

平成 25 年度 (2013 年度)
卒業論文

ペルセウス腕の IRAS 点源に対する
6.7 GHz メタノールメーザ探査 I : 銀経 $110\text{--}120^\circ$

茨城大学理学部理学科学際理学コース
10s6034x
山田 淑乃

Abstract

星形成領域では水メーザやメタノールメーザ等が観測されている。これらは星形成過程を理解するために有益な情報を提供する。特に 6.7 GHz メタノールメーザは、いまだ形成過程に不明点も多い大質量星の形成領域をトレースすることが知られている。本研究ではペルセウス腕に位置する IRAS 点源に対する 6.7 GHz メタノールメーザの探査を行い、過去の観測結果との比較等をおこなった。

日立局 32m 電波望遠鏡を用いて、ペルセウス腕方向の IRAS 点源 472 天体の観測を行った。2013 年 12 月 13 日から 2014 年 1 月 12 日にかけて 1 日おきに観測し、そのスペクトル図を確認した。その結果、IRAS23139+5939 と IRAS23126+6111 の 2 天体の放射を検出したが、これらは以前に観測例があり新発見の天体とはならなかった。しかし、過去の検出例と比較すると強度比に変化が見られた。また、IRAS23116+6111 からの離角が小さい IRAS23103+6109 と IRAS23123+6117 の観測では、ビームパターンをガウシアンビームであると仮定したとき以上に強く IRAS23116+6111 の放射の映り込みが見られた。これは、アンテナのサイドローブの影響を受けていると考えられ、栗橋 (2011) で行われた測定の結果に則したデータが得られた。

検出天体、非検出天体の特徴を明らかにするため IRAS フラックスの値のプロットを行ったが、明らかな差異は発見できなかった。

目次

第1章	序論	3
1.1	メーザ現象	3
1.1.1	メーザ現象とは	3
1.1.2	メーザの構造・発生条件	3
1.2	メタノールメーザ	5
1.2.1	メタノールメーザの分類	5
1.2.2	6.7 GHz メタノールメーザの特徴	6
1.2.3	大質量星形成のトレーサー	6
1.3	研究目的	6
第2章	観測	7
2.1	観測天体	7
2.2	観測パラメータ	19
2.3	観測方法	20
第3章	結果	21
3.1	検出天体	21
3.1.1	IRAS23139+5939	21
3.1.2	IRAS23116+6111	22
3.1.3	IRAS23103+6109、IRAS23123+6117	22
3.1.4	IRAS23324+6045	23
3.2	うねりの発生	23
3.3	本観測で検出された天体	24
第4章	考察	25
4.1	類似しているスペクトル	25
4.1.1	IRAS23103+6109、IRAS23123+6117 と IRAS23116+6111 の強度の比較	25
4.1.2	サイドローブの可能性	26
4.2	過去観測との比較	27
4.2.1	IRAS23139+5939 の過去観測との比較	27
4.2.2	IRAS23116+6111 の過去観測との比較	28
4.3	うねりが発生した原因	28
4.4	非検出天体	29
4.5	IRAS フラックスの特徴	29
第5章	まとめ	31

謝辞	32
参考文献	33

第1章 序論

1.1 メーザ現象

1.1.1 メーザ現象とは

原子や分子といった粒子は衝突や赤外線照射により励起されるが、通常の輝線スペクトルはこれらの粒子が自発的に下の準位に落ちるときに電波を放出するもので非常に微弱である。通常はボルツマン分布にしたがい、高い準位の存在確率分布は低い準位の存在確率分布よりも小さい。しかし、分子同士の衝突による衝突励起や、外部の放射による放射励起により、存在確率分布が反転した状態が生じる。反転分布は非常に不安定な状態であり、何らかのきっかけで粒子が高い準位から低い準位に遷移すると、次々と他の粒子も遷移を起こす。これを誘導放射といい放出された電波は強い輝線として観測される。これがメーザ (MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる現象である。1965年に OH メーザが検出されて以来、 H_2O , HCN , CH_3OH , H_2CO など様々な分子でメーザ現象が検出されている。このようなメーザは星形成領域から晩期型星まで様々な進化段階の星・領域に付随していることが多い。

1.1.2 メーザの構造・発生条件

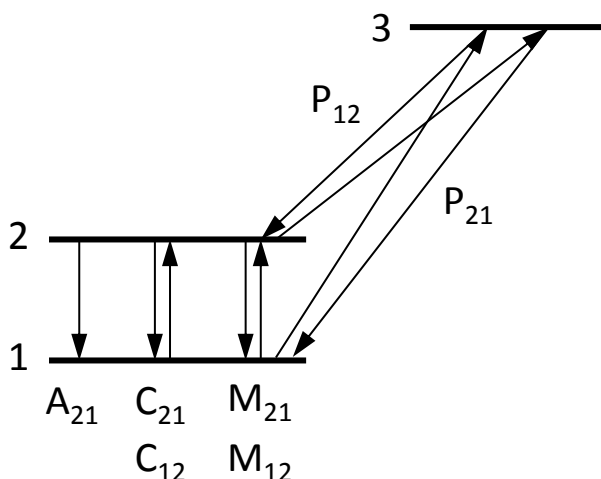


図 1.1: 三準位メーザの簡単なモデル

図 1.1 に示すようなメーザを考える [1]。問題とする二つのエネルギー準位 1 および 2 の平衡式は

$$N_2(C_{21} + M_{21} + P_{21} + A_{21}) = N_1(C_{12} + M_{12} + P_{12}) \quad (1.1)$$

と表すことができる。ただし

N :それぞれの準位に存在する分子の数密度

C_{ij} :衝突遷移確率

M_{ij} :強制放射および吸収の確率

$M_{ij} \equiv B_{ij}I\Omega_m/4\pi$ で定義される。 Ω_m は放射ビームの立体角。 B_{ij} は吸収係数。

強制放射による電波は入射と同じ方向へ放射されるため、角度依存性が付加される。

P_{ij} :他の準位を介しての遷移、ポンプアップ、ポンプダウンの確率

エネルギー準位 1 から 3 へ遷移した分子が準位 2 に落ちることで反転分布が生じる。

A_{ij} :自然放射係数

である。

メーザ源は一般的に、数密度、温度、電波強度が大きいとき C 、 M 、 P に対して自然放射係数 A を無視することができる。また、 $C_{12} = C_{21} = C$ とできる。よって、 $M = M_{12} = M_{21}$ として

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{C + M + P_{12}}{C + M + P_{21}} \quad (1.2)$$

と表せる。すべての効果を考慮した分布の反転は、 $P = P_{12} + P_{21}$ において

$$\Delta N = N_2 - N_1 = \frac{\Delta N_0}{1 + \frac{2(C+M)}{P}} \quad (1.3)$$

と表せる。ここで ΔN_0 は $M = C = 0$ のときの ΔN である。さらに電場の z 軸方向への伝播を考える。輻射輸送方程式を全周波数で積分すると z 方向への伝播式は

$$\frac{dI}{dz} = \frac{h\nu}{4\pi\Delta\nu}((N_2 - N_1)BI + N_2A_{21}) \quad (1.4)$$

となる。式 (1.4) に式 (1.3) を代入すると、

$$\frac{dI}{dz} = \frac{\alpha_0 I}{1 + \frac{I}{I_s}} + \epsilon \quad (1.5)$$

が得られる。ここで

$$\alpha_0 \equiv \frac{h\nu B}{4\pi\Delta\nu} \frac{\Delta N_0}{1 + \frac{2C}{P}} \quad (1.6)$$

$$I_s \equiv \frac{1 + \frac{2C}{P}}{\frac{B\Omega_m}{2\pi P}} \quad (1.7)$$

$$\epsilon \equiv \frac{h\nu}{4\pi\Delta\nu} N_2 A_{21} \quad (1.8)$$

である。式 (1.5) の第一項は、反転分布状態の分子に強度 I の電波が入射することで起こる、誘導放射のメーザ増幅分を表している。 α_0 は逆吸収係数、 I_s はメーザが飽和する強度である。誘導放射がエネルギー準位間の存在分布に影響を及ぼし始める放射強度の状態 $I > I_s$ を、メーザが飽和し

た状態と呼ぶ。

$I < I_s$ の不飽和メーザでは

$$I = I_0 e^{\alpha_0 z} + \frac{\epsilon}{\alpha_0} (e^{\alpha_0 z} - 1) \quad (1.9)$$

となり、メーザの強度は、見通す距離 z の増加に伴い指数関数的に増加することが分かる。これは誘導放射の雪崩的に起こる遷移によるものであり、ひとつの種光子により生成される。その後、メーザ現象自身により反転分布が崩れ始めると飽和したメーザ状態に突入する。このとき

$$\frac{dI}{dz} = \alpha_0 I + \epsilon = \text{一定} \quad (1.10)$$

より

$$I = I_0 + (\alpha_0 I + \epsilon) z \quad (1.11)$$

となる。メーザ強度は $\alpha_0 z$ にほぼ比例し、 z に伴い一次関数的に増加することがわかる。このことから、飽和メーザでは大幅な強度の増加を望むことができない。

1.2 メタノールメーザ

1.2.1 メタノールメーザの分類

メタノール分子は 25 GHz でのメーザ発見以来、様々な周波数における遷移が発見されてきた [2]。メタノールメーザはその付随領域の違いからクラス I とクラス II に分類される。表 1.1 に、周波数によるクラスの分類を示す。

表 1.1: 様々な周波数帯におけるメタノール遷移

クラス	周波数 [GHz]
I	9.9, 25.0, 25.8, 26.8, 27.4, 28.1, 29.6, 30.3, 36.1, 44.1, 84.5, 95.2, 104.3, 32.9, 146.6, 229.8
II	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 29.0, 37.7, 38.2, 38.4, 86.6, 86.9, 107.0, 108.8, 156.6, 156.8, 157.2

クラス I とクラス II のメタノールメーザは付随領域、励起機構、放射サイズなど様々な点で違いがみられる。表 1.2 に示す。

表 1.2: クラス I と II の特徴

パラメータ	クラス I	クラス II
HII、赤外線、OH メーザ	付随しない	付随する
発生領域	アウトフロー先端	星周円盤
励起機構	衝突励起	赤外線励起
スポットのサイズ	数百 AU	数 AU
典型的な輝度温度	$10^6 - 10^8 \text{ K}$	$> 10^{10} \text{ K}$

クラス I メタノールメーザは、アウトフローが周囲の高密度物質と相互作用するときに生じているといわれている。放射スポットのサイズも大きく、VLBI 観測のように高分解能の観測では分解されてしまう。クラス II メタノールメーザは赤外線源や UCHII 領域と発生領域がよく一致しているとされてきた。しかし、最近の観測によると UCHII 領域とは数秒角のずれがあり、空間的に一致はしていないという報告もされている。また発生領域は円盤に付随するという説とアウトフローに付随するという説があるが、近年では VLBI 観測の結果から円盤に付随するという説が有力である。Menten は一つの天体においてクラス I、II の両方の放射が検出されることはないとしたが、近年の観測ではクラス I、II の両方が同一天体から検出された例も報告されており、分類には注意が必要である [3]。

1.2.2 6.7 GHz メタノールメーザの特徴

本研究で観測した 6.7 GHz メタノールメーザは、クラス II に分類されている。1991 年に Menten の観測で発見されており、その静止周波数は 6668.519 MHz である。メタノールメーザは前述のように様々な波長帯で検出されているが、6.7 GHz メタノールメーザはもっとも明るいメーザとして知られ、メーザ全種の中でも、 H_2O に次ぐ二番目の明るさである。メーザ源である分子ガス領域のサイズは数 AU ($1\text{AU} = 1.5 \times 10^{11}\text{m}$) 程度と、クラス II のメーザが検出されるスポットに比べコンパクトであるため、観測される輝度温度も非常に高い。そのため VLBI 観測のように高分解能な観測に適しており数ミリ秒角での観測も行われている。

1.2.3 大質量星形成のトレーサー

6.7 GHz メタノールメーザは、太陽の 8 倍以上の質量を有する大質量星の形成領域のみから検出されており、小中質量星形成領域や晩期型星からは未検出である。大質量星の形成過程の中でも、分子雲中に存在する高密度な分子雲コアのような、非常に進化の若い段階をトレースしていると考えられている [4]。かつては OH メーザや H_2O メーザが大質量星の形成過程解明に重要な役割を果たすと考えられてきたが、これらのメーザは低質量星や銀河中心など星形成以外の天体にも付随する。また、アウトフロー起源と円盤起源のメーザが混在しておりメタノールのようなクラス分類がない。これらの理由から、6.7 GHz メタノールメーザは大質量星形成領域の重要なトレーサーとして、形成過程の解明を期待されている。

1.3 研究目的

これまでに述べたように、6.7 GHz メタノールメーザは大質量星の形成領域をトレースすることから、大質量星の形成過程を理解するために有益な情報を提供すると考えられる。本研究ではペルセウス腕に位置する IRAS 点源に対する 6.7 GHz メタノールメーザの探査をおこなった。過去におこなわれた観測との比較による強度変動の調査と、新たな 6.7 GHz メタノールメーザ源の探査、IRAS 観測波長のフラックス密度と検出天体、非検出天体の特徴の考察をおこない、大質量星が形成される領域について理解を深める。

第2章 観測

2.1 観測天体

本研究の観測天体は、赤外線天文衛星 IRAS の観測により作成された IRAS Point Source Catalog から選出した。具体的な選出条件は以下の条件である。

- (1) IRAS の観測波長 $25\ \mu\text{m}$ と $60\ \mu\text{m}$ で検出されている。
- (2) 銀経 (glon): $110^\circ < \text{glon} < 120^\circ$ 銀緯 (glat): $-5^\circ < \text{glat} < 5^\circ$ に存在する。

(1) の条件は星形成初期の大質量原始星が暖めた星周円盤の微粒子からみられる放射の特徴であり、(2) の条件は天の川銀河のペルセウス腕方向にある天体に限定するためである。この方法で選出された天体は 472 天体であった。天体の名称と座標は表 2.1 のとおりである。

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
00000+6706	00000+67	0.669341	67.381638	118.2563	4.9537
00001+6417	00001+64	0.672196	64.567749	117.7266	2.1899
00002+6647	00002+6A	0.697936	67.063026	118.207	4.6387
00010+6022	00010+60	0.899833	60.650246	117.0999	-1.6786
00016+6638	00016+66	1.059058	66.928009	118.3211	4.4799
00021+6604	00021+66	1.181843	66.349388	118.2637	3.902
00025+6708	00025+67	1.280982	67.412437	118.494	4.9407
00027+6700	00027+67	1.35215	67.294098	118.4998	4.8194
00029+6546	00029+65	1.387267	66.056313	118.2929	3.5988
00033+6035	00033+60	1.499216	60.866592	117.427	-1.5185
00036+6117	00036+61	1.572248	61.565193	117.5838	-0.8368
00044+6521	00044+65	1.764379	65.644608	118.3731	3.1665
00045+6109	00045+61	1.802137	61.439335	117.6701	-0.9796
00047+6441	00047+64	1.852313	64.967102	118.2935	2.4927
00049+6654	00049+66	1.897897	67.190979	118.6904	4.6811
00050+6631	00050+66	1.910631	66.811531	118.6307	4.3063
00052+6710	00052+67	1.978225	67.455688	118.766	4.9368
00053+6046	00053+60	1.99527	61.04681	117.6953	-1.3822
00054+6707	00054+67	2.021587	67.397354	118.7726	4.8765
00056+6605	00056+66	2.078345	66.364845	118.6213	3.8548
00062+6435	00062+64	2.210078	64.877884	118.4282	2.3794

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
00063+6706	00063+67	2.251724	67.385094	118.8581	4.8497
00065+5852	00065+58	2.290739	59.150379	117.5262	-3.2769
00067+6340	00067+63	2.35951	63.954247	118.3409	1.4576
00070+5756	00070+57	2.407746	58.219803	117.4347	-4.2049
00070+6503	00070+6A	2.431973	65.335899	118.5951	2.8161
00070+6516	00070+6B	2.434305	65.556175	118.6317	3.0333
00071+6704	00071+67	2.451059	67.35006	118.9283	4.8026
00073+6335	00073+63	2.486929	63.865612	118.3819	1.3611
00074+6710	00074+67	2.539279	67.448937	118.9779	4.8947
00080+6329	00080+63	2.666926	63.768913	118.4449	1.253
00081+5829	00081+58	2.69706	58.771973	117.6726	-3.684
00081+6003	00081+60	2.7008	60.333359	117.9203	-2.1423
00082+6508	00082+65	2.723025	65.417511	118.728	2.8773
00087+6025	00087+60	2.847777	60.697769	118.0486	-1.7936
00087+5833	00087+58	2.860485	58.830547	117.7656	-3.6393
00088+6012	00088+60	2.877843	60.483044	118.03	-2.0081
00090+6322	00090+63	2.932303	63.656082	118.5435	1.1233
00108+6519	00108+65	3.381878	65.606804	119.0271	3.023
00115+6038	00115+60	3.55618	60.923153	118.4241	-1.6224
00116+6716	00116+67	3.583608	67.55619	119.3906	4.94
00117+6412	00117+64	3.615521	64.479523	118.9612	1.8933
00121+6543	00121+65	3.71733	65.997543	119.2198	3.3898
00125+5929	00125+59	3.802351	59.772255	118.3811	-2.7789
00127+6058	00127+60	3.871395	61.244728	118.6205	-1.3256
00128+6047	00128+60	3.87874	61.074451	118.6003	-1.4947
00131+6529	00131+65	3.958682	65.770256	119.2858	3.151
00134+6417	00134+64	4.03952	64.573563	119.155	1.9609
00136+6103	00136+61	4.091778	61.334938	118.7378	-1.2508
00138+6544	00138+65	4.152048	66.019081	119.3981	3.3867
00139+6413	00139+64	4.164835	64.507408	119.1995	1.8881
00141+6529	00141+65	4.216843	65.768501	119.3906	3.1348
00145+6511	00145+65	4.311862	65.472916	119.3902	2.8367
00158+6128	00158+61	4.648588	61.75975	119.0567	-0.8645
00161+5820	00161+5A	4.704846	58.622791	118.6862	-3.9797
00161+5813	00161+5B	4.707194	58.496121	118.6714	-4.1055
00165+6451	00165+64	4.812224	65.135796	119.5543	2.4755
00165+6534	00165+65	4.822219	65.852455	119.6479	3.186
00169+6326	00169+63	4.932207	63.719364	119.4304	1.0635
00170+6542	00170+65	4.964477	65.991844	119.7228	3.3172
00174+6150	00174+61	5.054524	62.123482	119.2912	-0.5273

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
00177+5900	00177+59	5.116168	59.289852	118.9796	-3.3439
00180+6414	00180+64	5.194357	64.514259	119.64	1.8388
00181+6247	00181+62	5.227912	63.066467	119.4832	0.3994
00182+6223	00182+62	5.24227	62.671742	119.4431	0.0067
00182+6307	00182+63	5.25298	63.395069	119.5332	0.7244
00184+6619	00184+66	5.320267	66.596985	119.9377	3.9008
00185+6302	00185+63	5.330655	63.322258	119.5592	0.648
00186+5940	00186+59	5.350816	59.953087	119.1762	-2.6994
00186+6132	00186+61	5.356691	61.823639	119.3967	-0.8418
00187+6127	00187+61	5.369569	61.741409	119.3932	-0.9242
00190+5858	00190+58	5.443745	59.248882	119.1413	-3.4043
00197+5854	00197+58	5.613769	59.192696	119.2215	-3.47
00198+6054	00198+60	5.646798	61.189346	119.4619	-1.4878
00204+6142	00204+61	5.812346	61.985104	119.6281	-0.7056
00206+6034	00206+60	5.85629	60.852306	119.5257	-1.834
00210+6221	00210+62	5.963458	62.63781	119.7684	-0.0643
00222+5914	00222+59	6.252863	59.522953	119.5815	-3.1767
00248+5957	00248+59	6.904712	60.235664	119.977	-2.4993
23464+6506	23464+65	357.215271	65.393738	116.4742	3.3097
23466+5840	23466+58	357.274292	58.953766	114.9567	-2.9492
23470+6023	23470+60	357.386444	60.662399	115.4192	-1.3033
23477+6049	23477+60	357.551178	61.102993	115.6012	-0.8941
23478+6523	23478+65	357.564819	65.666603	116.6801	3.5403
23478+6248	23478+62	357.575989	63.085777	116.0781	1.0305
23481+6640	23481+66	357.637177	66.946343	117.0098	4.7774
23481+6154	23481+61	357.64679	62.179127	115.8975	0.1414
23481+5941	23481+59	357.659821	59.969967	115.3877	-2.0081
23482+6524	23482+65	357.664612	65.6819	116.7237	3.5455
23483+6325	23483+63	357.703217	63.70219	116.2776	1.6165
23486+5958	23486+59	357.773865	60.253048	115.5089	-1.746
23486+6336	23486+63	357.779999	63.885261	116.3531	1.7867
23487+6112	23487+61	357.796295	61.48027	115.8037	-0.5547
23489+6235	23489+62	357.865631	62.863338	116.1544	0.7836
23490+5720	23490+57	357.885559	57.627518	114.9573	-4.3138
23491+6243	23491+62	357.905853	63.010571	116.206	0.9227
23493+6230	23493+62	357.960754	62.791969	116.1803	0.7041
23494+6155	23494+61	357.975586	62.199474	116.0514	0.1258
23496+6131	23496+61	358.022186	61.803928	115.9824	-0.2643
23496+6420	23496+64	358.023743	64.617813	116.6247	2.4753
23498+6215	23498+62	358.074951	62.536438	116.1731	0.4434

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23501+6122	23501+61	358.164429	61.654232	116.0141	-0.4254
23502+6634	23502+66	358.177124	66.847282	117.1937	4.6322
23504+6043	23504+6A	358.235138	61.0023	115.9003	-1.0682
23504+6012	23504+6B	358.242645	60.479248	115.7863	-1.5787
23506+6224	23506+62	358.275848	62.693973	116.2986	0.576
23506+6005	23506+60	358.289368	60.372036	115.7847	-1.6884
23507+6230	23507+62	358.303955	62.783421	116.3312	0.6603
23514+6005	23514+60	358.48645	60.373455	115.8801	-1.7087
23515+6016	23515+60	358.516174	60.557625	115.935	-1.5323
23516+6430	23516+64	358.546814	64.791511	116.8817	2.5945
23517+5829	23517+58	358.567627	58.767635	115.5657	-3.284
23518+6239	23518+62	358.590271	62.939854	116.4932	0.7839
23518+5713	23518+57	358.59726	57.49931	115.3013	-4.5247
23521+6639	23521+66	358.648163	66.931244	117.3933	4.6729
23527+6328	23527+63	358.819427	63.757107	116.7715	1.5592
23532+6247	23532+62	358.943542	63.074902	116.679	0.881
23534+6354	23534+63	358.977814	64.179344	116.9302	1.9566
23540+6629	23540+66	359.142578	66.768806	117.5486	4.4724
23542+6006	23542+60	359.200806	60.384934	116.2275	-1.7736
23545+6645	23545+66	359.254944	67.030762	117.6473	4.7191
23545+6508	23545+65	359.27182	65.419655	117.3153	3.1424
23546+6421	23546+64	359.292816	64.629097	117.1584	2.3675
23550+6430	23550+64	359.396301	64.781052	117.2334	2.5069
23551+6054	23551+60	359.410675	61.190781	116.4958	-1.0068
23552+6341	23552+63	359.45639	63.975502	117.092	1.7134
23553+6609	23553+66	359.460022	66.43689	117.6026	4.1214
23558+6505	23558+65	359.58429	65.369118	117.4323	3.066
23559+6540	23559+65	359.627441	65.94912	117.5685	3.6302
23561+6037	23561+60	359.661255	60.896633	116.5543	-1.3196
23561+6609	23561+66	359.674469	66.436905	117.6867	4.1038
23567+6606	23567+66	359.833313	66.385796	117.7388	4.0409
23573+6339	23573+63	359.968933	63.943584	117.306	1.6366
23579+5916	23579+59	0.131661	59.561096	116.5163	-2.6749
23583+6417	23583+64	0.235704	64.571922	117.5433	2.2299
23586+6412	23586+64	0.300946	64.480812	117.5531	2.135
23586+6603	23586+66	0.305996	66.335808	117.9151	3.9545
23587+6210	23587+62	0.32661	62.450535	117.1717	0.1409
23589+6341	23589+63	0.382584	63.962479	117.4879	1.6196
23590+6056	23590+60	0.404789	61.223591	116.9716	-1.0702
23591+6154	23591+61	0.435098	62.189701	117.171	-0.1248

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23592+6228	23592+62	0.442695	62.749424	117.2816	0.4239
23592+6359	23592+6A	0.444881	64.276916	117.575	1.923
23592+6305	23592+6B	0.466707	63.375813	117.412	1.0367
23593+6320	23593+63	0.468827	63.627476	117.461	1.2835
23597+5941	23597+59	0.572387	59.969982	116.8132	-2.3165
00002+6641	00002+6B	0.713509	66.9683	118.1952	4.5445
00017+6342	00017+63	1.0887	63.984119	117.7964	1.5829
00032+6348	00032+63	1.473792	64.088257	117.981	1.6553
00034+6658	00034+66	1.526204	67.257416	118.5597	4.7714
00040+6645	00040+66	1.656285	67.044624	118.5724	4.5531
00117+6153	00117+61	3.610229	62.161468	118.6273	-0.4006
00188+5955	00188+59	5.387791	60.199737	119.2232	-2.4565
00245+5836	00245+58	6.832514	58.890427	119.8152	-3.8353
23395+6358	23395+63	355.483429	64.252609	115.4713	2.3924
23397+6214	23397+62	355.53656	62.521244	115.0344	0.7168
23398+6040	23398+60	355.555756	60.94931	114.6268	-0.8014
23398+6522	23398+65	355.552307	65.652359	115.8719	3.7341
23400+6320	23400+63	355.611816	63.626549	115.3597	1.7738
23406+6513	23406+65	355.755188	65.49688	115.9119	3.562
23410+6307	23410+63	355.86554	63.396648	115.4087	1.5222
23416+6130	23416+61	356.015076	61.789482	115.0588	-0.0479
23424+5656	23424+56	356.233093	57.223179	113.9932	-4.4898
23424+5845	23424+58	356.231689	59.035118	114.4558	-2.7376
23430+5919	23430+59	356.379242	59.6035	114.6731	-2.207
23431+6204	23431+62	356.404816	62.348782	115.378	0.4464
23436+6306	23436+63	356.525177	63.387432	115.6921	1.4379
23436+6011	23436+60	356.530212	60.464939	114.9628	-1.3922
23448+6010	23448+60	356.833649	60.455864	115.1055	-1.4381
23449+5756	23449+57	356.842865	58.222538	114.5604	-3.604
23457+6045	23457+60	357.058655	61.031483	115.3527	-0.9067
22489+6359	22489+63	342.706299	64.249557	110.2892	4.3798
22544+6412	22544+64	344.09845	64.47068	110.9294	4.314
22551+6221	22551+6A	344.271515	62.62896	110.2097	2.6164
22551+6227	22551+6B	344.286438	62.730648	110.2593	2.7055
22553+6418	22553+64	344.329926	64.577377	111.0654	4.3679
22561+6305	22561+63	344.516602	63.35984	110.6215	3.2308
22562+6310	22562+63	344.564453	63.442406	110.6759	3.2966
22566+6248	22566+62	344.655518	63.078632	110.5594	2.9495
22567+6220	22567+62	344.686615	62.607563	110.3738	2.5162
22568+6141	22568+61	344.716553	61.962322	110.115	1.9249

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
22571+6213	22571+62	344.778076	62.500179	110.3669	2.401
22575+6158	22575+61	344.894409	62.241161	110.3075	2.1432
22577+6230	22577+6A	344.929871	62.77343	110.5448	2.62
22577+6209	22577+6B	344.936615	62.422329	110.401	2.2997
22582+6219	22582+6A	345.054565	62.596088	110.5229	2.435
22582+6205	22582+6B	345.056396	62.360535	110.4258	2.2204
22585+6402	22585+64	345.124451	64.311455	111.265	3.9824
22585+6214	22585+62	345.143768	62.512035	110.5255	2.3414
22589+6236	22589+62	345.249664	62.876335	110.7206	2.653
22590+6255	22590+62	345.27298	63.191921	110.8606	2.9361
22591+6240	22591+62	345.298035	62.941673	110.7676	2.7035
22592+6222	22592+62	345.325867	62.645317	110.657	2.4282
22593+6401	22593+64	345.337067	64.288948	111.3398	3.9238
22594+6117	22594+6A	345.363556	61.563419	110.2278	1.4348
22594+6158	22594+6B	345.362305	62.236195	110.5039	2.0484
22595+6207	22595+62	345.386597	62.39817	110.5808	2.1914
22597+6149	22597+61	345.456055	62.08659	110.4824	1.894
23002+6424	23002+64	345.559204	64.673668	111.5857	4.2352
23004+6148	23004+61	345.615845	62.075954	110.5464	1.8537
23007+6222	23007+62	345.697144	62.642998	110.8119	2.3563
23011+6126	23011+61	345.804504	61.707291	110.4778	1.4807
23014+6208	23014+62	345.870819	62.412094	110.7915	2.1127
23017+6007	23017+60	345.948181	60.401352	110.0139	0.2579
23018+6113	23018+61	345.982117	61.500839	110.4717	1.2577
23025+6429	23025+64	346.125458	64.762955	111.8437	4.2188
23030+5958	23030+59	346.29425	60.244541	110.1081	0.0456
23031+6003	23031+60	346.304749	60.333443	110.1483	0.1251
23031+6211	23031+62	346.294373	62.456207	110.9889	2.0745
23031+6142	23031+61	346.307465	61.975666	110.803	1.6312
23032+6016	23032+60	346.341553	60.547375	110.25	0.3142
23033+5951	23033+59	346.354828	60.136555	110.0928	-0.0654
23037+6251	23037+6A	346.448334	63.12611	111.3199	2.6613
23037+6213	23037+6B	346.453888	62.500561	111.0742	2.0859
23042+6000	23042+60	346.588196	60.271545	110.2527	0.0127
23045+6215	23045+62	346.644653	62.525223	111.1649	2.0738
23045+6332	23045+63	346.638275	63.815773	111.6708	3.2613
23046+6313	23046+63	346.666229	63.488861	111.5533	2.9559
23164+6347	23164+63	349.645844	64.069931	112.9933	3.0048
23165+6150	23165+61	349.689667	62.116363	112.3262	1.1683
23166+5737	23166+57	349.726959	57.905563	110.8694	-2.7826

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23167+6018	23167+6A	349.734253	60.57946	111.8085	-0.2789
23167+6057	23167+6B	349.740204	61.236683	112.0409	0.3359
23169+6126	23169+61	349.7901	61.707283	112.2275	0.7685
23172+6227	23172+62	349.85025	62.739838	112.6136	1.7266
23173+5720	23173+57	349.910065	57.612946	110.8589	-3.091
23174+5941	23174+59	349.924652	59.971848	111.6854	-0.8814
23177+6211	23177+62	349.988892	62.463291	112.5775	1.4451
23179+6059	23179+60	350.028442	61.261101	112.1794	0.3106
23179+5804	23179+58	350.038757	58.353058	111.1797	-2.4203
23181+5710	23181+57	350.094849	57.443661	110.8934	-3.2841
23181+6549	23181+65	350.078247	66.106979	113.8761	4.8506
23183+5644	23183+56	350.163239	57.023998	110.7833	-3.6908
23183+6151	23183+61	350.146179	62.136482	112.5334	1.1131
23184+5819	23184+5A	350.178253	58.594845	111.3316	-2.2185
23185+6055	23185+60	350.179993	61.197342	112.2259	0.2256
23185+6326	23185+63	350.17923	63.721233	113.0923	2.5962
23188+6049	23188+60	350.255585	61.093517	112.2246	0.1156
23188+6101	23188+61	350.269135	61.302139	112.3021	0.3094
23190+5637	23190+56	350.326019	56.896633	110.8231	-3.8409
23190+5914	23190+59	350.319824	59.50885	111.7131	-1.3846
23191+5935	23191+59	350.335449	59.871921	111.8444	-1.046
23191+5730	23191+57	350.35791	57.776382	111.1403	-3.0199
23192+5904	23192+59	350.367401	59.341392	111.6787	-1.5503
23193+5911	23193+59	350.401489	59.457809	111.7347	-1.4467
23199+6144	23199+61	350.5448	62.009315	112.6656	0.93
23206+6049	23206+60	350.719147	61.095566	112.4361	0.0416
23207+6057	23207+60	350.75058	61.240036	112.4988	0.1726
23209+5909	23209+59	350.80481	59.424526	111.9166	-1.5472
23210+5708	23210+57	350.824493	57.423153	111.2564	-3.4368
23211+5833	23211+58	350.8591	58.837624	111.7467	-2.1097
23211+5553	23211+55	350.867676	56.166244	110.8574	-4.6293
23212+5857	23212+58	350.873871	59.234859	111.8864	-1.7378
23212+5634	23212+5A	350.886078	56.845978	111.0947	-3.992
23212+5639	23212+5B	350.886261	56.934589	111.1245	-3.9085
23213+5848	23213+58	350.903717	59.085716	111.8512	-1.8835
23214+5643	23214+56	350.929749	56.997124	111.1678	-3.8575
23215+6306	23215+63	350.927704	63.384064	113.2922	2.1662
23215+6022	23215+60	350.940399	60.653519	112.3901	-0.411
23215+5826	23215+58	350.953094	58.720753	111.7538	-2.2361
23217+6028	23217+60	351.001862	60.751625	112.451	-0.3285

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23218+5830	23218+58	351.034393	58.775261	111.8117	-2.1987
23219+5912	23219+59	351.061707	59.481949	112.0589	-1.5365
23222+5921	23222+59	351.125519	59.635887	112.1402	-1.4018
23226+6200	23226+62	351.210632	62.28373	113.0504	1.085
23228+5917	23228+59	351.271484	59.567108	112.1874	-1.4911
23228+6320	23228+63	351.273895	63.609333	113.5126	2.3279
23232+5932	23232+59	351.369446	59.82024	112.3169	-1.268
23234+5928	23234+5A	351.430145	59.753616	112.3241	-1.3409
23234+5602	23234+56	351.44223	56.319187	111.2104	-4.5904
23234+6434	23234+64	351.421692	64.856941	113.9816	3.486
23236+5903	23236+59	351.47464	59.329761	112.2076	-1.7491
23237+6351	23237+63	351.491516	64.131157	113.7737	2.7899
23239+5934	23239+59	351.552948	59.856209	112.4158	-1.2639
23239+5754	23239+57	351.563049	58.18177	111.8786	-2.85
23241+5950	23241+59	351.600098	60.110687	112.5203	-1.0307
23246+5649	23246+56	351.748413	57.094128	111.6214	-3.9115
23250+5837	23250+58	351.834503	58.906414	112.2461	-2.2094
23250+5957	23250+59	351.840485	60.233082	112.6729	-0.9532
23251+6142	23251+61	351.858673	61.990593	113.2421	0.7097
23252+6010	23252+60	351.889008	60.45034	112.765	-0.7549
23257+6131	23257+61	351.995087	61.79958	113.2423	0.5081
23262+6401	23262+64	352.115814	64.292435	114.083	2.8557
23264+6102	23264+61	352.181946	61.309429	113.172	0.0149
23264+6022	23264+60	352.190155	60.654713	112.9701	-0.6079
23265+5928	23265+59	352.219543	59.74279	112.6976	-1.4783
23268+5917	23268+59	352.276703	59.572552	112.6716	-1.649
23268+5622	23268+56	352.304718	56.658684	111.7719	-4.4209
23275+5906	23275+59	352.453613	59.38739	112.6993	-1.8529
23278+5908	23278+59	352.532074	59.419945	112.7474	-1.8343
23278+6000	23278+60	352.54541	60.276062	113.0185	-1.0222
23280+5838	23280+58	352.600952	58.917767	112.6257	-2.3229
23284+5958	23284+59	352.684113	60.254765	113.0774	-1.0637
23289+5852	23289+58	352.821716	59.157352	112.8075	-2.1297
23291+6359	23291+63	352.848938	64.274864	114.3803	2.7403
23295+6016	23295+60	352.960266	60.555771	113.2991	-0.8186
23299+5812	23299+58	353.059265	58.488331	112.7215	-2.8045
23300+6149	23300+61	353.088531	62.109181	113.8269	0.6437
23301+6316	23301+63	353.09906	63.555294	114.267	2.0213
23301+5849	23301+58	353.126343	59.104206	112.9404	-2.2277
23302+6025	23302+60	353.149414	60.700607	113.4313	-0.7085

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23304+6147	23304+61	353.187469	62.063683	113.8574	0.5864
23308+5811	23308+58	353.306244	58.462646	112.8372	-2.8677
23310+5911	23310+59	353.35022	59.473782	113.1602	-1.9092
23312+6028	23312+60	353.400177	60.751034	113.5633	-0.697
23314+6033	23314+60	353.434845	60.841606	113.6063	-0.6155
23321+6024	23321+60	353.608765	60.684761	113.6413	-0.7904
23321+6545	23321+65	353.594543	66.030579	115.2069	4.3214
23324+5834	23324+58	353.696014	58.8512	113.1459	-2.5564
23324+6045	23324+60	353.707123	61.042595	113.7918	-0.4622
23325+6523	23325+65	353.698517	65.668976	115.1412	3.9633
23328+6026	23328+60	353.791901	60.723476	113.7383	-0.7795
23330+6437	23330+64	353.848663	64.908501	114.9792	3.2176
23331+6435	23331+64	353.861847	64.86795	114.9728	3.1771
23331+6523	23331+65	353.864868	65.661568	115.2048	3.9362
23332+6208	23332+62	353.885773	62.42408	114.2744	0.835
23334+5827	23334+58	353.960815	58.738567	113.2446	-2.704
23341+6500	23341+65	354.124573	65.280037	115.198	3.5398
23343+5919	23343+59	354.188019	59.598133	113.603	-1.914
23344+6326	23344+63	354.184052	63.720345	114.7763	2.0378
23347+6428	23347+64	354.263306	64.755104	115.1042	3.02
23350+6413	23350+64	354.35199	64.495987	115.0671	2.7607
23351+5843	23351+58	354.382385	59.008785	113.5309	-2.5072
23352+5834	23352+58	354.417145	58.846302	113.5022	-2.6682
23358+5942	23358+59	354.551086	59.980534	113.8864	-1.5987
23361+6437	23361+64	354.613129	64.910278	115.2909	3.127
23361+6354	23361+63	354.622162	64.182785	115.0915	2.4273
23361+6116	23361+61	354.635345	61.558628	114.3662	-0.0948
23365+6050	23365+60	354.731659	61.111172	114.2864	-0.5374
23369+6142	23369+61	354.828674	61.986218	114.5725	0.2908
23371+6028	23371+60	354.876953	60.745686	114.2534	-0.9082
23371+6333	23371+63	354.875458	63.840679	115.1035	2.0678
23377+6059	23377+60	355.038635	61.26659	114.4713	-0.4286
23378+6134	23378+61	355.053467	61.847706	114.6363	0.1286
23379+6140	23379+61	355.073853	61.956604	114.6752	0.2308
23381+6505	23381+65	355.114227	65.361061	115.6182	3.5023
23384+6101	23384+61	355.208801	61.299721	114.559	-0.4189
23385+6053	23385+60	355.221649	61.172504	114.5306	-0.5431
23389+6529	23389+65	355.335968	65.775879	115.819	3.8769
23390+6524	23390+65	355.355133	65.678108	115.8003	3.7806
23391+6035	23391+60	355.373505	60.869789	114.5202	-0.8544

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23391+6106	23391+61	355.383911	61.387573	114.6635	-0.3568
23391+6336	23391+63	355.391663	63.883961	115.3342	2.0478
23392+5930	23392+59	355.407684	59.77953	114.2451	-1.9096
23074+5826	23074+58	347.395844	58.719387	110.0277	-1.5768
23077+5925	23077+59	347.480469	59.697811	110.4417	-0.6892
23078+6146	23078+61	347.487488	62.046986	111.341	1.4811
23078+6518	23078+65	347.473938	65.577812	112.6867	4.7463
23079+5932	23079+59	347.514862	59.806736	110.4993	-0.5951
23080+6058	23080+60	347.545929	61.241493	111.0597	0.7257
23081+6043	23081+60	347.563049	60.994564	110.9734	0.4942
23081+6219	23081+62	347.573029	62.601799	111.5892	1.9789
23085+6106	23085+61	347.675598	61.376629	111.1686	0.8271
23086+6325	23086+63	347.688873	63.702202	112.0559	2.977
23089+5914	23089+5A	347.771027	59.515064	110.5084	-0.9141
23089+5923	23089+5B	347.78595	59.670357	110.574	-0.7731
23089+5928	23089+5C	347.78772	59.749523	110.6047	-0.7001
23091+6211	23091+62	347.815918	62.46011	111.6393	1.8053
23100+5919	23100+59	348.047089	59.597015	110.6688	-0.8906
23101+6013	23101+60	348.075714	60.498989	111.0188	-0.0592
23102+6041	23102+60	348.109436	60.969578	111.2096	0.3713
23103+6245	23103+62	348.110382	63.03875	111.9814	2.2912
23103+6109	23103+61	348.12384	61.426537	111.3862	0.7928
23103+5956	23103+59	348.134033	60.215439	110.9399	-0.3331
23106+6340	23106+63	348.181854	63.953541	112.3522	3.1283
23106+6205	23106+62	348.20401	62.368565	111.7718	1.6532
23107+5928	23107+59	348.235931	59.741653	110.8112	-0.7919
23108+6408	23108+64	348.244629	64.414162	112.5492	3.5457
23109+5846	23109+5A	348.28064	59.046974	110.5749	-1.4455
23109+5839	23109+5B	348.287781	58.936703	110.5374	-1.5493
23113+6255	23113+62	348.353088	63.201771	112.144	2.4019
23113+6027	23113+60	348.368896	60.728172	111.2374	0.1003
23115+5920	23115+59	348.421295	59.609894	110.8495	-0.9489
23115+5859	23115+58	348.430603	59.259903	110.725	-1.2761
23116+6111	23116+61	348.440125	61.471577	111.5434	0.7787
23121+5857	23121+58	348.574371	59.225323	110.7807	-1.3352
23121+5914	23121+59	348.586334	59.508667	110.8901	-1.0738
23122+5758	23122+57	348.611938	58.25119	110.4422	-2.2489
23122+6324	23122+63	348.590881	63.68145	112.4196	2.8088
23123+5658	23123+56	348.640961	57.255108	110.0919	-3.1817
23123+6103	23123+6A	348.631104	61.332321	111.5774	0.6156

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23123+6117	23123+6B	348.630127	61.566486	111.6624	0.8338
23125+5921	23125+59	348.683319	59.624874	110.9783	-0.9835
23127+6431	23127+64	348.704224	64.801285	112.8756	3.8331
23127+5907	23127+5A	348.729584	59.389641	110.9145	-1.2111
23127+5948	23127+5B	348.731964	60.085476	111.1688	-0.5634
23129+6115	23129+61	348.774048	61.524403	111.711	0.7696
23129+6231	23129+62	348.770477	62.804958	112.1749	1.9632
23130+5750	23130+57	348.803436	58.116375	110.4871	-2.4112
23131+5812	23131+58	348.83075	58.476124	110.6311	-2.0812
23131+5942	23131+59	348.841614	59.980579	111.1817	-0.6811
23133+6050	23133+60	348.881226	61.119228	111.6121	0.3733
23134+6131	23134+61	348.894379	61.795074	111.8623	1.0012
23136+6111	23136+61	348.958801	61.469303	111.7732	0.6863
23137+6017	23137+60	348.971252	60.566261	111.4533	-0.1582
23137+5922	23137+59	348.976471	59.642376	111.1228	-1.0209
23137+5744	23137+57	348.983887	58.019325	110.541	-2.5363
23138+5659A	23138+56	349.023346	57.257698	110.2859	-3.2543
23138+5945	23138+59	349.019958	60.033249	111.2839	-0.6641
23138+6204	23138+62	349.010925	62.355465	112.1155	1.5041
23139+5939	23139+59	349.038849	59.922989	111.2531	-0.7704
23140+6042	23140+60	349.046936	60.982163	111.6375	0.2166
23140+6121	23140+61	349.04892	61.629108	111.8708	0.82
23141+6030	23141+6A	349.082581	60.784977	111.5829	0.0263
23146+5954	23146+59	349.203827	60.179535	111.4219	-0.5604
23146+6109	23146+6A	349.206909	61.438702	111.8729	0.6152
23146+6003	23146+60	349.218811	60.326214	111.4812	-0.4261
23147+5918	23147+59	349.226227	59.575943	111.2169	-1.1282
23149+6114	23149+61	349.291901	61.518501	111.9393	0.6753
23151+5912	23151+59	349.33786	59.480213	111.2357	-1.2379
23152+6034	23152+60	349.357605	60.845787	111.7298	0.0352
23153+6217	23153+62	349.387146	62.569424	112.3545	1.6418
23154+6120	23154+61	349.405853	61.613331	112.0237	0.7447
23155+5741	23155+57	349.433289	57.968079	110.7454	-2.6692
23155+6139	23155+61	349.440277	61.930862	112.1514	1.0359
23156+6135	23156+61	349.444305	61.871696	112.1322	0.9799
23156+5748	23156+57	349.468994	58.086166	110.8049	-2.5655
23158+6007	23158+60	349.506378	60.390366	111.6369	-0.4165
23158+6116	23158+61	349.503601	61.555641	112.0468	0.6743
23160+6017	23160+60	349.550262	60.570961	111.7208	-0.2552
23160+6536	23160+65	349.543365	65.878731	113.5914	4.7128

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23162+5816	23162+58	349.62912	58.55381	111.0486	-2.1575
22581+6352	22581+63	345.025482	64.137444	111.1532	3.8421
22587+6225	22587+62	345.197815	62.686272	110.6203	2.4898
22595+6111	22595+61	345.396851	61.466515	110.2024	1.34
23058+5917	23058+59	346.989166	59.567829	110.1624	-0.7136
23088+6014	23088+60	347.758423	60.516438	110.8806	0.0156
23113+5905	23113+59	348.376862	59.369572	110.7399	-1.164
23119+6157	23119+61	348.513641	62.238594	111.8575	1.4793
23126+6423	23126+64	348.676727	64.666809	112.8155	3.7122
23141+6008	23141+6B	349.087799	60.418316	111.4537	-0.3169
23142+6140	23142+61	349.097992	61.952766	112.0087	1.1137
23146+6136	23146+6B	349.203827	61.881477	112.0297	1.0293
23160+5959	23160+59	349.559784	60.268749	111.6188	-0.5397
23162+5732	23162+57	349.626495	57.807972	110.785	-2.8553
23182+5912	23182+59	350.109436	59.489784	111.6062	-1.3659
23184+5828	23184+5B	350.173126	58.753727	111.3837	-2.0683
23190+5852	23190+58	350.312164	59.147457	111.586	-1.723
23234+5951	23234+5B	351.431976	60.133064	112.4483	-0.9824
23237+5907	23237+59	351.5047	59.397839	112.2442	-1.6897
23238+6239	23238+62	351.510712	62.927563	113.391	1.6486
23239+5826	23239+58	351.561188	58.713715	112.05	-2.3463
23281+5742	23281+57	352.615356	57.97583	112.3421	-3.2212
23291+5555	23291+55	352.883606	56.203781	111.9361	-4.9525
23297+6246	23297+62	353.018555	63.052746	114.0808	1.553
23325+6033	23325+60	353.70932	60.826763	113.7298	-0.669
23326+5817	23326+58	353.760834	58.570961	113.0963	-2.8342
23338+6207	23338+62	354.034302	62.396381	114.3323	0.7887
23370+5854	23370+58	354.855438	59.190678	113.8152	-2.4003
23372+5850	23372+58	354.918976	59.122929	113.8279	-2.4744
23403+6038	23403+60	355.699158	60.911587	114.6841	-0.8561
23421+5722	23421+57	356.136841	57.660644	114.0553	-4.0536
23435+5850	23435+58	356.491577	59.122704	114.6073	-2.6867
23447+5837	23447+58	356.80896	58.908638	114.7124	-2.9347
23459+6016	23459+60	357.095337	60.546493	115.2526	-1.3816
23496+6645	23496+66	358.02475	67.04364	117.1802	4.837
23514+6402	23514+64	358.474792	64.311775	116.7455	2.1334
23525+5952	23525+59	358.755096	60.16127	115.9636	-1.9449
23545+6441	23545+64	359.257294	64.961876	117.2133	2.6961
23550+6234	23550+62	359.401276	62.846611	116.8344	0.614
23587+6004	23587+60	0.317349	60.35582	116.7625	-1.9135

表 2.1: 観測天体のリスト

IRAS 天体名	略称名	赤経 (deg)	赤緯 (deg)	銀経 (deg)	銀緯 (deg)
23593+6640	23593+66	0.484674	66.945808	118.1027	4.5394
23053+5927	23053+59	346.863708	59.731579	110.1678	-0.5381
23055+6000	23055+60	346.914154	60.283302	110.406	-0.0398
23055+5913	23055+59	346.923553	59.491367	110.102	-0.7711
23062+6111	23062+61	347.080078	61.465431	110.9394	1.0183
23063+5916	23063+59	347.13205	59.548267	110.2216	-0.7597
23065+5927	23065+59	347.163177	59.734413	110.308	-0.594
23068+6117	23068+61	347.232971	61.567822	111.0462	1.0846
23071+5908	23071+59	347.311157	59.40596	110.2507	-0.926
23071+6033	23071+60	347.308746	60.821514	110.793	0.3816
23072+6150	23072+61	347.336212	62.118767	111.303	1.5745

2.2 観測パラメータ

観測は日立 32m 電波望遠鏡を用いて行った。観測の内容は表 2.2 のとおりである。

表 2.2: 観測パラメータ

観測期間	2013 年 12 月 13 日—2014 年 1 月 12 日
望遠鏡	日立 32m 電波望遠鏡
ビームサイズ	～5 分角
開口能率	～70%
観測帯域幅	8MHz
サンプリングビット	4 ビット
分光点数	8192 点
積分時間	300 秒
速度分解能	0.044km/s
システム雑音温度	25-35K
rms ノイズレベル (1σ)	～0.3Jy

なお、rms ノイズレベル σ は以下の式で導出した理論値である。

$$\sigma = \frac{2k_B T_{sys} \times 10^{-23}}{\eta_{bit} A_e \sqrt{\delta_\nu t}} [\text{Jy}] \quad (2.1)$$

ただし

k_B : ボルツマン定数 = $1.38 \times 10^{-23} [\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}]$

T_{sys} : システム雑音温度 [K]

η_{bit} : サンプリング損失係数

A_e : アンテナの有効開口面積 [m^2]

δ_ν : 帯域幅 [Hz]

t :積分時間 [s]

である。

2.3 観測方法

まず観測スケジュールファイル作成のため、観測天体名、座標が記載された観測天体リスト“source.sch”を作成した。この観測天体リストとスケジュール作成ソフト“pc-sched.exe”を用いて観測スケジュールファイル DRG ファイルを作成した。on-off 法の観測を行うため、同じ天体を 2 回観測するよう設定し、2 回目の観測点をオフ点とした。オン点とオフ点の移動時間は 30 秒とし、次の天体への移動はその離角に応じて 5 秒の余裕ができるように観測時間を設定した。

次に、DRG ファイルを変換ソフト“drgconv-ibaraki.exe”を用いて 2 種の skd ファイルに変換した。2 種の skd ファイルはそれぞれアンテナを制御するための a.skd ファイル、データを取得するための o.skd ファイルである。アンテナを制御するための a.skd ファイルは on-off 法で観測を行うため、オフ点の観測点は観測天体から赤経方向に 60 分角ずらした方向に設定した。これらの skd ファイルを日立 32m 電波望遠鏡下の観測室内にある PC にファイルを送信する。これらのスケジュールファイルの実行は、観測は茨城大学内にある PC から遠隔操作でおこなった。

観測の終了後、自動で FFT 処理が行われる。その後オン点のデータをオフ点のデータで減算するベースラインフィッティングという補正法を用いる。これにより、天体の信号がない雑音部分を平たんにすることができる。このデータを gnuplot で表示させ、異常な検出がないかどうかを確認した。

第3章 結果

3.1 検出天体

472 天体を観測した結果、次の 5 天体の観測においてメタノールメーザ放射が検出された。検出されたピーク強度、ピーク速度、速度範囲は表 3.1 のとおりである。また、rms ノイズレベルは $1\sigma \sim 0.5$ Jy であった。

表 3.1: 検出天体

IRAS 天体名	略称	ピーク強度 [Jy]	ピーク速度 [km/s]	速度範囲 [km/s]
IRAS23139+5939	23139+59	4.65	-38.62	-42 $\sim$ -37
IRAS23116+6111	23116+61	165.33	-58.06	-62 $\sim$ -49
IRAS23103+6109	23103+61	2.42	-58.06	-62 $\sim$ -55
IRAS23123+6117	23123+6B	5.71	-58.06	-62 $\sim$ -55
IRAS23324+6045	23324+60	4.58	72.87	73

3.1.1 IRAS23139+5939

-42 km/s から -37 km/s で検出された。-39 km/s 付近の速度成分がもっとも強く検出された。スペクトルは図 3.1 である。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

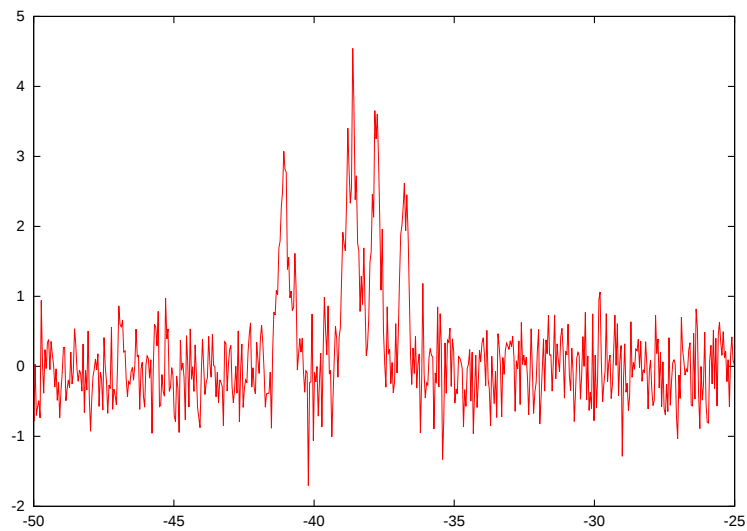


図 3.1: IRAS23139+5939 のスペクトル

3.1.2 IRAS23116+6111

強度の強い -62 km/s から -55 km/s の成分の他に、過去の観測でも指摘されている -53 km/s と -49 km/s 付近の小さなピークも検出された。 -58 km/s のピークがもっとも強く検出された。本観測では、さらに -50 km/s 付近に新しくピークを確認した。スペクトルは図 3.2 である。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

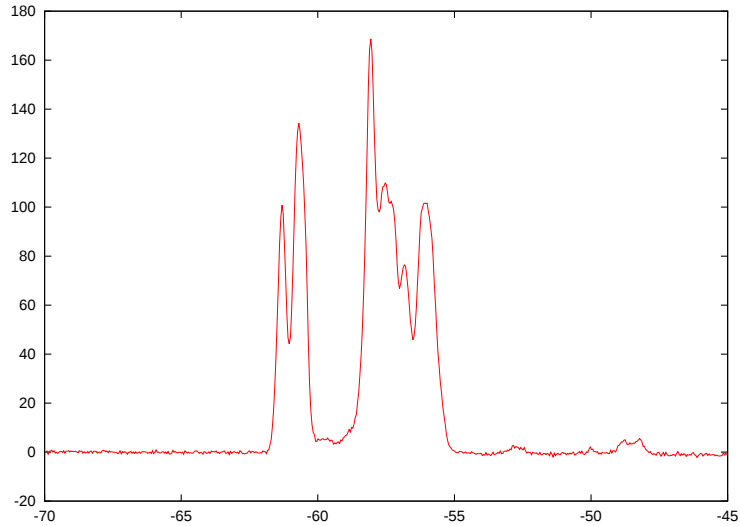


図 3.2: IRAS23116+6111 のスペクトル

3.1.3 IRAS23103+6109、IRAS23123+6117

いずれも -62 km/s から -55 km/s で検出されており、3.1.2 で述べた IRAS23116+6111 に酷似したスペクトルが得られた。IRAS23116+6111 との離角が非常に小さいため、空間的に分解ができず IRAS23116+6111 の放射が写りこんでしまったと考えられる。スペクトルは図 3.3 と図 3.4 である。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

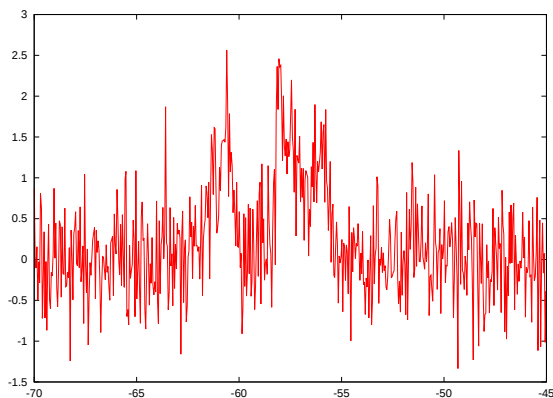


図 3.3: IRAS23103+6109 のスペクトル

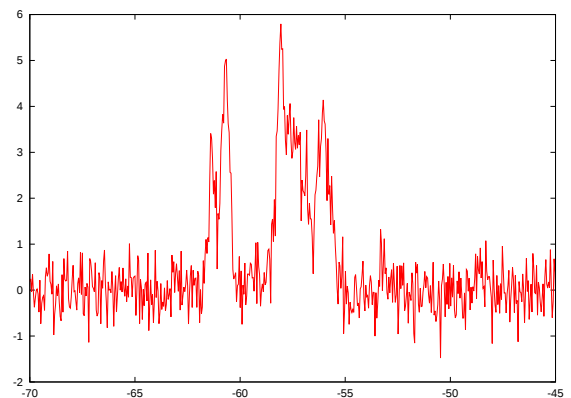


図 3.4: IRAS23123+6117 のスペクトル

3.1.4 IRAS23324+6045

基本的にペルセウス腕方向の天体は負の LSR 速度を持つこと、線幅が非常に細いことなどから、天体由来の信号とは考えにくい。望遠鏡の使用スケジュールの都合により再観測を行うことはできなかったが、この天体の検出はスプリアスだと考えられる。スペクトルは図 3.5 である。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

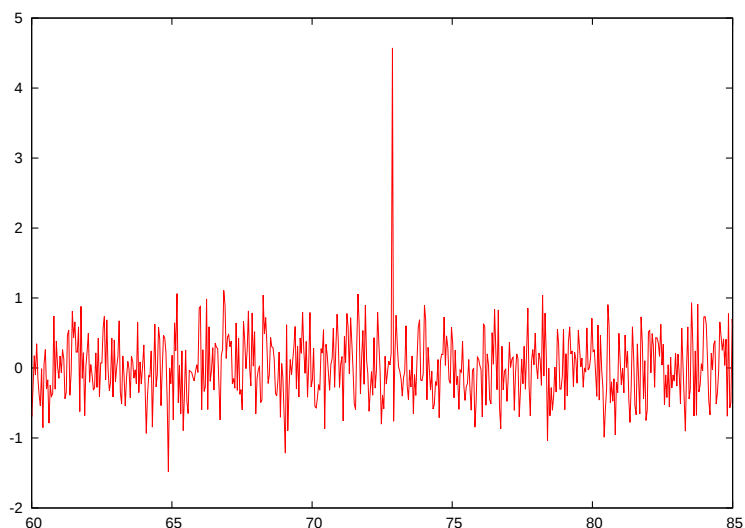


図 3.5: IRAS23324+6045 のスペクトル

3.2 うねりの発生

IRAS23211+5833、IRAS23215+5826、IRAS23218+5830 の 3 天体で、スペクトルにうねりが発生した。2 回の再観測を行ったが、いずれも同様の結果が得られた。スペクトルは図 3.6、図 3.7、図 3.8 である。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

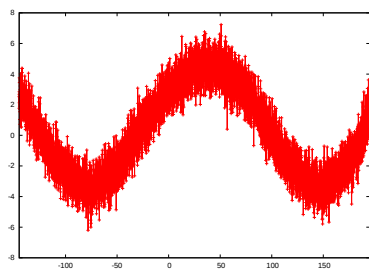


図 3.6: IRAS23211+5833

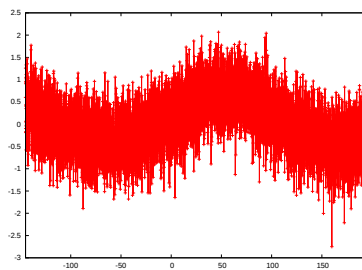


図 3.7: IRAS23215+5826

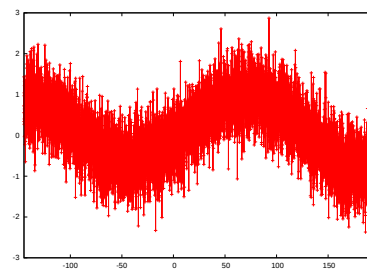


図 3.8: IRAS23218+5830

3.3 本観測で検出された天体

本観測では、5 点の IRAS 点源で検出がみられた。このうち強度が大きい天体の写りこみが 2 点で検出され、スプリアスが 1 点で検出された。新発見となる 6.7 GHz メタノールメーザ源はなく、観測された IRAS23116+6111 と IRAS23139+5939 はすでに観測例のある 2 天体であった。また、3 点でうねりが発生した。

第4章 考察

4.1 類似しているスペクトル

4.1.1 IRAS23103+6109、IRAS23123+6117とIRAS23116+6111の強度の比較

IRAS23116+6111 との離角が小さい2天体で、IRAS23116+6111 の写りこみがみられた。得られたスペクトル図を重ね、それぞれ図 4.1、図 4.2 とした。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。各ピークの強度比や、LSR 速度が明らかに一致していることがわかる。

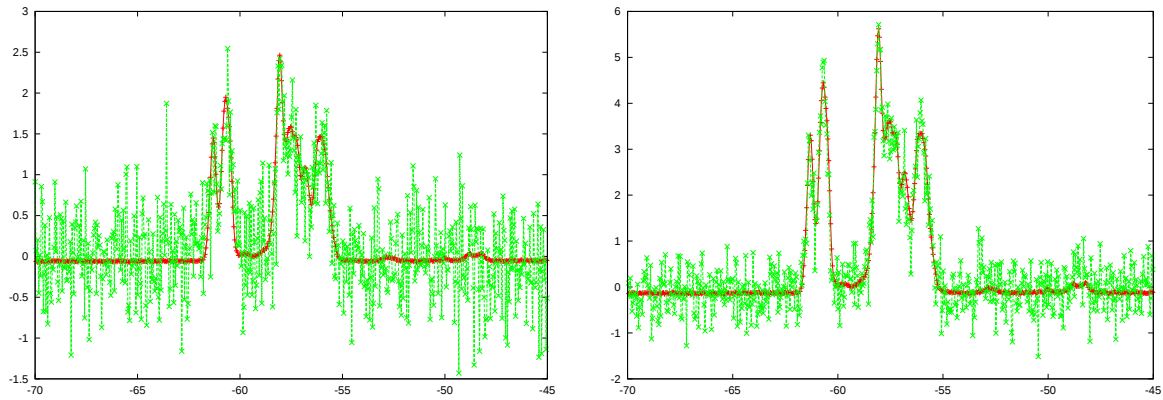


図 4.1: 23103+6109(緑) と 23116+6111(赤) 図 4.2: 23123+6117(緑) と 23116+6111(赤)

アンテナは1点だけを観測することはできず、ある程度の広がりをもって観測をおこなっている。アンテナの方向が天体の位置からずれると、その離角にしたがって検出強度は弱くなる。このアンテナ受信機の角度依存性のことをビームパターン (アンテナパターン) という。このビームパターンがガウシアンビームであるとする、離角が θ であるときのビームパターンは次の式で表すことができる。

$$P_n(\theta) = \exp\left(-4 \ln 2 \frac{\theta^2}{\theta_{\text{HPBW}}^2}\right) \quad (4.1)$$

ここで θ_{HPBW} はアンテナの半値全幅である。日立局 32m 電波望遠鏡では5分角である。天体の離角と、本観測で得られた強度比、ガウシアンビームを仮定したときに期待される強度比を表 4.1 にまとめた。

ガウシアンビームを仮定したときの IRAS23116+6111 に対する予想検出強度比に対して、実際に観測された強度比は大きい値であったことがわかる。

表 4.1: IRAS23116+6111 との離角と強度比

	離角	gaussian 仮定の強度比	検出強度	強度比
IRAS23116+6111	0 分角	100 %	165.33	100 %
IRAS23103+6109	9.5 分角	0.005 %	2.42	1.5 %
IRAS23123+6117	7.9 分角	0.1 %	5.71	3.5 %

4.1.2 サイドローブの可能性

4.1.1 のように、予想される強度よりも強く検出された原因としてサイドローブが考えられる。ビームパターンはガウシアンでは完全に表現されず、感度が最大となる方向を含んでいる主ビームの周囲に、感度の低い広がりであるサイドローブを持つ。栗橋 (2011) で行われた日立 32m 電波望遠鏡のビームパターン測定によると、6.7 GHz のビームパターンにはアンテナの EL に応じたサイドローブが確認されている [6]。

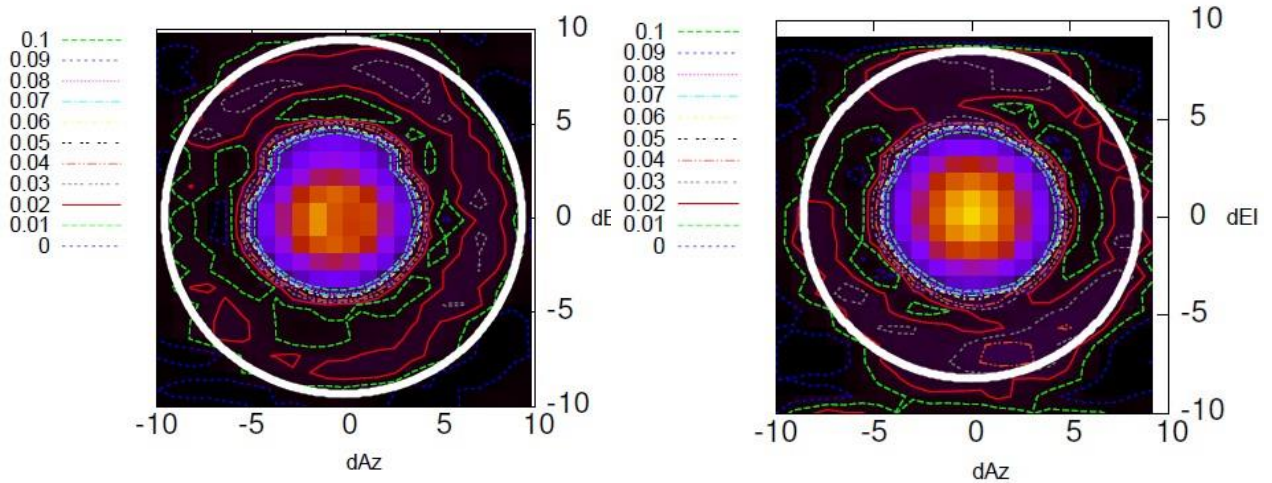


図 4.3: EL19.8° (左) と EL40.0° (右) のビームパターン。栗橋 (2011) より引用。

IRAS23103+6109(左) と IRAS23123+6117(右) 観測時の EL のビームパターンの図に、それぞれの IRAS23116+6111 との離角を半径とした円を重ね、図 4.3 に示した。IRAS23103+6109(左) では 1-2 % のサイドローブに一致し、IRAS23123+6117(右) では 3-4 % のサイドローブに一致していることがわかる。これは実際に観測された強度比を満たしており、本観測で強い強度が得られた原因としてサイドローブの影響の可能性があると見える。

4.2 過去観測との比較

4.2.1 IRAS23139+5939 の過去観測との比較

IRAS23139+5939 は、Szymczak et al.(2000)[5] で発見された天体である。2004 年と 2005 年におこなわれた山口大学の観測 [7] でも検出されており、それぞれのスペクトルを比較する。いずれの図も、縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] である。

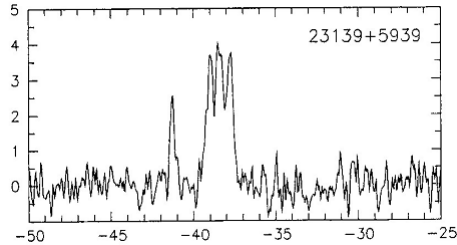


図 4.4: IRAS23139+5939 Szymczak et al.2000 の観測。

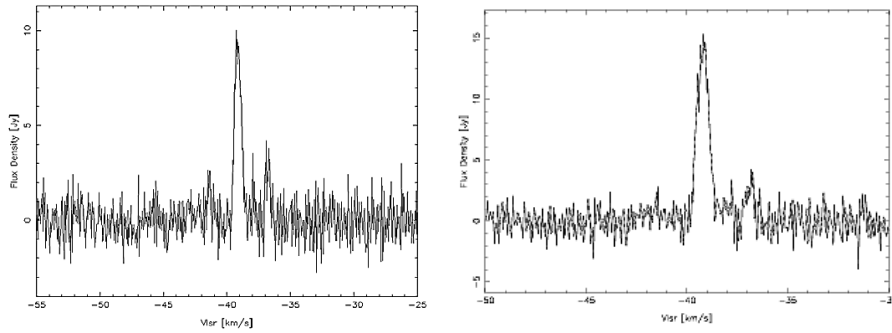


図 4.5: IRAS23139+5939 山口大学の観測。2004(左)、2005(右)。

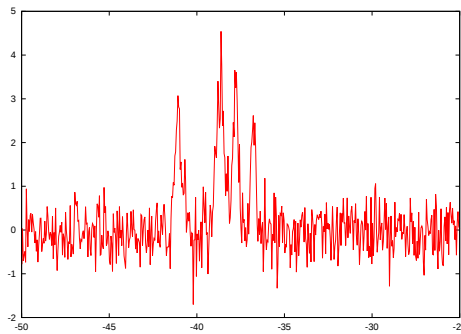


図 4.6: IRAS23139+5939 本研究の観測。2014。

いずれの観測でも -39 km/s 付近のピークが強く検出されているが、その強度は $4\text{--}15 \text{ Jy}$ の間で変動が起きている。 -42 km/s のピークは、山口大学の観測の検出限界が $\sim 4 \text{ Jy}$ であったことから、2004 年 2005 年の山口大学の観測では検出ができなかった可能性がある。2000 年と 2014 年の

観測では、強度に大きな変化はみられない。2000 年の観測で検出された $-37.5 \sim -40$ km/s の 3 つのピークは、本観測で中心の 1 つのピークが大幅に弱まっていることが判明した。また、2004 年 2005 年に新しく検出された -37 km/s のピークは強度を保ったままである。

4.2.2 IRAS23116+6111 の過去観測との比較

IRAS23116+6111 は、Menten(1991)[8] で発見された天体である。その後、Szymczak et al.(2000)[5]、2004 年と 2005 年におこなわれた山口大学の観測 [7] でも検出されており、それぞれのスペクトルを比較する。いずれの図も、縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] である。

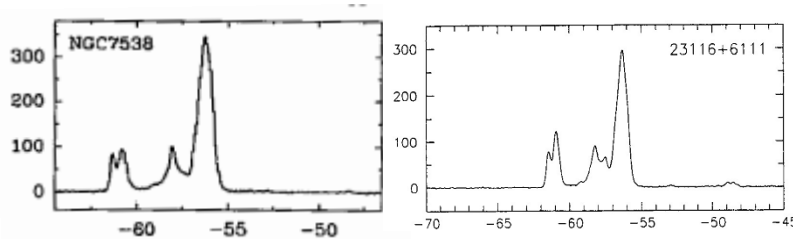


図 4.7: IRAS23116+6111 Menten1991(左) の観測と Szymczak et al.2000(右) の観測。

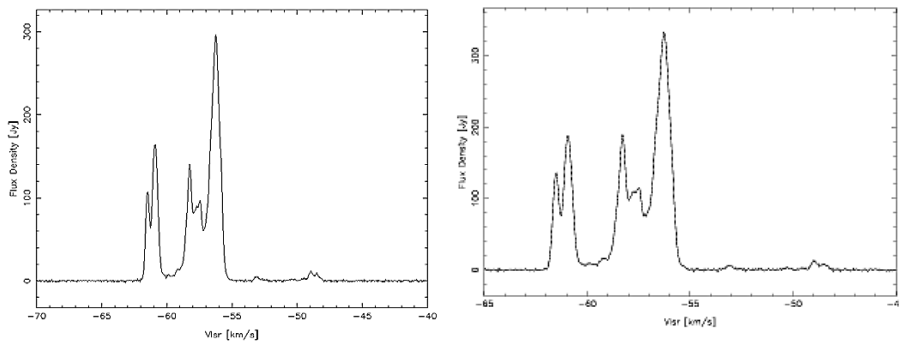


図 4.8: IRAS23116+6111 山口大学の観測。2004(左)、2005(右)。

Menten(1991) ではピークのフラックス密度は 346 Jy、Szymczak et al.(2000) では 296 Jy、山口大学 (2005) では 256.3 Jy と徐々に弱くなっていた -56 km/s 付近のピークが、本観測では 100 Jy まで弱まっている。 -58 km/s 付近のピークはいくつかの成分が重なった状態で強度変動がみられており、非常に複雑な形をしている。また、 $-62 \sim -60$ km/s の 2 つのピークは Menten(1991) から徐々に強度が増していたが、本観測では弱まっている。

Szymczak et al.(2000) で指摘されている -53 km/s と -49 km/s の小さなピークは、山口大学の観測に引き続き、本観測でも確認することができた。さらに -50 km/s にも、新たにピークが確認できた。

4.3 うねりが発生した原因

うねりがみられた 3 天体は互いに非常に近いところに存在しており、スペクトルの形状も似ていることから、いずれも同じ電波源の影響を受けたと考えられる。これらの天体の方向には強い

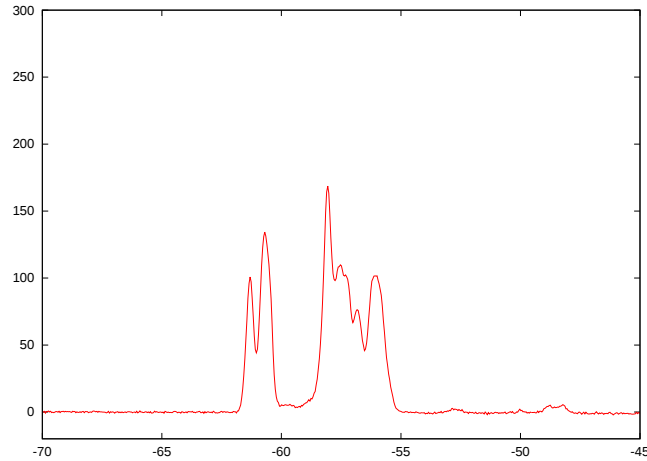


図 4.9: IRAS23116+6111 本研究の観測。2014。

電波源として有名なカシオペア座 A (Cas A) という超新星残骸があり、この天体からの連続波の影響を受けた可能性がある。

4.4 非検出天体

原始星のもとになる高密度の分子雲コアは星間微粒子を暖めるため、暖められた微粒子から赤外線放射がみられる。100 μm の放射が強く検出された天体は、分子雲コアから大質量星の形成に至る可能性がある。そのため、本観測で非検出であった 464 天体のうち、赤外線天文衛星 IRAS の観測で「波長 100 μm の放射が 1000 Jy 以上で検出されている」天体について過去の観測を調査した。

該当する天体は、7 天体あり、そのうち過去に観測例があったのは IRAS22551+6221 のみであった [9][10]。IRAS22551+6221 はこれ以降の観測例はなく、離角の小さい IRAS22543+6145 (CepA) のスペクトルの形状に酷似している。そのため、観測例は IRAS22543+6145 (CepA) のサイドローブであった可能性が高く、IRAS22551+6221 からのメタノールメーザの検出例はなかったと考えられる。

4.5 IRAS フラックスの特徴

IRAS 観測波長の 12 μm 、25 μm 、60 μm 、100 μm の強度比の特徴をみるため、検出天体、非検出天体、うねりのみえた天体、スプリアスにわけてプロットした。各波長のフラックスを f_{12} 、 f_{25} 、 f_{60} 、 f_{100} のように表している。図 4.10 と図 4.11 をみると、今回検出された天体のうち一つは、 f_{100} がとびぬけて大きい。しかし、その他の検出天体は、非検出天体に比べて有意な差が見られなかった。また、検出された天体はいずれも $f_{12} < f_{25} < f_{60}$ の関係を満たしている。これは、原始星や星周円盤が見られる星形成初期の段階を示しており、今回観測された天体では原始星が分子雲深くに埋もれていると考えられる。

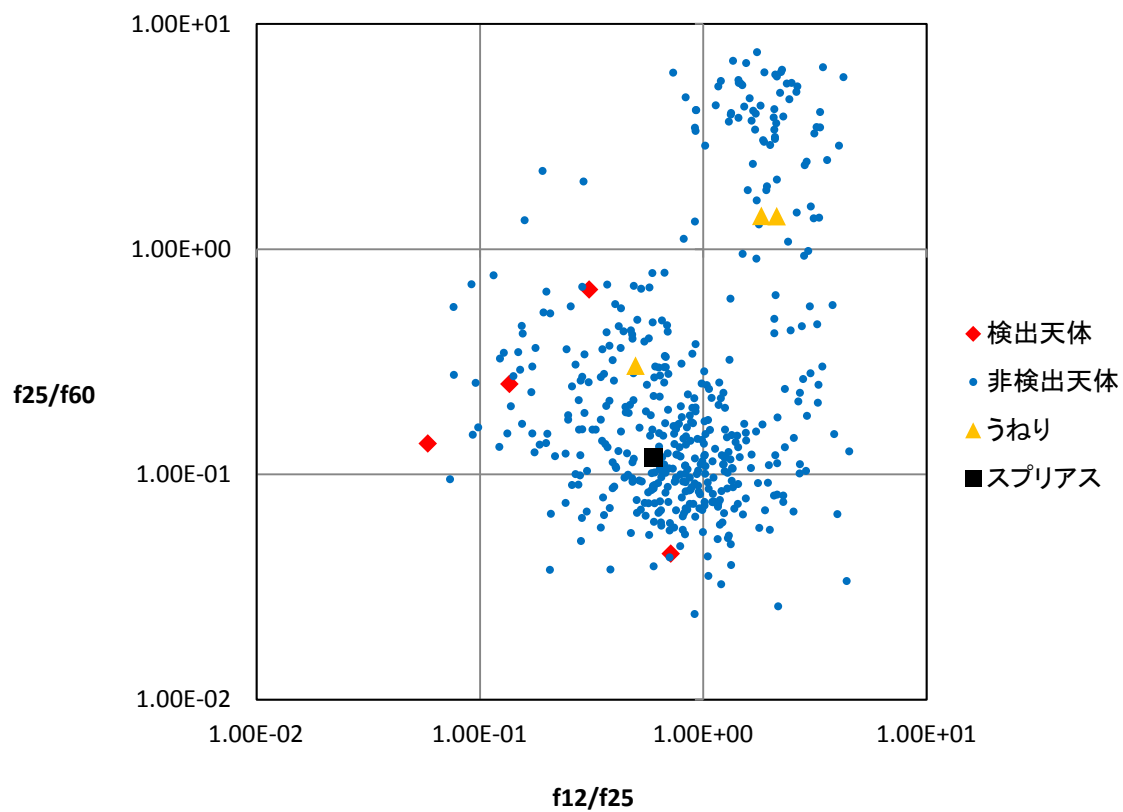


図 4.10: f_{12}/f_{25} と f_{25}/f_{60}

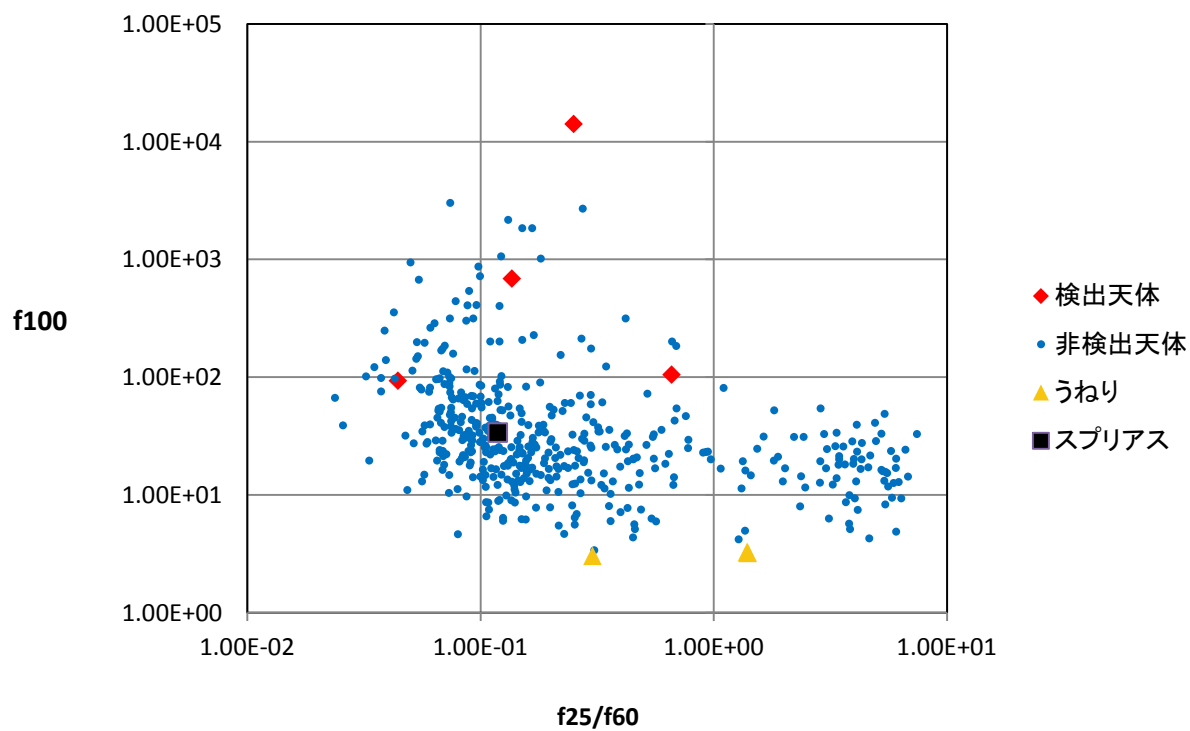


図 4.11: f_{25}/f_{60} と f_{100}

第5章 まとめ

本研究ではペルセウス腕方向に位置する IRAS 点源に対する 6.7 GHz メタノールメーザの探査をおこなった。472 天体を観測した結果、2 天体からメタノールメーザ放射を検出した。これらの天体はすでに観測例があったが、以前の観測時とくらべて強度の変動が見受けられる。また、超新星残骸の方向では連続波の影響を受けたことにより、ベースラインのうねりが確認された。過去の観測例を調査したが、本観測で非検出であった天体は今までも検出されたことはなく、急な強度変動がある天体は見受けられない。検出天体と非検出天体は IRAS フラックスで特徴的な違いがみられないため、大質量星の形成領域を探索するには今回のように長期的な観測が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の協力を頂きましたことに感謝の意を表します。指導教員の百瀬宗武教授には物理学の基礎から熱心にご指導いただき大変お世話になりました。観測や解析、発表などの場面では米倉覚則准教授、研究員の古川尚子さんに多くの助言をいただきました。ご指導いただいた皆様、また電波天文観測研究室の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 赤羽賢司, 海部宣男, 田原博人 1988, 宇宙電波天文学, 共立出版
- [2] Barrett, A. H., Schwartz, P. R., Waters, J. W. 1971, ApJ, 168, L101
- [3] Ellingsen, S. P. 2005, MNRAS, 359, 1498
- [4] Walsh, A. J., Burton, M. G., Hyland, A. R., Robinson, G. 1998, MNRAS, 301, 640
- [5] Szymczak, M., Hrynek, G., Kus, A. J. 2000, A & A, 143, 269
- [6] 栗橋潤 2011, 平成 23 年度茨城大学修士論文
- [7] 澤田昭浩 2005, 平成 17 年度山口大学修士論文
- [8] Menten, K. M. 1991, ApJ, 380, L75
- [9] MacLead, G. C., van der Walt, D. J., North, A., Gaylard, M. J., Galt, J. A., Moriarty-Schieven, G. H. 1998, AJ, 116, 2936
- [10] Slysh, V. I., Val' t's, I. E., Kalenskii, S. V., Voronkov, M. A., Palagi, F., Tofani, G., & Catarzi, M. 1999, A & AS, 134, 115