

令和元年度卒業論文

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

茨城大学理学部理学科物理学コース

16s2006G

伊藤美穂

論文要旨

本研究では、大質量星形成領域 G025.82–00.17 の 6.7 GHz メタノールメーザーを VLBI でマルチエポック観測（年 1 回の観測を複数年にわたって行う観測）し、そのうちの 1 エポック分の観測データの解析を行い、メーザースポットの空間分布を得た。得られた結果と先行研究の結果の比較を行ったところ、先行研究の結果よりも多くのメーザースポットの数取得でき、先行研究と同様の形状の空間分布が得られた。

目次

第1章	研究背景	3
1.1	大質量星	3
1.2	メタノールメーザー	3
1.2.1	メーザー現象	3
1.2.2	6.7 GHz メタノールメーザー	4
1.3	研究目的	4
第2章	対象天体 G025.82–00.17	4
2.1	天体選出条件について	4
2.2	対象天体 G025.82–00.17 について	5
2.3	メーザースポットに関する先行研究	6
第3章	観測	7
3.1	観測概要	7
第4章	解析手法	9
第5章	結果	11
第6章	考察	12
第7章	今後	14
謝辞		15
参考文献		15

第 1 章 研究背景

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、太陽程度の質量を持つ星に比べて、数が相対的に少なく、より遠方のサンプルを研究対象とする必要があるため、観測が難しい。また、小質量星の形成過程は理解が進んでいるが、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。

1.2 メタノールメーザー

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、2 準位ペアのうち、エネルギーの高い準位の分布数が低い準位の分布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 1.1 に示した。

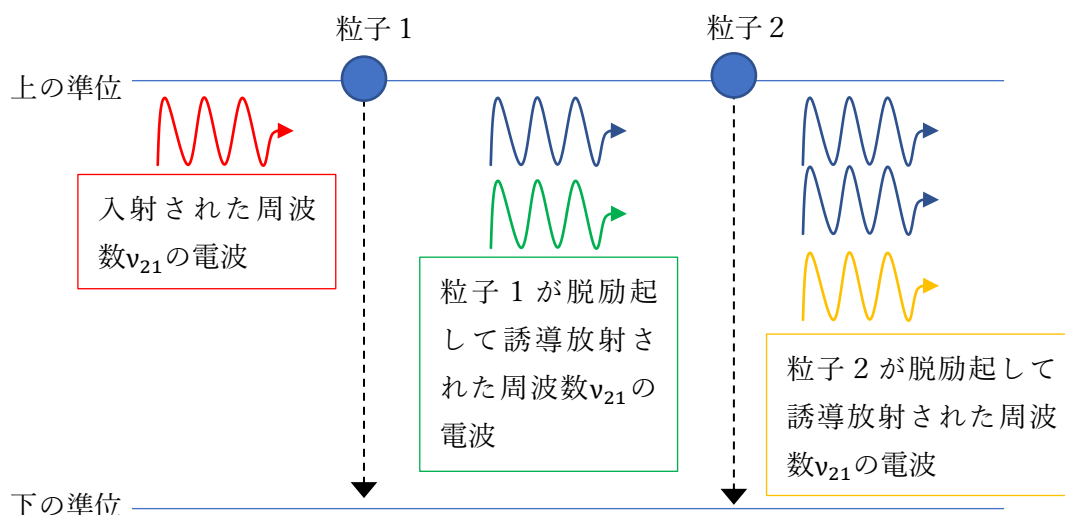


図 1.1 簡易的にメーザー現象を表した図。反転分布であるとき、周波数 ν_{21} の電波が入射してくることによりカスケード的に誘導放射が起こる。

1.2.2 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、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。また、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。

1.3 研究目的

前節であげられたメタノールメーザーの特徴を利用し、年 1 回程度の VLBI 観測を数年間行う。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ができる。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。

第 2 章 対象天体 G025.82–00.17

2.1 天体選出条件について

天体選出条件は次の通りである。

1. EAVN（東アジア VLBI 観測網）によるマルチエポック観測（年 1 回の観測が複数年にわたって行われた観測）の VLBI マップが存在 [Fujisawa et al, 2014]
 2. 杉山他（投稿準備中）でフラックス密度の周期変動が検出されているメーザー天体
 3. フラックス密度の周期変動の極大期および極小期に近い時期に観測が行われた天体
- これらの選出条件に当てはまる 4 天体を表 2.1 に示した。

表 2.1 選出したメーザー天体

天体名	周期
G006.18–00.35	179 日
G012.88+00.48	29.5 日
G025.82–00.17	76 日
G032.04+00.05	58 日

G006.18–00.35 は高木(2020)により解析が行われ、G012.88+00.48 は佐藤（2020）、

G032.04+00.05 は会川(2019)により解析が行われたため、本研究では G025.82–00.17 を解析した。

2.2 対象天体 G025.82–00.17 について

G025.82-00.17 の特徴を表 2.2 に示す。

表 2.2 対象天体の主な特徴

G025.82 -00.17		Refernce
赤経(J2000)	18 ^h 29 ^m 03 ^s .63	[Xu et al, 2009]
赤緯(J2000)	−06° 24′09″.5	
主成分の視線速度	91.2 km/s	
運動学的距離	5.0 kpc	[J.A.Green&N.M.McClure-Griffiths, 2011]
周期 (対応する視線速度)	71 日 (99.57 km/s)	[山口貴大, 2018]

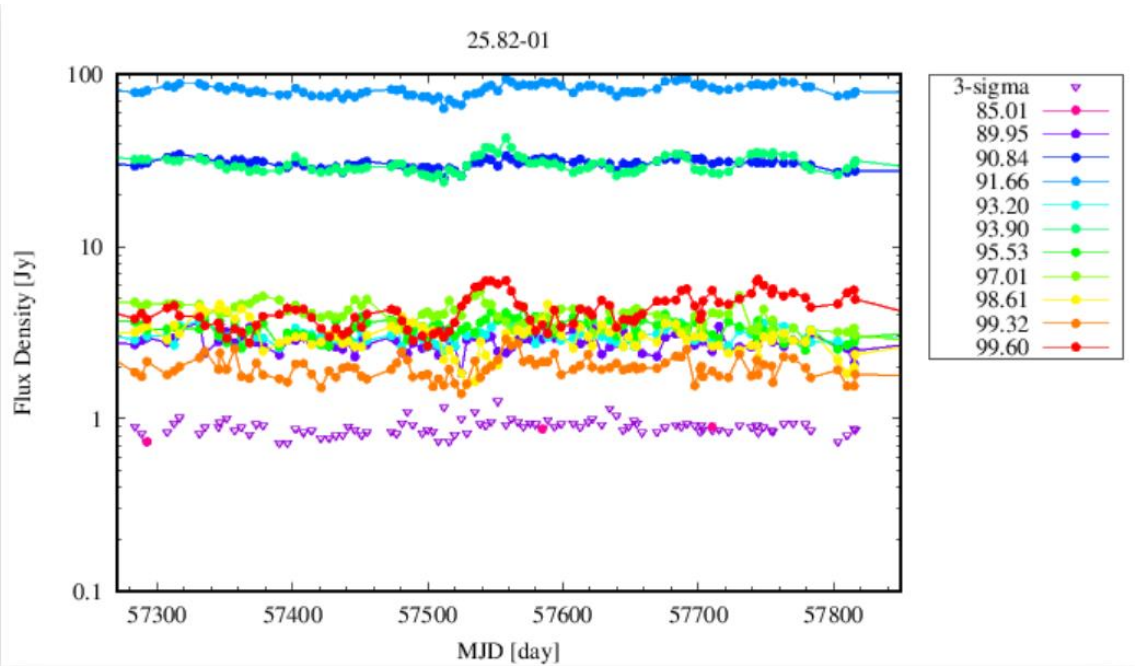


図 2.1 日立モニター観測による強度変動プロット。日立モニター観測にて取得された G025.82–00.17 の各速度成分の強度変化をここに示す。縦軸は対数スケールの強度である。横軸は MJD であり、範囲は 2015 年 9 月 18 日から 2017 年 3 月 7 日 (MJD では 57283 日から 57819 日に相当) である。プロットの色の違いは、LSR 速度の違いを表している。

茨城大学では日立 32 m 電波望遠鏡を用いて 6.7 GHz メタノールメーザー源の高頻度な強度モニター観測を 2012 年末から継続している [Yonekura et al, 2016] (以下、日立モニター観測と呼ぶ)。日立モニター観測により図 2.1 に示した G025.82–00.17 の強度変動が得られている。

2.3 メーザースポットに関する先行研究

先行研究 Fujisawa et al.(2014)により、フラックス密度対 LSR 速度の図 (図 2.2) と G025.82–00.17 のメーザースポットの空間分布 (図 2.3) が得られている。

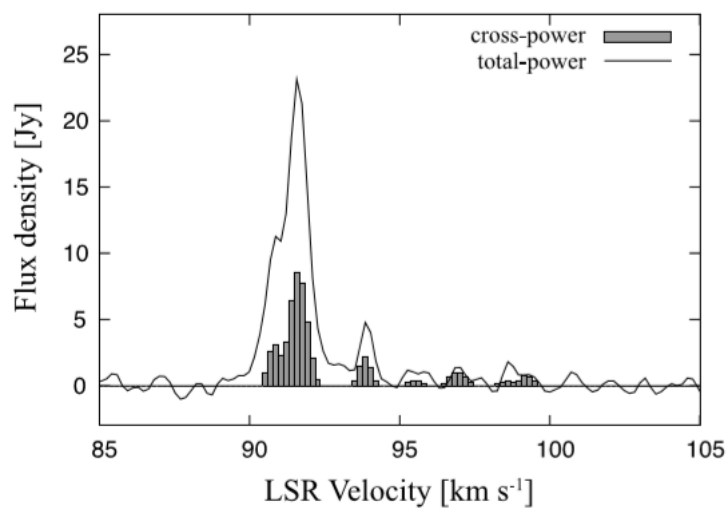


図 2.2 フラックス密度対 LSR 速度 [Fujisawa et al, 2014]

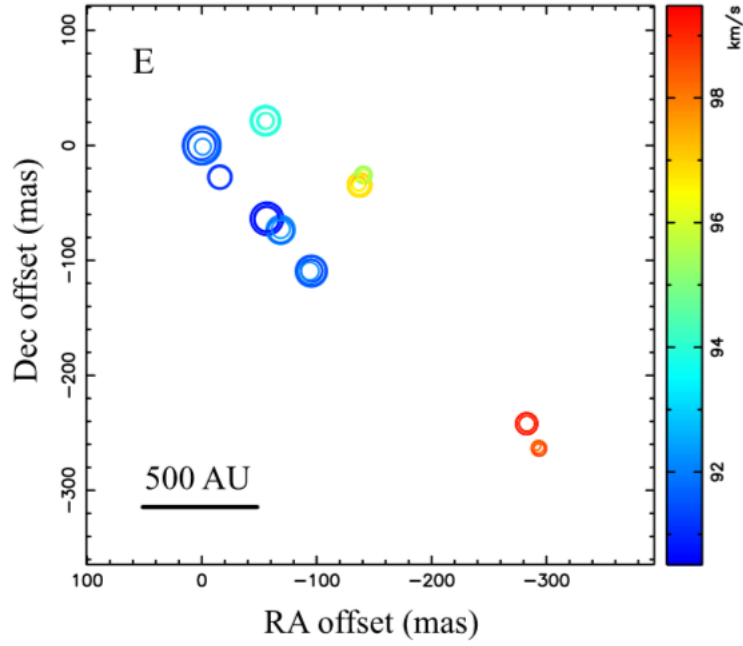


図 2.3 メーザースポットの空間分布 [Fujisawa et al, 2014]。信号対雑音比 >5 であることかつ 2 チャンネル以上連続して同じ位置にスポットが存在することを検出条件とした。スポットのサイズは、対数スケールである。

第3章 観測

3.1 観測概要

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、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、白田 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。このうち、本研究では観測コード U11330AA のメーザースポットの空間分布を求めた。

表 3.1 各観測の詳細

観測コード	U11330AA	U12257A	U13263A
観測日(UT)	2011/11/26 MJD:55891 1:30:00 – 9:00:00	2012/9/13 MJD:56183 6:30:00 – 14:00:00	2013/9/20 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
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		



図 3.1 Google map より作成したアンテナの配置

表 3.2 較正天体

天体名	目的
NRAO530、3C345	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

第4章 解析手法

データの解析は Astronomical Image Processing System (AIPS) 及び Difmap を用いて解析を行った。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

ター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. Delay & Rate 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への特性に起因する効果を除去した。

7. ドップラー較正

チャンネルとそれ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用いてビジビリティの位相・振幅較正をする 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。位相較正を行ったビジビリティのデータをもとに、もう一度分布を描いた。その分布イメージをもとにビジビリテ

ィの位相・振幅を同時に解いた。得られた振幅・位相解をレーザー放射がみられる全チャンネルに適用させた。

1 1. 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、レ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、レ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。パラメーター取得のための高空間分解能マップを作成する際、1 ピクセルが 0.5 mas、縦横がそれぞれ 4096 ピクセルとした。

1 2. メーザースポットのパラメーター取得

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。また、パラメーターを取得する際、信号の検出条件を次のように課した。

- ・信号対雑音比 > 5 であること。
- ・2 チャンネル以上連続して同じ位置にスポットが存在すること。

1 3. 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、チャンネル数は LSR 速度に換算した。作成した空間分布の図は、第 5 章に載せた。

第 5 章 結果

前章で示した検出条件を課した結果、得られたメーザースポットの空間分布は図 5.1 に表した。

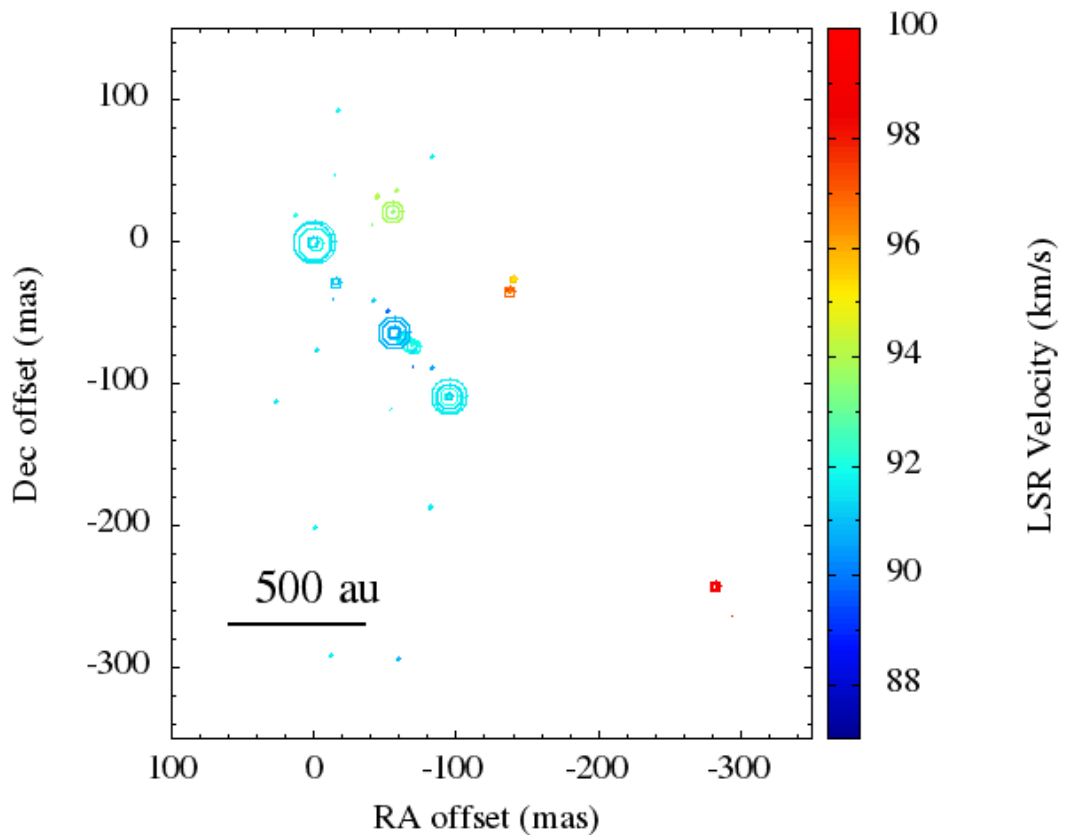


図 5.1 検出されたメーザースポットの空間分布。円の大きさをメーザースポットの強度（リニアスケール）、縦軸と横軸を原点からの相対位置、スポットの色を LSR 速度と指定してプロットをした。

第 6 章 考察

同じ観測日のデータを用いて、本研究と同様の検出条件で解析が行われた先行研究の空間分布（図 2.3）と比較をした。検出されたメーザースポットの数、先行研究では 53 個であったが、本研究では 95 個取得された。メーザースポットの分布の形状は、先行研究では楕円形になっているが、今回の結果では楕円形のほかにいくつかの複数のメーザースポットがみられる。このことから、Dirty image を CLEAN する際、合成ビームのサイドローブの影響が残ってしまい、CLEAN マップに残った可能性がある。作成した CLEAN マップのうちの 1 チャンネル分の CLEAN マップを図 6.1、合成ビームを図 6.2 に載せた。

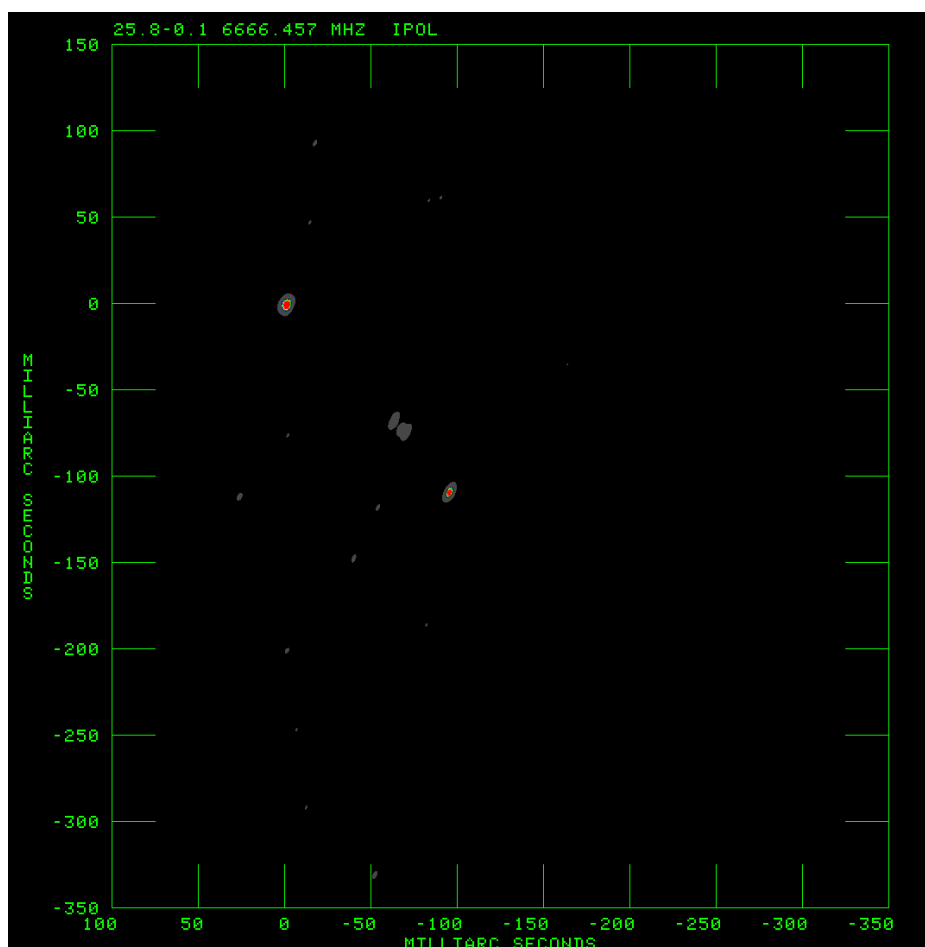


図 6.1 LSR 速度 91.7 km/s に対応するチャンネルの CLEAN マップ。

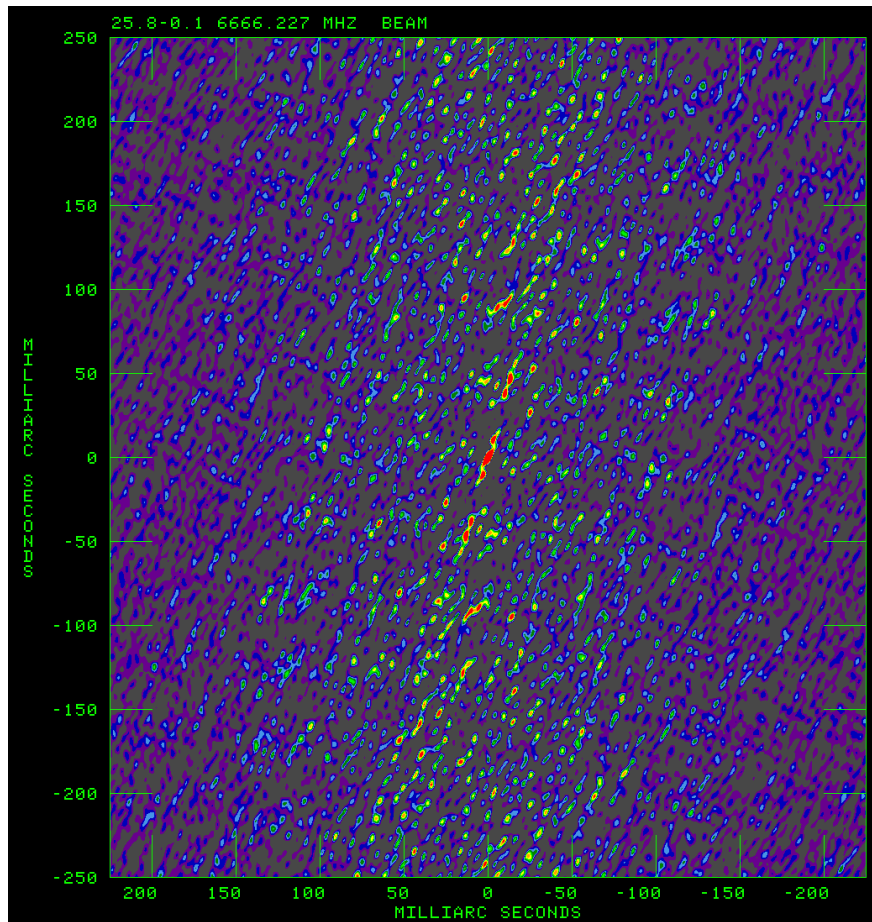


図 6.2 合成ビーム

第7章 今後

CLEAN する際、閾値を今回用いた値とは異なる値にしてより注意深く解析を行う。また、他のエポックの解析を進める。3 エポック分のメーザースポットの空間分布が得られたのち、固有運動を求める。

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教授、米倉覚則教授、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。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。

参考文献

- Fujisawa et al, 2014. *Publ. Astron. Soc. Japan*, pp. 66(2), 31.
J.A.Green&N.M.McClure-Griffiths, 2011.
Xu et al, 2009. *A&A*, pp. 507,1117.
Yonekura et al, 2016. *Publ. Astron. Soc. Japan*, pp. 68(5), 74 .
国立天文台編, 2005. 干渉計サマースクール 2005 教科書.
山口貴大, 2018. 茨城大学大学院理工学研究科.
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.