

修 士 学 位 論 文

大質量星形成領域 G 032.04+00.05 に付随する
6.7 GHz メタノールメーザー源の VLBI 観測による
内部固有運動の計測

2018 年度
(平成 30 年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

17NM151H
會 川 航 平

論文要旨

質量が太陽の 8 倍以上の大質量星は星間空間や銀河の進化に大きな影響を与える。そのため銀河規模の現象の理解には、大質量星の形成過程を解明することが必要となる。大質量星形成領域からは、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。CH₃OH メーザーは減光の影響を受けない電波帯の放射であり、特に 6.7 GHz 帯 CH₃OH メーザーは大質量星形成領域にのみ付随し、その中で周期的・突発的といった特徴的な強度変動を示す天体が観測されている。この変動メカニズムの切り分けを行うためにメーザーの空間分布の取得や固有運動の計測が必要となる。メーザー源の放射サイズは数 au 程度とコンパクトであり、明るいことから超長基線干渉計 (VLBI) 観測が適している。

本研究では、G 032.04+00.05 についてメーザーの空間分布とメーザーの内部固有運動の計測のために、東アジア VLBI 網 (EAVN) によって観測したデータを解析した。この天体は、2016 年 12 月 7 日時点で周期変動が検出されている CH₃OH メーザー天体から、(1)EAVN による複数エポックの VLBI マップが存在している、(2) 周期変動の極大期、もしくは極小期に近い周期で観測を行っている、の 2 点を満たし、さらに Fujisawa et al.(2014) よりメーザースポットで形成されるクラスターが 2 つのペア状に形成されており、一方のみが強度変動するという特徴から選出した。G 032.04+00.05 は視線速度 $V_{\text{lsr}}=92.75$ km/s の成分の強度が 57 日で周期変動を示すことが日立モニター観測の結果から確認されていた。以上を背景に本研究の目的は、(1) 周期的な強度変動を示すメーザー成分の空間的な特定と、(2) 周期的な強度変動を示すメーザースポットの内部固有運動の計測、の 2 点とした。

観測は EAVN にて、2010 年 8 月から 2013 年 10 月にわたり 4 回行った。観測は周期に合わせて行ったわけではなかったため、2010, 11, 12 年の 3 回は推定したピーク日から静穏期での観測であった。2013 年の観測はモニター観測より静穏期と分かった。メーザースポットの検出条件は (1) 連続する 2 チャンネル以上で同じ位置に確認、(2) 信号雑音比 (S/N) ≥ 5 、の 2 点を満たすこととし、1 エポック目では 29 個、2 エポック目では 53 個、3 エポック目では 60 個、4 エポック目では 47 個のスポットを確認した。それらを (1) 少なくとも 3 つのスポットを含む、(2) 合成ビームサイズの大きさ内にスポットが含まれる、の 2 点を条件を満たし、スペクトル上における視線速度方向の分離情報を参考にスポットをメーザーフィーチャーという小さなクラスターにまとめた。フィーチャーは 1, 2, 3, 4 エポックでそれぞれ 5 個、10 個、13 個、9 個となり、4 エポックにわたり存在しているフィーチャーが 4 つ、3 エポックにわたり存在しているフィーチャーが 3 つであった。

固有運動の計測はフィーチャーごとに行い、エポック間での座標の差を求め速度を導出する方法と、フィーチャーの座標と期間 (エポック数) で直線フィットさせ傾きから速度を求める方法の 2 通りを行った。その際 4 エポック目の座標が他のエポックと比べ大きくずれている成分があったため、4 エポック目を含めた場合と除いた場合に分けて速度を導出した。結果は全体を 1 つの系としてみた場合、膨張するような運動を見せたが 4 エポック目を含めない場合の方が膨張する量が小さかった。しかし 1 つの系とした場合、メーザーの分布する範囲が典型的な値よりも大きいことから系が 2 つある可能性も考えられた。だが、系が 2 つあるとした場合、運動の傾向は見られなかった。フィーチャー内の視線速度 V_{lsr} の勾配と固有運動の方向は同じ向きを示す可能性がある (Moscadelli, Sanna, and Goddi 2011) ことから、視線速度の勾配 V_{grad} を求めた。しかし固有運動の結果とは異なり、視線速度の勾配は全体的に収縮するような向きであった。これは、必ずしも全ての天体でフィーチャー内の視線速度 V_{lsr} の勾配は固有運動の方向は同じ向きを示すわけではないためかもしれない。

今後は固有運動の速度の値を確定するためにさらに観測を行うことや、他の天体の固有運動と視線速度の勾配を計測し他にもこれらの方向が異なる天体がないか調べる必要があると考える。

ABSTRACT

I imaged the spatial distribution of the class II 6.7 GHz methanol maser spots in a high-mass star-forming region G 032.04+00.05 and measured their internal proper motion.

I used the data taken with the East-Asian VLBI Network at 4 epochs over the period from August 2010 to October 2013.

I detected 29, 53, 60 and 47, methanol maser spots at epochs 1, 2, 3 and 4, respectively. I group the maser spots into a maser feature when there are at least three maser spots observed within the synthesized beam and the spots are detected at least in three consecutive velocity channels. As a result I identified 5, 10, 13 and 9, maser features at epochs 1, 2, 3 and 4, respectively.

From the derived internal proper motion, I concluded that the masing gas cloud is slightly expanding.

目次

1	研究背景	2
1.1	大質量星	2
1.2	CH ₃ OH メーザー	3
2	大質量星形成領域 G 032.04+00.05	5
2.1	天体選出条件	6
2.2	G 032.04+00.05	7
3	研究目的	10
4	観測	10
4.1	観測概要	10
5	データ解析	12
6	結果	14
6.1	エポック 1	15
6.2	エポック 2	18
6.3	エポック 3	22
6.4	エポック 4	26
6.5	メーザーフィーチャー	32
6.6	内部固有運動	39
7	考察	45
7.1	全体の運動	45
7.2	視線速度 V_{lsr} の勾配	45
8	まとめ	49

1 研究背景

1.1 大質量星

本節では「シリーズ現代の天文学 6 “星間物質と星形成”」(福井康雄 他 2008) を参考に、本研究と関連する事項を背景としてまとめる。

大質量星とは質量が太陽の 8 倍以上の恒星であり、星間空間や銀河とその進化に物理的・化学的に大きな影響を与える。具体的な影響の例としては以下が挙げられる。大質量星は表面温度が高く、紫外線量が大きいいため周囲のガスを電離・加熱する、星風と呼ばれるガス流を起こし周囲の物質を圧縮させる、さらに進化の最後に超新星爆発を起こすことで、星間空間に膨大なエネルギーを与え、重元素を生成・供給する、爆発時に形成される中性子星やブラックホールは宇宙線加速の場と考えられている、などがある。これらにより、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 大質量星形成のシナリオ

中・小質量星の形成は大質量星と比べ太陽の近傍に複数存在し、比較的観測も容易なことから、その過程の理解も進んでいる。標準的なシナリオは以下の通りである。

分子雲コアと呼ばれる分子雲の中でもガスの密度が高く星が形成される可能性の高い領域が、重力的に不安定になりガスが中心へと落下しはじめ原始星を形成し始める。重力収縮により圧縮が続き、中心部のガスの温度が上昇するとガス圧が上昇して、中心の高密度領域で重力収縮が止まり力学平衡の状態 (the first core) となる。取り残された周囲のガスが降着し、質量増加と共にコアの温度が 2000 K 程度まで上昇すると水素分子が解離をはじめめる。これは吸熱過程のためガスの圧力が低下し、平衡状態が崩れ再び収縮が始まる (the second collapse)。収縮後、解離した水素は完全電離した状態となり、再度平衡状態となる (the second core : 中心温度 4000 K、密度 10^{16}cm^{-3} 、質量 $0.01M_{\odot}$ 、半径が太陽半径の半分程度)。この第 2 のコアにガスが降着し原始星の質量が増加する (主質量降着期)。星の質量が $1M_{\odot}$ に達すると、何らかの要因により質量降着が停止しゆっくり収縮を始める (前主系列収縮)。星の半径が 1 太陽半径程度まで小さくなると中心温度が 1.5×10^7 K に上昇し水素燃焼反応が始まる。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。

太陽の 8 倍程度までの星は上記のシナリオが適用できると考えられており、特に小質量星については観測的にも各進化段階に対応する天体が特定されている。しかし $10M_{\odot}$ – 数百 $M_{\odot}$ の質量を持つ大質量星の場合、このシナリオをあてはめ質量降着進化が長く続いた結果形成されると考えると以下の 2 点の問題が発生する。

1. 小質量星形成の際の典型的な降着率 ($10^{-5}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$) で大質量星の寿命である 2 – 3 百万年の間降着を続けたとしても、せいぜい $30 - 40M_{\odot}$ 程度しか質量を増やすことができずそれ以上の質量の星が観測されていることについて説明ができない。
2. 中心星が $8M_{\odot}$ で主系列星になると中心星からの放射により降着が妨げられ、小質量星形成の際の降着率 ($10^{-5}M_{\odot}\text{yr}^{-1}$) で計算すると、 $10 - 20M_{\odot}$ 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り、1 と同様にそれ以上の質量の星の存在を説明できない。

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のシナリオに当てはめることはできない。現在、大質量星形成のシナリオは降着説と合体説の 2 つが提唱されている。

降着説では降着率が極めて大きいとして、降着進化により質量を増加するシナリオである。放射圧を十分上回るほど降着率が大きくなる場合、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も可能となる。また、小中質量星の形成シナリオでは質量降着は球対称を仮定していたが、物質は角運動量を持っているため降着円盤を形成することを考えると、円盤を介しての降着は妨げられることなく続けられると考えられる。このため降着説では原始星の周囲に降着円盤が存在すると考えられる。

合体説では、大質量星は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。しかし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り、今までにこのような高密度の領域は発見されていない。

このように大質量星は形成過程の理解は小中質量星の形成過程と比べ不十分なものとなっている。これは絶対数が少なく進化のタイムスケールが短いため、見つかっている形成領域がより遠方 (>1 kpc) にあること、大質量原始星の周囲を高密度の星間物質が覆っていることから観測が困難となっているためである。

1.1.2 大質量星形成領域のメーザー

大質量形成領域からは、原始星近傍から OH メーザー、 H_2O メーザー、 CH_3OH メーザーなど様々な種類のメーザー現象が確認されている。

メーザー源は放射サイズが数 au 程度^{*1}とコンパクトであり、かつ明るいため、超長基線電波干渉計 (VLBI: Very Long Baseline Interferometer) 観測が可能である。VLBI 観測は数ミリ秒角 (mas) の空間分解能を達成することができるため、VLBI 観測を用いたメーザー源の観測により、大質量星形成領域の詳細なデータが得られると期待される。

CH_3OH メーザーは減光の影響を受けない電波帯の放射であり、かつ輝度が高い (典型的な輝度温度: 10^7 – 10^{10} K) ため、大質量原始星を探る重要な手段である。中でも 6.7 GHz 帯の CH_3OH メーザーは大質量星形成領域にのみ付随することから、大質量星形成過程の解明に重要な役割を果たすと考えられている。 CH_3OH メーザーの中には特徴的な周期的強度変動を示す天体がある。これまでに検出された変動周期は 30–670 日 (Goedhart et al. 2004, 2009) であり、かつ複数成分に同期した変動が見られる天体も存在する。これらのタイムスケールや特徴から変動のメカニズムを推定にもつながるため、このメーザーは大質量星形成近傍の変動現象を観測可能な有力なプローブとして期待出来る。

1.2 CH_3OH メーザー

1.2.1 メーザー現象

通常の輝線スペクトルは分子との衝突で励起されたイオン・原子・分子が自発的に下の準位に落ちるときに電波を発するもので、非常に微弱である。しかし、赤外線など外部からの放射や分子同士の衝突によって励起されることによって、通常のボルツマン分布から粒子の数密度分布が反転し、高いエネルギー準位のほうにより多く分布することがある。このような反転分布の状態で、何らかのきっかけにより高い準位にある粒子が低い準位へと移ると、それが引き金となり連続的に低い準位へと遷移する誘導放射が起き強い放射を出す。これがメーザー (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる現象である。1965 年に天体からの放射として OH メーザーが発見されて以来、 H_2O 、 SiO 、 CH_3OH 、 H_2CO など様々な種類のメーザーが発見されてきた。このようなメーザーは、星形成領域から晩期型星まで様々な進化段階の星や領域に付随していることが多い。

*1 地球と太陽の平均距離。1 au = 1.50×10^{11} m

表 1.1 CH₃OH 遷移表 (Muller et al. 2004 参照)

クラス	周波数 (GHz)									
I	0.834	5.0	9.9	25.0	25.3	25.8	26.8	27.4	28.1	28.9
	29.6	30.3	36.1	44.1	84.5	95.2	104.3	132.9	146.6	229.8
II	6.7	12.2	20.0	23.1	29.0	37.7	38.4	38.5	86.6	86.9
	107.0	108.8	156.5	156.8	157.0	157.2	157.3			

1.2.2 6.7 GHz CH₃OH メーザー

メーザーは分子の種類により放射を出す周波数が異なる。大質量星近傍からは H₂O メーザーや CH₃OH メーザーなどが強い放射を出すことが知られている。この中で CH₃OH メーザーは 834 MHz 以上の周波数で輝線が見られ、衝突励起、放射励起のどちらが優勢かによって、class I, II メーザーに分類される。これらは生まれて間もない大質量星に付随するものである。それぞれのクラスに属する CH₃OH 遷移を表 1.1 に示す。6.7 GHz 帯と 12.2 GHz 帯の CH₃OH メーザーは class II の代表的なメーザーであり、現在までに大質量星形成領域以外からの検出例がほとんどないため、大質量星形成の指標として精力的に観測が行われている。

6.7 GHz CH₃OH メーザーが初めて観測されたのは 1991 年であり (Menten 1991)、励起状態 (J, K) = (5, 1) から低励起状態 (J, K) = (6, 0) への A⁺ 軸対称による遷移である。また、その静止周波数は $6668.5192 \pm 0.0008 \text{ MHz}$ である (Breckenridge & Kukolich 1995)。6.7 GHz のものは多くの周波数帯で検出される CH₃OH メーザーの中で最も明るく、メーザー全種の中で H₂O メーザーに次ぎ 2 番目に明るいことが知られている。また、このメーザーを起こしている分子ガス領域のサイズは数 au ほどで非常にコンパクト (Menten 1992) などがわかっている。そのため高分解能な VLBI 観測に適しており、秒角スケールの空間分布を数ミリ秒角の高い分解能で知ることが可能である。ただし、Minier et al. (2002) の研究により、12.2 GHz 帯のメーザーのサイズは必ずしもコンパクトではなく、数 10 – 数 100 au にも及ぶ広がった放射も存在していることが示唆されている。

1.2.3 強度変動

6.7 GHz CH₃OH メーザーについての長期間のモニター観測により、このメーザーは強度変動することが知られている。強度変動の観測の 1 例として Goedhart et al. (2004) がある。この研究では南アフリカ共和国の Hartebeesthoek 26 m 望遠鏡を使い、6.7 GHz 帯で 54 天体を 1999 年 1 月から 2003 年 3 月まで 1 – 2 週間間隔でモニター観測を行っている。結果は大多数の天体に数日 – 数年単位でスペクトルに変動が見られ、単調に増加もしくは減少するもの、周期的に変動するものなど、様々な傾向を持つ強度変動を検出した。図 1.1 は Goedhart et al. (2004) で観測された 6.7 GHz CH₃OH メーザーが周期的強度変動をする天体 G 331.13–0.24 のスペクトルと成分ごとの変動の様子である。6.7 GHz CH₃OH メーザーの周期変動を引き起こすメカニズムは恒星の脈動による脈動モデル (Inayoshi et al. 2013) や、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) などいくつかの理論モデルが考案されている。これらを切り分けるためにメーザーの空間分布の取得や内部固有運動の計測が必要となる。

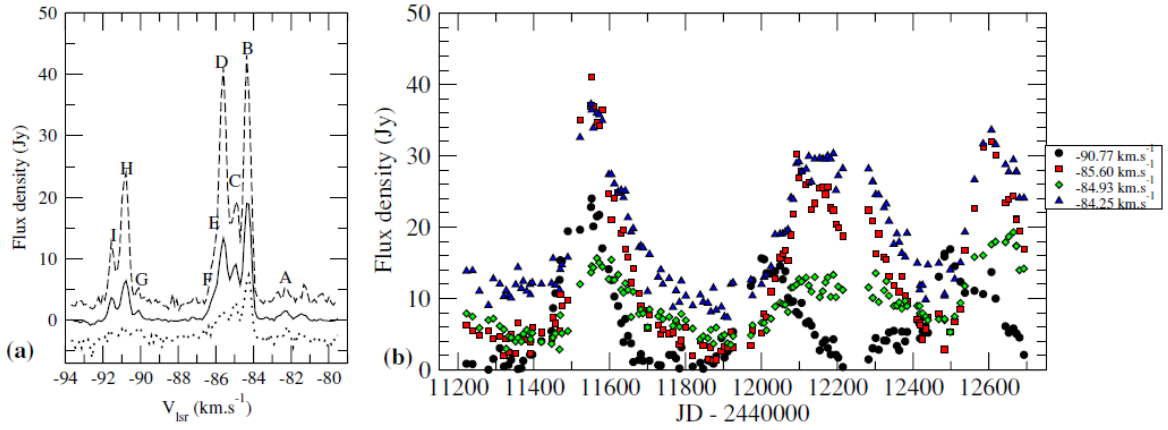


図 1.1 周期的強度変動を示す 6.7GHz メタノールメーザー天体の例 G 331.13-0.24 Goedhart et al. (2004)

1.2.4 内部固有運動

6.7 GHz CH_3OH メーザーは比較的長寿命であり、複数年にわたって観測を行うマルチエポック観測により内部固有運動を推定できる。メーザーは原始星周囲のガス雲から放射されると考えられるため、メーザーの固有運動の計測によりその運動を調べる事が可能となる。内部固有運動についての研究例として、Sugiyama et al.(2016) の G 006.79-00.25 の観測結果を紹介する。これは 2010 年 8 月 29 日 (VERA-水沢局, VERA-入来局, VERA-小笠原局, VERA-石垣局, 日立局, 上海局)、2011 年 10 月 5 日 (VERA4 局, 山口局, 日立局)、2012 年 9 月 23 日 (VERA4 局, 山口局, 日立局, 上海局) の 3 回にわたり East-Asian VLBI Network(EAVN) を用いた観測の解析結果であり、それぞれ 92, 106, 118 個のメーザースポットを検出している。スポットの検出条件は信号雑音比 (S/N) ≥ 5 、連続した 2 チャンネル以上で確認されることである。これらのメーザースポットはメーザーフィーチャーと呼ばれる小さなクラスタに分けられ、17 個に分類された。メーザーフィーチャーとは、10 au 程度のオーダーで隣接するチャンネルのメーザースポットを集め一つに近似したものである。これはメーザーガス雲を表している可能性があり、このフィーチャーの固有運動からガス雲の動きを推定した。この研究ではフィーチャーの定義を、少なくとも 3 つのスポットを含みそれが合成ビームサイズに収まるサイズでまとまるクラスタとした。さらに合成ビームサイズの大きさの中に含まれるスポットが複数のスペクトルに分けられる場合、視線速度方向の分離情報を参考にして区別した。このフィーチャー毎に固有運動の計測を行った結果をプロットした図が図 1.2 である。G 006.79-00.25 ではフィーチャーは楕円状に並び、回転・膨張運動をしているのではないかと解釈された。

2 大質量星形成領域 G 032.04+00.05

本研究では周期的な強度変動を示す G 032.04+00.05 に付随する 6.7 GHz CH_3OH メーザーの EAVN による VLBI 観測データの解析を行った。以下に天体の選出条件と天体の詳細を記す。

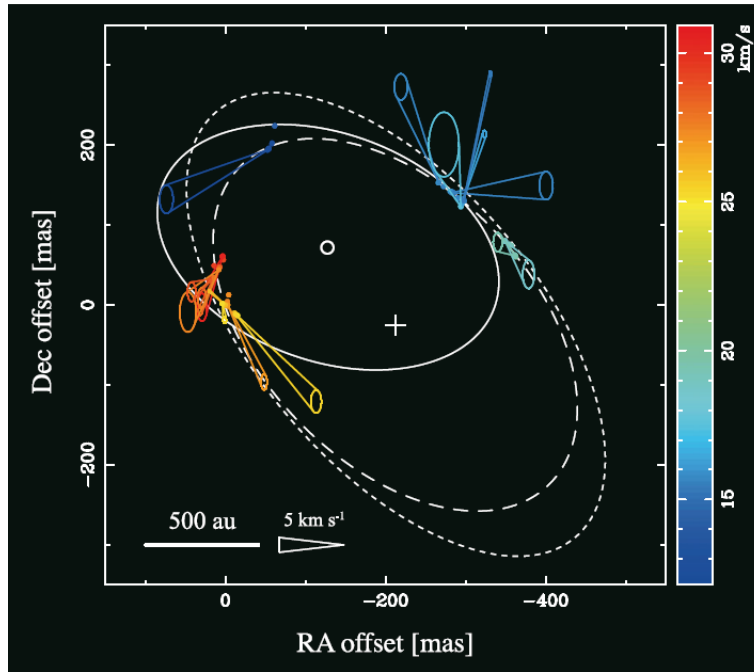


図 1.2 G 006.79-00.25 の固有運動計測結果 (Sugiyama et al. 2016)

表 2.1 選出された 4 天体

天体名	変動周期
G 006.18–00.35	179 日
G 25.82–00.17	76 日
G 012.88+00.48	29.5 日
G 032.04+00.05	57 日

2.1 天体選出条件

天体の選出元は 2016 年 12 月 7 日時点で周期変動が検出されていた CH_3OH メーザー天体全てであり、選出条件は (1)EAVN による複数エポックの VLBI マップが存在している, (2) 周期変動の極大期、もしくは極小期に近い時期で観測を行っている, 以上 2 点である。これらの条件より表 2.1 の 4 天体を選出した。

この 4 天体の中で、観測のタイミングが変動周期に合わせやすいため周期が短いこと、かつ先行研究 (Fujisawa et al. 2014) から、メーザースポットで形成されるクラスターが 2 つのペア状に形成されており、一方が強度変動を行い他方が変動しないという特徴をもつことから、G 032.04+00.05 を選び解析を行った。(4 天体中最も強度変動周期が短い G 012.88+00.48 は、茨城大学大学院理工学研究科 M1 佐藤公紀氏が解析を行っている。)

2.2 G 032.04+00.05

G 032.04+00.05 は図 2.1 に示す Infrared dark cloud(IRDC) G 031.97+00.07 に付随しており、太陽より $5.18^{+0.22}_{-0.21}$ kpc(Sato et al, 2014) の距離に存在する。天体の座標は表 2.2 の通りである。

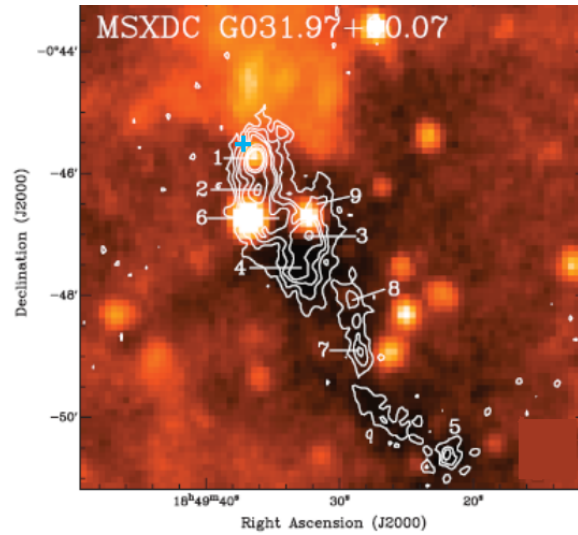


図 2.1 IRDC G 031.97+00.07 の $8\ \mu\text{m}$ 赤外線画像に 1.2 mm 連続波データのコントアを重ねた画像 (Rathborne et al. 2006) を改変。追記した十字線付近に G 032.04+00.05 が存在する。図中の番号 1–9 はそれぞれ 1.2 mm 連続波放射のダストコアを示す。

表 2.2 天体座標

天体名	R.A.(J2000)	Dec.(J2000)	Ref.
G 032.04+00.05	$18^{\text{h}}49^{\text{m}}37^{\text{s}}.3$	$-00^{\circ}45'47''$	Xu et al.(2009b)

2.2.1 先行研究

この天体は Fujisawa et al.(2014) にて、EAVN にて観測した 1 エポック分のデータが解析されていた。この研究では EAVN で観測した 36 点の 1 エポック目のデータを解析し、メーザースポットの分布を解析している。1 つのイメージ中に 2 天体確認できたイメージが 3 枚あったため、検出天体数は 39 となっている。観測日、観測局は表 2.3 に記した。

G 032.04+00.05 はセッション 3 の 2010 年 8 月 30 日に観測され、28 個のメーザースポットが確認された。ピーク成分や大きさのスケール等を表 2.4 に、メーザースポットのマップを図 2.2 に示す。

セッション	観測日 (y/m/d)	時間 (UT)	観測局
1	2010/08/28	07:00–16:00	M, R, O, I, H, S
2	2010/08/29	07:00–28:00	M, R, O, I, H, S
3	2010/08/30	08:00–17:00	M, R, O, I, H
4	2011/10/27	03:00–10:00	M, R, O, I, Y, H
5	2011/10/28	03:00–10:00	M, R, O, I, Y, H, S
6	2011/11/26	01:30–09:00	M, R, O, I, Y, U, H, S

表 2.3 EAVN 1 エポック目観測概要

M:VERA-水沢局, R:VERA-入来局, O:VERA-小笠原局, I:VERA-石垣局,
Y:山口局, U:白田局, H:日立局, S:上海局

天体名	ピーク成分視線速度 V_p (km s^{-1})	強度 F_p (Jy)	スケール (au^2)	視線速度範囲 V_{range} (km s^{-1})	形状
G 032.04+00.05	92.7	27.8	2100×3100	[92.1, 101.4]	ペア

表 2.4 天体パラメータ

ペア形状とは 1 天体中にクラスタが 2 つ存在する形状のことであり、この他の形状の分類としてリニア、楕円、アーチ、複雑形状がある。解析した 39 天体は全てこの 5 つに分類された。

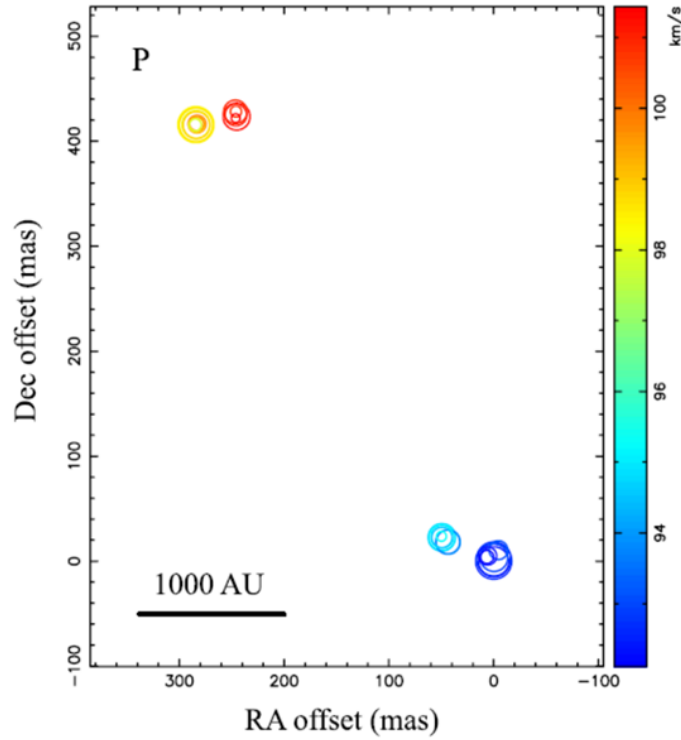


図 2.2 2010 年 8 月 30 日 (MJD 55438) のスポットマップ

2.2.2 日立モニター観測

茨城大学では 6.7 GHz CH_3OH メーザーの強度変動を統計的に調査するため、茨城県日立市にある 32 m 電波望遠鏡を用いてモニター観測を行っている。モニター観測とは、同じ天体をある期間継続して繰り返し観測を行う方法である。2012 年 12 月から現在まで大きく 4 期に分けてモニターを実施している。詳しい期間や天体数などは表 2.5 にまとめた。

G 32.04+00.05 は 11 個の速度成分が同定されている。このモニター観測より $V_{\text{lsr}} = 92.75 \text{ km/s}$ をはじめとした周期変動成分が 4 つ確認された。周期変動成分について、それぞれ表 2.6 に速度成分と周期をまとめた。また、日立モニター観測で得られた変動プロットは図 2.3 のとおりである。

この日立モニター観測の結果と Fujisawa et al.(2014) で得られた図 2.2 を併せて考えると、周期変動する成

	第 1 期	第 2 期	第 3 期	第 4 期
期間 (y/m/d)	2012/12/30–2014/01/10	2014/05/07–2015/08/24	2015/09/18–2017/03/07	2017/06/14– 現在
天体数	442	442	143	442
観測頻度	各天体 9 日に 1 回程度	各天体 9 日に 1 回程度	各天体 4 日に 1 回程度	各天体 5 日に 1 回程度 もしくは 45 日に 1 回程度

表 2.5 日立モニター観測の期間と天体数

表 2.6 G 032.04+00.05 速度成分

周期変動成分 $V_{\text{lsr}}[\text{km/s}]$	92.75	94.14	94.82	95.51
周期 (誤差 +, -)[day]	57.0(+1.6, -1.5)	55.5(+1.5, -1.4)	57.0(+1.6, -1.5)	57.0(+1.6, -1.5)

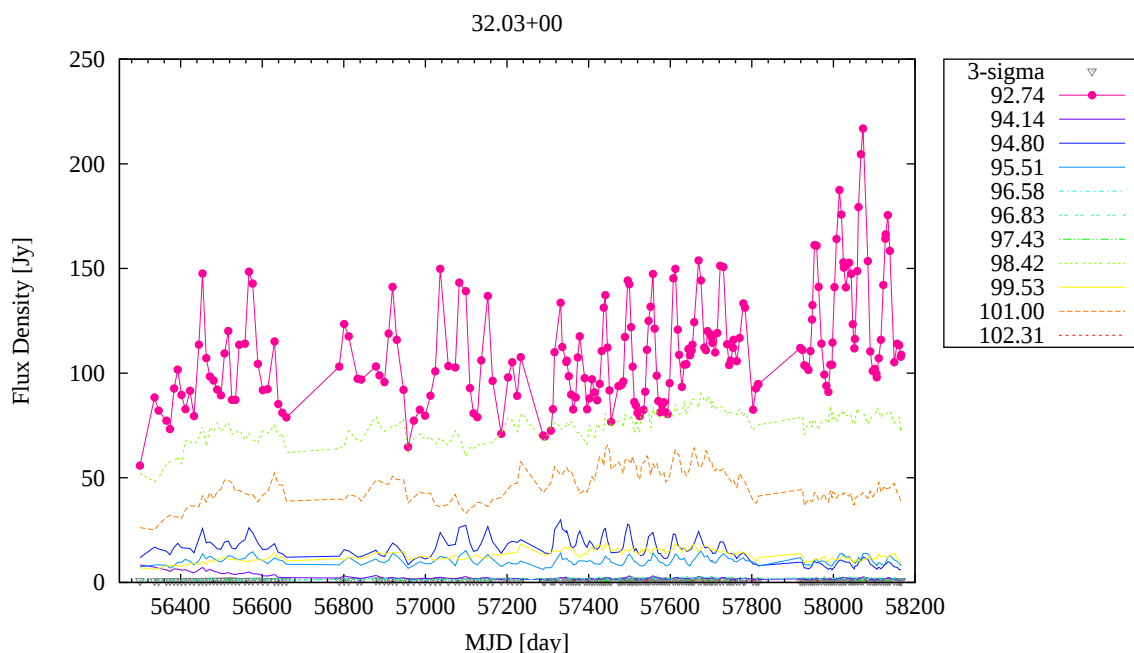


図 2.3 日立モニター観測モニター観測による変動プロット

分が示す視線速度との対応から $(\Delta R.A., \Delta Dec) = (0, 0)$ mas 付近に存在する成分のみが変動しており、北東の $(\Delta R.A., \Delta Dec) = (280, 400)$ mas 付近の成分は変動をしていないことが示唆される。

3 研究目的

これらの先行研究をふまえて、私の研究目的は、(1) 周期的な強度変動を示すメーザー成分の空間的な特定、(2) 周期的な強度変動を示すメーザースポットの内部固有運動の計測、の 2 点とし、これらの結果から周囲のガス雲の運動を考察した。

スポットの固有運動は数 au/year 程度の大きさの運動が確認されており、この天体では 2 mas/year 以下の大きさであるため、固有運動を捉えるためには高い空間分解能を持つ望遠鏡が必要となる。単一鏡と比べ表 3.1 に示すような高い空間分解能を持つ VLBI による観測が適している。

アンテナ・アレイ	空間分解能	距離 5.18 kpc の天体で換算した際の分解能
単一鏡 (日立局)	4.6 arcmin	1.4×10^6 au
VLBI(JVN)	5 mas	2.6×10^1 au

表 3.1 単一鏡と VLBI の空間分解能比較

4 観測

4.1 観測概要

本研究で使用した VLBI 観測のデータは、EAVN により 2010 年 8 月 30 日から 2013 年 10 月 30 日までの間で観測された 4 回分のデータである。観測に使用したアンテナは、VERA-水沢局 20 m, VERA-入来局 20 m, VERA-小笠原局 20 m, VERA-石垣局 20 m, 日立 32m, 山口 32 m, 上海 (中国) 25 m, 蔚山 (韓国) 21 m の計 8 局である。個々の観測に参加した局や、観測のパラメータは表 4.1 に示す。また、観測ではターゲットの G 032.04+00.05 以外にも較正天体などを適宜観測している。較正天体については表 4.2 の通りである。

G 32.04+00.05 の主成分 $V_{\text{lsr}} = 92.75$ km/s は 57 日の周期で強度変動することがわかっているため、観測日と推定されるピーク日との比較を行った (エポック 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)。結果は表 4.3 である。なお、ここで推定ピーク日の計算の起点には図 2.3 中で 92.74 km/s 成分が 100 Jy に初めて到達した日付である 2013 年 4 月 11 日 (MJD:56393) を用いた。この比較から、いずれの観測日も $V_{\text{lsr}} = 92.75$ km/s の主成分が静穏期にあったタイミングだったと推測された。

表 4.1 観測パラメータ

観測日 (y/m/d)	エポック 1 (2010/08/30)	エポック 2 (2011/10/6)	エポック 3 (2012/09/24)	エポック 4 (2013/10/30)
観測局	水沢局、小笠原局、石垣局、入来局、日立局			水沢局、小笠原局、石垣局 日立局、蔚山局、(山口局 †)
		(山口局 †)	上海局、(山口局 †)	
周波数帯	6.667 GHz–6.671 GHz			
分光点数	1024 点			
速度分解能	0.1757 km/s			
G 32.04+00.05 総積分時間	00:59:36	00:59:28	00:59:26	00:59:34
雑音 RMS (Jy/BEAM)	1.4×10^{-1}	3.5×10^{-2}	3.5×10^{-2}	4.3×10^{-2}
合成ビームサイズ (mas ²)	5.45×4.05	7.01×3.15	6.54×3.19	5.85×5.15
PA	−43.23°	−48.43°	−48.33°	27.88°

[†] 山口局のデータは観測はされていたが相関処理時の赤緯座標の符号が異なっていた可能性があり、解析に使用できなかった。

表 4.2 較正天体

天体名	目的
NRAO530, 3C454.3	幾何学的遅延残差較正・バンドパス較正
J1743-03, J1930+15	大気による遅延残差較正
37.40+15	振幅ゲイン較正 (1 エポック目のみ)

表 4.3 VLBI 観測日と推定されるピーク日との比較

観測日 (y/m/d) (MJD)	推定ピーク日 (前) (y/m/d) (MJD)	観測日との差 (day)	推定ピーク日 (後) (y/m/d) (MJD)	観測日との差 (day)
2010/08/30 55438	2010/08/16 55424	14	2010/10/12 55481	43
2011/10/06 55840	2011/09/19 55823	17	2011/11/15 55880	40
2012/09/24 56194	2012/08/26 56165	29	2012/10/22 56222	28
2013/10/30 56595	2013/10/02 [†] 56567	28	2013/12/04 [†] 56630	35

[†] 日立モニターによる実測値

5 データ解析

本研究でのデータの解析は、米国国立電波天文観測所で開発された Astronomical Image Processing Sysytem(AIPS) (<http://www.aips.nrao.edu/index.shtml>) を用いて行った。解析の流れは以下の通りである。なお、この手順は国立天文台 杉山孝一郎研究員が作成した「JVN/EAVN データ解析 フローチャート ver.1.5.1 in 2013/05/07」を参考にした。

1. データインポート・チェック
2. UV 再計算解読み込み
3. 振幅ゲイン校正 (1 回目)
4. Delay & Rate 校正
5. バンドパス位相特性校正
6. ドップラー校正
7. 振幅ゲイン校正 (2 回目)
8. メーザーピークによるフリンジフィッティング
9. ダーティイメージ作成
10. クリーンイメージ作成 (1 回目)
11. セルフキャリブレーション
12. クリーンイメージ作成 (2 回目)
13. メーザースポットの確認・パラメータの取得

AIPS の校正パートでは相関ビジビリティデータは基本的に改変せず、校正情報はファイルに添付するテーブルに書き込まれる。

データインポート・チェック

VLBI 観測のデータを AIPS 内へ読み込ませファイルを作成した。データが正しく読み込まれているのかや、観測スケジュール、アンテナ情報、UVcoverage の確認を行った。また、必要に応じて異常のあるデータを（見かけ上）削除した。

UV 再計算解読み込み

相関局に計算していただいた UV 再計算解^{*2}を読み込ませ、絶対位置の精度を上げることを目的とする。本研究では 1 エポック目のみこの解を使用した¹が、2 エポック目以降は、山口局における解が異常な様子を見せたため解は使わずに解析を進めた。本研究の目的として、メーザーフリンジフィットにより位相中心に持ってきた 92.75 km/s 成分のリファレンスメーザーの位置に対して、他の各メーザーの動きを相対的に検出することから、この解を読み込まずとも影響はない。

振幅ゲイン校正 (1 回目)

観測データを ACCOR という AIPS 中のタスクにて規格化した。またバンドパスの振幅校正のテーブルを作成した。

^{*2} 局位置を最新のものに修正し、かつ地球回転パラメータを精度よく解きなおした解

Delay & Rate 較正

まず、相関処理時の遅延時間補正の残差を明るい連続波源 (NRAO530, 3C454.3) を用いて較正した。この残差は各局の水素メーザーの時刻の精度によるもので、較正天体は必ずしもターゲット天体に近い必要はない。次に、大気の変動による遅延残差の補正を行う。こちらはターゲット天体に近い明るい連続波源で行う必要があり、今回は J1743-03 と J1930+15 を用いた。

また、上の 2 つの較正とは別に明るい連続波源 (NRAO530, 3C454.3) を用いて振幅、位相についてのバンドパスフィルター起因の特性の較正を行った。これを用いて次のバンドパス位相特性較正のテーブルを作成する。

バンドパス位相特性較正

バンドパスの位相方向にみられる特性の較正であり、バンドパスフィルターの周波数方向での特性に起因する効果を除去するためにテーブルを作成した。たいていの場合、目視での確認ができないほど小さい位相傾斜が較正される。

ドップラー較正

ターゲット天体 G 032.04+00.05 について、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て、スキャンした時間ごとに周波数方向へシフトされたファイルを作成した。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。

振幅ゲイン較正 (2 回目)

メーザーの自己相関スペクトルを用いて各局の振幅ゲインの時間変動較正を行った。「メーザー自身が、VLBI 観測中に時間変動していないという仮定で、自己相関スペクトルの時間変動は全てシステムゲインの時間変動に起因する」として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った。この手法をテンプレート法という。ここで知りたい値はシステム等価雑音温度 SEFD である。ある局のシステム雑音温度 T_{sys}^* と有効開口面積 A_{eff} ($A_{\text{eff}} = \pi r^2 \times \eta$, r はアンテナの口径半径, η は開口能率) がわかればフラックス密度 S を求められるため、 S が全局全時間で一定として、他の局の SEFD を計算した。

$$\text{SEFD} = \frac{2kT_{\text{sys}}^*}{A_{\text{eff}}}$$
$$S = \text{SEFD} \cdot \rho$$

k はボルツマン定数、 ρ は観測によって得られる値である。AIPS 上ではテンプレート局の $\frac{2k}{A_{\text{eff}}}$ の値と T_{sys}^* の値を入力する。

1 エポック目のみ 37.40+15 を較正天体として使用し、2 エポック目以降はターゲット天体 G 032.04+00.05 で較正を行った。

テンプレート法を行うにあたり、ある時間における T_{sys}^* 、開口能率が既知であるアンテナが必要となり、このアンテナはエポックごとに異なる。各エポックごとにテンプレートとした局は異なり表 5.1 の通りである。

メーザーピークによるフリンジフィッティング

各エポックで主成分のメーザーのピークチャンネルを用いて位相と遅延時間変化率の解を求めた。

エポック	テンプレート局	T_{sys}^* [K]	開口能率 [%]
1	入来局	120 [†]	52.5
2	小笠原局	135.1	52
3	入来局	125.6	52
4	石垣局	118.6	53

表 5.1 テンプレート局について

[†]1 エポック目は T_{sys}^* の情報を得ることができなかったため $T_{\text{sys}}^* = 120$ K と仮定して解析を行った

ダーティイメージ作成

今までに得た解を適用して天体のピークチャンネルを抜き出したファイルから、ダーティイメージと合成ビームマップのイメージを作成した。パラメータを変えることで、表示範囲を変えることが可能である。

クリーンイメージ作成

セルフキャリブレーションを行うために一度クリーンイメージを作成する必要がある。クリーンとはダーティイメージ中で輝度のピークを見つけ、そこから合成ビームを差し引くことを繰り返してサイドローブの影響を取り除く方法である。輝度のピークにはクリーンコンポーネントを置き、最終的にクリーンコンポーネントにガウシアンなどのクリーンビームを畳み込んでクリーンマップを作成する。

まず放射が見られない部分のダーティイメージを作成し、雑音 RMS(標準偏差) を導出した。AIPS 中のタスク IMAGR にてデルタ関数を置く輝度のピークの位置を指定し、RMS の値から閾値を定めクリーンをかけた。初めはクリーンイメージとの残差イメージを作成し、RMS が変化しない値までクリーンを繰り返す。その値を用いてクリーンイメージを作成した。

セルフキャリブレーション

作成したクリーンイメージをもとに CALIB という AIPS 中のタスクを走らせ振幅と位相の解を求める。

クリーンイメージ作成

セルフキャリブレーションで得た解を適用したファイルから、再びクリーンイメージを作成した。

メーザースポットの確認・パラメータの取得

クリーンイメージよりメーザー放射が見られる位置を判断し、 $S/N \geq 5$ を満たすような成分のパラメータを取得した。

6 結果

本研究でのメーザーの検出条件は (1) 連続する 2 チャンネル以上で同じ位置に確認, (2) $S/N \geq 5$, の条件を共に満たすこととした。これらを 1 チャンネル毎にスポットとして同定し、パラメータを取得した。各エポック毎に主成分のピークのメーザースポットからの相対位置 (mas) で、メーザー強度を円の大きさに表し、プロットしたのが図 6.1— 図 6.9 である。視線速度の違いをカラーで表した。

6.1 エポック 1

1 エポック目については、Fujisawa et al.(2014) で解析したデータと同一のものであり、改めて解析した結果を以下に記す。リファレンスマーザーは 92.651 km/s 成分とした。検出できたマーゼースポットの数 は 29 個であり、詳細は表 6.1 に記載した。図にプロットしたものが図 6.1 である。縦軸を強度、横軸を視線速度として、日立局のトータルパワースペクトルを図 6.2 に示した。

Fujisawa et al.(2014) (図 2.2) と比較すると、 $(\Delta R.A., \Delta Dec.)=(0, 0)$ mas 付近に 3 成分、 $(\Delta R.A., \Delta Dec.)=(50, 20)$ mas 付近に 2 成分、 $(\Delta R.A., \Delta Dec.)=(250, 420)$ mas 付近に 1 成分、 $(\Delta R.A., \Delta Dec.)=(300, 410)$ mas 付近に 1 成分と、スポットの場所と視線速度がほぼ一致した。このことから、解析手法などに誤りがないことを確認した。

また、北東と南西の成分間の距離をリニアスケールで換算したところ、およそ 3600 au であった。

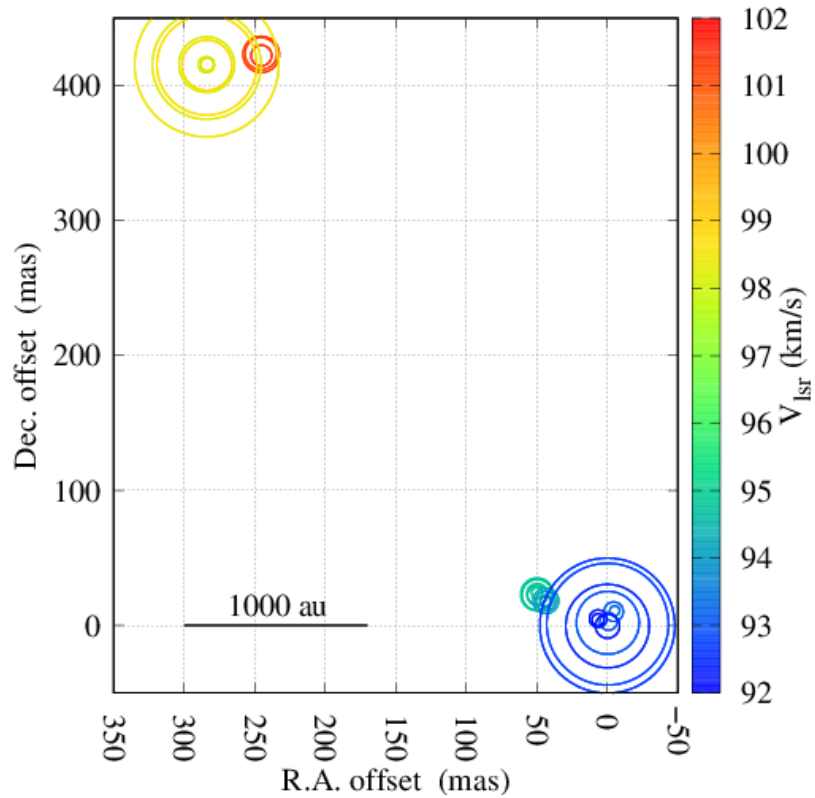


図 6.1 1 エポック目マーゼースポット図

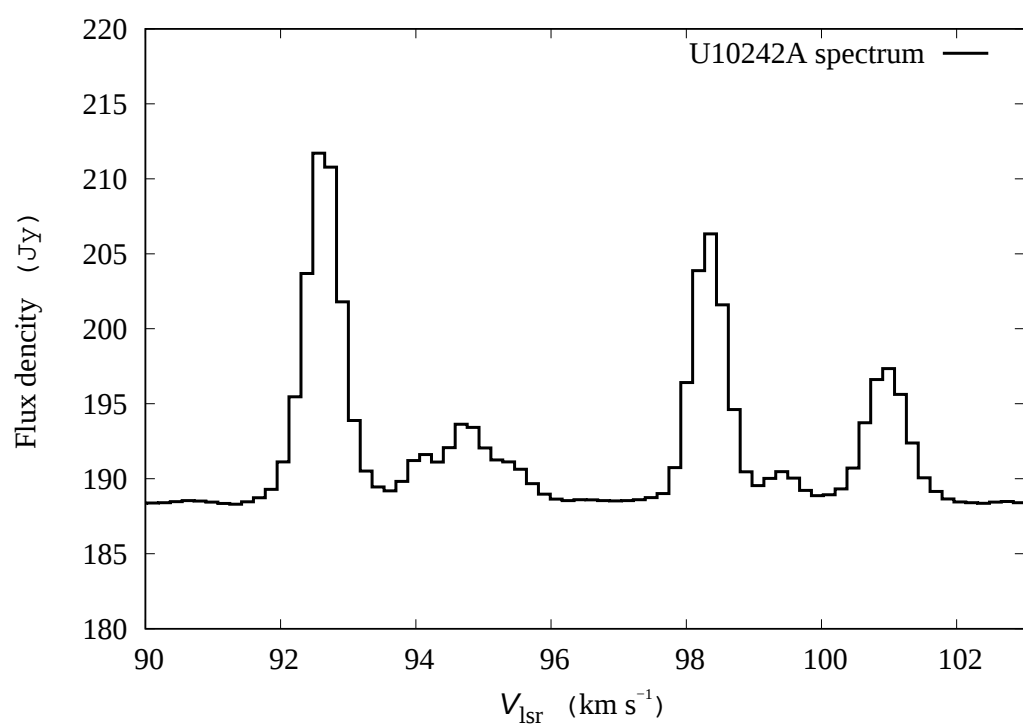


図 6.2 1 エボック目スペクトル図（日立局トータルパワー）

表 6.1 エポック 1

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
101.440	2.46	177.41	43.8	245.302	0.134	422.479	0.205
101.264	4.26	204.40	20.8	245.342	0.095	423.309	0.135
101.088	3.78	186.85	20.2	245.452	0.103	423.938	0.166
98.979	1.52	151.84	10.0	283.667	0.214	415.808	0.221
98.803	5.95	206.80	28.8	283.960	0.073	415.303	0.077
98.451	16.99	607.83	27.9	283.994	0.076	415.551	0.051
98.276	12.86	470.24	27.3	284.060	0.078	415.566	0.084
98.100	6.56	275.07	23.8	284.043	0.088	415.629	0.096
97.924	1.90	154.35	12.3	284.215	0.164	415.629	0.188
95.287	1.23	157.37	7.8	49.979	0.295	24.051	0.271
95.112	2.44	195.20	12.5	49.657	0.167	23.406	0.172
94.936	3.85	230.14	16.7	49.798	0.127	23.045	0.131
94.760	3.63	218.06	16.7	49.680	0.125	22.743	0.129
94.584	2.34	149.88	15.6	49.686	0.136	22.238	0.140
94.408	1.48	140.37	10.6	43.317	0.183	17.929	0.201
94.233	2.99	169.27	17.7	43.630	0.115	18.282	0.122
94.057	2.31	148.18	15.6	43.608	0.128	18.104	0.138
93.881	1.18	138.75	8.5	43.790	0.220	17.748	0.262
93.354	1.16	145.28	8.0	-5.185	0.234	10.904	0.319
93.178	2.30	193.91	11.9	-4.471	0.188	10.228	0.220
93.178	2.08	193.91	10.7	-0.751	0.232	2.996	0.286
93.002	7.41	338.38	21.9	-0.352	0.094	2.113	0.140
92.826	14.4	608.18	23.7	-0.175	0.084	0.964	0.126
92.651	15.9	683.92	23.3	-0.029	0.089	-0.056	0.113
92.475	9.87	434.35	22.7	-0.076	0.088	-0.403	0.108
92.299	2.84	158.00	18.0	-0.167	0.115	-4.428	0.138
92.299	2.07	158.0	13.1	6.527	0.154	5.154	0.160
92.123	1.39	144.1	9.7	6.579	0.208	4.291	0.225

6.2 エポック 2

2 エポック目のリファレンスメーザーは 92.667 km/s 成分とした。検出できたメーザースポットは 53 個である。詳細は表 6.2, 表 6.3 に記す。それらをプロットしたものが図 6.3 である。日立局のトータルパワースペクトルを図 6.4 に示した。

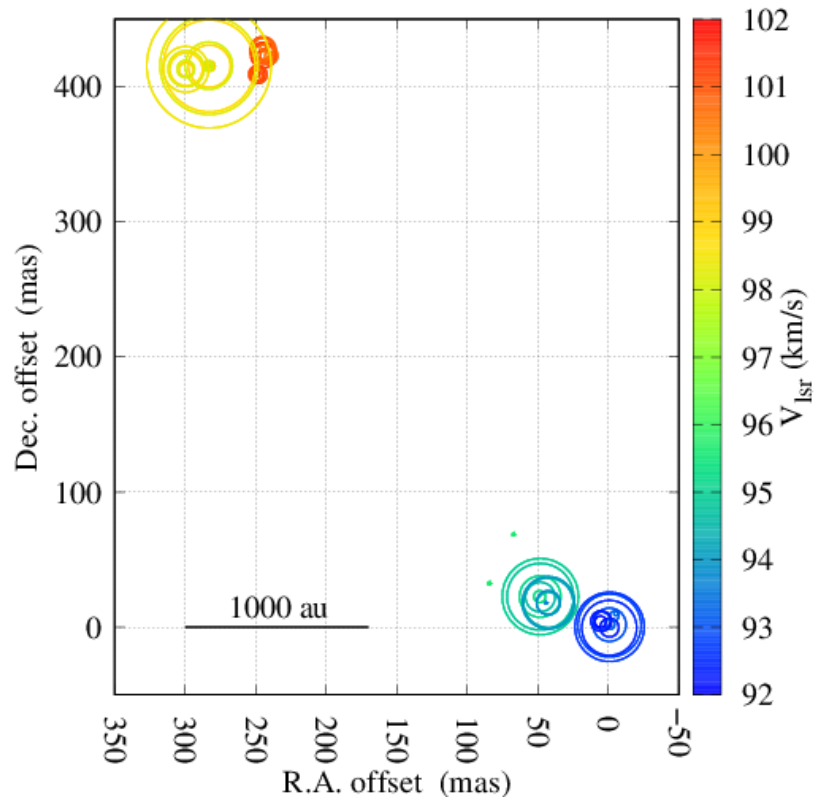


図 6.3 2 エポック目メーザースポット図

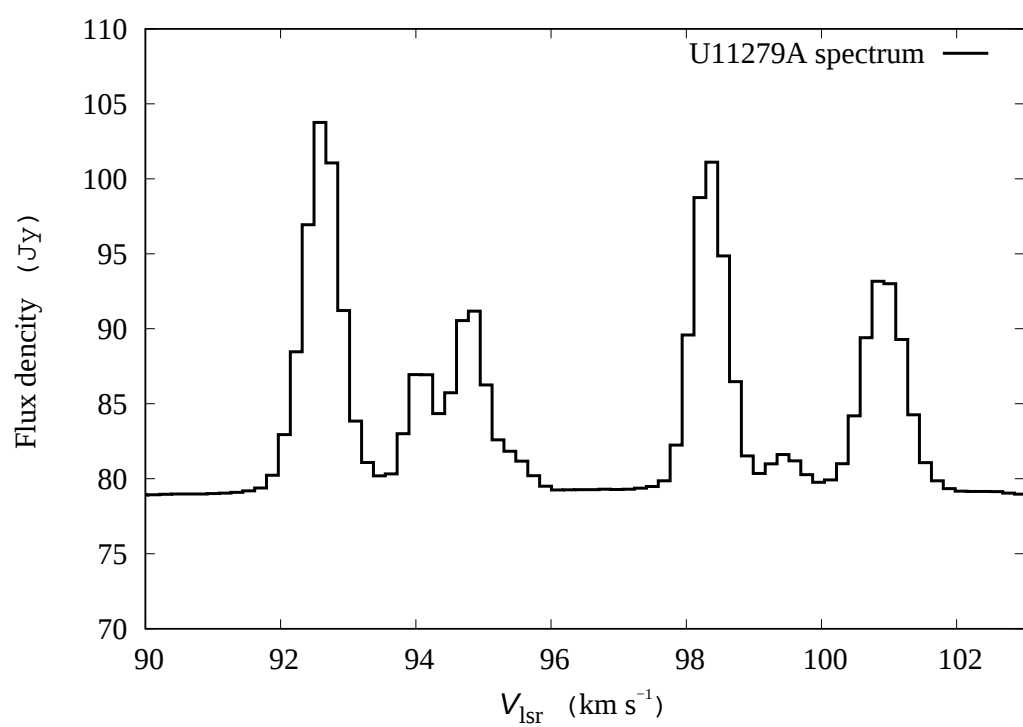


図 6.4 2 エポック目スペクトル図 (日立局トータルパワー)

表 6.2 エポック 2 その 1

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
101.456	0.84	58.39	14.4	249.476	0.191	409.841	0.225
101.280	1.77	84.71	20.8	248.841	0.123	409.514	0.177
101.104	2.16	97.51	22.2	248.482	0.095	409.288	0.091
101.456	1.33	58.39	22.8	244.541	0.109	423.625	0.105
101.280	2.99	84.71	35.3	244.489	0.069	423.645	0.079
101.104	2.40	97.51	24.6	243.786	0.115	424.623	0.159
100.928	3.06	120.54	25.4	244.944	0.094	427.573	0.098
100.928	1.40	120.54	11.6	249.193	0.183	409.207	0.205
100.753	2.47	102.49	24.1	245.067	0.100	428.284	0.094
100.577	0.78	57.42	13.6	244.739	0.196	428.724	0.182
100.753	2.03	102.49	19.8	240.483	0.145	423.168	0.139
100.577	0.98	57.42	17.1	240.716	0.151	423.116	0.165
100.401	0.19	37.49	5.1	241.143	0.607	422.512	0.923
98.819	1.69	156.89	10.8	299.364	0.192	412.741	0.195
98.643	3.84	334.32	11.5	299.318	0.167	413.153	0.176
98.468	5.40	458.75	11.8	299.575	0.173	413.080	0.181
98.292	4.29	364.58	11.8	299.352	0.160	413.420	0.169
98.116	2.06	184.19	11.2	299.498	0.188	413.387	0.192
99.171	0.45	37.67	12.0	282.907	0.187	415.466	0.182
98.995	1.25	57.33	21.7	282.493	0.108	415.439	0.106
98.819	4.99	156.89	31.8	282.811	0.071	415.438	0.071
98.643	10.86	334.32	32.5	282.882	0.067	415.646	0.071
98.468	14.65	458.75	31.9	283.105	0.069	415.667	0.072
98.292	11.56	364.58	31.7	283.033	0.068	415.872	0.075
98.116	5.60	184.19	30.4	283.277	0.073	415.751	0.076
97.940	1.19	63.08	18.8	283.712	0.121	415.452	0.112
97.764	0.39	38.30	10.3	283.763	0.217	415.265	0.191

表 6.3 エポック 2 その 2

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
95.831	0.29	35.30	8.4	84.390	0.283	32.506	0.241
95.655	0.33	44.50	7.3	84.324	0.346	32.362	0.280
95.831	0.25	35.30	7.1	67.027	0.324	68.448	0.309
95.655	0.30	44.50	6.8	67.336	0.392	68.620	0.353
95.304	1.38	67.47	20.4	48.733	0.110	22.740	0.103
95.128	4.87	144.43	33.7	48.291	0.066	22.780	0.064
94.952	9.00	252.56	35.6	48.207	0.061	22.689	0.062
94.776	7.85	229.29	34.2	48.156	0.065	22.601	0.065
94.600	3.48	122.54	28.4	48.207	0.082	22.405	0.078
94.425	2.65	98.28	27.0	42.600	0.086	17.605	0.081
94.249	5.82	169.25	34.4	42.440	0.065	17.202	0.063
94.070	6.20	176.60	35.1	42.501	0.063	18.166	0.062
93.897	2.79	87.62	31.8	42.529	0.071	18.217	0.067
93.721	0.24	36.16	6.6	44.240	0.353	17.870	0.302
93.370	0.53	42.27	12.6	-5.464	0.194	10.274	0.212
93.194	1.08	66.67	16.2	-4.290	0.156	8.628	0.209
93.018	3.94	136.48	28.9	-0.809	0.080	1.915	0.091
92.842	7.48	253.60	29.5	-0.862	0.073	1.298	0.094
92.667	8.15	282.51	28.9	-0.883	0.075	0.256	0.091
92.491	6.48	204.54	31.7	-0.664	0.072	-0.360	0.070
92.315	2.19	95.57	22.9	-0.796	0.108	-0.206	0.099
93.370	0.21	42.27	5.0	-1.531	0.456	0.919	0.437
93.194	1.14	66.67	17.1	-1.172	0.134	2.139	0.164
92.491	2.02	204.54	9.9	4.690	0.270	4.976	0.340
92.315	2.46	95.57	25.8	5.109	0.096	4.596	0.088
92.139	1.31	60.17	21.8	5.532	0.110	4.207	0.104

6.3 エポック 3

3 エポック目のリファレンスメーザーは 92.720 km/s 成分とした。検出できたメーザースポットは 60 個である。詳細は表 6.4, 6.5 に記す。図 6.5 がプロットしたものである。日立局のトータルパワースペクトルを図 6.6 に示した。

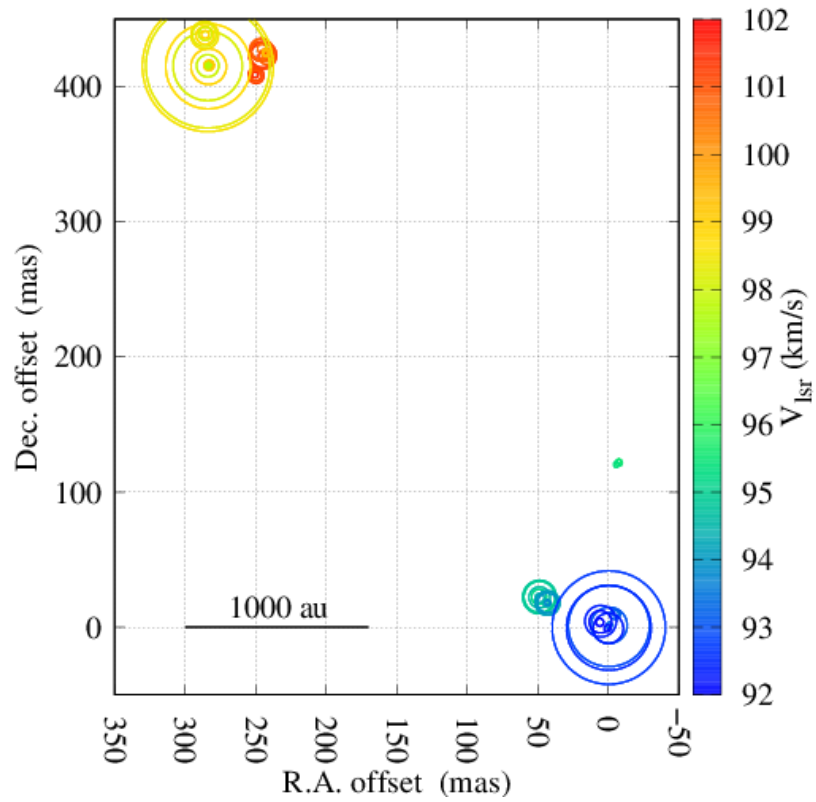


図 6.5 3 エポック目メーザースポット図

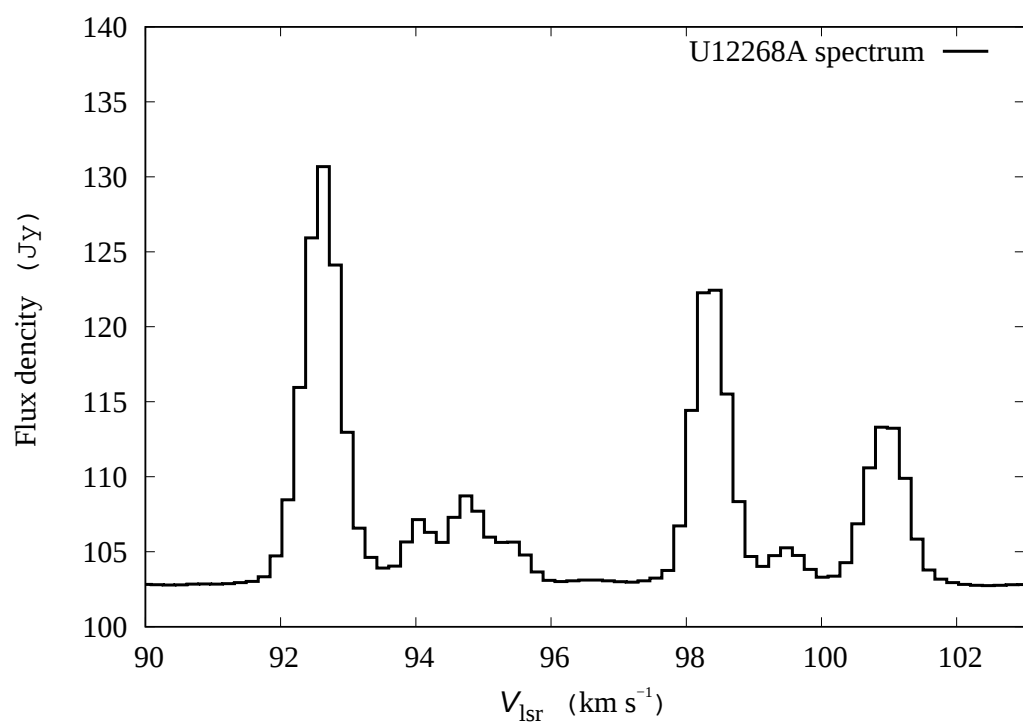


図 6.6 3 エポック目スペクトル図（日立局トータルパワー）

表 6.4 エポック 3 その 1

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
101.509	0.96	47.340	20.2	245.210	0.133	423.131	0.110
101.333	2.81	63.480	44.3	245.145	0.054	423.286	0.050
101.157	3.27	68.400	47.8	245.056	0.050	423.402	0.050
101.509	0.67	47.340	14.1	250.344	0.182	408.973	0.159
101.333	1.40	63.480	22.1	249.861	0.103	408.608	0.103
101.157	1.85	68.400	27.0	249.742	0.082	408.490	0.079
100.982	1.25	62.770	19.9	249.864	0.105	408.552	0.099
100.982	2.70	62.770	43.0	246.053	0.053	427.437	0.053
100.806	2.46	60.130	40.9	245.992	0.058	428.049	0.052
100.630	1.05	49.510	21.1	245.665	0.120	428.360	0.096
100.806	1.88	60.130	31.3	242.076	0.082	422.518	0.077
100.630	1.23	49.510	24.8	241.932	0.104	422.576	0.098
100.454	0.39	44.590	8.7	242.144	0.288	422.486	0.303
99.927	0.57	49.570	11.5	282.448	0.214	415.940	0.190
99.751	0.92	49.560	18.5	282.614	1.128	416.176	0.113
99.575	0.92	49.600	18.5	282.690	0.122	416.670	0.111
99.400	0.66	47.140	13.9	283.016	0.163	416.580	0.152
99.224	0.41	44.510	9.1	283.153	0.240	416.384	0.218
98.872	0.88	78.940	11.1	285.787	0.201	438.889	0.210
98.697	2.12	172.190	12.3	285.984	0.179	438.256	0.221
98.521	3.27	258.920	12.6	286.154	0.176	438.374	0.204
98.345	2.83	237.300	11.9	286.435	0.175	438.869	0.225
98.169	1.57	140.280	11.2	285.762	0.208	439.447	0.204
99.048	1.19	48.340	24.5	283.095	0.093	415.920	0.083
98.872	4.19	48.940	53.1	283.347	0.044	415.139	0.040
98.697	10.03	172.190	58.2	283.737	0.040	415.360	0.036
98.521	15.45	258.920	59.7	283.892	0.039	415.497	0.034
98.345	14.64	237.300	61.7	283.899	0.037	415.602	0.034
98.169	8.14	140.280	58.1	284.011	0.039	415.615	0.036
97.993	2.59	64.680	40.1	284.007	0.055	415.710	0.051
97.818	0.64	46.610	13.8	283.854	0.164	415.730	0.155
97.642	0.32	44.550	7.1	283.560	0.309	415.954	0.321

表 6.5 エポック 3 その 2

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
99.751	0.53	49.560	10.7	242.922	0.193	425.207	0.222
99.575	0.91	49.600	18.4	242.639	0.116	425.292	0.113
99.400	0.78	47.140	16.6	242.477	0.132	425.338	0.124
95.708	0.49	49.690	9.8	-7.554	0.302	122.988	0.275
95.533	0.72	51.470	14.0	-7.571	0.251	121.796	0.181
95.357	0.65	54.120	11.9	-5.730	0.283	120.516	0.248
95.181	1.76	53.620	32.8	49.090	0.069	22.656	0.063
95.005	3.67	71.850	51.1	48.815	0.044	22.522	0.040
94.829	3.95	74.800	52.8	48.745	0.043	22.352	0.039
94.645	2.46	60.440	40.7	48.708	0.055	22.118	0.051
94.478	1.05	49.520	21.1	48.611	0.107	21.759	0.096
94.478	0.89	49.520	18.0	43.443	0.120	17.829	0.108
94.302	2.85	62.290	45.7	43.145	0.049	17.975	0.044
94.126	3.90	74.540	52.3	43.051	0.044	18.040	0.040
93.951	2.31	59.580	38.8	43.156	0.059	18.063	0.054
93.775	0.58	45.670	12.7	42.978	0.183	18.062	0.164
93.423	0.61	46.810	13.0	-5.426	0.224	10.282	0.212
93.247	1.18	52.030	22.6	-4.822	0.110	9.691	0.107
93.247	0.68	52.030	13.0	-0.642	0.181	1.438	0.188
93.072	4.28	89.650	47.8	-0.506	0.0486	1.462	0.050
92.896	9.58	167.440	57.2	-0.472	0.038	0.947	0.047
92.720	13.35	202.310	66.0	-0.360	0.035	-0.175	0.036
92.544	10.02	174.350	57.4	-0.281	0.039	-0.438	0.038
92.368	3.58	88.650	40.4	0.026	0.053	-0.739	0.052
92.193	0.80	59.470	13.4	0.591	0.157	-0.683	0.141
92.368	3.70	88.650	41.7	5.354	0.058	4.496	0.059
92.193	2.61	59.470	43.9	5.600	0.053	4.093	0.051
92.017	0.90	46.850	19.1	6.084	0.119	3.692	0.117

6.4 エポック 4

リファレンスメーザーは 92.700km/s 成分とした。ただし、4 エポック目は他のエポックと比べてデータの質が悪かった可能性がある。比較のため、1 エポック目と 4 エポック目の合成ビームマップを図 6.7, 6.8 に示した。 $(\Delta R.A., \Delta Dec.) = (0, 0)$ mas がビームの中心であり、1 エポック目は主に南北方向に、4 エポック目は南北方向と北東から南西方向へサイドローブが確認できる。2, 3 エポックも図 6.7 と同様にサイドローブの影響は小さかったため、4 エポック目のみサイドローブが高かった。4 エポックを通して解析の手法は変わらないため、観測時のデータの質が悪かった可能性があると考えた。観測時の天候が関係しているのではないかと考え、観測日の国内にあるアンテナ周辺の天候・風速を確認したが、他の観測日と差異は見られなかった。サイドローブの影響が大きいと、メーザースポットの真の位置を誤認する可能性が高くなることから、4 エポック目の結果は他のエポックよりも注意深く扱う必要がある。

検出できたメーザースポットは 47 個である。詳細は表 6.6, 6.7 に記す。図 6.9 がプロットしたものである。日立局のトータルパワースペクトルを図 6.10 に示した。

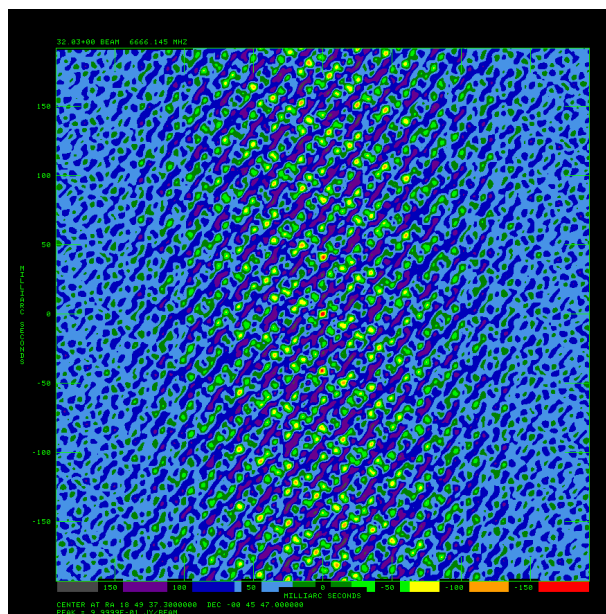


図 6.7 1 エポック目合成ビームマップ

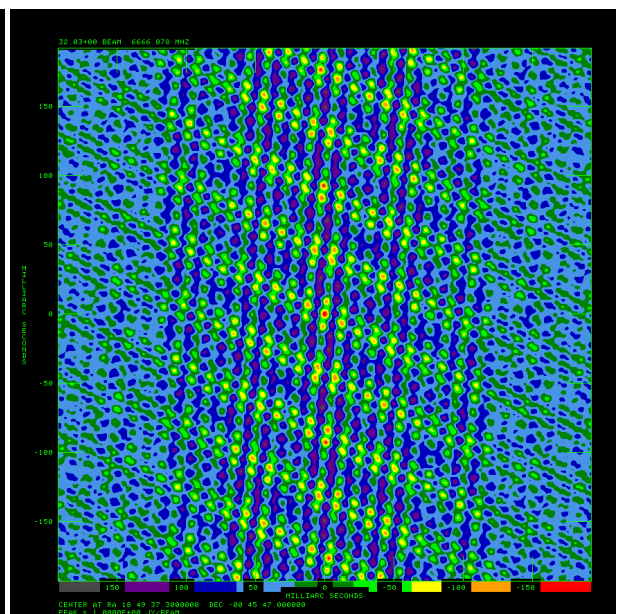


図 6.8 4 エポック目合成ビームマップ

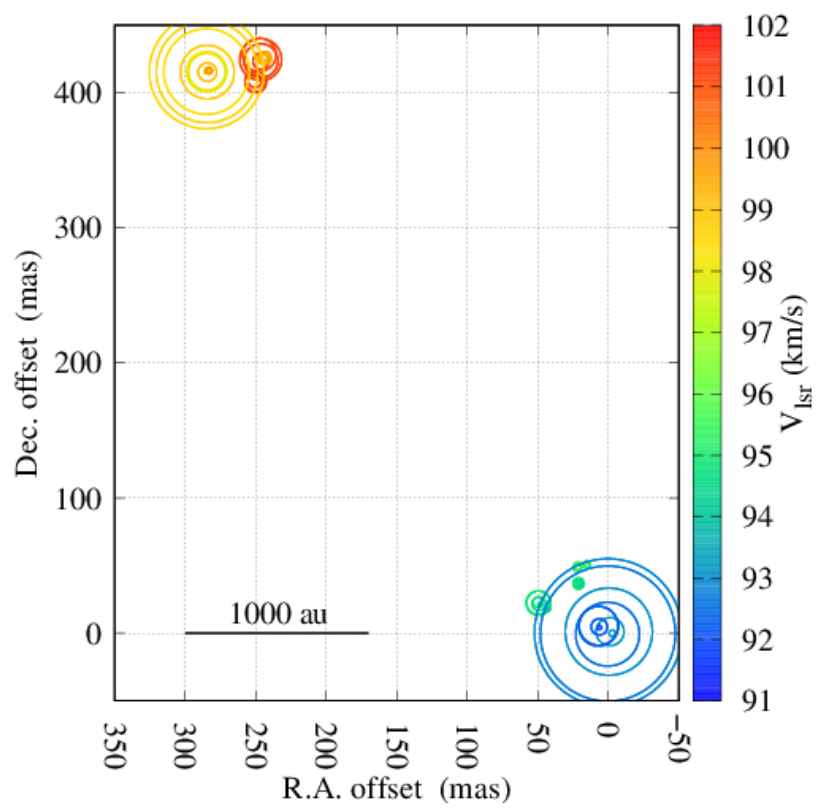


図 6.9 メーザースポット図

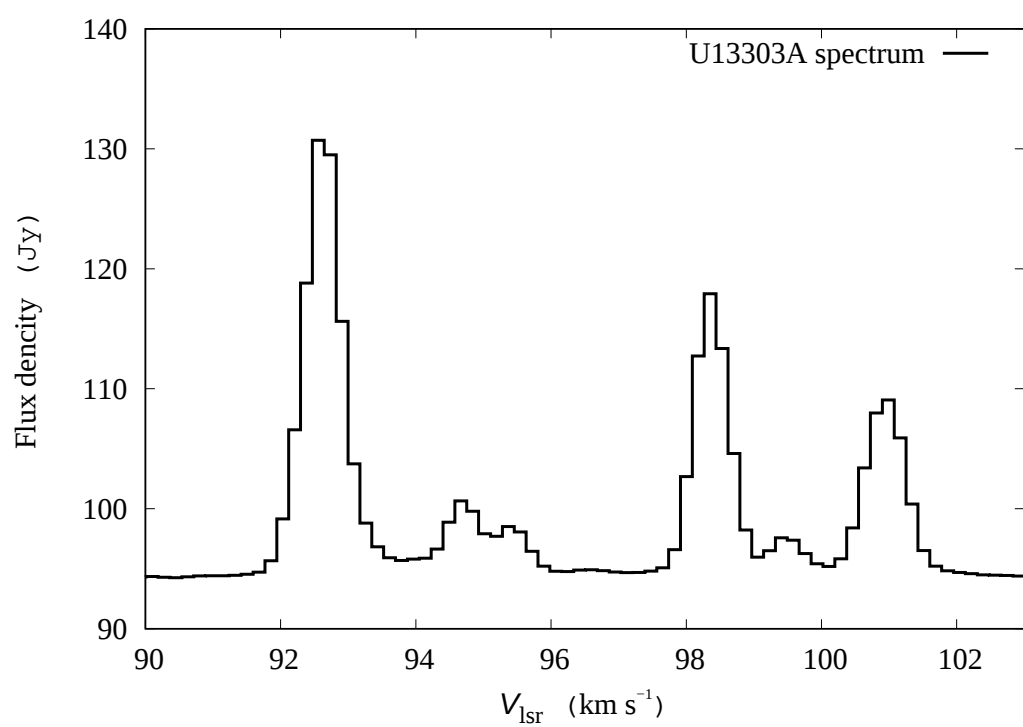


図 6.10 4 エポック目スペクトル図（日立局トータルパワー）

表 6.6 エポック 4

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
101.489	1.88	146.710	12.8	246.285	0.189	423.600	0.210
101.313	4.03	247.500	16.3	246.297	0.148	423.895	0.183
101.137	4.95	223.810	22.1	246.480	0.106	424.777	0.152
101.489	1.56	146.710	10.6	250.549	0.222	408.909	0.277
101.313	2.43	247.500	9.8	250.207	0.227	408.572	0.280
101.137	2.55	224.810	11.3	250.106	0.208	408.186	0.246
99.907	0.57	71.590	7.9	282.983	0.343	416.321	0.333
99.731	0.80	80.480	9.9	283.221	0.232	416.629	0.257
99.204	0.57	76.080	7.4	284.473	0.307	415.943	0.396
99.028	2.17	103.820	20.9	284.231	0.113	415.412	0.132
98.852	6.33	258.480	24.5	284.309	0.099	415.462	0.110
98.677	11.97	466.280	25.7	284.452	0.095	415.680	0.105
98.501	13.13	526.210	25.7	284.784	0.099	415.949	0.105
98.325	10.12	401.810	25.2	284.850	0.099	415.947	0.108
98.149	4.71	203.840	23.1	284.666	0.108	415.842	0.117
97.973	4.33	87.970	49.2	284.607	0.160	415.795	0.175
97.798	0.44	59.460	7.4	285.338	0.295	415.934	0.293
99.907	0.80	71.590	11.2	243.897	0.205	426.416	0.307
99.731	1.45	80.480	18.0	243.721	0.134	426.117	0.166
99.555	1.56	89.470	17.4	243.618	0.142	425.775	0.162
99.380	0.75	73.570	10.2	243.602	0.222	426.140	0.281
95.688	0.85	99.900	8.5	21.248	0.290	49.599	0.317
95.512	1.03	95.060	10.8	21.627	0.257	49.632	0.262
95.337	0.84	75.490	11.1	22.088	0.257	48.621	0.247

表 6.7 エポック 4 その 2

視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
95.512	0.84	95.060	8.8	14.949	0.320	51.349	0.285
95.337	0.57	75.490	7.6	15.416	0.344	50.563	0.386
95.161	1.15	90.300	12.7	49.989	0.193	23.008	0.224
94.985	2.76	143.550	19.2	49.625	0.131	22.646	0.147
94.809	2.90	158.040	18.4	49.485	0.133	22.399	0.160
94.634	1.57	102.270	15.4	49.205	0.165	21.952	0.189
94.458	0.52	79.210	6.6	48.701	0.363	20.987	0.482
94.985	1.03	143.550	7.2	21.241	0.330	37.076	0.378
94.809	1.33	157.040	8.4	21.140	0.287	36.847	0.349
94.634	0.74	102.270	7.3	20.665	0.303	36.893	0.349
95.458	0.40	79.210	5.0	19.866	0.484	37.075	0.561
94.282	0.45	66.470	6.8	43.357	0.354	17.619	0.374
94.106	0.41	68.900	6.0	42.654	0.411	17.791	0.479
93.403	0.77	87.340	8.8	-2.755	0.273	-0.009	0.351
93.227	3.31	156.930	21.1	-1.213	0.115	1.243	0.142
93.052	10.33	347.650	29.7	-0.292	0.080	1.211	0.109
92.876	17.42	538.770	32.3	0.076	0.075	0.511	0.097
92.700	15.95	400.850	39.8	0.365	0.066	-0.173	0.072
92.524	7.52	132.540	56.7	0.536	0.047	-0.589	0.049
92.524	4.58	132.540	34.6	6.951	0.076	5.604	0.086
92.348	4.67	177.680	26.3	6.953	0.097	5.203	0.116
92.173	1.90	103.020	18.5	6.421	0.128	4.812	0.172
91.997	0.48	69.540	6.8	6.400	0.341	4.205	0.506

4 エポック分のデータを並べたものが図 6.11–6.14 である。

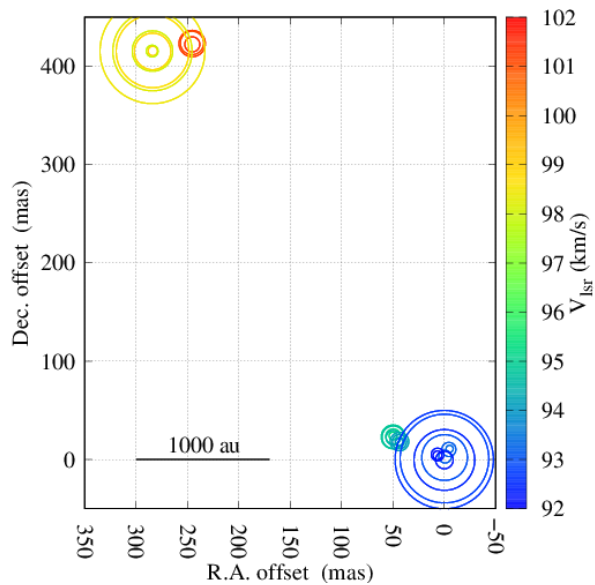


図 6.11 メーザースポット図 (1 エポック目)

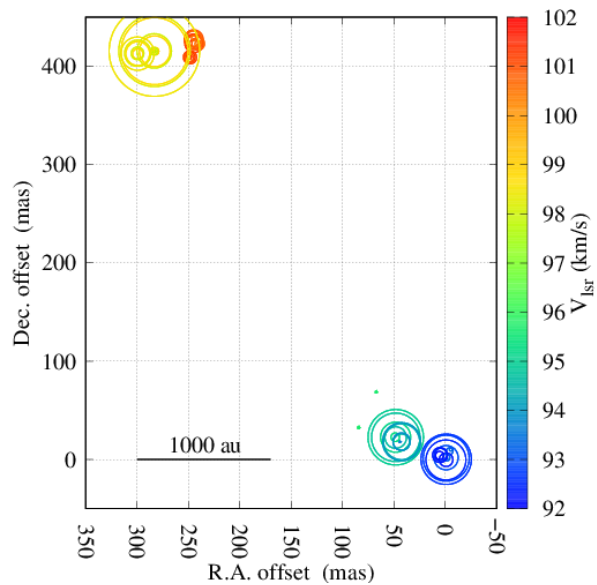


図 6.12 メーザースポット図 (2 エポック目)

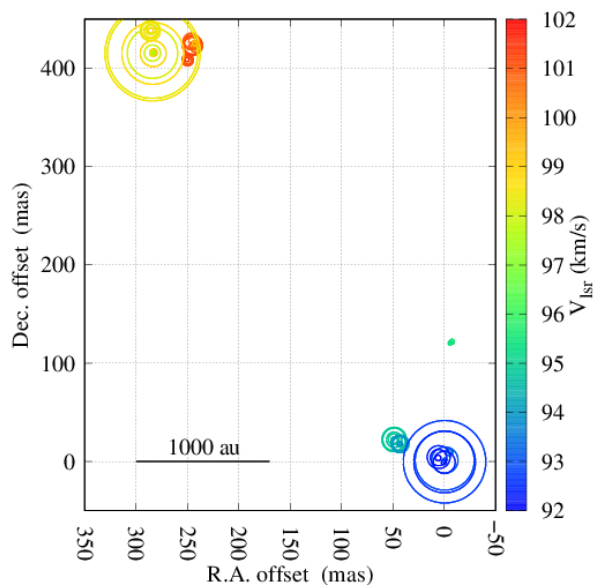


図 6.13 メーザースポット図 (3 エポック目)

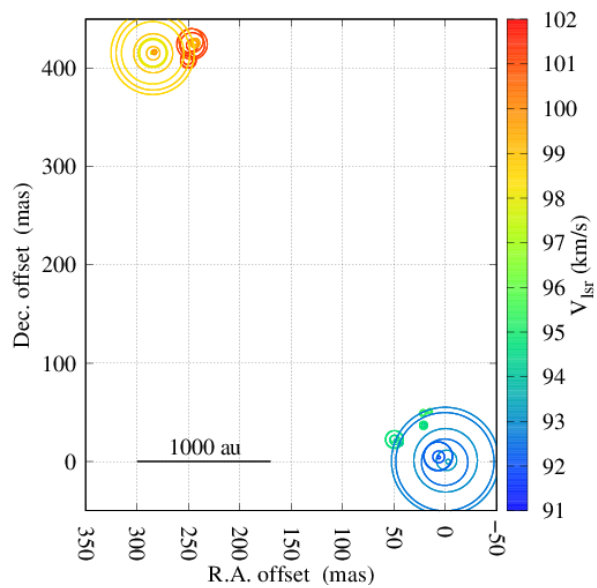


図 6.14 メーザースポット図 (4 エポック目)

6.5 メーザーフィーチャー

§1.2.4 で紹介した Sugiyama et al.(2016) と同様に、本研究でもメーザースポットをまとめた「フィーチャー」を用いて内部固有運動の計測を行う。メーザーフィーチャーとは、数 mas 以下のサイズに収まるメーザースポットの小さなクラスタのことである (Sanna et al.2010a, Moscadelli et al.2011b)。リニアスケールは 10 au 程度のオーダーとなり、このフィーチャーが付随するこのサイズのメーザーのガス雲があることを表している可能性がある。

本研究でも、Sugiyama et al.(2016) と同様に、メーザーフィーチャーとみなす条件は (1) 少なくとも 3 つのメーザースポットを含むこと、(2) 合成ビームサイズの大きさ内にスポットが含まれること、の 2 点を満たすこととした。また、他にスペクトル上における視線速度方向の分離情報を参考にフィーチャーの区別を行った。

具体例としては 3 エポック目 97.642 km/s – 99.927 km/s の成分を示す。図 6.15 の通り、合成ビームサイズ内に複数のスポットが収まっているが、スペクトルを見ると図 6.16 の通り、視線速度の範囲は成分が 2 つに分けられている。よって、これらは視線速度で 2 つのフィーチャーに区別した。

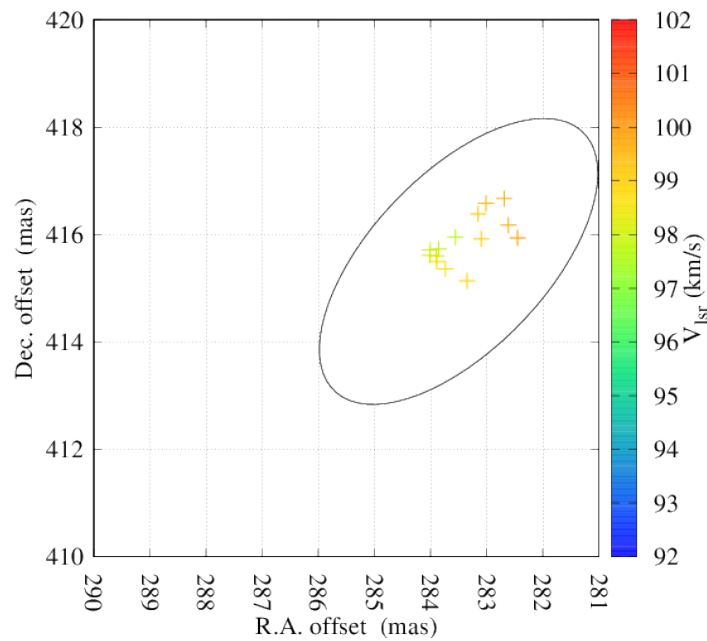


図 6.15 97.642–99.927 km/s のメーザースポット

図中の楕円は合成ビームサイズの大きさ

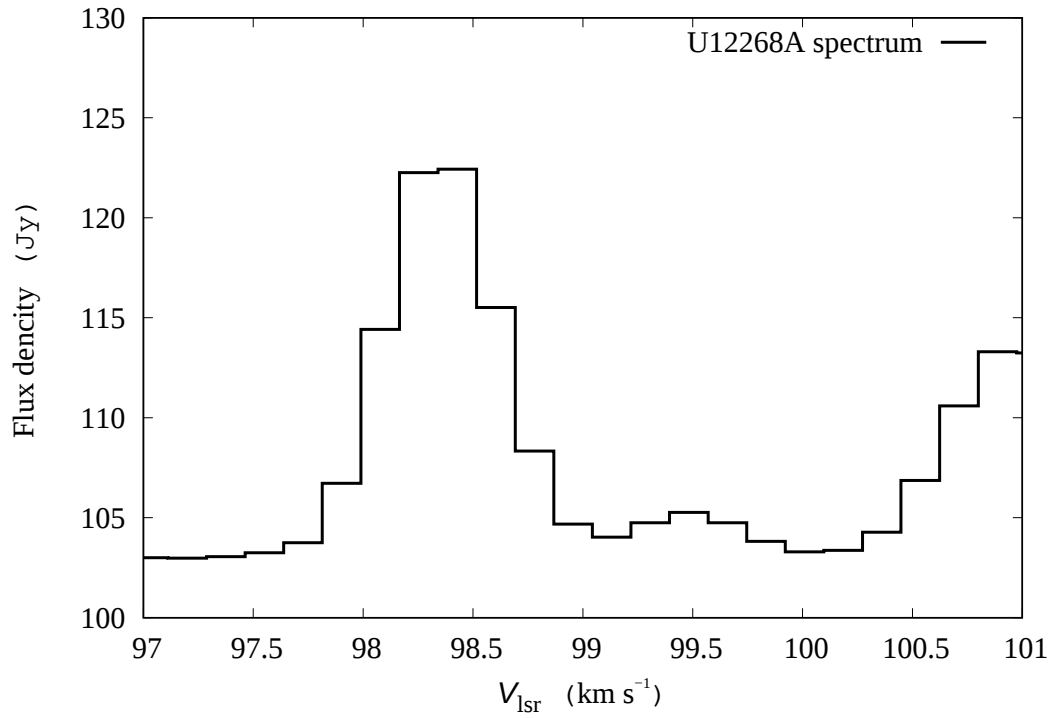


図 6.16 97.642 - 99.927 km/s スペクトル図

これらの区別の結果、1 エポック目は 5 個に、2 エポック目は 10 個に、3 エポック目は 13 個に、4 エポック目は 9 個に分類された。それぞれの座標は表 6.8–6.11 の通りであり、図 6.17–6.20 をスポットの場合と同様にプロットした。フィーチャーの番号は 4 エポックで共通として、視線速度の高いほうから振った。座標と座標のエラー、視線速度の値についてはフィーチャーに含まれるスポットの値をそれぞれ単純に足しあげ平均を取った値、強度と強度のエラー、RMS についてはスポットの値に 1 チャンネルあたりの視線速度 0.1757 km/s をかけたものを足しあげた値である。

表 6.8 エポック 1 メーザーフィーチャー

No.	視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
1	101.264	1.84	99.959	18.4	245.365	0.111	423.242	0.169
8	98.451	10.12	377.683	26.8	283.985	0.106	415.579	0.114
13	94.936	2.37	167.281	14.2	49.760	0.170	23.097	0.169
15	94.145	1.40	104.865	13.4	43.586	0.162	18.016	0.181
16	92.738	9.24	424.813	21.7	-0.258	0.117	0.864	0.152

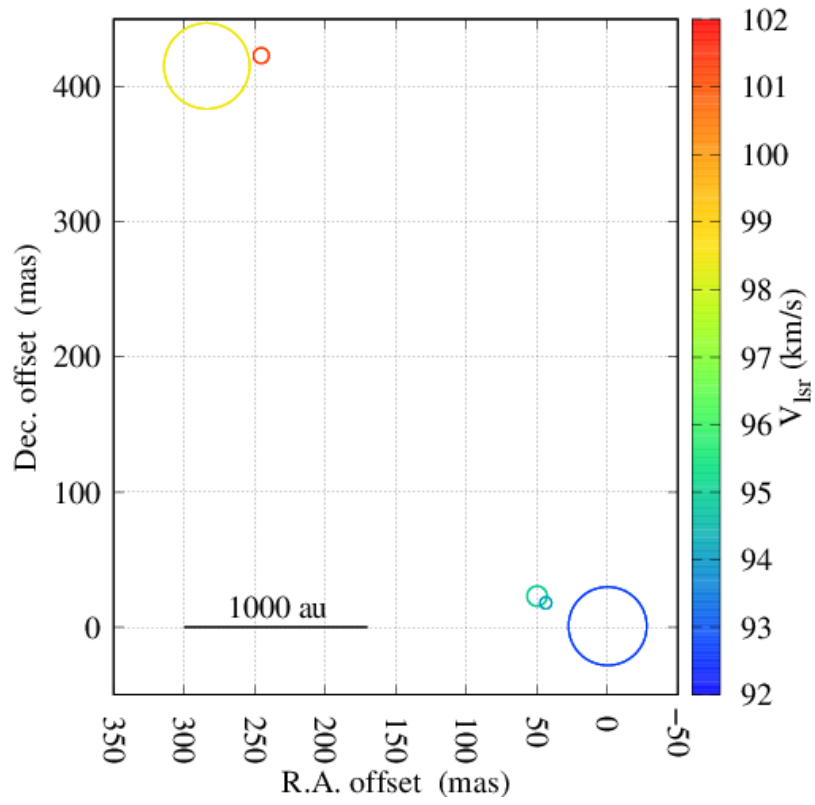


図 6.17 エポック 1 マーザーフィーチャー図

表 6.9 エポック 2 マーザーフィーチャー

No.	視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
1	101.280	1.18	42.294	27.9	244.282	0.098	423.964	0.114
2	101.192	1.08	63.483	17.1	248.998	0.148	409.463	0.175
3	100.753	1.11	49.298	22.5	244.917	0.130	428.194	0.125
4	100.577	0.56	34.699	16.2	240.781	0.301	422.932	0.409
8	98.468	8.95	297.966	30.0	283.109	0.109	415.555	0.106
9	98.468	3.04	263.447	11.5	299.421	0.176	413.156	0.183
13	94.952	4.68	143.301	32.6	48.310	0.076	22.650	0.074
15	94.073	3.11	99.827	31.2	42.862	0.128	18.012	0.115
16	92.843	5.20	190.131	27.4	-0.960	0.143	0.852	0.149
17	92.315	1.02	63.330	16.1	5.110	0.159	4.593	0.177

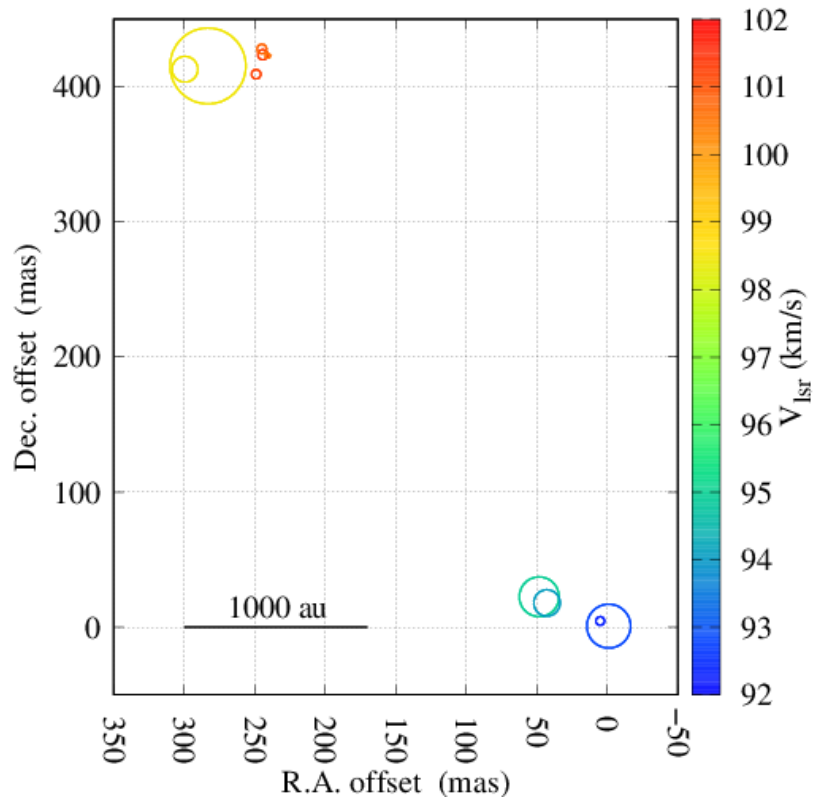


図 6.18 エポック 2 メーザーフィーチャー図

表 6.10 エポック 3 メーザーフィーチャー

No.	視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
1	101.333	1.24	31.503	39.3	245.137	0.079	423.273	0.070
2	101.245	0.91	42.537	21.3	249.953	0.118	408.656	0.110
3	100.806	1.09	30.306	36.0	245.903	0.077	427.949	0.067
4	100.630	0.62	27.111	22.7	242.051	0.158	422.527	0.159
5	99.575	0.61	42.254	14.4	282.784	0.373	416.350	0.157
6	99.575	0.39	25.717	15.2	242.679	0.147	425.279	0.153
7	98.521	1.87	156.028	12.0	286.024	0.188	438.767	0.213
8	98.345	10.05	191.918	52.4	283.711	0.091	415.614	0.088
10	95.533	0.33	27.295	11.9	-6.952	0.279	121.767	0.235
13	94.829	2.27	54.532	41.5	48.794	0.064	22.281	0.058
15	94.126	1.85	51.257	36.1	43.155	0.091	17.998	0.082
16	92.720	7.43	146.583	50.7	-0.235	0.079	0.259	0.079
17	92.193	1.27	34.272	36.9	5.679	0.077	4.094	0.076

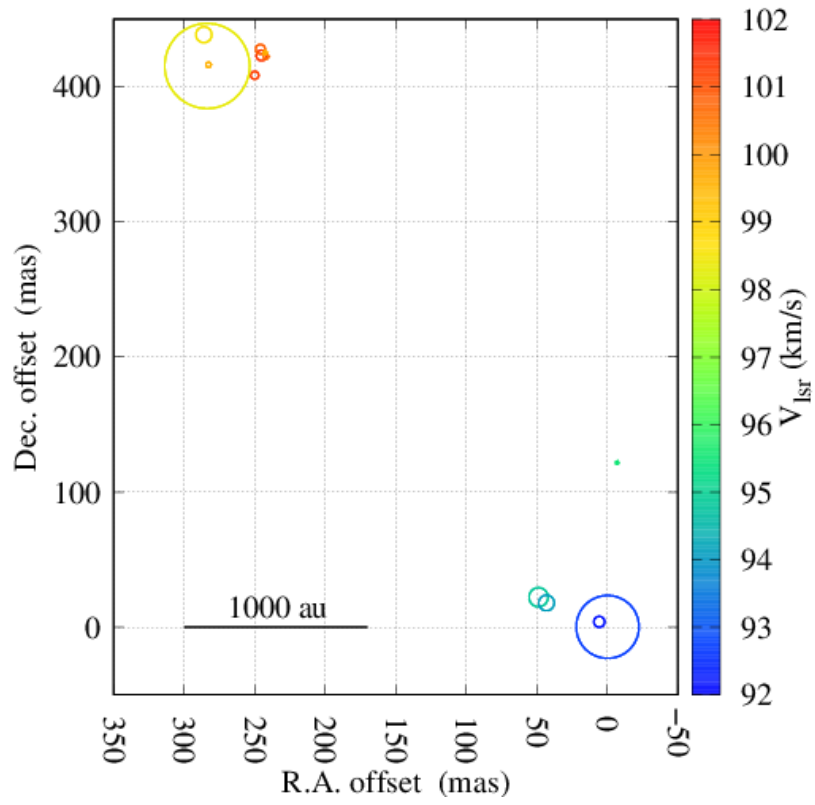


図 6.19 エポック 3 マーザーフィーチャー図

表 6.11 エポック 4 マーザーフィーチャー

No.	視線速度 V_{lsr} (km/s)	強度 (Jy)	RMS(mJy)	S/N	R.A.(mas)	エラー	Dec.(mas)	エラー
1	101.313	1.91	108.636	17.6	246.354	0.148	424.091	0.182
2	101.313	1.15	108.811	10.6	250.287	0.219	408.556	0.268
6	99.643	0.80	55.390	14.5	243.710	0.176	426.112	0.229
8	98.501	9.52	383.895	24.8	284.634	0.153	415.774	0.171
11	95.512	0.48	47.540	10.0	21.654	0.268	49.284	0.275
13	94.809	1.56	100.787	15.5	49.401	0.197	22.198	0.240
14	94.721	0.62	84.914	7.2	20.728	0.351	36.973	0.409
16	92.964	9.72	29.512	33.2	-0.547	0.109	0.366	0.137
17	92.261	2.04	84.863	24.1	6.681	0.161	4.956	0.220

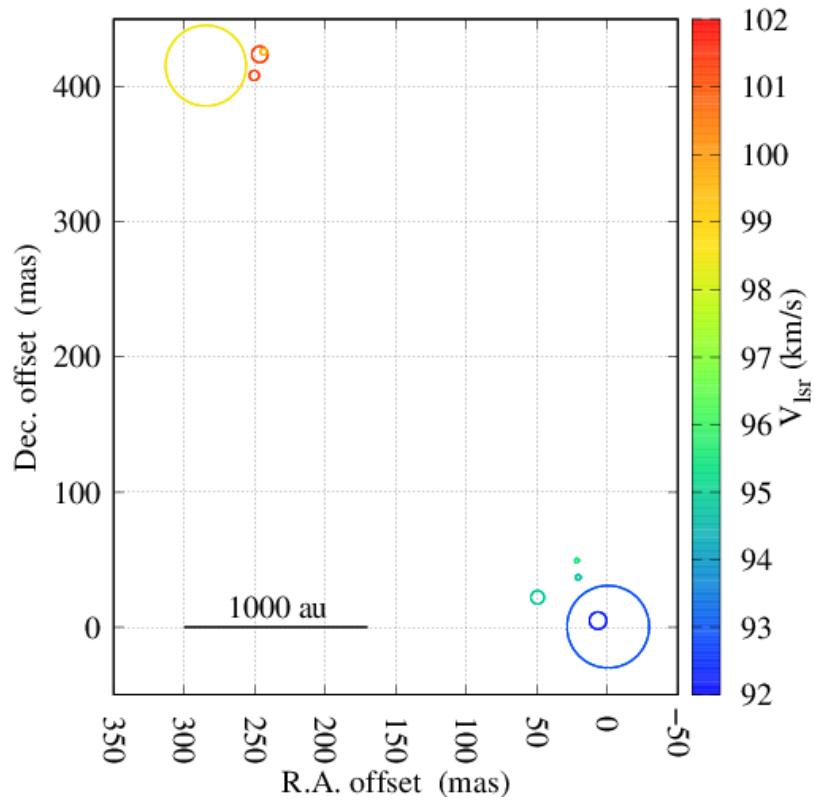


図 6.20 エポック 4 マーザーフィーチャー図

4 エポック分のフィーチャーの図を並べたのが図 6.21–6.24 である。

これらの表より 4 エポックにわたって存在しているフィーチャーが No. 1, 8, 13, 16 の 4 つ、それらを除き 1–3 エポック間にわたり存在しているフィーチャーが No. 15 の 1 つ、2–4 エポック間にわたり存在しているフィーチャーが No. 2, 17 の 2 つであることがわかる。表 6.12 に 3 エポック以上にわたり存在しているフィーチャーについてまとめた。視線速度と座標には 2 エポック目の値を記した。

表 6.12 マーザーフィーチャーまとめ

No.	視線速度 V_{lsr} (km/s)	R.A.(mas)	Dec.(mas)	強度 (Jy)			
				1 エポック目	2 エポック目	3 エポック目	4 エポック目
1	101.280	244.282	423.964	1.84	1.18	1.24	1.91
2	101.192	248.998	409.463		1.08	0.91	1.15
8	98.468	283.711	415.614		8.95	10.05	9.52
13	94.952	48.310	22.650	2.37	4.68	2.27	1.56
15	94.073	42.862	18.012	1.40	3.11	1.85	
16	92.843	-0.960	0.852	9.24	5.20	7.43	9.72
17	92.315	5.110	4.593		1.02	1.27	2.04

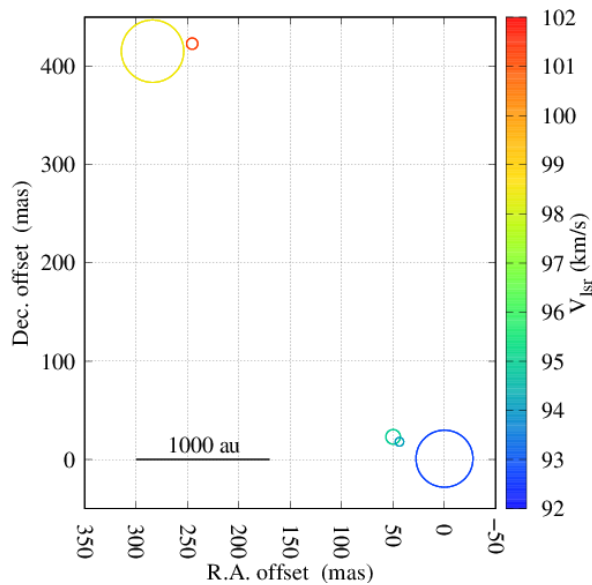


図 6.21 メーザーフィーチャー図 (1 エポック目)

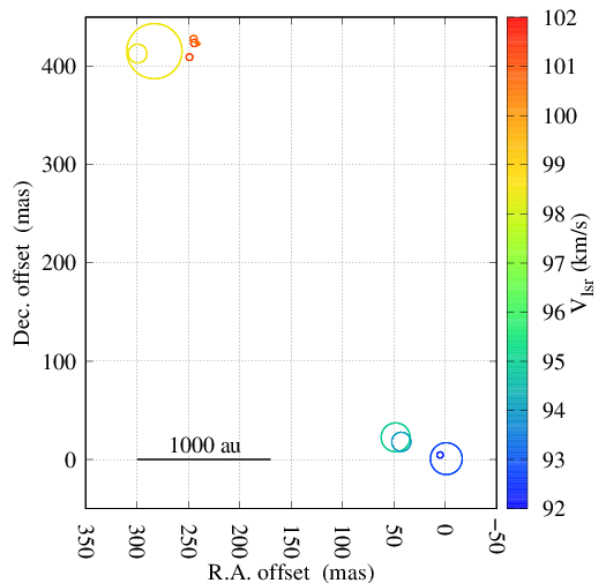


図 6.22 メーザーフィーチャー図 (2 エポック目)

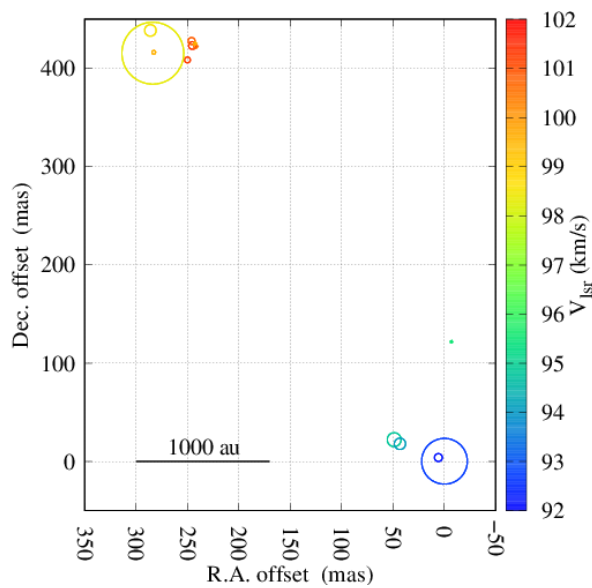


図 6.23 メーザーフィーチャー図 (3 エポック目)

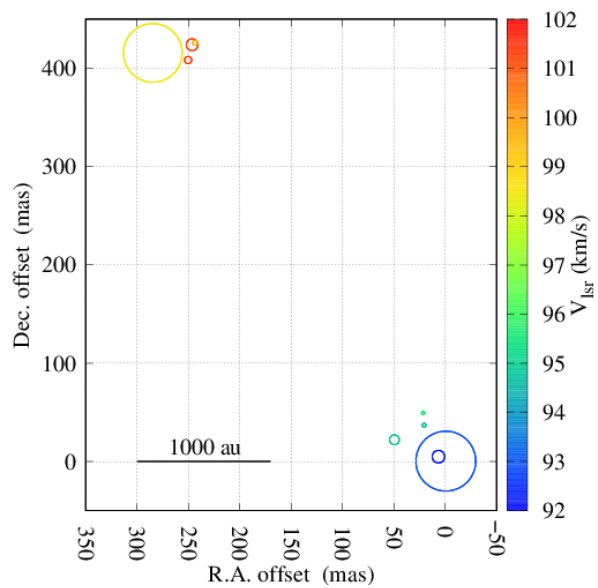


図 6.24 メーザーフィーチャー図 (4 エポック目)

6.6 内部固有運動

3 エポック以上にわたって存在しているフィーチャーについての固有運動の計測を行った。

まず、エポック間での基準の位置を各エポックでのリファレンスメーザー^{*3}としたスポットの位置として定め、フィーチャーの位置を補正した。具体的にはリファレンスメーザーの位置がそれぞれ $(\Delta R.A., \Delta Dec.) = (0, 0)$ mas になるように各エポック各フィーチャーの座標からリファレンスメーザーの座標分だけ差し引いた。その際エラーについては、(1) 位置決定精度^{*4}を考慮して、位置決定精度の長軸半径を R.A., Dec. にそれぞれ射影した値と、フィーチャーのエラーの二乗和平方根を取り、(2) (1) で求めた値とリファレンスメーザーのエラーの和を取る、という計算を行った。

なお、補正後の各フィーチャーのエポック間での差は図 6.25– 図 6.31 となった。図はリファレンスメーザーからの相対位置 (mas) であり、エラーバーを付けて表した。また、カラーは何エポック目かを表している。

固有運動の速度の導出は 2 通りの方法を試みた。(1) 最後のエポックから最初のエポックの座標を引いた移動差を速度 (km/s) へと変換する、(2) それぞれのフィーチャーの座標を縦軸 R.A. (Dec.)、横軸エポックとして直線でフィッティングさせ、その直線の傾きを求め速度 (km/s) へと直す、という方法である。それぞれ R.A., Dec. 方向の速度とそのエラーの値を比較し、エラーの値よりも速度の値のほうが大きい値であれば有意であるとした。

図 6.25– 図 6.31 を見ると、いくつかのフィーチャーで 4 エポック目が他のエポックと比べ大きくずれている。実際にこのように動いている可能性と、4 エポック目のデータの質が悪くこのようにずれてしまった可能性の 2 つが考えられるため、それぞれの方法で 4 エポック目を含めた場合と、含めなかった場合で速度を導出した。

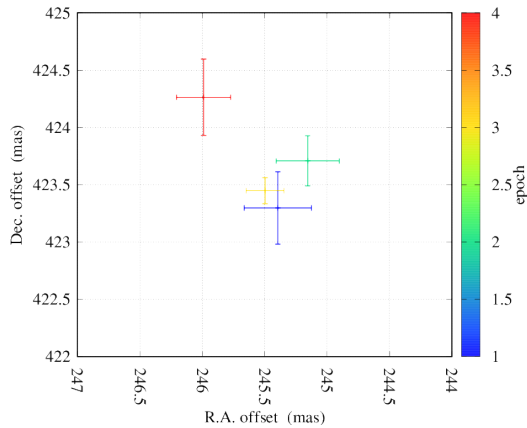


図 6.25 フィーチャー No. 1

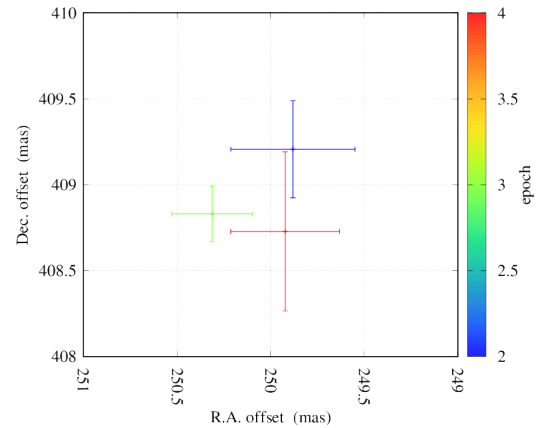


図 6.26 フィーチャー No.2

^{*3} 解析の際、各エポックで最も強度が強い $(\Delta R.A., \Delta Dec.) = (0, 0)$ mas 付近にあるメーザースポットをリファレンスとした。

^{*4} 合成ビームサイズ/SN 比 で表されるスポットの位置精度

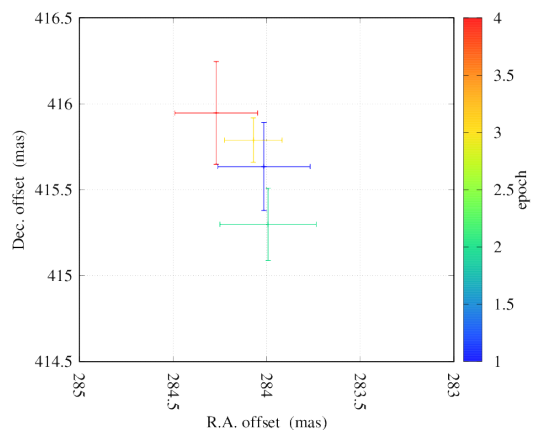


図 6.27 フィーチャー No.8

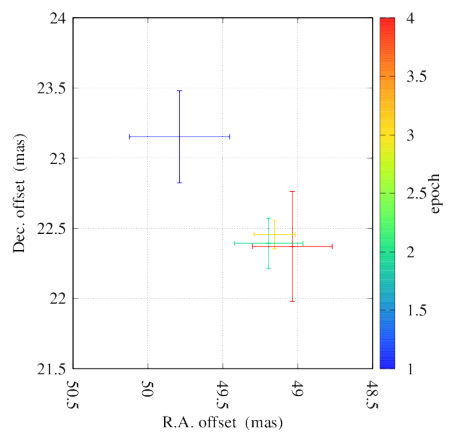


図 6.28 フィーチャー No.13

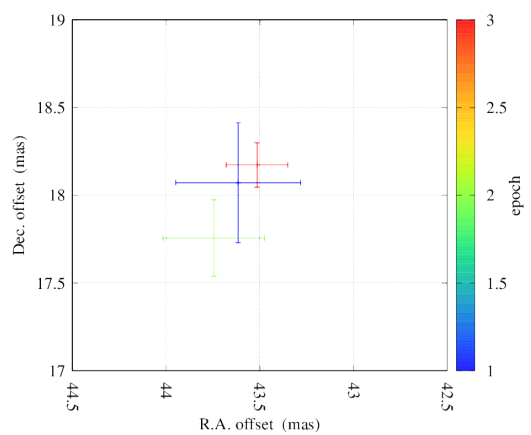


図 6.29 フィーチャー No.15

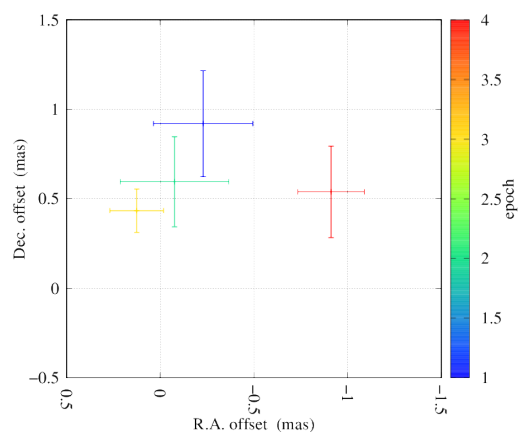


図 6.30 フィーチャー No.16

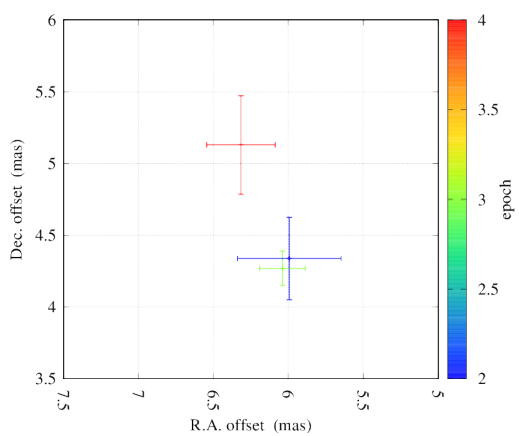


図 6.31 フィーチャー No.17

(1) エポック間での座標の差を求め速度を導出した場合

4 エポック目のフィーチャーの座標から 1 エポック目の座標の差を求め速度を導出した場合、結果は表 6.13 のようになった。ここで、視線速度は 2 エポック目の値を用いている。備考欄に記述がない場合は 1 エポック目と 4 エポック目の座標の差から速度を導出している。

表 6.13 固有運動の速度 (4 エポック目を含む)

No.	視線速度 V_{lsr} [km/s]	速度 R.A. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	速度 Dec. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	備考
1	101.280	4.871	3.988	7.910	5.319	2-4 エポックの差で導出
2	101.192	0.508	7.641	-5.871	9.167	
8	98.468	2.089	3.831	2.555	4.548	
13	94.952	-6.168	4.925	-6.399	5.895	1-3 エポックの差で導出
15	94.073	-1.237	6.115	1.242	5.751	
16	92.843	-5.593	3.622	-3.126	4.518	
17	92.315	3.967	7.055	9.731	7.742	2-4 エポックの差で導出

これらをプロットしたものが図 6.32 である。フィーチャーの位置は 2 エポック目の修正後の位置を用いた。また、太い線はエラーよりも速度の値の大ききのほうが大きかった成分である。

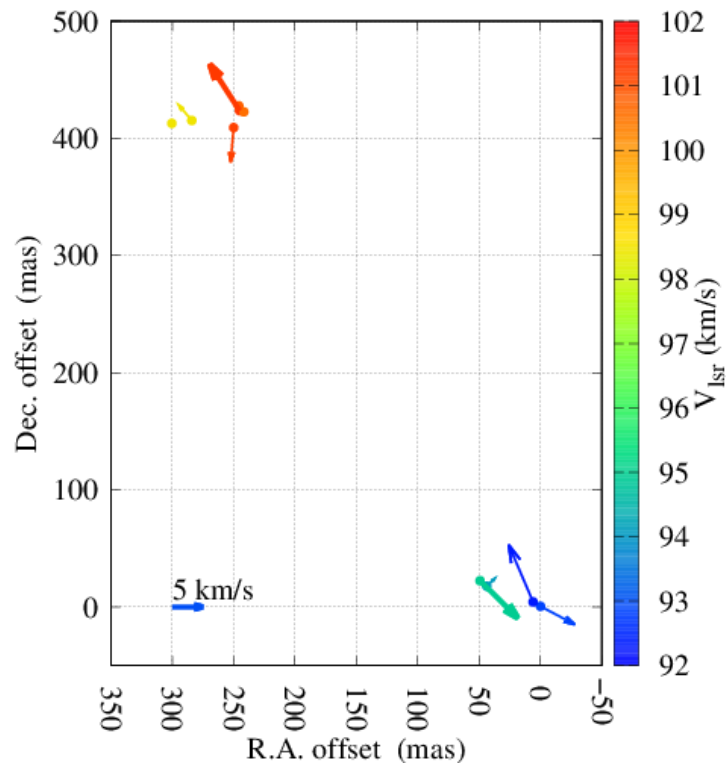


図 6.32 固有運動の速度 (4 エポック目を含む)

4 エポック目を除外して、3 エポック目のフィーチャーの座標から 1 エポック目の座標の差を求め速度を導出した場合、結果は表 6.14 のようになった。

表 6.14 固有運動の速度 (4 エポック目を含まない)

No.	視線速度 V_{lsr} [km/s]	速度 R.A. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	速度 Dec. 方向 [km/s]	エラー [km/s]
1	101.280	1.261	5.176	1.843	5.293
8	98.468	0.699	4.914	1.895	4.738
13	94.952	-7.804	5.805	-5.554	5.290
15	94.073	-1.237	6.115	1.242	5.751
16	92.843	4.355	5.015	-5.977	5.123

図 6.32 と同様にプロットしたものが図 6.33 である。

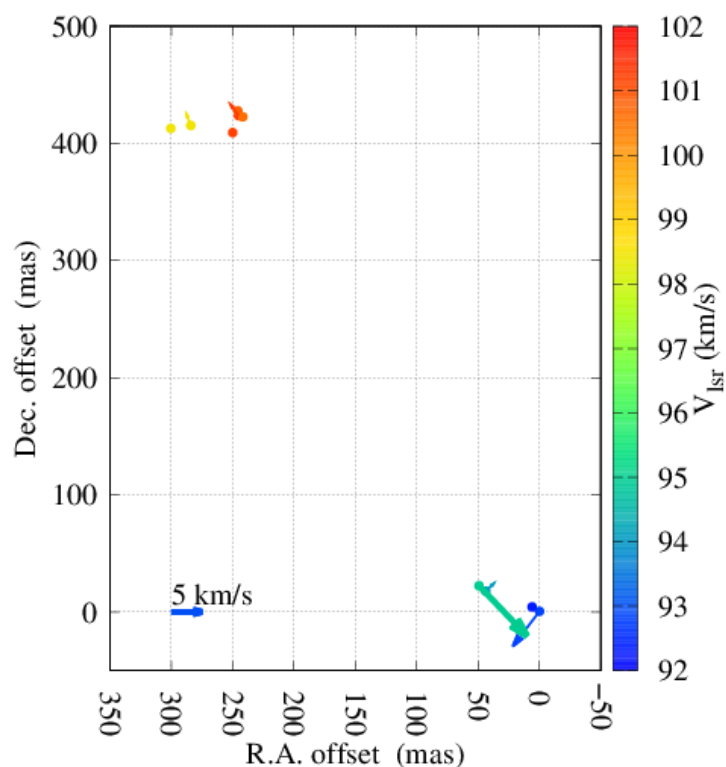


図 6.33 固有運動の速度 (4 エポック目を含まない)

(2) フィーチャーの座標とエポック数について直線でフィッティングさせ、傾きから速度を導出した場合

固有運動の速度を 4 エポック分のデータのフィッティングから求めた場合、結果は表 6.15 のようになった。

(1) と同様に、備考欄に記述がない場合は 1 エポック目と 4 エポック目の座標の差から速度を導出している。

表 6.15 固有運動の速度（4 エポック目を含む）

No.	視線速度 V_{lsr} [km/s]	速度 R.A. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	速度 Dec. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	備考
1	101.280	5.510	3.005	3.211	5.209	2-4 エポックの差で導出
2	101.192	-0.160	7.190	-7.010	2.661	
8	98.468	2.022	0.951	4.085	3.197	
13	94.952	-4.885	2.269	-4.108	3.725	
15	94.073	-2.099	2.351	4.052	5.045	1-3 エポックの差で導出
16	92.843	-5.831	6.843	-3.425	2.087	
17	92.315	4.686	2.170	8.158	9.925	2-4 エポックの差で導出

図 6.32 と同様にプロットしたものが図 6.34 である。

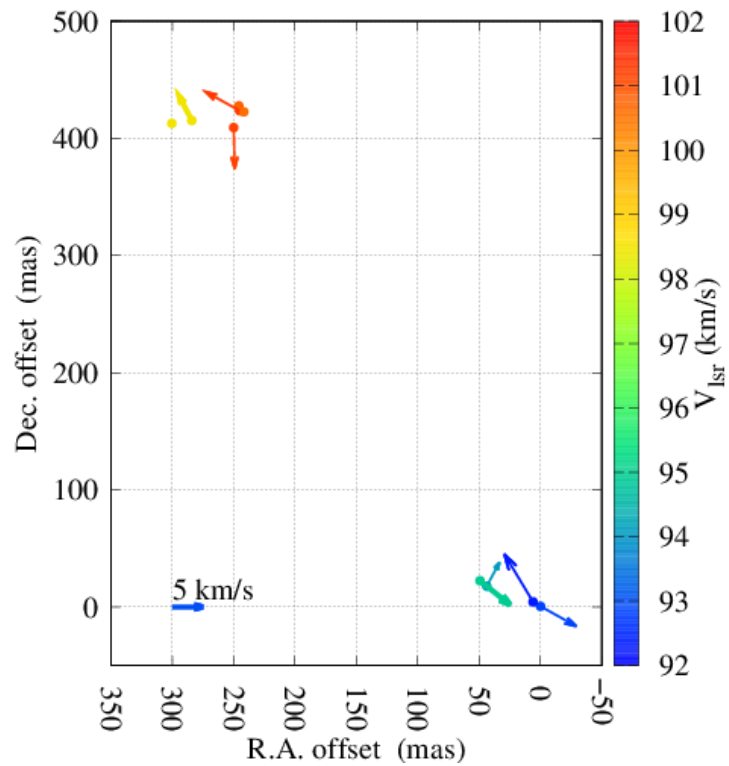


図 6.34 固有運動の速度（4 エポック目を含む）

3 エポック目までのデータからフィッティングにて速度を求めた場合、結果は表 6.16 のようになった。

表 6.16 固有運動の速度（4 エポック目を含まない）

No.	視線速度 V_{lsr} [km/s]	速度 R.A. 方向 [km/s]	エラー [km/s]	速度 Dec. 方向 [km/s]	エラー [km/s]
1	101.280	2.270	3.583	-0.517	4.443
8	98.468	0.832	0.597	3.814	5.399
13	94.952	-5.933	3.806	-4.568	5.750
15	94.073	-2.099	2.351	4.052	5.045
16	92.843	4.425	0.269	-5.567	0.991

図 6.32 と同様にプロットしたものが図 6.35 である。

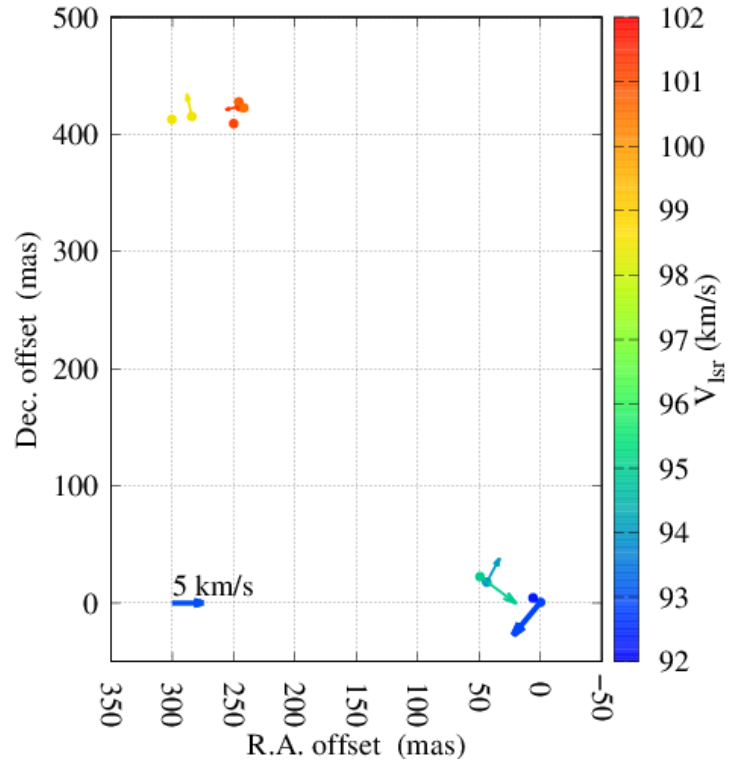


図 6.35 固有運動の速度（4 エポック目を含まない）

7 考察

7.1 全体の運動

まず、全体を1つの系として考え、画像の中心付近 ($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas に星があるとした場合を考えた。またフィーチャーごとの固有運動の結果を見ると、4 エポック目を含めるか否かで速度の向きが変わってしまっている成分がある。そのため4 エポック目を考慮する場合と考慮しない場合に分けて考えた。

まず、4 エポック目を考慮した場合 (図 6.32, 図 6.34)、(1), (2) どちらの方法でもほとんどのフィーチャーが視線方向と垂直な平面内に運動を持っており、101.3 km/s, 98.5 km/s, 95 km/s, 92.8 km/s の4成分は互いに遠ざかるような運動を見せている。運動を計測できた7成分のうち、101.2 km/s, 92.3 km/s 成分の2成分は画像の中心 ($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas へ方向であるが、94.1 km/s はそれらと直交する向きとなっていることから、($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas から遠ざかる運動のほうが多く占めている。特に95 km/s 成分は(1), (2)の方法両方で、101.3 km/s 成分は(1)の方法で、98.5 km/s は(2)の方法で、速度のほうエラーの値より大きく算出されており矢印の方向に運動している可能性が高い。これらのことを考えると、G 32.04+00.05 は膨張するような動きをしていると考えられる。

一方、4 エポック目を考慮せず1 エポック目から3 エポック目までのみのデータで解析した場合 (図 6.33, 図 6.35)、98–102 km/s 成分はほとんど動かず、92–95 km/s 成分では ($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas から遠ざかるような95 km/s 成分と、($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas と平行するような92.8 km/s 成分が目立つ。他の成分も画像中心 ($\Delta R.A., \Delta Dec.$)=(150, 200) mas へ向かうようなベクトルは存在しないことから、4 エポック目を考慮しない場合でも若干の膨張をしていると考えられる。

しかし、一般にメーザー源は原始星のごく近傍 (10–1000 au) から検出され则认为られているため、北東と南西のフィーチャー間の距離 (3600 au) を考えるとメーザー源の分布範囲は典型的な値よりも大きい。したがって、北東の成分と南西の成分の付近それぞれに別の原始星が存在する可能性が考えられる。しかし、北東のフィーチャーのクラスターと南西のフィーチャーのクラスターで別々の系としてみた場合、それぞれの系で運動は不統一であり、傾向は見つけることはできなかった。

4 エポック目を含めた場合、外した場合の両方で外側へ向かう成分が多く見られることから、全体を1つの系と見た場合は少なくとも膨張していると考えられる。しかし、メーザー源が原始星のごく近傍に存在すると考えた場合、メーザー源の分布範囲が広いと、北東、南西の成分で別々に原始星が存在する可能性がある。だが、それぞれを別の成分と見た場合の運動の傾向はわからなかった。また、4 エポック目を考慮する、しないに依存して速度の値が変わってしまうため、正確な固有運動の速さを求めるためには、今後さらに観測を追加し確認する必要がある。

7.2 視線速度 V_{lsr} の勾配

固有運動の計測結果より、全体を1つの系と見た場合 G 032.04+00.05 は膨張している傾向と考えられるが、2つの系としてみた場合は傾向は不明であった。そこで、別の視点からこの固有運動を確認できないかと考え以下を行った。Moscadelli, Sannna, and Goddi(2011)によると、フィーチャー内の視線速度 V_{lsr} の勾配は固有運動の方向と同じ向きを示す可能性が高いことから、フィーチャー内の視線速度勾配 V_{grad} を求めた。なお、Moscadelli, Sannna, and Goddi(2011)では4天体を扱っており、その4天体については、固有運動と視線速度の勾配の方向は一致した。

方法は、まず各フィーチャー内のスポットを相対位置で直線にフィットさせ、直線の関数と相関係数 r_s

を取得する。次にスポットの位置を求めた直線状に射影させ、視線速度と射影したスポット位置の中心からの距離で直線にフィットさせて、関数の傾きと相関係数 r_ν を取得した。求めた関数の傾きが視線速度の勾配 V_{grad} [$\text{km s}^{-1} \text{ mas}^{-1}$] である。1つのフィーチャー当たりのスポット数の平均は4.6個であった。Moscadelli, Sannna, and Goddi(2011)によると、典型的な V_{grad} の値は $0.1\text{--}0.2 \text{ km s}^{-1} \text{ mas}^{-1}$ 、相関係数の値は $|r_s|, |r_\nu| \geq 0.6$ である。2エポック目における、それぞれフィッティングした際の例を図7.1, 7.2に示した。エポックごとに得られた値を表7.1–表7.4に示した。

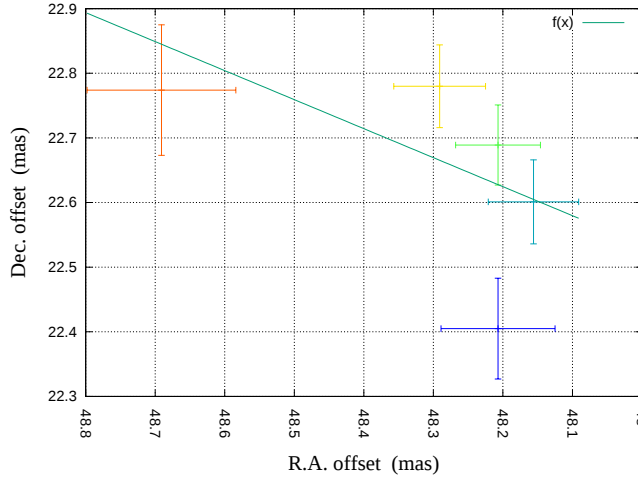


図 7.1 No. 13 位置のフィッティング結果

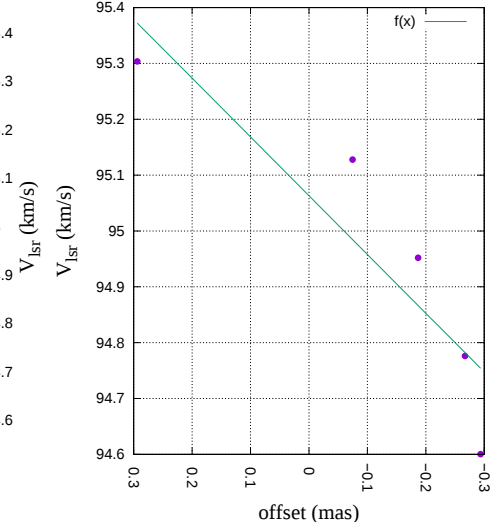


図 7.2 No. 13 視線速度と位置のフィッティング結果

表 7.1 視線速度の勾配 (1 エポック目)

No.	V_{grad} [$\text{km s}^{-1} \text{ mas}^{-1}$]	エラー	$ r_s $	$ r_\nu $
1	-0.238	0.018	1	0.053
8	-2.142	0.900	1	0.284
13	0.398	0.034	1	0.098
15	0.205	0.711	1	0.159
16	-0.217	0.033	0.754	0.320

表 7.2 視線速度の勾配 (2 エポック目)

No.	V_{grad} [$\text{km s}^{-1} \text{ mas}^{-1}$]	エラー	$ r_s $	$ r_\nu $
1	0.219	0.117	1	0.316
2	0.246	0.296	1	0.037
3	-0.365	0.687	1	0.025
4	-0.376	0.101	1	0.118
8	-1.051	0.191	1	0.015
9	-1.027	0.130	1	0.129
13	1.052	0.286	1	0.443
15	-0.225	0.165	1	0.543
16	-0.311	0.099	0.987	0.029
17	-0.308	0.001	0.999	0.003

表 7.3 視線速度の勾配 (3 エポック目)

No.	V_{grad} [km s ⁻¹ mas ⁻¹]	エラー	$ r_s $	$ r_\nu $
1	-2.177	0.366	1	-0.117
2	0.517	0.291	1	0.368
3	-0.740	0.569	1	0.261
4	-0.467	1.438	1	0.146
5	-0.633	0.055	1	0.129
6	0.739	0.117	1	0.110
7	0.168	0.375	0.754	0.345
8	-0.518	0.399	1	0.548
10	-0.108	0.030	0.993	0.183
13	0.718	0.048	1	0.084
15	1.175	0.417	1	0.356
16	-0.352	0.041	0.864	0.049
17	-0.322	0.026	0.999	0.057

表 7.4 視線速度の勾配 (4 エポック目)

No.	V_{grad} [km s ⁻¹ mas ⁻¹]	エラー	$ r_s $	$ r_\nu $
1	-0.271	0.080	1	0.196
2	0.413	0.026	1	0.044
6	0.540	0.414	1	0.032
8	-0.934	0.343	1	0.161
11	-0.237	0.093	1	0.249
13	0.295	0.043	1	0.236
14	0.341	0.084	1	0.312
16	-0.283	0.019	0.034	0.051
17	0.348	0.030	1	0.079

V_{grad} の値は大半が $0.2 \text{ km s}^{-1} \text{ mas}^{-1}$ を超えており、相関係数の値は $|r_s|$ については全て 0.6 を上回るが、 $|r_\nu|$ については全て 0.6 を下回る結果となった。よって、視線速度と位置の相関は弱いといえる。

求めた視線速度の勾配 V_{grad} をフィーチャーの図へプロットしたものが図 7.3–図 7.6 である。図 7.3–図 7.6 の矢印は視線速度が高い方へむかう向きを表している。これらの図を見ると、多くの矢印が画像中心 ($\Delta R.A., \Delta Dec.$) = (150, 200) mas 方向へ向かっている。もし視線速度の勾配が固有運動の向きと一致しているのならば、全体的に収縮しているような動きをすることとなるが、実際に観測して得られた固有運動の結果と合わない。これは、視線速度の勾配ベクトルと固有運動の方向は必ずしもすべての天体で一致するわけではないためかもしれない。この点を確認するためには、他天体の計測も行い、サンプルを増やす必要があるだろう。

上記の方法ではフィーチャーの固有運動や全体の傾向を確認することはできなかった。

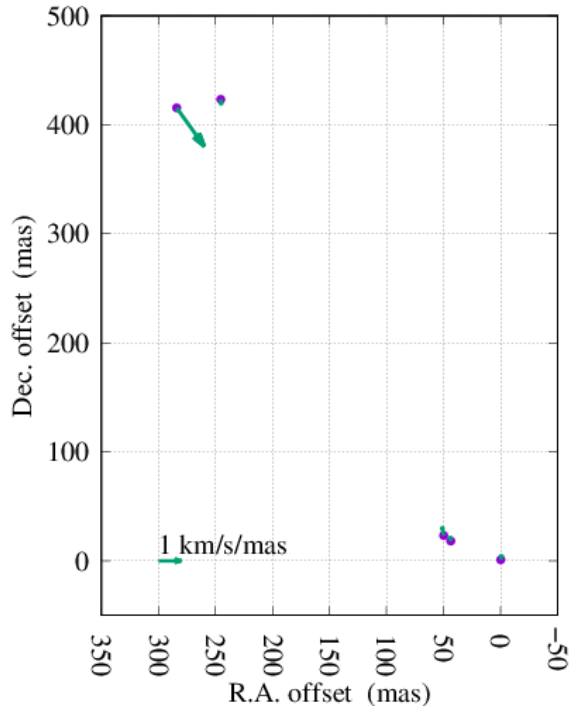


図 7.3 視線速度の勾配 V_{grad} の分布 (1 エポック目)

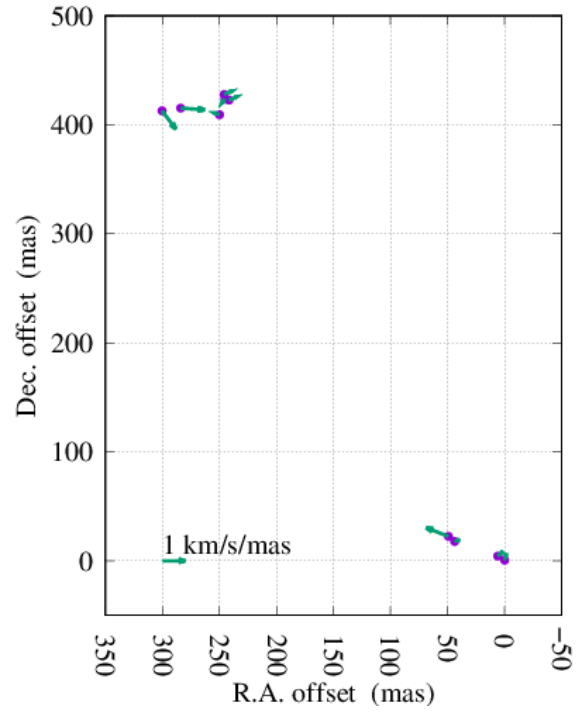


図 7.4 視線速度の勾配 V_{grad} の分布 (2 エポック目)

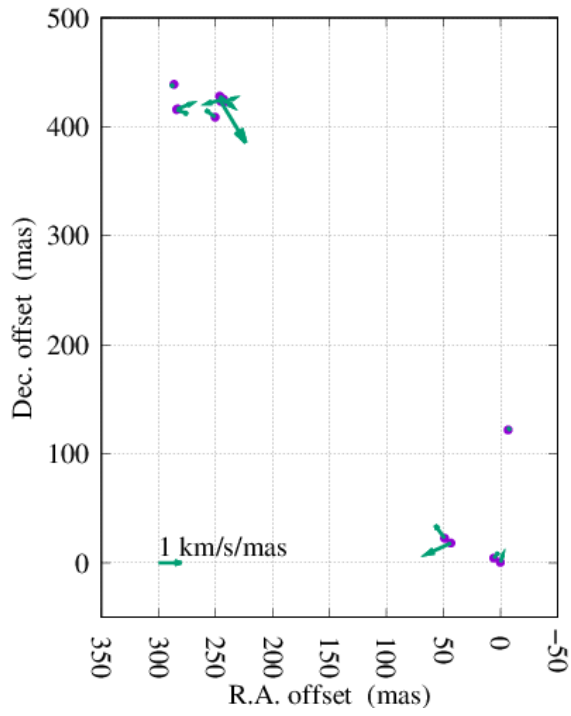


図 7.5 視線速度の勾配 V_{grad} の分布 (3 エポック目)

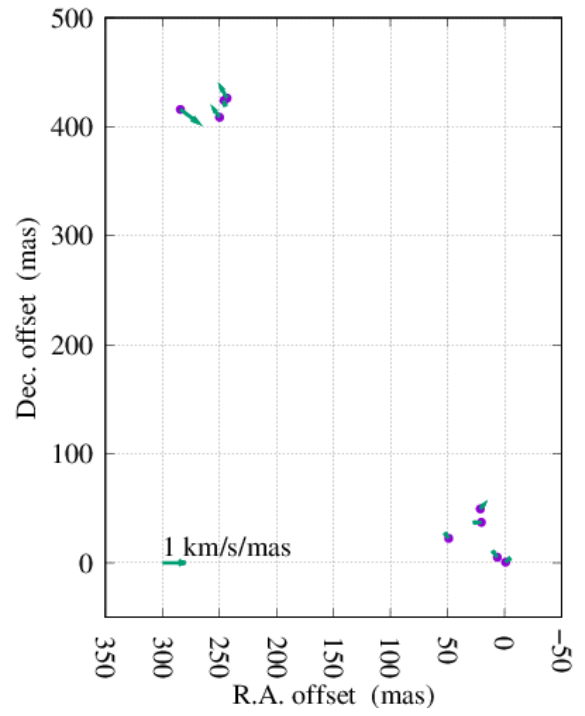


図 7.6 視線速度の勾配 V_{grad} の分布 (4 エポック目)

8 まとめ

本研究では、G 032.04+00.05 についてメーザーの空間分布とメーザーの内部固有運動の計測のために、EAVN によって観測したデータを解析した。G 032.04+00.05 は日立モニター観測の結果から視線速度 $V_{\text{lsr}}=92.7 \text{ km/s}$ が 57 日で周期変動を行うことが確認されており、Fujisawa et al.(2014) にてペア状の空間分布を持つことが確認されていた。

観測日は 2010/8/30, 2011/10/6, 2012/9/24, 2013/10/30 の 4 エポック分であり、これは周期に合わせて行った観測ではなかったため、ピーク日を推定したところ静穏期での観測であった。メーザースポットの検出条件は、連続する 2 チャンネル以上で同じ位置に確認、 $S/N \geq 5$, の両方を満たすこととした。1 エポック目では 29 個、2 エポック目では 53 個、3 エポック目では 60 個、4 エポック目では 47 個のスポットが確認され、それらをメーザーフィーチャーとして小さなクラスタにまとめた。フィーチャーの条件は少なくとも 3 つのスポットを含む、合成ビームサイズの大きさ内にスポットが含まれる、の 2 点であり、スペクトル上における視線速度方向の分離も考えて区別した。フィーチャーは 1 エポック目は 5 個、2 エポック目は 10 個、3 エポック目は 13 個、4 エポック目は 9 個となり、そのうち 4 エポックにわたり存在しているフィーチャーが 4 つ、3 エポックにわたり存在しているフィーチャーが 3 つであった。

フィーチャーの固有運動の計測は、エポック間での座標の差を求め速度を導出する方法と、フィーチャーの座標と期間（エポック数）で直線フィットさせ傾きから速度を求める方法の 2 通りを行った。その際 4 エポック目の座標が他のエポックと比べ大きくずれている成分があり、実際に運動している可能性とデータの質が悪かった可能性の両方が考えられるため、4 エポック目を含めた場合と除いた場合に分けて速度を導出した。その結果、全体を 1 つの系として考え中心に星があるとした場合は膨張するような運動を見せた。4 エポック目を含めない場合は含めた場合と比べて運動の量は小さかった。しかし 1 つの系と考えた場合、メーザーの分布する範囲が典型的な値よりも広い。そのため北東、南西と別々に 2 つの系として考え、それぞれに星がある場合を考えたが傾向はわからなかった。

フィーチャー内の視線速度 V_{lsr} の勾配は固有運動の方向は同じ向きを示す可能性が高い (Moscadelli, Sanna, and Goddi, 2011) ことから、視線速度の勾配 V_{grad} を求めた。しかし、視線速度の勾配ベクトルと固有運動の動きは異なる動きを見せたことから、必ずしもすべての天体でフィーチャー内の視線速度の勾配と固有運動の方向は一致するわけではないためかもしれない。

今後、フィーチャーの固有運動に関して正確な速さを求めるために、さらに観測と解析を行い確認する必要がある。また、視線速度の勾配ベクトルについて本研究では固有運動の動きと方向が一致しなかったため、この点を確認するために他天体の計測を行いサンプルを増やす必要がある。

謝辞

本研究を進めること修士論文を執筆することにあたって、指導教官である百瀬宗武教授には解析の際の問題点や論文執筆についてのご指摘など全般にわたってご指導いただきました。また、同研究室の米倉覚則教授には VLBI 観測についての詳細やご指摘などをいただきました。お二方には大変お世話になりました。

国立天文台の杉山孝一郎研究員には、解析の手法や考察の進め方などを具体的にご指導いただきました。深く感謝申し上げます。

同研究室のスンカンロウ研究員、田辺義浩先輩をはじめとする皆さまには考察や論文執筆にあたって様々な相談に乗っていただき、誠に感謝申し上げます。研究室の同期の皆さま、後輩の皆さまにも大変お世話になり感謝しております。皆様ありがとうございました。

参考文献

- [1] Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., et al. 2014, PASJ, 66, 31
- [2] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2004, MNRAS, 355, 553
- [3] Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., Motogi, K., & Tanaka, K. E. I. 2013, APJL, 769, L20
- [4] Kraus, S., Hofmann, K.-H., Menten, K. M., et al. 2010, NAT, 466, 339
- [5] Menten, K. M. 1991, APJL, 380, L75
- [6] Menten, K. M., Reid, M. J., Pratap, P., Moran, J. M., & Wilson, T. L. 1992, APJL, 401, L39
- [7] Müller, H. S. P., Menten, K. M., & Mäder, H. 2004, AAP, 428, 1019
- [8] Moscadelli, L., Sanna, A., & Goddi, C. 2011, AAP, 536, A38
- [9] Parfenov, S. Y., & Sobolev, A. M. 2014, MNRAS, 444, 620
- [10] Patel, N. A., Curiel, S., Sridharan, T. K., et al. 2005, NAT, 437, 109
- [11] Rathborne, J. M., Jackson, J. M., & Simon, R. 2006, APJ, 641, 389
- [12] Sanna, A., Moscadelli, L., Cesaroni, R., et al. 2010, AAP, 517, A71
- [13] Sato, M., Wu, Y. W., Immer, K., et al. 2014, APJ, 793, 72
- [14] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Hachisuka, K., et al. 2016, PASJ, 68, 72
- [15] van der Walt, D. J. 2011, Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege, 80, 260
- [16] Xu, Y., Voronkov, M. A., Pandian, J. D., et al. 2009, AAP, 507, 1117
- [17] 山口貴大, 2017, 茨城大学理工学研究科修士論文
- [18] 福井康雄, 犬塚修一郎, 大西利和, 中井直正, 舞原俊憲, (2008). 現代の天文学第 6 巻 星間物質と星形成 日本評論社
- [19] 干渉計サマースクール 2005 教科書