

修士学位論文

VLBI 観測による 6.7 GHz メタノールメーザー源
G025.82–00.17 の観測的研究

2021 年度
(令和 3 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻
20NM151R
伊藤美穂

論文要旨

年1回の観測が3年にわたって行われた G025.82-00.17 の観測データの解析を行い、この大質量星形成領域における 6.7 GHz メタノールメーザー源の空間分布を明らかにし内部固有運動の計測等を行った。これによって大質量星の形成時における星周囲の物質の3次元運動を明らかにし、大質量星形成メカニズム解明の手がかりを得ることを目的とした。本研究では、年1回の観測を3年間にわたり行って得た G025.82-00.17 のデータを解析し、6.7 GHz メタノールメーザーの固有運動を調べた。具体的には、2011年11月26日、2012年9月13日、2013年9月20日に観測された3回分の VLBI 観測データを用いた。各 Epoch で得られたメーザースポットの空間分布はいずれも楕円状であり、これらを比較したところ、スポットの視線速度に大きな違いは見られなかった。空間分布の結果を用いて内部固有運動を導出したところ、内部固有運動の速さの範囲は、1.88 km/s-12.2 km/s であった。この天体は Fujisawa et al. (2014)によると、この天体のスポット分布は楕円として分類されている。固有運動ベクトルの方向は、楕円の内側ではなく、外側を向いていることが確認された。Sanna et al. (2017)の非同一円周上モデルを用いたところ、1)フィーチャーの分布が一直線上にあること、2)中心から最も遠方に位置するフィーチャーの運動が1)の直線に沿っており、かつそれぞれ遠ざかる方向に動いていることから、対象天体の 6.7 GHz メタノールメーザー雲がアウトフローをトレースしている可能性がある。先行研究(Kim et al. 2020)のメタノール(22_4-21_5)熱放射によるマップと本研究で得られた各 Epoch での 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布を比較すると、速度がお互い異なっていたことから、6.7 GHz メタノールメーザー源は熱的なメタノール(22_4-21_5)輝線がその存在を示唆した円盤には付随していない可能性が高い。熱的な SiO 輝線によるアウトフローについて、南東-北西方向のアウトフローよりは南北方向のアウトフローの駆動源の方が、6.7 GHz メタノールメーザー源の空間分布と近く速度分布も似ていることがわかった。229 GHz メタノールは、SiO の高速アウトフローと似た分布を示すことから、同じアウトフローをトレースしている可能性がある。さらに、SiO アウトフローに比べてこの 229 GHz メタノールの線幅は半値全幅 (FWHM) にして 6.8 km/s と非常に狭く、低速なアウトフローをトレースしている可能性が示唆されていた。6.7 GHz メタノールメーザーも同じ南北アウトフローに付随していることから、229 GHz メタノールと同じく南北アウトフローのうちの低速成分に付随している可能性がある。アウトフローに付随している可能性と、Sanna et al. (2017)の非同一円周上モデルによる結果に加え、Hirota et al. (2017)で検出されている回転アウトフローを適用した。その結果、6.7 GHz メタノールメーザーのフィーチャーはスパイラル上に回転しながら、中心から外側へ噴出するアウトフローを起源とする可能性があることがわかった。

ABSTRACT

Multi-epoch observations of the 6.7 GHz methanol masers associated with G025.82–00.17 by East Asian VLBI Network (EAVN) are presented. As a result of measuring the internal proper motion, it can be confirmed that the direction of the obtained vector of the internal proper motion is not toward the inside of the ellipse but toward the outside. As a result of applying a non-identical circumferential model by Sanna et al. (2017), we conclude that it may originate from the outflows.

.

目次

第1章	導入	3
1.1	大質量星	3
1.1.1	星形成の標準シナリオ	3
1.1.2	大質量星形成のシナリオ	4
1.1.3	大質量星形成の指標	5
1.1.4	回転アウトフロー	6
1.2	レーザー	7
1.2.1	レーザー現象	7
1.2.2	メタノールレーザー	8
1.2.3	6.7 GHz メタノールレーザー	9
1.3	VLBI 観測	10
1.4	内部固有運動	11
1.5	研究目的	12
第2章	対象天体 G025.82–00.17	13
2.1	対象天体 G025.82–00.17 について	13
2.2	空間的構造に関する先行研究	13
2.2.1	連続波	13
2.2.2	熱的な SiO 輝線	14
2.2.1	229 GHz メタノール(8_1-7_0)(class I) レーザー及び熱的輝線	16
2.2.2	水レーザー	18
2.2.3	230 GHz 熱的なメタノール(22_4-21_5)輝線	19
2.2.4	6.7 GHz メタノールレーザー	19
第3章	観測諸元	21
第4章	解析手法	23
第5章	結果	26
5.1	空間分布図	26
5.2	内部固有運動	27
5.2.1	レーザーフィーチャーの定義	28
5.2.2	内部固有運動	28
第6章	考察	32
6.1	非同一円周上モデル	32
6.2	熱的なメタノール輝線、熱的な SiO 輝線、および Class I メタノールレーザー	

との比較.....	34
6.2.1 230 GHz 熱的なメタノール(22_4-21_5)輝線.....	35
6.2.2 熱的な SiO 輝線.....	36
6.2.3 229 GHz メタノール($8_{-1}-7_0$)(class I) メーザー及び熱的放射	38
6.3 回転アウトフロー	38
第7章 まとめ・今後	42
謝辞	44
参考文献.....	45

第1章 導入

1.1 大質量星

太陽のおよそ 8 倍以上の質量を持つ大質量星は、星間物質、銀河とその進化に非常に大きな影響を与える。しかしながら、小質量星の形成過程の理解とは対照的に、大質量星の形成過程については十分な理解が得られていない。星の初期質量関数を考慮すると、小質量星に比べ大質量星の数は少ない。このことから、小質量星形成領域に比べ、大質量星形成領域はより遠方に位置していることが予想される。実際、最も近傍のオリオン座巨大分子雲は約 400 pc^1 離れており (Kuhn et al. 2019)、若い大質量星はその星間物質に対する観測には高い空間分解能が求められる。若い大質量星の周囲を高密度な星間物質が覆うことから、これらを可視光で見通して観測することは困難である。大質量星はその進化のタイムスケールが短いことから、各進化段階に相当する天体するが少なくなり、進化過程の追跡は困難である。これらの理由により、大質量星は、小質量星に比べて形成過程、特に降着モードやその形成などが十分に理解されていない。

1.1.1 星形成の標準シナリオ

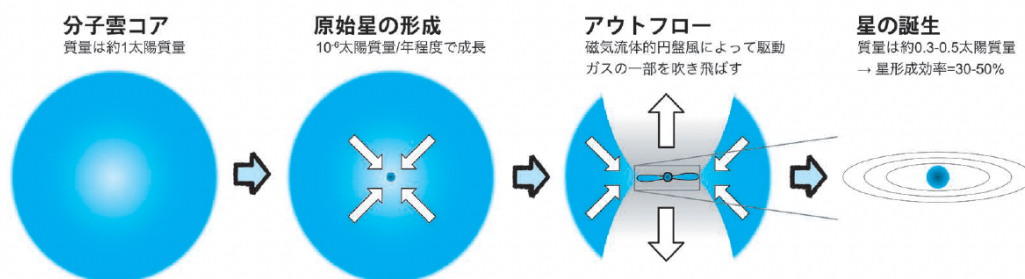


図 1.1 小質量星形成過程(天文月報 2018 年 4 月号「大質量星形成: 複合的フィードバックの影響」田中圭より引用)。

小質量星形成の概略図を図 1.1 に示した。小質量星形成は、分子雲内の高密度ガスである「分子雲コア」が自己重力で崩壊することにより開始する。材料となる分子雲コアの総質量は、約 $1M_{\odot}$ (太陽質量²) である。これは、コア自身の水素個数密度 10^4 cm^{-3} と温度 10 K か

¹ $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ 光年}$

² $1M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$

から見積もられるジーンズ質量とほぼ同程度である。重力崩壊後、コアの中心付近に原始星が誕生する。誕生時の原始星は、約 $10^{-3} M_{\odot}$ である。周囲の分子雲コアのガスが降着することで、およそ $10^{-5} M_{\odot}$ /年の割合で原始星の質量が増える。しかしながら、分子雲コアのガス全てが原始星に降着するわけではなく、アウトフローのフィードバックによって、降着していないガスが星間空間へと放出される。ガスは角運動量を持っているため、原始星の周りには回転しながら降着する円盤が作られる。この円盤には磁場があり、磁場が円盤回転運動により振り回され、ガスが磁力線にそって遠心力で加速され、回転軸方向に円盤風が噴出する。この磁気流体的円盤風は、周囲のガスを巻き込みアウトフローになり大量のガスを重力圏外へと吹き飛ばす。

一方、上記のような過程で数十 $M_{\odot}$ 以上の大質量星が形成されたとした場合、次の2つの問題が生じる。

- 寿命問題

小質量星の場合の典型的な降着率 $10^{-5} M_{\odot}$ /年で計算を行うと、中心星が $8 M_{\odot}$ 程度以上である大質量星の寿命は短く 200 – 300 万年であり、これを適用すると 30 – 40 $M_{\odot}$ 程度までしか質量を増やすことができない。実際、この質量を超える星が観測されている。例えば、オリオン座 ϵ 星は観測結果から $64.5 M_{\odot}$ であることが分かっている (Puebla et al.2016)。

- フィードバック問題

典型的な降着率の場合、質量が $8 M_{\odot}$ 程度に達すると中心星は主系列星になる。すると、中心星からの輻射圧の影響により、降着が妨げられる。小質量星の場合と同程度の降着率 $10^{-6} - 10^{-5} M_{\odot}$ で計算すると、10 – 20 $M_{\odot}$ よりも大きい星を球対称な降着により形成することは難しい。

1.1.2 大質量星形成のシナリオ

小質量星形成過程の降着進化をただ単に時間的に延長しただけでは、大質量星は形成されない。大質量星形成について、主に2つのシナリオ 1)降着説、2)合体説が提案されている。降着説が有力である。

降着説

降着説とは、降着率が極めて大きいとして、降着進化により中心星質量が増加するとする説である。大質量星も小質量星と同様に降着進化により質量を獲得するが、大質量星形成の場合は、小質量星形成の場合よりも、大きな降着率が求められる。小質量星の標準シナリオでは $\dot{M}_{*} \sim 10^{-5} M_{\odot}$ /年だが、大質量星の場合は $\dot{M}_{*} > 10^{-4} M_{\odot}$ /年の高い降着率が必要とされる (Hosokawa & Omukai 2009)。降着物質は角運動量を持っていることから原始星周りに降着

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、それに対して垂直な方向では比較的光学的に薄くなる。大質量原始星からは膨大な物質が分子流として噴出される様子も観測されている。小質量星形成の場合と同様に原始星の周りにケプラー回転する降着円盤が存在すると考えられている。大質量原始星周囲における熱的連続波・熱的輝線放射を介した回転及び降着円盤の検出がされている（例、Cesaroni et al. (1997)など）。

Hosokawa et al. (2010)では具体的な値が求められている。 $10^{-3}M_{\odot}$ /年の低温下での円盤降着の場合、原始星の半径は $R_{*}=\text{数}R_{\odot}$ （太陽半径³）である。数 $M_{\odot}$ 程度の質量が降着した後、原始星は膨張し始め、 M_{*} がおおよそ $10 M_{\odot}$ の場合、星の半径は最大 $30-400 R_{\odot}$ に達する。その後、原始星は最終的に収縮を開始し、降着形状に関係なく、 $M_{*}\approx 30 M_{\odot}$ の零歳主系列星(ZAMS)に達する。

近年では、降着説の中でも乱流コア降着モデル (McKee & Tan 2003) と、競争的コア降着モデル (Bonnell et al. 2002) の2つが提案されている。これらは、必要とするガスの初期条件が異なる。乱流コア降着モデルでは、中心集中した数 $10-100 M_{\odot}$ 程度の大質量分子雲コアが収縮して、大質量星を形成する。競争的コア降着モデルでは、分子雲が数 $M_{\odot}$ 程度の幾つもの分子雲コアに分裂して、その中の一部がより多くの質量を得て大きな星へと成長すると考えられている。

1.1.3 大質量星形成の指標

大質量星は、巨大分子雲内の高密度領域である分子雲コアで生まれる。現時点では、大質量星は、以下の各進化段階を経て形成され则认为られている。

1. 星なし大質量分子雲コア
2. 中小質量原始星を含む大質量分子雲コア
3. 大質量原始星を含む若い星団
4. 大質量主系列星を含む星団

1の星なしコア大質量分子雲コアは、低温、大質量の分子雲コアである。これは、大質量星形成に至る可能性のあるものとして想定されている。2の中小質量星原始星を含む大質量分子雲コアは、中心星への質量降着が進み、中心星が成長していく途中の段階である。この時点での中心星の質量は数 $M_{\odot}$ だと考えられている。3の大質量原始星を含む若い星団は、さらに中心星への質量降着が進み、中心星が大質量に到達した段階である。内部に高温の中心星が存在しており、高温の星間微粒子により中間赤外線放射が非常に強くなる。この進

³ $1R_{\odot} = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$

化段階は、「ホットコア」、「極超コンパクト HII 領域」、「超コンパクト HII 領域」、「赤外線点原」、「分子流天体」などとして観測される（図 1.2）。

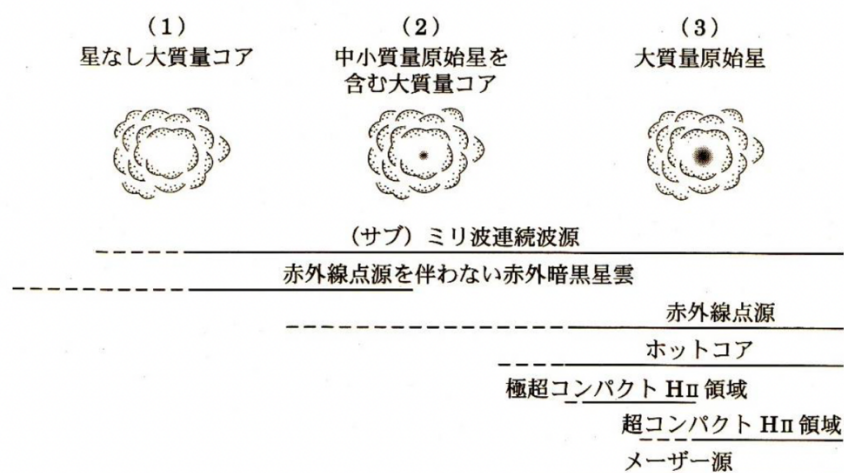


図 1.2 大質量星の進化段階及び指標となる天体（「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」より引用）。

1.1.4 回転アウトフロー

アウトフローとは、第一コアから駆動される低速のガス流である。Hirota et al. (2017)によって行われたオリオン座分子雲に含まれる大質量原始星 source I の観測からは、source I に付随するアウトフローが、赤道付近に広がる円盤が示す回転速度成分と同じ向きの回転に起因すると解釈できる速度勾配が確認された。このことから、大質量星から放出されているアウトフローはその回転円盤と同じ向きに回転していることが示唆されている（図 1.3）。

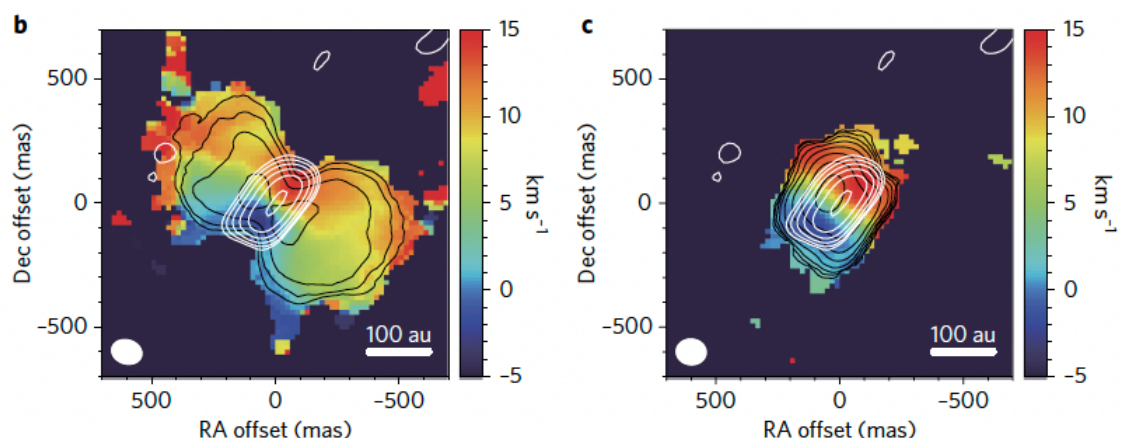


図 1.3 観測された輝線と連続波放射のモーメントマップ(Hirota et al. 2017)。左, 490 GHz 連続波 (白の等高線)、484 GHz Si^{18}O モーメント 0 (黒い等高線) とモーメント 1 (ピーク速度; カラー) を示し、484 GHz Si^{18}O がアウトフローを示唆している。右, 490 GHz 連続波 (白の等高線)、463 GHz H_2O 輝線のモーメント 0 (黒の等高線) とモーメント 1 (カラー) を示し、463 GHz H_2O が回転円盤を示唆している。

1.2 メーザー

1.2.1 メーザー現象

メーザーとは、誘導放射によるマイクロ波増幅 (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) のことである。宇宙空間では、ある分子内部エネルギー状態の 2 準位ペアのうち、エネルギーの高い準位の占有数が低い準位の占有数よりも多い反転分布が起きることがある。このとき、外から 2 準位間のエネルギー差に相当する周波数 ν_{21} の電波が入射すると上の準位にある粒子が下の準位に落ちて周波数 ν_{21} の電波を誘導放射する。その誘導放射された周波数 ν_{21} の電波が上の準位にある別の粒子に対して誘導放射を起こす。これがカスケード的に起き、非常に強い放射を起こす。これがメーザー現象であり、図 1.4 にその概念図を示した。

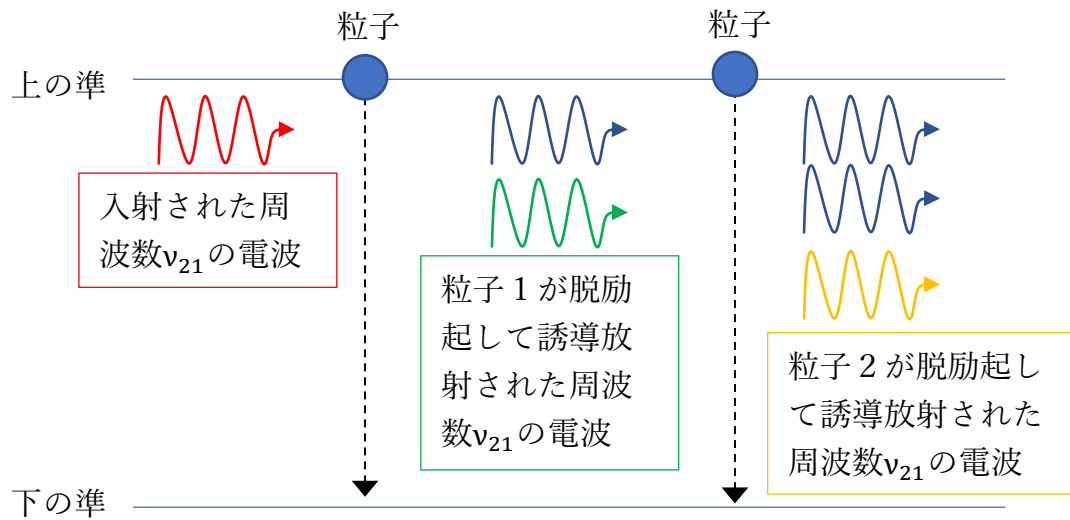


図 1.4 メーザー現象を表した概念図。反転分布であるとき、周波数 ν_{21} の電波が入射してくることによりカスケード的に誘導放射が起こる。

1.2.2 メタノールメーザー

メタノール (CH_3OH) メーザーは、付随領域の違いから 2 種類に分類することができる (Menten 1991a)。その特徴を表 1.1 にまとめた。クラス I の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必ずしも良くない。一方で、クラス II メタノールメーザーは、大質量原始星候補天体との位置的な相関が良いと言われている。クラス I のメタノールメーザーとクラス II メタノールメーザーの分布には違いがあり、Cyganowski et al. (2009) ではクラス II 6.7 GHz メタノールメーザーでは中心に集中して存在し、クラス I 44 GHz メタノールメーザーはより広い範囲に分布していることが指摘されている。クラス II メタノールメーザーでは、高密度のダスト環境にて、赤外線によるポンピングにより観測されたメーザーを説明できることが示されている (Cragg et al. 2005)。

表 1.1 クラス I 及びクラス II メタノールメーザーの特徴

	クラス I	クラス II
周波数[GHz]	9.9, 25.0, 36.2, 44.1, 84.5, 95.2, 146.6 など	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 37.7, 38.3, 38.5 など
付随領域	アウトフローと周辺ガスの境界面	円盤やアウトフロー
励起機構	衝突励起	赤外線励起
放射領域	100 au スケール	au スケール
輝度温度	$10^6 - 10^8$ K	$>10^{10}$ K

1.2.3 6.7 GHz メタノールメーザー

静止周波数 6.668519 GHz の放射を出す 6.7 GHz メタノールメーザーは、1991 年に初めて発見された(Menten 1991b)。様々なメタノール分子の遷移の中で最も強い放射であり、観測される輝度温度はすべてのメーザー放射の中で水メーザーに次いで 2 番目に高い。6.7 GHz 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よく、大質量星形成の非常に初期の段階を探るためのターゲットとして適している。6.7 GHz メタノールメーザーの中には、強度変動を起こすものがある (Goedhart et al. 2003)。その分布はハローとコアの構造を持ち、コアのサイズは、2 au–20 au である (Minier et al. 2002)。メーザー源は輝度が非常に高いので高い空間分解能を得られる VLBI (超長基線電波干渉法) 観測に適した対象である。1 つのメーザースポットの寿命は 4 年以上である (Goedhart et al. 2004)。

1.2.3.1 空間分布図

メーザースポットの特徴的な空間分布を分類することができ、具体的には、弧状、楕円、線状、ペア、コンプレックスである (Bartkiewicz et al. 2009)。先行研究で観測されているスポットの分布の個数の一例について表 1.2 にまとめた。楕円、線状、弧状は、星周円盤を真上または斜め上、真横、一部分を捉えたという説が有力ある。ペア、複雑は、見かけの形状からその本性を推定することが難しい (Norris et al. 1993, Norris et al. 1998 など)。

表 1.2 先行研究による 6.7 GHz メタノールメーザースポット空間分布の個数の一例。

	Array	楕円・ リング	弧状	線状	ペア	コンプレ ックス
Fujisawa et al. (2014)	EAVN	6(16%)	4(11%)	5(13%)	8(21%)	15(39%)
Bartkiewics et al. (2009)	EVN	9(33%)	3(11%)	5(19%)	1(4%)	9(33%)

1.3 VLBI 観測

VLBI 観測は地理的に離れた複数の電波望遠鏡を同時に使い観測する方法である。この方法がもたらす利点は、高空間分解能である。望遠鏡間距離に相当する口径を持つ望遠鏡と同等の高空間分解能が得られる。空間分解能 θ は、

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

で求められる。このとき、 λ は観測波長、 D は基線長（アンテナ間隔）である。観測波長が 4.4 cm（周波数が 6.7 GHz）、基線長が 2300 km であった場合、空間分解能はおよそ 0.7 mas（ミリ秒角）である。一方、日立 32 m 電波望遠鏡の分解能は、この波長（周波数）において ~4.6 arcmin である。この単一鏡としての分解能を VLBI 観測の計算例と比較すると、VLBI では高い分解能が得られることがわかる。一方 VLBI 観測の欠点は、感度が低いことである。特に広がった放射に対する感度が低く、天体の輝度が弱いものは検出できない。この特徴により、コンパクトで高い輝度を持つ大質量星形成領域の 6.7 GHz メタノールメーザの観測では利用可能である。本研究の観測データを取得するために使用された望遠鏡群は EAVN（東アジア VLBI 観測網）である。図 1.5 は EAVN で使用される望遠鏡群の分布図である。



図 1.5 EAVN (東アジア VLBI 観測網) の望遠鏡の分布図
(https://radio.kasi.re.kr/eavn/about_eavn.php)

1.4 内部固有運動

時期の異なる VLBI 観測を複数回実施するマルチエポック観測を行うことにより、メーザースポットのクラスターの位置の移動から、天体内部の固有運動（天球面上における 2 次元運動）を導出することができる。さらに内部固有運動と視線速度とを組み合わせることにより天体内部の 3 次元運動を導出し、大質量原始星周囲の物質の運動を明らかにし、大質量星形成機構を理解する手がかりにすることができる。図 1.6 は Cep A HW2 の内部固有運動の観測結果である。

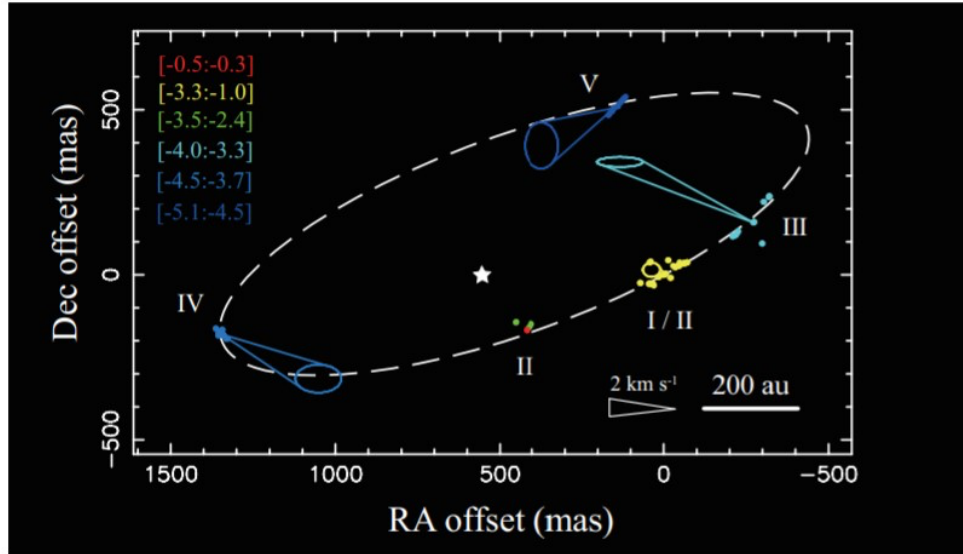


図 1.6 Cepheus A HW2 の内部固有運動(Sugiyama et al. 2014)。大質量原始星（星印）に向かって回転しながら中心に落ちていくガスの様子を捉えている。

1.5 研究目的

本研究では年 1 回の観測が 3 年にわたって行われた G025.82–00.17 の観測データの解析を行い、この大質量星形成領域における 6.7 GHz メタノールメーザー源の空間分布を明らかにするとともに内部固有運動の抽出を行う。これによって大質量星の形成時における星周囲の物質の 3 次元運動を明らかにし、大質量星形成メカニズム解明の手がかりを得ることを目的とする。

第2章 対象天体 G025.82–00.17

2.1 対象天体 G025.82–00.17 について

G025.82-00.17 の特徴を下の表 2.1 に示す。表 2.1 に書かれた G25.82-W1 は、本研究で検出された 6.7 GHz メタノールメーザースポットの近くで観測されたミリ波連続波のピーク位置である。

表 2.1 対象天体の主な特徴

G025.82 -00.17		Refernce
距離	5.0 kpc	Green&McClure-Griffiths. (2011)
Systemic velocity	93.7 km/s	Wienen et al. (2012)
G25.82 – W1 の光度	$1.2 \times 10^4 L_{\odot}^4$	Kim et al. (2020)
stellar mass	$12.7 M_{\odot}$	

2.2 空間的構造に関する先行研究

2.2.1 連続波

Kim et al. (2020)にてアタカマミリ波/サブミリ波干渉計 (ALMA) で観測された結果、1.3 mm 波長帯 (合成ビーム: $0''.27 \times 0''.24$, $\text{PA} = -83.6^\circ$) で複数の連続波源が検出された (図 2.1)。これらは、さまざまな進化段階にある若い恒星状天体 (YSOs) の存在を示唆している。放射が光学的に薄いグレイボディ放射であると仮定すると、1.3 mm 連続波放射から G25.82-W1 総質量は、 $20 - 84 M_{\odot}$ だと導出される。超ウルトラコンパクト HII 領域 G25.82-E、大質量な若い恒星状天体 (HM-YSO) G25.82-W1、星なしコア G25.82-W2、G25.82-W3 が存在している。複数の大質量の星なしコアと原始星コアの検出は、乱流コア降着モデルによって、大質量な若い恒星状天体が個々の大質量コアで形成されている可能性があることを意味する。この場合、G25.82 における大質量星形成過程は、小質量星形成のスケールアップバージョンと一致する。

⁴ $L_{\odot}$ は太陽光度であり、 $1L_{\odot} = 3.84 \times 10^{26} \text{ W}$

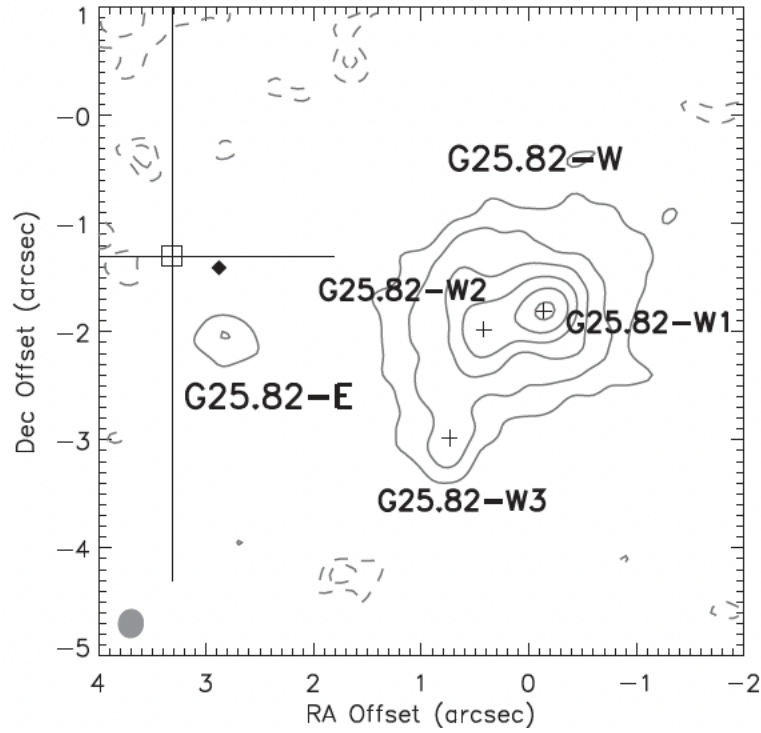


図 2.1 ALMA 干渉計で観測された 1.3 mm 連続波放射マップ(Kim et al. 2020)。等高線レベルは、 10σ 、 20σ 、 40σ 、 80σ 、 160σ 、 320σ であり、 1σ は 0.4 mJy/beam である。左下の灰色の円は、1.3 mm 連続波イメージにおける合成ビームサイズ ($0''.27 \times 0''.24$ 、 $\text{PA} = -83.6^\circ$) である。原点の絶対座標は、 $(18^{\text{h}}39^{\text{m}}03^{\text{s}}.63, -6^\circ 24' 09''.5)$ である。小さい十字は、G25.82-W の 1.3 mm の連続波源の各ピーク位置を示している。白抜き四角は、VLA 連続波放射のピークの位置 (H_{II} 領域) であり、角度分解能は十字で示される(Hu et al. 2016)。黒い菱形は、WISE のソース位置である。

2.2.2 熱的な SiO 輝線

北-南方向、及び、南東-北西方向の SiO(5-4)アウトフローが検出されている(Kim et al. 2020)。検出結果を図 2.2(上段)及び図 2.3 に示した。南北方向のアウトフローの駆動源は、G25.82-W1 とされている一方、南東-北西方向のアウトフローの駆動源は不明である。どちらも赤方偏移成分が支配的な構造をしている。南北のアウトフローは、G25.82-W1 の北西の約 $0''.2$ 離れた位置から発生し、範囲はおおよそ $12''$ である。その全速度範囲は、 $52.9 - 157.7 \text{ km/s}$ である。青方偏移と赤方偏移のアウトフローは、それぞれ北と南に伸びる、局所的にくびれがある湾曲した構造をしている。南東-北西のアウトフローは、南北のアウトフロー

に比べてとても弱い。このアウトフローは3つの連続波源から少なくとも約 $0''.8$ 離れた位置から発生し、約 $17''$ 広がっている。

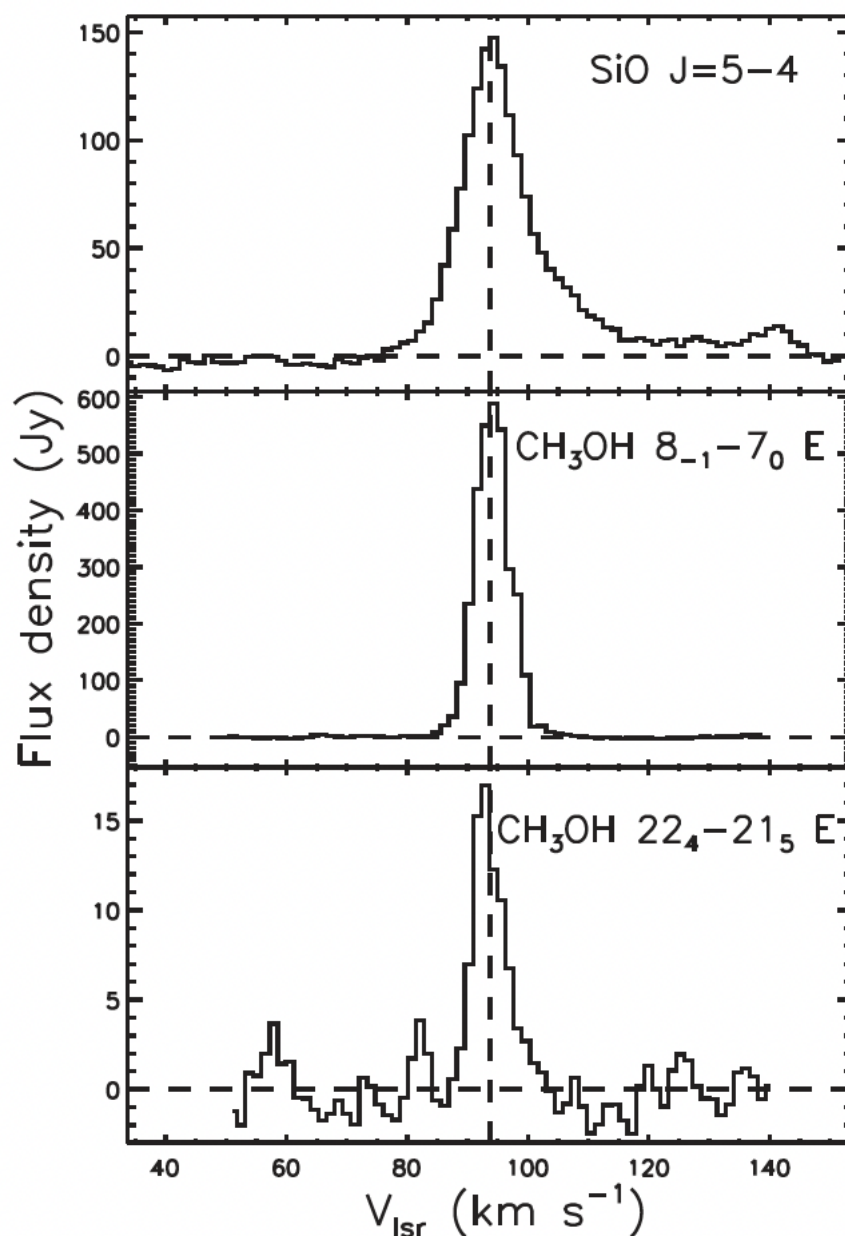


図 2.2 ALMA で観測した時の G25.82 の方向での検出された分子遷移スペクトル(Kim et al. 2020)。垂直または水平の破線は、それぞれ、G25.82 の系の中心速度 V_{sys} とベースラインである。スペクトルは図 2.3 で示された $15'' \times 15''$ の長方形の領域で積分されたものである。

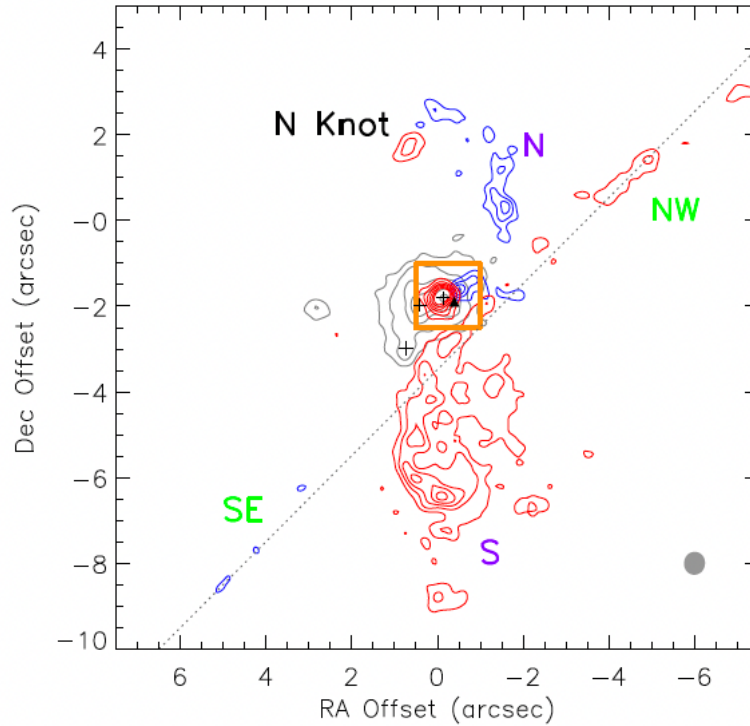


図 2.3 1.3 mm 連続波放射（灰色）に、SiO(5-4)輝線の青方偏移と赤方偏移の積分強度を重ねたもの(Kim et al. 2020)。青いコントアは、59.2 – 80.1 km/s の範囲で積分された強度を示す。赤いコントアは、103.7 – 157.7 km/s の範囲で積分された強度を示す。コントアの範囲は 5σ から 30σ で、間隔は 5σ である。この時の 1σ はそれぞれ 9.8 mJy/beam km/s、18 mJy/beam km/s である。黒い十字は、それぞれ北から G25.82-W1、W2、W3 である。黒い三角形は、80.5 km/s の 22 GHz 水メーザースポットの位置である。点線は、南東-北西 SiO アウトフローの軸である。右下隅の灰色の円は、SiO マップの合成ビームである。オレンジ色の長方形は、図 2.5 の領域を示している。

2.2.1 229 GHz メタノール($8_{-1}-7_0$)(class I) メーザー及び熱的輝線

229 GHz のメタノール($8_{-1}-7_0$)遷移では、熱放射成分とメーザー放射成分とが混合して検出されている(Kim et al. 2020)。検出結果を図 2.4 に示した。構造は、93.7 km/s の systemic velocity に近いチャンネルで、SiO(5-4)輝線の放射と似ていることがわかっている。このメーザーフィーチャーは、SiO アウトフローによってトレースされるものよりも、低速なアウトフローガスをトレースしているように見える。229 GHz のクラス I メタノールメーザーは、SiO アウトフローと比較して弱い、または、古い衝撃領域をトレースしている可能性があることを示唆している。

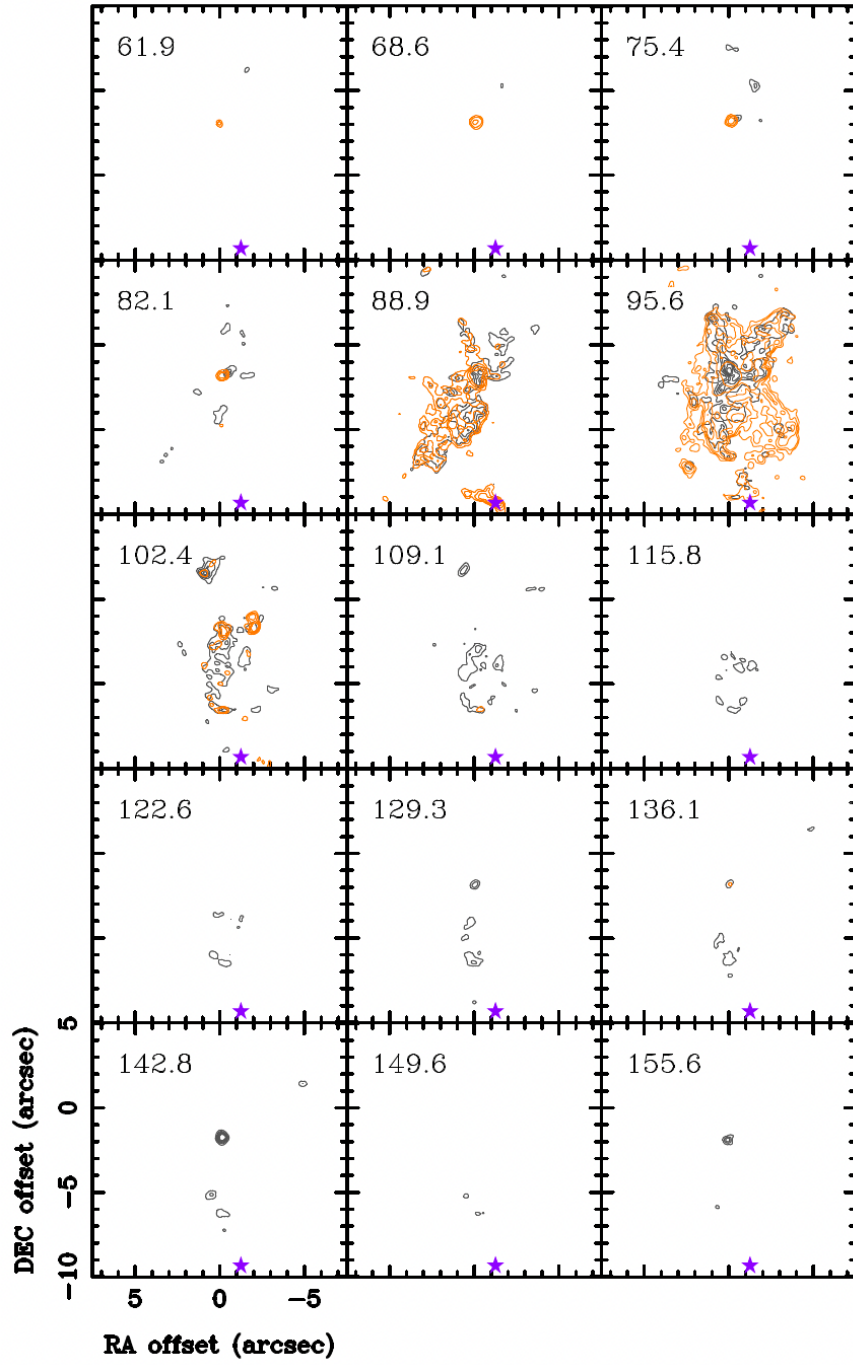


図 2.4 SiO (5-4) (灰色の等高線)、229 GHz メタノール($8_{-1}-7_0$) (橙色の等高線) の積分強度分布図(Kim et al. 2020)。灰色の等高線の範囲は 5σ から 30σ で、間隔は 5σ である。この時の 1σ は $1.4 \text{ mJy/beam km/s}$ である。橙色の等高線は 5σ 、 20σ 、 80σ である。この時の 1σ は $1.4 \text{ mJy/beam km/s}$ である。各パネルの左上にある数字は速度(km/s)である。

2.2.2 水メーザー

KaVA で観測された 22 GHz 水メーザーは、G25.82-W1 から南西方向に約 $0''.25$ 離れた領域に分布している (Kim et al. 2020)。検出されたメーザーフィーチャーの速度範囲は、41.5–98 km/s である。図 2.5 の中にある星印は、22 GHz 水メーザーの空間分布であり、北東-南西方向に伸びている。80.5 km/s のメーザーフィーチャーの位置は、(RA, Dec) = ($18^{\text{h}}39^{\text{m}}03^{\text{s}}.60$, $-06^{\circ}24'11''.4$) である。水メーザーアウトフローの速度構造は、視線速度範囲や空間分布の伸びている方向が他のアウトフロートレーサーの速度構造とは一致していない。

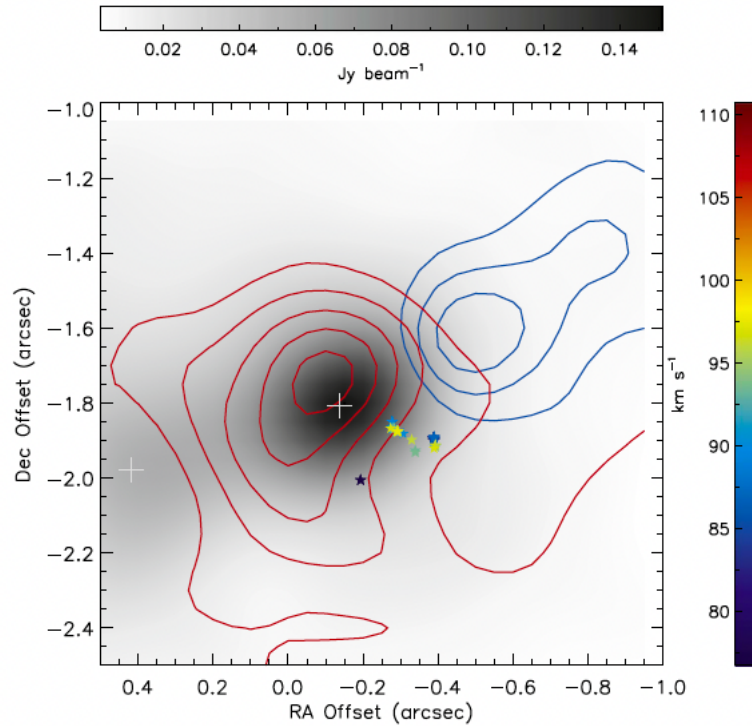


図 2.5 ALMA 望遠鏡で観測された 1.3 mm 連続波 (グレースケール) に KaVA で得られた 22 GHz 水メーザーの分布を重ねたもの (Kim et al. 2020)。青と赤のコントアは SiO(5-4) 輝線の積分強度マップである。青いコントアは 5σ から 15σ の範囲、 1σ レベルが 9.2 mJy/beam km/s、間隔は 5σ である。赤いコントアは 5σ から 25σ の範囲、 1σ レベルが 16 mJy/beam km/s、間隔は 5σ である。星印は水メーザーであり色は速度に対応している。十字は、1.3 mm 連続波源 G25.82-W1 と G25.82-W2 の位置を示す。

2.2.3 230 GHz 熱的なメタノール(22_4-21_5)輝線

230 GHz にあるメタノール (22_4-21_5 E) 線が速度範囲は $V_{lsr}=90.2-96.1$ km/s で検出されている。検出結果は図 2.6 に示した。検出されている領域の広がり、直径約 $1''$ 以下であり、これは 5000 au 以下に相当する。G25.82-W1 の周囲にコンパクトなリング状構造を示し、赤方偏移と青方偏移の速度勾配がある。回転しているディスクまたはエンベロープからの放射であることを示唆する。ガスの運動がケプラー回転であると仮定すると、G25.82-W1 の力学質量は、 $25 M_{\odot}$ より大きいと推定される。

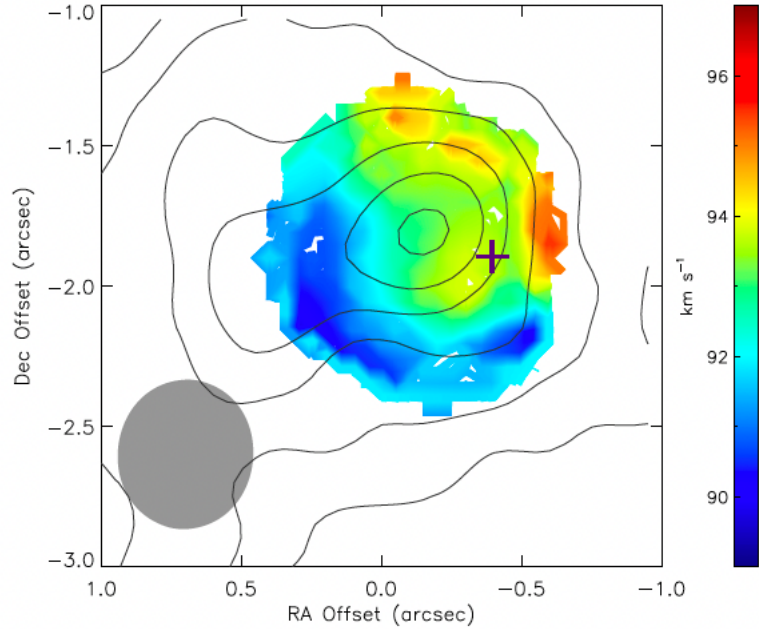


図 2.6 メタノール(22_4-21_5 E) 線のモーメント 1 マップ(Kim et al. 2020)。コントアレベルは、 10σ 、 20σ 、 40σ 、 80σ 、 160σ 、 320σ であり、 1σ は 0.4 mJy/beamである。紫の十字は、 80.5 km/s の水メーザーフィーチャーの絶対位置を示す。左下隅の灰色の円は、合成ビームサイズである。

2.2.4 6.7 GHz メタノールメーザー

Hu et al. (2016)は、J-VLA を用いて 6.7 GHz メタノールメーザーの観測を行った。これにより、図 2.7 に示すスペクトル (上図)、及びスポットの空間分布 (下図) が得られている。スポットは $500 \text{ mas} \times 400 \text{ mas}$ の範囲内に北東-南西方向に伸びた分布をしており、北東方向には青方偏移成分、南西方向には赤方偏移成分が分布している。また、Fujisawa et al.

(2014)は、EAVN を用いた 6.7 GHz メタノールメーザーの観測を行い、対象天体の 6.7 GHz メタノールメーザーのスポットの空間分布を「楕円」として分類した (図 5.2 参照)。

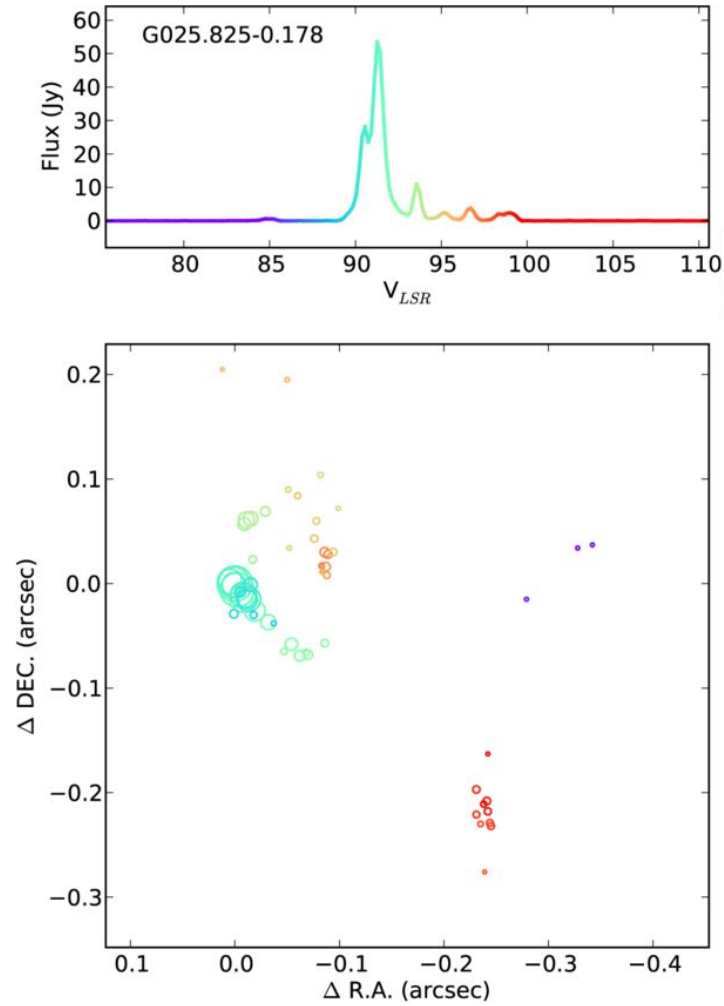


図 2.7 スペクトル (上) とスポットの空間分布図 (下) (Hu et al. 2016)。スポットのサイズは、強度のリニアスケールである。色は視線速度に対応したものである。原点は、 $18^{\text{h}} 39^{\text{m}} 03^{\text{s}}.627 -06^{\circ} 24' 11''.15$ である (絶対位置は、位置天文キャリブレーションへの phase-referenced 観測によって取得された)。

第3章 観測諸元

本研究で用いた VLBI 観測データは、2011 年 11 月 26 日から 2013 年 9 月 20 日までの期間で観測された 3 回分のデータである。観測に使用したアンテナは、東アジア VLBI 観測網を構成する VERA 水沢局 20m、VERA 入来局 20m、VERA 小笠原局 20m、VERA 石垣局 20m、山口 32m、日立 32m、臼田 64m、上海 25m の計 8 局である。これらのアンテナを用いて G025.82–00.17 の 6.7 GHz メタノールメーザーを観測した。各観測の詳細と較正天体については、それぞれ表 3.1 と表 3.2 に示した。各アンテナの分布は、図 3.1 に示した。

表 3.1 各観測の詳細

Epoch	1	2	3
観測コード	U11330A	U12257A	U13263A
観測日(UT)	2011 年 11 月 26 日 MJD:55891 1:30:00 – 9:00:00	2012 年 9 月 13 日 MJD:56183 6:30:00 – 14:00:00	2013 年 9 月 20 日 MJD:56555 6:00:00 – 14:00:00
観測アンテナ	水沢、入来、小笠原、石垣、山口、日立		
	臼田、上海		上海
記録偏波	左旋円偏波		
観測周波数帯域	6664 – 6668 MHz		6665 – 6669 MHz
分光点数	1024 点		
速度分解能	0.1757 km/s		
合成ビーム	6.45 × 2.98 mas ² (32.3 × 14.9 au ²) –25.6 度	5.82 × 3.16 mas2 (29.1 × 15.8 au ²) –35.2 度	5.74 × 3.10 mas ² (28.7 × 15.5 au ²) –14.7 度
イメージ rms ノイズレベル 1 σ	0.03 Jy/beam	0.09 Jy/beam	0.10 Jy/beam

表 3.2 較正天体

天体名	目的
NRAO530、3C 345	幾何学的遅延残差較正・バンドパス較正
J1824+01	大気による遅延残差較正



図 3.1 Google map より作成したアンテナの配置。一部改変。

第4章 解析手法

データの解析は Astronomical Image Processing System (AIPS) 及び Difmap を用いて行った。解析の流れは以下の通りである。解析の手順は NARIT 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 ver1.8.1 in2017/01/23」を参考にした。

1. データ読み込み
2. データチェックと使用不可なデータの削除
3. UV 再計算
4. 振幅ゲイン較正 1
5. 遅延及び遅延レート較正
6. バンドパス振幅較正
7. ドップラー較正
8. 振幅ゲイン較正 2
9. メーザーピークによるフリンジフィッティング
10. Dirty image の作成
11. Self calibration の実施
12. CLEAN の実施
13. メーザースポットのパラメーター取得
14. 空間分布の図の作成

以下でそれぞれ行ったステップで行った解析内容を簡単に説明する。

1. データ読み込み

該当する複数ある FITS データの読み込みを行い、AIPS 内にファイルを作成した。その際、各データの時間範囲が重複しないように、正しく相関処理されている方の FITS ファイルを優先するように時間指定を行った。読み込んだ FITS ファイルが複数あるため、ファイルの結合を行い、ファイルのデータを時系列に並べ替えた。

2. データチェックと使用不可なデータの削除

観測に参加した電波望遠鏡、メーザースペクトルの確認、周波数帯域のチェック、ビジビリティ振幅データのチェックを行った。また、異常のあるデータを使用しないようにフラグをたてた。

3. UV 再計算

相関器で用いられている観測局の位置を最新の局位置に修正し、かつ地球回転パラメータの精度をより上げるテーブルを作成した。

4. 振幅ゲイン較正 1

ベースラインの規格化を行った。その次に、バンドパスの振幅較正のテーブルを作成した。

5. 遅延及び遅延レート較正

位相に関しての振幅較正を行った。バックエンドや大気による外部の影響を較正した。その次に、遅延時間補正の残差、大気揺らぎによる遅延残差の較正を行った。

6. バンドパス位相特性較正

バンドパスフィルターの周波数方向に沿った応答特性の効果を除去した。

7. ドップラー較正

チャンネルに対応する視線速度を用いてドップラー追尾較正を行い、ファイルを作成した。

8. 振幅ゲイン較正 2

メーザー自身の自己相関スペクトルを用いた、各局の振幅ゲインの時間変動較正とフラックスの絶対値較正を行った。「メーザー自身が 1Epoch の観測中に時間変動していないという仮定のもと、自己相関スペクトルの時間変動は、すべてシステムゲインの時間変動に起因している」という前提で、メーザーの自己相関スペクトルを用いてシステムゲインの時間変動較正を行う、というテンプレート法を用いた。

9. メーザーピークによるフリンジフィッティング

メーザーピークのチャンネルを用いて、フリンジフィッティングによる位相解と遅延時間変化率の解の導出を行った。

10. Dirty image の作成

ビジビリティをフーリエ変換して得られる画像は真の輝度分布に合成ビームを畳み込んだものであり、これを Dirty image という。ピークチャンネルの Dirty image を作成した。

11. Self calibration の実施

メーザースポットを使い、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位相・振幅の較正をする Self calibration を行った。Self calibration を行う際、AIPS ではなく Difmap を用いた。1 番明るいメーザースポットの空間分布のイメージを元に、ビ

ジビリティの位相較正を行った。位相較正を行ったジビリティのデータをもとに、もう一度、メーザー空間分布を描いた。その分布イメージをもとにジビリティの位相・振幅を同時に解いた。得られた振幅・位相解をメーザー放射がみられる全チャンネルに適用した。

1 2. CLEAN の実施

Dirty image で輝度のピークを見つけ、そこに CLEAN component を置き、適当にスケールを選択した合成ビームを Dirty image から差し引くことでサイドローブを取り除き、その演算を差し引いた後の残差マップに対して再び同じ手順を繰り返した。この反復過程で得られた CLEAN components に CLEAN beam を畳み込んで CLEAN マップを作成した。CLEAN する際に閾値を設定する必要があるため、メーザー放射が含まれていないある一つのチャンネルにおける雑音 rms を求めた。その値の 3 倍を閾値に指定して CLEAN を行い、メーザー放射の全チャンネルの広範囲マップ及び高空間分解能マップを作成した。広範囲マップ及び高空間分解能マップを作成する際、1 ピクセルを 0.5 mas とした。

1 3. メーザースポットのパラメーター取得

スポットとは 1 つのチャンネルマップで見られる放射のことである。広範囲マップでメーザースポットの分布を確認し、高空間分解能マップでパラメーター取得を行った。取得したパラメーターは、マップチャンネル数、位置情報、輝度、イメージ rms である。

1 4. 空間分布の図の作成

取得したパラメーターを用いて、空間分布の作成をした。その際、チャンネル数を LSR 速度に換算した。作成した空間分布の図は、第 5 章の結果に載せた。作成する際のメーザースポットの条件は、信号対雑音比 ≥ 5 であることとした。

第5章 結果

5.1 空間分布図

解析の結果、図 5.1 の結果が得られた。

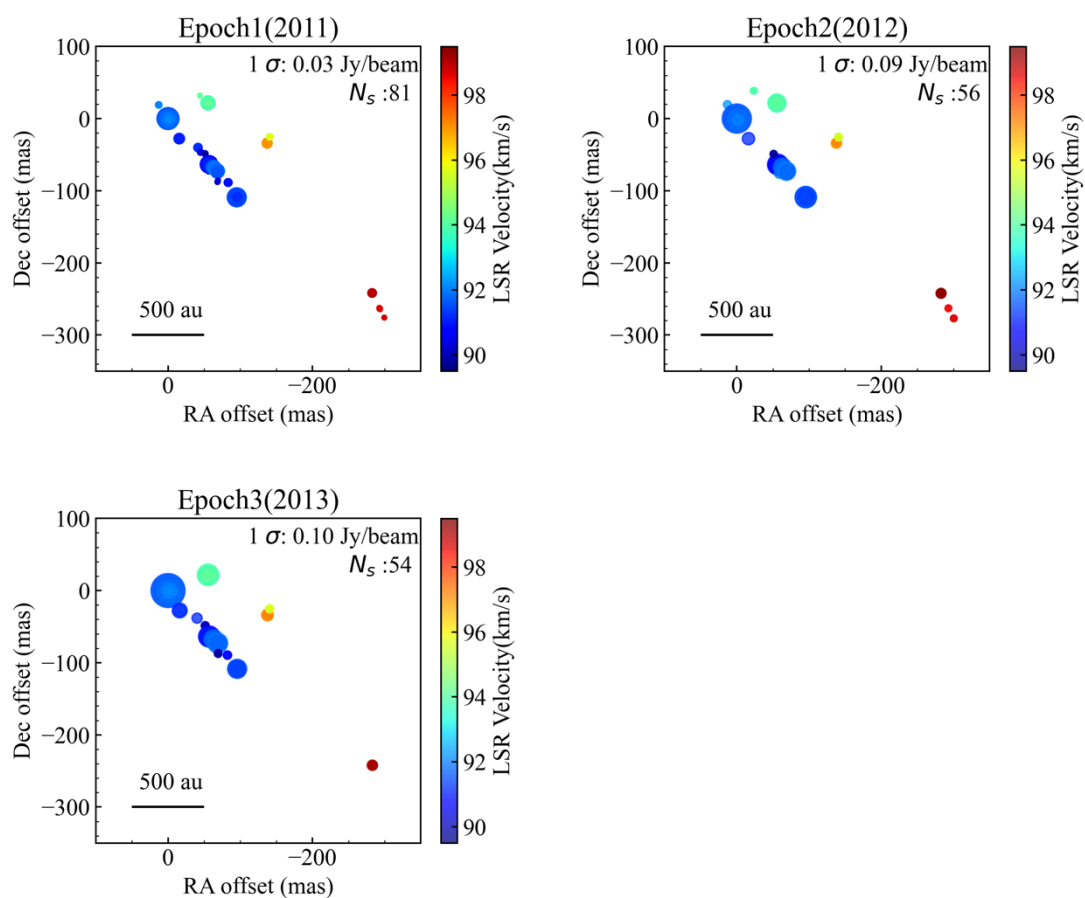


図 5.1 各 Epoch の 6.7 GHz メタノールメーザーのスポットの空間分布。横軸縦軸は、強度最大のスポットからの相対位置である。円の大きさは強度の大きさに比例する。色の違いは、視線速度の違いである。各マップの右上には、放射のないチャンネルの rms ノイズレベルとスポット数が示されている。

どの Epoch もメーザースポットは、 $300 \text{ mas} \times 300 \text{ mas}$ の範囲内で、北東-南西方向に伸びた分布をしており、北東方向で青方偏移成分、南西方向に赤方偏移成分があった。各 Epoch で得られたメーザースポットの空間分布はいずれも楕円状であり、スポットの視線速度の

範囲を比較したところ、チャンネル間隔 0.1757 km/s 以上の違いはなかった。一方で、スポット数は Epoch 間で異なっており、具体的には、Epoch1 は 81 個、Epoch2 は 56 個、Epoch3 は 54 個であった。この結果の原因は、 6.7 GHz メタノールメーザーの特徴の 1 つである 6.7 GHz メタノールメーザー自身の強度の変動に加え、参加アンテナ局数が 8 で、かつ、大口径な 64 m 臼田局が参加していた Epoch1 ではより低い rms ノイズレベルが得られたことにより、放射がより弱いスポットまで検出できたことが考えられる。

Epoch1 は、Fujisawa et al. (2014) で示されている 6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布 (図 5.2 の左図) を導いたものと同じ観測データであった。本研究で得られた Epoch1 に対応するメーザー分布と Fujisawa et al. (2014) による結果を比較したところ、スポット分布の形状や速度範囲に有意な違いは見られなかった。

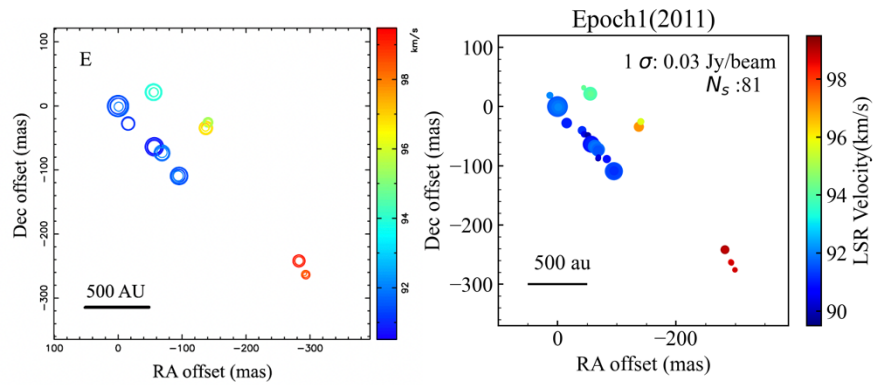


図 5.2 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布図(Fujisawa et al. 2014) (左) と本研究の Epoch1 の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布図(右)の比較図。縦軸横軸が原点からの相対位置を表す。左図の円の大きさは強度の大きさの対数に比例する。右図の円の大きさは強度の大きさに比例する。色は視線速度を表す。

5.2 内部固有運動

内部固有運動とは、天球面上における 2 次元運動のことである。絶対位置に対する運動ではなく、メーザースポット位置の基準点に対する相対的な運動を指す。本研究では、メーザーフィーチャー (メーザースポットのクラスター) の位置の相加平均を基準点とし、これに対する相対運動を求めた。具体的な導出方法は、5.2.1 節と 5.2.2 節で述べる。

5.2.1 メーザーフィーチャーの定義

本研究では、メーザースポットをクラスターでまとめた「メーザーフィーチャー」を定義して内部固有運動を議論する。メーザースポットをメーザーフィーチャーにまとめることにより、複数のメーザースポットの共通する放射源にあたるメーザー雲の存在を推定することができる。スポットは観測上の仕様である速度分解能に依存して周波数方向に分離しているため、固有運動の抽出に先立ち、それらを物理的にまとまりのあるメーザーフィーチャーに再構成する必要があると考えた。

本研究では、以下の条件を使ってメーザーフィーチャーの同定を行った。

1. 個々のメーザースポットが最大サイズ 20 au の「コア」を持つと仮定をし、その円が同一もしくは隣り合うチャンネル間で重なること。
2. スポットが3つ以上含まれること。

メーザーフィーチャーの物理量の算出には、Epoch 間で検出されているスポット（以下、共通スポットと呼ぶ。）のみを用いた。得られた 6.7 GHz メタノールメーザーの速度構造には Epoch 間で大きな変化が確認されなかったことから、観測された3年間でチャンネル間隔（速度分解能）以上の視線速度の変化が起きていないとみなし、速度が一致するスポットを同一のスポットみなした。フィーチャーの位置は、フィーチャーを構成するスポットのうち全ての Epoch 間で検出されたスポットの位置の相加平均で求めた。離角の小さいスポット同士の輝度の変化によって生じる偽の固有運動を排除するために、メーザーフィーチャーの位置を導出する際の共通スポットの位置情報に対してそれぞれ明るさでの重みかけなかった。フィーチャーの位置のエラーは、フィーチャーを構成する共通スポットに対する標準誤差で求めた。

5.2.2 内部固有運動

内部固有運動の導出の対象フィーチャーは、Epoch 間で検出されているフィーチャー（以下、共通フィーチャーと呼ぶ。）とした。内部固有運動の導出にあたっては、各 Epoch で導出した共通フィーチャーの位置の相加平均を基準点として、これに対する各メーザーフィーチャーの位置の変化を抽出した。図 5.3 は、フィーチャーの位置と、基準点となる共通フィーチャーの位置の相加平均の位置（図 5.3 のダイヤ印）を示している。抽出された基準点に対する位置の変化を、内部固有運動の赤経・及び赤緯成分が Epoch1 から Epoch3 までの2年間は一定値であったと仮定し、時間に対する一次直線でそれぞれ最小二乗フィッティングを行った。その解析から導出したメタノールメーザーの内部固有運動の結果を、図 5.4 及び表 5.1 に示す。

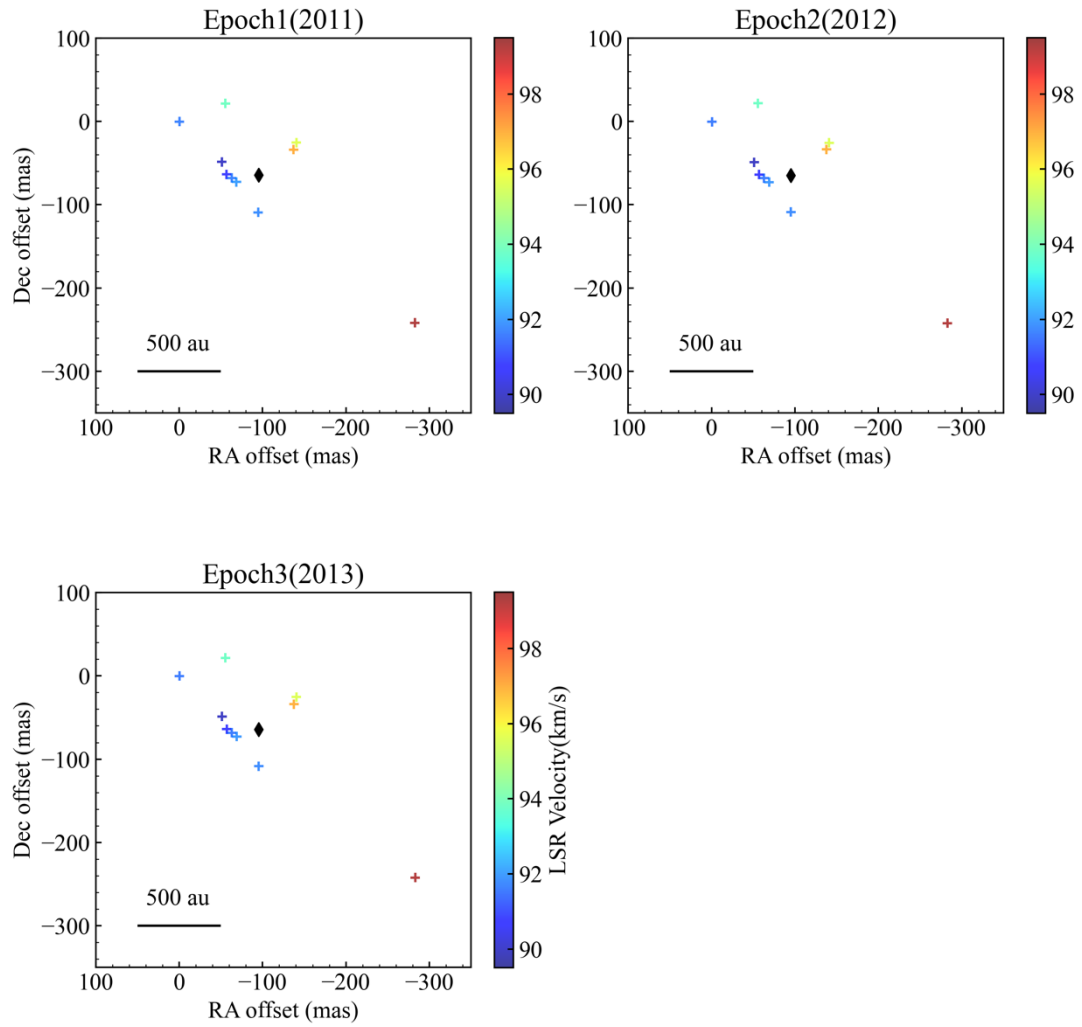


図 5.3 各 Epoch の 6.7 GHz メタノールメーザーの 3Epoch で共通してみられるフィーチャーと重心の分布。横軸縦軸は、強度最大のスポットからの相対位置である。ダイヤモンドの位置が重心の位置である。十字は、フィーチャーの位置である。色の違いは、視線速度の違いである。

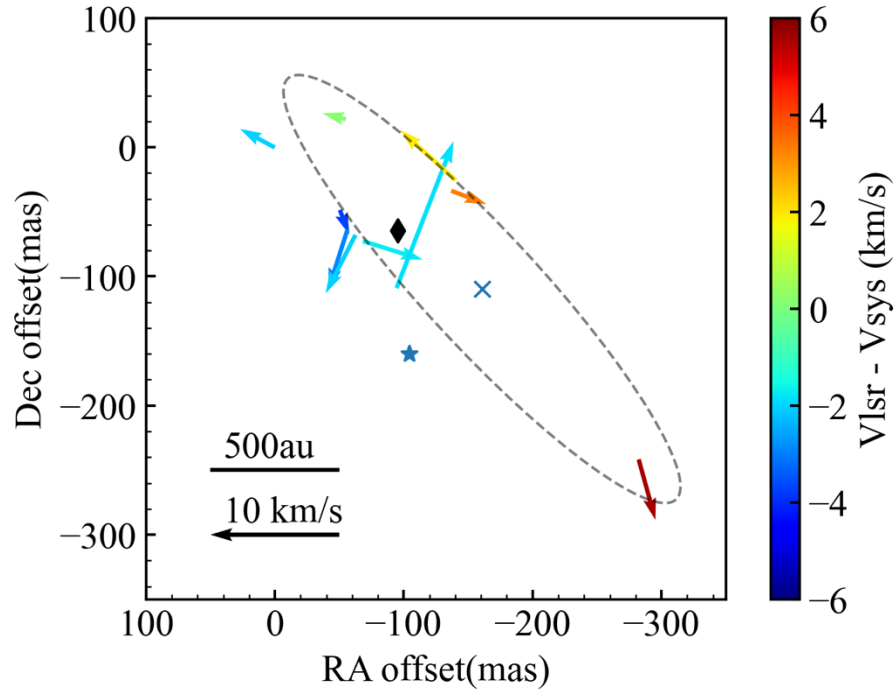


図 5.4 フィーチャーの内部固有運動。ベクトルの色は、視線速度から Systemic velocity 93.7 km/s (Wienen et al. 2012)を引いたものである。ダイヤは重心の位置である。星印は、最も放射の強いメーザースポットが Hu et al. (2016)で取得された絶対座標と一致していると仮定した上で、Kim et al. (2020)により確認された G25.82-W1 の連続波のピーク位置を表す。点線は、Epoch1 で検出されたスポットに対して楕円を最小二乗法でフィットさせた時の楕円である。×印は、楕円をフィットさせたときの中心である。楕円の長軸半径は 222 mas、短軸半径は 44 mas、位置角は 47° である。

表 5.1 最小二乗法による直線フィットの結果。2 列目と 3 列目はエポック 1 の強度最大スポットからの相対位置を表す。

Feature ID	dx (mas)	dy (mas)	$V_{\text{lsr}} - V_{\text{sys}}$ (km/s)	V_x (km/s)	Error V_x (km/s)	V_y (km/s)	Error V_y (km/s)
1	-0.27	-0.29	-2.04	2.70	1.75	1.44	0.62
2	-50.76	-48.65	-3.71	-0.73	9.36	-1.91	3.57
3	-55.43	21.59	0.15	1.83	1.69	0.46	1.12
4	-56.73	-63.60	-2.92	1.50	2.99	-4.69	0.33
5	-62.88	-67.98	-2.04	2.31	2.42	-4.52	0.25
6	-68.57	-72.77	-1.69	-4.65	4.38	-1.44	0.35
7	-94.74	-109.18	-1.87	-4.43	1.91	11.37	2.92
8	-137.21	-33.79	3.32	-2.72	4.58	-1.04	2.67
9	-140.70	-25.62	1.91	4.29	0.86	3.87	2.20
10	-282.66	-241.78	5.60	-1.30	0.28	-4.68	0.19

内部固有運動の速さは、1.88 km/s – 12.2 km/s の範囲で得られた。この天体は Fujisawa et al.(2014)では、Epoch1 の空間分布のみから判断し、スポットの分布を「楕円」として分類している。一方、今回得られた内部固有運動のベクトルの向きについて、南西の端にあるベクトルや北東の端にあるベクトルは楕円の内側を向いていないことが確認できる。

第6章 考察

6.1 非同一円周上モデル

対象天体 G25.82-0.17 は、Fujisawa et al. (2014)では楕円として分類されている。しかしながら、メーザースポットは大質量原始星を中心に同一円周上に分布しているとは限らない。そこで、本研究により計測された内部固有運動をバイアスなく理解するために、本節では Sanna et al. (2017)の非同一円周上モデルを適用することで、各メーザーフィーチャーの運動を真上から見た図として理解することを試みる。このモデルでは、メーザーがほぼ同一面内に存在し、かつその面内と直交する速度成分に比べ面内の速度成分が卓越するような運動をしているものと仮定する。そのために、今回計測された内部固有運動に加え、スペクトル上の視線速度情報も加えた3次元速度構造の情報を下記モデルフィットの対象とする。東方向をX、北方向をYとしてXY平面を天球面と一致させ、視線方向をZと置く。図6.1のように、XYZ座標をZ軸周りに角度PAだけ回転させたものをX''Y'Z座標とし、そのX''Y'Z座標をY'軸周りに角度iだけ回転させた後の座標をX'Y'Z'座標とした。この時、PAはYとY'とがなす角度が一致した時を0°とし北から東に回る方向、iは運動面の垂線Z'と視線Zとがなす角度が一致した時を0°とし図6.1の左下図にて反時計回りに回転する方向をiの正の方向とした。X'Y'Z'座標における速度 V_X 、 V_Y 、 V_Z は回転行列

$$\begin{pmatrix} V_X' \\ V_Y' \\ V_Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos i & 0 & -\sin i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin i & 0 & \cos i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos PA & -\sin PA & 0 \\ \sin PA & \cos PA & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

を用いて、PAとiをそれぞれ $[-90^\circ, 90^\circ]$ と $[0, 90^\circ]$ の範囲で 0.1° 毎に変化させることによって求めた。このとき V_Z は、フィーチャーの視線速度から Systemic velocity 93.7 km/s (Wienen et al. 2012)を引いたものである。さらに各PA、iに対して $|V_Z'|$ の相加平均を求めた。Sanna et al. (2017)と同じ評価方法を用いた。ただし Sanna et al. (2017)に

- 本文(加重平均 V_Z/V_P を最小にする)と図3の説明文(V_Z を最小にする)とで食い違っている
 - 加重平均を求める際の加重の方法が正しく記載されていない
- ことから、本研究では $|V_Z'|$ の相加平均を最小にするPA, iを求めた。その結果、PA= -16° 、i= 65° となった。

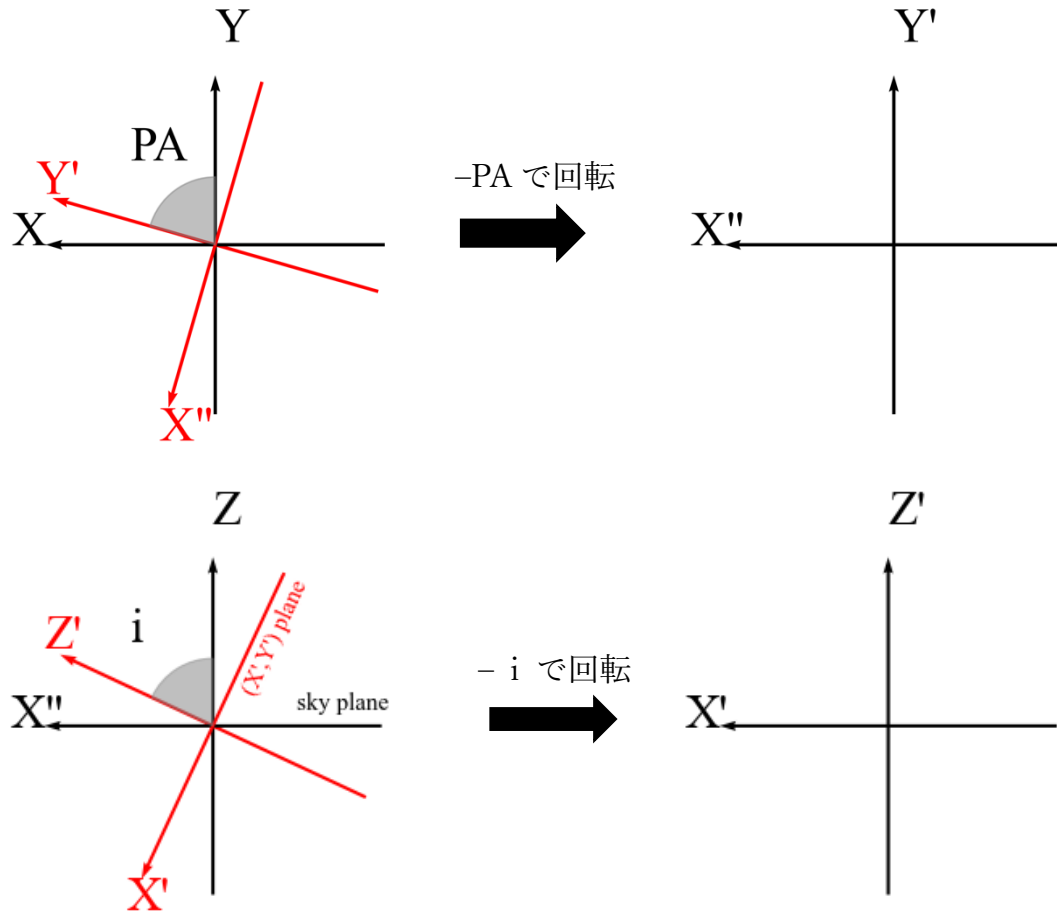


図 6.1 上の2つのプロットは、天球面上の座標についてである。左上の図で東をX、北をYとし、その座標に対して北から東にPA回転させた座標をそれぞれX''とY'とした。右上の図は、左上の図をZ軸周りに-PA回転させたときの図である。上の図と同様に、左下の図は(X'',Z)座標に対して、i回転させたものをそれぞれ(X',Z')とおき、左下の図をY'軸周りに-i回転させたときの図である。なお、右手系の座標系を用いており、上の2つの図のZ方向は面の手前から奥の方向であり、下の2つの図のY'方向は面の奥から手前である。

図 6.2 で示した運動面((X',Y')平面)上にあるフィーチャーの位置(X',Y')は、

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos PA & -\sin PA \\ \sin PA & \cos PA \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

$$X' = \frac{X''}{\cos i} \quad (6.3)$$

を使って求めた。この時、 (X_0, Y_0) は、Kim et al. (2020) で確認されている G25.82-W1 の連続波の一番明るい位置（原始星の位置と想定）である。図 6.2 を見ると、1) フィーチャーの分布が一直線上にあること、2) 中心から最も遠方にあるフィーチャー1 とフィーチャー10 の運動が上記の直線に沿って分布し、かつお互いが遠ざかる向きに動いていることから、対象天体の 6.7 GHz メタノールメーザー雲が円盤ではなくアウトフローをトレースしている可能性がある。

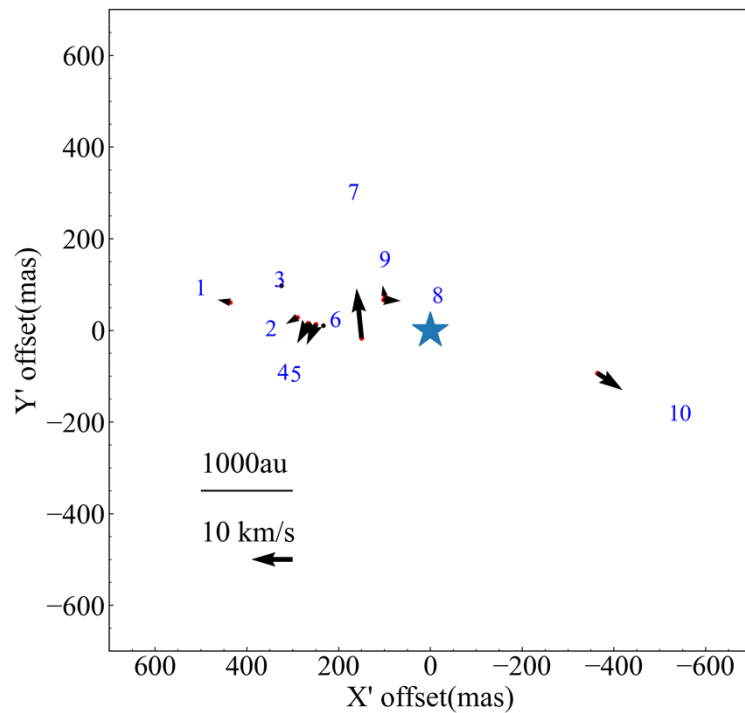


図 6.2 PA= -16° 、 $i=65^\circ$ として Face on で見た場合に得られるフィーチャーの運動の様子。原点にある青い星印は、Kim et al. (2020) で検出された G25.82-W1 の連続波の一番強い位置を表す。赤い点はフィーチャーの位置を表し、左下以外の黒い矢印はフィーチャーの速度を表す。黒い円は中心からの距離を表す。青色の数字はフィーチャー番号である。

6.2 熱的なメタノール輝線、熱的な SiO 輝線、および Class I メタノールメーザーとの比較

Kim et al. (2020) により得られている対象天体の情報を表 6.1 にまとめた。6.2 節では、これらの情報と本研究の結果とを比較し、考察する。

表 6.1 Kim et al. (2020)による観測結果。

	中心速度 (km/s)	線幅(km/s)	示唆しているもの
230 GHz メタノール (22 ₄ -21 ₅)熱的な輝線	92.9	6.3	円盤
SiO(5-4)熱的な輝線	94.3	~11.7	2つのアウトフロー (南北、南東-北西の2つ)
229 GHz メタノール (8 ₁ -7 ₀)メーザー及び 熱的な輝線	94.3	6.8	SiO よりも線幅が狭いことから、SiO アウトフローよりも 低速なアウトフローをトレースしていることを示唆。

6.2.1 230 GHz 熱的なメタノール(22₄-21₅)輝線

本研究で得られた 6.7 GHz メタノールメーザーと検出されたメタノール(22₄-21₅)熱的輝線(Kim et al. 2020)の比較を行う (図 6.3)。Kim et al. (2020)では、230 GHz メタノール(22₄-21₅)輝線のモーメント 1 マップの結果から、この放射は回転円盤またはエンベロープをトレースしているのではないかと解釈していた。この輝線は、南東方向が青方偏移、北西方向が赤方偏移の速度勾配を示している。一方、本研究による 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布は、北東-南西方向に伸びており、北東方向が青方偏移、南西方向が赤方偏移であることがわかる。本研究の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布と Kim et al. (2020) の 230 GHz メタノール(22₄-21₅)輝線のモーメント 1 マップの結果とを比較すると、両者の速度分布は異なる。具体的には、北東付近で Kim et al. (2020)と本研究のスポットの空間分布いずれも約 92 km/s であり近い速度を示しているが、南西付近で Kim et al. (2020)では約 90 km/s であるのに対して本研究のスポットの空間分布では約 97 km/s であり、同じ領域で得られた速度分布がお互いに異なっている。このことから、Kim et al. (2020)が得たメタノール熱的輝線のモーメント 1 マップから示唆された円盤に、6.7 GHz メタノールメーザーが付随している可能性は低い。

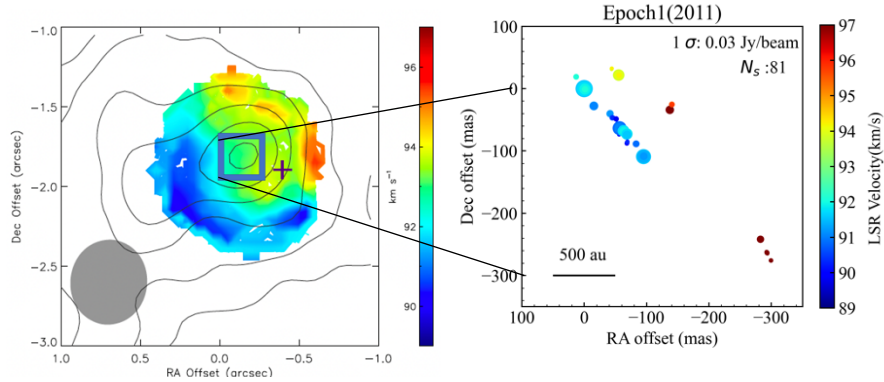


図 6.3 図 2.6 を修正したもの (左) と図 5.1 の一部 (色を図 2.6 の色に合わせたもの) (右) との比較図。左図の青い四角は本研究にて 6.7 GHz メタノールメーザーが検出された範囲 (300 mas $\times$ 300 mas) である。本研究にて検出された 6.7 GHz メタノールメーザーの速度範囲は、89.5 – 99.5 km/s である。

6.2.2 熱的な SiO 輝線

Kim et al. (2020) では、対象天体には北西-南東方向と北-南方向の 2 つの SiO アウトフローが確認されている。図 6.4 は先行研究の SiO のマップと本研究で得られた 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布図である。第 1 に、Kim et al. (2020) の北西-南東 SiO アウトフローとの比較をしていく。先行研究で検出された南東-北西方向のアウトフローは、北西側に赤方偏移成分が、南東側は青方偏移成分がそれぞれ分布していた。一方で 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布は北東-南西方向に伸びた分布をしており、北東方向で青方偏移成分、南西方向に赤方偏移成分があった。本研究で得られた 6.7 GHz メタノールメーザー源の視線速度分布と Kim et al. (2020) による SiO 北東-南西方向のアウトフローを比較すると、伸びている軸の方向はおよそ 90° 異なり一致しないことから、6.7 GHz メタノールメーザーはこの SiO 北東-南西方向のアウトフローには付随していないと考えられる。

次に、Kim et al. (2020) の南北 SiO アウトフローとの比較を行う。Kim et al. (2020) で検出された南北 SiO アウトフローについて、北側に青方偏移成分が、南側は赤方偏移成分がそれぞれ分布していた。一方で本研究の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布は北東-南西方向に伸びた分布をしており、北東方向で青方偏移成分、南西方向に赤方偏移成分があった。北と南で区切った時に、どちらの分布も南側には赤方偏移成分、北側に青方偏移成分が存在しており一致していると言える。また、伸びている方向については、南東-北西アウトフローよりは、南北方向のアウトフローに近いと言える。

駆動源と本研究の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの位置についても述べる。6.7 GHz メタノールメーザーは、G25.82-W1 付近に分布している。南東-北西方向のアウトフローの原点は 3 つの連続波源 (G25.82-W1, W2, W3) から少なくとも $0''.8$ (距離 5 kpc において 4000 au に相当) 離れている。南北方向のアウトフローの場合は、G25.82-W1 の北西方向から $0''.2$ (1000 au に相当) 離れている。このことから、南東-北西方向のアウトフローよりは、南北方向のアウトフローの原点が 6.7 GHz メタノールメーザー源と近いことがわかる。つまり、この南北アウトフローには 6.7 GHz メタノールメーザーが付随している可能性がある。

視線速度範囲を比較すると、SiO(5-4)は 59.2–157.7 km/s (Kim et al. 2020)、本研究の 6.7 GHz メタノールメーザースポットでは、89.6–99.5 km/s である。すなわち、検出されている速度範囲が異なる。これについては、Machida et al. (2008) により理論的に提唱されている "磁気遠心力により噴出される比較的コリメーションの弱い低速アウトフロー" と、"磁気圧により噴出され強くコリメーションされた高速ジェット" が共存する、という計算結果を踏まえた説明が可能な状況であると言える。

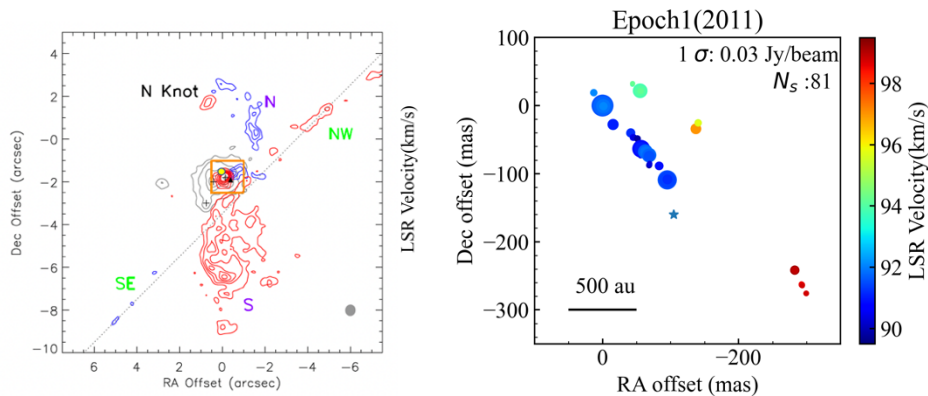


図 6.4 図 2.3 に 6.7 GHz メタノールメーザーの強度最大スポットの位置 (黄色い点) を付け加えた図 (左) と本研究による Epoch1 の 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布図 (右) の比較図。左図の青いコントアは、59.2–80.1 km/s の範囲で積分された強度を示す。左図の赤いコントアは、103.7–157.7 km/s の範囲で積分された強度を示す。左図のコントアの範囲は 5σ から 30σ で、間隔は 5σ である。この時の 1σ はそれぞれ 9.8 mJy/beam km/s、18 mJy/beam km/s である。左図の黒い十字は、それぞれ北から G25.82-W1、W2、W3 である。点線は、南東-北西 SiO アウトフローの軸である。右下隅の灰色の円は、SiO マップの合成ビームである。オレンジ色の長方形は、図 2.5 の領域を示している。右図の青い星印は、最も放射の強いメーザースポットが Hu et al. (2016) で取得された絶対座標と一致していると仮定した上で、Kim et al. (2020) により確認された G25.82-W1 の連続波のピーク位置を表す。

6.2.3 229 GHz メタノール($8_{-1}-7_0$)(class I) メーザー及び熱的放射

図 2.4 で示した 229 GHz メタノール放射は、少なくとも 61.9 – 109.1 km/s の範囲で検出されている (Kim et al. 2020)。6.7 GHz メタノールメーザースポットは、229 GHz メタノール放射のほうが SiO 放射よりも近い視線速度範囲で検出されている。この 229 GHz メタノールと SiO のアウトフローは、視線速度 88.9 km/s、95.6 km/s、102.4 km/s において似た分布を示していることから、229 GHz メタノールは SiO と同じアウトフローをトレースしている可能性が高い。SiO アウトフローに比べてこの 229 GHz メタノールの線幅の半値全幅 (FWHM) は 6.8 km/s と非常に狭く、SiO と同じ方向のアウトフローに付随しながらも非常に低速なアウトフローをトレースしている可能性が示唆されている。このことから、南北方向の SiO アウトフローに付随している可能性がある 6.7 GHz メタノールメーザーに関して、6.7 GHz メタノールメーザーも同じ南北アウトフローに付随し、229 GHz メタノールが低速アウトフローに付随している可能性があることから、南北アウトフローのうちの低速成分に 6.7 GHz メタノールメーザーが付随している可能性がある。高速ジェットと低速アウトフローが同じ原始星に共存することは理論的に可能であることが指摘されている (Machida et al. 2008) ことから、高速ジェットと低速アウトフローがそれぞれの放射の起源となっている可能性を検討していく必要があると考えられる。

6.3 回転アウトフロー

Hirota et al. (2017) によるオリオン座分子雲に含まれる大質量原始星 source I の観測からは、source I に付随するアウトフローの短軸方向に、赤道付近に広がる円盤が示す回転速度成分と同じ向きの回転に起因すると解釈できる速度勾配が確認された。このことから、大質量星から放出されているアウトフローは、その回転円盤と同じ向きに回転していることが示唆された (図 6.5)。このことは、Machida et al. (2008) などが理論的に議論している、「低速なアウトフローが回転円盤周りの磁気遠心力により噴出される」とする描像と合致している。

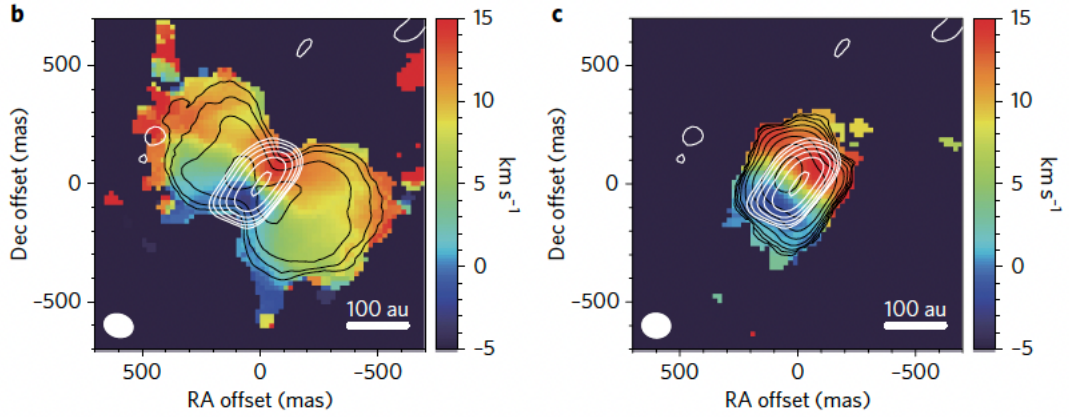


図 6.5 観測された輝線と連続波放射のモーメントマップ(Hirota et al. 2017)。左, 490 GHz 連続波 (白の等高線)、484 GHz Si^{18}O モーメント 0 (黒い等高線) とモーメント 1 (ピーク速度; カラー) を示し、484 GHz Si^{18}O がアウトフローを示唆している。右, 490 GHz 連続波 (白の等高線)、463 GHz H_2O 輝線のモーメント 0 (黒の等高線) とモーメント 1 (カラー) を示し、463 GHz H_2O 輝線が回転円盤を示唆している。

本研究の対象天体である G025.82-00.17 の 6.7 GHz メタノールメーザーのアウトフローについて議論する。図 6.1 では、ほぼ一直線に並んだフィーチャーにおいて両端のフィーチャー 1 とフィーチャー 10 は上記の直線に沿って分布し、かつお互いが遠ざかる向きに動いていたが、他のフィーチャーは、そのような遠ざかるような外向きの運動を示さなかった。この特徴を説明するため、Hirota et al. (2017) の回転アウトフローを適用する。回転運動とアウトフローの影響により、フィーチャーの運動は図 6.7 のようなスパイラル状である可能性が考えられる。

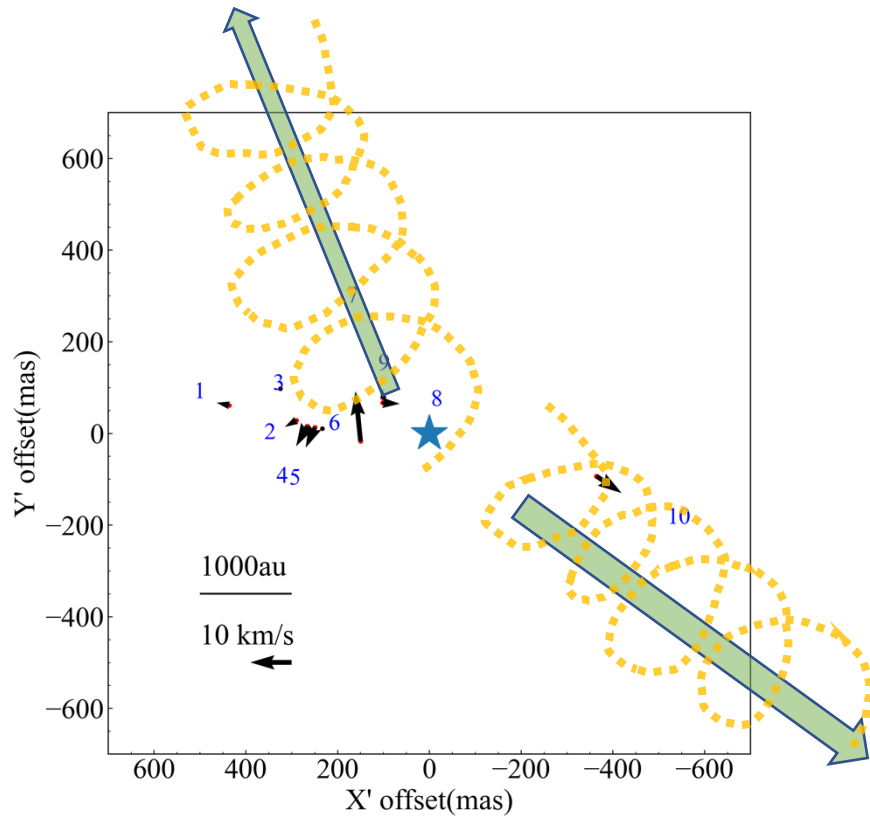


図 6.7 図 6.2 にアウトフローに関する図形を付け加えたものである。緑色の矢印は、アウトフローの運動の方向を示す。オレンジの点線は回転アウトフローを表す。

図 6.7 に含まれている 10 個のいずれのフィーチャーの運動も、緑色のアウトフローが図 6.7 で示したようにあった場合、このアウトフローの軸を中心に、螺旋の幅が広がるように外側に向かって運動している。アウトフローの影響により、連続波源を中心に外側の緑の矢印で示したような運動も確認できる。すなわち、図 6.7 のようにスパイラル上に回転しながら、中心から外側へ噴出するようなアウトフローを想定すると、両端以外のフィーチャーに見られる一見ランダムな運動を説明できる。

定量的に推定されるアウトフローの軸を使って天球面上にプロットされるアウトフローの軸がどのようにプロットされるのか調べていく。まずは、今回得られたフィーチャーの速度を使って推定されるアウトフローの軸について調べた。フィーチャー 1～9 とフィーチャー 10 に分け、それぞれの速度の傾き V_Y/V_X の相加平均を求め、それをプロットさせた図が図 6.8 (左) の青い線（フィーチャー 10 の速度の傾き）と橙色の線（フィーチャー 1～9 の速度から求められた傾き）である。青い線が $PA_{\text{青}}=56^\circ$ 、橙色の線が $PA_{\text{橙}}=5^\circ$ である。これを

$$X'' = X' \cos i \quad (6.4)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-PA) & -\sin(-PA) \\ \sin(-PA) & \cos(-PA) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X'' \\ Y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

で計算し天球面上にプロットさせたものが図 6.8(右)である。この時、 (X_0, Y_0) は、Kim et al. (2020)で確認されている G25.82-W1 の連続波の一番明るい位置 (原始星の位置と想定)である。天球面上にプロットさせた推定されるアウトフローの軸は、青い線 (運動面上のフィーチャー10 の速度を使って求めたもの) が $PA_{\text{青}}=16^\circ$ 、橙色の線 (運動面上のフィーチャー1~9 の速度を使って求めたもの) が $PA_{\text{橙}}=-13^\circ$ である。これらの推定されるアウトフローの軸はいずれもおおよそ南北に軸が伸びている。

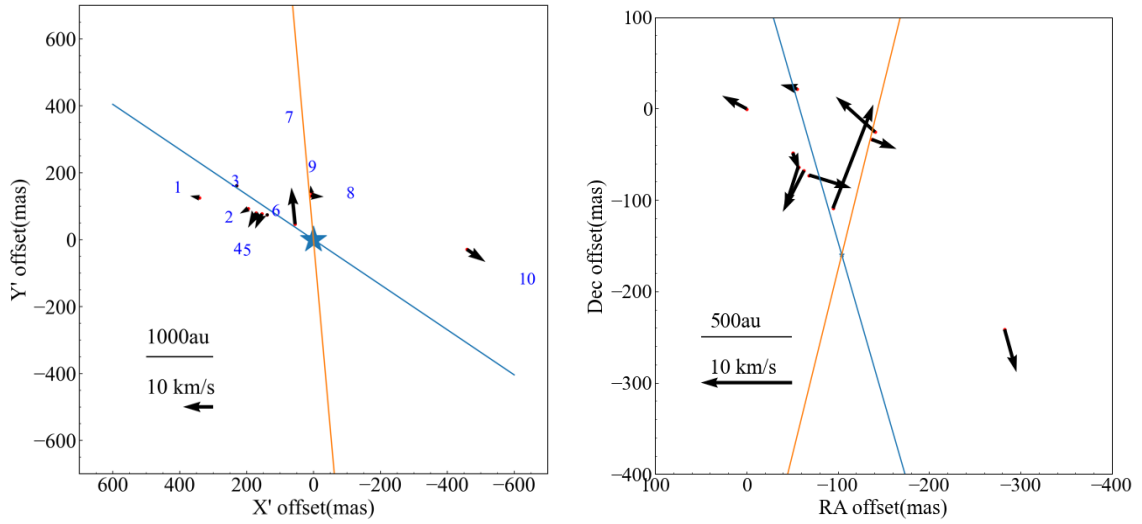


図 6.8 左図は図 6.2 に推定されるアウトフローの軸 (青、橙色の線) をプロットさせたもの。右図は天球面上に内部固有運動 (矢印) と推定されるアウトフローの軸 (青、橙色の線) をプロットさせたもの。両図の星印は連続波ピーク位置 G25.82-W1 である。左図の原点は連続波ピーク位置、右図の原点は強度最大のスポットである。

第7章 まとめ・今後

本研究では、年1回の観測を3年にわたって行った G025.82–00.17 の観測データの解析を行い、この大質量星形成領域における 6.7 GHz メタノールメーザー源の空間分布とその時間変化を明らかにし、内部固有運動の計測等を行った。その結果は以下の通りである。

1. 各 Epoch で得られたメーザースポットの空間分布はいずれも楕円状であり、これらを比較したところ、スポットの視線速度や位置の分布に大きな違いは見られなかった。
2. 空間分布の結果を用いて内部固有運動を導出したところ、内部固有運動の速さの範囲は、1.88 km/s–12.2 km/s であった。この天体は Fujisawa et al. (2014)によると、この天体のスポット分布は楕円として分類されている。固有運動ベクトルの方向は、楕円の内側ではなく、外側を向いていることが確認された。
3. Sanna et al. (2017)の非同一円周上モデルを用いたところ、1)フィーチャーの分布が一直線上にあること、2)中心から最も遠方に位置するフィーチャーの運動が1)の直線に沿っており、かつそれぞれ遠ざかる方向に動いていることから、対象天体の 6.7 GHz メタノールメーザー雲がアウトフローをトレースしている可能性がある。
4. 先行研究(Kim et al. 2020)のメタノール(22_4-21_5)熱放射によるマップと本研究で得られた各 Epoch での 6.7 GHz メタノールメーザースポットの空間分布を比較すると、速度がお互い異なっていたことから、6.7 GHz メタノールメーザー源は熱的なメタノール(22_4-21_5)輝線がその存在を示唆した円盤には付随していない可能性が高い。
5. 熱的な SiO 輝線によるアウトフローについて、南東–北西方向のアウトフローよりは南北方向のアウトフローの駆動源の方が、6.7GHz メタノールメーザー源の空間分布と近く速度分布も似ていることがわかった。229 GHz メタノールは、SiO の高速アウトフローと似た分布を示すことから、同じアウトフローをトレースしている可能性がある。さらに、SiO アウトフローに比べてこの 229 GHz メタノールの線幅は半値全幅(FWHM)にして 6.8 km/s と非常に狭く、低速なアウトフローをトレースしている可能性が示唆されていた。6.7 GHz メタノールメーザーも同じ南北アウトフローに付随していることから、229 GHz メタノールと同じく南北アウトフローのうちの低速成分に付随している可能性がある。
6. アウトフローに付随している可能性と、Sanna et al. (2017)の非同一円周上モデルによる結果に加え、Hirota et al. (2017)で検出されている回転アウトフローを適用した。その結果、6.7 GHz メタノールメーザーのフィーチャーはスパイラル上に回転しながら、中心から外側へ噴出するアウトフローを起源とする可能性があることがわかった。

今後は、メタノールメーザーがアウトフローに付随しているのかをさらに検証するために、この天体に対して VLBI 観測を継続していくことが望ましい。また、この天体が 6.7 GHz メタノールメーザーの励起条件を満たしているかどうかの検証が必要である。

謝辞

この研究を進めるにあたってご指導していただきました百瀬宗武先生、米倉覚則先生、NARIT の杉山孝一郎氏、山口大学の澤田佐藤聡子氏に深く感謝申し上げます。観測データを提供してくださり、大変ありがとうございます。また、ゼミや講習会などを通してお世話になりました電波天文観測研究室のみなさま、ありがとうございました。山口茨城研究会を通してお世話になった山口大学の先生方、学生の皆様、ありがとうございました。大学学部生院生時にお世話になった皆様、ありがとうございました。

参照文献

- Bartkiewicz et al., 2009, A&A, 502, 155
Bonnell et al., 2002, MNRAS, 336, 659
Cragg et al., 2005, MNRAS, 360, 533
Cyganowski et al., 2009, ApJ, 702,161
Fujisawa et al., 2014, PASJ, 66, 31
Goedfart et al., 2003, MNRAS, 339, L33
Goedhart et al., 2004, MNRAS, 355, 553
Ellingsen et al., 2012, arXiv:1210.2139
Hirota et al., 2017, Nature Astronomy, 1, 146
Hosokawa & Omukai, 2009, Apj, 691, 823
Hosokawa et al., 2010 apj, 721, 478
Hu et al., 2016, Astrophysical Journal, 833,18
J.A.Green&N.M.McClure-Griffiths, 2011, MNRAS, 417, 2500
Kim et al., 2020, Astrophysical Journal, 896,127
Kuhn et al.,2019, ApJ, 870, 32
McKee & Tan 2003, ApJ, 585, 850
Menten, 1991a, ASPC, 16, 119M
Menten, 1991b, ApJ, 380, L75
Minier et al., 2002, A&A, 383, 614
Norris et al., 1993, ApJ, 412, 222 (N93)
Norris et al., 1998, ApJ, 508, 275
Puebla et al., 2016, MNRAS, 456, 2907
Sanna et al., 2017, A&A, 603, A94
Sugiyama et al., 2014, A&A, 562, A82
Wienen et al., 2012, A&A, 544, A146
天文月報 2012 年 4 月号「星形成過程の解明」町田正博
天文月報 2018 年 4 月号「大質量星形成: 複合的フィードバックの影響」田中圭
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. 1 編 日本評論社.