yonekura et al. 2016 Publ. Astron. Soc. Japan, 68(5), 74
- [31] 干渉計サマースクール 2005 教科書 国立天文台
- [32] シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 日本評論社 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井直正、舞原俊憲、水野亮

付録 A 放射領域サイズ推定

天体の放射領域サイズを推定するには、天体からのフラックス、つまり放射輝度に対応するビジビリティが uv 平面における基線長にあたる uv-distance に対してどのように変化するかという情報が必要である。以下では縦軸にビジビリティ振幅、横軸に uv-distance を取ったグラフをビジビリティプロットと呼ぶ。以下ではこのビジビリティプロットから放射領域のサイズを推定する方法について記述する。

まず、点源天体を観測した場合を考える。干渉計の空間分解能は基線長が長くなるほど良くなるが、点源天体は分解することができないため、ビジビリティ振幅は uv-distance に対して一定の値を示すと予想できる。一方、天体が有限の広がりを持つ構造天体であるとする、基線長が長くなればその構造が分解されるので、ビジビリティ振幅が uv distance に対して変化すると考えられる。以上についての模式図を図 A.1 に示す。

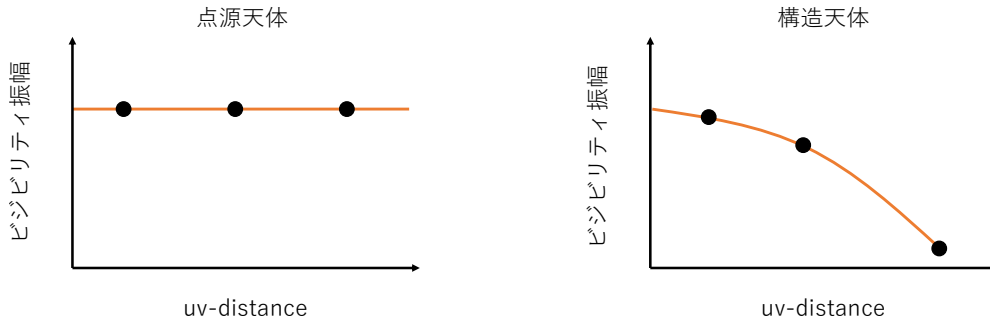


図 A.1: 点源天体と構造天体を観測したときのビジビリティプロットの模式図。

ビジビリティと天体の輝度分布はフーリエ変換の関係にあるので、ビジビリティプロットの減衰が始まった時の uv-distance の値が、天体構造を分解しはじめた閾値を表していることになる。グラフの形状をガウシアンで近似することができれば、そのフーリエ変換もガウシアンであるため、半値幅 FWHM から放射領域サイズを推定することが可能である。フィッティングしたガウス関数の FWHM と放射領域の視野角 θ には以下の関係が成り立つ。

$$\theta \sim \frac{1}{\text{FWHM}}.$$

付録 B 干渉計のイメージング

干渉計とは、複数の望遠鏡で同時に天体を観測することで仮想的に大きなアンテナを作成する観測方法のことである（図 B.1）。以下では、干渉計の基礎からイメージングまでを簡単に記述する。

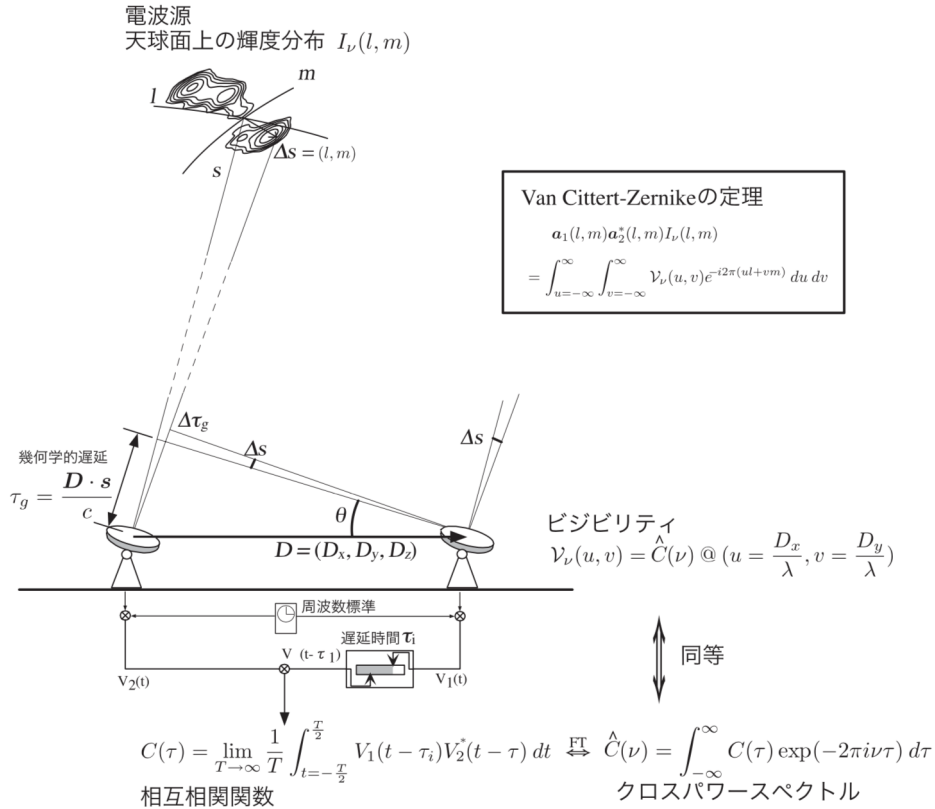


図 B.1: 干渉計の概略図（干渉計サマースクール, 2005.）

ここでは簡単のために、図 B.1 のような 2 つのアンテナで構成される干渉計について考える。このような干渉計で観測を行うと、2 つのアンテナで得られた電圧信号に幾何学的遅延 τ_g を加えて積を取ったものである、相互相関関数が得られる。2 つの入力電圧をそれぞれ $V_1(t)$, $V_2(t)$ とすると、相互相関関数は

$$C(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} V_1(t - \tau_i) V_2^*(t - \tau) dt$$

と表される。ここで τ_i は遅延補正である。この $C(\tau)$ を時間 τ と周波数 ν でフーリエ変

換したものをクロスパワースペクトル $\hat{C}(\nu)$ と呼び、以下のように書くことができる。

$$\hat{C}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) \exp(-2\pi i \nu \tau) d\tau.$$

さらにこの $\hat{C}(\nu)$ を空間周波数で書き直したものをビジビリティ $\mathcal{V}(u, v)$ と呼び、これが干渉計の観測量に相当する。ここで空間周波数 (u, v) とは、観測した時点において天体方向から見た基線ベクトルを波長単位で表したものである。 $\mathcal{V}(u, v)$ は点球面状の輝度分布 $I(l, m)$ と 2 次元フーリエ変化の関係にある。

$$a_1 a_2^* I(l, m) = \int_u \int_v \mathcal{V}(u, v) \exp(2\pi i (ul + \nu m)) du dv.$$

これを Van Cittert-Zernike の定理と呼ぶ。ここで a はアンテナの複素ゲインである。また、 (l, m) は天球面における位相追尾中心からの相対的な離角である。全ての (u, v) においてビジビリティを測定できれば完全な輝度分布を取得することができるが、 (u, v) は有限台数のアンテナが作る基線で決まるため、特定の (u, v) 点でしかビジビリティを測定することはできない。観測の結果ビジビリティが測定できた (u, v) には 1、測定できなかった (u, v) には 0 を与えるサンプリング関数を $U(u, v)$ とすると、実際に観測で得られるビジビリティ $\hat{\mathcal{V}}(u, v)$ は

$$\hat{\mathcal{V}}(u, v) = \mathcal{V}(u, v) U(u, v)$$

となる。この $U(u, v)$ を uv coverage と呼び、そのフーリエ変換 $B(l, m)$ を合成ビームと呼ぶ。観測されたビジビリティをフーリエ変換すると

$$\begin{aligned} FT[\hat{\mathcal{V}}(u, v)] &= FT[\mathcal{V}(u, v) U(u, v)] \\ &= FT[\mathcal{V}] ** FT[U(u, v)] \\ &= I(l, m) ** B(l, m) \end{aligned}$$

のようになり、真の輝度分布に合成ビームが畳み込まれたものが求められる。これを Dirty Image と呼ぶ。ここから真の輝度分布を得るためには、この畳み込みを解く必要がある。そのアルゴリズムの 1 つである CLEAN を本研究では用いた。

CLEAN では、天体構造が点源の集合で表現できると仮定した上で、Dirty Image 中で輝度のピークを見つけ、合成ビームを適当にスケールリングして Dirty Image から差し引くことで輝度分布を再現する。具体的な内容は以下の通りである。

1. Dirty Image 上で輝度ピークを同定する。

2. 1. の場所にて CLEAN コンポーネント（デルタ関数）を立てる。CLEAN コンポーネントに合成ビームを畳み込んだ関数を使って、Dirty Image から差し引く。その結果得られる輝度分布を Residual Image と呼ぶ。
3. 得られた CLEAN コンポーネントの位置と強度を保存する。
4. 上記の手順を Residual Image から目立つ構造がなくなるまで繰り返す。
5. 得られた CLEAN コンポーネントの集合に、合成ビームをガウシアンでフィットしたものである CLEAN ビームを畳み込み、最終的な Residual Image を足し合わせることで CLEAN イメージを得る。

以上を図解したものを図 B.2 に示す。

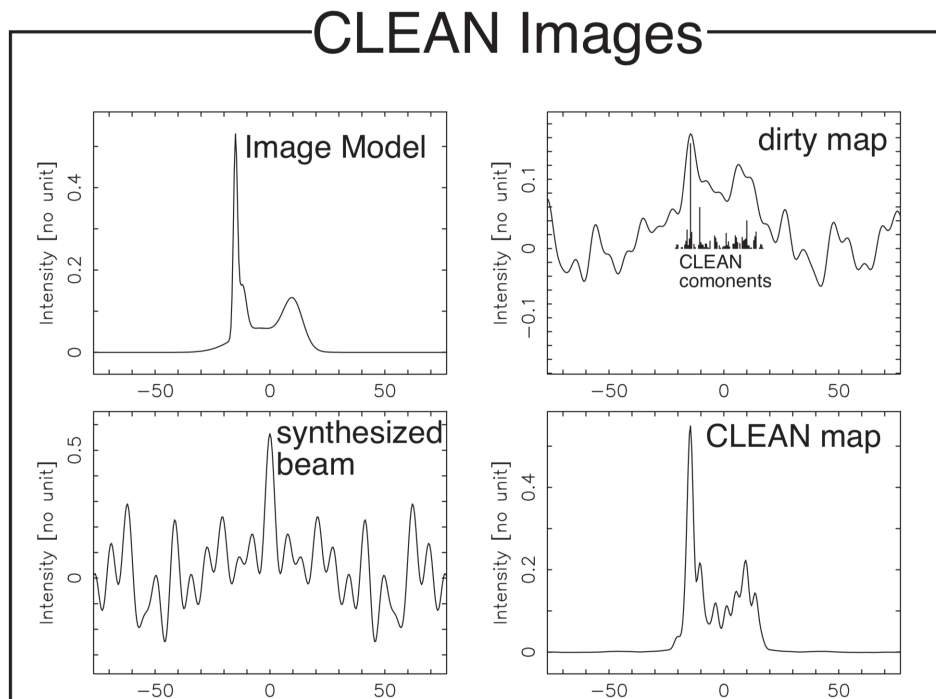


図 B.2: CLEAN の概略図（干渉計サマースクール, 2005.）

付録 C SEFD とフラックス密度

アンテナ温度 T_A は、天体からの電波がアンテナで集光されて受信部に供給される単位周波数幅あたりの電力を温度換算したものである。 T_A はフラックス密度 S 、アンテナ有効開口面積 A_{eff} 、ボルツマン定数 k を用いると

$$T_A = \frac{SA_{\text{eff}}}{2k}$$

と書ける。この T_A に対して、システム雑音温度 T_{sys} が付加されたものが、相関器への入力となる。

雑音はアンテナ毎に独立で無相関であるのにたいして、天体からの放射は共通なので相関する成分が含まれる。天体が点源ではなく有限の広がりを持っている場合は、 T_A の一部が相関するので、 T_A のうち相関する成分を T_c とすると

$$S_c = \frac{2k T_c}{A_{\text{eff}}} \quad (\text{C.1})$$

となり、 S_c が「較正されたビジビリティ振幅」を表していることとなる。

相関器から出力される正規化相関係数 ρ は、それぞれのアンテナで受信された T_A のうち相関する成分の割合で決まり、それらの幾何平均となる。つまり

$$\rho_{ij} = \frac{\sqrt{T_{ci} T_{cj}}}{\sqrt{(T_{Ai} + T_{\text{sys}i})(T_{Aj} + T_{\text{sys}j})}} \quad (\text{C.2})$$

と表すことができる。ここで i, j はアンテナ番号である。また、(B.2) に (B.1) を代入すると

$$S_{cij} = \frac{2k \sqrt{(T_{Ai} + T_{\text{sys}i})(T_{Aj} + T_{\text{sys}j})}}{\sqrt{A_{\text{eff}i} A_{\text{eff}j}}} \rho_{ij}$$

となり、相関器から出力される相関係数 ρ_{ij} と求めるビジビリティ振幅 S_c の関係を得ることができる。ここで各アンテナ毎の感度を定める要素としてシステム等価雑音温度 SEFD を

$$\text{SEFD} = \frac{2k(T_A + T_{\text{sys}})}{A_{\text{eff}i}}$$

と定義すると式 (B.3) は、

$$S_{cij} = \rho_{ij} \sqrt{\text{SEFD}_i \text{SEFD}_j}$$

と記述できる。このように SEFD はアンテナ単体の感度を表す量であり、「相関係数あたりのフラックス密度」と直観的に理解できる。SEFD が小さいほど高感度のアンテナである。また、ほとんどの場合は $T_A \ll T_{\text{sys}}$ であるため、SEFD は

$$\text{SEFD} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A_{\text{effi}}}$$

と近似することができ、 T_{sys} , A_{eff} がわかれば決定できる値となる。

付録 D 回転座標変換

簡単のため、まずは 2 次元平面を考える。この時、「点 P を β 回転させた点 Q がどこに来るか。」を表す回転行列は

$$\begin{pmatrix} x_q \\ y_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix}$$

である。次に、座標変換を表す回転行列について考える。これはつまり「点を固定して座標を回し、回り終わった座標の上で点が新たにどのような位置にあるか」を求めることのできる回転行列である。図 D.1 より、黒い座標を反時計回りに β 回すと、回りきった赤い座標上での点の位置は元の座標空間における点の位置関係と比べると、黒い座標上で点を $-\beta$ 回転した位置と同じだと言うことがわかる。黒の座標上の点 P (x_A, y_A) は、赤い座標上で (x_B, y_B) にあるとすると、上記の回転行列より

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\beta) & -\sin(-\beta) \\ \sin(-\beta) & \cos(-\beta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix}$$

であり、これを変換すると

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \end{pmatrix}$$

となる。これが 2 次元平面における回転座標変換を表す式である。

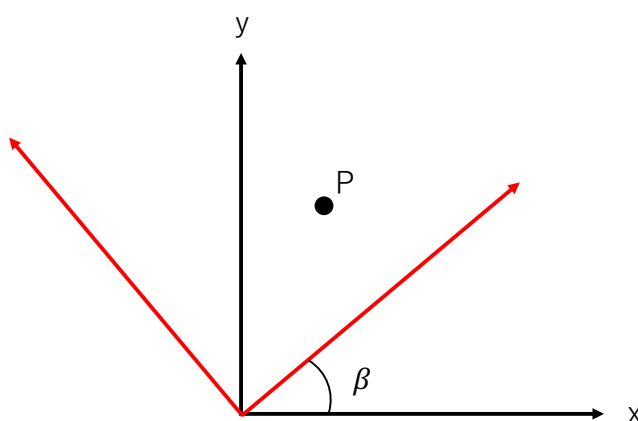


図 D.1

続いて 3 次元の回転座標変換について右手座標系で考える。3 次元での場合、x, y, z 軸のどの軸周りに座標を回転させるかで 3 パターンの座標変換が存在する (図 D.2)。z 軸周りの回転座標変換の場合、先述した 2 次元での式をそのまま 3 次元に拡張するだけである。つまり、

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}$$

となる。y 軸周りの回転座標変換の場合、図 D.2 より、上式の記号を入れ替えれば良いので

$$\begin{pmatrix} z_B \\ x_B \\ y_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_A \\ x_A \\ y_A \end{pmatrix}$$

となり、この式を展開して順番を入れ替えることで

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}$$

と求める事ができる。x 軸周りの回転座標変換も、y 軸周りと同様に考えることで

$$\begin{pmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix}$$

と求められる。

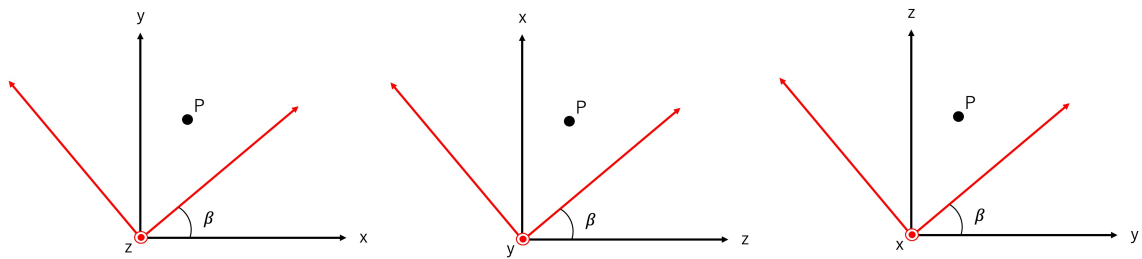


図 D.2

付録 E 系の中心速度（システム速度）の推測

本研究対象天体は系の中心速度（システム速度）に対する先行研究がなかったため、Green et al. (2013) を参考に、トータルパワースペクトルで放射が確認される範囲の中央値をシステム速度として使用した。EAVN で得られたデータのうち、epoch 4 のみ日立モニター観測の期間と被っていたので、システム速度推定には、日立望遠鏡で得られたトータルパワースペクトルの中で最も epoch 4 に近い日付のものをを用いた（図 E.1）その結果、G6.18 のシステム速度はおおよそ $V_{\text{sys}} = -32.617 \text{ km/s}$ であると求めた。

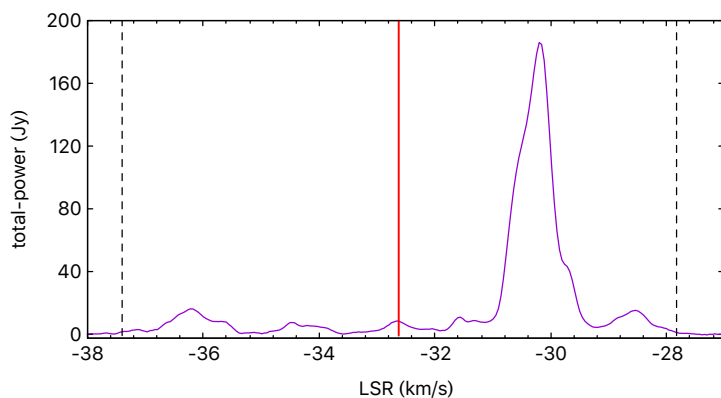


図 E.1: 日立モニター観測で得られた対象天体のデータの中で、最も epoch 4 に近い日付のトータルパワースペクトル。点線が 3σ を超える放射が確認される最小と最大の視線速度であり、赤い実線が予想される G6.18 のシステム速度である。

付録 F 中心星からの距離と黒体近似されたダスト温度

今、図 F.1 のように光度 L の中心星から距離 R にある、半径 r の天体がエネルギーを受け取る状況を考える。

まず、中心星からの放射エネルギー L によって、 1 m^2 を毎秒通過するエネルギー量 S は

$$S = \frac{L}{4\pi R^2}$$

と表す事ができる。また、天体が中心星により照らされる面積は πr^2 であるため、天体が黒体のように入射光を完全に吸収する場合の受け取るエネルギー L' は

$$L' = S\pi r^2 = \frac{Lr^2}{4R^2}$$

となる。

次に、天体が放出しているエネルギー l は、天体の周りの温度を T とすると

$$l = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

と表す事ができる。ここで σ はボルツマン定数である。天体が熱平衡であることを仮定すると、 $l' = L$ が成り立つため、

$$T^4 = \frac{L}{16\pi\sigma R^2}$$

となる。よって

$$T = (16\pi\sigma)^{-1/4} R^{-1/2} L^{1/4}$$

となり、温度 T は受け取る天体の半径に依存せず、中心星からの距離に依存することがわかる。

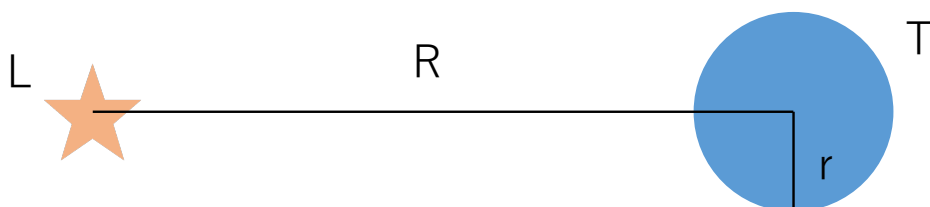


図 F.1: 中心星からの放射と温度の関係。星型印が中心星を表し、放射エネルギーを受け取る天体を青丸で表す。