

平成29年度卒業論文

東アジア VLBI 観測網 (EAVN) による 6.7GHz メ
タノールメーザー源 G012.88+00.48 の周期強度変
動機構の解明

理学部理学科物理学コース

14S2014X

佐藤公紀

論文要旨

東アジア VLBI ネットワーク (EAVN) による VLBI 観測された、周期強度変動天体 G012.88+00.48 のマルチエポック観測データを解析した。現状解析済みのデータは2エポック目（観測コード：U12270A）のみである。解析により、各速度成分のメーザースポットの空間分布、および座標、フラックスなどを導出し、メーザーチャンネルマップを作成した。今後は他エポック（観測コード：U11301A・U13262A）の観測データに関しても解析を行い、同様に各種パラメータ導出することで、本天体の固有運動を導出、最終的には本天体の周期強度変動機構の解明を目指したい。

目次

概要	i
第 1 章 観測背景	1
1.1 大質量星	1
1.2 メーザー	1
1.3 研究目的	3
第 2 章 対象天体 G012.88+00.48	4
2.1 先行研究	4
2.2 空間分布	5
第 3 章 観測	6
3.1 観測概要	6
3.2 解析手法	7
第 4 章 結果と考察	8
4.1 結果	8
4.2 考察	12
第 5 章 まとめ	14
謝辞	15
参考文献	16

第 1 章

観測背景

1.1 大質量星

大質量星は $8M_{\odot}$ 以上の質量の天体のことである。小質量星の形成過程についてはその形成領域が相対的に太陽系近傍にあるため理解が進んでいるが、大質量星形成過程については観測的に

- 絶対数が少ない
- 進化のタイムスケールが短いため統計的な進化過程を追うことが困難
- 元となる巨大分子雲が、太陽系近傍ではなく 500pc 以上遠方に存在しているため空間分解能が悪い
- コアの周りを高密度のガスやダストが覆っているため、可視光観測が困難

などの要因から、未だに十分な理解が進んでいない。

一方で、理論的には大質量星は降着する物質を押し返すほどの、強い電磁波を放射する。そのためかつてはこの輻射圧によって質量の大きな原始星への物質降着が妨げられると考えられており、太陽質量の数十倍を超える大質量星の形成の説明が困難であった。

近年の理論研究により、ジェットとアウトフローで円盤の双極方向から運動量フラックスの大半が抜け、そのために物質の降着を妨げないことが分かってきている。

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 (MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) のことである。熱平衡下にある系に関して、ある 2 つの準位分布について

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

で定義される温度 T_{ex} を励起温度と呼ぶ。励起温度は LTE (局所熱力学平衡) の場合、全ての準位で等しく系の温度 T に等しい。LTE でない場合にもこの放射は普通満たされる。このような場合の分布を正規分布という。

輻射輸送方程式より、励起温度 T_{ex} の物質中を伝搬した時の輝度温度は

$$T_b = T_b(0)e^{-\tau_\nu} + T_{\text{ex}}(1 - e^{-\tau_\nu}) \quad (2)$$

となる。(1) 式で定義される励起温度は T_{ex} は $\frac{n_2 g_1}{n_1 g_2} < 1$ の場合は正の値となるが、負の値を取る場合もあり得る ($\frac{n_2 g_1}{n_1 g_2} > 1$)。このような状態（下の準位よりも上の準位により多くの粒子が存在している状態）を反転分布と呼ぶ。メーザーはこのような反転分布となった場合に起こる。この場合、吸収係数 α_ν は負の値となる。これはアインシュタイン係数を用いて吸収係数が

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

と書けることから分かる。また光学的厚み τ_ν と吸収係数 α_ν との関係は

$$\tau_\nu = \int \alpha_\nu ds \quad (4)$$

である。(3),(4) 式から励起温度が負の場合、 $\exp(-h\nu/kT_{\text{ex}}) > 1$ より、 α_ν, τ_ν が負の値になることが分かる。

これより輻射輸送方程式は

$$T_b = T_b(0)e^{|\tau_\nu|} + |T_{\text{ex}}|(e^{|\tau_\nu|} - 1)$$

となる。この式から、輝度温度は伝播に伴って指数関数的に増幅され、極めて輝度温度の高い放射が観測される。これがメーザー現象である。

メーザーは他にも以下のような特徴がある

- 放射源の広がり極めて小さく点状
- 直線または円偏波
- 位相が揃っている

大質量星形成領域では、OH メーザー、水メーザー、メタノールメーザーなどのメーザー源を伴う。本研究では 6.7GHz メタノールメーザーに着目する。

1.2.2 メタノールメーザー

メタノールメーザーはその付随領域の違いから、ClassI, ClassII の2つに分類されている。ClassI メタノールメーザーは大質量星形成の指標となる天体（大質量原始星候補天体；以下大質量原始星と呼ぶ）との位置的な相関が必ずしも良くない。一方、ClassII メタノールメーザーは大質量原始星との位置的な相関が良いと言われている。メーザー源は輝度が非常に高い（メタノールメーザーで 10^{10}K ）ため、VLBI (Very Long Baseline Interferometry) などの、感度はそれほど良くないが超高空間分解能が得られる観測において検出可能で、詳細な空間分布が得られる。

また、時期をずらしての複数回観測により固有運動の解明ができる特徴がある。ClassII メタノールメーザーは現在までに大質量星形成領域以外での検出例がないため、大質量星形成領域の研究をする上で、指標となるものであり、精力的な観測が行われている。

1.3 研究目的

本研究では東アジア VLBI ネットワーク (EAVN) による、周期強度変動する 6.7GHz メタノールメーザー源の観測によって得られたデータの解析を行なった。メーザー源が空間的にどのような分布をしているかを調べ、その後に天体の固有運動解析、最終的には天体の周期強度変動がどのような要因で引き起こされるかの解明を目指す。

第 2 章

対象天体 G012.88+00.48

2.1 先行研究

G012.88+00.48（以下、本天体とする）は

- EAVN で観測した天体
- 日立・高萩アンテナモニター観測で周期変動が新検出された天体

の中から特徴的な空間分布を示す天体として選定された。本天体はその中でも周期が最短である。

座標は $RA = 18^h 11^m 51^s.4000$, $Dec = -17^\circ 31' 29''.600$ で、年周視差法により 2.34 kpc の距離に位置することが確認されている (Xu et al. 2011)。また強度変動に周期性があることが分かっており、その周期は 29.5 日であることが確認されている (Goedhart et al. 2014)。全時間積分スペクトルを図 2.1、強度変動プロットを図 2.2 に示す。

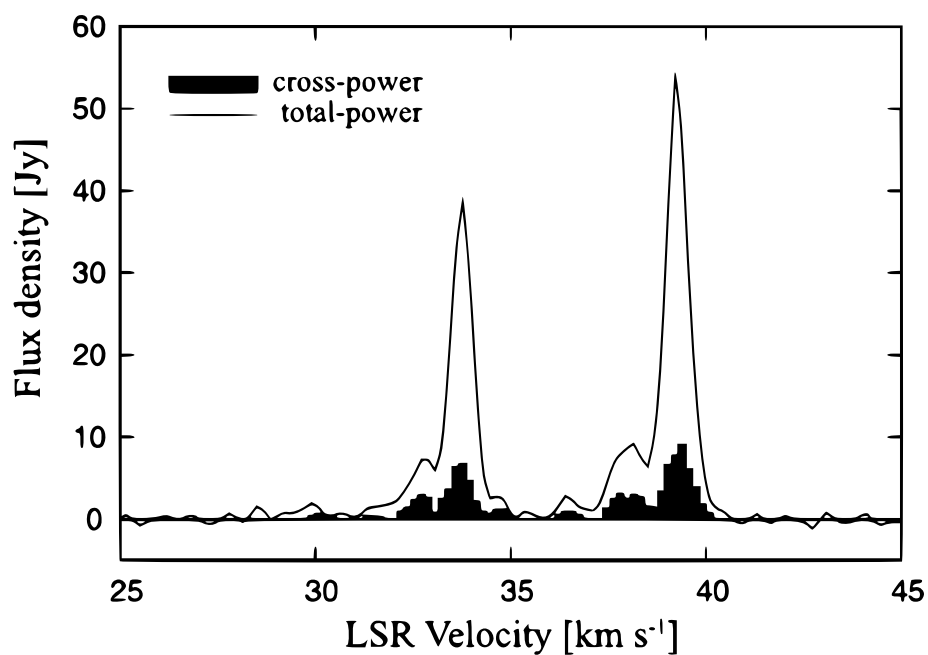


図 2.1 全時間積分スペクトル

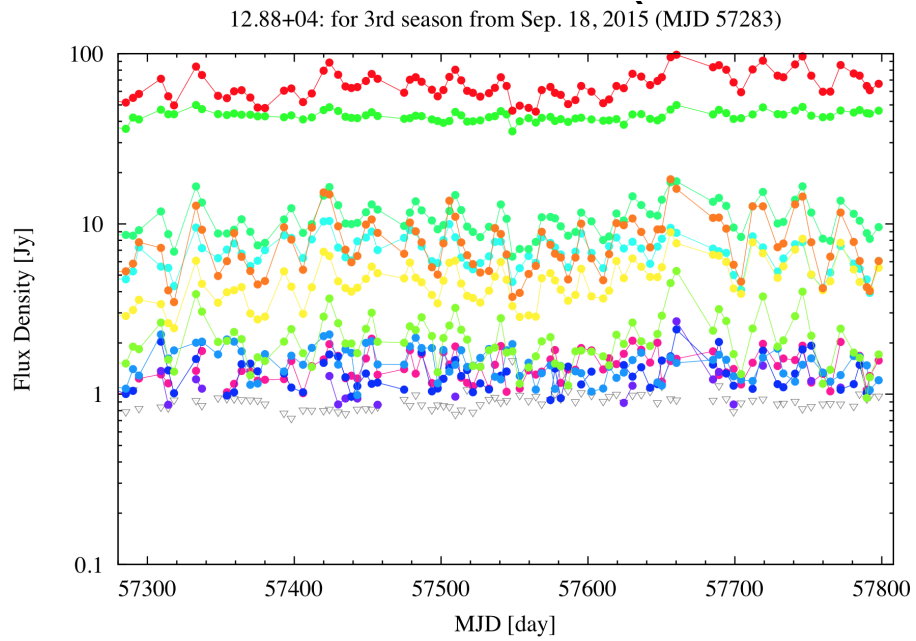


図 2.2 強度変動プロット

2.2 空間分布

メーザースポットの空間分布とその拡大図を図 2.3 に示す (Fujisawa et al. 2014)。ここで原点は先述した赤経・赤緯である。メーザースポットの分布は、メインのクラスターと2つの分離したクラスターに含まれていることが確認されており、これらのメーザースポットは $1100 \text{ mas} \times 1600 \text{ mas}$ ($\sim 2600 \text{ au} \times 3800 \text{ au}$) にわたって分布していることが確認されている。

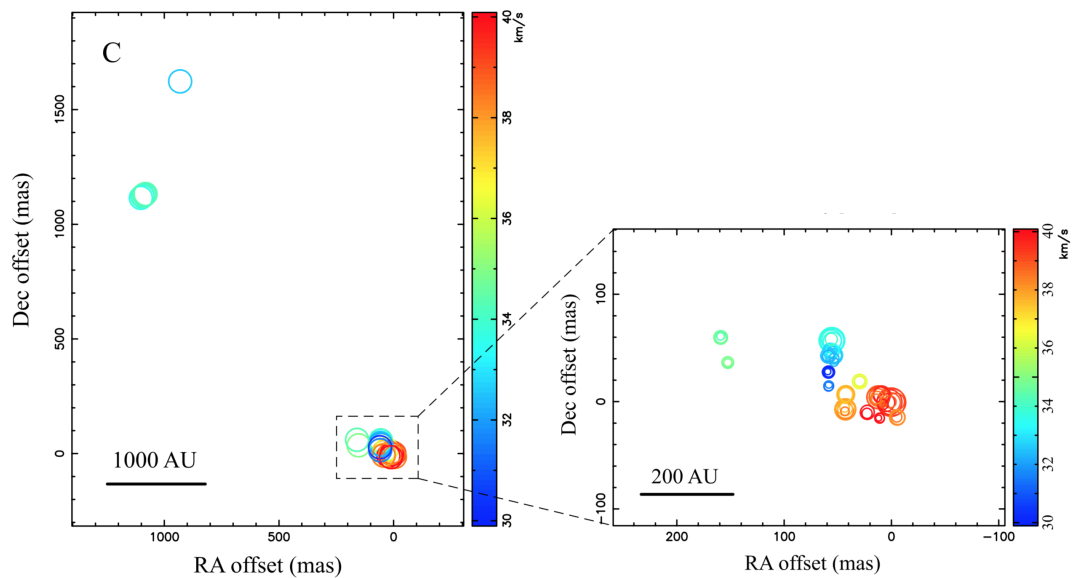


図 2.3 メーザースポットの空間分布

第3章

観測

3.1 観測概要

観測は2011年10月28日（観測コード：U11301A）・2012年9月26日（観測コード：U12270A）・2013年9月19日（観測コード：U13262A）に行い、各エポックとも、総観測時間は7～8時間（うち対象天体 G012.88+00.48 は15分間の観測を4回）程度行った。観測参加局は、観測コード U11301A・U13262A では VERA 4局（水沢・入来・小笠原・石垣）と山口局・日立局・上海局の7局、観測コード U12270A では水沢・入来・石垣・山口・日立局の5局である。各アンテナの配置と各基線を図3.1に示す。

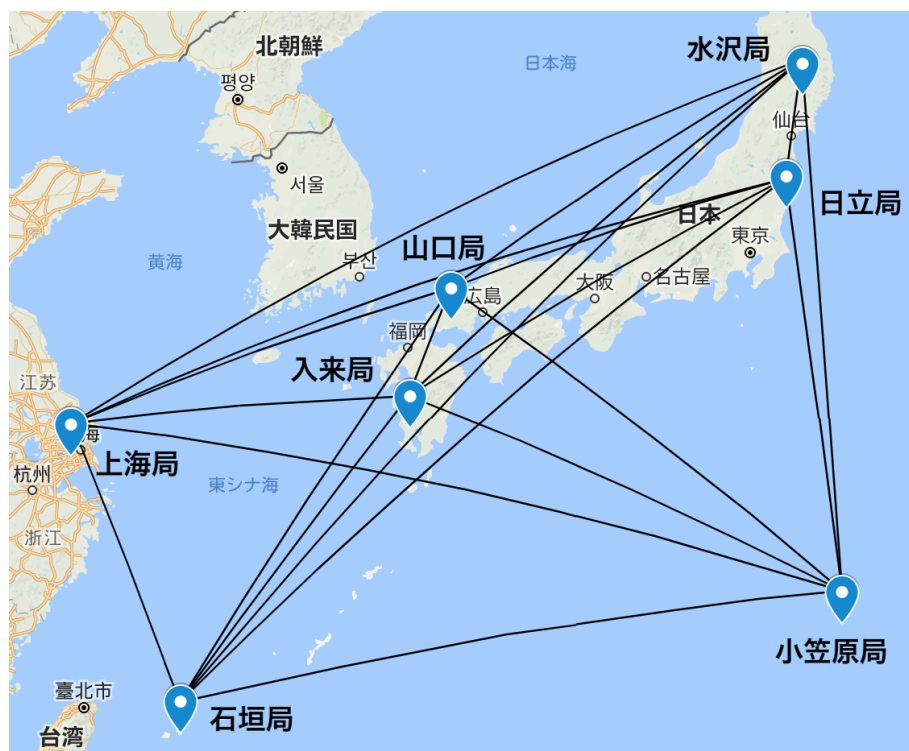


図 3.1 アンテナ配置と各基線

観測周波数帯域は 6665-6669MHz の 4MHz 幅で、1024 点分光したデータを使用した。解析に用いた天体（校正天体を含む 5 天体）を表 3.1 に示す。

観測天体	観測理由
G012.88+00.48	解析対象天体
G9.62	装置異常など確認天体
J1743-03	大気位相較正天体
NRAO530	幾何学的遅延残差及び帯域通過特性較正天体
3C454.3	同上

表 3.1 解析に使用した天体

3.2 解析手法

解析は Astronomical Image Processing System (AIPS) 及び Difmap を用いて解析を行った。主な解析手順は

1. FITS データ読み込み
2. データチェック
3. 使用不可データのフラグ
4. UV 再計算
5. 振幅ゲイン較正
6. Delay&Rate 較正
7. バンドパス位相特性較正
8. バンドパス振幅較正
9. ドップラー較正
10. 振幅ゲイン較正
11. メーザーピークによるフリンジフィッティング
12. Dirty Image 作成
13. SelfCalibration (Difmap)
14. Clean Image 作成
15. メーザースポットのパラメータ取得

である。

第 4 章

結果と考察

4.1 結果

現状では解析済みのデータは、2 エポック目（観測コード U12270A）のみである。空間分布マップの作成によって各メーザースポットについてパラメータを導出した。マップの軸は全て相対座標（中心 $RA = 18^h11^m51^s.4000$, $Dec = -17^\circ31'29''.600$ ）である。

以下のメーザースポット分布を見ると、39.3 km/s 成分のメーザースポットは概ね中心付近にあることが分かる。一方、34.0 km/s 成分は中心から $RA = +50$ mas, $Dec = +60$ mas 程度離れた場所にあることが分かる。以上から、先行研究での他エポックの解析結果で得られたメーザースポットの空間分布と概ね合っていることが確認できた。合成ビームマップを図 4.1 に、Dirty Image を図 4.2 に示す。

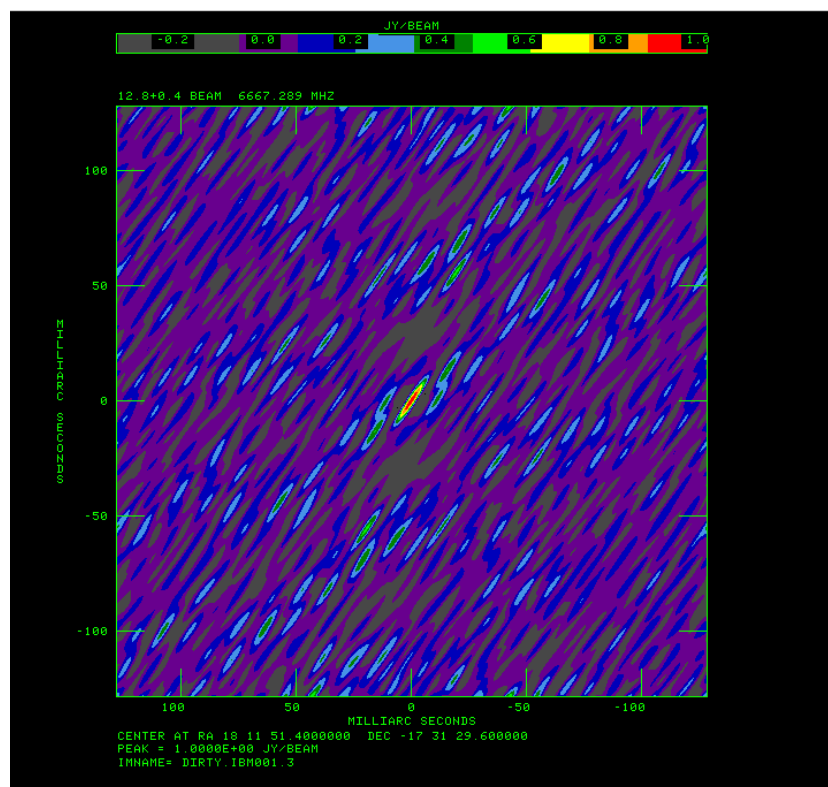


図 4.1 合成ビームマップ

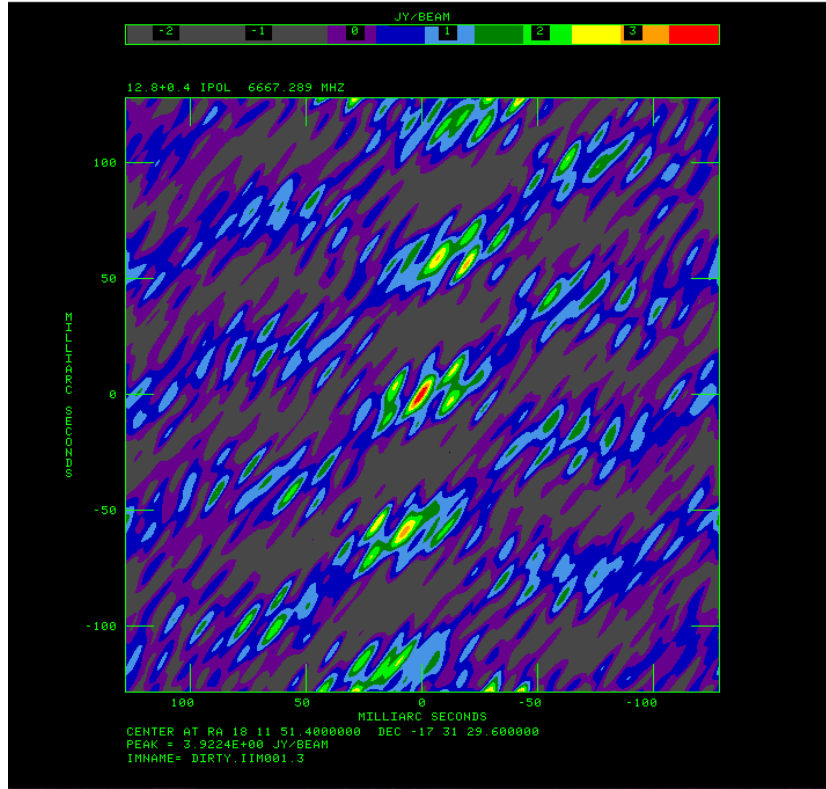


図 4.2 ダーティマップ

スペクトルに見られた2つのピークでのクリーンイメージを図 4.3、図 4.4 に示す。ノイズレベルは $1\sigma = 0.04218$ Jy/beam で、ビームサイズは 24.25×2.64 mas²、PA = -33.61 deg である。

4.1.1 39.3 km/s 成分

一番明るいメーザースポットの座標成分

RA Offset 11.848 ± 0.112 mas

Dec Offset 7.068 ± 0.160 mas

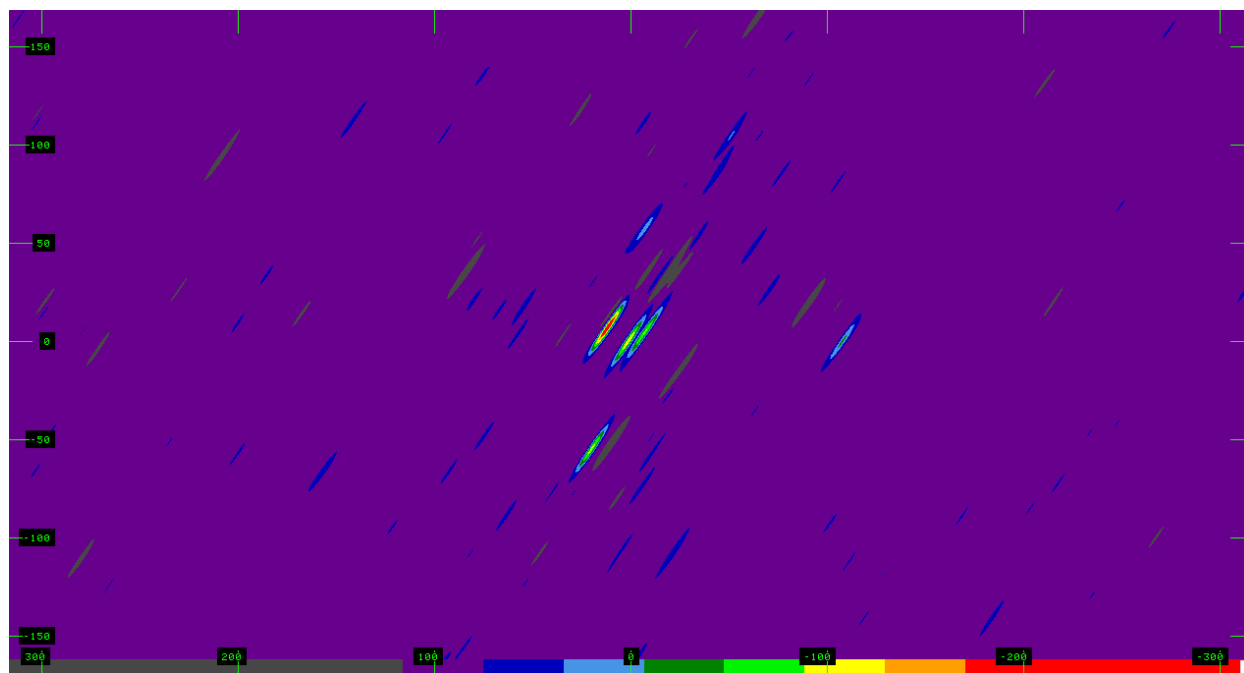


図 4.3 クリーンマップ (588ch)

4.1.2 34.0 km/s 成分

一番明るいメーザースポットの座標成分

RA Offset 54.295 ± 0.151 mas

Dec Offset 61.928 ± 0.221 mas

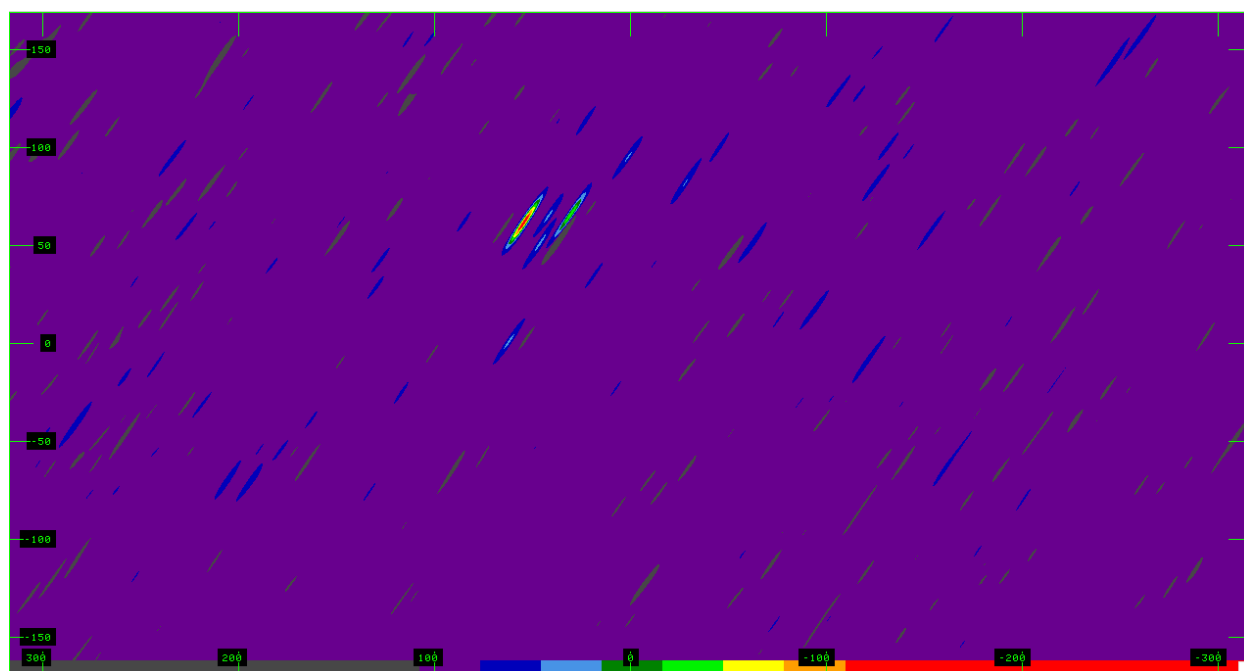


図 4.4 クリーンマップ (618ch)

また、得られたメーザースポットの座標から作成した空間分布マップを図 4.5、図 4.6 に示す。

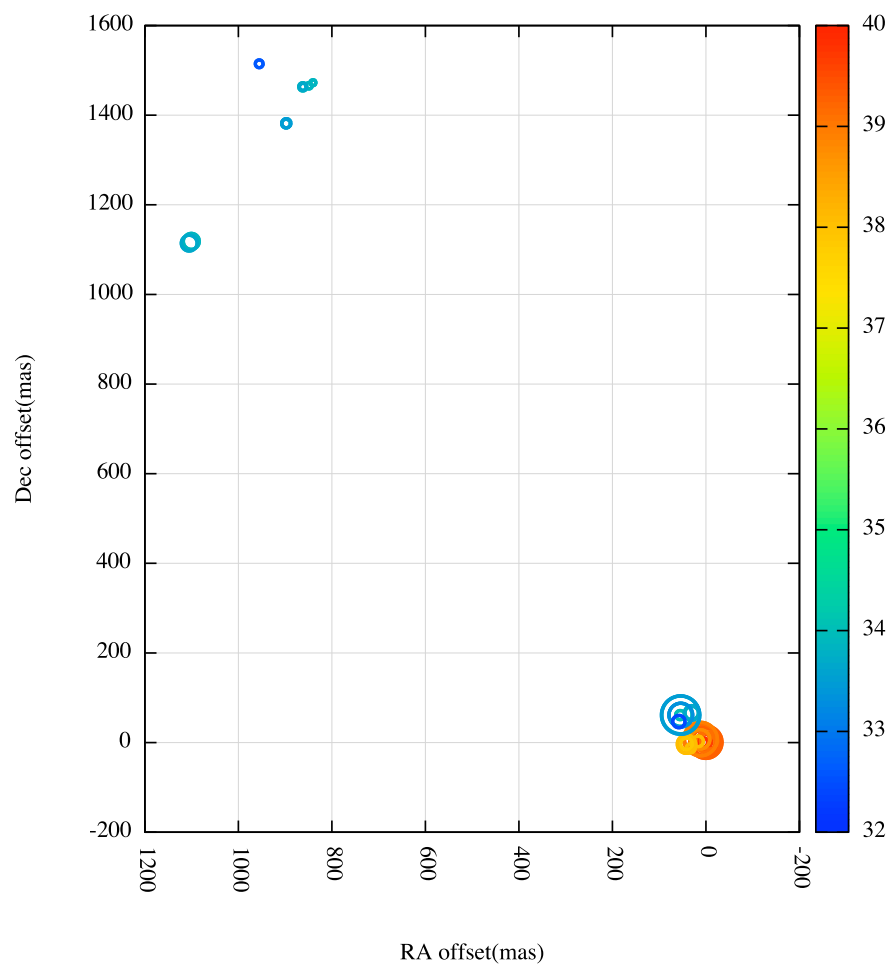


図 4.5 メーザースポット分布

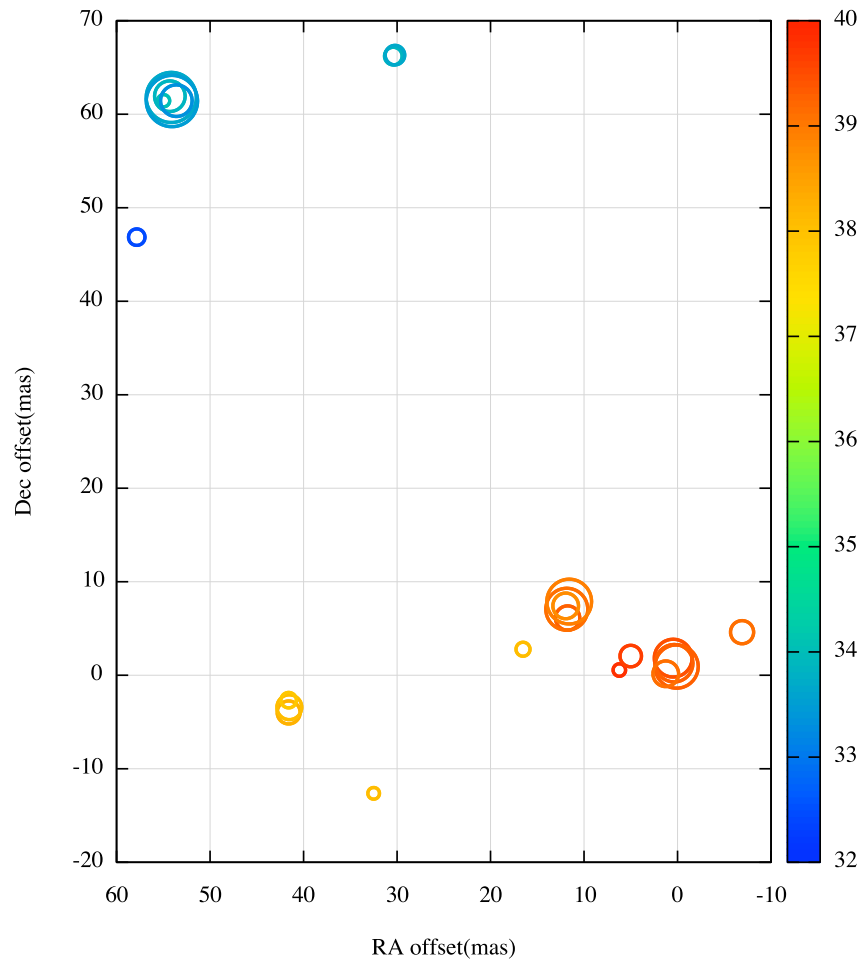


図 4.6 メーザースポット分布（中心付近）

4.2 考察

- 39.3 km/s 成分についてのクリーンイメージについて、中心付近以外にも成分がみられる。この成分についてはリアルな成分であると言えるかを以下で考察する。

Dirty Image の一番明るい部分についての Clean を行い、Clean 残差マップを作成。このマップから、該当する成分はサイドローブを誤ってクリーンした結果であると判断した。

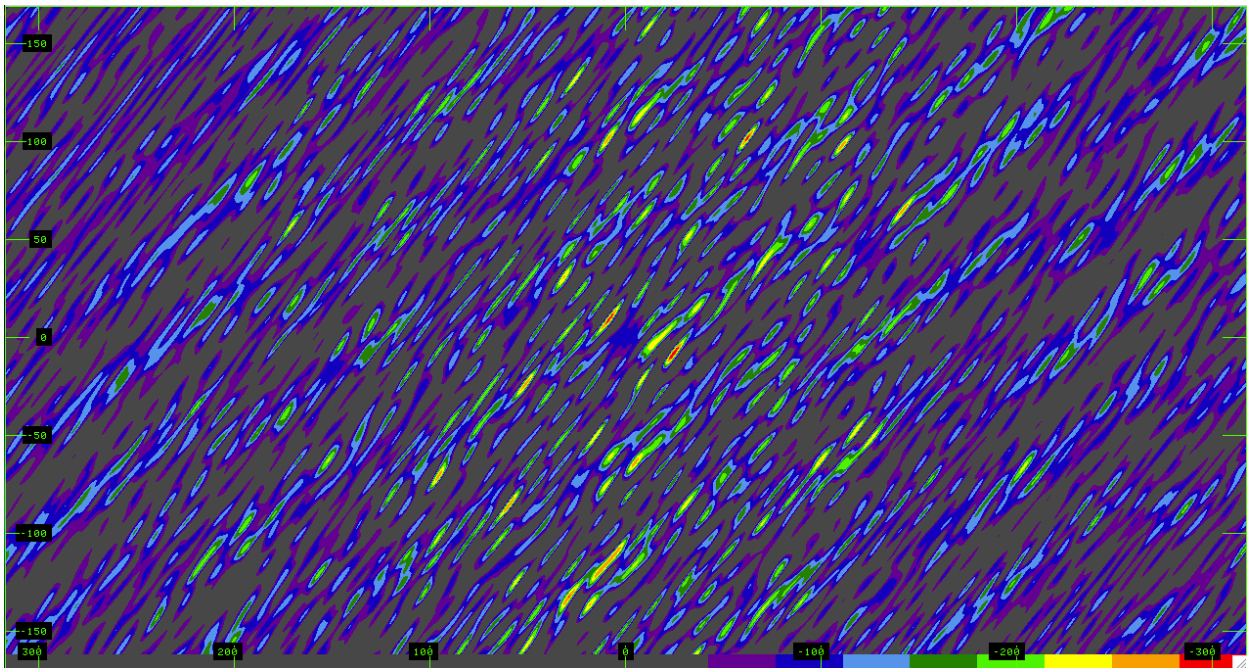


図 4.7 残差マップ (588ch)

また、先行研究では検出されていない座標に検出された成分に関しても、サイドローブである可能性が高く、同様に残差マップを作成して確認する必要がある。

- 今回、検出できていないメーザー放射について考察する。

今回解析したエポックでは観測参加局数が先行研究より2局少なく、感度不足であった。そのため、弱い放射を捉えられなかったことが原因であると考えている。観測参加局の多いエポックの解析を行うことで今回検出できなかったメーザー放射も検出できると期待される。

第 5 章

まとめ

6.7GHz メタノールメーザー源 G012.88+00.48 の東アジア VLBI ネットワークによる VLBI 観測データの解析を行なった。現状解析済みのデータは、2 エポック目（観測コード：U12270A）のみである。

- AIPS および Difmap による解析で、各成分のメーザースポットの空間分布および各種パラメータを導出した。
- 得られたパラメーターを元に、メーザースポット分布を作成した。

今後は、今回新たに検出された成分に関して残差マップを作成し、サイドローブの影響か否かを判断する。さらに、他のエポックも解析を進めることで本天体の固有運動の導出を目指す。

謝辞

本研究に取り組むにあたって、天文学の基礎部分から丁寧にご指導いただきました百瀬宗武教授、VLBI やメーザーについて多数の助言を賜り、親身になってご指導して下さった、米倉覚則准教授、国立天文台の杉山孝一郎氏に深く感謝申し上げます。また、日頃から自分の疑問点などに対して親切にご指導して下さった電波天文観測研究室の研究員・博士・修士の皆様、そして、自主ゼミなどで多くの時間お世話になった同期の2人にも感謝いたします。これからも高いレベルで研究を進めていけるよう邁進して参ります。

参考文献

- [1] Walsh, A. J.; Burton, M. G.; Hyland, A. R.; Robinson, G. 1998,MNRAS,301,640W
- [2] Goedhart, S.; Langa, M. C.; Gaylard, M. J.; Van Der Walt, D. J. 2009,MNRAS,398,995G
- [3] Fujisawa, Kenta; Sugiyama, Koichiro; Motogi, Kazuhito; Hachisuka, Kazuya; Yonekura, Yoshinori; Sawada-Satoh, Satoko; Matsumoto, Naoko; Sorai, Kazuo; Momose, Munetake; Saito, Yu; Takaba, Hiroshi; Ogawa, Hideo; Kimura, Kimihiro; Niinuma, Kotaro; Hirano, Daiki; Omodaka, Toshihiro; Kobayashi, Hideyuki; Kawaguchi, Noriyuki; Shibata, Katsunori M.; Honma, Mareki; Hirota, Tomoya; Murata, Yasuhiro; Doi, Akihiro; Mochizuki, Nanako; Shen, Zhiqiang; Chen, Xi; Xia, Bo; Li, Bin; Kim, Kee-Tae 2014,PASJ,66,31F
- [4] Xu, Y.; Moscadelli, L.; Reid, M. J.; Menten, K. M.; Zhang, B.; Zheng, X. W.; Brunthaler, A. 2011,ApJ,733,25X
- [5] Beuther, H.; Zhang, Q.; Hunter, T. R.; Sridharan, T. K.; Zhao, J.-H.; Sollins, P.; Ho, P. T. P.; Liu, S.-Y.; Ohashi, N.; Su, Y. N.; Lim, J. 2004,ApJ,616L,19B
- [6] Beuther, H.; Hunter, T. R.; Zhang, Q.; Sridharan, T. K.; Zhao, J.-H.; Sollins, P.; Ho, P. T. P.; Ohashi, N.; Su, Y. N.; Lim, J.; Liu, S.-Y. 2004,ApJ,616L,23B
- [7] Beuther, H.; Zhang, Q.; Sridharan, T. K.; Chen, Y. 2005,ApJ,628,800B
- [8] Beuther, H.; Vlemmings, W. H. T.; Rao, R.; van der Tak, F. F. S. 2010,ApJ,724L,113B
- [9] 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
- [10] シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測 II ー電波天文学 日本評論社 中井直正、坪井昌人、福井康雄