

高萩 32 m 電波望遠鏡を用いた 19.9 GHz、23.1 GHz
メタノールメーザーの観測による
大質量星形成過程の物理状態の解明

茨城大学大学院理工学研究科理学専攻宇宙物理学コース
24NM154X 村田千和

2026 年 02 月 05 日

目次

第 1 章	イントロダクション	1
1.1	電波天文学	1
1.2	大質量星	1
1.2.1	形成シナリオ	1
1.3	メーザー	2
1.4	メタノールメーザー	2
1.4.1	Class II メタノールメーザー	2
1.4.2	Class II メタノールメーザーの代表遷移	3
1.5	メタノールメーザーの理論モデル	3
1.5.1	非 LTE 放射輸送モデルの枠組み	3
1.5.2	遷移ごとの励起条件の違い	6
1.5.3	19.9 GHz・23.1 GHz メーザーの特異性	7
第 2 章	背景	8
2.1	研究背景	8
2.2	先行研究	9
2.2.1	19.9 GHz	9
2.2.2	23.1 GHz	11
2.3	特異天体	12
2.3.1	W3 (OH)	12
2.3.2	NGC6334F	13
第 3 章	観測	14
3.1	観測諸元	14
3.2	観測概要	14
3.2.1	探査的観測	14
3.2.2	追観測	14
第 4 章	解析方法	16
4.1	解析方法	16
4.2	放射検出の定義	16
第 5 章	探査的観測 結果	18
5.1	観測結果	18
5.1.1	19.9 GHz メタノールメーザー	18
5.1.2	23.1 GHz メタノールメーザー	19

第 6 章	追観測 結果	21
6.1	追観測天体選出方法	21
6.1.1	19.9 GHz	21
6.1.2	23.1 GHz	21
6.2	結果	22
6.2.1	19.9 GHz	22
6.2.2	23.1 GHz	22
6.3	先行研究との比較	23
6.3.1	19.9 GHz	23
6.3.2	23.1 GHz	24
6.4	他周波数との比較	25
6.5	強度変動	27
第 7 章	考察	30
7.1	強度比較	30
7.2	強度変動	32
7.2.1	ダスト熱放射	33
第 8 章	今後の展望	34
第 9 章	まとめ	35
付録 A	観測天体リスト	37
A.1	探査的観測	37
A.2	追観測	38
A.2.1	19.9 GHz	38
A.2.2	23.1 GHz	39
付録 B	4 σ 以上 5 σ 未満のスペクトル	40
B.1	19.9 GHz	40
B.2	23.1 GHz	40

概要

大質量星形成領域は、星形成領域内の光学的厚みが大きい内部構造の観測が困難であり、距離が遠く高い空間分解能を得にくいことも観測を難しくする要因となっている。そのため大質量星の形成過程は未だ十分に理解されていない。メタノールメーザーのうち Class II に分類されるものは大質量星形成領域でのみ検出されるため、大質量星形成過程の解明にメタノールメーザーが有力な手段とされている。6.7 GHz メタノールメーザーは非常に輝度が高く観測が容易であるが、広い範囲の物理状態（ガス温度 $\lesssim 250$ K、ダスト温度 $\gtrsim 100$ K、ガス密度 $\lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、柱密度 10^{11} cm^{-2} – 10^{14} cm^{-2} ）で放射が発生するため、物理状態の特定は困難である。一方、19.9 GHz および 23.1 GHz のメタノールメーザーは、より狭い範囲の物理状態（ガス温度 $\lesssim 50$ K、ダスト温度 100–200 K、ガス密度 10^6 – 10^8 cm^{-3} 、柱密度 $10^{11.3} \text{ cm}^{-2}$ – $10^{13.2} \text{ cm}^{-2}$ ）で検出されることが予想されている (Ellingsen et al., 2004)。6.7 GHz メタノールメーザーでは数多くの観測が行われているが、19.9 GHz および 23.1 GHz メタノールメーザーの観測は 10 例程と少ない。本研究では、観測例の少ない 19.9 GHz、23.1 GHz メタノールメーザーを用いて、大質量星の形成領域内の物理状態の解明を目指した。

本研究では、まず初めに高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて 19.9 GHz および 23.1 GHz メタノールメーザーの観測を、茨城大学で 6.7 GHz および 12.2 GHz メタノールメーザーの同時モニター観測を行っている 434 天体に対して、9 グループのスケジュールに分けて 228 日間実施した。19.9 GHz、23.1 GHz メタノールメーザーの同時観測及び長期モニター観測がされたのは初である。1 回当たりの積分時間は ON 点 5 分、OFF 点 5 分であり、1 天体当たりの総 ON 点積分時間は典型的に 100 分となった。積分した後の典型的なノイズレベル (1σ) は 19.9 GHz では 0.27 Jy、23.1 GHz では 0.34 Jy であった。5 σ 以上の放射は 19.9 GHz と 23.1 GHz で 2 天体、暫定の検出とした 4 σ 以上 5 σ 未満の放射は 19.9 GHz では 8 天体、23.1 GHz では 11 天体で検出された。次に S/N を向上させるための追観測を行った。天体は以下の手順で選定した。追観測を行う天体は、19.9 GHz は 3 σ 以上の放射を検出した天体に対して、6.7 GHz メタノールメーザーの放射速度帯を基準とした分類を行った。19.9 GHz の放射速度帯が 6.7 GHz の放射速度帯と $\pm 1 \text{ km/s}$ 以内で一致するものは毎日観測し、速度が一致していない天体は 3 グループに 1 回観測することとした。23.1 GHz の追観測は、23.1 GHz において 4 σ 以上の放射が検出された天体もしくは、19.9 GHz で毎日観測を行う 52 天体の内、23.1 GHz において 3 σ 以上 4 σ 未満の放射が検出された天体に対して行った。その結果追観測は 19.9 GHz では 80 天体を 55 日、23.1 GHz では 44 天体を 6 日実施した。1 回当たりの積分時間は ON 点 5 分、OFF 点 5 分であり、1 天体当たりの総 ON 点積分時間は典型的に 19.9 GHz で 600 分、23.1 GHz で 150 分となった。天体ごと、周波数ごとに観測データを速度積分した結果、典型的なノイズレベル (1σ) は 19.9 GHz では 0.10 Jy、23.1 GHz では 0.24 Jy であった。検出とした 5 σ 以上の放射は 19.9 GHz と 23.1 GHz で 2 天体、暫定の検出とした 4 σ 以上 5 σ 未満の放射は 19.9 GHz では 4 天体、23.1 GHz では 2 天体で検出された。検出となった 2 天体は、放射ピークの速度帯が先行研究と一致した。先行研究で検出された天体の内、19.9 GHz の 2 天体と 23.1 GHz の 1 天体は口径の差による感度不足のため本研究では検出されなかった。

本研究の観測結果を、各メタノールメーザー輝線放射領域の物理状態と予想される輝度温度の関係モデル (Ellingsen et al., 2004) と比較すると、W3(OH) はガス温度 ≤ 16 K, 144–202 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} または、ガス温度 50 K、ダスト温度 120–141 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 (解なし)、柱密度 10^{12} cm^{-2} 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 $10^{11.1}$ – $10^{11.5} \text{ cm}^{-2}$ といった条件のいずれかを満たしていることが示唆される。NGC6334F はガス温度 ≤ 13 K または ≥ 147 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 111–127 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 (解なし)、柱密度 10^{12} cm^{-2} 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 $10^{11.2}$ – $10^{11.5} \text{ cm}^{-2}$ といった条件のいずれかを満たしていることが示唆される。

今後も追観測によって積分時間を伸ばすことでノイズを小さくし、新検出となる天体を引き続き探索するとともに、検出された天体から放射される他の周波数のメタノールメーザーの観測結果との比較により物理状態の特定を目指す。

Abstract

Massive star-forming regions are difficult to observe due to their high optical thickness, which obscures internal structures. Their great distance and the resulting difficulty in achieving high spatial resolution further complicate observations. Consequently, the formation process of massive stars remains poorly understood. Methanol masers classified as Class 2 are detected only within massive star-forming regions, making methanol masers a powerful tool for elucidating massive star formation processes. The 6.7 GHz methanol maser is highly luminous and easy to observe, but it emits across a wide range of physical states (gas temperature $\lesssim 250$ K, dust temperature $\gtrsim 100$ K, gas density $\lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$, column density 10^{11} cm^{-2} – 10^{14} cm^{-2}) that emit radiation, making it difficult to identify the specific physical conditions. In contrast, the 19.9 GHz and 23.1 GHz methanol masers occur within a narrower range of physical conditions (gas temperature $\lesssim 50$ K, dust temperature 100–200 K, gas density 10^6 – 10^8 cm^{-3} , column density $10^{11.3} \text{ cm}^{-2}$ – $10^{13.2} \text{ cm}^{-2}$) are expected to be detected (Ellingsen et al., 2004). While numerous observations exist for the 6.7 GHz methanol maser, observations of the 19.9 GHz and 23.1 GHz methanol masers are scarce, numbering only about 10 examples. This study aimed to elucidate the physical conditions within massive star-forming regions using the less-observed 19.9 GHz and 23.1 GHz methanol masers.

First, we conducted observations of the 19.9 GHz and 23.1 GHz methanol masers using the Takahagi 32-meter radio telescope. GHz methanol masers using the Takahagi 32-m radio telescope. These observations targeted 434 objects simultaneously monitored for 6.7 GHz and 12.2 GHz methanol masers at Ibaraki University, conducted over 228 days divided into 9 observation schedules. This marks the first simultaneous and long-term monitoring of both 19.9 GHz and 23.1 GHz methanol masers. The integration time per observation was 5 minutes ON and 5 minutes OFF, resulting in a typical total ON-point integration time of 100 minutes per object. The typical post-integration noise level (1σ) was 0.27 Jy at 19.9 GHz and 0.34 Jy at 23.1 GHz. Emission exceeding 5σ was detected in two objects at both 19.9 GHz and 23.1 GHz. Emission between 4σ and 5σ , considered a tentative detection, was found in eight objects at 19.9 GHz and eleven objects at 23.1 GHz. Follow-up observations were then conducted to improve the S/N ratio. Objects were selected using the following procedure. For follow-up at 19.9 GHz, objects exhibiting emission at 3σ or higher were classified based on their 6.7 GHz methanol maser emission velocity band. Objects whose 19.9 GHz velocity band matched the 6.7 GHz velocity band within ± 1 km/s were observed daily. Objects whose velocities did not match were observed once per group of three. Follow-up observations at 23.1 GHz were conducted for objects detecting radiation at 4σ or greater at 23.1 GHz, or for the 52 objects observed daily at 19.9 GHz that detected radiation at 3σ or greater but less than 4σ at 23.1 GHz. As a result, follow-up observations were conducted for 80 objects over 55 days at 19.9 GHz and for 44 objects over 6 days at 23.1 GHz. The integration time per run consisted of 5 minutes ON and 5 minutes OFF, resulting in a typical total ON-point integration time per object of 600 minutes at 19.9 GHz and 150 minutes at 23.1 GHz. After velocity-integrating the observation data per object and per frequency, the typical noise level (1σ) was 0.10 Jy at 19.9 GHz and 0.24 Jy at 23.1 GHz. Radiation detected at 5σ or higher was found in 2 objects at both 19.9 GHz and 23.1 GHz. Radiation detected as tentative at 4σ or higher but less than 5σ was found in 4 objects at 19.9 GHz and 2 objects at 23.1 GHz. The velocity bands of the emission peaks for the two detected objects matched those in previous studies. Among the objects detected in previous studies, two at 19.9 GHz and one at 23.1 GHz were not detected in this study due to insufficient sensitivity caused by the difference in aperture.

Comparing the observational results of this study with the relationship model between the physical state of each methanol maser emission region and the expected brightness temperature (Ellingsen et al., 2004), W3(OH) shows gas temperature $\leq 16\text{K}$, 144–202 K, dust temperature 175 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density 10^{12} cm^{-2} or gas temperature 50 K, dust temperature 120–141 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density 10^{12} cm^{-2} , or gas temperature 50 K, dust temperature 175 K, gas density (no solution), column density 10^{12} cm^{-2} , or gas temperature 50 K, dust temperature 175 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density $10^{11.1}\text{--}10^{11.5}\text{ cm}^{-2}$. NGC6334F has either a gas temperature $\leq 13\text{ K}$ or $\geq 147\text{ K}$, dust temperature 175 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density 10^{12} cm^{-2} , or gas temperature 50 K, dust temperature 111–127 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density 10^{12} cm^{-2} , or gas temperature 50 K, dust temperature 175 K, gas density (no solution), column density 10^{12} cm^{-2} , or gas temperature 50 K, dust temperature 175 K, gas density 10^7 cm^{-3} , column density $10^{11.2}\text{--}10^{11.5}\text{ cm}^{-2}$.

Future follow-up observations will extend the integration time to reduce noise, enabling continued exploration for newly detected objects. We will also aim to determine their physical states by comparing observations with those of methanol masers at other frequencies emitted from the detected objects.

第 1 章

イントロダクション

1.1 電波天文学

電波天文学は、電磁波のうち概ね 30 MHz から 3 THz 程度の周波数帯域を用いる天文学の一分野である。電波帯の光子は他の電磁波帯（可視光、X 線等）と比較してエネルギーが極めて低い一方、その波長はダストの典型的なサイズよりも十分に長い。この特性により、電波はダストによる散乱や吸収の影響を無視し得る。したがって、可視光では遮蔽される大質量星形成領域の深部や高密度分子雲の内部構造、あるいは銀河中心部を、減衰を最小限に抑えて直接的に観測できるという優位性を持つ。可視光や X 線の観測が数万 K 以上の高温ガスや高エネルギー過程の探査に有効であるのに対し、電波観測は数 K から数百 K 程度の低温な星間分子ガスやダスト、あるいは非熱的放射の解析に適している。さらに、電波観測は昼夜を問わず遂行可能であり、大気透過率の高い「大気の窓」を利用することで、安定した長時間積分が可能となる。加えて、電波帯における最大の技術的特徴は、複数のアンテナを用いた「電波干渉計」の実用化にある。これにより、単一のアンテナでは到達不可能な極めて高い角分解能を実現し、天体の微細構造を空間的に分解して解析することが可能となっている。以上のように、電波観測は他の波長帯では代替不可能な相補的かつ不可欠な手法である。

1.2 大質量星

大質量星とは、8 太陽質量未満の星を中小質量星というのに対して、8 太陽質量以上の星のことである。大質量星の形成過程は観測的に解明が難しいという問題がある。一般に、中小質量星形成領域に比べ大質量星形成領域は地球からの距離が遠く（典型的に数 kpc）、角分解能の制限を受けやすい。また高密度のガスやダストに深く埋もれているため、感度の制限を受けやすい。さらに大質量星は形成および進化の時間スケールが短いため形成の初期段階を捉えることが困難である。大質量星形成の機構を理解するためには、質量獲得過程や円盤・アウトフローの形成といった物理過程が顕在化する形成初期段階を直接捉えることが重要である。加えて、大質量星は集団的に星が誕生している領域内で生まれる傾向にある。このような環境では複数の若い恒星やガス・ダストが混在するため、個々の大質量星形成過程を分離して理解することが難しくなる。大質量星は銀河進化において重要な役割を担う一方で、その形成過程は観測的・物理的に複雑である。

1.2.1 形成シナリオ

大質量星の形成過程は中小質量星と比較して形成および進化の時間スケールが短く、かつ形成領域が空間的に密集しており、また遠方に位置することから、形成機構についてはいくつかの理論的枠組みが提案されているものの、完全な統一的な理解には至っていない。現在理論的側面においては、単一の重力束縛コアの崩壊を仮定する「Core Accretion モデル」と、星団形成領域における動的なガス捕獲を重視する「Competitive Accretion モデル」が対立しており、初期条件や質量獲得過程の物理的妥当性について議論が続いている。特に、大質量原始星から放射される強力な輻射圧が降着流を障害する「放射圧問題」をいかに克服し、最終的な

質量を獲得するかという点は、本質的な課題である。近年の観測的研究により、円盤構造やアウトフローによる放射圧の回避が示唆されているが、H II 領域を形成する前段階にある HMPO (High-Mass Protostellar Object)、分子輝線が豊富な高温分子コアである HMC (Hot Molecular Core)、そして紫外放射によって周囲が電離された UC H II (Ultra-Compact H II region) 領域へと進化する段階の各フェーズにおいて、降着様式、周囲ガスの温度・密度構造、ならびに電離の進行といった物理状態がどのように変化・遷移するか各段階を一意に区別できる決定的指標は未だ確立していない。

本研究で着目する分子メーザーは、これら大質量星形成領域の深部において発生し、その種類や空間分布が形成過程の物理状態に敏感に依存することが知られている。したがってメーザースポットの運動学的・空間的解析は、未確立である大質量星形成シナリオを観測的に制約する上で、極めて有効な手法となり得る。

1.3 メーザー

メーザーとは Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (誘導放射によるマイクロ波増幅) の略称であり、誘導放射によって電波が増幅される現象を指す。これをマイクロ波 (Microwave) ではなく光 (Light) の波長にしたものがレーザー (LASER) である。同種粒子間の衝突がない希薄な領域では、分子ガスが高密度の状態になると分子同士の衝突や星からの強い放射によって、特定の分子が励起状態になる。このとき分子のエネルギー準位の分布は LTE(局所熱力学平衡) から外れた、いわゆる非 LTE 条件となる。非 LTE 条件下では、上位のエネルギー準位にある分子の数が下位準位よりも多くなる反転分布が生じることがある。そこへ外部から電波が入射すると、刺激を受けた分子が上の準位から下の準位へ遷移し、同じ周波数の電波を放出する。この過程が繰り返されることで電波は分子ガス中を伝播する間に増幅され、ガス雲を出るときには入射した電波よりもはるかに強い電波となる。こうして非常に明るい電波源が形成される。その結果、観測では極めて狭い線幅をもつ鋭いスペクトル線として現れる。

このためメーザーは、星形成領域の中でも高密度で特殊な物理条件が成立している場所を選択的に示す指標となる。特に若い星の近傍など星形成が活発に進行している領域を捉えることができる点で、星形成研究において重要な観測手段である。

1.4 メタノールメーザー

メタノールメーザーとは、メタノール分子 CH_3OH が励起されてメーザー作用を起こすメーザー源のことである。メタノールメーザーは主として星形成領域において観測されており、明るさでは H_2O (水) メーザーに次いで強いことが観測的に明らかにされている。メタノール分子は複雑な回転構造を持つため、メーザー遷移が多数存在する。実際にメタノールメーザーでは多くの周波数帯においてメーザー遷移が観測されており、星形成領域の物理状態を多角的に調べる手段として有用である。メタノールメーザーは励起機構の違いにより二つのクラスに分類される。一つはアウトフローや周辺のガスの水素分子同士の衝突によって励起される Class I メタノールメーザーであり、もう一つはダストからの赤外線放射によって励起される Class II メタノールメーザーであると考えられている。メタノールメーザーは、励起機構や空間分布の違いが原始星周辺の物理環境の変化を反映するため進化段階のトレーサーとしての可能性を持つ点で星形成研究において重要な役割を果たしている。

1.4.1 Class II メタノールメーザー

Class II メタノールメーザーは、大質量原始星を取り巻く高温ダストからの赤外線放射によって励起されると考えられている。このため、本メーザーは大質量原始星から数百 au 以内の極めて近傍に位置し、大質量原始星や超コンパクト HII 領域と密接な相関を示す。衝突励起が主要因である Class I メタノールメーザーがア

ウトフロー等の広域な相互作用領域をトレースするのに対し、Class II メタノールメーザーは大質量星形成の放射場・密度・ダスト温度といった物理条件を反映していると考えられている Cragg et al. (2005)。

1.4.2 Class II メタノールメーザーの代表遷移

Class II メタノールメーザーには数多くの遷移が存在するが、その検出率や強度は遷移ごとに大きく異なる (Cragg et al., 2005)。最も代表的なものは 6.7 GHz ($5_1 \rightarrow 6_0 A^+$) 遷移であり、大質量星形成領域において最も高い検出率を示す (Ellingsen et al., 1996)。次いで 6.7 GHz メーザーを伴う天体においては 12.2 GHz ($2_0 \rightarrow 3_{-1} E$) 遷移の検出率も高い (Breen et al., 2016)。一方で、本研究の対象である 19.9 GHz ($2_1 \rightarrow 3_0 E$) や 23.1 GHz ($9_2 \rightarrow 10_1 A^+$) といった遷移は、観測的検出例が極めて限られている遷移である (Ellingsen et al., 2004; Wilson et al., 1984; Wilson et al., 1985)。これら多数の遷移が理論的に予測されながら、観測的な検出率に顕著な差が生じる理由は、それぞれの遷移が要求する励起条件 (温度・密度・赤外放射強度) のわずかに異なる物理条件に対する感度の違いに起因すると考えられる (Cragg et al., 2005)。

1.5 メタノールメーザーの理論モデル

1.5.1 非 LTE 放射輸送モデルの枠組み

本節ではメタノールメーザー励起機構について、代表的な理論モデルを基に概説する。

Sobolev and Deguchi (1994) は、Class II メタノールメーザーがどのように励起されるかを準位間遷移ネットワーク (population flow network) として理論的にモデル化し解析する枠組みを提示した。このモデルでは多数の量子準位を持つ分子 (例：メタノール) において、どのようなポンピングサイクルおよび準位間遷移ネットワークが、実際の天体環境下でメーザーの反転分布を安定に維持しうるかが定量的に検討した。さらに自然放射、吸収、誘導放射といった放射遷移に加え、分子間衝突による遷移をすべて含むレート方程式を構築し、非 LTE 条件下における各準位の占有数分布を数値的に求めた。それを解くと同時に、どの遷移経路が反転に寄与を大きくしているかを追跡可能なトレースバック法を構築した。さらにこの手法を使って、飽和の度合いが異なる条件でのメーザー励起の安定性および主要なポンピングルートの変化の可能性を考察した。

これにより、単純な二準位モデルや単一ポンピング経路モデルでは捉えきれない、複雑な励起ダイナミクスを説明可能にした。飽和や遷移間の競合の影響が強いため、同一分子・同一天体でも、ガス密度、ダストによる赤外放射、温度、ビーミング、乱流といった環境条件がわずかに異なるだけで、優勢となるメーザー遷移が変化しうることを示唆される。

Sobolev et al. (1997) は、Class II メタノールメーザーの代表的遷移である 6.7 GHz メーザーの励起機構を理論的に説明したモデル研究である。Sobolev et al. (1997) は Sobolev and Deguchi (1994) によるメーザーの励起モデルを基礎としており、それを拡張することで 6.7 GHz メーザーが広い物理条件下で強く励起される理由を理論的に示した。本モデルでは、Large Velocity Gradient (LVG) 近似を用いて多準位の統計平衡方程式を解くことで、赤外線ポンピングと衝突緩和を導入している。背景 UCH_{II} continuum を仮定していないが、赤外線ポンピングによるねじれ励起を通じた準位間遷移が、複数の回転準位における反転分布を形成する基本的機構として位置づけられた。一方で本モデルでは各遷移が空間的に同一位置に存在すると仮定しているため、複数コンポーネントが存在する場合への適用には限界がある。

Cragg et al. (2002) は、天体における分子メーザー、特に CH_3OH と OH を理論モデリングによって理解しようとした研究である。Cragg et al. (2002) では複数の遷移 (異なる回転準位) を含むメーザー発生の条件を探る包括的モデルが提示され、多遷移・多分子系におけるメーザー発生条件の体系的理解を目的としている。SD (Sobolev & Deguchi) モデル (Sobolev and Deguchi, 1994) におけるメタノールと OH メーザーの振る舞いを 4 つのパラメーター (ダスト温度、ガス温度、ガス密度、柱密度) を変化させながら遷移の反転条件を評価した。計算は通常 4 次元パラメーター空間を単一のパラメーター軸に沿って切断することで実行される。多

遷移を包括するモデルゆえに、密度や温度、メタノール存在量、赤外放射場などの微妙な条件変化によってどの遷移が優位になるかが変わる。

モデルでは、回転準位、トーション準位や振動準位、分子の対称性の違いなどを含む多数の量子準位を考慮したマルチレベル分子モデルを構築した。Cragg et al. (2002) では、自発放射、吸収、誘導放射といった放射遷移に加え、分子間衝突による準位間遷移を含むレート方程式を数値的に解いた。これにより、さまざまな物理環境 (ガス密度、温度、放射場強度、分子濃度、ビーム角度など) における各遷移のシミュレーションを行った。多遷移・多分子に対応するため、パラメータ空間を広く掃引し、どの条件帯でどの遷移が強くなるかをパラメーター空間マップに示した。

Ellingsen et al. (2004) は、Cragg et al. (2002) によるメーザーモデルの枠組みに 19.9 GHz 遷移を組み込んだ。計算結果を図 1.1 に示す。

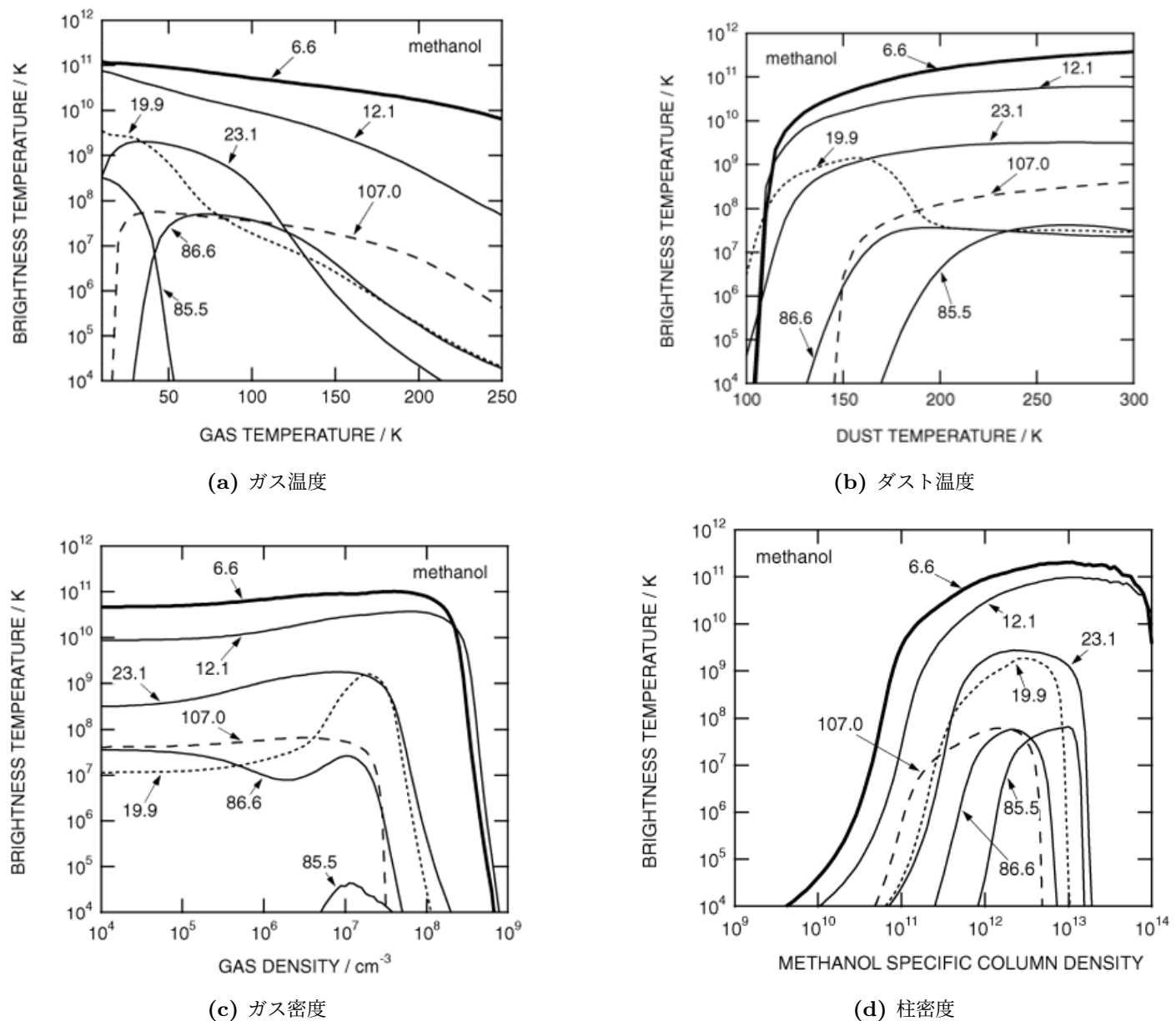


図 1.1: メタノールメーザーの様々な遷移の輝度温度 (縦軸) と物理状態 (横軸) の関係。ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている Ellingsen et al. (2004)。

Cragg et al. (2004) は、Class II メタノールメーザーが 23.1 GHz でどのような物理条件で励起されるかを理論的にモデル化した研究である。観測から得られた 23.1 GHz 非検出 (upper limits) を制約として、新たにモデル計算を行い、23.1 GHz が励起されうるパラメーター領域を調べた。SD モデル (Sobolev and Deguchi, 1994) を用いて、6.7 GHz、23.1 GHz、107.0 GHz のメタノールメーザー放射強度の比とモデルパラメーター (ガス温度、ダスト温度、ガス密度、メタノール柱密度など) の関係をパラメータ空間上にマッピングすること

で行われた。計算結果を図 1.2 に示す。

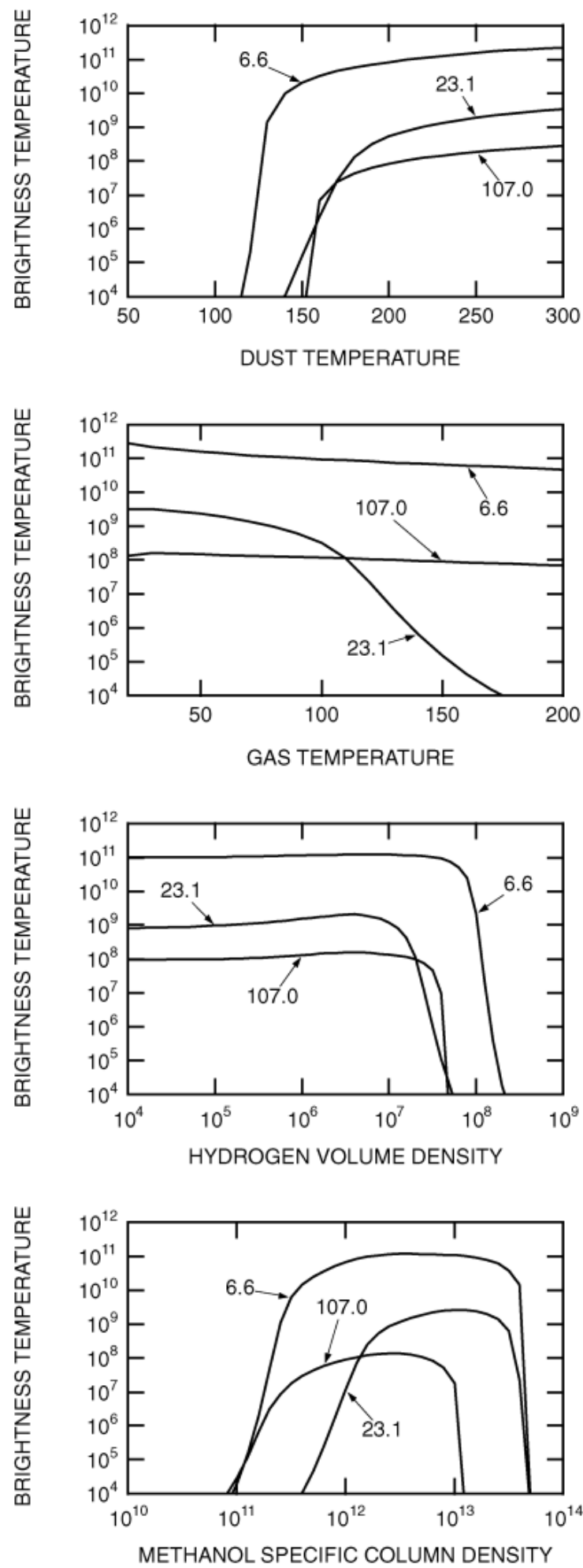


図 1.2: メタノールメーザーの様々な遷移の輝度温度（縦軸）と物理状態（横軸）の関係。ガス温度 75 K、ダスト温度 225 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 $10^{12.5}$ cm $^{-2}$ で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている Cragg et al. (2004)。

Cragg et al. (2005) は、SD モデル Sobolev and Deguchi (1994) をベースにさらに発展させ、Pottage et al. (2001) による新たに得られたメタノールの衝突率係数がメーザーモデルに及ぼす影響を検証した研究である。より多くの回転準位、ねじれ準位を含め、850 程度のレベルまで展開した。ガス温度、ダスト温度、ガス密度、柱密度等を広くスキャンした。遷移について明るさを計算し、どの条件で反転分布が生じるかを評価した。パラメータ探索を繰り返し、観測されるメーザー放射の検出限界と整合する条件の組み合わせを求めた結果、全体的な傾向は先行研究 (Cragg et al., 2004) と概ね一致することが示された。一方でガス密度は概ねわずかに高い値にシフトする傾向がある。過去モデルでは衝突率係数の違いで物理条件がシフトしており、W3(OH) などの稀な源でも理論的整合性が向上する可能性が示された。計算結果は図 1.3 に示す。

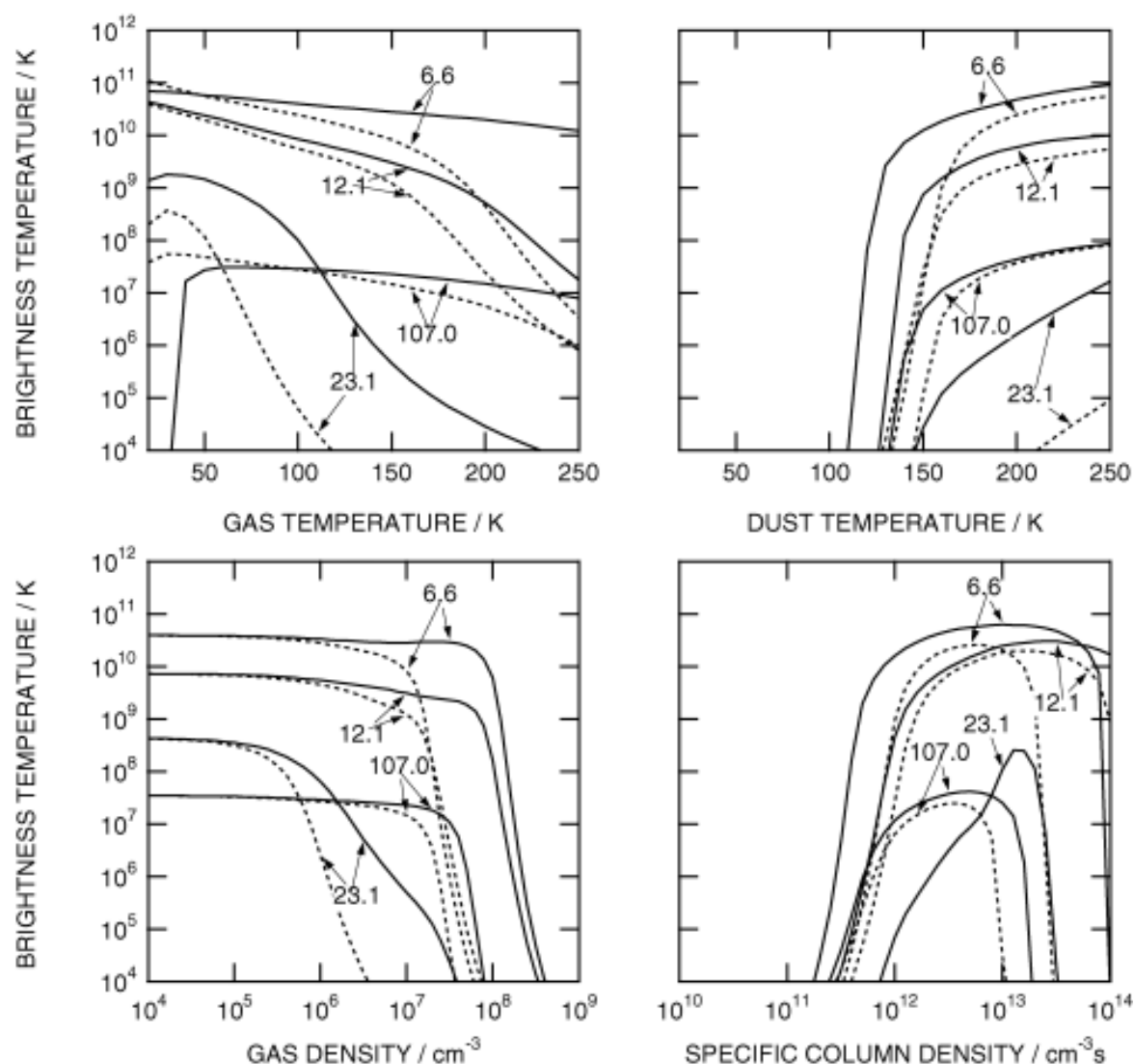


図 1.3: メタノールメーザーの様々な遷移の輝度温度（縦軸）と物理状態（横軸）の関係。異なる衝突率係数を用いた 4 つのメーザーにおけるパラメータ変化が輝度温度に与える影響。実線は新しい PFD 衝突データ、点線は傾向則を用いた。ガス温度 150 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 $10^{12.2} \text{ cm}^{-2}$ で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている (Cragg et al., 2005)。

1.5.2 遷移ごとの励起条件の違い

同一の星形成領域でも、条件が少し変わるだけでどの遷移が支配的かが大きく変わりうる。すなわち遷移の選択性は固定ではなく、ガス密度、温度、メタノール濃度、放射場の強さなどの環境依存である。これらが変われば 6.7 GHz や 12.2 GHz のようなメジャー遷移ではなく、むしろマイナー遷移の方が励起可能になる条件帯がある。これはなぜ観測で 19.9 / 23.1 GHz の検出例が少なく変動的、あるいは特定の環境でのみ検出されるかを理論的に説明する根拠になる (Cragg et al., 2002)。

強い 23.1 GHz 放射に必要な条件はメタノールメーザー源ではまれである。これらはモデル上きわめて特殊

なパラメータの組み合わせを必要とするか、あるいは単純な輻射輸送モデルでは記述できない追加的な物理的特異性を有している可能性を示唆している。更なるモデリングは物理状態を制約する上で有用である一方、高分解能観測によって様々なメーザーの関連性 (19GHz の強いメーザーの位置など) が明らかになった後に行うのが最善である (Cragg et al., 2004)。

その後の研究では、衝突過程の取り扱いが改良されより現実的な励起条件が再評価された。6.7 GHz は広い条件で励起する一方、23.1 GHz はより限定された条件でしか顕著にならない。19.9 GHz や 23.1 GHz のような弱いメーザー遷移も励起可能であるが、励起条件 (ガス密度・ダスト温度・赤外線放射場等) は 6.7 GHz より狭く特異的である。新しい衝突データの導入により必要なガス密度が従来モデルより高くなる傾向があり、23.1 GHz の励起がより限定的である理論的根拠となる (Cragg et al., 2005)。

1.5.3 19.9 GHz・23.1 GHz メーザーの特異性

Class II メタノールメーザーの多数の回転・振動・ねじれ準位を含む非 LTE マルチレベルモデル解析 (Sobolev and Deguchi, 1994) では、メーザーの反転分布は単一あるいは少数のポンピングサイクルによって維持されるのではなく、多数の弱い経路の総和によって形成されることが示された。この結果は、メーザー励起が特定の遷移に対して極めて敏感であることを意味する。特に 6.7 GHz のような高検出率遷移では比較的広い物理条件下で複数のポンピング経路が有効となるのに対し、19.9 GHz や 23.1 GHz といったレア遷移では、有効なポンピング経路の数が限られ、特定のガス密度・ダスト温度・赤外線放射強度の条件が同時に満たされる必要がある。さらに、メーザーが飽和状態に近づくと、準位間の遷移ネットワークにおいて特定の遷移が反転分布のボトルネックとして機能し、分子がその準位から下位へ遷移しにくくなる。このボトルネック遷移は、反転分布を維持する一方で、メーザー強度の増大を抑制する役割を果たし、結果として各遷移ごとに理論的な最大フラックスを規定する。このような性質から、19.9 GHz および 23.1 GHz のメーザーは、わずかな環境の違いによって励起・消失が左右されやすい。

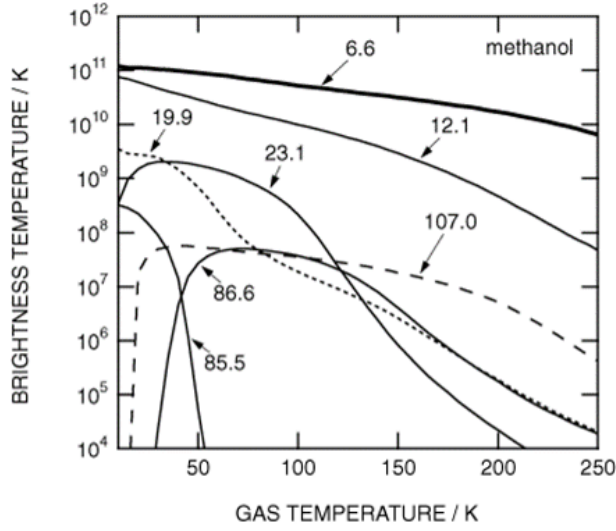
観測的には、19.9 GHz メーザーは一部の天体で 6.7 GHz メーザーと大まかに同じ領域 ($\lesssim 0.2$ arcsec) に存在する可能性が示されているが、空間的・速度的分布の詳細は一致せず、両者が必ずしも同一の物理条件下で励起されているわけではない (Krishnan et al., 2013)。19.9 GHz メーザー源は、一般に強力な UC H II 領域と関連する傾向があり (Ellingsen et al., 2004)、より大きな Class II メーザークラスター内の高検出率遷移とは異なる条件下で励起されることが期待される。これらの特異性は、観測で 19.9/23.1 GHz メーザーが少数かつ変動的に検出される理由を理論的に説明する根拠となる。高分解能観測によって、異なる遷移間の位置関係や速度分布が明らかになった後に、マルチ遷移モデルを用いた詳細な物理条件の評価が有効となる (Cragg et al., 2002, 2004, 2005)。

第 2 章

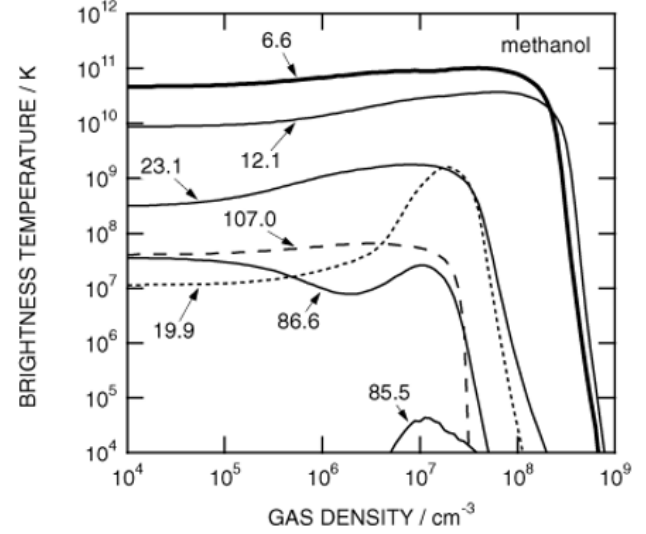
背景

2.1 研究背景

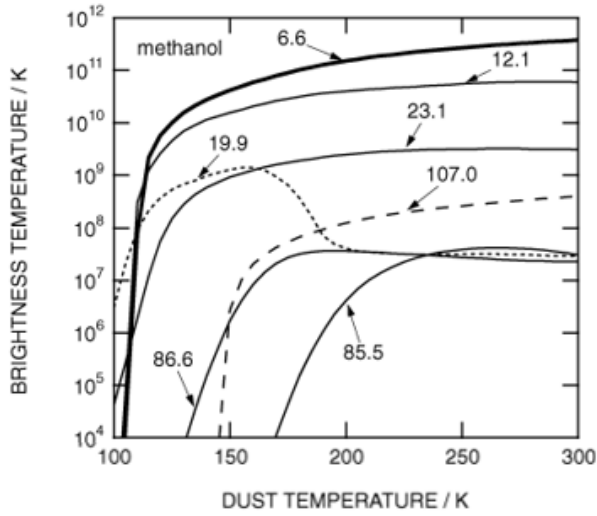
メタノールメーザーは大質量星形成領域でのみ検出されるため、大質量星形成過程の解明に有効である。6.7 GHz メタノールメーザーでは数多くの観測が行われており、1000 天体以上が検出されている (Caswell et al., 2010; Breen et al., 2015)。6.7 GHz メタノールメーザーは、広い範囲の物理状態 (ガス温度 $\lesssim 250$ K、ダスト温度 $\gtrsim 100$ K、ガス密度 $\lesssim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、柱密度 $10^{10.5} \text{ cm}^{-2} - 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) で強く放射されると予想されるため、物理状態の特定は困難である。一方、19.9 GHz および 23.1 GHz のメタノールメーザーは、より狭い範囲の物理状態 (ガス温度 $\lesssim 50$ K、ダスト温度 100–200 K、ガス密度 $10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$ 、柱密度 $10^{11.3} \text{ cm}^{-2} - 10^{13.2} \text{ cm}^{-2}$) で検出されると予想されており (図 2.1、Ellingsen et al. 2004 より引用)、本研究の観測が物理状態の特定に大きく貢献すると考えられる。



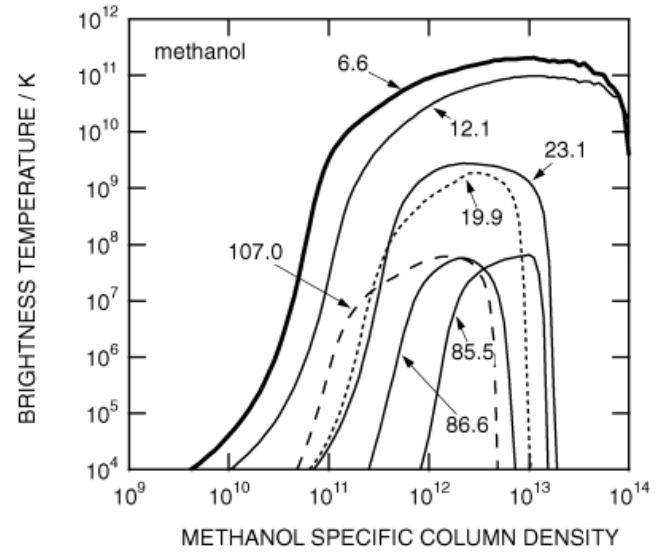
(a) ガス温度



(b) ガス密度



(c) ダスト温度



(d) 柱密度

図 2.1: 各周波数におけるメタノールメーザーの輝度温度(縦軸)と物理状態(横軸)の関係。ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている。(Ellingsen et al., 2004)

2.2 先行研究

2.2.1 19.9 GHz

先行研究で検出された天体はこれまでで 11 天体しかない。検出された天体を表 2.2、先行研究で検出された天体の内日本から観測することができる天体のスペクトルを図 2.2 に示す。

19.9 GHz のメタノールメーザーの観測諸元はそれぞれ、ドイツ Effelsberg 100 m (Wilson et al., 1985)、アメリカ Green Bank 43 m で 4 日間 (Menten and Batrla, 1989)、オーストラリア Tidbinbilla 70 m で 6 日間、ノイズレベル (1σ) 0.1 Jy、1 天体当たりの典型的な積分時間 600 s (Ellingsen et al., 2004)、オーストラリア Compact Array で 1 日間、ノイズレベル (1σ) 0.1 Jy、1 天体当たりの典型的な積分時間 35 min (2100 s) (Krishnan et al., 2013)、ロシア RT-22 22 m で 1 天体当たりの典型的な積分時間は 5 min (Volvach et al., 2019) で行われた。いずれも短期間観測である。

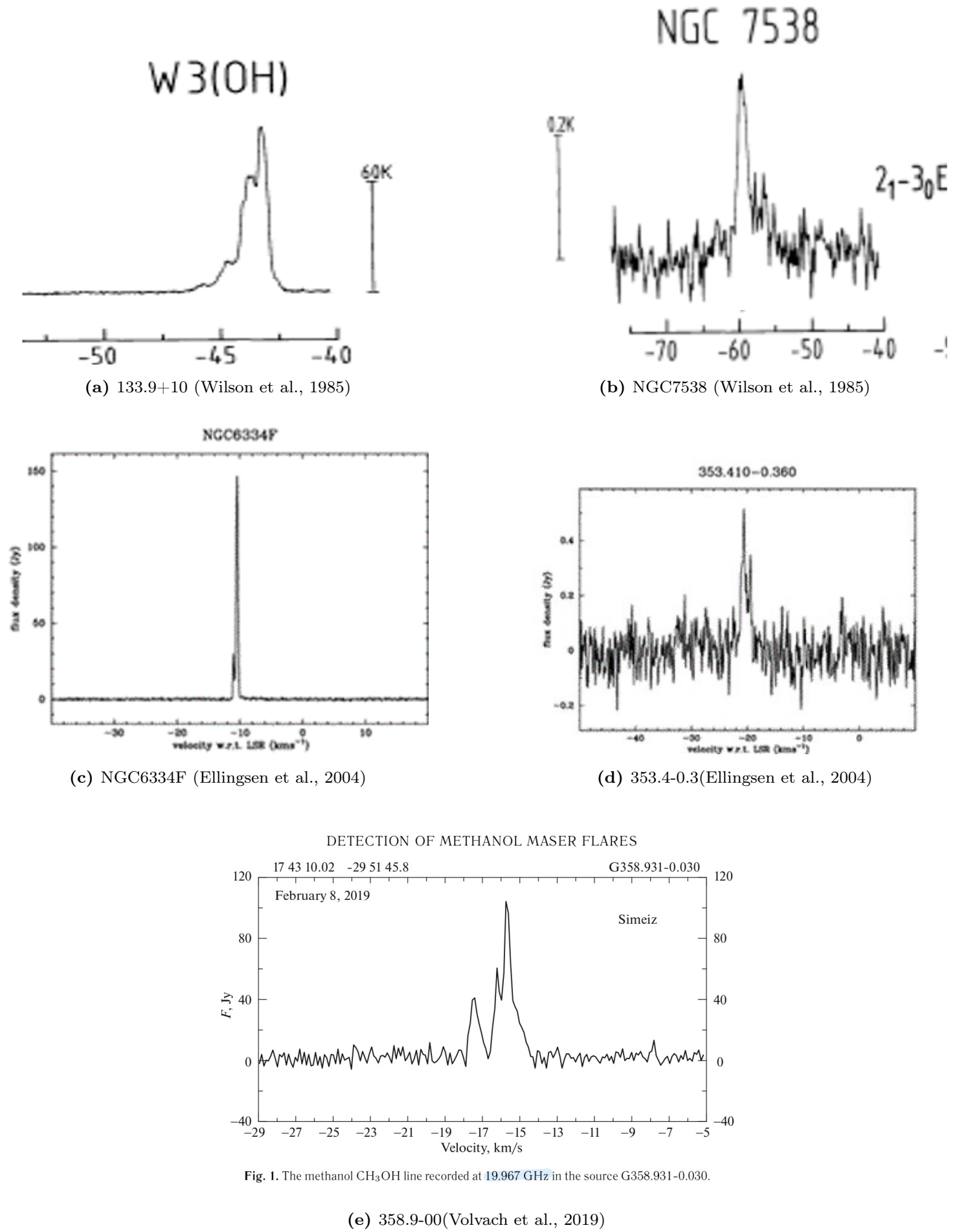


図 2.2: 先行研究で 19.9 GHz メタノールメーザーが検出された天体のうち、日本から観測可能な 5 天体のスペクトル

表 2.1: 19.9 GHz で検出された天体

天体名	観測コード*	初検出論文	日本からの観測	備考
W3(OH)	133.9+10	Wilson et al. (1985)	可能	
NGC7538	111.5+07	Wilson et al. (1985)	可能	
NGC6334F	NGC6334F	Menten and Batrla (1989)	可能	
323.740-0.263		Ellingsen et al. (2004)		
328.808+0.633		Ellingsen et al. (2004)		
339.884-1.259		Ellingsen et al. (2004)		
345.003-0.223		Ellingsen et al. (2004)		
345.010+1.792		Ellingsen et al. (2004)		
353.410-0.360	353.4-0.3	Ellingsen et al. (2004)	可能	
G309.921+0.479		Krishnan et al. (2013)		
G358.931-0.030	358.9-00	Volvach et al. (2019)	可能	2019.10 バースト時

*茨城大学が行なっているメタノールメーザーの観測で用いられている観測コードを示している。

表 2.2: 23.1 GHz で検出された天体

天体名	観測コード*	初検出論文	日本からの観測	備考
W3(OH)	133.9+10	Wilson et al. (1984)	可能	
NGC7538	111.5+07	Wilson et al. (1984)	可能	
NGC6334F	NGC6334F	Menten and Batrla (1989)	可能	
NGC6334I-MM1		MacLeod et al. (2018)	可能	2015.08 バースト時
G358.931-0.030	358.9-00	MacLeod et al. (2019)	可能	2019.03 バースト時

*茨城大学が行なっているメタノールメーザーの観測で用いられている観測コードを示している。

2.2.2 23.1 GHz

検出された天体はこれまでで 5 天体しかない。検出された天体を表 ??、先行研究で検出された天体の内日本から観測することができる天体のスペクトルを図 2.3 に示す。

NGC6334I-MM1 はモニター観測^{*1}を行っていない。

23.1 GHz のメタノールメーザーの観測は、ドイツ Effelsberg 100 m で観測 (Wilson et al., 1984)、ドイツ Effelsberg 100 m で 1 日間、ノイズレベル (1σ) 0.2 Jy、1 天体当たりの典型的な積分時間 18 min (1080 s) (Menten et al., 1985)、アメリカ Green Bank 43 m で 4 日間 (Menten and Batrla, 1989)、オーストラリア Parkes antenna 64 m で 6 日間、ノイズレベル (1σ) 0.3 Jy、積分時間 30 min (1800 s) (Cragg et al., 2004)、アメリカ VLA で 2 日間、ノイズレベル (1σ) 0.2 Jy、1 天体当たりの典型的な積分時間 60 min (3600 s) (Galván-Madrid et al., 2010)、南アフリカ Hartebeesthoek 26 m (MacLeod et al., 2018)、南アフリカ Hartebeesthoek 26 m (MacLeod et al., 2019) で行われた。いずれも短期間観測である。

^{*1} 茨城大学グループが、日立・高萩 32-m 電波望遠鏡を用いて 450 天体程度のメタノールメーザー源に対して 6.7 GHz などのメタノールメーザーで行なっている観測の事

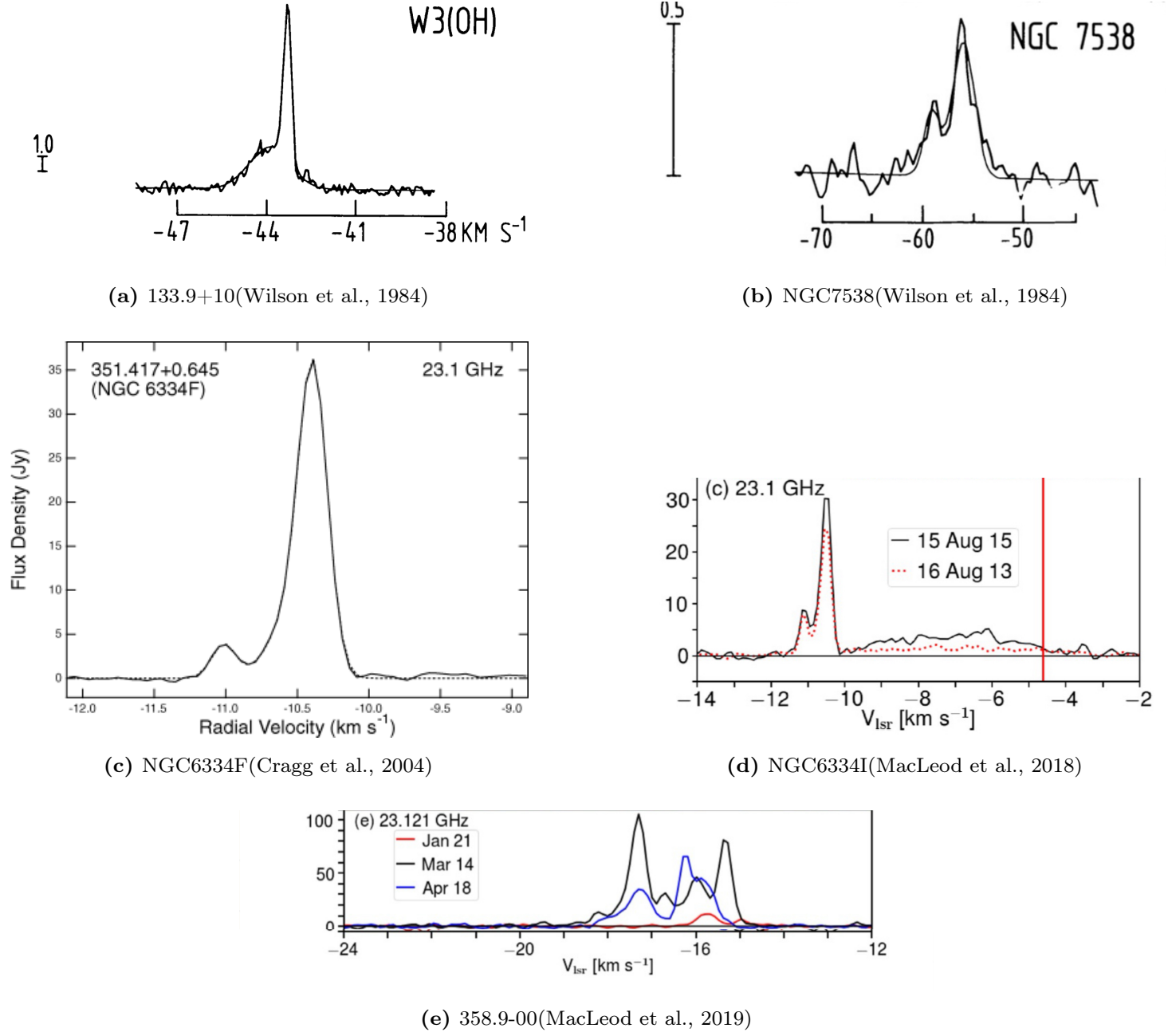


図 2.3: 先行研究で 23.1 GHz メタノールメーザーが検出された天体のスペクトル

2.3 特異天体

2.3.1 W3 (OH)

W3(OH) は銀河系内に存在する代表的な大質量星形成領域であり、強い電波連続波放射を伴う UC H II 領域である。W3 はカシオペア座の方向にあり、2.04 kpc (Hachisuka et al., 2006) の距離に位置している。

本天体の最も顕著な特徴の一つは、電波連続波放射が非常に強いことである。W3(OH) に付随する UC H II 領域は高い電子密度を持ち、センチメートル波帯において高輝度の自由-自由放射を示す。この強い連続波放射は、メーザー放射の背景源として機能しうる点で重要である (Wilson et al., 1985)。W3(OH) は、OH、H₂O、ならびに複数の Class II メタノールメーザー遷移が共存する数少ない天体の一つであり (Menten, 1991)、メーザー発生環境として極めて豊富な情報を与える。このため、本天体は観測的研究のみならずメーザー励起理論の検証対象としても長年にわたり参照されてきた (Sobolev and Deguchi, 1994; Cragg et al., 2002, 2005)。

以上の理由から W3(OH) はメタノールメーザー研究における「特異天体」として位置づけられ、本研究においても重要な観測対象として扱う。

2.3.2 NGC6334F

NGC6334F は、さそり座方向に位置する大質量星形成領域 NGC6334 内に存在する、強い電波連続波放射を伴う UCH II 領域である。NGC6334 は銀河系内でも特に活発な星形成を示す領域の一つとして知られており、その内部には複数の赤外線源および H II 領域が存在する（例えば Rodríguez et al. 1982）。その中でも NGC6334F は、強い電波連続波放射と多様なメーザー放射が共存する点で際立った天体である。

NGC6334F では、OH メーザーおよび H₂O メーザーに加え、6.7 GHz や 12.2 GHz に代表される Class II メタノールメーザーが検出されており、Class II メーザーの典型的な環境を備えた天体と考えられている（Menten 1991; Ellingsen et al. 1996）。特に、本天体は 19.9 GHz および 23.1 GHz メタノールメーザーが検出された極めて限られた天体の一つであり（Wilson et al. 1985; Krishnan et al. 2013）、理論的にも厳しい励起条件が要求される遷移が実際に成立している例として重要である。

強い電波連続波放射を背景とする点や、複数の Class II メタノールメーザー遷移が共存する点において、NGC6334F は W3(OH) と多くの共通点を持つ。一方で、空間構造や速度分布には遷移間での違いも報告されており、これらは単一の励起条件では説明できない可能性を示唆している（Cragg et al. 2005）。このように NGC6334F は、19.9 GHz・23.1 GHz メタノールメーザーの特異性を検討する上で、W3(OH) と並ぶ重要な天体である。



図 2.4: NGC6334 [ESO]

第 3 章

観測

3.1 観測諸元

観測諸元を表 3.1 に示す。また観測を行った天体のリストを付録 A に示す。

表 3.1: 観測諸元

使用電波望遠鏡	高萩局
使用周波数	19.9673961 GHz 23.1210242 GHz
観測周波数範囲	19.951 – 19.983 GHz 23.105 – 23.137 GHz
帯域幅	32 MHz
分光点数	8192
速度範囲	19.9 GHz : 505.26 km s ⁻¹ 23.1 GHz : 417.39 km s ⁻¹
周波数分解能	約 3.91 kHz
速度分解能	19.9 GHz : 0.0616 km s ⁻¹ 23.1 GHz : 0.0510 km s ⁻¹
積分時間	ON 点 5 分、OFF 点 5 分

3.2 観測概要

高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて 19.9 GHz、23.1 GHz メタノールメーザーを観測を 2 種類のパターンで実施した。

3.2.1 探査的観測

高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて 19.9 GHz、23.1 GHz メタノールメーザーの探査的観測を行った。2023 年 11 月時点で、茨城大学で 6.7 GHz と 12.2 GHz メタノールメーザーの同時モニター観測が行われていた 434 天体に対して、9 日間に分けて観測を実施した。観測概要は表 3.2 に示す。

3.2.2 追観測

高萩 32 m 電波望遠鏡を用いて 19.9 GHz、23.1 GHz メタノールメーザーに対して、天体数を絞って追観測を行った。追観測の観測天体の選定基準については、6.1 章に示す。観測概要は表 3.3 に示す。

表 3.2: 探査的観測における観測概要

観測日	19.9 GHz : 2023/12/21–2025/02/05 (228 日) 23.1 GHz : 2024/04/15–2025/02/05 (201 日) 2024/04/15–2025/02/05 (201 日) は同時観測
観測天体数	434 天体
観測スケジュール	434 天体を 9 グループに分割して観測 W3(OH)、NGC6334F は毎グループで観測
ノイズレベル (1σ) の典型値*	19.9 GHz 1.03 Jy 23.1 GHz 2.06 Jy
積分後のノイズ (1σ) の典型値*	19.9 GHz 0.27 Jy 23.1 GHz 0.34 Jy
1 天体当たり積分した スキャン数の典型値	19.9 GHz 26 23.1 GHz 23

* 開口能率およびその仰角依存性を、仰角によらず開口能率を 30 % と仮定した。

表 3.3: 追観測における観測概要

観測日	19.9 GHz : 2025/10/12–2026/01/07 (55 日) 23.1 GHz : 2025/12/11–2025/01/08 (6 日) 追観測は同時観測を行っていない
観測天体数	19.9 GHz : 80 天体 23.1 GHz : 44 天体
観測スケジュール	19.9 GHz : 80 天体を 3 グループに分割して観測 23.1 GHz : 44 天体を 1 グループで観測 W3(OH)、NGC6334F は毎グループで観測
積分後のノイズ (1σ) の典型値*	19.9 GHz 0.10 Jy 23.1 GHz 0.24 Jy
1 天体当たり積分した スキャン数の典型値	19.9 GHz 44 23.1 GHz 29

* 開口能率およびその仰角依存性を、仰角によらず開口能率を 30 % と仮定した。

第 4 章

解析方法

4.1 解析方法

Chopper-Wheel 法によるアンテナ温度の導出、ドップラー補正による周波数から V_{lsr} 速度への変換、Flux 密度の校正、baseline の除去は、観測終了後自動で行われる。その後の解析を python を用いて行った。各天体の 1 観測日内のデータに対して速度方向 3 点移動平均を適用した。それに対してノイズ評価を行い、rms が 5σ (6.86 Jy に対応) を超えるデータは信頼性が低いと判断し、以降の解析から除外した。除外したデータ以外に対して、除外作業とは別に生データをノイズの -2 乗の重み付き平均をし、3 点移動平均、3 次多項式でベースラインフィットを行った。

$v2$ と $v3$ の間が、6.7 GHz のメーザー放射が見られる速度範囲である。 $v1$ と $v2$ の間および、 $v3$ と $v4$ の間の 2 つが、baseline の速度範囲である。baseline の速度範囲は、baseline fit を行う場合や、ノイズレベルを求める場合に使う。 $v1$ から $v4$ の範囲でスペクトルを作成した。これを図示したものを図 4.1 に示す。

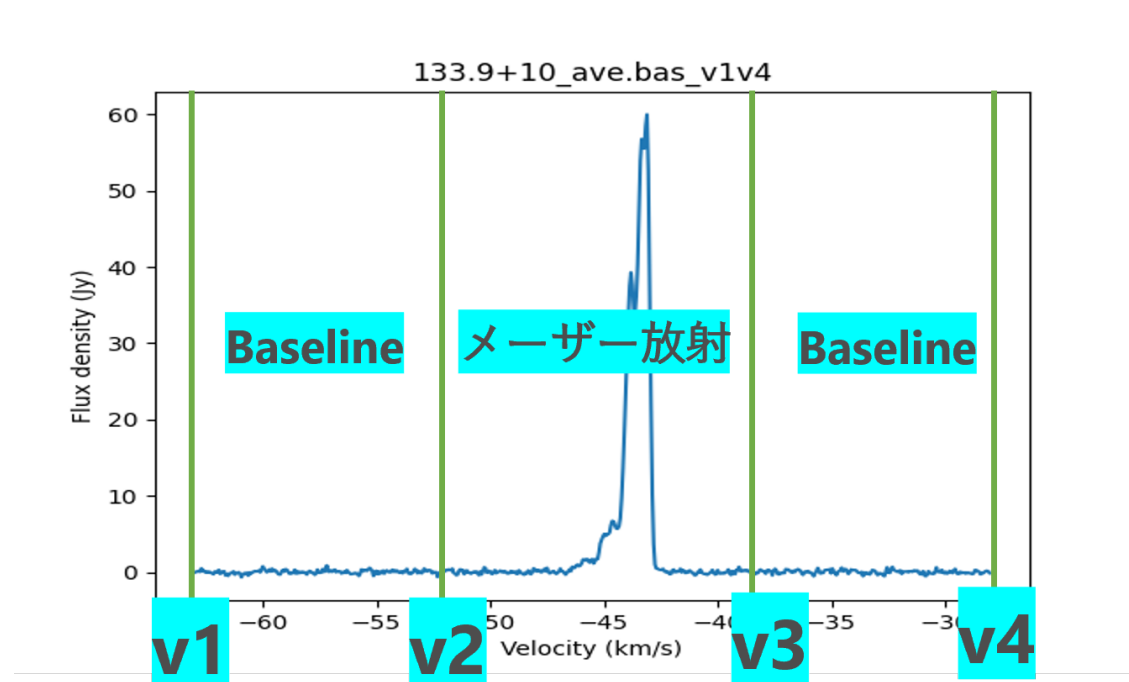


図 4.1: $v1$, $v2$, $v3$, $v4$ の関係

4.2 放射検出の定義

観測されたスペクトルの各チャンネルの強度がランダムなノイズである場合、標準正規分布に従う。標準正規分布で、 1σ より大きい値を持つ確率は 15 %、 3σ より大きい値を持つ確率は、0.1 %、 5σ より大きい

値を持つ確率は、 $2.75 \times 10^{-5} \%$ 。つまり、ノイズが 3σ よりも大きい値を持つ確率は 0.1% なので、 3σ よりも大きい値が検出された場合、それがノイズである可能性は非常に低い。言い換えるとその信号は真の放射であると考え事ができる。しかし実際にはランダムノイズでない可能性があるので、今回は 4σ 以上 5σ 未満の放射を暫定的な検出、 5σ 以上の放射を検出とみなす。

第 5 章

探査的観測 結果

5.1 観測結果

5.1.1 19.9 GHz メタノールメーザー

19.9 GHz メタノールメーザーの検出天体数を表 5.1 に示す。

表 5.1: 19.9 GHz における検出強度区分ごとの天体数

検出強度区分	天体数
$S < 3\sigma$	209
$3\sigma \leq S < 4\sigma$	214
$4\sigma \leq S < 5\sigma$	9
$5\sigma \leq S$	2

4 σ 以上 5 σ 未満の放射が見られた天体は、13.71-00、16.58-00、174.1-00、2.615+01、24.93+00、30.98-00、34.10+00、38.12-02、45.47+00 である。5 σ 以上の放射が見られた天体は、133.9+10、NGC6334F である。5 σ 以上の放射が見られた天体のスペクトルを図 5.1 に示す。先行研究で検出された天体 (バースト天体を除く) の内、353.4−0.3、111.5+07 は本観測において 3 σ 未満のフラックス密度であった。353.4−0.3 を検出した Ellingsen et al. (2004) では、オーストラリアの Tidbinbilla 70 m 鏡を用いて、ノイズレベル (1 σ) ~ 0.1 Jy が報告されている。口径 $D = 32$ m の望遠鏡で同等の感度を得るには $(32/70)^2 \simeq 0.21$ 倍の感度、すなわち ~ 0.02 Jy 程度のノイズレベルが必要となる。同様に、111.5+07 を検出した Wilson et al. (1985) では、Effelsberg 100 m 鏡によりノイズレベル (1 σ) ~ 0.1 Jy が得られている。したがって口径 $D = 32$ m の望遠鏡では $(32/100)^2 \simeq 0.10$ 倍の感度、すなわち ~ 0.01 Jy 程度のノイズレベルが必要となる。探査的観測のノイズレベルは 0.27 Jy のため、感度不足で 353.4−0.3、111.5+07 は本観測において検出とならなかった。

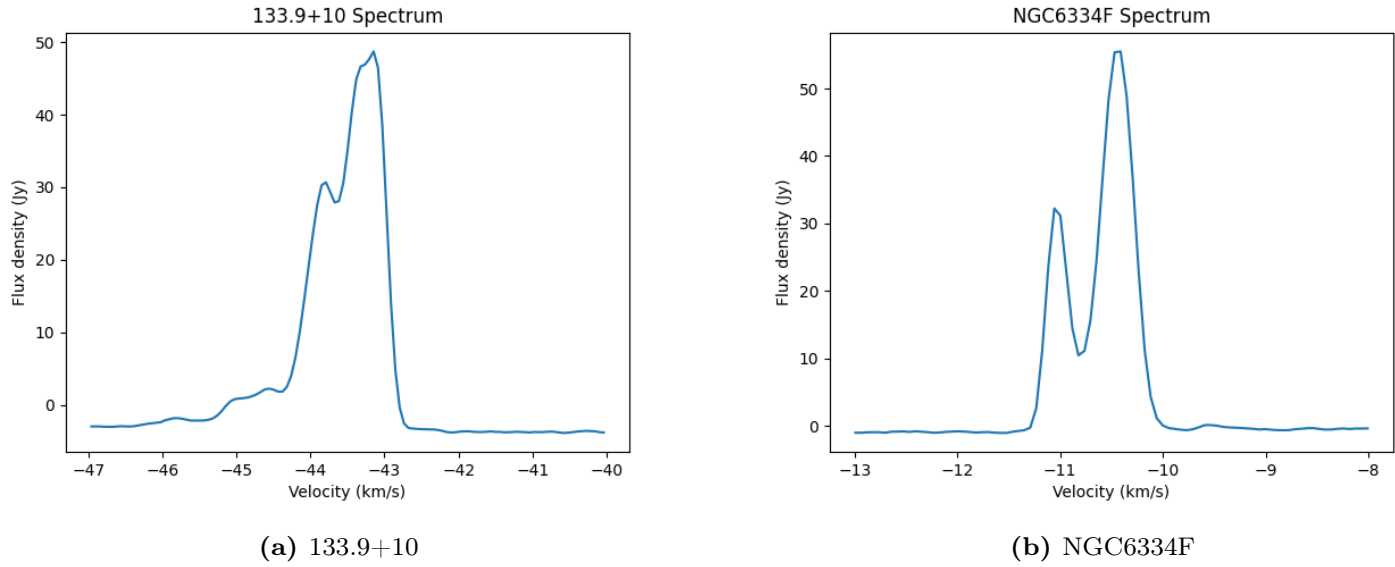


図 5.1: 5σ 以上の放射が見られた天体のスペクトル

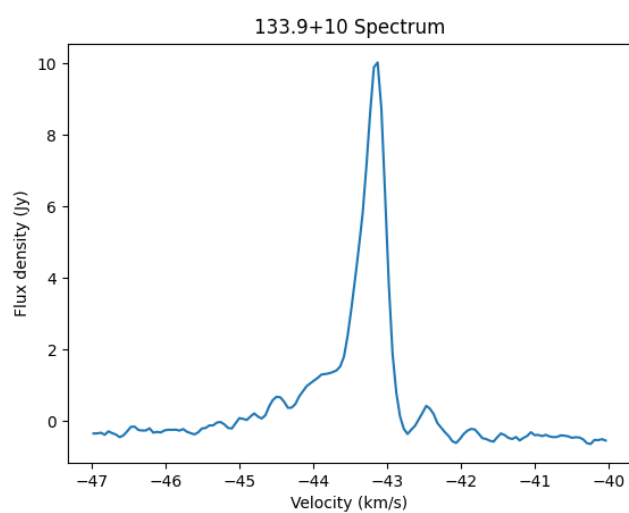
5.1.2 23.1 GHz メタノールメーザー

23.1 GHz メタノールメーザーの検出天体数を表 5.2 に示す。

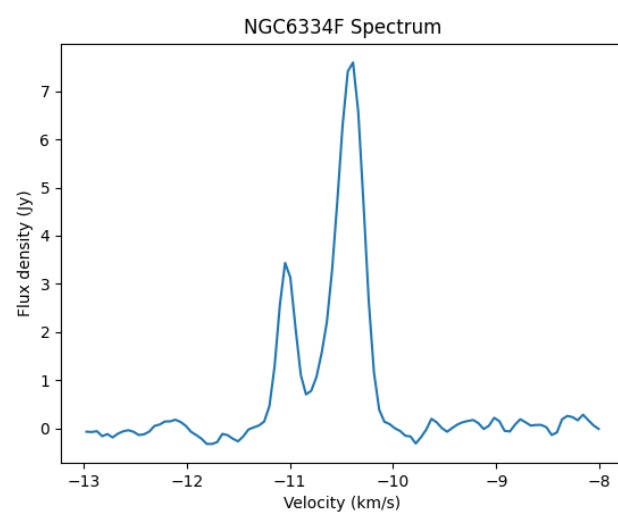
表 5.2: 23.1 GHz における検出強度区分ごとの天体数

検出強度区分	天体数
$S < 3\sigma$	168
$3\sigma \leq S < 4\sigma$	253
$4\sigma \leq S < 5\sigma$	11
$5\sigma \leq S$	2

4σ 以上 5σ 未満の放射が見られた天体は、12.90-00、28.39+00、32.97+00、33.09-00、37.47-01、41.08-01、43.15+00、45.44+00、49.62-03、C19.0-02、G65.7-20 である。 5σ 以上の放射が見られた天体は、133.9+10、NGC6334F である。 5σ 以上の放射が見られた天体のスペクトルを図 5.2 に示す。先行研究で検出された天体（バースト天体を除く）の内、111.5+07 は本観測において 3σ 未満のフラックス密度であった。111.5+07 を検出した Wilson et al. (1984) では、Effelsberg 100 m 鏡によりノイズレベル (1σ) ~ 0.1 Jy が得られている。したがって口径 $D = 32$ m の望遠鏡では $(32/100)^2 \simeq 0.10$ 倍の感度、すなわち ~ 0.01 Jy 程度のノイズレベルが必要となる。探査的観測のノイズレベルは 0.34 Jy のため、感度不足で 111.5+07 は本観測において検出とならなかった。



(a) 133.9+10



(b) NGC6334F

図 5.2: 5σ 以上の放射が見られた天体のスペクトル

第 6 章

追観測 結果

6.1 追観測天体選出方法

6.1.1 19.9 GHz

19.9 GHz の追観測の対象天体は以下の手順で選定した。追観測のスケジュールを策定した段階では、先行研究で検出されている 2 天体を除き有意な放射が検出されている天体数が限られていたため、将来的に放射が顕在化する可能性のある天体をできるだけ多く観測対象に含める必要があった。そのため終了時点の解析結果だけで判断するのではなく、中間時点の解析結果も判断材料として用いた。そこで、探査的観測の観測日数の中間時点 (111 日) における解析結果と、終了時点における探査的観測の解析結果を比較した。これらのうち、中間時点もしくは終了時点のどちらかで 3σ 以上 4σ 未満の放射を検出した天体に対して、6.7 GHz メタノールメーザーの放射速度帯を基準とした分類を行った。19.9 GHz の放射速度帯が 6.7 GHz の放射速度帯と ± 1 km/s 以内で一致するものは毎日観測することとし、6.7 GHz における複数ピークの間放射が見られる天体は 3 グループに 1 回の観測とした。また 19.9 GHz において、 4σ 以上の放射を検出した天体に対しても同様に 6.7 GHz の放射速度帯との比較を行った。その結果、6.7 GHz の放射速度帯と一致する天体は毎日観測することとし、6.7 GHz における複数ピークの間放射が見られる天体やそれ以外は 3 グループに 1 回の観測とした。また今回放射が検出されていないが、先行研究で検出されている 2 天体も追観測にて毎日観測を行うことにした。以上の合計 80 天体を追観測対象とし、6.7 GHz の放射と速度帯が等しい 50 天体と今回放射が検出されていないが、先行研究で検出されている 2 天体の計 52 天体は毎グループで観測を行うことにした。19.9 GHz メタノールメーザーの追観測天体選定区分を表 6.1 に示す。

6.1.2 23.1 GHz

23.1 GHz の追観測の対象天体は以下の手順で選定した。23.1 GHz は終了時点の結果のみで判断した。まず、19.9 GHz で毎日観測を行う 52 天体を 23.1 GHz の観測対象とした。これに加えて、23.1 GHz において 4σ 以上の放射が検出された 13 天体のうち、既に 19.9 GHz で毎日観測対象となっている 5 天体を除外した 8 天体を追加した。その結果、追観測候補は合計 60 天体となった。さらに、この 60 天体のうち 23.1 GHz で放射が 3σ 未満であった 16 天体を除外し、最終的に計 44 天体を追観測対象とした。

表 6.1: 19.9 GHz メタノールメーザーの追観測天体選定区分

	速度が ± 1 km/s 以内	複数ピークの間	それ以外
$\geq 4\sigma$	毎日観測	3 日に 1 回観測	3 日に 1 回観測
$3\sigma - 4\sigma$	毎日観測	3 日に 1 回観測	観測しない

探査的観測では放射が検出されなかったが、上記以外に先行研究で放射が検出された天体も毎日観測することとした。

6.2 結果

6.2.1 19.9 GHz

19.9 GHz メタノールメーザーの検出天体数を表 6.2 に示す。

表 6.2: 19.9 GHz における検出強度区分ごとの天体数

検出強度区分	天体数
$S < 3\sigma$	25
$3\sigma \leq S < 4\sigma$	49
$4\sigma \leq S < 5\sigma$	4
$5\sigma \leq S$	2

4σ 以上 5σ 未満の放射が見られた天体は、0.673-00、24.93+00、30.98-00、40.41+07 である。これらのスペクトルを付録 B.1 に示す。 5σ 以上の放射が見られた天体は、133.9+10、NGC6334F である。 5σ 以上の放射が見られた天体のスペクトルを図 6.1 に示す。

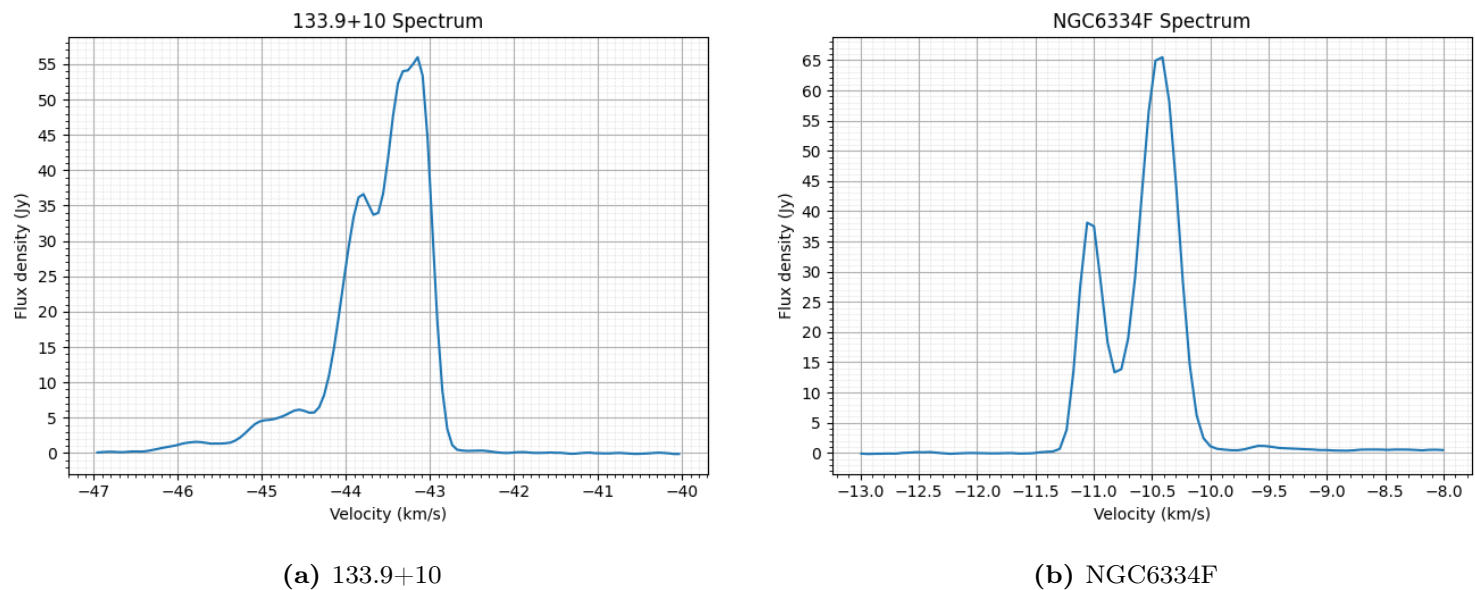


図 6.1: 5σ 以上の放射が見られた天体のスペクトル

6.2.2 23.1 GHz

23.1 GHz メタノールメーザーの検出天体数を表 6.3 に示す。

表 6.3: 23.1 GHz における検出強度区分ごとの天体数

検出強度区分	天体数
$S < 3\sigma$	17
$3\sigma \leq S < 4\sigma$	23
$4\sigma \leq S < 5\sigma$	2
$5\sigma \leq S$	2

4σ 以上 5σ 未満の放射が見られた天体は、12.90-00、32.97+00 である。これらのスペクトルを付録 B.2

に示す。5 σ 以上の放射が見られた天体は、133.9+10、NGC6334F である。5 σ 以上の放射が見られた天体のスペクトルをを図 6.2 に示す。

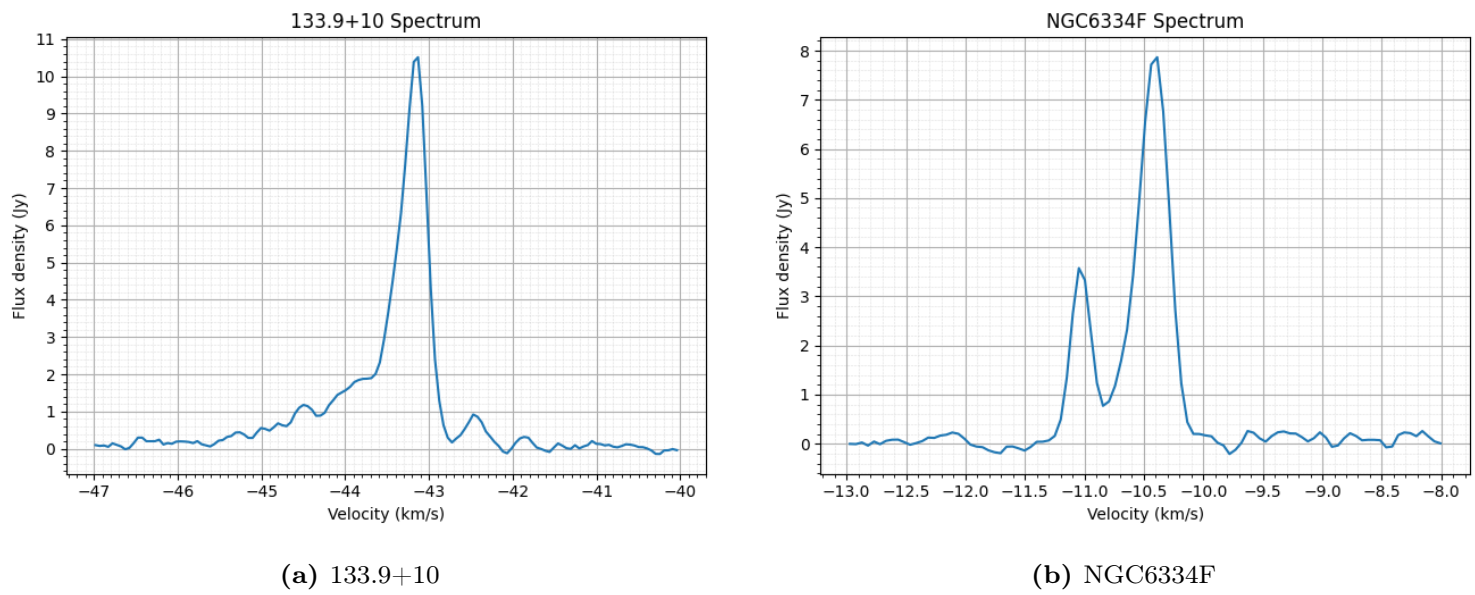


図 6.2: 5 σ 以上の放射が見られた天体のスペクトルを

6.3 先行研究との比較

6.3.1 19.9 GHz

追観測で 5 σ 以上の放射が見られた 133.9+10 と NGC6334F の 2 天体を、先行研究と追観測の放射速度範囲を比較する。19.9 GHz の先行研究と追観測の比較のスペクトルを 133.9+10 は図 6.3、NGC6334F は図 6.4 に示す。両天体ともスペクトル形状は先行研究と似ている。133.9+10 のピーク最大値の速度は -43.1 km/s であり、先行研究と一致している。また NGC6334F のピーク最大値の速度は -10.4 km/s であり、先行研究と一致している。

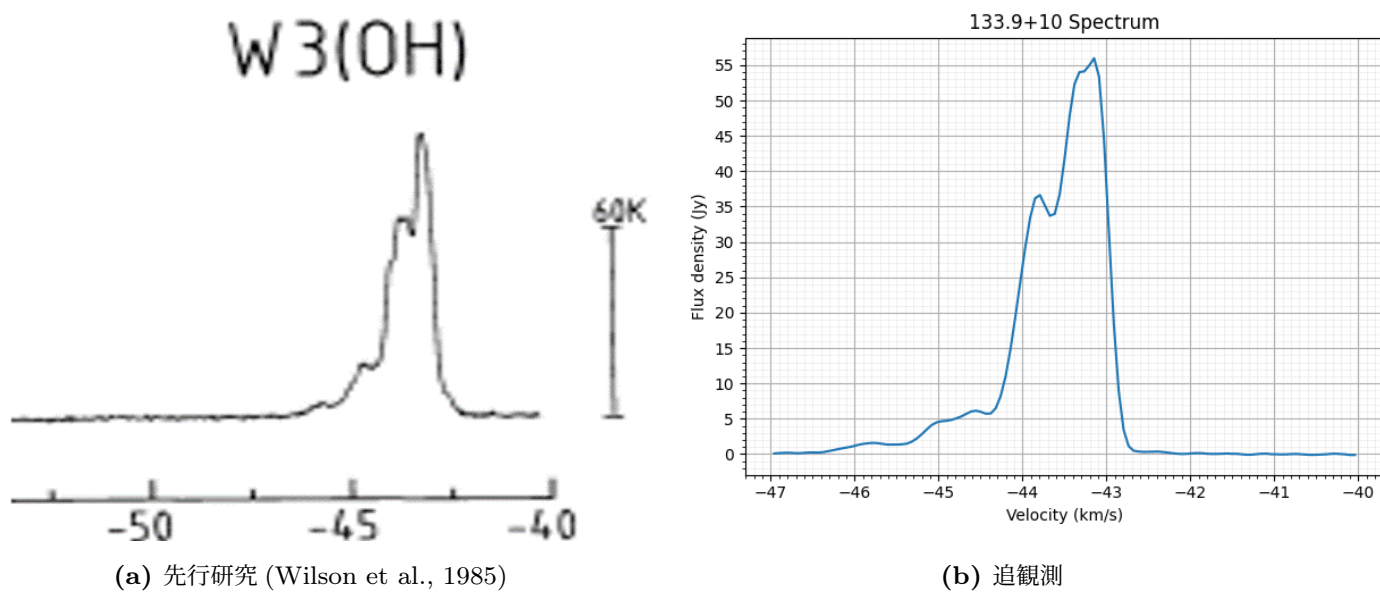
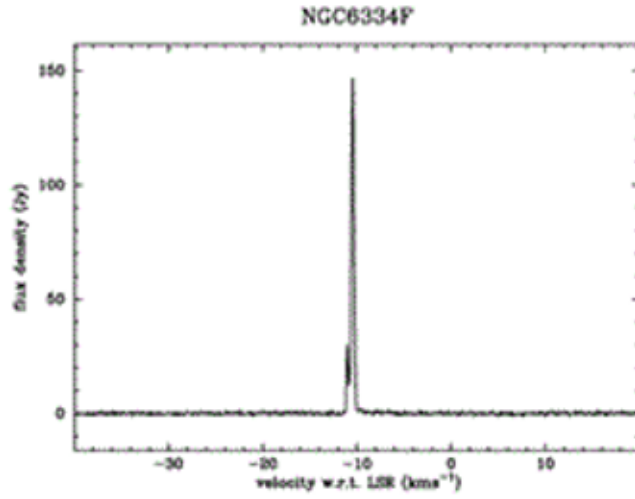
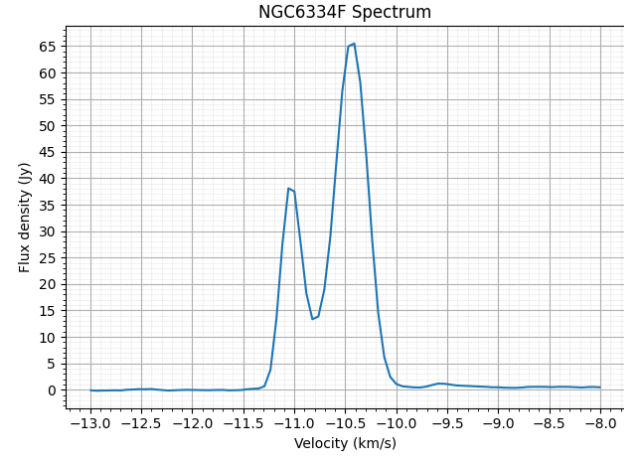


図 6.3: 133.9+10 のスペクトル比較



(a) 先行研究 (Ellingsen et al., 2004)

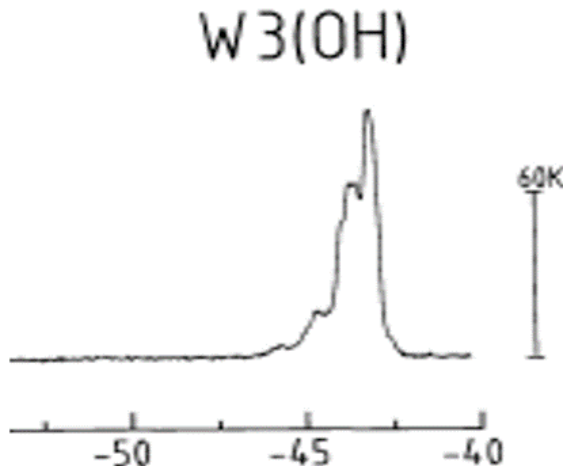


(b) 追観測

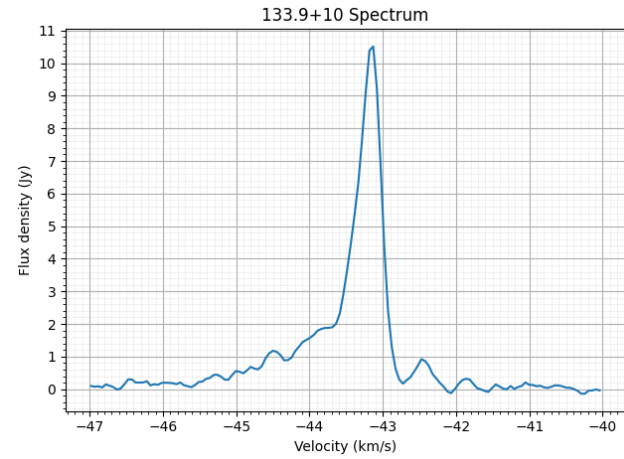
図 6.4: NGC6334F のスペクトル比較

6.3.2 23.1 GHz

追観測で 5σ 以上の放射が見られた 133.9+10 と NGC6334F の 2 天体を、先行研究と追観測の放射速度範囲を比較する。23.1 GHz の先行研究と追観測の比較のスペクトルを 133.9+10 は図 6.5、NGC6334F は図 6.6 に示す。両天体ともスペクトル形状は先行研究と似ている。133.9+10 のピーク最大値の速度は -43.1 km/s であり、先行研究と一致している。また NGC6334F のピーク最大値の速度は -10.4 km/s であり、先行研究と一致している。



(a) 先行研究 (Wilson et al., 1984)



(b) 追観測

図 6.5: 133.9+10 のスペクトル比較

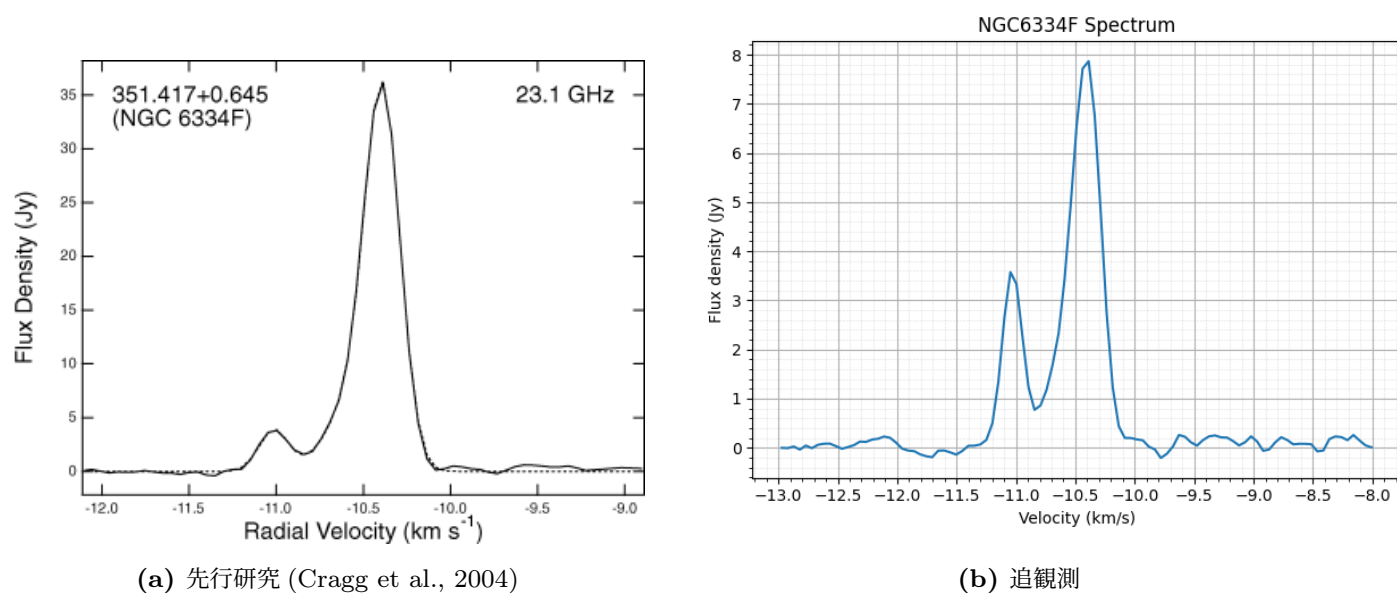


図 6.6: NGC6334F のスペクトル比較

6.4 他周波数との比較

19.9 GHz、23.1 GHz で放射が検出された 133.9+10 と NGC6334F をモニター観測で実施している、6.7 GHz メタノールメーザーと 12.2 GHz メタノールメーザーのスペクトルと比較する。133.9+10 の周波数ごとの比較は図 6.7、NGC6334F の周波数ごとの比較は図 6.8 に示す。133.9+10 も NGC6334F も 6.7 GHz、12.2 GHz の放射速度帯に放射が見られる。

133.9+10

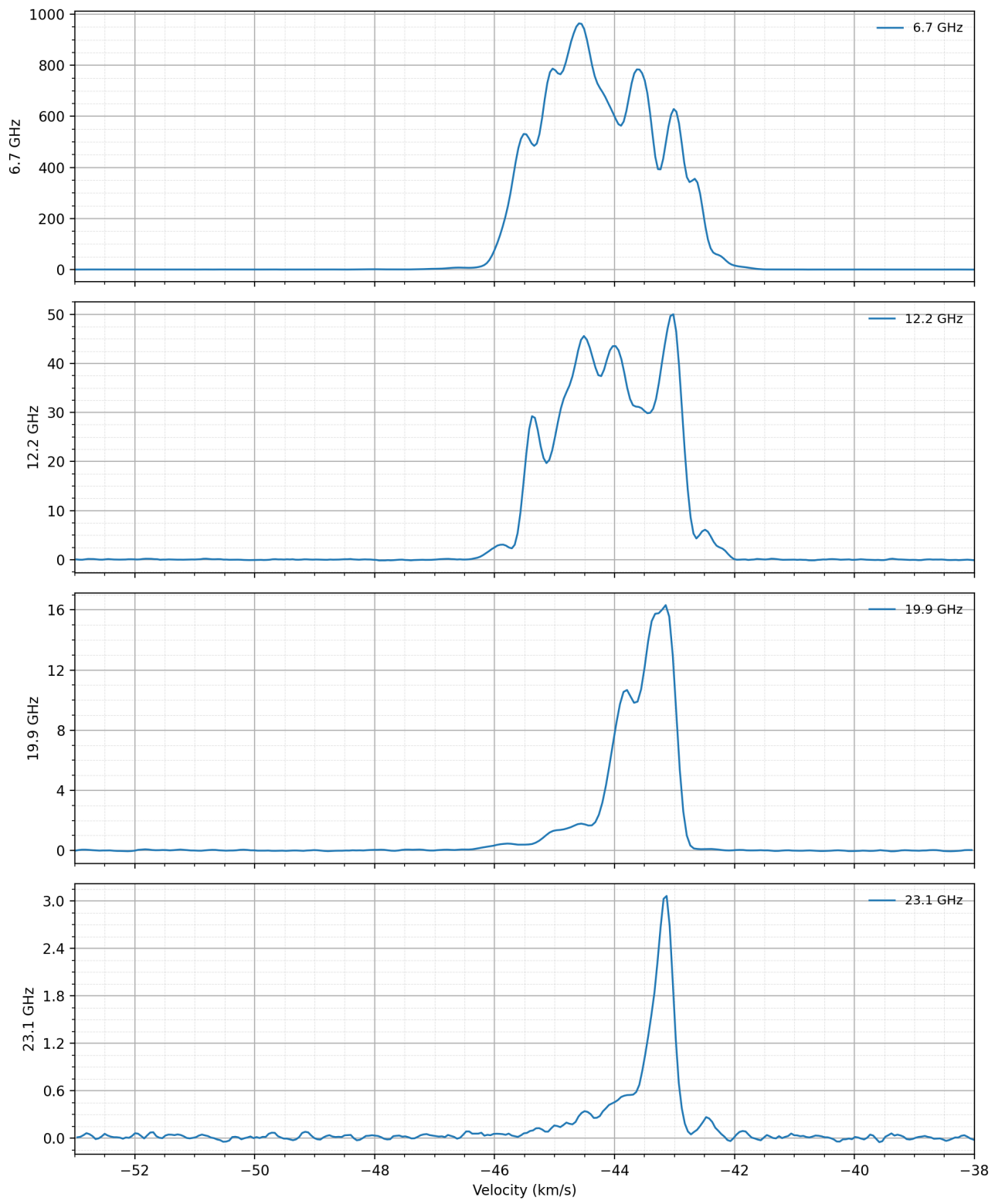


図 6.7: 133.9+10 の周波数ごとのスペクトル比較。

NGC6334F

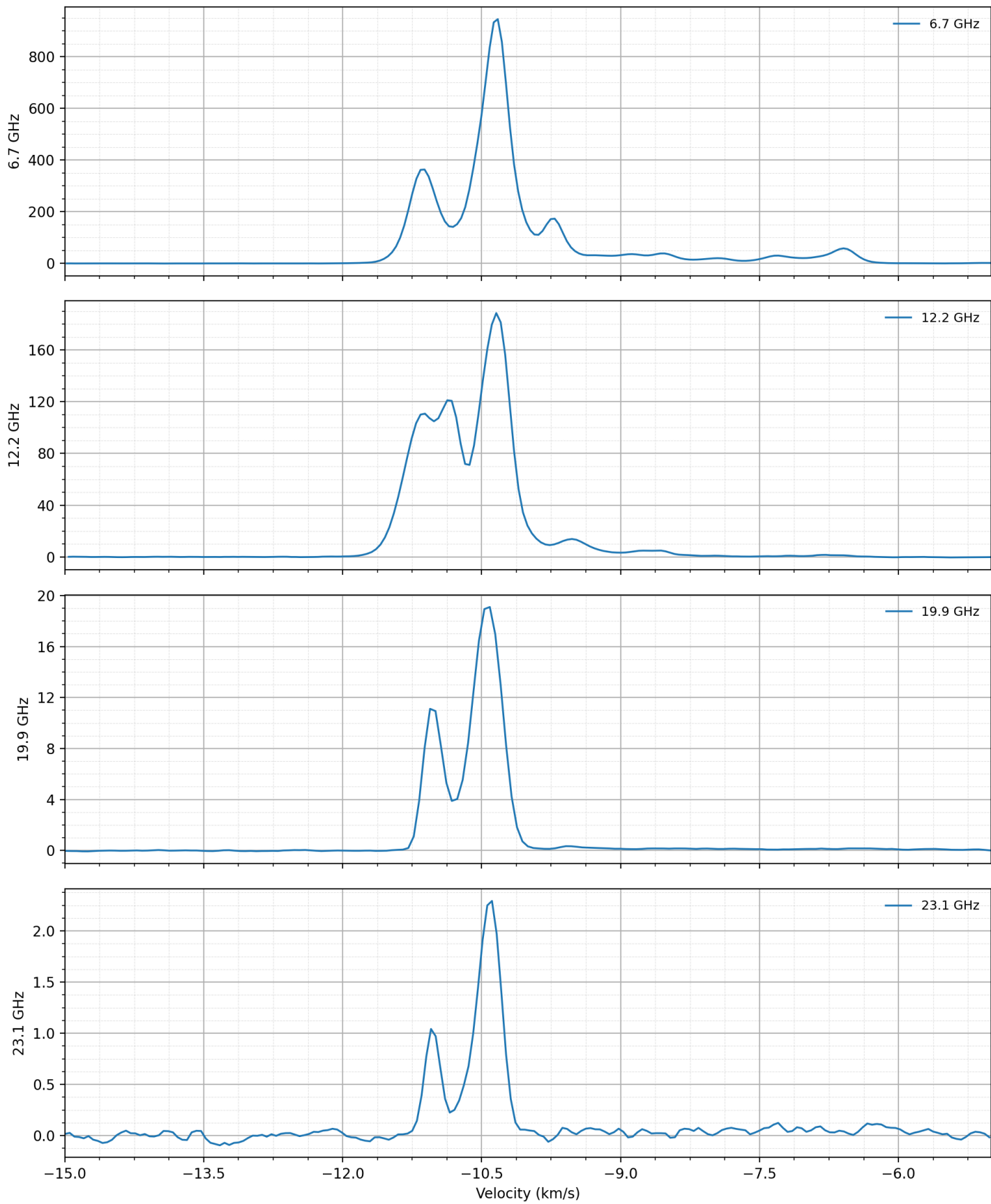
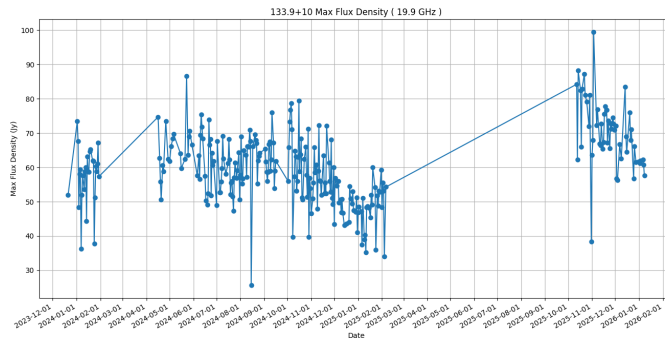


図 6.8: NGC6334F の周波数ごとのスペクトル比較。

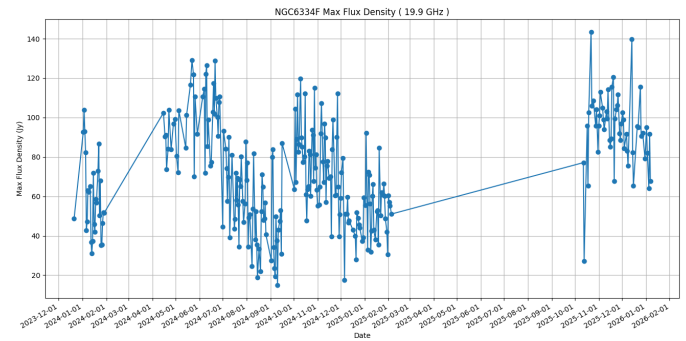
6.5 強度変動

133.9+10 と NGC6334F はアンテナの指向誤差が同じになる様に毎日同じ Az、El で観測しているにもかかわらず、強度が変化していた。19.9 GHz の強度変動を図 6.9、23.1 GHz の強度変動を図 6.10 に示す。3 σ ノ

イズレベルは 3 Jy 未満なので強度変動をしていると言える。特に図 6.9 の (b) は周期変動のような変動をしているが、今回周期は 3 周期未満なので詳細な解析は行わなかった。

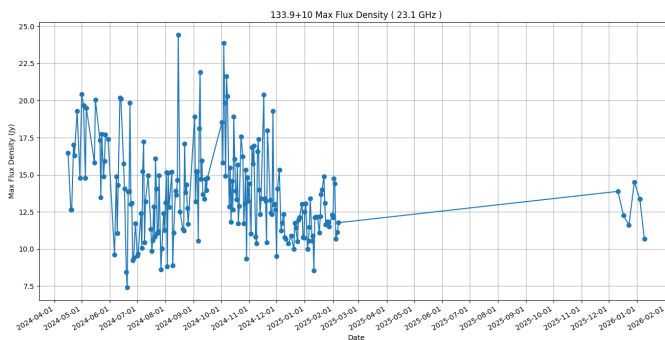


(a) 133.9+10

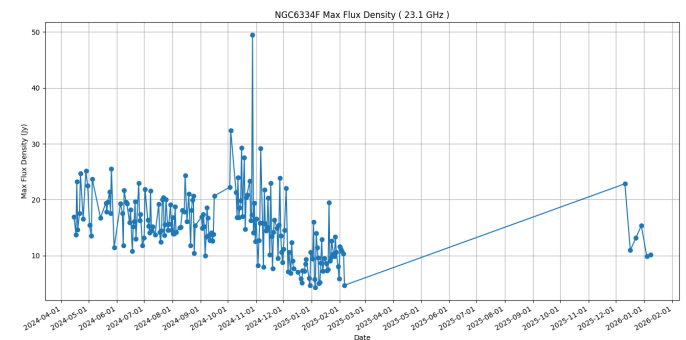


(b) NGC6334F

図 6.9: 19.9 GHz の強度変化



(a) 133.9+10



(b) NGC6334F

図 6.10: 23.1 GHz の強度変化

133.9+10 と NGC6334F の強度変動を周波数ごとに比較する。133.9+10 の強度変動を図 6.11、NGC6334F の強度変動を図 6.12 に示す。両周波数とも 1 日スケールの短期間で強度が変動している。強度の変動率を、19.9 GHz と 23.1 GHz は強度の大きさに差があるので標準偏差/平均で求めた。その結果 133.9+10 の 19.9 GHz は 0.18、23.1 GHz は 0.24、NGC6334F の 19.9 GHz は 0.36、23.1 GHz は 0.40 と算出された。同一天体で 2 周波数を比較すると、23.1 GHz は 19.9 GHz より変動率が高い。

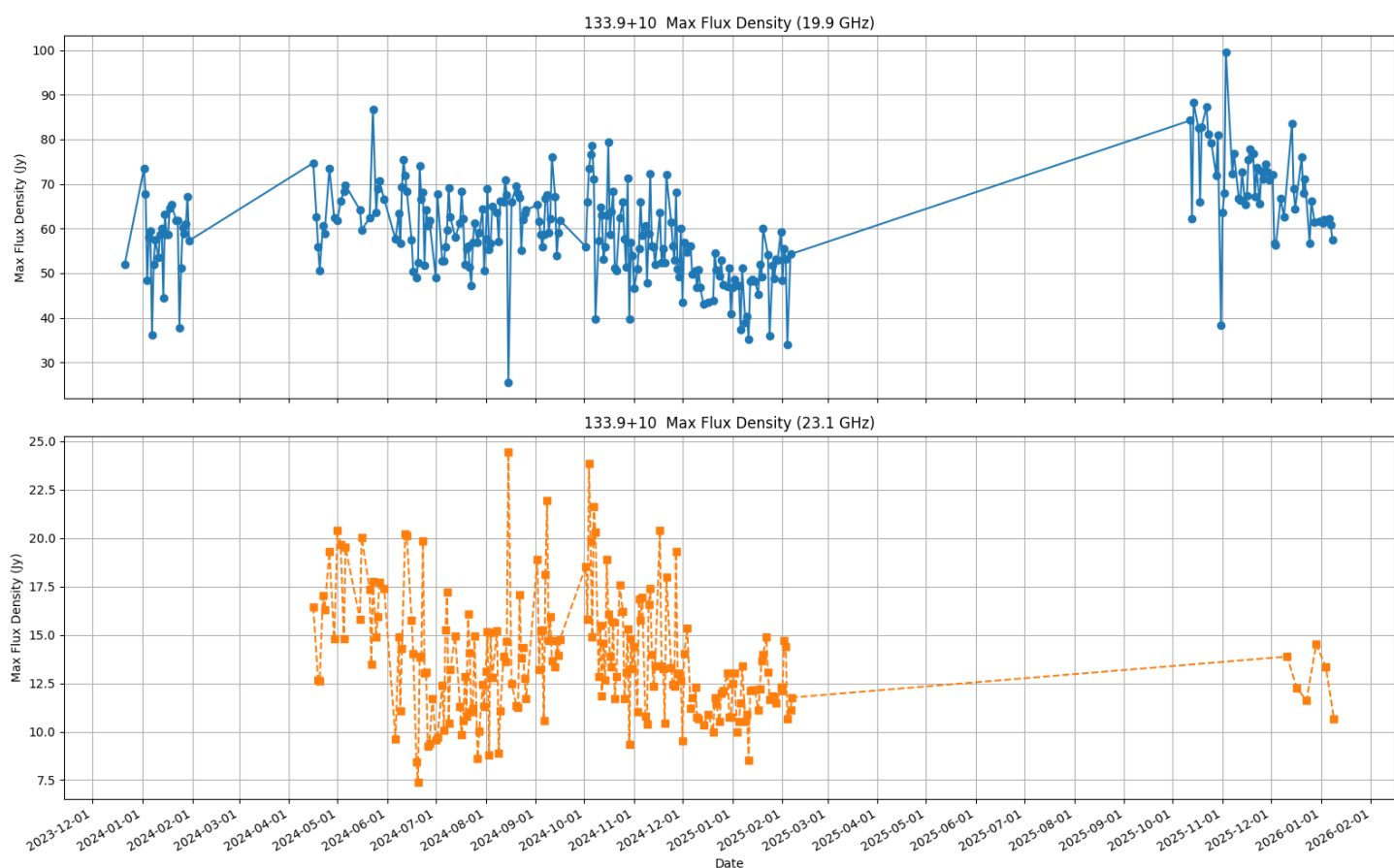


図 6.11: 133.9+10 の強度変化。周波数ごとの比較。

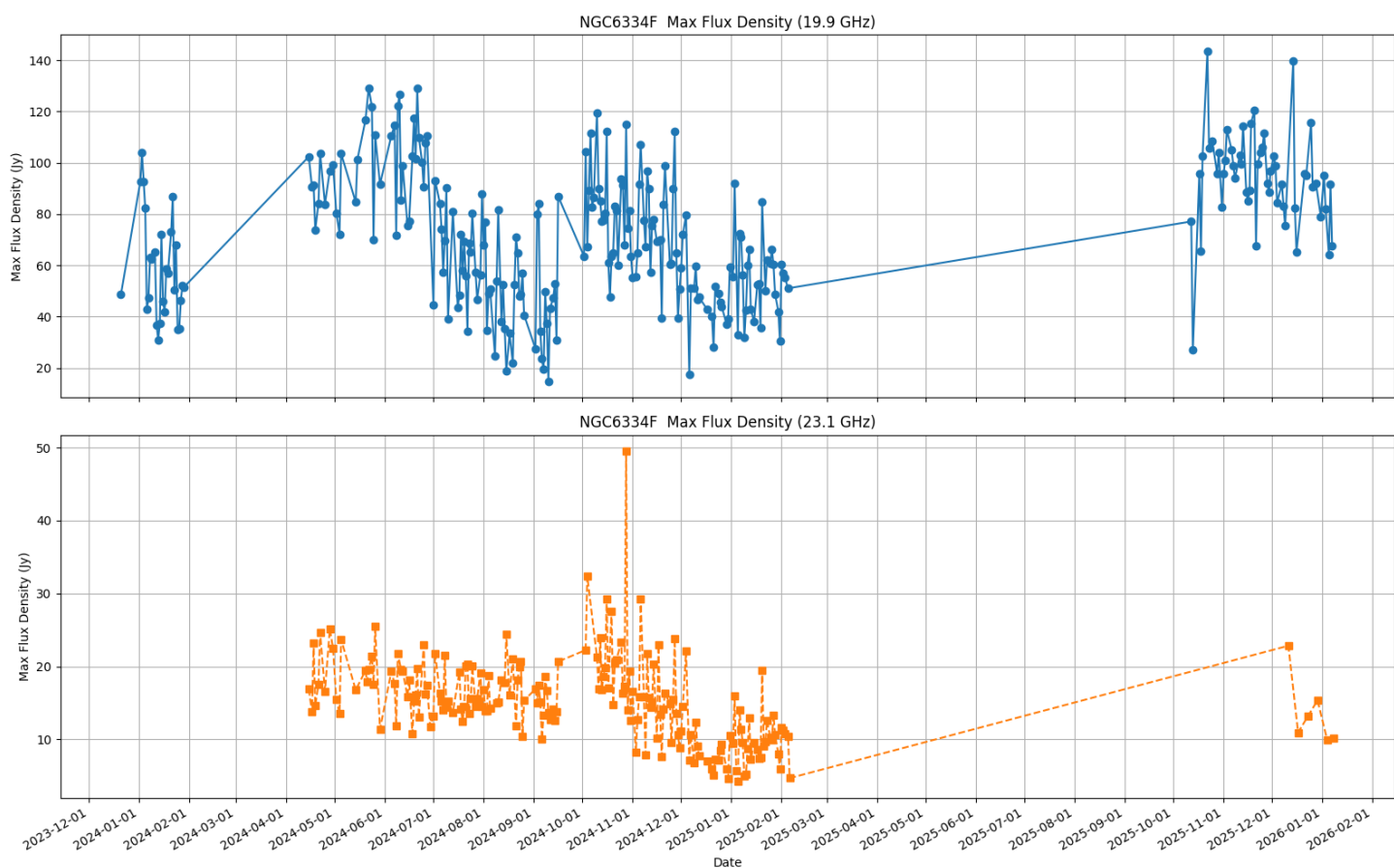


図 6.12: NGC6334F の強度変化。周波数ごとの比較。

第 7 章

考察

7.1 強度比較

W3(OH) におけるフラックス密度比は

$$\frac{F_{19\text{ GHz}}}{F_{23\text{ GHz}}} = \frac{56.0\text{ Jy} \pm 0.1\text{ Jy}}{10.5\text{ Jy} \pm 0.1\text{ Jy}} \quad (7.1)$$

$$= 5.3 \pm 0.2 \quad (7.2)$$

NGC 6334F においては,

$$\frac{F_{19\text{ GHz}}}{F_{23\text{ GHz}}} = \frac{65.5\text{ Jy} \pm 0.1\text{ Jy}}{7.87\text{ Jy} \pm 0.17\text{ Jy}} \quad (7.3)$$

$$= 8.3 \pm 0.3 \quad (7.4)$$

である。

一方、図 2.1 の縦軸は輝度温度で表されているため、観測されたフラックス密度を輝度温度へ変換する必要がある。フラックス密度 F は

$$F \propto \nu^2 \Omega T_B$$

で与えられるため、この変換にはソースの立体角 Ω が必要となる。しかし、メタノールメーザーのソース立体角を正確に推定することは困難である。

そこで、本研究では 19.9 GHz と 23.1 GHz においてソース立体角が等しいと仮定する。この仮定のもとでは

$$\frac{F_{19}}{F_{23}} = \frac{T_{B,19}}{T_{B,23}} \left(\frac{\nu_{19}}{\nu_{23}} \right)^2$$

とみなすことができ、観測されたフラックス密度比を輝度温度比として図 2.1 と直接比較することが可能となる。さらに本観測ではアンテナの開口能率が未測定であるため、得られたフラックス密度には大きな不確かさが含まれている可能性がある。そのため $F_{19\text{ GHz}}/F_{23\text{ GHz}}$ は、求められた比の 1/2 から 2 倍の範囲の値を取り得ると仮定する。W3(OH)、NGC6334F の誤差を含んだフラックス密度比を表 7.1 に示す。

表 7.1: W3(OH)、NGC6334F の誤差を含んだフラックス密度比

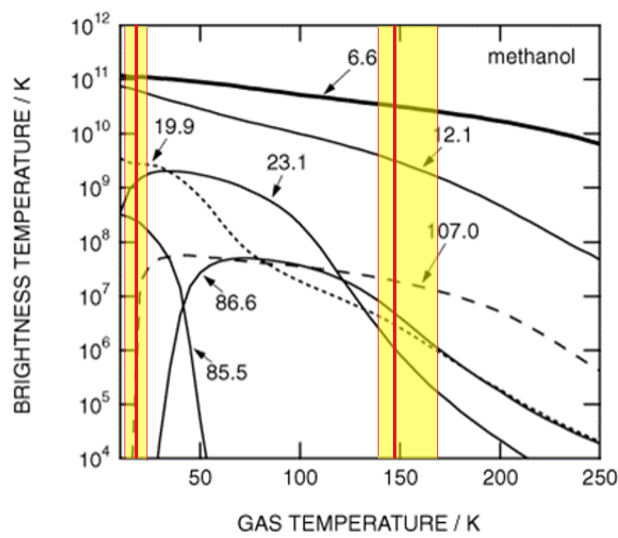
天体	$1/2 (F_{19\text{ GHz}}/F_{23\text{ GHz}})$	$F_{19\text{ GHz}}/F_{23\text{ GHz}}$	$2(F_{19\text{ GHz}}/F_{23\text{ GHz}})$
W3(OH)	1.96	3.9	7.8
NGC6334F	3.1	6.1	12.2

以上の結果に基づき、メタノールメーザー放射領域の物理状態の図から物理量を推測した。ただし、この結論は物理状態を示す 4 つパラメーターのうち 3 つを固定し残り 1 つを変化させた条件下での計算結果に基づくものであり、仮定する物理条件が変化した場合には結果も変化する可能性がある。

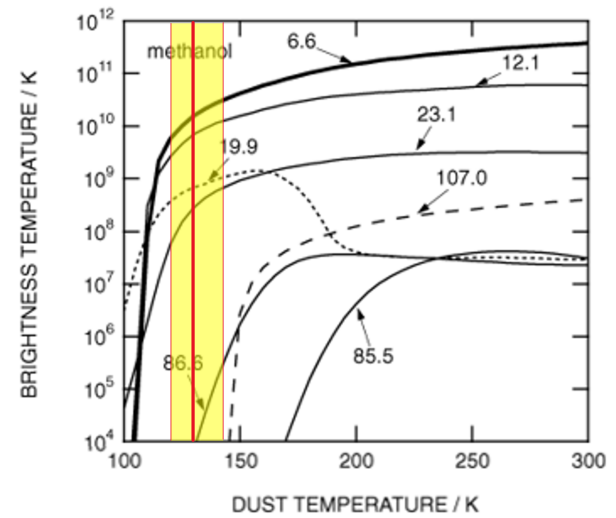
表 7.1 のフラックス密度比を図 2.1 に当てはめ、その範囲を読み取った結果を表 7.2、表 7.3 に示す。しかし、ガス密度は 133.9×10 、NGC6334F 両天体でフラックス密度比が Ellingsen et al. (2004) のモデル結果に適合しなかった。 133.9×10 のメタノールレーザー放射領域内で推定される物理状態は図 7.1、NGC6334F のメタノールレーザー放射領域内で推定される物理状態は図 7.2 に示される。

表 7.2: W3(OH) のメタノールレーザー放射領域内で推定される物理状態

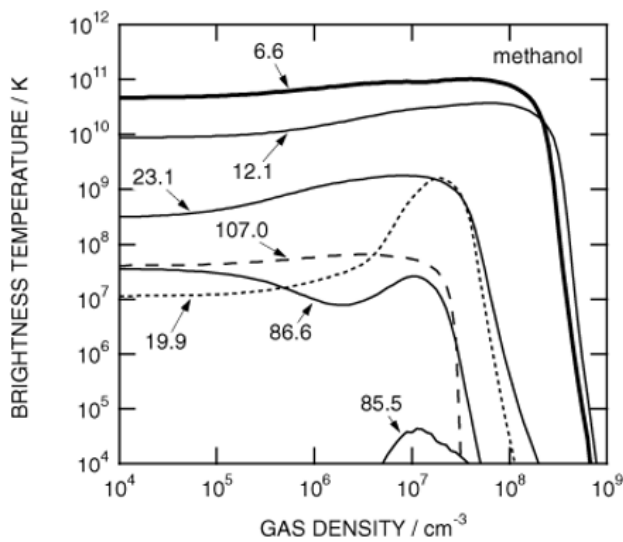
パターン	ガス温度 (K)	ダスト温度 (K)	ガス密度 (cm^{-3})	柱密度 (cm^{-2})
1	$\leq 16, 144 - 202$	175	10^7	10^{12}
2	50	120 - 141	10^7	10^{12}
3	50	175	解なし	10^{12}
4	50	175	10^7	$10^{11.1} - 10^{11.5}$



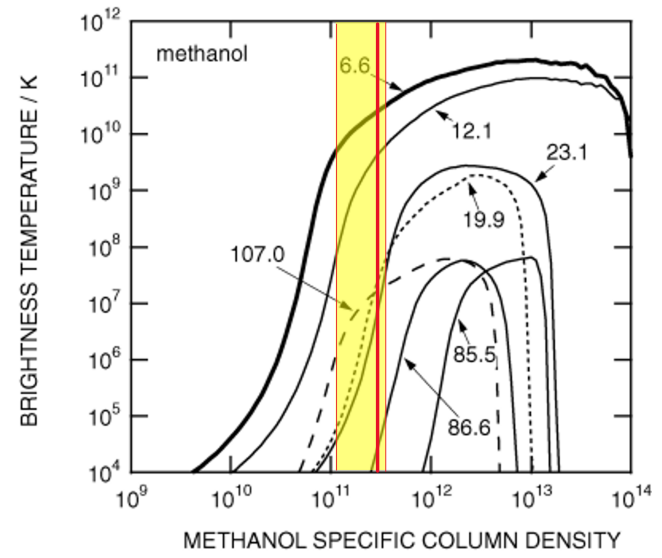
(a) ガス温度



(b) ダスト温度



(c) ガス密度

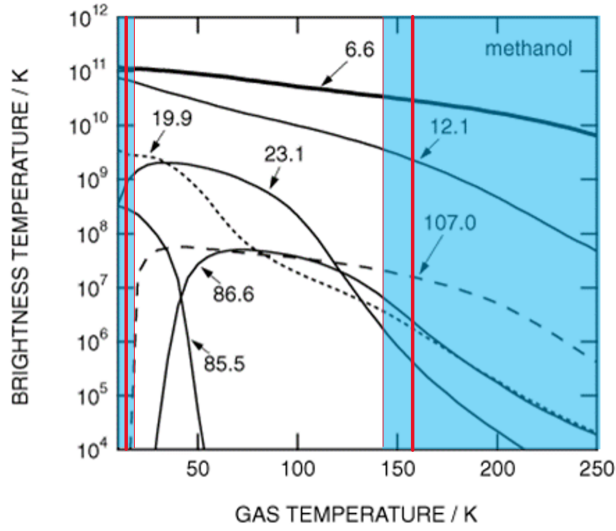


(d) 柱密度

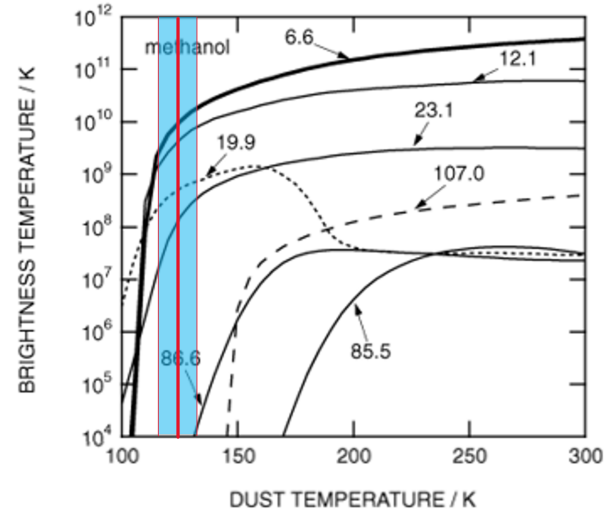
図 7.1: メタノールレーザーの様々な遷移の輝度温度（縦軸）と物理状態（横軸）の関係。黄色の範囲は W3(OH) の推定される物理状態。ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている (Ellingsen et al., 2004)。

表 7.3: NGC6334F のメタノールレーザー放射領域内で推測される物理状態

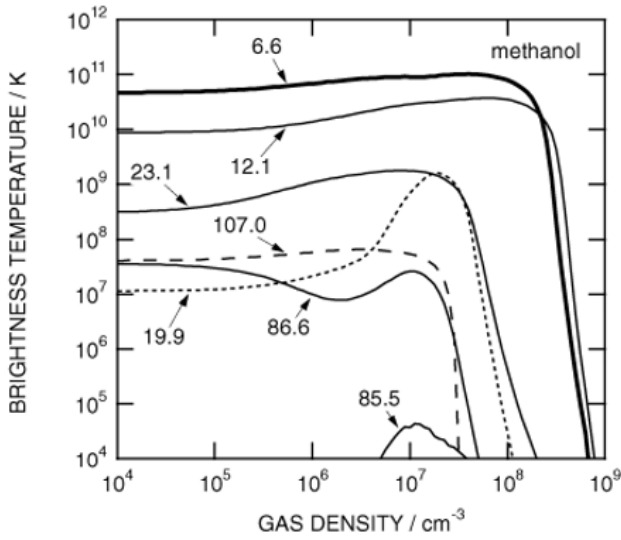
パターン	ガス温度 (K)	ダスト温度 (K)	ガス密度 (cm^{-3})	柱密度 (cm^{-2})
1	$\leq 13, 147 \leq$	175	10^7	10^{12}
2	50	111–127	10^7	10^{12}
3	50	175	解なし	10^{12}
4	50	175	10^7	$10^{11.2} - 10^{11.5}$



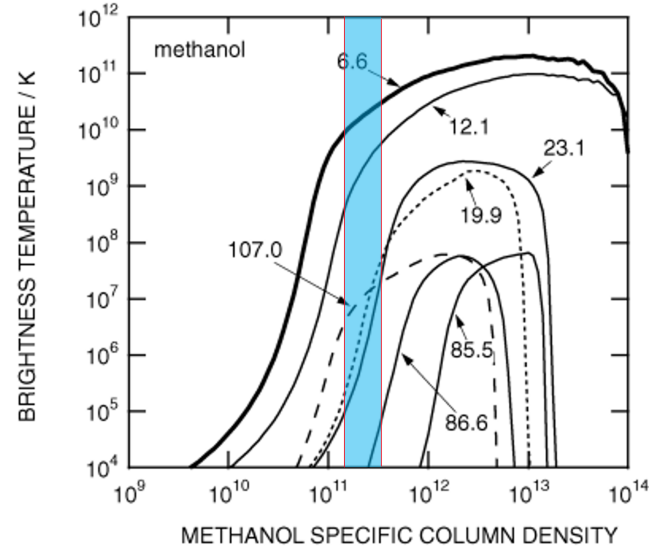
(a) ガス温度



(b) ダスト温度



(c) ガス密度



(d) 柱密度

図 7.2: メタノールレーザーの様々な遷移の輝度温度（縦軸）と物理状態（横軸）の関係。水色の範囲は NGC6334F の推定される物理状態。ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm^{-3} 、柱密度 10^{12} cm^{-2} で固定し、パラメーターを 1 つずつ変化させている (Ellingsen et al., 2004)。

7.2 強度変動

5 σ 以上の放射が検出された 133.9+10 と NGC6334F において、19.9 GHz 及び 23.1 GHz メタノールレーザーの強度変動が確認された。特に、23.1 GHz レーザーは 19.9 GHz と比較して強度の変化率が大きかった。また両天体とも 19.9 GHz の放射強度が 23.1 GHz の放射強度より強く検出された。このような遷移間での変動特性の差は、励起条件に対する感度の違いを反映している可能性が考えられる。7.1 節で推測された物理状態の範囲内でこのような傾向を示すのは図 7.1、図 7.2 よりガス温度 17 K 付近、あるいはダスト温度 130 K

付近である。大質量星形成領域においては、ガス温度が 17 K であることはまれなため、ここではダスト温度が 130 K であると考ええる。このため、ダスト加熱の時間変化が 23.1 GHz メーザーの大きな強度変動として現れている可能性が示唆される。本観測から推定される物理状態から、上記の観点でメーザースポットの大きさを導出し妥当性を検討する。

7.2.1 ダスト熱放射

強度変動の要因がダスト温度の変化なら、変動時間はダスト温度変化の伝搬時間程度である。Burns et al. (2020) は、ダストの温度変化が光速の 4 – 8 % 程度の有効速度で空間的に伝播しうること示している。本研究では伝搬速度を光速の 5 % と仮定した。ダストの温度変化が、光速の 5 % でメーザースポットを観測された変動時間スケール (1 日) で通過する場合、メーザースポットの大きさは 8.9 au と求められる。観測された変動時間スケールは、メーザースポットの大きさ (1 – 100 au 程度、Minier et al. 2002) と整合的である。以上から本天体における 19.9 GHz および 23.1 GHz メタノールメーザーの 133.9+10 と NGC6334F の強度変動は、ダスト温度の変動に支配されている可能性がある。

第 8 章

今後の展望

今後は開口能率及びその仰角依存性を測定を行うとともに、検出された天体に対して強度変動の調査を進める。未検出の天体については新たな検出を目指す。また 6.7 GHz、12.2 GHz、19.9 GHz、23.1 GHz の観測結果と比較することで大質量星形成過程の物理状態の推定を行う。さらに Ellingsen et al. (2004) について、対象以外の物理量の仮定を変えた場合の影響についても検討する。また 19.9 GHz の NGC6334F に対して周期性があるか引き続き観測することで解明を目指す。

第 9 章

まとめ

本研究は、大質量星形成領域の物理状態を解明することを目的に 19.9 GHz、23.1 GHz メタノールレーザーの観測を行った。5 σ 以上の放射が検出された天体は、先行研究でも放射が既知の 133.9+10 と NGC6334F のみであった。しかし先行研究では短期間高感度の観測のみだったため、高周波数帯に対して長期的、また 19.9 GHz、23.1 GHz の同時観測は初めてである。この 2 天体は強度変動をしており、ダストの温度変化による可能性がある。また強度比から W3(OH) はガス温度 ≤ 16 K, 144–202 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ または、ガス温度 50 K、ダスト温度 120–141 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 (解なし)、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 $10^{11.1}$ – $10^{11.5}$ cm $^{-2}$ といった条件のいずれかを満たしていることが示唆される。NGC6334F はガス温度 ≤ 13 K または ≥ 147 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 111–127 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 (解なし)、柱密度 10^{12} cm $^{-2}$ 、または、ガス温度 50 K、ダスト温度 175 K、ガス密度 10^7 cm $^{-3}$ 、柱密度 $10^{11.2}$ – $10^{11.5}$ cm $^{-2}$ といった条件のいずれかを満たしていることが示唆される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、米倉教授には指導教員として終始熱心なご指導を賜りました。アンテナの仕組みや使用方法、研究の進め方に至るまで丁寧にご教示いただき心より感謝申し上げます。百瀬教授には、ゼミナールを通して電波天文学の基礎をご指導いただきました。多くの質問にも丁寧にお答えいただき深く感謝いたします。また、博士課程の森泉さんには日頃から研究に関する助言をいただくとともに、数多くの質問にも親身に対応していただき大変お世話になりました。さらに、卒業生の折原さんにはデータ解析におけるPython コードの作成に際して多大なご支援をいただき、厚く御礼申し上げます。

最後に、電波観測研究室の皆様には本論文の執筆にあたり多くのご助言と温かい激励をいただきました。皆様のお力添えのおかげで、本修士論文を完成させることができました。ここに深く感謝の意を表します。

付録 A

観測天体リスト

A.1 探査的観測

表 A.1: 探査的観測で観測した天体リスト 434 天体

0.092+06	12.02-00	23.24-02	35.20-07
0.167-04	12.11-01	23.32-02	35.20-17
0.315-02	12.18-01	23.39+01	35.25-02
0.376+00	12.20-01	23.43-01	35.40+00
0.409-05	12.26-00	23.48+00	35.59+00
0.475-00	12.52+00	23.66-01	35.79-01
0.546-08	12.62-00	23.70-01	36.02-02
0.645-00	12.68-01	23.80+04	36.70+00
0.673-00	12.77+01	23.91+00	36.84-00
0.836+01	12.88+04	23.98-00	36.90-04
1.008-02	12.90-02	24.14+00	36.92+04
1.147-01	13.17+00	24.33+01	37.04-00
1.329+01	13.65-05	24.50-00	37.38-00
1.719-00	13.69-01	24.54+03	37.40+15
2.143+00	13.71-00	24.64-03	37.52-01
2.521-02	14.10+00	24.67-01	37.60+04
2.536+01	14.23-05	24.78+00	37.74-01
2.591-00	14.39-00	24.93+00	37.76-01
2.615+01	14.45-01	25.27-04	37.77-02
2.703+00	14.49+00	25.38-01	38.03-03
3.253+00	14.52+01	25.38+00	38.08-02
3.312-03	14.60+00	25.41+01	38.12-02
3.442-03	14.63-05	25.53+03	38.20-00
3.502-02	14.99-01	25.65+10	38.26-00
3.910+00	15.09+01	25.70+00	38.26-02
4.393+00	15.60-02	25.82-01	38.56+01
4.434+01	15.66-04	26.52-02	38.60-02
4.569-00	16.11-03	26.59-00	38.66+00

4.586+00	16.30-01	26.60-02	38.92-03
4.676+02	16.58-00	27.21+02	39.10+04
4.866-01	16.66-03	27.28+01	39.39-01
5.618-00	16.83+00	27.36-01	40.28-02
5.657+04	16.85+06	27.78+00	40.41+07
5.885-03	16.86-21	27.78-02	40.62-01
6.189-03	17.02-00	27.86-02	40.94-00
6.368-00	17.02-24	28.02-04	41.08-01
6.539-01	17.63+01	28.14+00	41.12-01
6.588-01	18.07+00	28.20-00	41.12-02
6.610-00	18.15+00	28.28-03	41.16-02
6.881+00	18.26-02	28.39+00	41.23-02
7.166+01	18.34+17	28.69+04	41.27+03
7.601-01	18.44+00	28.81+03	41.34-01
7.632-01	18.46-00	28.82+04	41.58+00
8.139+02	18.66+00	28.83-02	41.87-01
8.683-03	18.83-03	28.86+00	42.03+01
8.832-00	18.87+00	29.31-01	42.43-02
8.872-04	18.88-04	29.86-00	42.70-01
9.215-02	19.00-00	29.95-00	43.04-04
9.621+01	19.24+02	30.20-01	43.08-00
9.986-00	19.26+03	30.30+00	43.15+00
10.09+07	19.36-00	30.30-01	43.17-00
10.28-01	19.47+01	30.40-02	43.80-01
10.32-01	19.49+01	30.53+00	43.87-07
10.32-02	19.60-02	30.59-01	44.31+00
10.35-01	19.61+00	30.59-00	44.64-05
10.44-00	19.61-01	30.70-00	45.44+00
10.47+00	19.66+01	30.76-00	45.47+00
10.627-0	19.70-02	30.78+02	45.47+01
10.72-03	19.75-01	30.82+02	45.49+01
10.82-01	19.88-05	30.82-00	45.57-01
10.88+01	20.08-01	30.96-01	45.81-03
10.95+00	20.24+00	30.98-00	46.07+02
11.03+00	21.57-00	31.16+00	46.12+03
NGC6334F	NGC2071A	IRS16293	V1318CYG
G24.1+00	G23.2+00	G12.4+00	G65.7-20

A.2 追観測

A.2.1 19.9 GHz

表 A.2: 追観測の 19.9 GHz で観測した天体リスト 80 天体

133.9+10	174.1-00	173.4+24	NGC2071A
188.7+10	IRS16293	NGC6334F	G353.2+0
351.7-05	354.6+04	G357.9-0	359.6-02
0.496+01	0.673-00	111.5+07	0.546-08
2.536+01	2.615+01	2.703+00	6.189-03
6.795-02	8.683-03	10.47+00	11.10-01
18.46-00	12.26-00	189.7+03	13.71-00
14.10+00	13.65-05	14.99-01	14.63-05
16.30-01	16.58-00	C19.0-02	27.36-01
23.48+00	25.65+10	23.24-02	24.33+01
23.98-00	24.93+00	24.64-03	25.70+00
25.82-01	28.82+04	28.39+00	28.83-02
29.95-00	353.4-03	31.41+03	30.76-00
30.98-00	32.97+00	33.09-00	33.13-00
33.40+00	33.86+00	34.24+01	37.54+02
34.10+00	36.84-00	38.20-00	38.26-00
38.12-02	40.41+07	40.28-02	41.12-02
42.03+01	45.07+01	45.47+01	45.47+00
43.87-07	69.52-09	49.27+03	49.41+03
49.47-03	49.62-03	G65.7-20	81.76+05

A.2.2 23.1 GHz

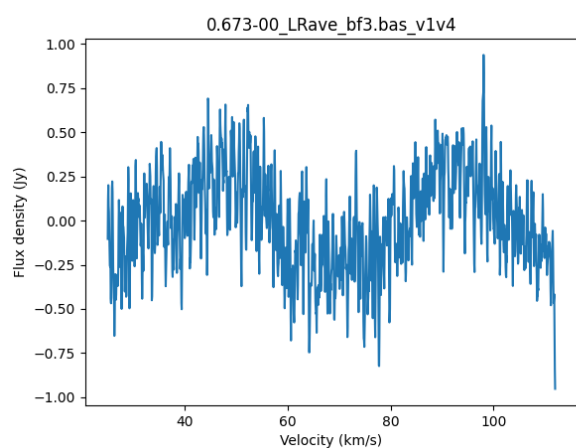
表 A.3: 追観測の 23.1 GHz で観測した天体リスト 44 天体

133.9+10	NGC6334F	351.7-05	354.6+04
359.6-02	0.496+01	111.5+07	0.546-08
6.189-03	8.683-03	10.47+00	12.90-00
13.71-00	14.10+00	C19.0-02	23.48+00
25.65+10	23.98-00	24.93+00	28.82+04
28.39+00	353.4-03	31.41+03	37.47-01
32.97+00	33.09-00	33.40+00	33.86+00
34.24+01	41.08-01	38.20-00	45.44+00
40.41+07	40.28-02	41.12-02	43.15+00
45.47+01	45.47+00	43.87-07	49.27+03
49.47-03	49.62-03	G65.7-20	81.76+05

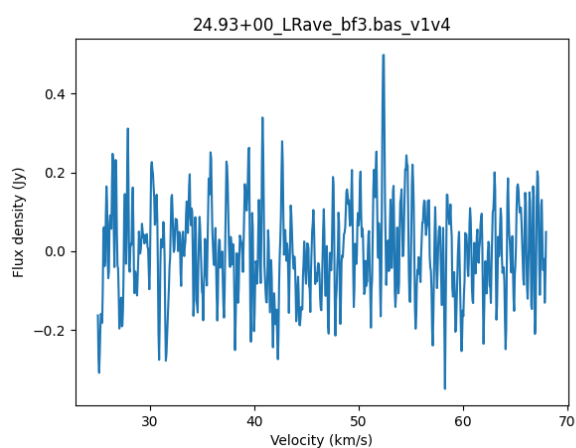
付録 B

4 σ 以上 5 σ 未満のスペクトル

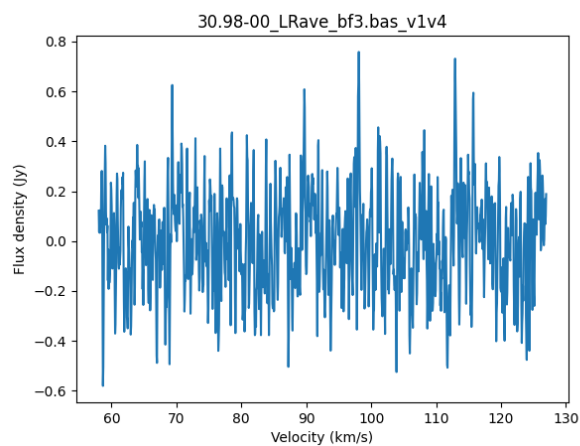
B.1 19.9 GHz



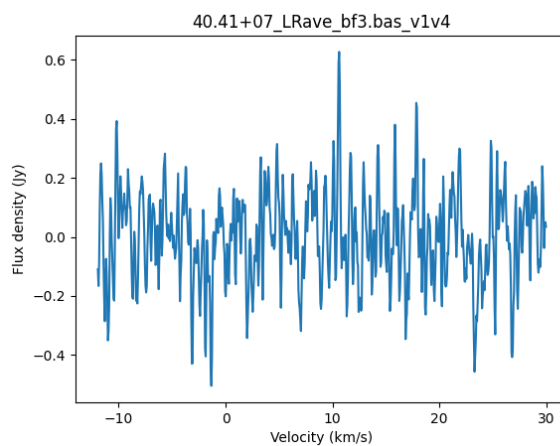
(a) 0.673-00



(b) 24.93+00



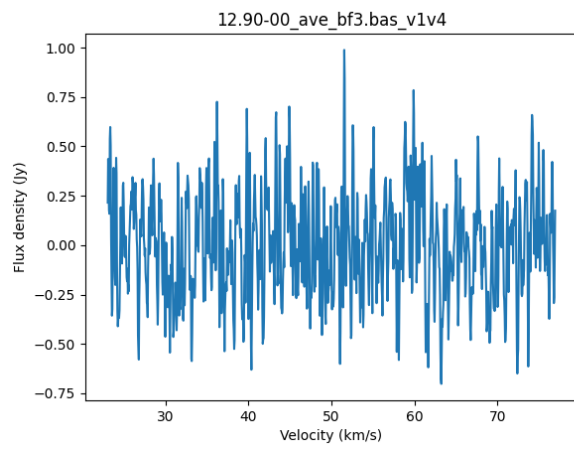
(c) 30.98-00



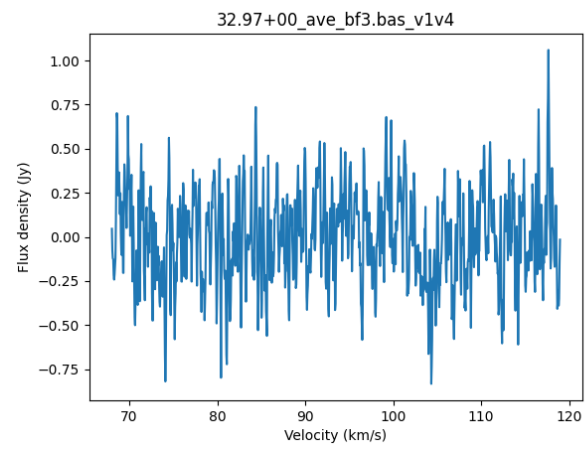
(d) 40.41+07

図 B.1: 4 σ 以上 5 σ 未満の放射が見られたスペクトル

B.2 23.1 GHz



(a) 12.90-00



(b) 32.97+00

図 B.2: 4σ 以上 5σ 未満の放射が見られたスペクトル

参考文献

- Breen, S. L., Ellingsen, S. P., Caswell, J. L., Green, J. A., Voronkov, M. A., Avison, A., Fuller, G. A., and Quinn, L. J. (2016). 12.2-ghz methanol maser mmb follow-up catalogue – iv. longitude range 20° – 60° . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(4):4066–4087.
- Breen, S. L., Fuller, G. A., Caswell, J. L., Green, J. A., Avison, A., Ellingsen, S. P., Gray, M. D., Pestalozzi, M., Quinn, L. J., Richards, A. M. S., Thompson, M. A., and Voronkov, M. A. (2015). The 6-ghz methanol multibeam maser catalogue – v. galactic longitudes 20° – 60° . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(4):4109–4136.
- Burns, R., Sugiyama, K., Hirota, T., Kim, K.-T., Sobolev, A., Stecklum, B., MacLeod, G., Yonekura, Y., Olech, M., Orosz, G., et al. (2020). A heatwave of accretion energy traced by masers in the g358-mm1 high-mass protostar. *Nature Astronomy*, 4(5):506–510.
- Caswell, J. L., Fuller, G. A., Green, J. A., Avison, A., Breen, S. L., Brooks, K. J., Burton, M. G., Chrysostomou, A., Cox, J., Diamond, P. J., Ellingsen, S. P., Gray, M. D., Hoare, M. G., Masheder, M. R. W., McClure-Griffiths, N. M., Pestalozzi, M. R., Phillips, C. J., Quinn, L., Thompson, M. A., Voronkov, M. A., Walsh, A. J., Ward-Thompson, D., Wong-McSweeney, D., Yates, J. A., and Cohen, R. J. (2010). The 6-ghz methanol multibeam maser catalogue – i. galactic centre region, longitudes 345° to 6° . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404(2):1029–1060.
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., Caswell, J. L., Ellingsen, S. P., and Godfrey, P. D. (2004). Search for class ii methanol masers at 23.1 ghz. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(4):1327–1337.
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., and Godfrey, P. D. (2002). Modelling methanol and hydroxyl masers in star-forming regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 331(2):521–536.
- Cragg, D. M., Sobolev, A. M., and Godfrey, P. D. (2005). Models of class ii methanol masers based on improved molecular data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 360(2):533–545.
- Ellingsen, S. P., Cragg, D. M., Lovell, J. E. J., Sobolev, A. M., Ramsdale, P. D., and Godfrey, P. D. (2004). Discovery of new 19.9 - ghz methanol masers in star - forming regions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 354(2):401–413.
- Ellingsen, S. P., von Bibra, M. L., McCulloch, P. M., Norris, R. P., Deshpande, A. A., and Phillips, C. J. (1996). A survey of the galactic plane for 6.7-ghz methanol masers – i. $l = 325$ - 335 ; $b = -0$ to -53 . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 280(2):378–396.
- Galván-Madrid, R., Montes, G., Ramírez, E. A., Kurtz, S., Araya, E., and Hofner, P. (2010). The rare 23.1 ghz methanol masers in ngc 7538 irs 1. *The Astrophysical Journal*, 713(1):423.
- Hachisuka, K., Brunthaler, A., Menten, K. M., Reid, M. J., Imai, H., Hagiwara, Y., Miyoshi, M., Horiuchi, S., and Sasao, T. (2006). Water maser motions in w3(oh) and a determination of its distance. *The Astrophysical Journal*, 645(1):337.
- Krishnan, V., Ellingsen, S. P., Voronkov, M. A., and Breen, S. L. (2013). The first high-resolution observations of 19.9-ghz methanol masers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433(4):3346–3363. <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/433/4/3346/4885330/stt1017.pdf>.

- MacLeod, G., Smits, D., Goedhart, S., Hunter, T., Brogan, C., Chibueze, J., van den Heever, S., Thesner, C., Banda, P., and Paulsen, J. (2018). A masing event in ngc 6334i: contemporaneous flaring of hydroxyl, methanol, and water masers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 478(1):1077–1092.
- MacLeod, G. C., Sugiyama, K., Hunter, T. R., Quick, J., Baan, W., Breen, S. L., Brogan, C. L., Burns, R. A., Caratti o Garatti, A., Chen, X., Chibueze, J. O., Houde, M., Kaczmarek, J. F., Linz, H., Rajabi, F., Saito, Y., Schmidl, S., Sobolev, A. M., Stecklum, B., van den Heever, S. P., and Yonekura, Y. (2019). Detection of new methanol maser transitions associated with g358.93 – 0.03. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 489(3):3981–3989.
- Menten, K. M. (1991). The Discovery of a New, Very Strong, and Widespread Interstellar Methanol Maser Line. *Astrophysical Journal, Letters*, 380:L75.
- Menten, K. M. and Batrla, W. (1989). Observations of Various Methanol Maser Transitions toward the NGC 6334 Region. *Astrophysical Journal*, 341:839.
- Menten, K. M., Johnston, K. J., Wilson, T. L., Walmsley, C. M., Mauersberger, R., and Henkel, C. (1985). VLA observations of the 9 2- 10 1 A+ methanol masers toward W3 (OH). *Astrophysical Journal, Letters*, 293:L83–L85.
- Minier, V., Booth, R. S., and Conway, J. E. (2002). VLBI observations of 6.7 and 12.2 GHz methanol masers toward high mass star-forming regions. III. The milliarcsecond structures of masing regions. *Astronomy and Astrophysics*, 383:614–630.
- Pottage, J. T., Flower, D. R., and Davis, S. L. (2001). The rotational excitation of methanol by helium at low temperatures. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 34(16):3313.
- Sobolev, A., Cragg, D. M., and Godfrey, P. D. (1997). Pumping of class ii methanol masers. ii. the 5_1-6_0 a^+a^- transition. *Astronomy and Astrophysics*, v. 324, p. 211-220, 324:211–220.
- Sobolev, A. M. and Deguchi, S. (1994). Pump Cycles and Population Flow Networks in Astrophysical Masers: an Application to Class II Methanol Masers with Different Saturation Degrees. *Astrophysical Journal*, 433:719.
- Volvach, A., Volvach, L., Larionov, M., and MacLeod, G. (2019). Detection of methanol maser flares near 19.9 and 20.9 ghz toward the massive source of active star formation g358. 931-0.030. *Astronomy Letters*, 45(11):764–769.
- Wilson, T., Walmsley, C., Snyder, L., and Jewell, P. (1984). Detection of a new type of methanol maser. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 134, no. 1, May 1984, p. L7-L10., 134:L7–L10.
- Wilson, T. L., Walmsley, C. M., Menten, K. M., and Hermsen, W. (1985). The discovery of a new masering transition of interstellar methanol. *Astronomy and Astrophysics*, 147:L19–L22.